

Prise d'eau de l'usine des Roberts, sur la Romanche, aux environs de Grenoble. — *Phot. Piccardy.*

Cette prise d'eau a été aménagée en 1913. A droite, le barrage en maçonnerie flanqué de vannes mobiles. Sur le même plan, à gauche, vannes permettant d'isoler le bassin de décantation. Ce bassin, long de 150 mètres, est divisé en plusieurs compartiments munis de vannes de chasse réparties sur son pourtour, qu'on lève pour envoyer au torrent le limon qui s'est déposé. Une grille, noyée le long de la passerelle, arrête les feuilles et les branches. A l'extrême-gauche, se dessine l'entrée du tunnel, long d'un kilomètre, aboutissant à la chambre de charge et aux conduites forcées de l'usine de la *Compagnie universelle d'acétylène et d'électrometallurgie*, équipée sous une chute brute d'environ 40 mètres pour une puissance de 12.000 CV, et qui fabrique du carbure de calcium et divers ferro-alliages. En arrière, le village de Livet ; au dernier plan, le glacier des Grandes Rousses.

LA HOUILLE BLANCHE

par F. HONORÉ

LA PREMIÈRE TURBINE. — LES TURBINES MODERNES. — L'AMÉNAGEMENT D'UNE CHUTE.
LE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

L'ÉLECTRIFICATION DES CHEMINS DE FER. — L'ÉLECTROCHIMIE ET L'ÉLECTROMÉTALLURGIE. — LES CAPRICES
DES TORRENTS. — HOUILLE BLANCHE ET HOUILLE NOIRE.



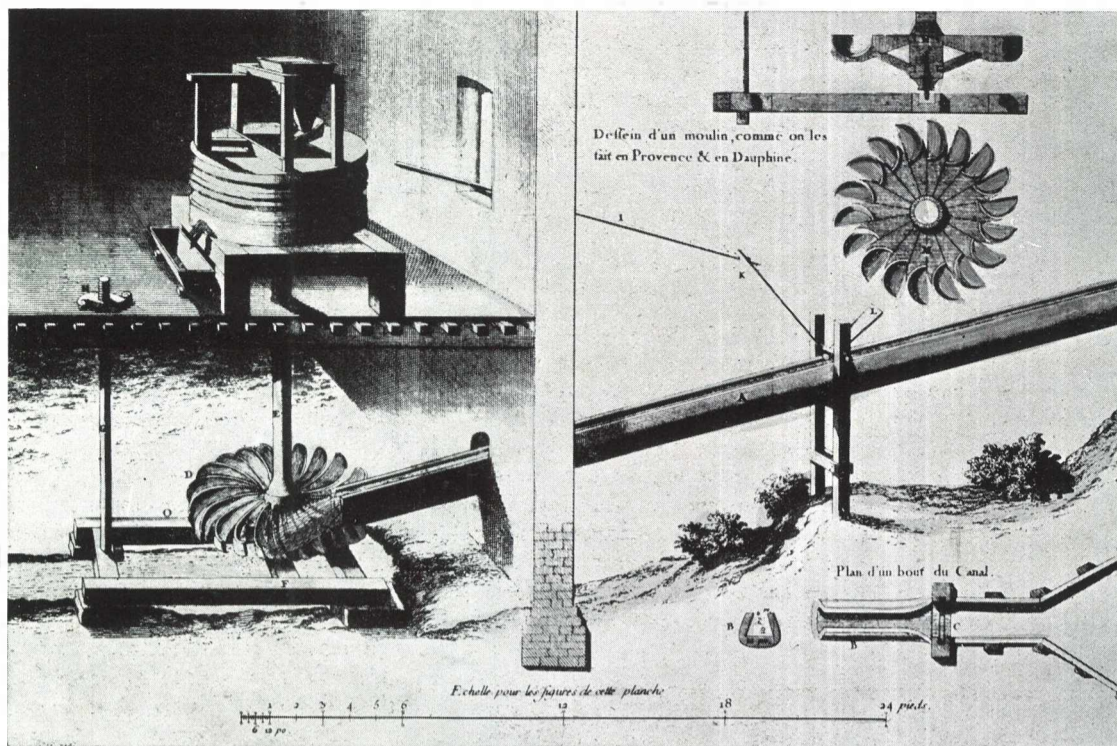
UNE GRANDE INVENTION FRANÇAISE

L'Exposition internationale de la Houille blanche, qui s'est ouverte à Grenoble le 21 mai, est, comme nous le disions il y a quinze jours, la première du genre. Elle consacre l'essor d'une des plus merveilleuses industries modernes, et nulle ville au monde n'était aussi qualifiée que la capitale du Dauphiné pour célébrer cette apothéose du génie français. Car l'industrie de la houille blanche est une œuvre essentiellement française.

Alors que trop souvent les découvertes de nos savants et les travaux de nos inventeurs vont d'abord enrichir l'étranger, l'utilisation de la goutte d'eau des montagnes pour créer de l'énergie, de la chaleur ou de la lumière fut conçue, réalisée, et portée au plus haut point de perfection dans les Alpes du Dauphiné et de la Savoie. C'est un Français, Benoît Fourneyron, dont le nom est à peine cité dans les ouvrages techniques, qui, en 1827, construit et installe cette première turbine hydraulique dont on cherchait la formule depuis plusieurs siècles ; c'est le même qui, en 1835, invente la conduite forcée permettant d'envoyer à sa turbine une colonne d'eau de 100 mètres de hauteur. C'est Aristide Bergès qui, dès 1869, a l'audace d'aménager une chute de 200 mètres ; c'est Fontaine qui, en 1872, constate la réversibilité de la dynamo ; c'est Marcel Deprez qui, en 1880, démontre par le calcul,

puis par l'expérience, que cette réversibilité s'accommode des grandes distances et que le courant, né au pied du torrent, peut couler le long d'un fil de fer pour aller à quelques lieues, plus tard à des centaines de kilomètres, animer une autre dynamo qu'il suffit d'accrocher à ce fil pour la voir tourner au même rythme que sa sœur perdue dans la montagne. C'est Sainte-Claire-Deville qui, en 1854, obtient le premier lingot d'aluminium par des procédés coûteux auxquels il entrevoit la possibilité de substituer l'électrolyse, le jour où l'on saura produire le courant électrique dans des conditions nouvelles. C'est Henri Moissan qui rénove, avec le four électrique, grand consommateur de houille blanche, la technique de la métallurgie et des alliages ; c'est Héroult qui, résolvant le problème posé par Sainte-Claire-Deville, trouve le moyen d'adapter ce four à une préparation économique de l'aluminium dont le prix tombe subitement de 45 à 19, puis à 3 francs le kilo. Ces précurseurs méritent d'autant plus notre admiration qu'il leur fallut, pour triompher, une ténacité et un esprit de suite qu'une légende fautive refuse au génie français. Plusieurs se heurtèrent non pas seulement au scepticisme de la foule, mais surtout à l'opposition agressive de la presque généralité des hommes de science et à une défiance telle qu'on les considéra parfois comme des fous dangereux.

Le Parisien qui parcourt aujourd'hui les Alpes accorde à la houille blanche un regard distrait. Il remarque les conduites forcées qui, selon l'expression



Moulin avec roue horizontale à palettes courbes, comme on en voyait encore, il y a quelques années, dans certaines parties de la Provence.

(Extrait du *Traité d'architecture hydraulique*, de Bélidor, publié en 1837.)

chère aux défenseurs des sites, « déshonorent » le paysage ; il apprécie sans trop y penser, tant la chose est devenue banale, l'ampoule électrique qui, dans les plus modestes auberges, a remplacé la chandelle. Parfois, les hasards de l'étape le font rouler, après le coucher du soleil, sur ces routes de la Haute-Maurienne ou du Graisivaudan, semées d'usines qui illuminent les vallées silencieuses, jetant des taches de lumière aussi crues que celle des murs de pierre blanche où se heurte le soleil des montagnes ; plus souvent, formant un barrage de brume diaphane qu'animent comme des fantômes les silhouettes des arbres épargnés par l'ingénieur. Ce voyageur admire vaguement, amusé plutôt si, à travers la lueur aveuglante que jette une coulée de carbure, il aperçoit un Chinois préposé à la garde du feu, car l'industrie de la houille blanche elle-même a dû recourir à la main-d'œuvre étrangère. La T. S. F. et l'aviation l'enthousiasment ; mais l'industrie de la houille blanche lui apparaît comme une réalisation assez simple.

Il n'en est guère cependant de plus complexe. La T. S. F. et l'aviation ont à compter avec les forces naturelles qui jouent dans l'atmosphère ; mais elles ont à résoudre des problèmes de mécanique ou d'électricité assez circonscrits. L'industrie de la houille blanche est l'esclave de la nature et il faut, avant tout, qu'elle l'asservisse. Elle doit d'abord, sans crainte de se laisser surprendre, domestiquer la puissance la plus forte, la plus invincible que nous connaissons sur la planète, infiniment plus redoutable que la puissance du feu : la puissance de l'eau. Quand elle a réussi à capter cette puissance, à éviter le danger de ses emportements subits, à s'affranchir du caprice des saisons, elle demande des appareils capables de recevoir, sans un fléchissement, les pressions formidables qui concentrent dans un modeste tuyau l'énergie d'un torrent.

Alors commence le problème électrique. Il s'agit d'associer dans un même rythme la turbine qui pousse un flot désordonné et la dynamo qui tournera avec la précision d'un chronomètre. Le courant obtenu, il faut le transmettre par un fil capable de le porter au loin sans perte sensible et sans que le prix du transport devienne excessif, sans danger aussi pour le passant qui, à la moindre rupture, peut tomber foudroyé. L'utilisation de ce courant présente de nouvelles difficultés. On doit abriter l'énergie de 10.000 ou de 100.000 chevaux derrière un tableau orné de quelques manettes qu'il suffit de tourner pour distribuer la lumière dans une grande cité ou dans un essaim de hameaux ; pour allumer des fours où l'eau nous donne la plus haute température que l'homme ait encore connue ; pour faire circuler les tramways d'une région, les trains de tout un réseau ; pour actionner, dans mille chalets épars sur la montagne, le tour familial qui arrondit les pipes ou qui appelle un rayon de lumière sur les facettes du diamant ; ou encore, en abaissant ce courant formidable presque à la tension de celui qui anime une lampe de poche, pour dissocier les corps à froid comme on les dissociait jadis par la chaleur ; pour voir naître dans une cuve de liquide des plaques de métal à un degré de pureté qu'ignorent les produits les plus parfaits de l'ancienne métallurgie.

Cette chaîne est prodigieusement intéressante ; on peut, sans fatigue, en examiner un à un tous les anneaux. Grâce à nos dessins, et à nos photographies sélectionnées parmi des centaines d'autres prises dans les usines françaises, j'espère faire comprendre de tous ce qu'est la « houille blanche ». Cela me permettra de préciser ce qu'il est raisonnable d'en attendre, en évitant les exagérations dont ne se gardent point toujours les auteurs ayant abordé la matière. S'il m'arrive de trop insister, les lecteurs voudront bien m'excuser en pensant que je suis dominé par le désir de leur rendre plus attrayante l'Exposition de Grenoble en groupant ici une suite de documents qu'ils ne trouveront rassemblés dans aucun ouvrage.

LA PREMIÈRE TURBINE

De même que tout essor lui semblait interdit avant la mise au point de la dynamo et des lignes de transport, l'industrie de la houille blanche ne pouvait naître avant la turbine. Et la réalisation de ce moteur incomparable fut très tardive.

On ignore l'origine de la roue des moulins comme on ignore l'origine d'appareils qui nous paraissent aujourd'hui fort simples, mais dont on éprouve une certaine peine à se figurer l'invention par les hommes d'une époque qui se rapproche peut-être du stade préhistorique. Il est vraisemblable que l'idée d'utiliser la force de l'eau date de loin ; mais les renseignements qui nous sont parvenus à cet égard ne remontent pas au delà du deuxième siècle avant notre ère. A cette époque, il existait déjà des hydrauliciens remarquables. On connaissait le siphon et la pompe aspirante et foulante ; la clepsydre et la fontaine de Héron d'Alexandrie sont célèbres. Ce dernier eut pour professeur un certain Ctésibius dont l'épouse, Thais, fut elle-même, au dire de Pline, un ingénieur distingué.

Vitruve, qui nous a laissé la description d'un taxi en usage à Rome, nous décrit la roue de moulin utilisée de son temps, identique à celle qui, jadis, chantait sur toutes nos rivières. Au cours des âges, cette roue subit des modifications nombreuses. L'eau agissait directement par sa vitesse sur les roues à palettes, et par son poids sur les roues à augets. Quelquefois, tombant dans un cylindre, elle coulait à travers les tubes rayonnant du centre d'une roue horizontale et s'échappait suivant la tangente, provoquant « par réaction » le mouvement de la roue dans le sens opposé à celui de la marche de la veine liquide.

Tous ces appareils présentaient, à peu de chose près, les mêmes défauts, dont deux principaux :

La roue, ne pouvant tourner dans l'eau, se trouve paralysée dès que le niveau s'élève en aval. Aussi, pour la rendre indépendante des crues, on sacrifiait souvent une partie importante de la hauteur de chute. D'autre part, ces roues, en augmentant de diamètre, atteignent vite un volume et un poids tels que leur emploi restait limité aux petites chutes. La plus haute chute utilisée fut sans doute une chute de 14 mètres, située en Angleterre, pour laquelle on avait construit une roue de 19 mètres de diamètre.

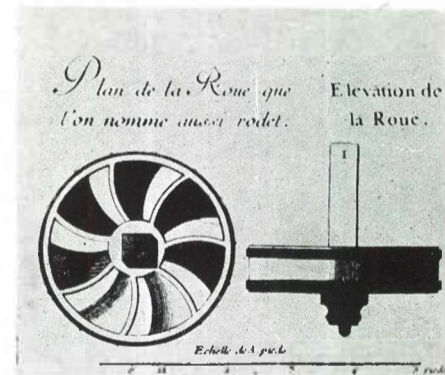
Pour remédier à ces inconvénients, on essaya les roues horizontales « usitées en Provence et en Dauphiné », comme celle que représente une de nos gravures, puis le *rodet* à palettes courbes du fameux moulin du Basacle, à Toulouse, cité par Rabelais dans une histoire où l'on est assez surpris de voir intervenir l'hydraulique. Ces divers appareils avaient un rendement très faible : 15 à 25 % pour les roues à palettes ; encore moins pour les roues à axe vertical ou les roues à augets. Jamais, avec de tels moteurs, on n'aurait pu utiliser avantageusement les torrents des montagnes qui se caractérisent par un faible débit avec des pentes pouvant fournir de grandes hauteurs de chute.

En 1823, la Société d'encouragement pour l'industrie nationale proposa un prix de 6.000 francs — somme énorme pour l'époque — devant être décerné à celui qui parviendrait à appliquer en grand, d'une manière satisfaisante, dans les usines et manufactures, les turbines hydrauliques à palettes courbes de Bélidor.

Bélidor, né à Paris en 1793, professeur à l'École d'artillerie de la Fère, a laissé plusieurs ouvrages remarquables dont le plus célèbre, publié en 1837, a pour titre : *Architecture hydraulique ou l'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie*. Avec de nombreuses figures, l'auteur expose la science hydraulique de l'époque ; il préconise les roues à palettes courbes, mais il ne donne point la théorie de la turbine. Il l'a peut-être entrevue, il n'a point su la préciser. Il rêvait de perfectionner les roues du moulin du Basacle qui présentaient une disposition très remarquable, inspirée, semble-t-il, d'une théorie signalée par Borda à l'Académie des sciences en 1767.

Benoît Fourneyron s'attaqua au problème. Ce jeune ingénieur, né à Saint-Etienne en 1802, comprit l'erreur fondamentale de ses prédécesseurs.

Les moteurs construits jusqu'alors étaient à admission partielle. Dans un instant donné, l'eau n'agit que sur une partie souvent infime de leur surface ;



Rodet à palettes courbes des anciens moulins du Basacle, à Toulouse (d'après Bélidor).

jusqu'au moment de son expulsion, elle séjourne dans leur « capacité » un nombre de secondes souvent important et durant lequel son action est très réduite. Fourneyron se rendit compte le premier qu'il fallait *supprimer dans la roue nouvelle à créer tout espace, toute capacité inutile ou dans lesquels l'eau n'exercerait pas constamment une action concourant à la réalisation de l'effet à produire* ; qu'il fallait, en outre, réduire au minimum possible le temps de séjour de l'eau dans la roue et l'y amener sans aucune perte de chute.

Appliquant cette théorie, le novateur imagine un appareil comprenant deux roues qui s'emboîtent l'une dans l'autre, comme deux anneaux : le distributeur et le récepteur. Le distributeur, placé intérieurement, consiste en une couronne fixe percée de créneaux. Il est encerclé par une couronne mobile divisée en secteurs par des aubes analogues à celles qui forment les créneaux du distributeur, mais orientées de façon différente. L'eau est canalisée sur le distributeur dont elle ne peut sortir qu'en passant par les créneaux. Ceux-ci la divisent en lames, et chaque lame va s'épanouir sur une aube de la roue mobile qu'elle entraîne. Cette turbine est dite *centrifuge*. L'eau s'écoulant du centre à la périphérie. Pour des raisons techniques que je ne saurais développer, on l'appelle aussi turbine à *réaction*.

« Par cette combinaison, écrit Fourneyron, on dépouille l'eau de toute son énergie dans un temps extrêmement court et le long d'un parcours minimum, ne lui laissant à la sortie que la vitesse strictement nécessaire à son évacuation. D'autre part, la pression qu'on obtient empêche l'eau d'aval de s'introduire dans les cavités de la roue, même complètement immergée. La turbine peut donc tourner noyée et donner, aux frottements près, la même quantité relative d'effet utile, qu'elle soit plongée dans l'air ou dans l'eau.

» L'appareil présente un avantage encore plus grand : celui de pouvoir s'adapter à toutes les hauteurs de chute. Alors qu'on ne pouvait songer à équiper avec une roue une chute supérieure à une quinzaine de mètres, les dimensions du nouveau moteur varient, *pour une même puissance*, en raison *inverse* de la hauteur de chute. »

Fourneyron a donc conçu et réalisé la théorie de la turbine à peu près telle qu'on l'enseigne aujourd'hui, théorie dont l'esprit général est le suivant : l'appareil doit recevoir l'eau *sans choc* et la rendre avec le minimum de vitesse. Pour utiliser toute la force vive du liquide, il est bon de le diviser en lames suffisamment minces pour que le plus grand nombre des molécules vienne agir sur les parois des aubes.

Comme le faisaient observer, il y a quelques années, les descendants de l'inventeur, il y a moins de différence entre les turbines de Fourneyron et les turbines de 5.000 chevaux des chutes du Niagara (on construit aujourd'hui des turbines de 20.000 chevaux) qu'entre elles et tous les moteurs qui les avaient précédées.

C'est en 1827 que la première turbine fonctionna à Pont-sur-l'Ognon (Haute-Saône). Sous une chute de 1 m. 40, elle fournissait une puissance de six chevaux et un rendement de 80 %. D'autres turbines donnèrent d'aussi bons résultats et, dans sa séance du 24 décembre 1833, c'est-à-dire après six années de contrôle, la Société d'encouragement décerna son grand prix à l'ingénieur de Saint-Etienne.

Deux ans plus tard, le jeune lauréat se risque à installer la première turbine de haute chute (108 mètres) pour les filatures du baron d'Eichtal, à Saint-Blaise, en Forêt Noire. L'équipement nécessitait une conduite forcée de quatre à cinq cents mètres de longueur, capable de supporter à la base une pression de 11 atmosphères. A cette époque, l'acier était inconnu ; on ne pouvait utiliser que des tuyaux en fonte. Les ingénieurs auxquels M. d'Eichtal soumit les calculs de Fourneyron déclaraient inadmissibles les épaisseurs minimales prévues pour ces tuyaux et en proposaient d'autres qui comportaient une dépense rendant le projet inexécutable. Fourneyron prouva, par des essais à la presse hydraulique, qu'il avait raison ; M. d'Eichtal s'inclina et il économisa cinquante tonnes de fonte.

« On réussit, écrit Fourneyron, à recueillir au pied de cette chute de l'eau animée d'une vitesse de plus de 41 lieues à l'heure, à la faire entrer sans choc dans un récepteur d'où elle devait sortir sans vitesse et à la dépouiller ainsi de toute la force possible pendant la durée de son passage, qui n'est que de 1/40^e de seconde.

» Une petite roue de la grandeur des ailes d'un chapeau ordinaire (316 mm de diamètre), d'une hauteur égale à six fois l'épaisseur d'une pièce de cinq francs et d'un poids de 17 kilos, suffisait pour recevoir et transmettre — ce qui, d'abord, paraissait impossible, ce qui, depuis, semble tout simple — une puissance réelle de 60 chevaux. »

Le rendement dépassait 80 %. Dans la séance de l'Académie des sciences du 27 novembre 1837, Arago déclarait : « La turbine de M. Fourneyron a fait en Allemagne une vive sensation. La Russie, l'Ecosse paraissent vouloir profiter de cette invention. Puisse la France entrer elle-même

largement dans une voie qui promet de si utiles résultats à l'industrie. »

L'usage de la turbine se développa assez lentement dans les minoteries et dans les autres usines. En France, on l'adopta dans les papeteries de la région de l'Isère. De divers côtés, on chercha à perfectionner la formule de Fourneyron. Aux Etats-Unis, Francis et Pelton imaginèrent deux types très différents qui sont restés classiques.

Mais il fallut trente ans pour voir poindre l'aube de la « houille blanche ».

LES DÉBUTS DE LA HOUILLE BLANCHE

Il y a quelques années, une polémique s'engagea entre diverses personnalités dauphinoises sur la question de savoir à qui revient le mérite d'avoir le premier aménagé, en France, une haute chute de montagne. Les adversaires sont restés sur leurs positions et l'opinion régionale est encore partagée. Ce point d'histoire n'a qu'une importance anecdotique. Etranger au pays, exempt de tout parti pris, je me suis cru mieux préparé que d'autres à tenter de l'éclaircir. J'ai rencontré beaucoup d'affirmations de très bonne foi, sans doute, mais ne constituant pas des preuves ; j'ai été surpris de voir des industriels instruits ignorer la priorité de Fourneyron qui, d'après eux, « aurait réalisé des expériences grosses de conséquences pour l'avenir, sans doute, mais qui ne dépassèrent guère le domaine scientifique » — j'ai constaté enfin

qu'à des réalisations de date certaine on oppose parfois une priorité d'idée difficile à établir et, en tout état de cause, peu pertinente. Finalement, des documents soumis à mon examen, je crois pouvoir conclure en faveur d'Aristide Bergès.

Sorti de l'Ecole centrale, le jeune Bergès avait apporté divers perfectionnements à l'industrie de la pâte de bois, guidé par son père qui exploitait une fabrique de papier à L'Orps, sur les bords du Salat, dans une des plus jolies vallées de l'Ariège. Attaché un instant comme ingénieur au Crédit mobilier de Paris, il avait inventé une pilonneuse mécanique qui servit pour établir l'asphaltage sous l'Arc de Triomphe de l'Etoile.

En 1866, alors âgé de 23 ans, il vient en Dauphiné pour diriger l'installation de machines vendues par lui. En parcourant les environs de Grenoble, il remarque la facilité que présentent les cours d'eau de la région pour aménager des chutes que l'on pourrait rendre puissantes, malgré leur faible débit,

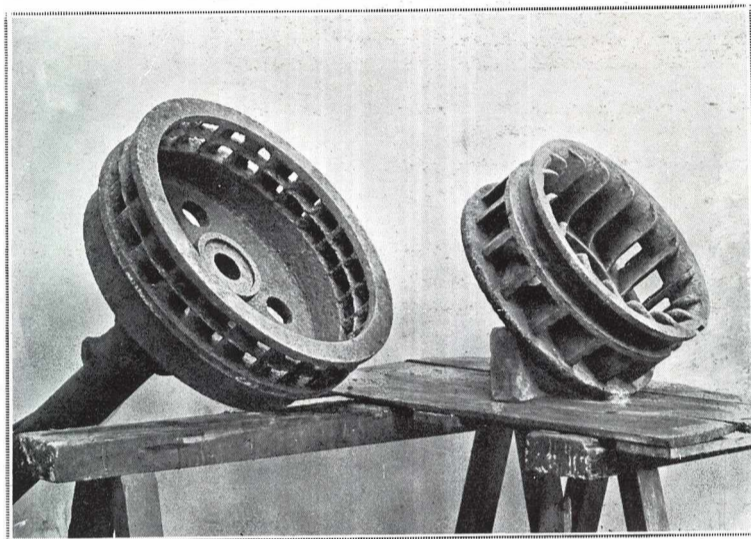
à condition d'en « exagérer » la hauteur. Il décide de créer une petite râperie de bois à Lancey, en déviant, par un canal horizontal de 600 mètres de longueur, un ruisseau encaissé dans une gorge très rapide. On doit obtenir à l'usine une différence de niveau de 200 mètres, soit une pression de 20 atmosphères et une puissance motrice de 1.000 chevaux. Les travaux, commencés en avril 1869, sont achevés le 10 octobre suivant. C'était la première fois qu'on imposait pareille charge à des conduites et qu'on réalisait une puissance aussi élevée avec un débit très faible. Les ingénieurs avaient déclaré la chose irréalisable. Aucun tuyau, disaient-ils, à moins d'atteindre des épaisseurs énormes et, par conséquent, des prix prohibitifs, ne pourrait supporter de tels efforts ; aucune turbine ne résisterait. Emue par ces affirmations, la population avait fini par considérer l'expérience comme dangereuse pour la sécurité de la vallée. Le succès imposa silence aux détracteurs et, treize ans plus tard, en 1882, Bergès portait sa chute à 500 mètres de hauteur.

Cet homme audacieux comprit la richesse que représentait pour la France l'exploitation des ressources hydrauliques que, dès 1892, il évaluait, comme on les évalue encore aujourd'hui, à 10 millions de chevaux. Il se fit l'apôtre désintéressé de la nouvelle industrie et inventa l'expression « houille blanche » qu'à tort, semble-t-il, on attribue souvent à Cavour. A l'Exposition universelle de 1889, où il avait envoyé une turbine et un plan en relief des montagnes d'où il tirait sa force motrice, il faisait distribuer un prospectus d'où j'extraits ces quelques lignes :

« De la « houille blanche », dans tout cela il n'y en a pas. Ce n'est évidemment qu'une métaphore, mais j'ai voulu employer ce mot pour frapper l'imagination et signaler avec vivacité que les glaciers des montagnes peuvent, étant exploités en force motrice, être pour leur région et pour l'Etat des richesses aussi précieuses que la houille des profondeurs. »

Cette explication lui semblait nécessaire : plusieurs industriels du Nord lui ayant écrit pour lui demander un « échantillon » de houille blanche...

Aristide Bergès est donc bien l'inventeur du mot « houille blanche ». Mais, le jour où l'on vit tourner la turbine de Lancey, il y avait trente-quatre ans que Fourneyron avait aménagé une chute de 108 mètres dans la Forêt Noire. Il semble juste, néanmoins, de rendre hommage à l'initiative d'Aristide Bergès. Quand ce grand animateur mourut, en 1904, il avait eu la joie de voir se dessiner le grand mouvement industriel qu'il avait souhaité. Aujourd'hui, la modeste usine de 1869 subsiste au milieu d'un vaste ensemble de bâtiments où les papeteries Bergès absorbent une puissance de 12.000 chevaux, produisant chaque jour 50 tonnes de papier et 40 tonnes de carton.



Turbine de Fourneyron datant de 1832.

Les deux éléments sont en fonte. A droite, le distributeur fixe qui s'emboîte dans la roue mobile vue à gauche, avec son arbre. Sur la gorge du distributeur s'appuyait un cylindre amenant une colonne d'eau qui se divisait en lames pour aller frapper les aubes de la roue mobile, absorbant son énergie et canalisant sa sortie.

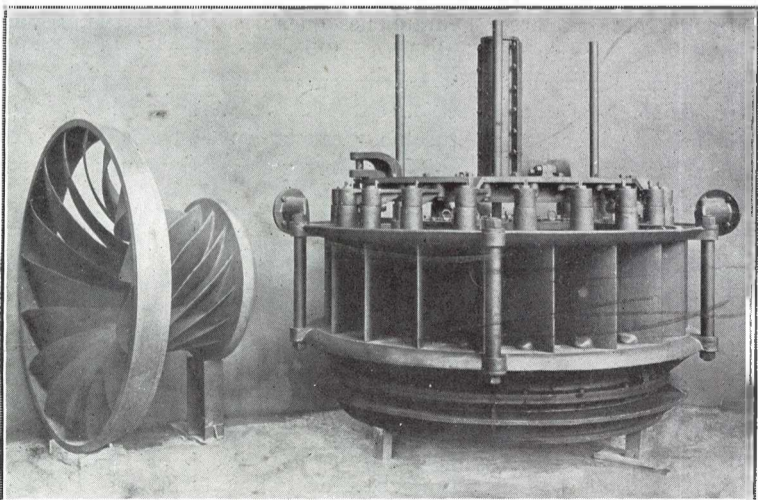


Prise d'eau du ruisseau de Lancey pour la première chute de 200 mètres aménagée par Aristide Bergès.

LES TURBINES MODERNES

Dans l'exposé qui précède, je me suis préoccupé surtout de mettre en relief les rôles respectifs des deux grands précurseurs : Fourneyron et Bergès. Précision nécessaire, car l'appareil de Fourneyron est aujourd'hui abandonné au profit de turbines dont le type n'est qu'une copie, légèrement modifiée, de la première turbine française. Je vais maintenant essayer de bien faire comprendre le fonctionnement de ces moteurs.

La turbine est l'organe essentiel d'une usine hydraulique ; c'est d'elle que dépend en grande partie le rendement du cours d'eau. Pour chaque cas, il faut calculer ses moindres éléments : diamètre des roues, profil et intervalle des aubes et des contre-aubes, épaisseurs de métal, etc. Calcul délicat où interviennent des influences complexes et où l'on doit souvent procéder empiriquement, n'étant pas toujours bien fixé sur la façon dont se comportent les divers éléments du tourbillon liquide. M. Eydoux, professeur à l'École nationale des Ponts et Chaussées, a trouvé une formule élégante pour déterminer rapidement toutes les caractéristiques d'une turbine. La courbe mathématique arrêtée, il reste à l'appliquer. Or, le tracé correct des aubages en forme de surface gauche représente, pour le constructeur, une difficulté énorme. Sous son apparence simple et massive, la turbine est un moteur plus difficile à établir et beaucoup plus sensible, en raison de l'énergie avec



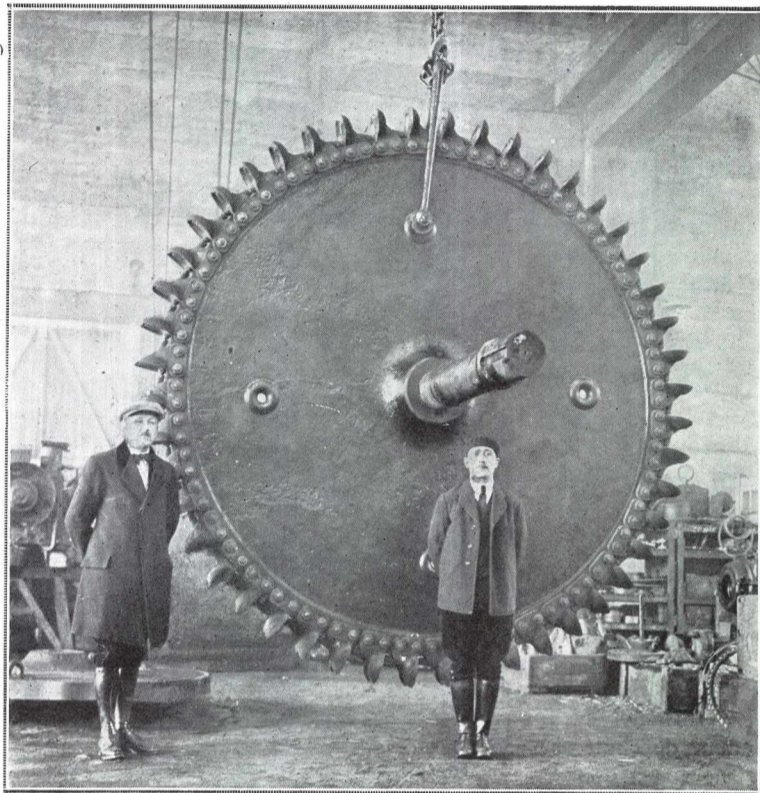
Turbine centripète française Neyret-Beylier, pour basses chutes.

A droite, le distributeur extérieur : ses aubes mobiles sont orientées à volonté ou automatiquement, pour régler l'arrivée de l'eau, au moyen de bielles disposées sur une couronne dont le déplacement entraîne celui de toutes les aubes directrices. On aperçoit trois des tiges aboutissant au volant de manœuvre. La quatrième est cachée par la gaine servant à protéger l'arbre de la roue mobile (vu à gauche), qui s'emboîte dans le distributeur.

laquelle il se trouve aux prises, que le moteur d'automobile. On ne saurait analyser ses qualités, ses défauts, ses caprices sans recourir aux équations. J'épargnerai ce supplice au lecteur, comptant surtout sur nos gravures pour l'intéresser à un mécanisme amusant, certes, mais un peu spécial.

Turbine centripète pour basses chutes. — La chute de moulin envoie une lame d'eau sur une seule palette à la fois. Disposer la roue de manière à pouvoir lancer une trombe liquide qui agisse simultanément et sans arrêt sur toutes les aubes, tel est le principe, éminemment simple, sur lequel repose, comme nous l'avons vu, l'invention de Fourneyron.

Au lieu d'envoyer brutalement la colonne d'eau sur le moteur, on la découpe en autant de lames qu'il y a d'aubes à toucher ; de cette façon, chaque aube accapare la plus grande partie de l'énergie de la masse d'eau en mouvement.



Turbine tangentielle, pour hautes chutes, dite « roue Pelton », avant son montage. (Type français de Neyret-Beylier.)

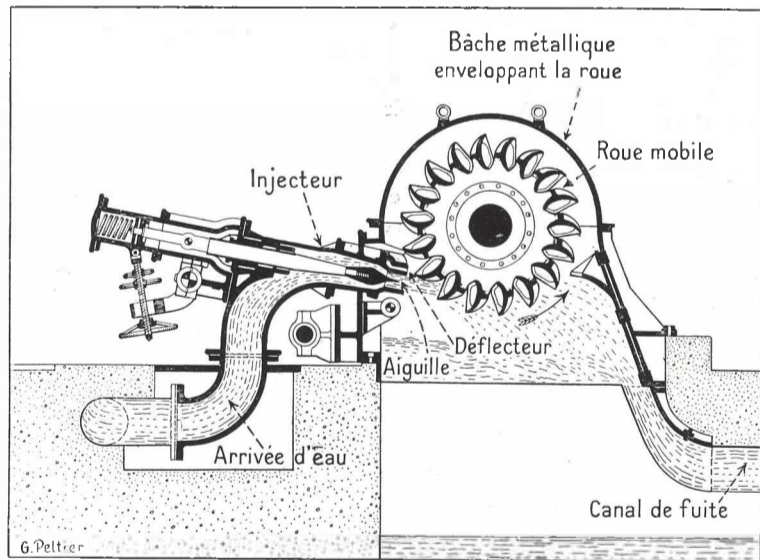


Schéma du fonctionnement de la turbine ci-dessus. — L'eau passe de la conduite dans un injecteur dont l'orifice de sortie est réduit à quelques centimètres de diamètre, de façon à lancer sur les augets de la roue un jet animé d'une vitesse considérable. Une « aiguille », mue à la main ou actionnée par un régulateur automatique, peut avancer ou reculer, rétrécissant ou élargissant le passage de l'eau dont la puissance est ainsi diminuée ou augmentée. A ce mode de réglage, vient s'ajouter celui du déflecteur, sorte de palette annulaire, qui vient s'appuyer sur le bec de l'injecteur pour dévier le jet.

Au moment où l'eau s'échappe de la turbine, elle a perdu toute sa pression ; elle n'a plus que de la vitesse. La vitesse est nécessaire à son évacuation, mais il faut en garder le minimum indispensable.

Dans le modèle centrifuge de Fourneyron, l'eau arrive par un distributeur central et rayonne vers la périphérie ; le calcul nous apprend que sa vitesse de sortie reste forcément plus grande que dans le type Francis qui présente une disposition inverse : distributeur extérieur par où l'eau se précipite de la périphérie vers l'axe du récepteur mobile. En sortant du distributeur, cette eau rencontre les aubes sur lesquelles elle glisse en formant un tourbillon qui les entraîne. A la sortie, sa vitesse est plus épuisée et, par conséquent, a été plus complètement utilisée que dans le type centrifuge.

Les turbines de ce genre sont dites *centripètes* ou, aussi, à *réaction*. Elles peuvent atteindre de grandes dimensions et absorber un volume d'eau considérable. A l'usine de la Basse-Isère, sise à Beaumont-Montoux, à 10 kilomètres environ du confluent de l'Isère avec le Rhône, la roue mobile

mesure 4 mètres de diamètre. Elle pèse 12 tonnes et peut débiter 50 mètres cubes par seconde sous une chute de 10 m. 20, ce qui donne une puissance de 5.600 chevaux. La vitesse est de 107 tours par minute.

A hauteur de chute égale, la puissance d'une turbine croît avec le volume d'eau qu'elle débite et, par conséquent, avec ses propres dimensions. Les plus fortes turbines actuellement installées en France fournissent de 12.000 à 15.000 chevaux. En Amérique, on a construit des unités de 40.000 chevaux.

Les turbines se font en acier coulé. Parfois les aubes de la roue mobile sont soudées, ce qui nuit à leur solidité, mais ce qui permet de les remplacer quand elles sont usées ou déformées par l'érosion de l'eau et du sable. Quant aux aubes du distributeur, on les fait toujours mobiles et orientables, de façon à pouvoir modifier l'entrée de l'eau en quantité et en vitesse.

Les turbines centripètes conviennent surtout aux gros débits; leur emploi est limité aux basses chutes. On comprend dans cette catégorie les chutes de plaine, depuis quelques mètres de hauteur, jusqu'aux chutes de montagne d'environ 150 mètres. On ne peut appliquer ces turbines aux chutes plus hautes.

Fourneyron a raison quand il déclare que, *pour une même puissance*, les dimensions de la turbine varient au raison inverse de la hauteur de chute. Cette puissance, en effet, est égale au produit du débit par la hauteur. Une hauteur plus grande donnera donc la même puissance avec un débit moindre et, par conséquent, avec une turbine plus petite. Mais il y a une limite. Avec de gros débits, sous une grande hauteur de chute, la turbine aurait à supporter une charge énorme et elle prendrait une vitesse telle qu'aucun métal ne résisterait aux effets de la force centrifuge : l'appareil éclaterait. Aussi, pour les hautes chutes, on emploie un moteur très différent de la turbine proprement dite : la roue Pelton, ou « turbine tangentielle ».

La roue à impulsion Pelton pour hautes chutes. — La roue Pelton n'a pas de distributeur. C'est une simple roue garnie d'augets où un injecteur envoie un filet d'eau, roue à *impulsion avec admission partielle* comme dans la roue de moulin ordinaire. Le volume d'eau agissant sur ce moteur, très minime comparé à celui qu'absorbe la turbine centripète, atteint rarement un mètre cube par seconde. La faiblesse du débit est compensée par la vitesse.

Au bas de la chute, l'eau passe de la conduite forcée dans un injecteur très étroit et va frapper un des augets de la roue, donnant à celle-ci une impulsion considérable en vertu de la formule MV^2 , bien connue des chauffeurs raisonnables et des écraseurs et qui peut se traduire ainsi : *la force vive d'un mobile frappant un obstacle est égale au produit de la masse par le carré de la vitesse*. C'est ainsi qu'avec un très faible débit une chute très haute peut fournir une puissance considérable.

L'usine d'Eget, par exemple, près Arreau (Hautes-Pyrénées), qui alimente le réseau du Midi, présente les caractéristiques suivantes :

Hauteur de chute brute, 750 mètres ;
Diamètre des conduites forcées près de l'usine, 56 centimètres ;
Diamètre de sortie de l'injecteur, 86 millimètres ;
Débit maximum, 680 litres par seconde ;
Vitesse du jet, 117 mètres par seconde ;
Diamètre de la roue, 2 m. 20 ;
Nombre de tours par *minute*, 500 ;
Puissance, 5.000 chevaux.

L'installation comprend sept turbines donnant au total 35.000 chevaux.

En comparant cette usine et celle de la Basse-Isère, mentionnée plus haut, on voit le parti qu'on peut tirer des deux types de chute.

A Basse-Isère, une chute de 10 m. 20 donne 5.600 chevaux sur une turbine de 4 mètres de diamètre tournant à 107 tours par minute et absorbant 50 mètres cubes par seconde.

A Eget, une chute de 750 mètres donne 5.000 chevaux sur une roue de 2 m. 20 tournant à 500 tours et absorbant 680 litres par seconde.

Donc, pour obtenir une puissance sensiblement équivalente : d'une part, petite chute, grande masse d'eau, turbine lente ; d'autre part, très haute chute, petit volume d'eau, turbine rapide.

L'AMÉNAGEMENT D'UNE CHUTE

Pour beaucoup de gens, « houille blanche » évoque l'idée de cascade. Ceux qui ne connaissent point les Alpes s'imaginent qu'il suffit, pour installer une usine hydraulique, de recueillir sur une turbine l'eau d'un torrent tombant d'une grande hauteur. La vérité est tout autre. Les grandes chutes naturelles, comme le saut du Doubs ou la chute du Rhin, sont très rares. Quant aux cascades nombreuses qui égalaient la montagne, l'irrégularité et, la plupart du temps, la faiblesse de leur débit les rendent inutilisables. Presque toujours ce sont les ingénieurs qui créent des chutes artificielles en profitant de la pente des cours d'eau.

L'utilisation des cascades naturelles s'opère d'ailleurs suivant deux formules dissemblables.

On est en train d'aménager le gave de Pau aux environs de Gavarnie, dont la cascade célèbre tombe d'une hauteur de 422 mètres. Cette cascade, avec ses douze sœurs cadettes, issues comme elle des glaciers du cirque, constitue la source du gave de Pau. En hiver, elle se réduit à un filet d'eau; à ses heures de beauté, elle débite à peu près 15 mètres cubes par seconde. Cette

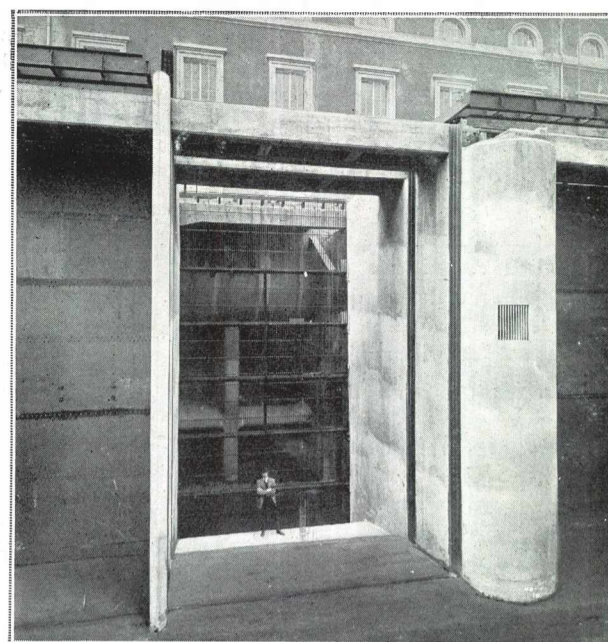
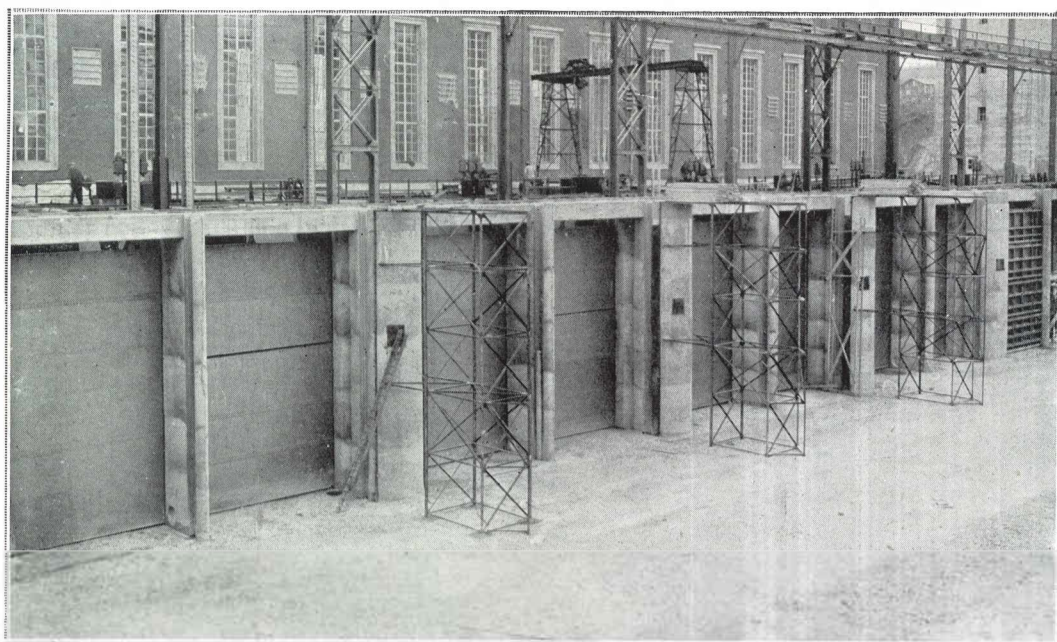


Schéma-type de l'aménagement d'une haute chute de montagne : chute et usine du Bâton, près de Grenoble.

Le torrent du Bâton, qui descend du massif de Belledonne, est alimenté par trois lacs superposés; le lac inférieur (1), seul, est vu sur notre dessin. Au-dessous du lac, à l'altitude de 1.760 mètres, on a élevé un barrage (2). Une partie de l'eau retenue est détournée dans le canal d'aménée (3), long de 1.100 mètres établi en tunnel sur presque tout son parcours, qui aboutit à la chambre d'eau (4). Cette chambre est creusée dans le rocher, et c'est là que commence la chute de l'eau dans une conduite forcée (5) longue de 1.565 mètres, qui aboutit à l'usine (6) de MM. Keller et Leleux, où l'on dispose donc d'une chute qui correspond à une hauteur verticale de 1.045 mètres, c'est-à-dire qui est la plus haute de France. La conduite mesure 54 centimètres de diamètre jusqu'à l'altitude de 1.249 mètres, elle se réduit ensuite à 40 centimètres. Son poids total atteint 410 tonnes. L'eau passe sur deux turbines, et, par le canal de fuite, retourne au Bâton, qui se jette dans la Romanche (7). — L'usine du Bâton est établie à l'intérieur du rocher, ce qui constitue un cas exceptionnel.

cascade ne pourrait cependant alimenter qu'une usine assez modeste. Aussi, les ingénieurs la dédaignent. Ils établissent leur prise d'eau à 8 kilomètres en aval, devant l'*Hôtel de la Grotte* de Gèdre, où le gave, déjà grossi par les eaux recueillies depuis le cirque, reçoit le gave de Héas. A ce point, le débit moyen est d'environ 9 mètres cubes par seconde et l'eau arrivera à l'usine de Luz sous une chute brute d'environ 320 mètres notablement inférieure à la hauteur de la cascade. Celle-ci ne sera en rien diminuée, puisqu'on capte l'eau au-dessous d'elle.

Quand on se trouve en présence d'une cascade de faible hauteur et de gros débit, comme celle de Gimel, par exemple, on prend l'eau en amont de la cascade, qui se trouve alors appauvrie. A la chute du Rhin, près de Schaffouse, la masse d'eau est telle qu'elle ne se ressent guère du prélèvement opéré par l'usine de Neuhausen.



Usine de Chancy-Pougnny, sur le Rhône : les chambres des turbines, vues en amont, avant la mise en eau. — Phot. Jullien.

Cette usine, qui utilise une chute d'environ 8 mètres, est bâtie sur le prolongement d'un barrage, à cheval sur des massifs de béton entre lesquels se précipite l'eau déviée par le canal d'aménée. Le couloir, ainsi ménagé sous l'usine, est divisé par des parois de 2 m. 40 d'épaisseur, en cinq compartiments de 8 mètres de hauteur constituant les chambres des turbines. Chaque chambre est partagée en deux parties par une cloison verticale formant deux demi-chambres fermées par deux vannes indépendantes mues électriquement. — A gauche, une partie de l'usine, les vannes étant baissées ; à droite, une demi-chambre, vanne levée, dont l'entrée est protégée par une grille métallique. Derrière la grille, on aperçoit un cloisonnement en béton qui amorce la canalisation de l'eau avant son arrivée sur la turbine (les bâtis, vus en avant, sont provisoires).

Les usines de montagne. — L'aménagement d'une chute de montagne ne ressemble en rien à celui des rivières qui font tourner un moulin. Ces dernières, retenues un instant par un simple barrage, se déversent directement sur la roue ou sur la turbine. L'usine des Alpes, au contraire, s'élève souvent à plusieurs kilomètres du barrage ; ce dernier ne s'embellit d'une chute qu'à l'époque des crues ou des très hautes eaux. Et cette chute n'est point celle qui produit l'énergie. La chute du Livet, représentée sur la couverture de ce numéro, est produite par le trop-plein de la chambre qui envoie l'eau aux turbines de l'usine Keller et Leleux.

Le barrage sert à détourner une partie du torrent dans un canal établi au flanc de la montagne qu'il suit presque horizontalement sur un parcours dont la longueur dépend de la hauteur de chute à obtenir. Si, par exemple, au bout de deux kilomètres, le canal se trouve à 200 mètres au-dessus de la berge et si, dans un tuyau plus ou moins incliné, nous laissons alors l'eau se précipiter vers la vallée, nous obtiendrons une « chute » de 200 mètres.

L'aménagement d'une chute de montagne comprend quatre parties essentielles : la prise d'eau, le canal d'aménée, la chute à l'intérieur des conduites forcées, l'installation des turbines.

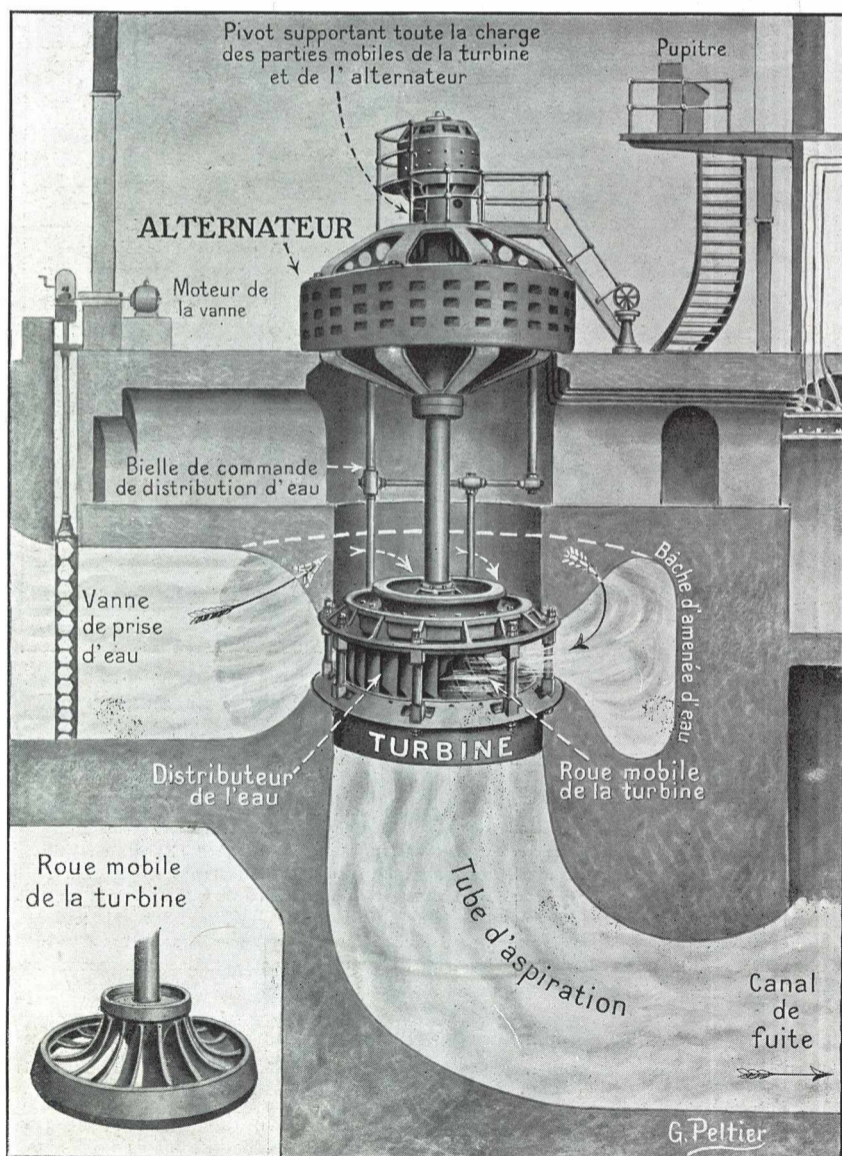
La prise d'eau s'effectue au moyen d'un barrage construit dans une partie étroite de la vallée et comprenant toujours une vanne de chasse pour évacuer les graviers qui s'accumulent en amont. Une partie de l'eau retenue est dirigée sur le canal d'aménée dont l'excédent retourne à la rivière par un déversoir un peu moins élevé que la crête du barrage.

Le canal d'aménée court à flanc de montagne, parallèlement au cours d'eau, tantôt à ciel ouvert, tantôt en souterrain pour le préserver des éboulis et de la gelée. Sa section, proportionnée au débit, est de l'ordre de 7 à 10 mètres de largeur au plafond sur 3 mètres de profondeur. Sa longueur, avons-nous dit, dépend de la pente de la vallée et de la hauteur de chute qu'on désire ; elle atteint 5.500 mètres pour l'usine d'Eget, à Arreau (Pyrénées), qui dispose d'une chute de 750 mètres ; elle se réduit à 1.100 mètres pour la chute du Bâton (1.045 mètres). Le canal d'aménée aboutit à la chambre de charge, ou chambre d'eau, réservoir en maçonnerie contenant parfois plusieurs milliers de mètres cubes et d'où partent les conduites forcées. C'est là que commence la chute invisible. Les usines hydrauliques de montagne présentent cette particularité : on ne voit point la chute, on n'aperçoit que son enveloppe.

Au commencement ou à l'extrémité du canal, suivant les commodités du terrain, l'eau passe dans des bassins de décantation où se déposent les graviers et les sables ; au seuil de la chambre de charge, une grille arrête les branches et les feuilles. Quelques chiffres vont nous édifier sur l'importance de ces dispositifs : la Durance et le Var roulent 11 millions de mètres cubes de matériaux par an ; le Rhône, 21 millions ; le Danube, 60 millions. La plus limoneuse des rivières alpines est l'Isère ; la proportion des dépôts, qui est à peine de 2 kilos par mètre cube dans son cours supérieur, passe à 150 et même 200 kilos dans le cours moyen. Le débit étant alors de 300 mètres par seconde, la quantité de limon charriée en vingt-quatre heures atteint 4 millions de tonnes. Dans les Pyrénées, dont les glaciers sont peu étendus, les eaux sont claires en toute saison, sauf au moment des fortes crues. Dans les Alpes, elles ne sont claires qu'en hiver.

L'installation des conduites forcées posa des problèmes qui furent résolus d'assez bonne heure par nos grands constructeurs grenoblois, M. Bouchayer et M. Viala. Quelques-unes ont à supporter des pressions supérieures à 100 kilos par centimètre carré, c'est-à-dire le poids d'une colonne d'eau de plus d'un kilomètre de hauteur. Au-dessus d'un certain diamètre et au-dessous d'une certaine épaisseur, elles tendent, sous l'effet de leur propre poids, à s'ovaliser et à prendre un profil circulaire. On a vu s'aplatir complètement des conduites où un vide intérieur était créé par une fuite importante de la partie inférieure, la pression atmosphérique extérieure intervenant pour augmenter la tendance à l'aplatissement.

Ces grands tuyaux disgracieux, peu faciles à dissimuler, sont en acier doux Martin d'une élasticité suffisante pour se prêter à certaines déformations, tout en offrant une grande résistance sous une épaisseur qui varie, selon les pressions à supporter, de 4 à 40 millimètres. Les conduites de forte épaisseur sont soudées ; on assemble leurs tronçons au moyen de brides et de



Coupe schématique montrant le fonctionnement d'une turbine centrifète suspendue pour basse chute à axe vertical.

L'eau arrive à gauche et se répand dans une bache circulaire qui enveloppe la turbine en se rétrécissant de façon à canaliser l'eau entre les deux plateaux du distributeur qui est « arraché » sur la partie droite de la figure. L'eau s'échappe, suivant l'axe vertical de la roue mobile, dans le canal de fuite. L'alternateur est couplé avec la turbine et le pivot de rotation de l'arbre commun est soutenu par une armature reliée à la cage de l'alternateur qui s'appuie sur le plancher échanuré. (Cette turbine se monte aussi sur axe horizontal à l'intérieur d'une bache établie sur le plancher comme pour la roue Pelton.)

jointes au caoutchouc. Les grosses conduites, formées de tôles cintrées, sont rivées bout à bout ; au delà de 3 mètres de diamètre, on est obligé de les construire sur place avec des tôles toutes préparées. On dépasse rarement le diamètre de 3 m. 50. (Les conduites d'Eguzon mesurent 4 m. 20.)

On utilise aussi des tuyaux sans soudure obtenus en étirant un lingot d'acier coulé. Enfin, pour de très gros débits sous faible pression, on recourt au ciment armé, de prix beaucoup moindre. Le record du genre appartient à la conduite Drac-Romanche, de 6 mètres de diamètre, dont nous avons reproduit une photographie dans notre numéro du 18 mars 1922.

Ces grosses conduites ne conviennent qu'aux usines de plaine installées sur des fleuves à très grand débit. Une conduite de 2 mètres de diamètre, recevant l'eau d'une rivière ayant une vitesse de 2 mètres par seconde, débite pendant cette même seconde plus de 6 mètres cubes. Dans les mêmes conditions, un modeste tuyau de 20 centimètres débite 62 litres.

En montagne, la pose des conduites est une opération laborieuse, et l'on ne dépasse guère le diamètre de 1 mètre à 1 m. 20. Une conduite de ce calibre se construit par tronçons de 6 à 7 mètres, pesant plusieurs centaines de kilos au mètre courant, qu'on doit souvent hisser à 1.600 ou 1.800 mètres d'altitude le long de parois abruptes ou dans un sentier de forêt nouvellement défriché. Les tuyaux amenés à pied d'œuvre, on les assemble, tantôt en ligne droite, tantôt avec des coudes bien étudiés, et on les ancre solidement. Souvent, au lieu de les poser directement sur le sol, on les appuie à intervalles réguliers sur des berceaux en maçonnerie.

Quand les conduites ne sont pas enterrées, cas le plus fréquent, il faut les préserver des effets du soleil et du gel, envisager les écarts énormes entre la dilatation diurne et la contraction nocturne du métal. Les uns peignent les conduites en blanc pour augmenter le rayonnement. D'autres les gazonnent ou leur font un berceau de verdure ; on rend ainsi moins facile une surveillance qui doit être très rigoureuse. Avec les pressions énormes imposées à ces tuyaux, on est toujours à la merci de fuites ou de fissures pouvant s'agrandir subitement et provoquer une inondation plus ou moins sérieuse de la vallée. Il est juste de reconnaître que, grâce à la perfection des installations, aucun accident grave de ce genre ne s'est encore produit en France.

Dans les pays de montagnes, on remarque souvent que le diamètre des conduites diminue aux approches de l'usine. Il y a là une mesure d'économie. La pression de l'eau augmentant à mesure qu'elle s'éloigne du point de chute, il est nécessaire d'accroître en même temps la résistance et, par conséquent, l'épaisseur et la dépense de métal. Pour réduire cette dernière, on rétrécit les conduites.

Les conduites doivent épouser les caprices du terrain. On les voit tantôt passer sous la route, tantôt franchir la vallée, accrochées à un pont ou posées sur une passerelle. Parfois, elles s'élancent au-dessus du torrent, ne s'appuyant que sur les rives. La première conduite de ce genre fut établie au-dessus de la rivière de l'Arc, en Maurienne, sur les plans de l'ingénieur Héroult qui eut beaucoup de peine à faire admettre son projet, jugé d'une audace excessive. Citons encore le siphon qui traverse la Durance pour amener à la grande usine de l'Argentière l'eau de la Gyronde de Vallouise. En raison des échafaudages et des culées qu'il exige, ce dispositif n'est pas toujours plus économique que la construction d'un pont ; il est cependant des cas où il s'impose pour diverses raisons.

Les conduites forcées aboutissent soit à un collecteur horizontal qui répartit l'eau entre les turbines, soit directement à chaque turbine. L'eau est restituée par le canal de fuite à la rivière, qui peut être barrée de nouveau plus bas et actionner une autre usine. On installe ainsi plusieurs usines en cascade sur le même torrent, chacune bénéficiant à la fois de l'eau qui a alimenté l'usine d'amont et de celle recueillie en aval de cette dernière. Un des exemples les plus remarquables d'un tel aménagement est celui effectué tout récemment par la Compagnie du Midi le long du gave d'Ossau. (Voir le schéma plus loin, au-dessous de la carte de l'électrification dans le Massif Central et dans les Pyrénées.)

Les usines de plaine. — Les usines de plaine utilisent des rivières ou des fleuves à gros débit sous une hauteur de chute variant d'environ deux ou trois mètres à une quinzaine de mètres. A cette catégorie appartiennent les usines de Tuilières et de Mauzac, sur la Dordogne ; l'usine de la Basse-Isère, citée plus haut, dans la plaine de la vallée du Rhône, aux environs de Valence ; celle de Chancy-Pougny, construite par les établissements Schneider, également sur le Rhône, à la frontière franco-suisse ; celles qu'on se propose d'établir sur le Rhin entre Bâle et Strasbourg, sur la Seine entre Paris et Rouen, etc.

L'usine s'élève tantôt sur le barrage même, tantôt à côté ou à une légère distance. L'eau se déverse sur les turbines, sans intermédiaire de conduites forcées, soit par le barrage, soit par un canal d'amenée dont les dimensions dépassent considérablement celles des canaux de montagne. Le canal d'amenée de la Basse-Isère, long de 1.600 mètres, a 4 m. 60 de profondeur et 32 mètres de largeur au plafond. Son entrée est défendue par une grille de 145 mètres de longueur ; à son extrémité, il s'épanouit à la largeur de l'usine devant une autre grille de 73 mètres.

Le barrage des usines de ce type est construit en maçonnerie, en béton armé, en acier, parfois en terre. Il comporte toujours une largeur assez grande et, par conséquent, une grosse dépense qui contribue à rendre l'installation plus onéreuse que celle d'une usine de montagne. Quand la rivière est navigable ou susceptible de le devenir, par suite des biefs que crée l'établissement d'une chaîne ininterrompue d'usines, l'Etat oblige le concessionnaire à ménager l'emplacement d'une écluse. Sur certains cours d'eau, on doit en outre disposer des échelles à poisson.

Il est assez difficile de fixer un rapport de rendement, même approximatif,

entre deux types d'usines. Eget, dans les Pyrénées, avec un débit de 4.800 litres et une chute de 715 mètres, donne 35.000 chevaux ; Tuilières, sur la Dordogne, avec 185 mètres cubes et 12 mètres de chute, en donne 24.000. A Rjukan, en Norvège, 50 mètres cubes tombant d'une hauteur de 272 mètres fournissent 145.000 chevaux. Queenston, sur le Niagara, avec 453 mètres cubes et 80 mètres de chute, dispose de 300.000 chevaux.

Les usines du Massif Central. — Il est une autre formule d'aménagement usitée dans les régions de montagnes moyennes. A ce type appartiennent les usines prévues sur la haute Dordogne et la plupart de celles en construction ou en projet dans le Massif Central, où beaucoup de rivières coulent dans des gorges profondes avec une pente moyenne et un débit très irrégulier.

On construit un barrage de 50 ou 60 mètres de hauteur, ou même davantage. On noie ainsi la vallée sur une longueur de plusieurs kilomètres et l'on crée un lac artificiel emmagasinant une masse d'eau qui assure un débit régulier. L'usine, établie au pied du barrage, reçoit l'eau par des conduites très courtes qui la prennent à un niveau déterminé du lac.

La plus importante usine française de ce genre est actuellement celle que l'on construit à Eguzon, dans la Creuse. Le barrage atteindra 60 mètres de hauteur et l'usine sera armée de cinq groupes de 12.000 chevaux donnant une puissance totale de 60.000 chevaux.

L'INSTALLATION DES TURBINES

Le profane admis à visiter une usine hydraulique voit peu de chose, il comprend encore moins.

En montagne, une puissance de vingt ou trente mille chevaux est apportée par une trombe d'eau dont il n'aperçoit pas une goutte. Dans la salle des machines, supérieurement astiquée, il voit tourner et il entend ronfler les alternateurs électriques ; la turbine lui échappe. Cependant, il la frôle ; souvent il marche dessus, n'étant séparé que par l'épaisseur d'un plancher du tourbillon qui l'anime. Essayons donc de pénétrer dans ces dessous peu connus et de bien comprendre ce qui s'y passe.

Pour les hautes chutes équipées avec la roue Pelton, l'installation est simple.

Sous le plancher s'étend, comme au-dessous d'une scène de théâtre, une vaste cave en maçonnerie où pénètrent les conduites forcées. Le tuyau qui amène une colonne d'eau de 40 ou 50 centimètres de diamètre se termine par un injecteur ne laissant passer qu'un jet de 8 ou 10 centimètres, lequel frappe, l'une après l'autre, les aubes de la roue. Cette dernière est en général montée sur un arbre horizontal assez élevé au-dessus du plancher et elle se dissimule sous une *bâche* en fonte ou en acier qui reçoit les éclaboussures. L'arbre est couplé avec celui de l'alternateur placé parallèlement à quelques mètres de distance. On dispose quelquefois deux ou trois injecteurs — jamais davantage — de façon à agir simultanément sur deux ou trois aubes.

Le volume d'eau attaquant la roue est réglé automatiquement ou à la main par deux systèmes à ressorts : l'aiguille, qui élargit ou rétrécit l'orifice de l'injecteur ; le déflecteur, sorte de palette qui dévie plus ou moins le jet en venant s'appuyer sur lui.

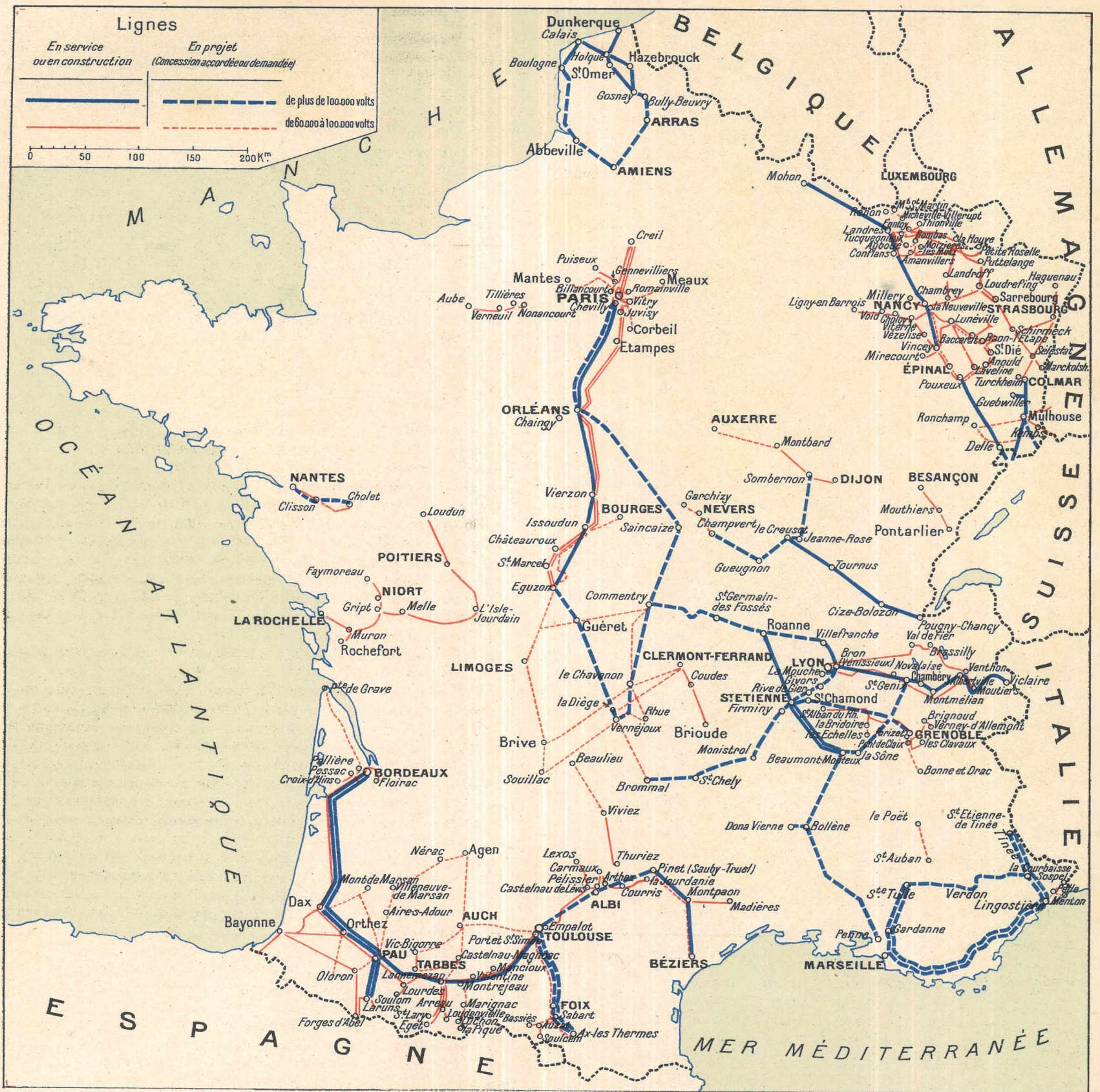
Les turbines centripètes ou turbines proprement dites, utilisées pour les chutes basses ou peu élevées, appellent une installation différente. Montées en général sur arbre vertical, au-dessous du plancher, elles tournent tantôt en chambre fermée, tantôt en chambre ouverte.

La chambre fermée consiste en un compartiment de maçonnerie où aboutit une conduite forcée. L'eau s'engouffre sur tout le pourtour du distributeur et, après avoir frappé les aubes de la roue mobile, elle tombe dans la chambre et s'échappe par le canal de fuite. A l'origine, le pivot de la turbine reposait au fond de l'eau, sur un bloc de maçonnerie. Le graissage au moyen d'huile envoyée sous pression donnait des résultats médiocres ; la visite et l'entretien étaient peu commodes, exigeant la mise à sec de la chambre. Aujourd'hui, la turbine est *suspendue*. Son arbre n'a aucun point d'appui à la base ; traversant le plancher, il va rejoindre l'arbre de l'alternateur dont le pivot roule sur un palier solidaire d'une armature qui repose sur un système de poutres installé à l'échancrure du plancher. Cette disposition élégante est assez hardie : le poids des parties tournantes de l'alternateur et de la turbine et les réactions de l'eau représentent pour le pivot une charge atteignant souvent 150 tonnes.

La chambre ouverte convient aux basses chutes de très gros débit fournissant des pressions énormes qui rendraient difficile la construction de chambres fermées assez résistantes.

Disposée comme les autres sous le plancher de l'usine, ouverte en amont et en aval, elle forme une sorte de couloir où l'eau se déverse directement du canal d'amenée et qu'elle remplit en passant sur la turbine pour retourner à la rivière. L'usine de Chancy-Pougny offre le type le plus récent et le plus perfectionné d'une grande usine fonctionnant avec chambres ouvertes.

Quelle que soit la turbine, elle doit fonctionner en accord parfait avec l'alternateur qu'elle fait tourner. Or, ce dernier, qui doit tourner à vitesse sensiblement constante, est soumis à des variations de débit plus ou moins brusques qui diminuent ou augmentent sa « résistance » et, par conséquent, tendent à modifier sa vitesse. Si, par exemple, on éteint instantanément plusieurs milliers de lampes, l'alternateur et la turbine tendent à tourner plus vite et à « s'emballer ». Des dispositifs complexes assurent les compensations nécessaires. Des régulateurs automatiques commandent l'arrivée d'eau sur la turbine de telle façon qu'à tout instant cette dernière ne fournisse à l'alternateur que la puissance demandée par les consommateurs.

Lignes électriques à très haute tension (60.000 volts et au-dessus) construites ou projetées au 1^{er} mai 1925.

Le territoire est divisé en sept régions : NORD. Grandes centrales thermiques, installées sur le carreau des mines ou à leur proximité immédiate et brûlant du charbon de qualité inférieure. — EST. Conjugaison des centrales thermiques alimentées par le charbon de la Lorraine, de la Sarre et de la Ruhr et les gaz de hauts fourneaux avec les centrales de courant hydraulique actuellement importé de Suisse et devant être fourni plus tard par l'énergie du Rhin. — CENTRE-EST. Conjugaison de l'énergie hydraulique des Alpes (étiage d'hiver) et du Massif central (étiage d'été) et jonction avec les grosses thermiques de Paris et des régions de Saint-Etienne et du Creusot. Une partie importante du courant est destinée à l'électrification du réseau d'Orléans. — SUD-EST. Régularisation de l'énergie saisonnière des Alpes méridionales par les thermiques de Sainte-Tulle et de Lingostière et, prochainement, par des réservoirs sur la Tinée et le Verdon. On étudie un réseau de 120.000 volts pour réunir ces différentes sources d'énergie et électrifier le réseau P.-L.-M. — SUD-OUEST. Conjugaison de l'énergie hydraulique des Pyrénées (étiage d'hiver) et du Tarn (étiage d'été). Electrification des chemins de fer du Midi. — CENTRE-OUEST. Régularisation de l'énergie hydraulique du Massif central (Dordogne et Vienne) par les thermiques de Faymoreau (mine) et des régions de Bordeaux et Nantes (charbon importé). — NORD-OUEST. On amorce en Bretagne l'interconnexion des usines hydrauliques entre elles, avec une tension de 45.000 volts inférieure aux tensions représentées sur la carte.

LE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE À DISTANCE

Le grand public s'est habitué peu à peu à associer la notion de houille blanche à celle de transport d'énergie électrique. Les deux choses sont pourtant complètement indépendantes l'une de l'autre. À l'origine, l'énergie des torrents fut utilisée sur place, sans aucune intervention de la dynamo ; aujourd'hui, le courant électrique qui fuit le long des routes est souvent fourni par des usines à vapeur, à un prix sensiblement égal à celui des kilowatts tirés de la houille blanche qui, suivant une expression dont l'exactitude est très relative, « ne coûte rien ». Il est vrai, le problème du transport à grande distance du courant électrique a été posé par la houille blanche ; celle-ci, d'autre part, doit son essor à la possibilité d'utiliser au loin son énergie. Et la solution de ce problème, appelée à révolutionner l'industrie moderne, fut extrêmement laborieuse.

À l'Exposition de Vienne, en 1873, un ingénieur français, Hippolyte Fontaine, démontra la réversibilité de la dynamo. Deux machines, placées

dans l'enceinte de l'Exposition, étaient reliées par un fil de deux kilomètres de longueur ; on actionnait l'une avec un moteur Lenoir et le courant faisait tourner l'autre. La dynamo était encore dans l'enfance. Elle venait d'être réalisée à Paris par un menuisier d'origine belge, Gramme, établi à Bois-Colombes, où, depuis 1902, une rue porte son nom. Longtemps avant, en 1861, Pacinotti avait construit à Pise une machine identique comme principe à celle de Gramme ; mais cette machine, dont il existe un exemplaire au Conservatoire des arts et métiers, n'avait jamais bien fonctionné et il semble que l'inventeur belge ne l'avait pas connue.

Les conditions dans lesquelles le menuisier génial fut amené à concevoir et à construire sa dynamo sont curieuses à rappeler. Gramme était originaire de la province de Liège où il fit son apprentissage de menuisier tout en suivant le cours de géométrie dans une école d'adultes. Son instruction générale était presque nulle ; suivant une formule consacrée, il savait à peine lire et écrire. En 1856, il vient à Paris où il se fait apprécier comme ouvrier *rampiste* ; nul ne savait aussi bien que lui donner le galbe aux rampes d'escalier dont la construction représente le sommet de l'art du menuisier. En 1860, Van Malderen, qui l'avait connu à Bruxelles, l'engage comme modèleur pour la société *l'Alliance*, dont il était directeur, société qui cons-

truisait des magnétos et qui eut, à l'époque, une certaine célébrité. En voyant fonctionner ces machines, Gramme découvre sa vocation électrique et il abandonne la menuiserie. Des ateliers de l'*Alliance*, il passe dans ceux de Ruhmkorff ; il va ensuite séjourner quelques mois en Angleterre et il rentre à Paris en 1869, apportant plusieurs inventions qui lui ont été inspirées par la lecture du *Traité de physique* de Ganot, moins savant peut-être, mais bien plus clair, dans sa forme première, que la plupart des traités postérieurs. Il prend ses brevets et, en 1870, âgé de 43 ans, il construit la première dynamo industrielle à courant continu, où il applique le principe des électro-aimants circulaires tournants. La machine amorce bientôt l'essor de la galvanoplastie et de l'éclairage électrique ; elle détrône la machine à courant alternatif, à laquelle on reviendra plus tard pour la construction des moteurs et pour les transports d'énergie.

Émerveillés par l'expérience de Vienne, des esprits hardis entrevirent la possibilité de transmettre le courant électrique, c'est-à-dire l'énergie, à grande distance. Ils se heurtèrent à l'incrédulité des augures qui leur opposaient *a priori* une loi de physique élémentaire, oubliant, comme il est arrivé souvent et comme il arrivera sans doute encore, que beaucoup de lois peuvent être « tournées » et que d'autres, en apparence absolues à une époque de la science, deviennent caduques à l'époque suivante.

La physique enseigne que la *puissance* d'un courant, exprimée en watts, est le produit de l'*intensité* (ampères) par la *tension* (volts). D'autre part, tout circuit traversé par un courant est le siège, dans ses diverses parties, d'un dégagement continu de chaleur qui croît comme le carré de l'intensité. Cette chaleur représente une utilisation, donc une perte d'énergie qui devient vite considérable. On peut réduire cette perte en augmentant le diamètre du fil conducteur ; on se heurte alors à une dépense de métal prohibitive pour les longs parcours. Aussi, les premiers expérimentateurs furent bientôt unanimes à déclarer le transport de l'énergie électrique pratiquement impossible au delà de quelques kilomètres. La chose était admise comme un dogme intangible le jour où Marcel Deprez entreprit de prouver le contraire.

Marcel Deprez n'appartenait pas à la science officielle ; il s'était fait lui-même. Né à Aillant-sur-Milleron (Loiret) en 1843, il entra à vingt ans, comme élève libre, à l'École nationale des mines, où il ne restait que quelques mois, M. Haton de la Goupillière, professeur de mécanique, lui ayant donné une note insuffisante à l'examen de fin d'année. Le directeur de l'École, Charles Combes, membre de l'Institut, fit appeler l'élève éliminé ; en une heure de conversation, il apprécia sa valeur et il se l'attacha comme secrétaire.

A quelque temps de là, M. Haton de la Goupillière, désireux de publier dans un de ses ouvrages un théorème de Marcel Deprez, pria M. Combes de le mettre en rapport avec son secrétaire, dont le nom ne lui rappelait rien. L'entrevue fut des plus cordiales.

— De quelle Ecole sortez-vous, demanda le professeur, Polytechnique ou Normale ?

— De l'École des mines, répondit Deprez, et par la mauvaise porte. J'ai été renvoyé à la fin de ma première année.

— Pour la chimie, évidemment ?

— Non, monsieur, pour la mécanique, et c'est vous-même qui m'avez « séché ».

Haton de la Goupillière se reporta à ses dossiers d'examens et il constata avec une certaine amertume l'erreur qu'il avait commise en jugeant l'élève probablement sur une seule question.

Après s'être signalé par une série de travaux tout à fait remarquables dans le domaine de la mécanique et de l'électricité, Marcel Deprez résolvait théoriquement le problème du transport de l'énergie à distance dont il proclamait, vers 1880, les lois fondamentales. Ces lois sont exprimées en termes qui n'ont point leur place ici. Pour les rendre plus aisément compréhensibles, on les résume souvent en deux principes :

Le rendement d'un transport d'énergie est indépendant de la distance qui sépare la machine génératrice de la machine réceptrice.

Le rendement dépend uniquement de la tension aux bornes de la machine génératrice placée à la source de l'énergie à transporter.

Cette forme lapidaire qui plaît aux ingénieurs prête à confusion.

Si, en effet, nous équipons une ligne capable de transporter à 100 kilomètres une puissance déterminée avec un rendement de 90 %, le jour où nous allongerons la ligne pour envoyer cette même puissance à 200 kilomètres, le rendement baissera. Mais, et c'est en cela que réside la grande découverte de M. Deprez, nous disposons d'un moyen pour empêcher cette diminution de rendement.

Nous savons, en effet, que la puissance d'un courant est égale au produit de l'intensité par la tension. Diminuons l'intensité et augmentons la tension dans une proportion convenable : nous obtiendrons le même produit. Le cas est analogue à celui de l'énergie hydraulique où l'on peut compenser respectivement le volume du débit et la hauteur de chute.

Par conséquent, puisque c'est l'intensité qui nous gêne, en provoquant la déperdition de courant par échauffement du fil, transportons des courants de faible intensité sous forte tension et nous pourrions envoyer très loin une grande puissance. D'autres éléments de calcul interviennent, mais tel est le sens général d'une loi qui peut s'exprimer ainsi :

Étant donné une puissance déterminée à transporter à une distance quelconque, on peut toujours calculer les tensions à employer pour obtenir le même rendement à diverses distances.

Dans la pratique, il faut tenir compte des pertes subsidiaires résultant de l'imperfection des appareils et qui augmentent aussi avec la tension,

mais dans une proportion infime par rapport à celles résultant de l'intensité.

La proclamation de ces lois au Congrès des électriciens de 1881 souleva des tempêtes. Des articles sévères, violents, nous rappelle M. Sylvestre, parurent dans des revues techniques, sous des signatures autorisées, taxant de paradoxales les théories de Marcel Deprez, qui fut même traité de charlatan. « Le danger des hautes tensions rend ces théories inapplicables », se contentaient d'affirmer, avec une courtoisie apeurée, des esprits distingués mais vieillissants, tel ce vénérable membre de l'Académie des sciences, aujourd'hui défunt, qui n'osa jamais se risquer dans l'ascenseur du Palais Mazarin, lequel met cent secondes pour gravir un étage.

L'expérience allait bientôt confirmer la théorie. En 1882, quelques mois après le congrès de Paris, une exposition s'ouvre en Bavière. Marcel Deprez, en employant un fil télégraphique ordinaire, transporte de Miesbach à Munich, distants de 57 kilomètres, un courant électrique représentant l'énergie d'un cheval-vapeur. Il y a d'abord quelques mécomptes dus au mauvais isolement de la ligne et à la malveillance ; on est obligé de garder militairement la ligne que des ingénieurs sceptiques tiennent à suivre en chemin de fer pour bien voir le fil réunissant les deux machines. Finalement, le succès s'affirme, avec un rendement de 60 %.

Ces résultats ont un retentissement mondial. En France, les attaques redoublent et Marcel Deprez se voit refuser par le ministère des Postes et Télégraphes la disposition d'un fil pour continuer son œuvre. La Compagnie du Nord vient à son aide. En février-mars 1883, l'inventeur transporte 8 chevaux de Paris au Bourget, sur une ligne qu'on a bouclée au Bourget afin de pouvoir disposer dans un même atelier le générateur et le récepteur, et effectuer des mesures simultanées sur les deux machines. Le rendement atteint 71 % sous une tension aux bornes de 2.480 volts. Ceux qui reprochaient à l'inventeur d'avoir empêché tout contrôle en plaçant les machines de Munich et de Miesbach à 57 kilomètres l'une de l'autre prétendent alors qu'on a rendu la distance illusoire en réunissant cette fois les machines dans un même local ! Mais Marcel Deprez reçoit les félicitations officielles de l'Académie des sciences, qui avait délégué une commission de contrôle comprenant MM. Joseph Bertrand, Tresca, Cornu, Ferdinand de Lesseps et de Freycinet.

La ville de Grenoble suivait ces essais avec un intérêt facile à comprendre. Sur l'initiative du maire, M. Edouard Rey, Marcel Deprez se rend en Dauphiné. Une turbine à eau, installée à Vizille, actionne une dynamo qui développe 11 chevaux ; on reçoit à Grenoble, distant de 14 kilomètres, environ 7 chevaux qu'on utilise pendant plus d'un mois pour l'éclairage. Par suite de pertes *mécaniques* variées, le rendement était moindre que précédemment, mais la perte en ligne ne dépassait pas 5 %. « Ces nouvelles expériences, déclarait Joseph Bertrand à l'Institut, ont eu un succès complet et la ville de Grenoble peut réclamer l'honneur d'avoir fait le premier pas dans une voie signalée à plusieurs reprises par les encouragements et les expériences de l'Académie des sciences. »

Paul Bert ajoutait : « M. Deprez a complètement triomphé des obstacles qui avaient arrêté ses prédécesseurs ; les forces naturelles, qui ne coûtent rien et qui sont aujourd'hui perdues, pourront être utilisées par l'industrie. La force de la chute d'eau sortira de la gorge inaccessible ; celle du vent descendra de la colline abrupte ; celle de la marée, immense et inutilisée, pourra être saisie et transmise hors de la portée des vagues. C'est l'aurore d'une révolution industrielle... L'expérience de Grenoble-Vizille, si admirable qu'elle soit, n'est qu'un essai, un début bien modeste à côté de ce que l'humanité devra aux travaux de Marcel Deprez. »

Le concours financier de MM. de Rothschild permit d'organiser une expérience décisive avec ce programme : prendre 100 chevaux de force motrice à la station de Creil, les transporter électriquement à la gare de la Chapelle, soit à 56 kilomètres de distance, avec un rendement de 50 %. Les essais, commencés en octobre 1885, furent continués pendant six mois au bout desquels la commission de savants appelée à les suivre acquit la certitude que le problème était complètement résolu. On avait employé une tension de 6.290 volts, chiffre énorme pour l'époque, et il ne s'était produit aucun accident.

En 1886, Marcel Deprez est élu à l'unanimité, deux ans après M. Haton de la Goupillière, membre de l'Académie des sciences où il occupe le fauteuil dont le premier titulaire fut Napoléon I^{er}.

MM. de Rothschild fondent alors la « Société anonyme pour le transport de force ». Marcel Deprez, à qui ils en confient la direction, trouve autour de lui, dans le conseil d'administration, des adversaires de la première heure. Énervé, il donne bientôt sa démission. M. de Rothschild insiste en vain pour le conserver ; il lui offre alors un traitement de 25.000 francs et un laboratoire dont il s'engage à assumer tous les frais. Marcel Deprez refuse ; il se contentera de sa chaire du Conservatoire des arts et métiers. Et cet homme de génie, d'une fierté et d'une indépendance que justifiait sa haute probité, s'est éteint le 13 octobre 1918, âgé de soixante-quinze ans, dans sa petite maison de Saint-Mandé, presque pauvre. *L'Illustration* fut un des rares journaux qui rendit hommage à ce savant dont le nom est presque ignoré de la jeunesse. C'est pour cela que j'ai cru devoir rappeler, un peu longuement peut-être, ce calvaire lamentable d'un grand Français.

Les petites lignes de transport de courant électrique se multiplièrent assez rapidement ; des installations sommaires permirent de fournir la lumière à des prix minimes aux villes ou aux villages bâtis près d'un torrent. Dès 1893, l'ampoule électrique éclairait les rues de Briançon et les rives du lac Majeur.

Le développement des lignes à grandes distances fut plus lent, car il soulevait des problèmes nouveaux éminemment complexes.

A la chute, les usines construites avant guerre produisent toujours le courant à un prix avantageux, bien que ce prix varie beaucoup, suivant les dépenses d'installation. Pour envoyer ce courant au loin à un prix encore rémunérateur, deux conditions sont nécessaires : en perdre aussi peu que possible pendant le trajet ; éviter des frais de canalisation tels qu'au point de distribution le prix de revient ne serait pas suffisamment inférieur au prix du courant produit sur place au moyen de la vapeur. Conditions difficiles à réaliser, car, dans une certaine mesure, elles s'excluent réciproquement.

Le tableau ci-dessous indique la dépense de câble nécessaire pour transporter à 100 kilomètres, sous différentes tensions, un courant triphasé de 10.000 kilowatts, lequel correspond à une puissance d'environ 15.000 chevaux :

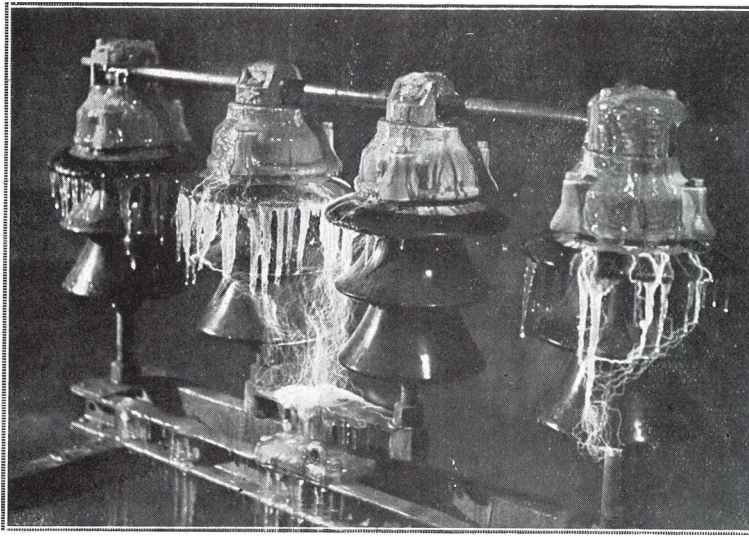
TENSION	POIDS DU CUIVRE PAR CV	DÉPENSE PAR CV (avant guerre)
10.000 volts..	320 kilos	768 francs
20.000 — ..	80 —	192 —
40.000 — ..	20 —	48 —
60.000 — ..	8,8	21,23
80.000 — ..	5 —	12 —
100.000 — ..	3,20	7,68
120.000 — ..	2,22	5,30

On a donc avantage *a priori* à employer une tension aussi élevée que possible : le poids de cuivre nécessaire et les pertes par effet Joule (dégagement de chaleur) seront réduits au minimum. Mais on est limité par certaines difficultés qui, elles, tendent à s'accroître avec la tension : difficultés d'isolement de la ligne et des appareils, pertes par effluves (dont nous parlerons plus loin), etc.

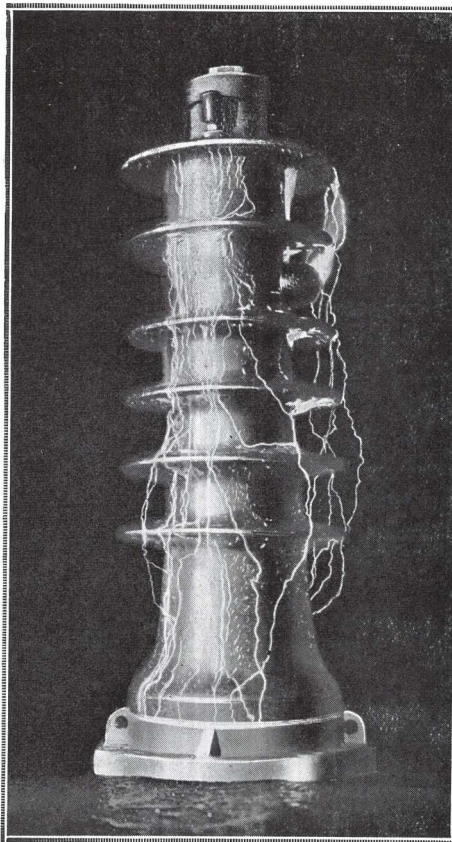
L'isolateur joue à cet égard un rôle prépondérant ; il apparaît comme l'élément vital d'un réseau de transport d'énergie. Il doit résister aux efforts de rupture mécanique provenant de la tension du câble, aux effets de dilatation des tiges métalliques et du ciment employés pour son montage ; offrir un isolement persistant pendant les pluies les plus violentes ; ne point présenter de cavités où s'accumulent les poussières, les dépôts salins, les buées qui rendent les surfaces conductrices, etc. Après de longs tâtonnements, on a adopté la forme de cloches pointues dont le plan très incliné facilite l'écoulement ; on groupe ces cloches en chapelets pour répartir entre elles la tension électrique totale et, par conséquent, la fatigue qu'on leur impose.

La qualité de la porcelaine est d'une importance capitale, et tous les fabricants cherchent depuis longtemps à réaliser la pâte idéale. Cette céramique industrielle, d'apparence grossière, qui décore les pylônes de transport ou les poteaux télégraphiques, présente des difficultés de composition et de cuisson qu'ignorent peut-être les produits les plus parfaits de la Manufacture de Sèvres ou des vieux artisans chinois. La porcelaine électrique est un composé, en proportions variables, de feldspath, de quartz et d'une argile plastique, kaolin ou autre. Il s'agit de composer ce mélange et de le cuire de façon à obtenir une matière partiellement vitrifiée aussi homogène et étanche que possible. Car la porcelaine, de même que le verre, n'est pas rigoureusement étanche. La vapeur d'eau de l'atmosphère la pénètre peu à peu malgré la glaçure, avec, il est vrai, une extrême lenteur. Mais ses fissures souvent invisibles favorisent à la fois les pertes de courant, les éclatements ou les courts-circuits que provoquent le givre ou la pluie. Le givre est terrible, comme on peut s'en rendre compte par une de nos photographies.

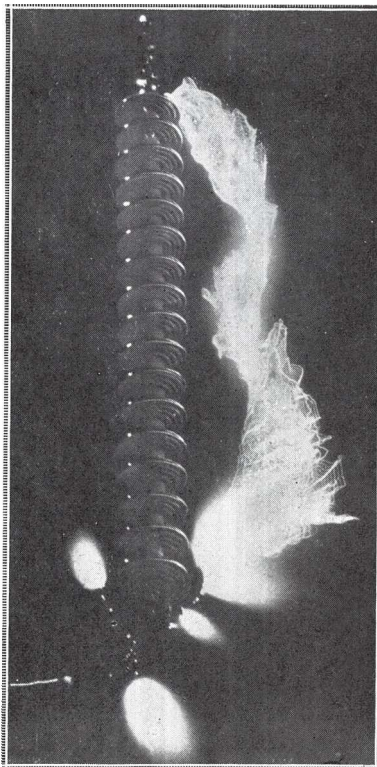
D'autre part, à mesure que la tension augmente, l'électricité tend à « gicler » autour du fil comme l'eau gicle d'un tuyau en toile soumis à une pression trop forte ; elle forme une couronne d'effluves (*effet couronne*) qui entraîne une perte notable et peut amorcer des courts-circuits.



Effluves lumineux s'échappant des isolateurs en porcelaine d'un pôle de sectionneur rotatif Delle, à 75.000 volts, sous une couche de glace.



Borne en porcelaine de disjoncteur à 75.000 volts, entourée de longues étincelles sous une pluie intense



Amorçage d'un arc-flamme à 1 million de volts.
EFFETS D'ISOLEMENT FORTUITEMENT RÉDUIT OU DE SURTENSION.

Ces diverses difficultés ont été résolues par étapes. Une technique s'est créée peu à peu ; bien qu'elle soit aujourd'hui très avancée, elle continue à se perfectionner grâce aux études qui se poursuivent chez les constructeurs et dans des laboratoires spéciaux où l'on étudie la résistance de matières nouvelles et de dispositifs inédits à des tensions supérieures à celles qui sont entrées dans le domaine courant. Il existe, aux environs de Paris, un laboratoire dont nous avons signalé l'inauguration, où l'on produit des tensions d'un million de volts et qui n'a rien à envier aux installations les plus grandioses de l'Amérique.

On ne doit pas seulement se préoccuper de réduire les pertes de courant ; il faut encore assurer la sécurité à l'usine, chez le consommateur et en

cours de transport, sécurité des personnes et sécurité des appareils exposés aux courts-circuits, aux surtensions, aux coups de foudre susceptibles de troubler gravement le fonctionnement de la ligne ou de détruire en une seconde des appareils valant plusieurs centaines de mille francs.

On peut « redresser » le courant, c'est-à-dire le transformer d'alternatif en continu ou inversement ; on peut aussi abaisser ou augmenter sa tension, en le faisant passer, en un point quelconque, par une seconde machine, dynamo ou alternateur. Mais il faut surveiller cette machine et circuler près du courant mortel. Le transformateur, dont notre compatriote Gaulard imagina le premier type, fonctionne sans surveillance et peut être enfermé dans une cabine ou une salle où ne pénètrent que les gens avertis. C'est lui qui sert à modifier la tension ; la transformation du courant alternatif en courant continu, ou inversement, est réalisée par la commutatrice.

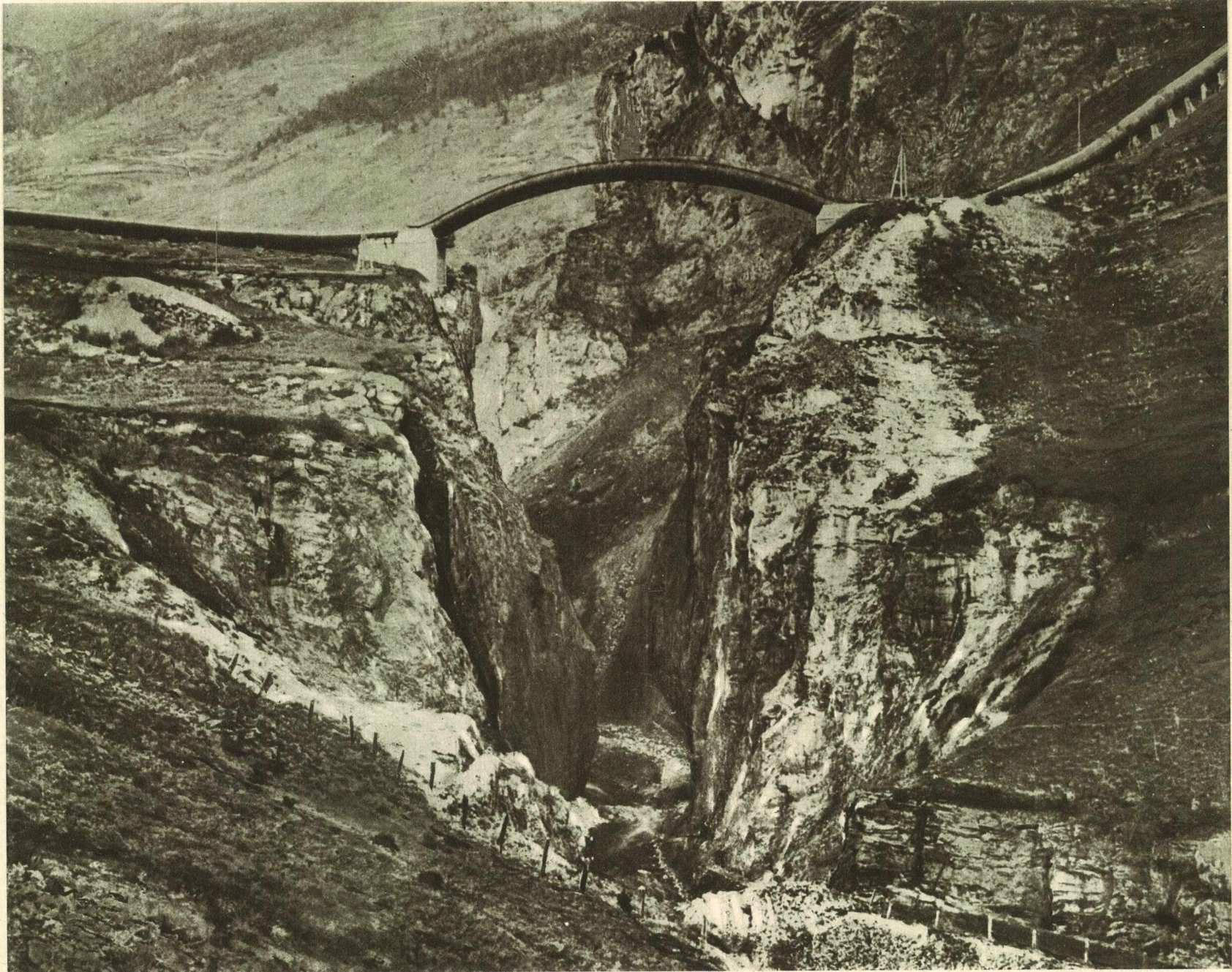
En général, le courant alternatif triphasé sort de l'alternateur actionné par la turbine à une tension de 3.000 à 15.000 volts. Il passe dans un premier transformateur, dit élévateur de tension ou survolteur, qui relève, suivant la distance à parcourir, à 50.000, 100.000 volts (on est allé jusqu'à 220.000 volts en Amérique), la tension de ce courant. Celui-ci s'en va alors le long des fils de cuivre ou d'aluminium portés par des isolateurs montés sur des pylônes en fer, en bois, en ciment armé. Dans les agglomérations, on préfère les lignes souterraines.

Au point d'utilisation, le courant est retransformé en sens inverse ; on abaisse la tension par des transformateurs abaisseurs de tension ou dévolteurs, avant de l'envoyer dans les réseaux de distribution qui le répartiront sans danger pour les usagers. En somme, fait remarquer M. Cavaillès, on procède comme l'industriel qui, avant d'expédier de l'alcool, élèverait le titre pour en diminuer le volume, titre qu'il abaisserait ensuite pour livrer le produit au public.

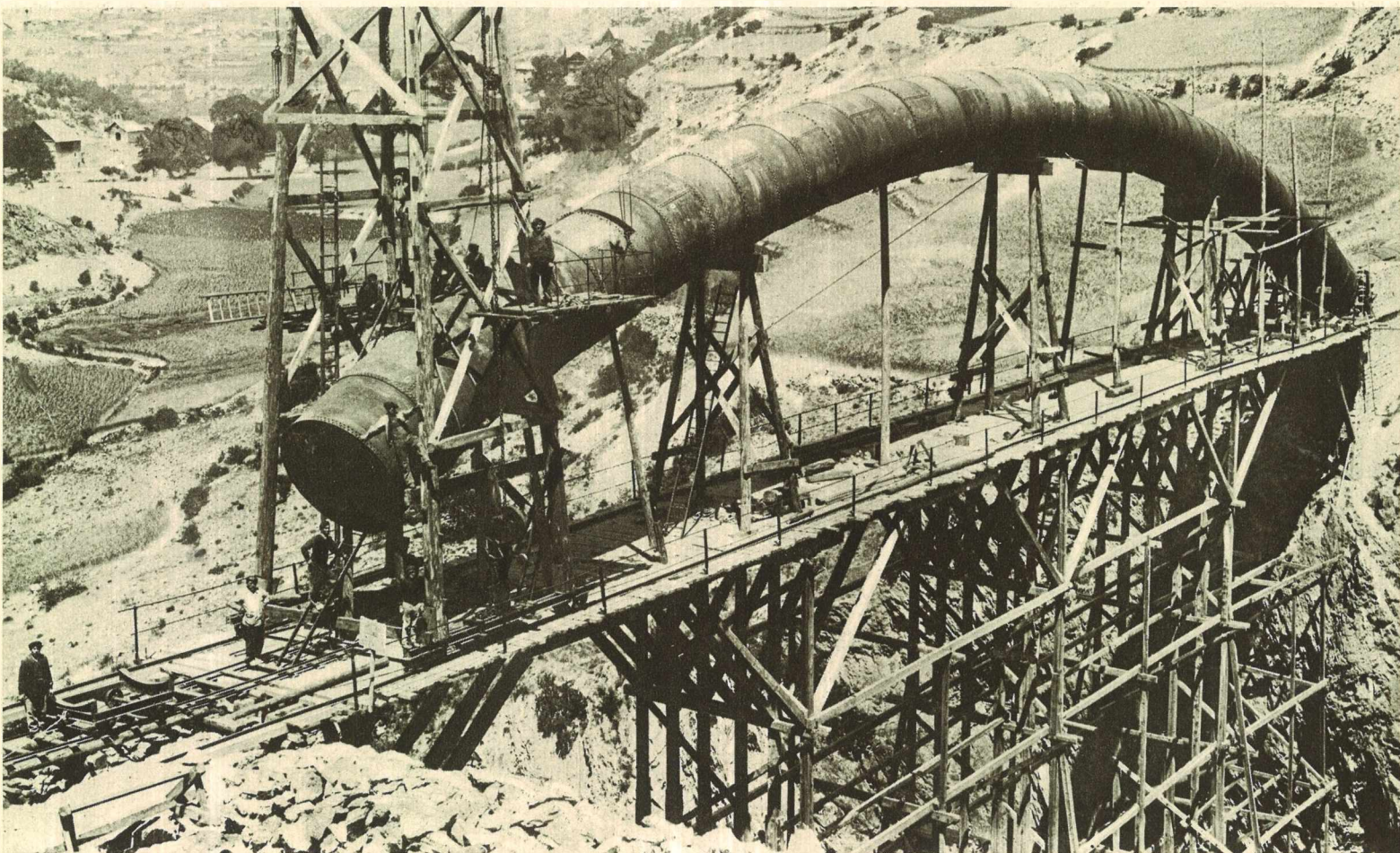
La construction des transformateurs devient fort délicate quand on envisage de hautes tensions. Réduit à sa plus simple expression, l'appareil comprend deux enroulements de fils autour d'une même carcasse de tôle de fer, dite noyau magnétique. Ces enroulements, qui sont distincts et n'ont aucun point commun, sont assujettis et immobiles, d'où le nom de transformateur statique. Quand un courant alternatif circule dans l'un des enroulements, il engendre dans le second, par induction, un courant de tension différente. Le rapport de cette dernière à la tension d'alimentation s'appelle rapport de transformation ; il dépend seulement du nombre de spires de chaque enroulement.

Quel que soit le sens de la transformation à obtenir, on met donc en présence deux éléments dont les tensions respectives présentent un écart considérable. Il est dès lors nécessaire de rendre l'intervalle qui les sépare suffisamment isolant pour éviter des courts-circuits et des étincelles d'éclatement. On emploie, à cet effet, divers procédés ; un des plus usités consiste à noyer les enroulements dans un bain d'huile minérale qui oppose une résistance très grande au passage du courant. Pour éviter un échauffement qui rendrait l'huile plus

L'ILLUSTRATION



Une conduite forcée dont l'audace ne dépare pas le paysage : ce siphon, d'une portée de 66 mètres, franchit le ravin de la Durance, à 98 mètres au-dessus de la rivière, pour amener les eaux de la Gyronde de Vallouise à l'usine de l'Argentière-la-Bessée (Hautes-Alpes).



Une phase du montage du siphon ci-dessus (le diamètre de la conduite est de 2 m. 60). — *Phot. Etablissement Joyu.*

AQUEDUC MODERNE AU SERVICE DE LA HOUILLE BLANCHE

conductrice, on refroidit celle-ci par un courant d'eau.

Tous ceux qui ont visité une station électrique ont aperçu les transformateurs, énormes réservoirs cylindriques ou elliptiques surmontés de deux cornes dépassant souvent un mètre de longueur qui sont les *bornes* de haute tension. Notre photographie montre l'intérieur d'un de ces appareils. A l'Exposition de Grenoble, on voit une installation sous 220.000 volts, la première en Europe, réalisée par les ateliers de constructions électriques de Delle.

La question des interrupteurs a aussi une grande importance. Quand, par suite d'accident, de panne ou pour toute autre cause, on veut interrompre sur une partie de ligne un courant de 60.000 ou de 100.000 volts, par exemple, la chose est moins simple que quand il s'agit d'éteindre le lustre de notre salon. On utilise pour cela des appareils plongés, comme les transformateurs, dans un bain d'huile ayant pour fonction d'étouffer les étincelles de rupture et d'absorber la chaleur considérable qu'elles dégagent.

Les interrupteurs sont appelés aussi à couper automatiquement le courant en cas de trouble sur le réseau. Ils sont munis de relais qui provoquent leur fonctionnement au moment voulu. Ils sont donc aussi des appareils automatiques de protection et sont appelés dans ce cas *interrupteurs automatiques* ou *disjoncteurs*. Ils affectent des formes et des dimensions analogues à celles des transformateurs.

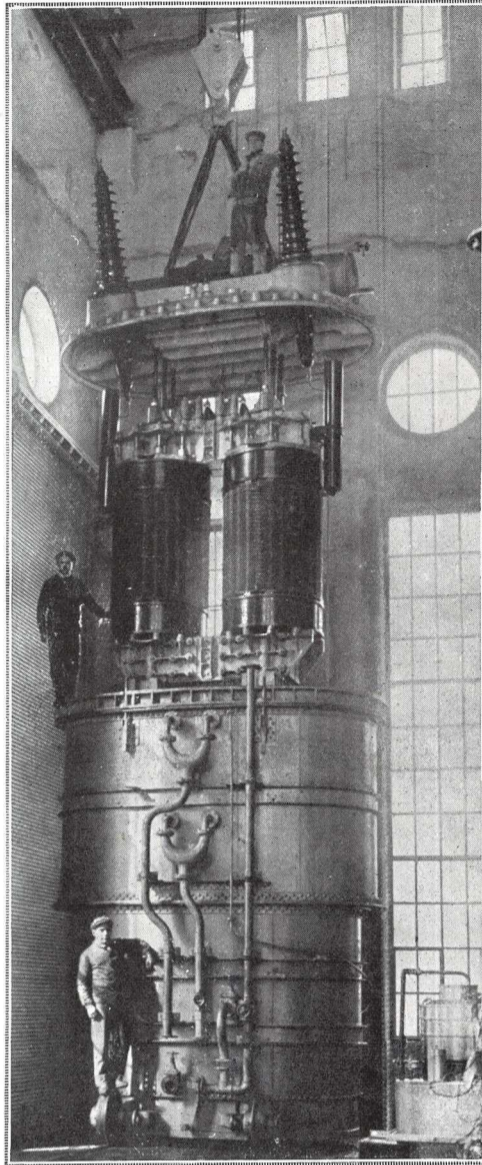
Les prix progressant rapidement avec les tensions et avec les puissances, le bénéfice que l'on obtiendrait en réduisant la perte en ligne est quelquefois inférieur à l'excès de dépense qu'exigerait l'augmentation de tension correspondant à cette réduction. Il y a un point limite qu'indique le calcul.

Quoi qu'il en soit, la technique très complexe du transport d'énergie électrique est fort avancée. On transporte aujourd'hui le courant sous des tensions de 150.000 ou 220.000 volts avec une perte en ligne ne dépassant guère 10 %.

Il est un danger grave auquel se trouvent exposées les lignes et les usines électriques ou les personnes qui les desservent : celui des coups de foudre. L'intensité mise en jeu dans un coup de foudre est évaluée par les théoriciens comme variant entre 10.000 et 100.000 ampères. Les coups de foudre directs sur les circuits électriques sont assez rares, mais l'électricité atmosphérique détermine dans les circuits des surtensions qu'il faut éviter.

Pour comprendre la difficulté de combiner un bon parafoudre, rappelons qu'environ 75 % des coups de foudre sont multiples. Notre photographie montre un coup de foudre composé de 44 décharges distinctes ayant duré en tout 71 centièmes de seconde. Cette durée représentant à peu près 42 périodes d'un courant de 60 périodes, il y eut environ une décharge par période. Chaque décharge peut causer dans la ligne et dans l'usine une perturbation profonde qu'un parafoudre doit être prêt à éliminer. Or, après avoir absorbé une décharge, ce parafoudre ne peut absorber la suivante que s'il est revenu à son état de neutralité primitif.

On emploie à cet effet divers appareils. Le plus récent et le plus « amusant » est formé de deux plaques de laiton serties sur une bague de porcelaine. L'espace compris entre la bague et les tôles est rempli de peroxyde de



Transformateur monophasé de 10.500 à 120.000 volts pour 4.666 kilovoltampères, construit par MM. Schneider et C^{ie} pour l'usine de Chancy-Pougny.

La photographie, prise en cours de montage, laisse voir le noyau magnétique et les enroulements. Cet ensemble doit être descendu dans la cuve remplie d'huile, refroidie par un courant d'eau, qui sera fermée par le capot que l'on voit à la partie supérieure de l'appareil et sur lequel on aperçoit ici un homme s'appuyant à l'une des deux bornes de haute tension. Ce transformateur, en ordre de marche, pèse 43.000 kilos, dont 14.500 kilos d'huile et 1.660 kilos de cuivre pour les enroulements.

plomb en poudre et les surfaces internes du laiton sont recouvertes d'un vernis isolant. Quand la tension vient à dépasser sensiblement la normale, la pellicule de vernis claque sur certains points et se craquelle. Le courant s'insinue à travers ce réseau et son passage n'est plus limité que par la résistance du peroxyde de plomb.

Aux points de passage, il se produit donc un afflux considérable du courant et il se forme un petit arc qui, provoquant l'échauffement du peroxyde, le transforme en un oxyde isolant de très haute résistance : le courant est interrompu. La reformation de la pellicule isolante s'opère en moins de $1/4.000^{\circ}$ de seconde et le cycle continue.

La plus haute tension actuellement utilisée en France est celle de la ligne d'Eget à Lannemezan, longue d'environ 40 kilomètres, qui alimente, sous 120.000 volts provisoirement, et bientôt sous 150.000, le réseau de la Compagnie du Midi. Cette Compagnie achève une ligne de 200 kilomètres portant le courant de la vallée d'Ossau à Bordeaux sous 150.000 volts. L'usine en construction à Eguzon (Creuse), appelée à desservir Paris et le réseau d'Orléans, enverra le courant à une distance de 300 kilomètres sous 150.000 volts et probablement plus loin sous 200.000 volts. Le courant de l'usine projetée sur le Rhône à Génissiat serait amené à Paris, soit 400 kilomètres, sous 220.000 volts. On vient de mettre en service la ligne à 120.000 volts de Chancy-Pougny au Creusot, qui alimente les usines de ce gros centre industriel avec l'énergie du Rhône, captée à 150 kilomètres du point d'utilisation. De même les usines de Saint-Etienne et Saint-Chamond reçoivent l'énergie des chutes avoisinant Grenoble par une ligne à 120.000 volts de même longueur.

Jusqu'à présent, la plus longue ligne de l'Europe est celle de Molinar à Madrid : 265 kilomètres. En Amérique, les lignes supérieures à 300 kilomètres sont nombreuses. En Afrique, on envisage une ligne de 1.200 kilomètres sous 150.000 volts, transportant à Johannesburg l'énergie des chutes du Zambèze.

Les lignes de transport ignorent les frontières, les montagnes et les mers. La Suisse vend du courant en Alsace, en Allemagne, en Italie ; l'Espagne éclaire la région de Biarritz. Dans les Alpes françaises, la ligne qui va du Rivier d'Almond à Brignoud traverse le massif de Belledonne à 1.580 mètres d'altitude. Les usines suédoises expédient leur énergie à Copenhague au moyen d'un câble immergé à travers le détroit du Sund. Les

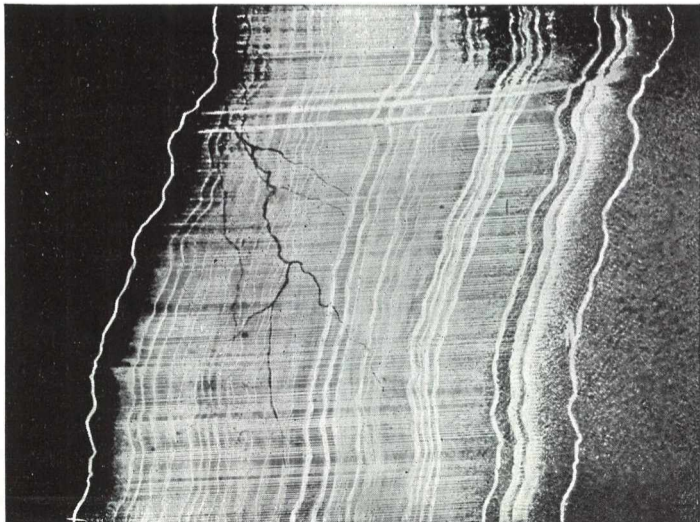
pylônes supportant les conducteurs sont établis à des intervalles variant, en général, de 200 à 300 mètres. En Italie, la ligne de Brugherio à Reggio d'Emilie traverse le Pô près de Plaisance avec une portée de 883 mètres.

Sur l'initiative de M. Le Trocquer, naguère ministre des Travaux publics, on poursuit la réalisation d'un réseau à haute tension appelé à desservir toute la France. Le courant, fourni tantôt par la houille blanche, tantôt par la houille noire, sera envoyé dans de grandes centrales de distribution qui l'enverront à des stations secondaires. Des connexions seront établies entre les usines hydrauliques alimentées par des cours d'eau de bassins ou de régimes différents, de manière que chaque usine puisse toujours utiliser sa puissance saisonnière maxima en venant au secours des usines momentanément déficitaires. Notre carte montre l'état d'avancement de ce réseau qui facilitera l'électrification des chemins de fer et qui apportera la lumière et l'énergie électriques dans nombre de régions qui en sont encore plus ou moins privées.

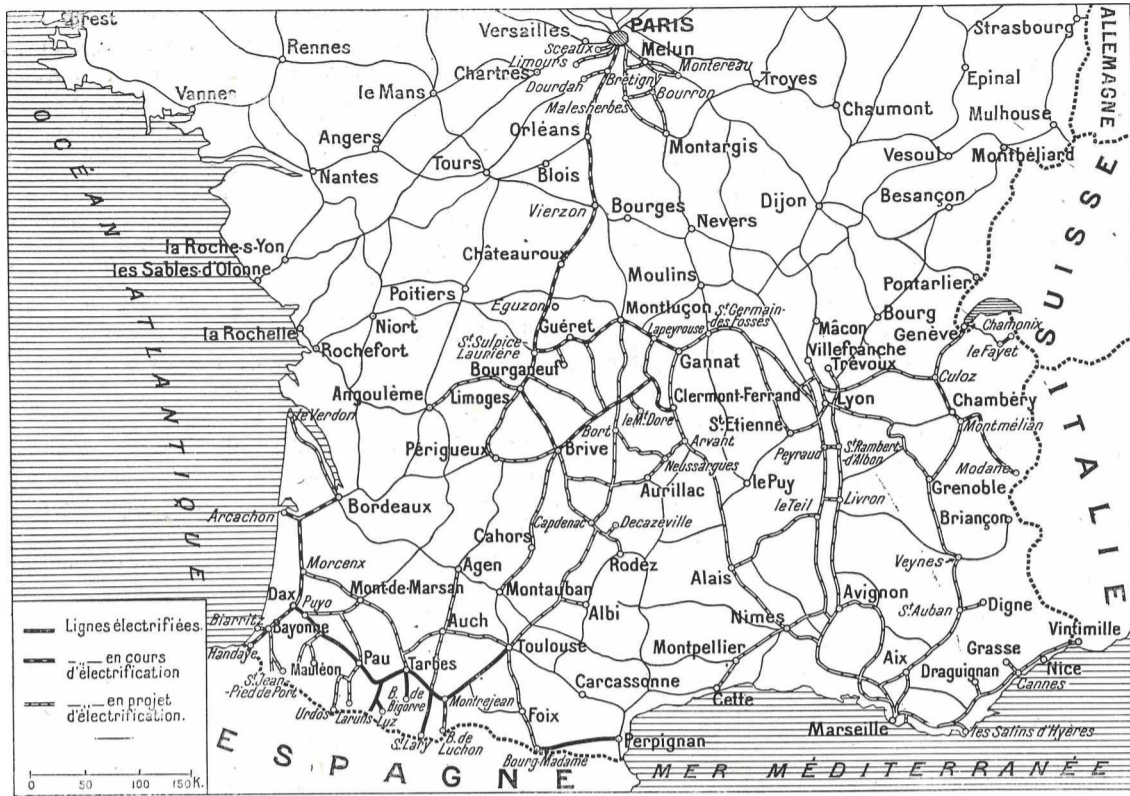
L'ÉLECTRIFICATION DES CHEMINS DE FER

Après la distribution de la lumière ou de la force motrice qui anime les usines les plus variées, l'électrification des lignes de chemins de fer ou de tramways apparaît comme la plus importante application industrielle de l'énergie fournie par les torrents et transmise par les lignes à haute tension. Dans tous les pays riches en houille blanche, la traction électrique tend à se substituer à la traction à vapeur ; elle présente sur cette dernière des avantages évidents, mais ne s'imposant que dans des cas déterminés.

Alors qu'une locomotive à vapeur exige trois ou quatre heures de mise en pression, il suffit d'abaisser une manette pour lancer une locomotive électrique. Avec celle-ci, le démarrage est beaucoup plus rapide. Alors que la machine à vapeur ne franchit pas pratiquement des rampes supérieures à 35 millimètres par mètre, la traction électrique permet de gravir sans peine

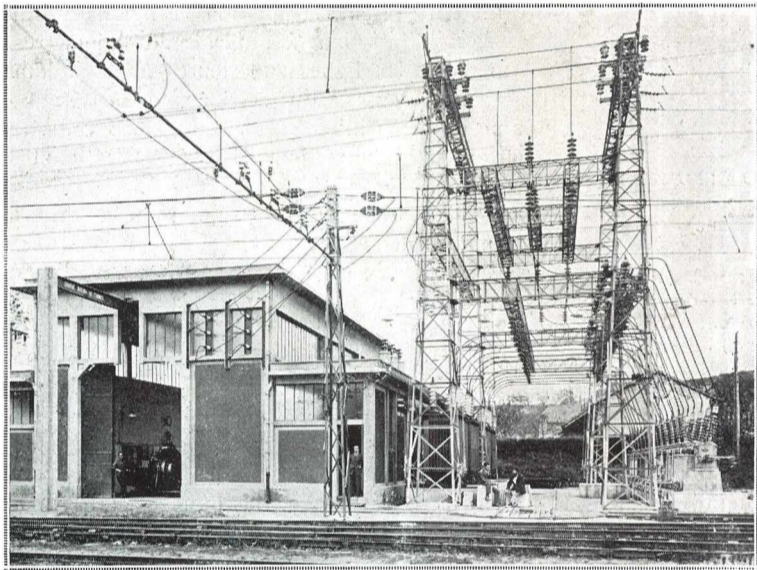


Photographie d'un coup de foudre composé de 44 décharges successives et ayant duré 71 centièmes de seconde.



L'électrification des lignes de chemins de fer français.

des rampes de 60 millimètres. On peut donc abrégier les tracés et éviter les tunnels de base. En outre, la traction est plus douce, les secousses produites par le mouvement alternatif des pistons étant supprimées. Enfin, plus de fumée, plus d'escarbilles incendiant les forêts ; la main-d'œuvre est



Sous-station de transformation de Tournay (Hautes-Pyrénées), sur la ligne de Tarbes à Toulouse, installée par les ateliers de constructions électriques de Deile.

Les sous-stations de ce type sont établies en bordure de la voie, espacées d'une vingtaine de kilomètres. Elles transforment le courant triphasé à 60.000 volts en courant continu à 1.500 volts qui alimente les locomotives, comme l'indique le schéma ci-dessous.

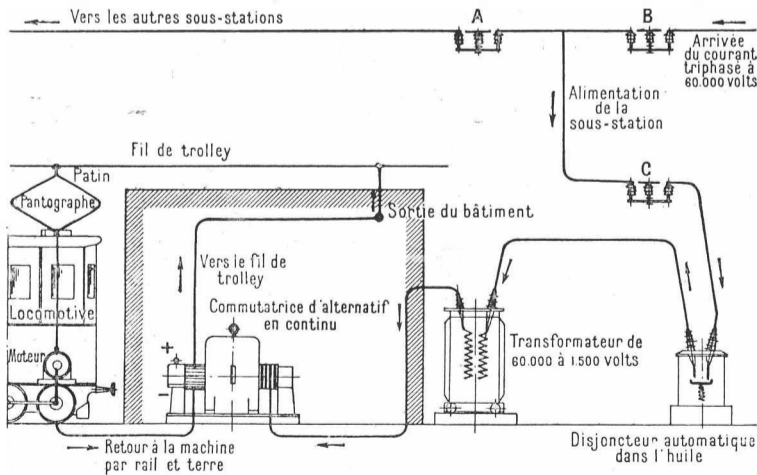


Schéma du poste ci-dessus.

Le courant triphasé à haute tension (60.000 volts) passe par les sectionneurs A et B, manœuvrables de l'intérieur du poste, qui permettent de couper la ligne en amont ou en aval pour effectuer une réparation ou pour toute autre cause. Le sectionneur C est utilisé pour séparer la sous-station de la ligne sans interrompre la continuité de cette dernière. Le disjoncteur automatique n'intervient que pour couper la dérivation en charge quand il se produit un accident, par exemple un court-circuit. Le transformateur abaisse à 1.500 volts la tension du courant alternatif, qui est ensuite transformé en courant continu par la commutatrice. Des câbles conduisent ensuite ce courant aux fils de trolley. Le retour du courant, qui a traversé les moteurs des locomotives, se fait par les rails et la terre.

diminuée, le rendement atteint 40 % de l'énergie originelle, tandis qu'une locomotive ordinaire utilise à peine 10 % de l'énergie libérée par le charbon. Pour ces diverses raisons, même obtenue avec la houille noire, la traction électrique peut se traduire dans certains pays par une économie importante sur la traction à vapeur.

L'électrification des réseaux, commencée de bonne heure en Italie, où le charbon manque, fut envisagée assez tard en France. La raison est peut-être psychologique. Il n'y a pas longtemps, on entendait encore de vieux ingénieurs, président à la destinée des chemins de fer, affirmer que la locomotive à vapeur, qu'ils avaient peu à peu perfectionnée, ne serait probablement jamais détrônée. A cette foi de métier s'ajoutait souvent la crainte, très humaine, de se voir supplanter par des jeunes, experts en science électrique à laquelle ils n'entendaient pas grand'chose. Il est aussi des raisons plus sérieuses. La facilité de démarrage, très précieuse sur les lignes de tramways, est inutile aux grands express qui s'arrêtent rarement ; les pannes de courant apportent plus de trouble dans un réseau qu'une panne de machine ; enfin, et c'est l'objection la plus grave, le jour où l'on veut augmenter la capacité d'une ligne électrique, c'est-à-dire le débit des trains, on se trouve fort embarrasé par l'insuffisance du courant. Pour la traction à vapeur, il suffit d'ajouter quelques locomotives sur les rails. Aujourd'hui, ces diverses considérations s'effacent devant la nécessité de réduire, dans la plus large

mesure possible, nos importations de charbon.

Dès avant guerre, M. Paul, directeur des chemins de fer du Midi, avait entrepris l'électrification de son réseau. Le Midi et les Pyrénées produisent peu ou point de charbon ; par contre, la houille blanche y abonde et quelques lacs de montagnes constituent des réservoirs régulateurs permettant d'assurer assez économiquement la constance de débit qu'exige la marche des trains.

Le problème reste néanmoins fort complexe. Voici trois ou quatre gaves, au bord desquels on installe cinq ou six usines. Ces usines envoient le courant alternatif à très haute tension à des postes répartis sur le réseau, chargés de le transformer en courant continu à 1.500 volts qui va courir le long des lignes. Deux cents trains circulent à la fois sur le réseau, souvent à des centaines de kilomètres les uns des autres ; ceux-ci s'arrêtent ou descendent, tandis que ceux-là gravissent des rampes demandant un grand supplément d'énergie. Il arrive que tous circulent en même temps ou que quelques-uns seulement continuent à rouler. Tout ce mouvement est commandé par l'arrivée du gave, au flot inégal, sur quelques turbines envoyant le courant dans des centrales étroitement solidaires chargées de le distribuer en évitant les retards et les pannes, et sans que ces masses de courant viennent troubler le courant minime des lignes télégraphiques qui bordent la voie. Ces difficultés ont été résolues avec une maîtrise telle que le réseau électrique du Midi est considéré par les techniciens comme le plus parfait du monde. Ses usines de Fontpédrouse, d'Eget, de Soulom, du val d'Ossau lui fournissent une puissance totale de plus de 100.000 chevaux, et la traction électrique est actuellement en service sur des lignes qui représentent un total de 500 kilomètres : Perpignan à Villefranche-de-Conflent et Bourg-Madame, Dax à Toulouse, Lourdes à Pierrefitte-Nestalas, Tarbes à Bagnères-de-Bigorre.

Les lignes Bordeaux-Irun et Montrejeau-Luchon, Lamothe à Arcachon et la Négresse-Biarritz seront exploitées électriquement à la fin de l'année. Le programme général comprend 3.300 kilomètres électrifiés sur les 4.300 dont s'enorgueillira dans trente ans un réseau qui en compte aujourd'hui 4.000.

La Compagnie d'Orléans a décidé l'électrification, en trois étapes, de 2.543 kilomètres de lignes. La ligne de Paris à Brive, avec embranchement Brétigny-Dourdan, est en cours d'équipement et fonctionnera sans doute jusqu'à Vierzon l'année prochaine. La Compagnie a pris à sa charge la construction d'un certain nombre d'usines hydrauliques sur la Haute-Dordogne ; elle est en outre intéressée dans l'usine d'Eguzon, sur la Creuse, en service à la fin de cette année et qui sera équipée pour au moins 60.000 chevaux.

Un réseau à 90.000 volts assurera l'alimentation des sous-stations de traction et des régions traversées ; une ligne à 150.000 volts, actuellement terminée entre Eguzon et Vierzon, permettra d'amener jusqu'à l'usine de Gennevilliers la partie de l'énergie produite dans le Massif Central qui ne sera pas absorbée par la traction ou par les besoins régionaux.

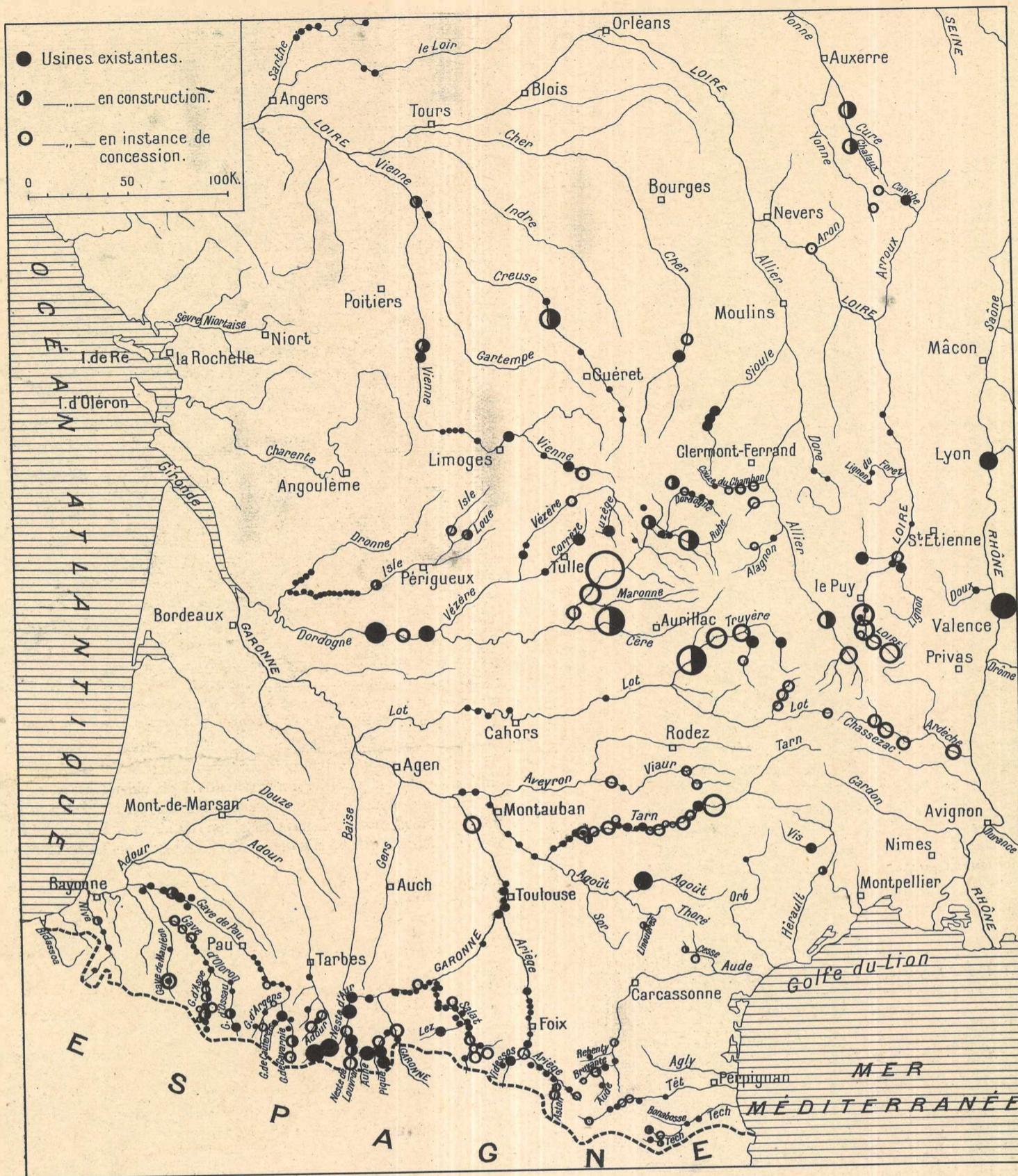
Le P.-L.-M. a commencé l'électrification de la ligne de Culoz à Modane, qu'il compte mettre en service vers la fin de 1925. L'énergie sera fournie par les usines hydroélectriques des bassins de l'Arly et du Bonnant. On équipera ensuite les lignes du littoral de Marseille à Vintimille, en commençant par la section de Carnoules à la frontière. Le courant sera fourni par la société *Energie électrique du littoral méditerranéen*. On envisage pour une époque plus lointaine l'électrification de la banlieue parisienne et des principales lignes de la région comprise entre Lyon et la Méditerranée, ces dernières formant un total d'environ 3.000 kilomètres.

Les Compagnies de l'Est et du Nord conserveront la traction à vapeur pour raison stratégique.



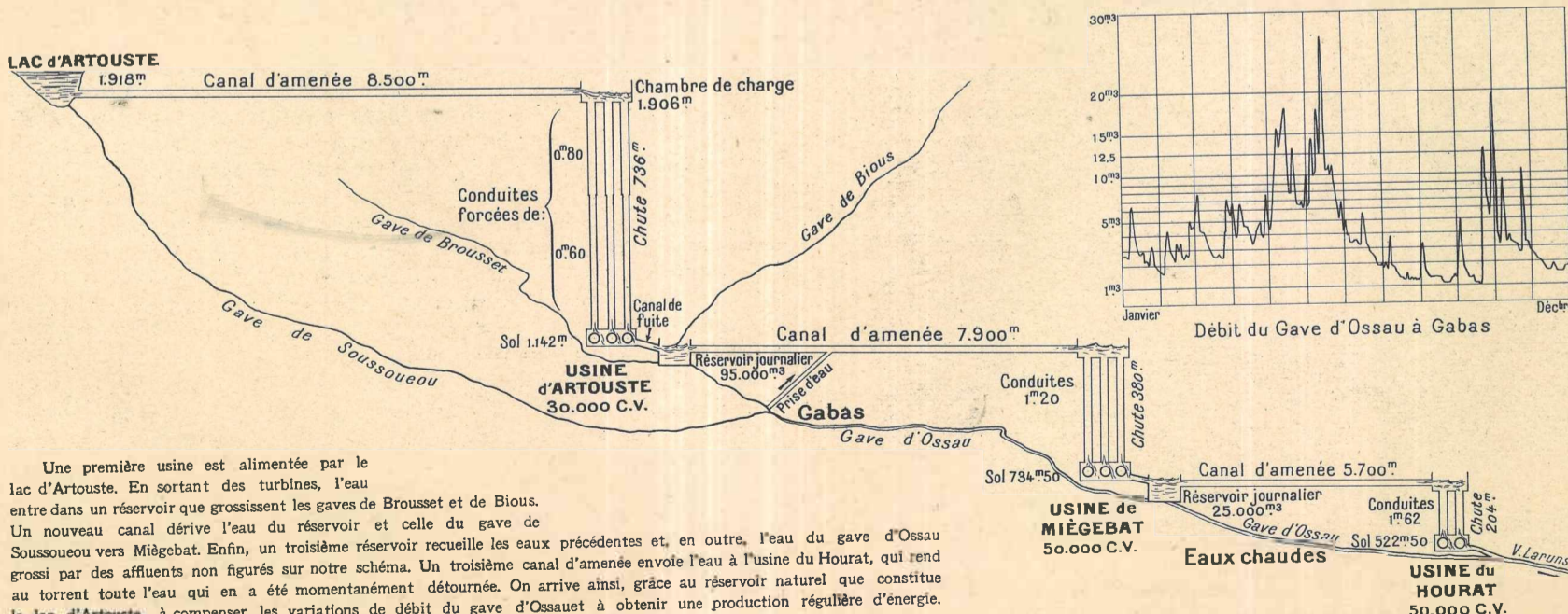
LA HOUILLE BLANCHE ET LE TOURISME ENTRE LE RHONE ET LA FRONTIERE DES ALPES

Chaque usine est représentée par un cercle d'une surface proportionnelle à sa puissance. Seules sont indiquées les usines dont la puissance normale dépasse 200 kilowatts, soit à peu près 300 chevaux. Les plus importantes ont une puissance installée de l'ordre de 30.000 à 40.000 chevaux.



LA HOUILLE BLANCHE DANS LE MASSIF CENTRAL ET DANS LES PYRÉNÉES

Chaque usine est représentée par un cercle d'une surface proportionnelle à sa puissance. Seules sont indiquées les usines dont la puissance normale dépasse 200 kilowatts, soit à peu près 300 chevaux. Les plus importantes ont une puissance installée de l'ordre de 30.000 à 40.000 chevaux.



Une première usine est alimentée par le lac d'Artouste. En sortant des turbines, l'eau entre dans un réservoir que grossissent les gaves de Broussset et de Bious. Un nouveau canal dérive l'eau du réservoir et celle du gave de Soussoueu vers Miégebat. Enfin, un troisième réservoir recueille les eaux précédentes et, en outre, l'eau du gave d'Ossau grossi par des affluents non figurés sur notre schéma. Un troisième canal d'aménée envoie l'eau à l'usine du Hourat, qui rend au torrent toute l'eau qui en a été momentanément détournée. On arrive ainsi, grâce au réservoir naturel que constitue le lac d'Artouste, à compenser les variations de débit du gave d'Ossau et à obtenir une production régulière d'énergie.

SCHEMA DE L'INSTALLATION EN CASCADE DANS LE VAL D'OSSAU DES TROIS USINES DE LA COMPAGNIE DES CHEMINS DE FER DU MIDI.

L'ÉLECTROCHIMIE ET L'ÉLECTROMÉTALLURGIE

Nous avons envisagé l'utilisation du courant électrique issu de la houille blanche sous la forme qui a pris le plus d'ampleur : transport à distance pour distribuer l'énergie à des prix plus avantageux que celui de la vapeur. Cet emploi de l'énergie hydraulique ne représente qu'une commodité. Il nous reste à examiner les progrès industriels spéciaux dus au prix longtemps fort minime du courant hydroélectrique, progrès qui rentrent tous dans le domaine de l'électrochimie ou de l'électrometallurgie.

L'électrochimie comprend deux branches : l'électrolyse par voie humide, qui traite les sels dissous ; l'électrolyse par voie ignée, qui s'applique aux sels fondus et, par conséquent, se pratique à haute température.

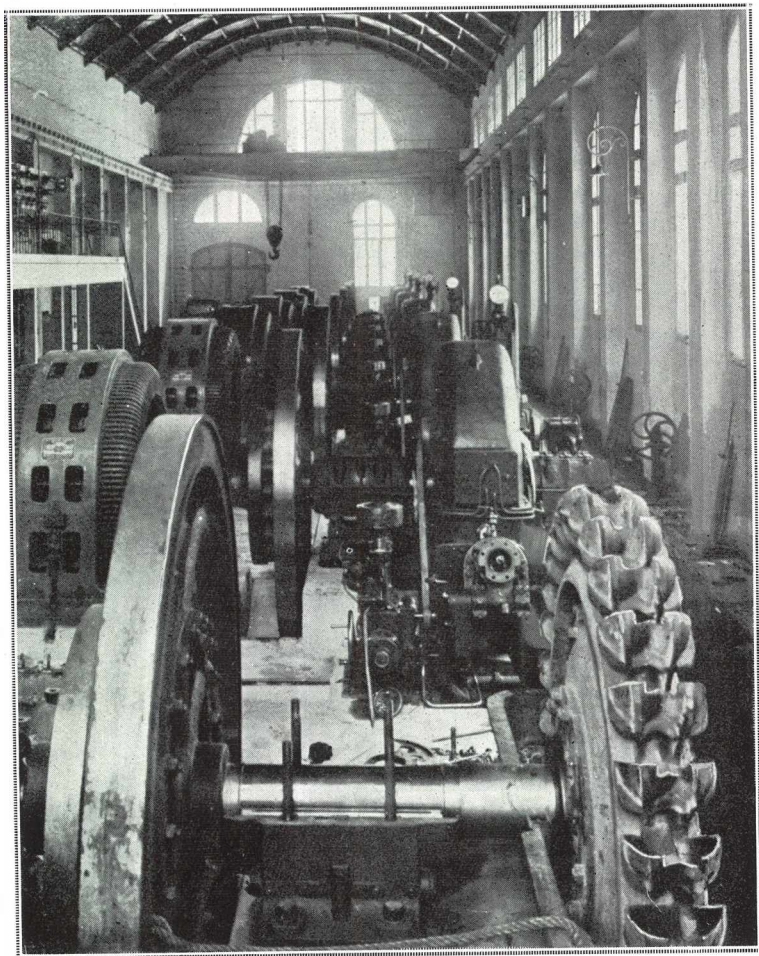
L'électrolyse par voie humide consiste à décomposer une solution aqueuse en la faisant traverser par le courant. Basée sur le même principe que la galvanoplastie, elle apparut, à l'origine, comme le meilleur mode d'utilisation sur place, dans les coins perdus des Alpes, de l'énergie fournie par la houille blanche.

Elle est régie par un petit nombre de lois rigoureuses et par nombre d'influences accessoires dont le mécanisme est parfois difficile à discerner.

Prenons le cas le plus simple : celui d'une solution de sulfate de cuivre. Sous l'influence du courant, le cuivre va se déposer sur la cathode (électrode négative), et l'acide sulfurique avec lequel il était combiné est transporté à l'anode (électrode positive). Quand celle-ci est peu attaquable, l'acide se dégage ; dans le cas contraire, il la dissout. Si elle est en cuivre, ce cuivre régénère la solution dont le titre reste invariable. En résumé, le métal du sel se porte toujours à la cathode et son « radical » va à l'anode. On peut donc employer comme cathode soit un moule rendu conducteur que le métal va recouvrir, soit un objet en métal qu'avec un bain approprié il est facile d'argenter, de dorer, de nickeler, etc. L'opération, très lente, s'accomplit avec une rare précision : il y a une proportion invariable entre l'intensité du courant et la quantité de chaque substance libérée dans un temps donné, et l'on arrive à déposer automatiquement sur un objet quelconque la quantité prévue de métal, à quelques milligrammes près.

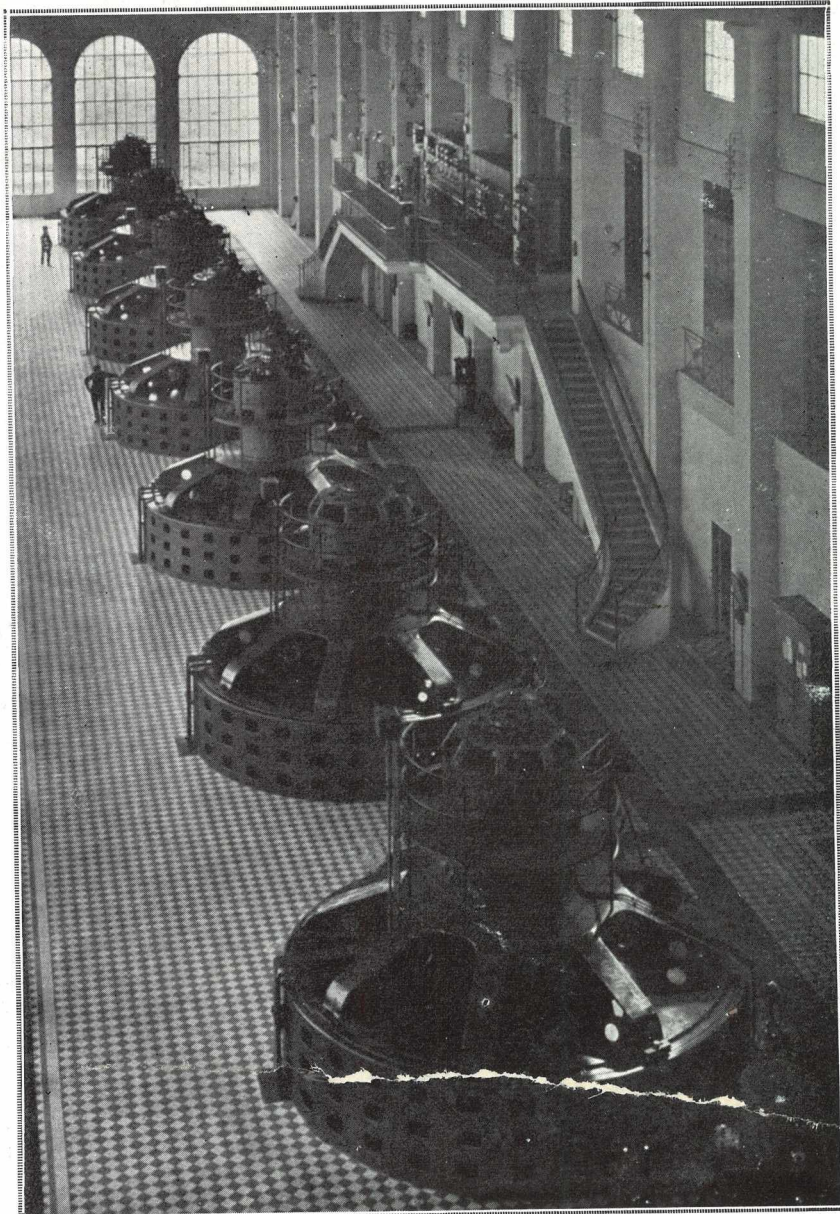
Le métal se rassemble en molécules d'une finesse presque colloïdale qui s'agglutinent les unes aux autres, produisant une matière un peu grenue, assez cassante, qu'il suffit de passer au four, à une température modérée, pour lui donner une structure normale. Le métal ainsi préparé revient beaucoup plus cher que celui obtenu à chaud ; il présente l'avantage d'être à peu près chimiquement pur. Aussi emploie-t-on ce procédé pour l'affinage du cuivre, du zinc, du plomb, de l'or et de quelques métaux demandés par les laboratoires et les industries d'art. Les établissements Bouchayer, à Grenoble, obtiennent par électrolyse des tubes en fer sans soudure dont l'homogénéité est fort appréciée pour certains usages spéciaux.

L'électrolyse humide est employée surtout pour extraire du sel marin la



Salle des machines de l'usine d'Eget, dans les Hautes-Pyrénées (usine de haute chute).

Cette usine de la Compagnie du Midi est alimentée par une chute de 750 mètres de hauteur brute, qui actionne 7 turbines françaises de 5.000 chevaux, type Pelton, montées sur axe horizontal. Chaque turbine, couplée sur un alternateur, vu à gauche, est enveloppée par une bache en fonte qui reçoit les éclaboussures. La turbine du premier plan est vue en cours de montage et l'on aperçoit la roue à augets ; l'injecteur décrit page 582 attaque cette roue au-dessous du plancher.



Salle des machines de l'usine de la Basse-Isère, près de Valence (usine de basse chute).

Cette usine, qui fonctionne sous une chute d'environ 10 mètres, comprend 7 turbines françaises Neyret-Beylier, fournissant chacune une puissance de 5.600 à 6.400 chevaux ; ces turbines, à axe vertical, sont installées sous le plancher, comme l'indique notre schéma de la page 584 ; elles sont couplées avec les alternateurs qui, seuls, sont visibles. Chaque turbine peut débiter environ 50 mètres cubes par seconde.

soude, le chlore et ses composés ; pour retirer des eaux mères des salines le magnésium ; pour traiter certains minerais d'argent, d'antimoine, d'étain, de nickel, etc. Les moindres détails dans la composition du bain, dans sa densité ou sa température, dans la forme ou la composition des électrodes, dans la tension ou l'intensité du courant, peuvent influencer sur les résultats. Aussi les usines d'électrolyse sont rigoureusement fermées ; nul n'est admis à y pénétrer. On n'y voit d'ailleurs que de longues théories de cuves totalement dépourvues d'intérêt pour le profane.

L'ALUMINIUM

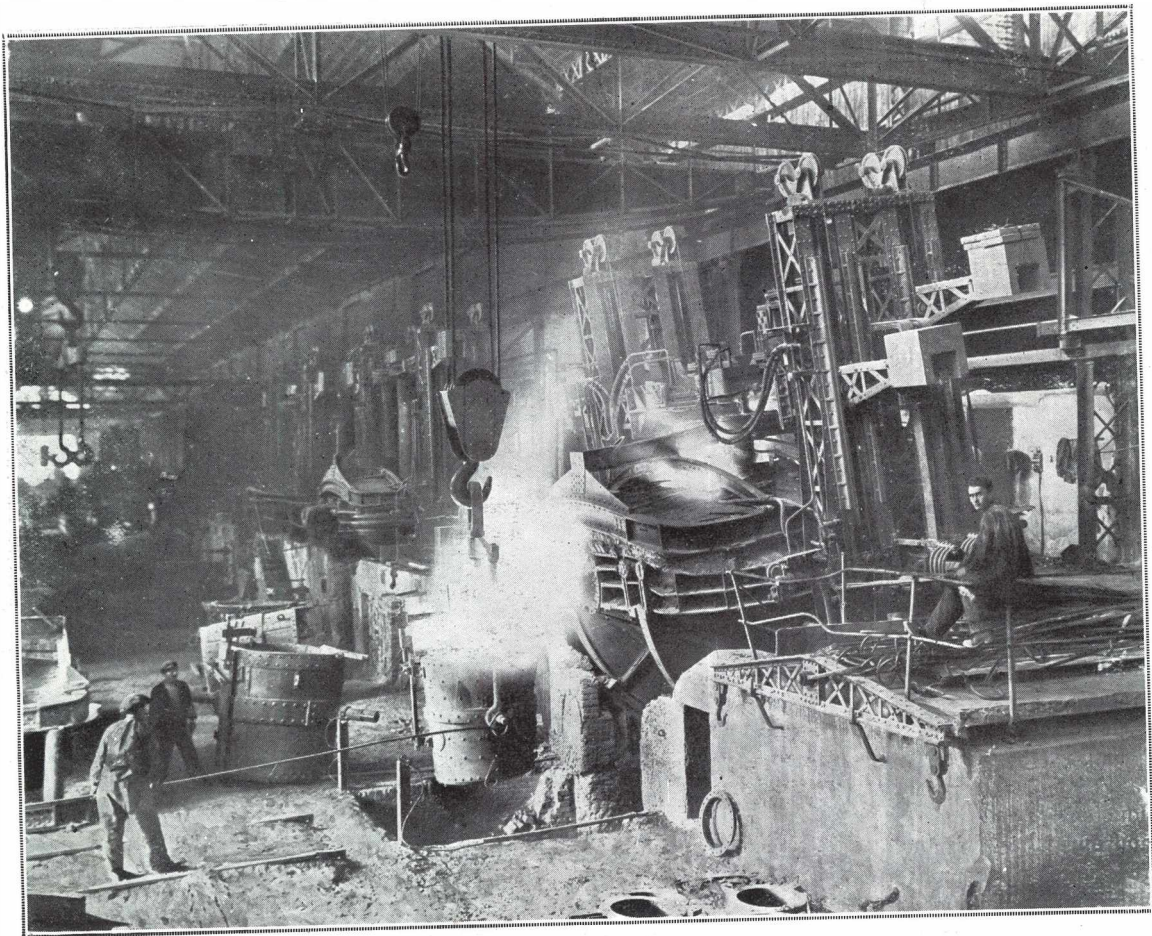
L'électrolyse par voie ignée a des applications plus restreintes, mais elle a complètement révolutionné la préparation de l'aluminium.

C'est encore à un Français, ou plutôt à deux Français, Sainte-Claire-Deville et Paul Héroult, qu'on doit la vulgarisation de ce métal, dont la préparation industrielle, cherchée pendant quarante ans par les chimistes du monde entier, dérive de la houille blanche.

On a souvent attribué l'isolement de l'aluminium au chimiste allemand Wöhler, qui, en 1827, en obtint quelques grammes sous forme d'une poussière à l'aspect à peine métallique. M. Matignon, professeur au Collège de France, et M. Faurholt semblent avoir établi récemment, dans *la Science moderne*, que la priorité appartient au savant danois Ørstedt qui s'est illustré par la découverte de l'électromagnétisme. Mais c'est Sainte-Claire-Deville qui réussit le premier, en 1854, à préparer le métal à l'état pur et en quantité appréciable. Plusieurs lingots figurèrent à l'Exposition de 1855, non loin de la vitrine des diamants de la couronne. Le public fut enthousiasmé par l'éclat et surtout par la légèreté de ce « nouvel argent ». On lisait, dans *L'Illustration* du 1^{er} septembre 1855 :

« Un lingot d'aluminium a été placé à côté d'un lingot d'argent, et, au bout d'un mois, quand l'un et l'autre ont été touchés par un million de mains (ce chiffre n'est pas arbitraire, il a été calculé par un employé), l'argent était devenu tout noir, tandis que l'aluminium n'avait rien perdu de sa blancheur un peu bleuâtre. »

Le prix de revient, qui oscillait d'abord entre 1.200 et 1.500 francs le kilo, tomba bientôt à 300 francs. C'était encore beaucoup trop cher, et l'aluminium fut délaissé jusqu'au jour (1886) où Paul Héroult inventa le procédé de préparation électrolytique qui consiste à décomposer de l'alumine dans un bain de cryolithe en fusion par un courant électrique aboutissant au bain.



Four électrique Pau. Girod, au moment de la coulée.

Dans ce vaste hall des fours de l'usine d'Ugines, on voit, au premier plan, rattachant un peu la proue d'un navire, un four de 25 tonnes qu'on fait basculer sur son berceau pour laisser couler l'acier en fusion qu'on recueille dans la « poche » maintenue par un ouvrier. A droite des fours se dressent les potences avec poulies qui maintiennent les électrodes à une distance convenable du bain à mesure qu'elles se consomment.

N'ayant pas trouvé en France les capitaux nécessaires pour exploiter son invention, Héroult créa l'usine de Neuhausen, au pied de la chute du Rhin. Quelques mois plus tard, la *Société électrometallurgique française* construisait à Froges, sur l'Isère, en amont de Grenoble, la première usine hydroélectrique d'aluminium des Alpes. Une autre s'élevait bientôt à la Praz, en Maurienne, et, en 1891, M. Bernard, père du célèbre auteur dramatique Tristan Bernard, édifiait dans la même vallée l'usine de *Calypso* qui détient encore, semble-t-il, le record de la situation sauvage après avoir détenu quelque temps celui de la hauteur de chute, avec 600 mètres.

Aujourd'hui, on compte en France 11 usines hydroélectriques d'aluminium dont 5 établies en chapelet dans la vallée de l'Ac surnommée la vallée de l'Aluminium. Ces usines sont encore plus fermées que les usines d'électrolyse ; il est moins aisé de pénétrer dans la salle des cuves que d'être admis à contempler le tombeau d'Abraham.

L'aluminium ne peut guère se préparer économiquement qu'avec la houille blanche, car il faudrait environ 10 tonnes de charbon pour produire une tonne de métal. Le cours actuel est d'environ 1.000 francs ; avant guerre, il se tenait autour de 300 francs. Après avoir atteint 4.500 francs, avant l'application du procédé électrolytique d'Héroult, il était tombé, en 1909, à 150 francs.

Ce métal, à l'origine métal « précieux », est devenu un métal industriel dont l'emploi suit une progression constante. Ses qualités caractéristiques sont : faible densité, 2,7 (fer, 7,8) ; inaltérabilité *très grande* qui laisse nombre d'acides, même assez concentrés, sans action sur lui ; grande conductibilité électrique, etc. En l'alliant au cuivre, au zinc, à l'étain, au manganèse, etc., l'on obtient une série de « nuances » se prêtant aux usages les plus variés.

Un des alliages les plus remarquables est le duralumin, qui contient de 0,5 à 1 % de magnésium, une proportion analogue de manganèse et 3 % de cuivre. Cet alliage, qui offre une très grande résistance, est utilisé pour les carcasses des zeppelins ; il sert pour l'aviation, pour l'automobile et pour nombre d'industries qui emploient concurremment des alliages différents pour les tôles, les bielles, les pistons de moteurs, etc.

La France fabrique beaucoup d'aluminium ; sa capacité de production est évaluée à 25.000 tonnes, celle des Etats-Unis atteignant 115.000 tonnes. Nous ne possédons plus, il est vrai, le monopole européen de la bauxite, minéral d'aluminium. Mais nos gisements situés dans le Var, dans l'Hérault et dans le Gard paraissent encore les meilleurs et les mieux situés du monde. La bauxite est une argile tantôt blanche, tantôt grise, plus souvent rouge, formée d'alumine alliée à des quantités variables de fer ou de silice dont on la sépare par des traitements chimiques afin d'obtenir de l'alumine pure qu'on soumet à l'électrolyse. Elle s'exploite généralement à ciel ouvert.

L'ÉLECTROMÉTALLURGIE

En électrometallurgie, le grand précurseur fut Henri Moissan. Vers 1879, Siemens imagine le premier four électrique dont il ne tire aucun parti sérieux ; en 1893, les expériences retentissantes de Moissan initient le public aux possibilités du nouvel appareil. Dans une caisse en briques, grande comme un carton à chapeau, l'illustre chimiste fait fondre un morceau de sucre et un bloc de fonte : il obtient, au bout d'une demi-heure, des paillettes microscopiques qu'il affirme présenter tous les caractères scientifiques du diamant.

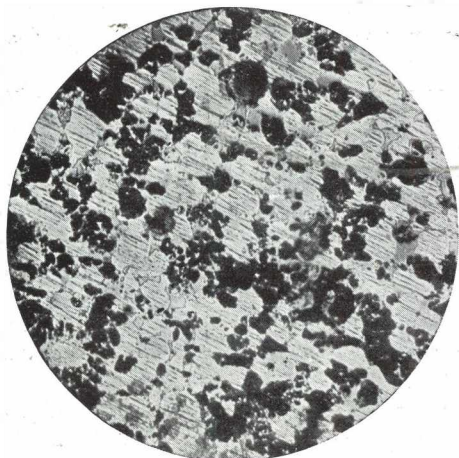
Ce fut d'ailleurs coquetterie de savant. Moissan entrevoyait surtout le parti à tirer du four électrique pour le progrès de la métallurgie ; il consacra dès lors toute son activité à l'étude des alliages et des métaux rares dont on avait alors une connaissance superficielle. Il était loin de supposer, néanmoins, que le four électrique contribuerait, dans une large part, au développement des deux modes suprêmes de locomotion depuis longtemps rêvés par l'humanité : la locomotion automobile, autour de laquelle peinaient nos ingénieurs ; la locomotion aérienne, encore considérée comme une utopie.

C'est pourtant ce qui s'est produit. Le frère avion d'hier, avec son fuselage léger et ses longerons fins comme les moulures d'un meuble de prix, nous donnait d'abord l'impression d'un beau travail d'ébénisterie ; en réalité, sa puissance prodigieuse est issue du four électrique. On pourrait presque dire : tel acier, tel avion. L'acier classique, au carbone le plus fin, évolue dans une gamme restreinte de formules et de propriétés correspondantes. Il a fallu les aciers *spéciaux*, presque tous tributaires du four électrique, pour résoudre des problèmes mécaniques d'un intérêt primordial, posés par l'aviation et par l'automobile qui, en ces derniers temps, ont encore bénéficié de l'essor des alliages d'aluminium.

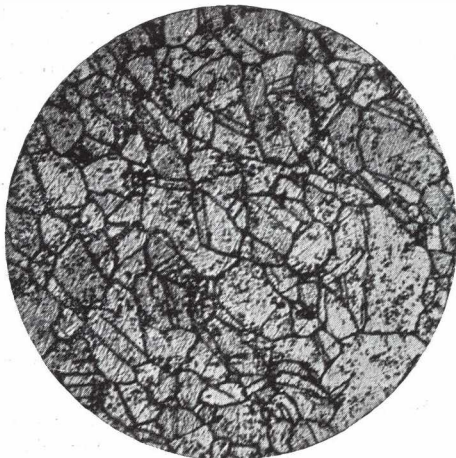
Il existe aujourd'hui de nombreux types de four électrique ; un des plus usités est le four Paul Girod.

Ce four affecte la forme d'un vase posé sur un berceau qui permet de le faire basculer pour faciliter la coulée. Le couvercle est mobile et le chargement s'opère par une porte latérale. Les plus grands fours ont une capacité de 25 tonnes et absorbent une puissance de 10.000 chevaux.

Une électrode de charbon, suspendue à une potence, traverse le couvercle et vient affleurer la surface du bain, descendant automatiquement à mesure



Ferrotungstène (87 % de tungstène).
S'incorpore dans les aciers au tungstène et les aciers à coupe rapide.

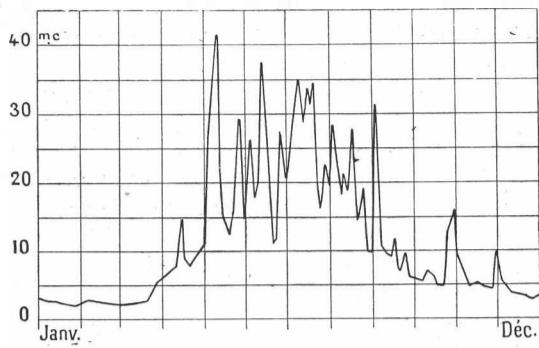


Acier à coupe rapide.
Contenant 12 % de tungstène, 6 % de cobalt, 5 % de chrome, 0,5 % de carbone.

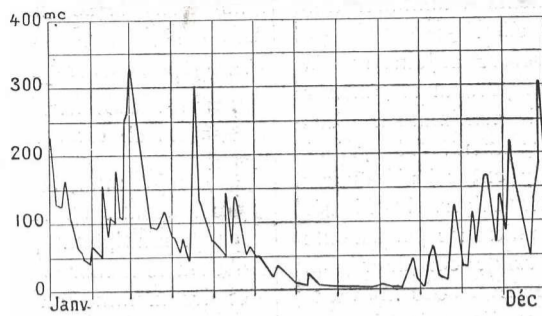


Acier au silicium (5,54 % de silicium).
Employé surtout pour les dynamos et l'appareillage électrique.

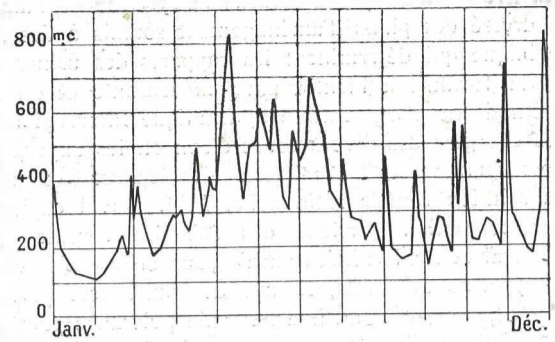
Microphotographies (grossissement : environ 200 à 300 diamètres) de ferro-alliages et d'aciers spéciaux tributaires du four électrique. Le métal a été attaqué par des acides qui ont agi différemment sur les différents constituants formant l'alliage, révélant ainsi leur répartition moléculaire.



La Romanche, aux Chazeaux.



La Dordogne, à Argentat.



L'Isère, à la Saône.

qu'elle se consume. Cette « baguette » mesure environ 1 m. 50 de longueur sur 30 ou 35 centimètres de côté. La seconde électrode est constituée par le bain lui-même et par l'sole du four. L'arc jaillit entre l'électrode de charbon et le bain dont il auréole et chauffe toute la surface.

Le four électrique présente plusieurs avantages. Il fonctionne sans introduction d'air extérieur, c'est-à-dire sensiblement en atmosphère neutre. Les réactions ne sont donc point troublées par l'action oxydante de l'air ni par l'influence des gaz employés comme combustibles qui, dans le four Martin, traversent le bain et tendent à l'échauffer outre mesure. L'arc voltaïque chauffe surtout le calcaire introduit comme fondant, qui surnage ; il chauffe modérément le bain lui-même, ce qui favorise l'affinage. Le rendement de l'énergie consommée atteint 60 %, alors que celui du four Martin ne dépasse pas 8 ou 10 % ; l'encombrement est considérablement moindre. Enfin, alors que la température du four Martin est limitée à 1.800° et celle du haut fourneau à 2.000°, le four électrique donne pratiquement 2.500° à 3.000°, température nécessaire pour certaines combinaisons.

Pendant longtemps, la métallurgie n'employait guère le four électrique que pour la production des aciers spéciaux dont l'élaboration comporte deux phases.

On prépare d'abord les *ferro-alliages* ou *ferros*, en traitant un mélange de minerais de fer et d'un autre minerais métallique. On obtient un alliage assez pur, tel que le ferrochrome, ferronickel, ferrotungstène, etc., où la proportion du métal associé au fer atteint parfois 90 %. On incorpore ensuite à de l'acier au carbone une proportion variable de ferro-alliage. En modifiant les dosages, on obtient une série indéfinie de *nuances* d'acier répondant aux besoins les plus caractéristiques de la mécanique ou d'autres industries.

Aujourd'hui, en raison du prix élevé du charbon, la fabrication de l'acier fin ordinaire au four électrique s'est beaucoup développée.

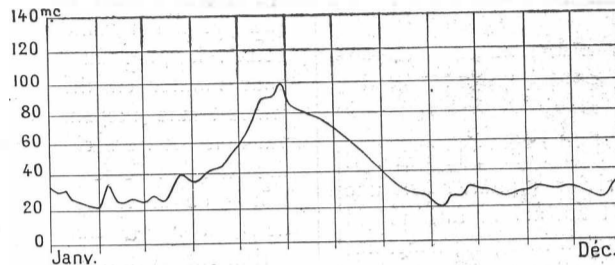
L'électrothermie. — On rattache parfois à l'électrometallurgie des procédés où le four électrique intervient uniquement pour amener les matières à traiter à la température nécessaire pour produire des dissociations ou des combinaisons chimiques. Ces procédés, qui constituent plutôt le domaine de l'électrothermie, comportent diverses applications dont deux ont pris, en ces dernières années, une importance considérable : l'industrie des produits nitrés pour explosifs ou pour engrais agricoles obtenus en partant de l'azote extrait de l'air atmosphérique au moyen de l'arc électrique, et, d'autre part, la fabrication du carbure de calcium qui, en se dissolvant dans l'eau, dégage du gaz acétylène. Ce carbure exige le four électrique, car il résulte de la combinaison de chaux très pure et de charbon à la température d'environ 3.000°. Avant guerre, il servait beaucoup à l'éclairage privé et à l'éclairage public des petites localités dépourvues de gaz ou d'électricité. Aujourd'hui, on en produit des quantités énormes pour le convertir en cyanamide (nitrate de chaux constituant un excellent engrais) ou pour pratiquer la soudure autogène, qui en absorbe elle-même une quantité notable.

LES CAPRICES DES TORRENTS

La technique de l'aménagement d'une chute n'a guère plus de progrès à faire. On sait aujourd'hui discerner les solutions possibles aux divers points d'une vallée ; le type d'usine une fois adopté, l'installation générale représente un travail d'ingénieur dont les détails sont relativement aussi faciles à déterminer que ceux de la construction d'un pont. Mais l'industriel désireux d'exploiter une chute doit, avant tout, se préoccuper du rendement commercial. Cette question ne peut se résoudre que par un compromis entre les exigences financières et les caprices de l'eau, et il n'est point toujours facile de déterminer la meilleure formule du compromis.

Que l'on considère une chute de montagne ou une chute de plaine, le volume du débit intervient toujours pour une large part. Or, pour une même chute, le débit présente de grands écarts saisonniers. Sans compter les crues ou les sécheresses exceptionnelles, il y a une époque de hautes eaux, une de basses eaux et une période d'étiage. Et ces époques diffèrent d'un bassin ou même d'une rivière à l'autre.

Les torrents des Alpes septentrionales ont des régimes assez réguliers, avec des débits très variables. Les hautes eaux se produisent au printemps,



Le gave de Pau, à Lourdes.

QUELQUES EXEMPLES DES VARIATIONS DE DÉBIT
DES COURS D'EAU PENDANT UNE ANNÉE

à la fonte des neiges, et se maintiennent pendant une partie de l'été ; les basses eaux ont lieu vers février, à la suite des neiges et des gelées, et parfois au milieu de l'été, saison de pluies rares et de forte évaporation. De façon générale, les rivières, du type alpin, alimentées surtout par des glaciers, ont leurs hautes eaux en saison chaude. Quand on descend vers le Sud, l'influence des pluies méditerranéennes modifie le régime.

A latitude égale, les Pyrénées reçoivent des pluies et des neiges plus abondantes que les Alpes ; mais les glaciers y occupent à peine

25 kilomètres carrés sur les deux versants. Ils débitent peu ; les seuls cours d'eau français qu'ils alimentent sont la Garonne et le gave de Pau. Les hautes eaux se produisent au printemps et à l'automne ; les basses eaux, entre novembre et mars, et de juillet à septembre. Le régime diffère un peu dans les Pyrénées occidentales ; pour l'ensemble du massif, les eaux les plus basses sont celles de l'été. Les débits sont souvent assez faibles. Certains gaves, alimentés principalement par les pluies atlantiques, ont des crues soudaines, très violentes.

Il pleut beaucoup sur le Massif Central, qui est totalement dépourvu de glaciers et dont le sommet le plus élevé, le Sancy, n'a que 1.886 mètres. Dans le bassin de la Dordogne, où les eaux s'éparpillent suivant toutes les directions, les débits sont en général moins riches que dans les Pyrénées ou dans les Alpes. Il est, pourtant, des exceptions. D'autre part, les neiges étant fondues plus tôt, la période des basses eaux est beaucoup plus longue. On ne peut guère y réaliser que des chutes basses ou de hauteur moyenne.

En résumé, on peut dire que, de façon générale, les hautes eaux ont lieu en saison chaude dans les montagnes pourvues de glaciers (Alpes et partie des Pyrénées) et en saison froide dans les autres : Pyrénées, Massif Central, Jura, Vosges, Provence. Dans les régions chaudes de la Provence, le débit d'été est parfois presque nul.

Avant d'arrêter le nombre et la puissance de ses turbines, l'industriel doit donc se libérer des conséquences économiques qu'entraînent les caprices du torrent. La question comporte diverses solutions qui ont été exposées avec un sens critique tout à fait remarquable par M. Arbelot, directeur des forces hydrauliques au ministère des Travaux publics.

Les premiers adeptes de la houille blanche concevaient l'usine isolément. Etablie dans un pays de montagne d'accès souvent difficile, cette usine était presque toujours créée en vue d'une utilisation sur place : papeterie, électrochimie, électrometallurgie. Dans ces conditions, l'usine est exposée à deux inconvénients majeurs : irrégularité saisonnière des débits ; manque de souplesse de marche, en l'absence d'une accumulation journalière permettant de subvenir aux *pointes*, c'est-à-dire aux besoins exceptionnels de la clientèle à certaines heures.

La solution simpliste consiste à n'utiliser que les *chevaux permanents* de la rivière ; l'équipement de l'usine correspond au débit d'étiage et, pendant huit à neuf mois de l'année, la majeure partie du débit inutilisé s'écoule par-dessus le barrage ou par des vannes. On se résout ainsi à une perte d'énergie souvent considérable.

Pour éviter ce gaspillage, on équipe l'usine de façon à pouvoir utiliser un débit sensiblement supérieur au débit d'étiage et on lui adjoint une usine thermique destinée à faire l'appoint aux périodes de débit insuffisant.

On peut aussi régulariser le débit du cours d'eau en établissant un réservoir de grande capacité, commandant directement l'usine de production. Cette solution n'est économique qu'à la condition de rencontrer une situation géographique particulièrement favorable, laquelle est peu fréquente. Il est plus avantageux d'utiliser les réservoirs naturels que constituent les lacs.

Tout récemment, la Compagnie du Midi a aménagé le lac d'Artouste qui assure le fonctionnement régulier des trois usines en cascade de la vallée d'Ossau.

La souplesse du régime journalier est plus commode à réaliser : il suffit d'un petit réservoir où on laisse l'eau s'accumuler pendant les heures de consommation faible ou nulle, et auquel on puise pour augmenter le débit naturel à d'autres heures. L'usine de Jonage, sur le Rhône, dispose d'un réservoir suffisant pour porter momentanément la puissance de 16.000 à 20.000 chevaux.

A la conception initiale de l'usine isolée ou à celle un peu plus parfaite

du groupe d'usines, a succédé le système de l'aménagement par bassin. On a dressé des plans d'aménagement soumis à des règlements d'administration publique qui déterminent les rapports des usines entre elles.

La formule a bientôt paru insuffisante et on lui préfère aujourd'hui la méthode de compensation hydraulique interrégionale, qui prétend régulariser les énergies des divers cours d'eau en les superposant, le maximum des uns correspondant aux minima des autres et réciproquement. *A priori*, la solution semble rationnelle. MM. Duval et Lavanchy ont calculé qu'une interconnexion partielle des énergies fournies par les Alpes, le Massif Central et les Pyrénées aurait pour effet d'ajouter à la puissance permanente de 750.000 kilowatts, somme des puissances permanentes de chaque région considérée isolément, une nouvelle puissance permanente de 300.000 kilowatts due à la conjugaison d'une partie des puissances saisonnières de chacune de ces régions.

HOUILLE BLANCHE ET HOUILLE NOIRE

Le lecteur connaît maintenant les « mystères » de la houille blanche. Il sait comment l'ingénieur profite de la pente des rivières pour créer une chute; comment il aménage l'usine où cette chute fait tourner la turbine qui actionne un appareil électrique, simple transformateur d'énergie permettant d'utiliser sur place ou à des centaines de kilomètres de distance la puissance de l'eau qui coule. Cette puissance nous est offerte gratuitement par la nature; nous n'avons qu'à la récolter. Après avoir éclairé tout un pays, allumé des fours dont la température approche un peu de celle du soleil, après avoir animé des machines innombrables, la goutte d'eau, un instant prisonnière, retourne au torrent d'où elle ira, portée par un nuage, retrouver son glacier pour y reprendre le cycle éternel de son énergie. Combien cette énergie nous apparaît plus précieuse et plus économique que celle de la vapeur où une goutte d'eau semblable se borne à transmettre la puissance que nous achetons au prix de la destruction du charbon! Cependant, contrairement à ce que pense la foule, la houille blanche tend à devenir aussi chère que la houille noire.

La France est très riche en houille blanche. D'après les statistiques officielles, elle disposerait d'environ 10 millions de chevaux moyens ainsi répartis :

Alpes, Rhône et Jura.....	6.000.000
Pyrénées.....	1.800.000
Massif Central.....	1.500.000
Rhin, Vosges, Moselle.....	1.000.000
Ensemble.....	10.300.000

Ces chiffres, admis, en général, comme sensiblement exacts, doivent être acceptés et interprétés avec prudence. Les chiffres proposés par des hommes éminents comme M. Blondel, membre de l'Institut, et M. de La Brosse, inspecteur général des Ponts et Chaussées, présentent des écarts sérieux. Ils nous renseignent d'ailleurs assez mal sur la valeur pratique de la puissance qu'ils indiquent. La diversité des façons de compter des administrations, des sociétés, des usines, ne facilite point l'appréciation. On exprime la puissance tantôt en kilowatts, tantôt en chevaux-vapeur; inconvénient minime, il est vrai, car la conversion est aisée (1 cheval = 0,736 kilowatt et, par conséquent, 1 kilowatt = 1,36 cheval). On distingue les chevaux permanents, les chevaux semi-permanents, la puissance normale moyenne, la puissance installée, la puissance disponible, etc., et, selon qu'on adopte l'une ou l'autre de ces mesures conventionnelles, on arrive à des conclusions dissemblables.

Ces réserves faites, admettons le chiffre de 10 millions de chevaux moyens comme représentant l'énergie hydraulique disponible dans notre pays. Avant guerre, la puissance installée atteignait à peine un million de chevaux presque entièrement concentrés dans les Alpes. C'est dans le Dauphiné, autour de Grenoble surtout, puis en Savoie que l'effort fut le plus marqué. Les industriels de la région, soutenus par des banques locales de premier ordre, avaient créé une série d'usines qui, de la Maurienne ou de la Tarentaise jusqu'aux Alpes-Maritimes, apportaient la richesse et le bien-être dans nombre de vallées. Aux confins de l'Ubaye et de la Durance, l'*Energie électrique du littoral méditerranéen* commençait un vaste réseau qui éclaira d'abord Nice et Marseille et qui distribue aujourd'hui la lumière ou la force dans toute la Provence.

Le mouvement s'arrêta bientôt, gêné par les indécisions coutumières de l'administration. Les propriétaires des rives et du lit des torrents non navigables ni flottables émettaient des prétentions exorbitantes pour céder leurs droits; de leur côté, les industriels réclamaient la faculté d'exproprier à leur guise et, l'indemnité payée, d'agir librement.

Pendant la guerre, les usines nouvelles purent s'installer en toute liberté, puis, le 16 octobre 1919, la Chambre vota enfin le statut de la houille blanche.

Ce régime est, aujourd'hui, très attaqué par les industriels que gênent surtout les redevances à l'Etat et la présence de celui-ci au conseil d'administration, présence assez légitime pourtant quand l'entreprise est subventionnée. Quoi qu'il en soit, ce régime ne semble point, jusqu'à présent, avoir paralysé les initiatives. Un coup d'œil jeté sur nos cartes montre l'étonnante densité des usines en construction ou en projet qui s'essaient dans les Alpes, dans le Massif Central, dans les Pyrénées. Les Alpes françaises possèdent certainement, en Dauphiné et en Savoie, le groupement industriel le plus puissant qui existe dans une région montagneuse du globe.

D'après les statistiques du Service central des forces hydrauliques,

arrêtées au 1^{er} janvier 1924, la puissance normale disponible de nos usines au-dessus de 200 kilowatts s'établit ainsi :

	EN SERVICE	EN CONSTRUCTION	EN PROJET
En kilowatts...	783.000	339.000	3.995.000
En chevaux...	1.065.000	461.000	5.433.000

Dans ce total, la Corse, qui n'a encore aucune usine en service, figure pour 540 kilowatts en construction et 104.000 kilowatts en projet.

(En multipliant par 2 le nombre de chevaux normalement disponibles, on obtient le nombre de chevaux installés, et, en tenant compte des petites usines et des moulins, on arrive à un total d'environ 2.250.000 chevaux installés.)

Ces projets se réaliseront-ils, et peut-on espérer la continuation de ce développement au moins apparent? La chose paraît douteuse.

L'aménagement d'une chute exige aujourd'hui un capital considérable. Les premières usines des Alpes furent établies aux points les plus avantageux; le prix du cheval installé oscille d'abord entre 150 et 300 francs, pour monter ensuite à 700, parfois 1.000 francs. Il faut admettre, actuellement, une moyenne minima d'environ 3.000 francs. Les cas sont très variables, et les sociétés se montrent fort discrètes à cet égard. La Compagnie des chemins de fer du Midi nous donne cependant un chiffre exact: les trois usines de la vallée d'Ossau, aménagées pour une puissance totale installée de 130.000 chevaux ou 95.000 kilowatts, ont coûté 140 millions, auxquels s'ajoutent 21 millions d'équipement électrique. La puissance normale n'étant que de 45.000 kilowatts, le kilowatt normal revient à 3.000 francs et le cheval normal à 4.000 francs. Les lignes de transport à 150.000 volts — 100.000 francs par kilomètre — viennent en sus. Au taux unitaire de 4.000 francs, le prix d'une usine de 30.000 chevaux revient donc à plus de cent millions. L'amortissement d'un tel capital grève lourdement une exploitation qui comporte des frais d'entretien assez élevés.

Une usine à vapeur de même puissance coûterait trois ou quatre fois moins cher. Cependant, le prix du kilowatt à l'usine thermique sera presque toujours sensiblement égal à celui du courant fourni par la houille blanche. Le charbon aura l'avantage dans des cas spéciaux, par exemple quand il permettra de réduire la longueur des lignes de transport; il est, en outre, libéré des servitudes imposées à la houille blanche.

Ne comptons donc point sur les nouvelles usines hydroélectriques pour obtenir l'énergie à bon marché. Il semble, au contraire, qu'en présence des sommes énormes qu'exige aujourd'hui l'industrie de la houille blanche et de la rémunération modeste qu'elle comporte ces usines seront désormais construites surtout par des collectivités ou des consortiums appelés à utiliser l'énergie pour leur propre compte, sauf à vendre les excédents. Les petites localités encore privées d'électricité ne pourront la recevoir que si elles se trouvent sur une ligne de transport importante.

Si, nous plaçant à un point de vue plus élevé, nous envisageons l'intérêt national, la question change d'aspect; nous devons encourager, dans la plus large mesure possible, l'aménagement de nos ressources hydrauliques, même si l'énergie ainsi obtenue doit coûter un peu plus cher que celle fournie par le charbon. Cet écart comporte, bien entendu, une limite économique difficile à préciser.

On estime que les deux millions de chevaux moyens actuellement aménagés sur nos rivières représentent une consommation annuelle de 12 millions de tonnes de charbon. Les huit millions de chevaux restant disponibles représenteraient donc 48 millions de tonnes, soit un total de 60 millions. Il ne faut pas s'hypnotiser sur ce chiffre.

D'après M. Le Trocquer, ancien ministre des Travaux publics, dont l'opinion concorde avec celle de M. Flusin, professeur à l'Université de Grenoble, on peut envisager la possibilité d'aménager encore assez avantageusement 3 millions de chevaux, ce qui nous donnerait une puissance totale de 5 millions de chevaux, représentant l'énergie fournie par 30 millions de tonnes de charbon. En évaluant à 100 francs le prix de la tonne de charbon industriel, nous arrivons à une économie annuelle de 3 milliards sur le tribut que nous payons aux mines étrangères; sur une période de vingt ans, nous diminuons de 60 milliards l'exode de l'or français.

Ces conclusions, qui n'ont rien d'optimiste, sont à méditer. Il semble qu'il n'y ait pas d'hésitation permise sur la ligne de conduite à adopter. Pendant quelque temps, sans doute, l'énergie houille blanche pourra coûter, dans beaucoup de cas, un peu plus cher que l'énergie charbon, et l'écart ira en augmentant si le développement de l'énergie hydraulique en France et à l'étranger fait baisser le cours mondial du charbon. Mais une compensation s'établira au profit de la collectivité, l'Etat pouvant toujours continger l'importation de la houille noire dans la mesure nécessaire pour qu'elle ne vienne pas ruiner la houille blanche.

A côté de ces avantages économiques, il est sage d'envisager aussi le bienfait social que nous apporte la houille blanche. Elle amène le bien-être et l'hygiène dans nombre de pays déshérités où elle retient désormais le montagnard appelé à nous donner une race saine et vigoureuse chez qui l'amour intense, un peu particulariste, de sa vallée se cristallise en un amour supérieur de la patrie. Aux usines lointaines où elle envoie le courant, elle permet à l'ouvrier des villes de travailler dans une atmosphère saine, exempte des poussières, des fumées et de la chaleur du charbon; à l'ouvrier qui n'a qu'une manette à lever pour voir tourner son petit moteur, elle épargne les courses de chaque jour à l'usine, par tous les temps, lui faisant apprécier la douceur du chez soi et du foyer familial. Tout cela vaut bien le chagrin qu'éprouvent quelques esthètes quand leur regard supérieur aperçoit une conduite forcée dévalant au flanc d'un rocher.

F. HONORÉ.