

propos du transsaharien de celles qui avaient été émises par Ferdinand de Lesseps avant d'entreprendre la percée de l'isthme de Panama. Il estimait que le tonnage des navires empruntant le canal atteindrait, après un certain nombre d'années, 7 millions de tonnes par an, et il avait basé sur ce tonnage la rémunération du capital nécessaire. Après la déconfiture de la première compagnie, lorsque ses administrateurs furent poursuivis, une des charges retenues contre de Lesseps fut précisément cette estimation de 7 millions de tonnes du trafic possible. L'un des économistes les plus réputés de l'époque, Paul Leroy-Beaulieu, appelé comme expert, avait assimilé cette évaluation à une « promesse fallacieuse », propre à tromper l'épargne. Or, une dizaine d'années après l'ouverture du canal de Panama, qui a eu lieu en 1914, le trafic annuel était de l'ordre de 30 millions de tonnes (sensiblement égal à celui du canal de Suez).

Sans s'attarder à calculer avec une précision illusoire le trafic et le rendement du chemin de fer Méditerranée-Niger, on doit en considérer la construction comme une œuvre utile, d'une part, pour donner une cohésion à nos possessions africaines et faciliter l'exploitation de leurs ressources, d'autre part, pour affirmer l'intérêt que la France ne cesse d'apporter, malgré la défaite, à son empire colonial. Le chemin de fer Méditerranée-Niger sera peut-être, dans quelques décades, l'un des principaux éléments de prospérité de nos possessions africaines.

P. CALFAS,  
Ingénieur des Arts et Manufactures.

## MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

### UNE RÉVOLUTION DANS L'ART DE BATIR :

#### Les constructions précontraintes.

Dans son dernier numéro, le Génie Civil a rendu compte de l'Exposition des Ressources et Réalisations nouvelles de la Qualité française dans l'Art et l'Industrie, que l'Institut de Recherches et de Coordination artistiques et techniques (I. R. C. A. T.) avait organisé, du 13 au 30 novembre, dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale, 44, rue de Rennes, à Paris, et a donné le programme des conférences qui ont été faites à l'occasion de cette Exposition.

A la séance de clôture, le 29 novembre, de ce cycle de conférences, M. Freyssinet, le constructeur bien connu, a fait, dans une des salles de l'Exposition, une importante communication sur les idées au développement desquelles il consacre toute son activité depuis près de quinze ans. En raison de l'intérêt de cette communication et des grandes possibilités ouvertes aux idées présentées par l'auteur, nous avons jugé utile de donner ici la plus grande partie de cette conférence, en résumant, en plus petits caractères, les passages que le manque de place nous a empêché de reproduire in extenso.

M. Freyssinet fait d'abord remarquer que l'époque actuelle est caractérisée par l'emploi des matériaux sous formes d'associations, dans lesquelles chacun d'eux joue un rôle qui utilise au mieux ses propriétés particulières. Un exemple de ces associations est le béton armé, dont l'auteur signale les défauts dans les termes suivants :

**LE BÉTON ARMÉ ET SES DÉFAUTS.** — Le béton armé est une association de matériaux qui a connu une fortune singulière, mais qui fonctionne dans des conditions très déficientes.

**Résistance à la flexion.** — Quand on fait travailler en flexion jusqu'à rupture une pièce en béton, elle casse toujours par insuffisance du béton tendu. Pour renforcer celui-ci, on lui incorpore des armatures en acier, parallèles aux tractions à supporter. Le béton ainsi armé travaille de la manière suivante :

a) Au début de la flexion, l'acier et le béton s'allongent ensemble, se partageant la traction totale au prorata des produits de leurs sections par leurs modules. Dans cette phase, si les pourcentages d'acier sont faibles, le béton supporte pratiquement tout l'effort ;

b) Dès que la contrainte du béton atteint une valeur suffisante pour rompre le béton non armé, elle cesse de croître et le béton subit un étirage sous charge constante. L'acier supporte alors seul l'augmentation de la traction ;

c) Pour un certain taux d'allongement de l'acier, la contrainte du béton diminue très brusquement et le béton se fissure.

Afin d'éviter la fissuration, on calcule les sections des aciers

de telle sorte que leurs allongements restent inférieurs à ceux qui la provoquent, mais on fixe ainsi aux contraintes du métal des limites très inférieures à celles qui pourraient être admises si l'on n'avait égard qu'à ses possibilités propres.

**Résistance à la compression.** — L'utilisation du béton comprimé n'est pas meilleure. Dans une dalle armée, la hauteur de la zone comprimée n'est guère que le quart de celle de la pièce : la zone tendue inactive occupe les trois quarts de la section.

**Résistance aux efforts tranchants.** — Les efforts tranchants engendrent des efforts de traction en général inclinés à 45° sur leur direction et sur celles des tractions dues à la flexion. On s'efforce de supporter ces tractions à 45° par des armatures, qualifiées, bien à tort, de secondaires, mais, dans les pièces de faible hauteur, telles que les hourdis, on ne peut compter que sur la résistance du béton à la traction pour supporter l'effort tranchant ; cela arrive aussi dans les bords des poutres, dans lesquels l'armature secondaire, trop courte ou insuffisamment ancrée, cesse d'être efficace.

De telles conditions de travail sont dangereuses, parce que le béton est un matériau fragile, parfois traversé de fissures avant toute mise en charge, qui casse sans prévenir et sans laisser subsister aucun moyen de raccrochage ; c'est pourquoi l'insuffisance des résistances aux efforts tranchants est à l'origine de la presque totalité des accidents de béton armé. On est donc contraint de prendre de très larges coefficients de sécurité chaque fois que la résistance aux efforts tranchants est en jeu.

**Résistance aux efforts alternés.** — La répétition des charges aggrave encore les conditions de fonctionnement du béton armé. Si, après avoir chargé une poutre, on la décharge et la charge à nouveau un grand nombre de fois, on constate que des charges parfaitement supportées par le béton, sans désordres ni fissuration, une première fois, provoquent sa rupture après un certain nombre d'alternances.

**Influence du retrait.** — Le retrait du ciment, en provoquant des tractions supplémentaires, rend parfois vaines les précautions prises pour éviter les fissures.

**Conclusion.** — Ces défauts sont si apparents qu'ils ont été observés dès les premières applications, et beaucoup de bons techniciens doutaient alors qu'on pût généraliser l'emploi d'un matériau si imparfait. L'expérience a démenti ces prévisions pessimistes et le béton armé a connu une brillante carrière pour deux sortes de raisons :

1° La pratique a prouvé que dans les constructions établies suivant les règles que l'expérience a enseignées, la sécurité et les conditions de conservation des constructions en béton armé sont pratiquement satisfaisantes. Cela est dû à des propriétés très particulières des bétons de ciment utilisés pour la fabrication des bétons armés, notamment à leur grande déformabilité due à leur compacité médiocre. Ce bon comportement des ouvrages en béton armé est donc une conséquence de la faible compacité des bétons utilisés pour leur exécution : c'est un point très important, qu'il ne faut pas perdre de vue ;

2° Les conséquences des défauts de l'association béton-acier se limitent à la nécessité d'observer certaines règles qui relèvent les prix de revient à un certain niveau, lequel s'est néanmoins trouvé suffisamment bas pour faire préférer le béton armé aux matériaux concurrents dans un vaste domaine.

**Les constructions précontraintes.** — Il y a trente ou quarante ans, les défauts du béton armé préoccupaient les techniciens beaucoup plus qu'aujourd'hui, puisqu'on ignorait, faute d'expérience, quelle serait leur influence sur la durée des constructions. Dans cette période, on s'est donc plus préoccupé que par la suite de trouver des moyens de les atténuer.

Des tentatives fondées sur une mise en tension préalable des aciers, limitée à une fraction de celle qui leur est imposée par les charges des poutres, n'ont donné aucun résultat, et ne pouvaient en donner aucun, car, par ce moyen, on ne peut obtenir une amélioration, d'ailleurs non permanente, que pour les poutres à charge constante, cas qui n'offre aucun intérêt. Il en est de même pour tous les moyens possibles de mise en tension partielle des armatures et notamment pour ceux qu'on a proposés récemment, spécialement le gonflement du béton par voie chimique ou mécanique.

Il existe, cependant, des constructions exemptes des défauts du béton armé : ce sont les arcs en maçonnerie ou béton, établis de telle sorte qu'ils ne puissent être *soumis en aucun point à des tractions dépassant la contrainte acceptable par leur matériau pour le travail de traction*; telles sont, par exemple, les grandes voûtes réalisées par M. Séjourné. Tout système placé dans des conditions mécaniques semblables jouira des mêmes propriétés.

J'ai été ainsi amené à envisager des constructions *précontraintes*, c'est-à-dire *soumises, avant l'application des charges qu'elles auront à supporter, à un système d'efforts permanents*, créé artificiellement dans le but de déterminer des contraintes supplémentaires et *tel que les contraintes résultant de l'ensemble des forces appliquées, charges supportées et efforts permanents ainsi créés, ne comportent aucun effort que les matériaux utilisés ne puissent supporter indéfiniment en toute sécurité*. Dans le cas de charges permanentes, on peut appliquer les efforts artificiels en même temps que celles-ci. Dans la très grande majorité des cas, le système des efforts permanents à créer ne comprend que des compressions; celles-ci peuvent toutefois se trouver excentrées et déterminer des flexions et des cisaillements.

Cette définition des constructions précontraintes est très générale et peut être étendue à des *ensembles de matériaux très divers* : bétons, grès, maçonneries sèches ou à bain de mortier, assemblages de métaux ou de matières quelconques homogènes ou hétérogènes, voire à des systèmes naturels tels que des sols de fondation.

On peut réaliser des constructions précontraintes *sans aucune armature*. Mes concessionnaires généraux, les Entreprises Campenon Bernard, en ont fait deux applications en Algérie : le radier du barrage des Portes de Fer, sur l'oued Fodda (fig. 1), et les renforcements du barrage des Beni Bahdel, sur l'oued Tafna (fig. 2), nécessités par un relèvement de 7 mètres de son plan d'eau qui a augmenté de plus de 10 millions de mètres cubes la capacité du réservoir créé par ce barrage.

Dans ces deux cas, des points fixes étant fournis par les flancs rocheux des vallées fermées par les barrages, on a réalisé les contraintes permanentes par une compression, lentement réalisée à l'aide de vérins. Ces vérins sont constitués très simplement par deux tôles raccordées par un boudin torique déformable et prennent appui sur des surfaces de béton convenablement profilées; ils peuvent travailler jusqu'à 250 kg/cm<sup>2</sup>, c'est-à-dire qu'un vérin de 1 m<sup>2</sup> qui pèse 40 kg a une puissance de 2 500 tonnes.

On n'a pas toujours des appuis rocheux à sa disposition et le moyen pratique de réaliser en tout lieu les efforts permanents nécessaires consiste dans la mise en tension d'armatures à haute limite élastique. On en revient ainsi à une association de matériaux *acier-béton*, comme dans le béton armé, *mais il ne s'agit nullement d'un béton armé amélioré*, car le principe du béton armé est complètement abandonné.

Le couple résistant est fourni par l'antagonisme, non plus d'une semelle comprimée et d'une armature, mais de deux semelles en béton, l'une comprimée, l'autre tendue; le rôle de l'acier consiste seulement à soumettre le béton, destiné à être tendu par avance, à une compression permanente, de valeur au moins égale à la traction maxima qu'il devra supporter. Ce rôle est si nettement défini que, dans beaucoup de réalisations, l'application des charges n'entraîne rigoureusement *aucune variation de contrainte de l'acier*. En général, la variation de la contrainte de l'acier est inférieure à 2 % de la contrainte moyenne du métal.

**PROPRIÉTÉS DES CONSTRUCTIONS PRÉCONTRAINTES.** — La présence, dans une construction en béton, de compressions préalables toujours supérieures aux tractions que développeraient dans le béton les charges à prévoir, lui confère des propriétés mécaniques extrêmement remarquables, qui sont très supérieures, non seulement à celles du béton armé, mais même à celles d'un béton équirésistant, c'est-à-dire qui aurait à la traction la même résistance qu'à la compression.

**Résistance à la flexion.** — C'est ainsi que la résistance à la flexion d'une dalle en béton précontraint est pratiquement triple de celle d'une dalle armée de même épaisseur en béton de même qualité et sa déformation est considérablement moindre.

Cette conclusion est peu en harmonie avec les habitudes d'esprit des constructeurs, accoutumés à négliger les conséquences des états élastiques initiaux, mais l'emploi des associations de matériaux rendra indispensable la réforme de ces habitudes : pour une dalle armée avec un acier très résistant, une simple variation de l'état élastique de celui-ci par rapport au béton, sans aucune modification des sections du béton ou de l'armature, peut, en effet, faire passer la résistance à la flexion, de celle d'une dalle non armée, au triple de celle de la dalle équirésistante, soit une variation de 1 à 30 au moins.

M. Freyssinet cite, à titre d'exemple, une dalle de 20 mètres de portée et 0<sup>m</sup> 60 d'épaisseur que les Entreprises Sainrapt et Brice exécutent, sous licence de ses concessionnaires généraux, à la traversée de la Bresle par le chemin vicinal n° 9, à Longroy, en Seine-Inférieure, pour le compte de l'Administration des Ponts et Chaussées. Cette dalle, construite en béton précontraint, supportera des charges permanentes d'environ 2 000 kg/m<sup>2</sup> et des surcharges de 1 000 kg/m<sup>2</sup>; elle sera trois fois plus résistante que la même dalle simplement armée et aura une flèche bien moindre, comme le montre M. Freyssinet par une mesure sur une maquette au 1/5<sup>e</sup> de cette dalle, réduite à 0<sup>m</sup> 16 de largeur, qui figurait dans la salle de l'Exposition où il donnait sa conférence.

Cette dalle de 20 mètres est déjà remarquable, mais on peut aller beaucoup plus loin en cas de nécessité. On sait, en effet, par un bon choix des agrégats, de la granulométrie, de la teneur en eau et par une bonne mise en place par vibration sous légère compression, obtenir des bétons beaucoup plus résistants que les bétons ordinaires, par exemple pour la confection des chaussées de routes.

Étant donnée la simplicité des formes des dalles précontraintes, on peut leur appliquer les mêmes techniques d'exécution qu'aux routes en béton et, par conséquent, doubler leurs résistances et multiplier par  $\sqrt{2}$  leur portée à épaisseur égale : une dalle sur appuis simples, de portée égale à cinquante fois son épaisseur, est donc possible.

Alors que dans le béton armé, le métal et le béton tendu n'additionnent jamais leurs efforts, en béton précontraint, cette addition se réalise intégralement.

Si, en effet, nous introduisons dans la face tendue d'une grande masse de béton, telle qu'un barrage, une section d'armatures formant par exemple 0,5 % de la section du béton à renforcer, la dépense sera à peu près double, mais nous n'aurons pas augmenté la résistance de manière appréciable : avant la rupture du béton, l'acier n'interviendra que dans le rapport des sections multiplié par celui des modules, c'est-à-dire qu'il n'aura augmenté la résistance que de quelques centièmes; une fois la rupture du béton réalisée, l'acier supportera seul l'effort, mais si le rapport de sa résistance à celle du béton est inférieur à 200, ce qui est largement vrai pour un béton normal, la résistance finale de l'ouvrage ne sera pas augmentée.

Si, au contraire, nous remplaçons ce 0,5 % d'aciers ordinaires par 0,25 % d'aciers tendus à 80 kg/mm<sup>2</sup>, la dépense sera à peu près la même, mais nous aurons obtenu une précontrainte du béton de 20 kg/cm<sup>2</sup> qui aura deux effets : tout d'abord, le béton durcissant sous compression acquerra une résistance à la traction plus élevée, en raison de la suppression des tractions internes, causes de fissures; ensuite, cette résistance accrue s'ajoutera à la précontrainte et la résistance finale de l'ouvrage aura plus que doublé.

**Résistance aux efforts tranchants.** — Les efforts tranchants donnent lieu dans les ouvrages en béton armé à de très graves difficultés. En béton précontraint, tout devient simple et facile : il suffit de déterminer des précompressions telles que les efforts résultants, y compris les effets des cisaillements et des flexions, soient des compressions ou des tractions assez petites pour que le béton puisse les supporter avec un bon coefficient de sécurité.

Dans le cas de poutres suffisamment hautes à âme mince et de cisaillements unitaires importants, on y arrivera en utilisant deux directions d'armatures tendues. Les calculateurs se rendront aisément compte que, moyennant l'emploi d'armatures tendues de direction bien choisie, la limite de contrainte au cisaillement est la même qu'à la compression. D'où des réductions de plus de 10 à 1 dans l'épaisseur des âmes des poutres qui se trouvent être presque toujours surabondantes.

Ses très fortes résistances à l'effort tranchant ouvrent au béton précontraint un domaine d'application interdit au béton armé, celui des constructions pour lesquelles de grandes résistances au cisaillement sont indispensables : vannes et bouchures hydrauliques, bâtis de presses, etc.

Dans le barrage des Portes de Fer, sur l'oued Fodda, en Algérie, (fig. 1), les vannes mobiles, de 17<sup>m</sup> 30 de portée, sont en béton précontraint ; on a pu limiter à 0<sup>m</sup> 10 les épaisseurs des âmes des poutres et ces vannes sont à peine plus lourdes que des vannes métalliques établies pour les mêmes charges.

*Résistance aux efforts alternés.* — Dans le domaine de la résistance aux efforts variables ou alternés, la supériorité du béton précontraint sur le béton armé est vraiment extraordinaire.

L'inconvénient capital du béton armé est que la contrainte limite de l'acier pour laquelle se produisent les fissurations s'abaisse, quand il s'agit de charges variables, à des valeurs d'autant plus basses que la fréquence et l'ampleur de la variation sont plus grandes.

Dans les poutres calculées dans les conditions ordinaires, des fissures apparaissent alors et les flèches augmentent. Après quelques milliers d'alternances, les pièces sont hors service, d'autant plus complètement que les efforts de cisaillement sont plus importants ; ce sont, comme toujours en béton armé, les efforts tranchants qui sont le plus à redouter.

Au contraire, le béton précontraint, dans lequel le béton est toujours comprimé et la contrainte des aciers pratiquement indépendante des variations de charge, résiste parfaitement et indéfiniment aux efforts alternés et aux vibrations.

J'ai effectué des expériences avec deux poteaux, l'un en béton armé, l'autre en béton précontraint, reliés au moyen d'un appareil qui leur impose des efforts alternés égaux et de sens inverse. Le poteau en béton armé a été presque immédiatement fissuré et il a été démolé totalement par quelques milliers d'alternances, sous des efforts qui, au début de l'essai, dépassaient de 50 % les efforts de service normaux, mais qui, très vite, sont devenus très inférieurs à ceux-ci par la diminution des charges correspondant à une même flèche.

Le poteau détruit une fois remplacé par un second poteau précontraint, les deux poteaux précontraints ont supporté des centaines de milliers d'alternances, sous des efforts égaux à 1,5 fois celui pour lequel ils étaient prévus, sans la moindre altération.

*Propriétés particulières.* — Les associations précontraintes bénéficient de deux propriétés très curieuses et tout à fait spéciales :

La première est leur faculté d'auto-réparation après rupture partielle. Si l'on fait éclater un tuyau précontraint en lui appliquant une pression très supérieure à sa pression de rupture, l'eau gicle violemment et il faut une pompe à grand débit pour maintenir la pression. Dès que l'on rétablit la pression normale, le tuyau redevient étanche et, peu après, il est extérieurement sec et on ne peut pas retrouver trace des fissures.

La seconde est leur comportement simultané comme corps dur et comme corps plastique sous l'action d'étreintes triples, c'est-à-dire d'efforts s'exerçant dans trois directions perpendiculaires.

On sait que les corps se divisent en deux classes : d'une part, les corps fragiles ou durs, caractérisés par un coefficient de frottement interne élevé, une grande résistance au poinçonnement, une faible déformabilité et une facile propagation des fissures ; d'autre part, les corps plastiques non fragiles, dans lesquels les fissures ne se propagent pas.

Une dalle en béton à très haute résistance, formée d'agrégats aussi durs que possible et soumise à une double compression de 1 000 kg/cm<sup>2</sup> parallèlement à sa surface, et à une troisième compression de 500 kg/cm<sup>2</sup> perpendiculairement à celle-ci, aura un coefficient de frottement interne très élevé, celui du béton, et une très grande résistance à la compression de l'ordre de 5 000 kg/cm<sup>2</sup>, c'est-à-dire comparable à celle d'un acier dur, malgré une densité de 2,5 fois plus faible : ce sera donc un corps dur, et même très dur, qui possédera une résistance au poinçonnement extrêmement élevée.

Mais cette dalle aura en même temps les propriétés d'un corps mou et plastique : elle sera capable de grandes déformations avant rupture ; la propagation des fissures y sera complètement

impossible, car elles ne peuvent intéresser que le béton ; son énergie de rupture et sa résistance aux chocs seront énormes ; enfin, en cas de fissuration, ses fissures se fermeront automatiquement, après suppression ou diminution de l'effort.

Un tel corps sera donc à la fois dur et plastique ; selon la nature des efforts qu'il aura à subir, il sera l'un ou l'autre, et même l'un et l'autre, chose assurément impossible pour tout matériau homogène quel qu'il soit. Des propriétés aussi remarquables trouvent des applications importantes, d'autant que des masses de béton ainsi armées peuvent être réalisées en tout lieu et avec des dimensions pratiquement illimitées.

*ÉTABLISSEMENT D'UNE CONSTRUCTION PRÉCONTRAÎTE.* — Pour établir une construction précontrainte, on calculera d'abord, comme pour tout système de construction, les efforts dus aux diverses hypothèses de charges et les contraintes qui en résultent, notamment les tractions.

Il s'agira ensuite de créer un système de compressions capables, en se composant avec les efforts dus aux charges, non seulement de faire disparaître les tractions, mais de déterminer des compressions résiduelles notables, constituant une marge de sécurité. Il existe une infinité de tels systèmes ; on choisira,

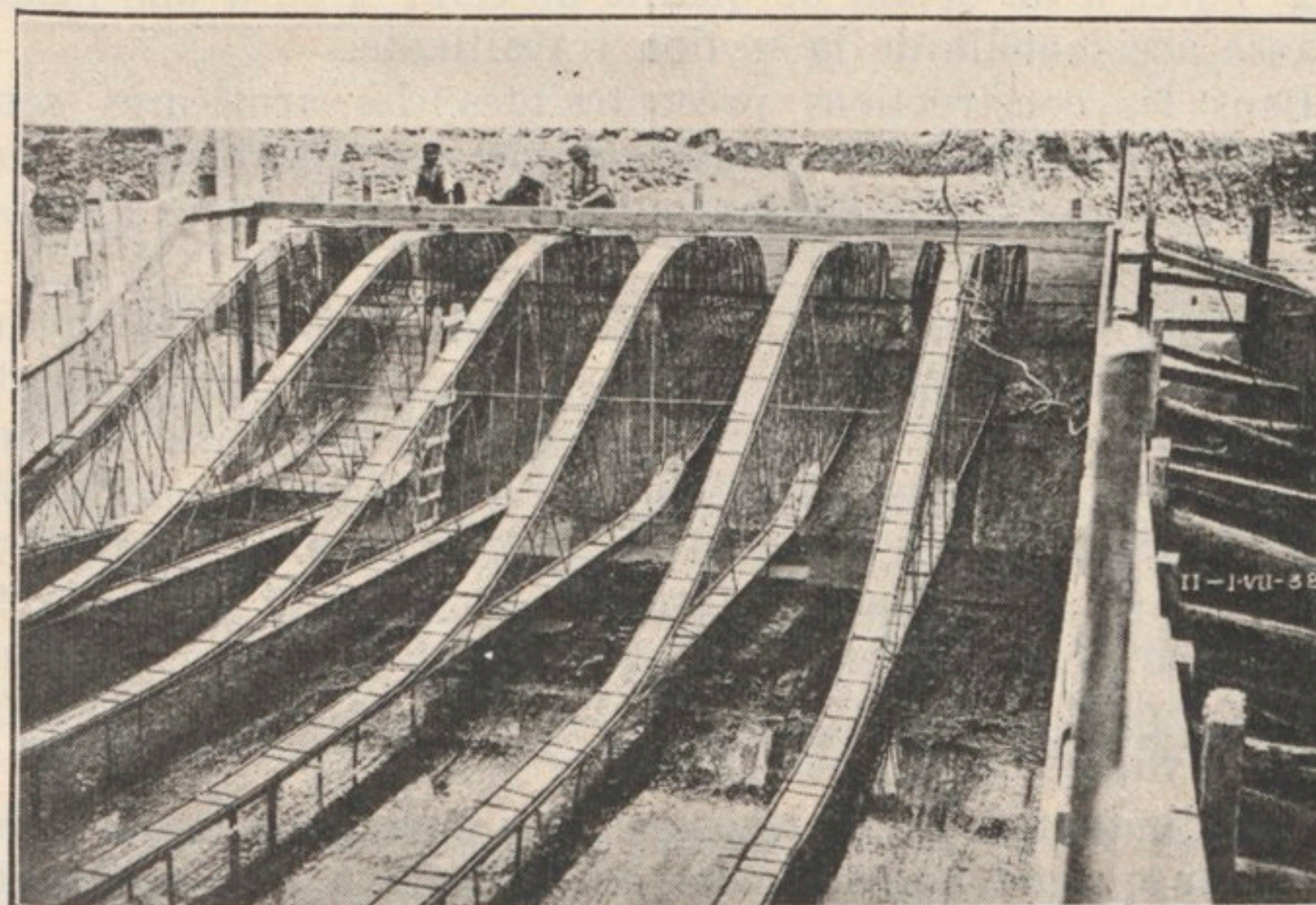


FIG. 1. — Barrage des Portes de Fer, sur l'oued Fodda, en Algérie. Vue des armatures de mise en compression transversale du radier.

parmi les plus faciles à réaliser, un de ceux qui déterminent les contraintes de compression minima dans les différents états de charge de la construction.

Une fois réalisé, le système de précompressions choisi donnera, avec les charges permanentes, un système résultant de compressions permanentes, et l'on observera, après application de ces forces, des raccourcissements de la construction dus au retrait, aux déformations instantanées et à la déformation différée.

Ces raccourcissements déterminent une chute de tension des armatures par rapport à la tension initiale qu'on leur aura donnée, égale au produit, par le module élastique de l'acier, du raccourcissement réalisé depuis le report de la tension des aciers au béton jusqu'à l'équilibre final de celui-ci. Il est essentiel de limiter et de très bien connaître la valeur de ces chutes de tension. Elles peuvent, en effet, varier dans des limites très étendues, jusqu'à enlever, à défaut de précautions suffisantes, toute valeur aux constructions.

En raison de leur importance pour les constructions précontraintes, M. Freyssinet donne quelques indications relatives aux trois causes précitées de raccourcissement du béton.

Les valeurs que peuvent prendre les pertes de tension varient entre 2 kg/mm<sup>2</sup> dans le cas de bétons peu chargés, durcis d'avance et abrités du retrait, et 70 kg/mm<sup>2</sup>. Quelles que soient les conditions de tension initiales réalisées pour l'armature, on peut donc en perdre entièrement le bénéfice par le raccourcissement du béton, si on ne le limite pas par les dispositions du projet. Les chutes de tension tolérables sont évidemment d'autant plus grandes que la limite élastique de l'acier utilisé, et, par suite, la tension qu'il est possible de lui donner, sont plus grandes.

Pour limiter les raccourcissements du béton, on devra tout d'abord exclure absolument les bétons de qualité médiocre ou même moyenne, trop peu compacts et trop déformables.

De plus, on devra limiter les contraintes de compression permanentes des zones tendues en donnant à celles-ci des sections convenables, et cela d'autant plus que la limite élastique des aciers utilisés sera moins élevée et le retrait plus à craindre.

On pourrait diminuer la chute de tension en procédant à une remise en tension des aciers après quelques semaines, mais ce serait une erreur, car des chutes de tension de cet ordre ne sont pas un inconvénient, mais un sérieux avantage. Grâce à elles, chaque élément de l'armature ainsi que le béton de la semelle tendue, se trouvent soumis avant mise en service à des efforts dépassant les efforts maxima qu'ils auront à supporter, ce qui constitue un essai de premier ordre.

**LIMITES DE SÉCURITÉ DU BÉTON PRÉCONTRAIT.** — Dans les constructions classiques, le problème est d'éviter que la cohésion du métal puisse être détruite par des contraintes, variables proportionnellement aux charges et répétées à chaque application de celles-ci. Dans ce but, on fixe à ces contraintes des maxima, qui tiennent compte des variations des efforts subis et d'une marge de sécurité dont le but est double :

1° Se mettre à l'abri des conséquences d'une exagération éventuelle des contraintes sollicitant le métal ;

2° Parer à un défaut de qualité de celui-ci ou à une insuffisance accidentelle de la section travaillante.

Dans les constructions précontraintes, les armatures sont tendues initialement à un taux pratiquement très voisin de leur limite élastique ; cette tension se relâche en partie sous l'action des raccourcissements du béton.

La construction ne peut donc être mise en péril : ni par une rupture des armatures, due à une insuffisance de qualité ou de section, qui se révélerait nécessairement lors de la mise en traction ; ni par une exagération ou des répétitions des contraintes du métal, car celles-ci ne peuvent prendre que des valeurs maxima très notablement inférieures à celles qui ont déjà été subies par le métal dans un état antérieur de la construction, maxima dont elles ne s'écartent par la suite, comme nous l'avons vu, qu'extrêmement peu.

Une diminution de la résistance des ouvrages ne peut donc provenir que de l'abaissement de la fraction permanente de ces contraintes au-dessous de la valeur prise comme minimum dans les calculs de l'ouvrage. Cette valeur minimum doit donc être telle qu'on soit certain que les tensions permanentes réelles ne s'abaisseront jamais plus bas.

M. Freyssinet donne quelques indications sur les règles pratiques de sécurité qui en découlent, tant pour l'acier que pour le béton.

**CHOIX DES MATÉRIAUX. — Aciers.** — Les seuls aciers intéressants qu'on trouve dans le commerce sont des aciers durcis par addition de 7 ‰ de carbone et de 8 à 12 ‰ de manganèse, dont la limite élastique à l'état naturel est de l'ordre de 50 kg/mm<sup>2</sup> et la limite de rupture de 100 kg/mm<sup>2</sup>. On les améliore, soit par simple étirage, soit par traitement thermique et tréfilage : dans le premier cas, la limite élastique obtenue est de 70 à 80 kg/mm<sup>2</sup> ; dans le second, elle varie avec les diamètres, de 110 kg/mm<sup>2</sup> pour 5 mm, à 130-140 kg/mm<sup>2</sup> pour 2 mm.

Pour le choix entre ces modes de traitement, on devra tenir compte du rapport entre le prix du kilogramme et la valeur du taux de tension permanente réalisable. On devra tenir compte également du fait qu'il ne faut pas dépasser, pour le rapport de la tension initiale à la tension finale, des valeurs trop élevées. La situation est, en effet, très différente pour une tension de 100 kg/mm<sup>2</sup> descendant à 90 kg/mm<sup>2</sup> et pour une tension de 20 kg/mm<sup>2</sup> descendant à 10 kg/mm<sup>2</sup>.

Actuellement, le prix de l'unité de résistance élastique obtenue avec ces deux catégories d'aciers est un peu inférieur à la moitié du prix obtenu avec les aciers doux usuels. On est, en effet, obligé d'employer, pour précontraindre du béton, des aciers fabriqués en quantités relativement faibles pour des usages tout autres, ce qui implique des complications et des exigences inutiles.

Plus tard, lorsqu'existeront des tréfileries spéciales, outillées pour la fabrication en très gros tonnages, de trois ou quatre diamètres d'acier de qualité standard, auquel on ne demandera que d'avoir une limite élastique élevée, l'écart des prix entre le métal doux et le métal traité s'atténuera très considérable-

ment. Je suis convaincu qu'on obtiendra des aciers à 140 kg/mm<sup>2</sup> de limite élastique, pouvant être tendus à 120 kg/mm<sup>2</sup>, pour un prix inférieur au double du prix des aciers doux actuels, ce qui représentera un abaissement du coût de l'unité de résistance réellement utilisable, de l'ordre de 4 à 1 dans le cas de charges permanentes, et de 8 à 1 au moins pour les charges très variables.

**Bétons.** — L'affirmation que les bétons qui seront employés pour les constructions précontraintes différeront de ceux qui sont ou seront utilisés pour le béton armé, autant que les aciers doux des aciers tréfilés, peut paraître un peu risquée. Elle est cependant tout à fait exacte ; la généralisation des précontraintes conduira à une amélioration progressive considérable des compacités et des résistances des bétons employés dans les constructions, que la construction en béton armé ne pouvait pas provoquer pour plusieurs raisons.

Le béton armé utilise aussi mal les propriétés des bétons compacts que celle des aciers à haute limite élastique. Tout d'abord, en augmentant la résistance d'un béton, on n'améliore pas les résistances des poutres dans la même proportion que les résistances spécifiques. De plus, en augmentant sa compacité,

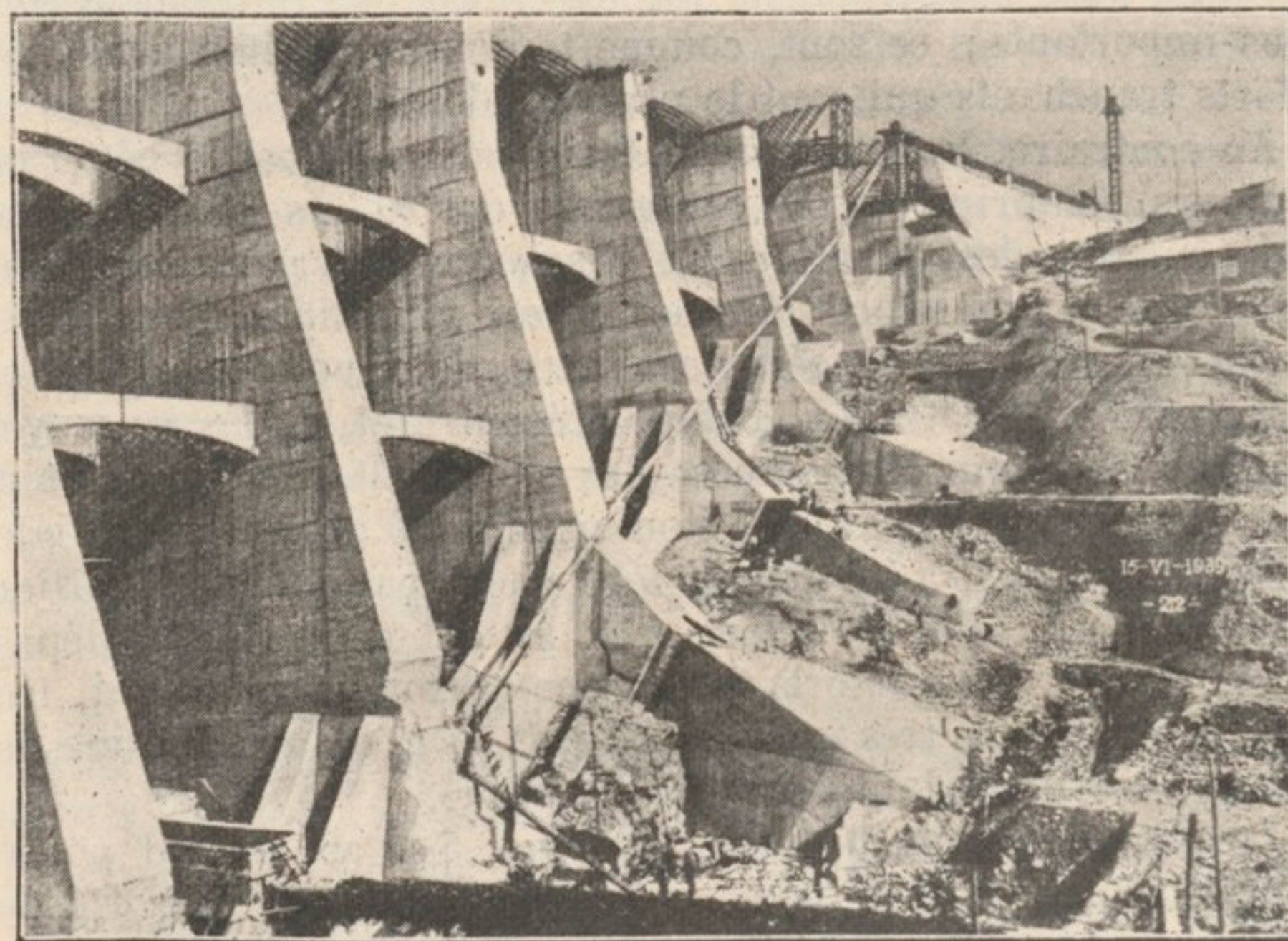


FIG. 2. — Barrage des Béni-Bahdel, sur l'oued Tafna, en Algérie.  
Renforcement aval des contreforts.

on diminue la plasticité du béton, qui a une grande importance au point de vue de la bonne tenue des ouvrages en béton armé. Enfin, l'influence des zones tendues et cisailées, qui ne gagnent à peu près rien au durcissement du béton, concorde avec ce qui précède pour réduire l'intérêt de l'emploi, en béton armé, de bétons très durs.

Pour ces diverses raisons, les résistances des bétons couramment utilisés en béton armé ont fait des progrès très lents et alors qu'on obtient pour des bétons de routes des résistances supérieures à 1 000 kg/cm<sup>2</sup>, on considère comme satisfaisantes pour du béton armé des résistances de 250 à 300 kg/cm<sup>2</sup>, obtenues avec des agrégats de même nature et les mêmes ciments.

Aucun de ces motifs de limitation des résistances du béton n'existe plus dans le cas du béton précontraint. Les résistances des ouvrages, à poids constant, sont rigoureusement proportionnelles à la résistance spécifique des bétons. La rigidité, l'absence de plasticité, la stabilité de formes, qui accompagnent les hautes résistances, cessent d'être des défauts pour devenir des avantages.

Enfin, les armatures, qui sont, en général, moins encombrantes que dans le béton armé, puisqu'il suffit de sections cinq ou six fois plus faibles à égalité d'efforts, permettent l'emploi de gammes d'agrégats plus étendues vers les gros éléments ; rien n'empêche, dans certains cas, d'arriver au moellon et même d'incorporer aux ouvrages des chaînes de libages.

Tout cela favorise et facilite l'emploi des bétons à haute résistance. De nouvelles méthodes de fabrication encore à l'étude permettront bientôt d'étendre à tous les bétons de chantier le bénéfice des très hautes résistances, réservé jusqu'ici à certaines fabrications particulières. Dans le cas d'exécution du béton précontraint par blocs moulés à l'avance en usine, on sait déjà réaliser des résistances approchant de 1 000 kg/cm<sup>2</sup>.

**MISE EN TENSION DES ACIERS.** — Les problèmes de tension et d'ancrage des aciers dans les constructions précontraintes sont difficiles, en raison, tout d'abord, de la grandeur absolue des efforts à réaliser, qui se chiffrent en milliers de tonnes, dès qu'on aborde des ouvrages de quelque importance, et peuvent coûter fort cher, si on n'emploie pas des moyens très économiques.

Une seconde source de difficultés réside dans les emplacements extrêmement limités dont on dispose, surtout quand on veut aborder des taux de précontrainte d'un ordre très élevé, indispensables pour beaucoup d'applications.

Une autre, enfin, provient de la nature des aciers employés qui doivent posséder une limite élastique très élevée.

Il faut donc exclure tout moyen de fixation des armatures comportant, soit des entailles, qui détermineraient des points fragiles, ce qui élimine les vis et écrous, soit des soudures, qui feraient perdre le bénéfice des traitements subis par le métal pour relever sa limite élastique. Il ne reste donc à la disposition du constructeur qu'un seul moyen de fixation, qui est l'utilisation des frottements.

M. Freyssinet indique comment il faut répartir des ancrages, pour éviter les réactions entre bétons comprimés et non comprimés.

La mise en tension des armatures se fait au moyen de vérins ; la valeur de la tension obtenue peut être mesurée par la pression des vérins hydrauliques ou appréciée d'après les allongements des armatures. Ces opérations peuvent se faire avant coulage ou après durcissement du béton.

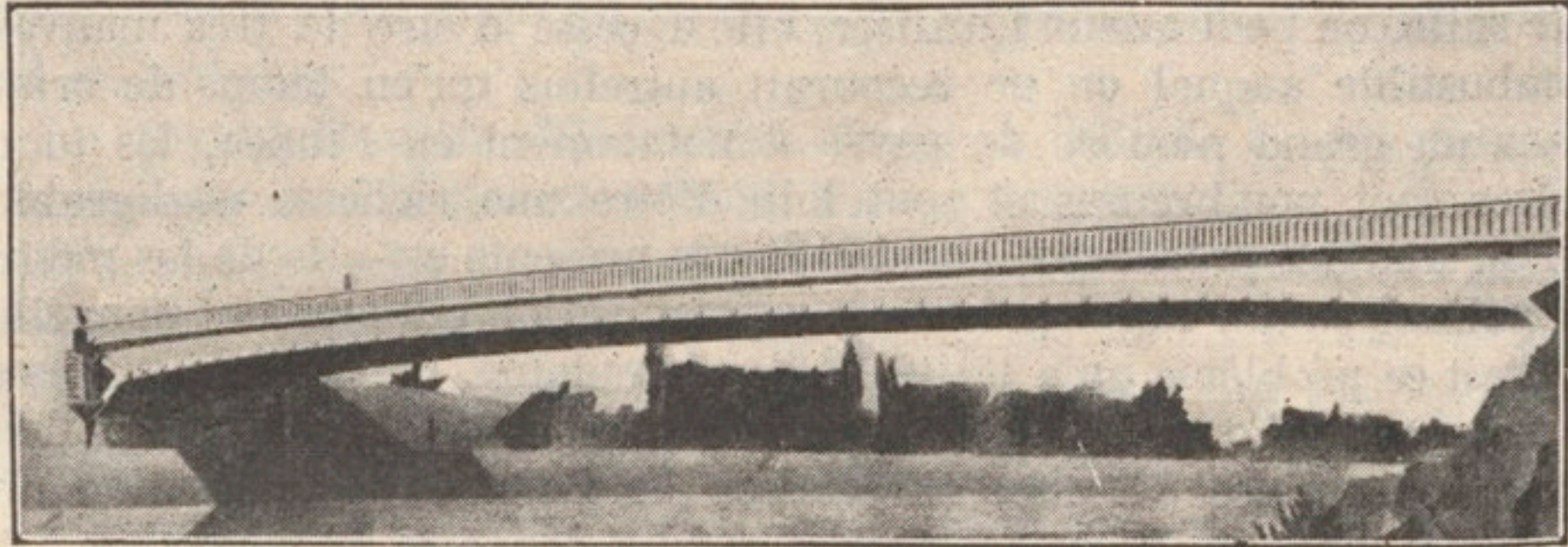


Fig. 3. — Maquette du pont sur la Marne de Luzancy (Seine-et-Marne).

*Mise en tension avant coulage.* — Dans ce cas, on prend les appuis nécessaires sur les moules ou autres organes ; la tension réalisée, on coule le béton, et après durcissement, on libère les aciers de leurs liaisons provisoires. Leur tension se reporte au béton, soit par l'adhérence seule, soit par des organes spéciaux.

Ce procédé a de nombreux avantages, mais il présente le défaut d'immobiliser, pendant toute la durée du durcissement du béton, les organes d'appui nécessaires à la création des tensions, organes coûteux dont le prix ne peut être amorti que sur de longues séries d'éléments identiques, qu'il faut ensuite transporter en une seule pièce au lieu d'emploi. Il se prête donc mal à la réalisation d'ouvrages d'une certaine importance.

Cependant, à la demande de mon concessionnaire allemand, la Société Wayss et Freytag, j'ai étudié son emploi pour des poutres d'assez grande portée, notamment le pont de Oelde de 32 mètres d'ouverture. Les entreprises Campenon Bernard ont également employé ce procédé en Algérie pour les vannes et le pont de service du Barrage des Portes de Fer (fig. 4).

En Angleterre, en France et dans différents autres pays, on utilise, pour des poutres beaucoup moins importantes et pour des solives de planchers, la tension des armatures sur une grande longueur formant un grand nombre de poutres mises bout à bout. Ces poutres, de construction simple, sont susceptibles d'applications étendues et les Établissements Sainrapt et Brice en ont entrepris la fabrication en série.

*Mise en tension après durcissement.* — Malgré le succès de ces applications, si l'on veut construire des ouvrages de très grandes dimensions et de formes quelconques, il faut tendre les aciers après durcissement du béton à précontraindre, en prenant appui directement sur lui.

La première application importante de ce procédé a été faite en 1934-35 pour la création de semelles d'appui destinées au renforcement des fondations de la gare transatlantique du Havre (1).

(1) Cette gare a fait l'objet d'un article dans le *Génie Civil* des 31 juillet et 7 août 1937 ; le chapitre relatif aux travaux des fondations se trouve dans le premier de ces numéros, p. 103.

De nombreuses poutres à travées solidaires ont été réalisées, simplement en coulant entre les massifs en béton des anciennes fondations de nouveaux massifs de béton, la liaison des anciens massifs aux nouveaux étant assurée uniquement par une compression générale de l'ensemble. Cette compression était obtenue en tendant des câbles à fils parallèles entre deux têtes d'ancrage en béton armé, disposés de part et d'autre des massifs extrêmes des anciennes fondations et dans lesquelles les extrémités des fils, convenablement façonnées, étaient enrobées de béton ; l'une de ces têtes pouvait être déplacée au moyen de vérins hydrauliques s'appuyant contre l'un des massifs extrêmes des anciennes fondations.

Cette méthode a été également utilisée pour le radier et les piles du Barrage des Portes de Fer (fig. 1) et la surélévation du Barrage des Béni-Bahdel (Algérie) (fig. 2) et pour des caissons pour la construction de quais de grande profondeur à Brest. Elle a cependant de nombreux défauts, dont les principaux sont que les têtes de tension doivent faire, dans chaque projet, l'objet d'une étude délicate, qu'elles sont coûteuses, encombrantes, ce qui limite les taux de précontrainte réalisables ; enfin, elles imposent des formes de béton et d'armatures peu commodes.

J'ai réussi à faire disparaître tous ces inconvénients par la

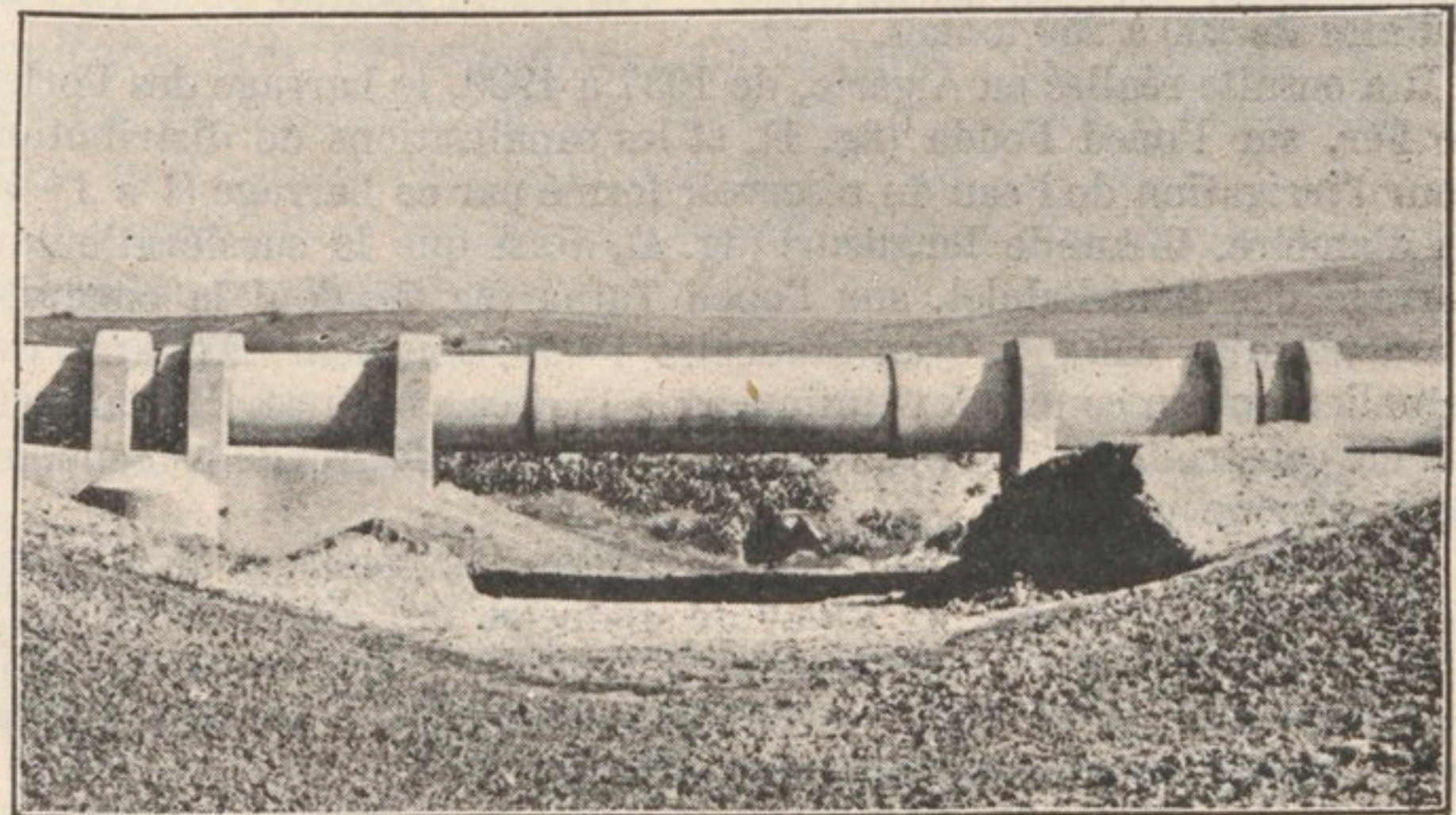


Fig. 4. — Distribution par conduites forcées pour l'irrigation des eaux du barrage des Portes de Fer, sur l'oued Fodda, en Algérie. Tuyau-poutre de 18 mètres de portée.

création d'un appareil à cônes mâle et femelle, qui réalise, en une seule opération, la tension et l'ancrage d'un faisceau formé d'un nombre de fils quelconque. L'organe d'ancrage du câble est constitué par un petit bloc de béton armé, coulé à l'avance, noyé dans le béton à précontraindre et comportant un orifice tronconique de révolution dans lequel peut entrer l'armature, constituée par des fils parallèles et isolés du béton. Ces fils sont rabattus contre les parois du cône et entre eux est disposé un coin central en acier ou béton fretté. Lorsque, après tension, le câble est abandonné à lui-même, le cône mâle, formé par les fils et les coins, se bloque dans le cône femelle de l'ancrage.

M. Freyssinet précise les conditions à réaliser pour que la paroi du cône femelle puisse supporter l'effort du câble et le transmettre au béton à précontraindre, puis il donne quelques précisions sur la mise en tension des armatures.

Les cônes d'ancrage étant noyés dans les masses sur lesquelles doivent agir les armatures, celles-ci doivent nécessairement traverser les bétons au voisinage des appuis ; sur le reste de leur longueur, elles peuvent être placées, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur des bétons à précontraindre. Aux endroits où les armatures traversent le béton, il est nécessaire que des dispositions soient prises pour supprimer toute adhérence des aciers au béton, au moins temporairement, pour permettre la mise en tension.

Le conférencier donne quelques renseignements sur les dispositifs permettant d'isoler des armatures, ainsi que sur certains procédés particuliers de mise en tension, notamment pour les armatures circulaires.

*Exécution des bétons.* — Une réalisation susceptible de développements considérables consiste à mouler d'avance des blocs maniables et séparés, de formes et de dimensions permettant l'emploi de procédés de fabrication perfectionnés et l'obtention de très hautes résistances, et à relier ces blocs en les comprimant par la mise en tension d'armatures placées après coup,

dans des tubes, des joints ou des vides quelconques ménagés à cet effet. Ces blocs peuvent être assemblés à sec ou avec des joints de mortier à haute résistance.

Ce procédé a été prévu pour l'exécution du pont sur la Marne de Luzancy (Seine-et-Marne) qui aura 55 mètres de portée et 8 mètres de largeur (fig. 3), et sera formé de 66 blocs principaux pesant 5 à 6 tonnes chacun, et de blocs secondaires plus légers, réunis par des armatures.

Cette construction en blocs durcis d'avance convient parfaitement à l'exécution de poutres de toutes portées ; par l'utilisation de formes en cantilever bien comprises, on peut atteindre des portées de l'ordre du kilomètre.

\*  
\* \*

M. Freyssinet termine son exposé par quelques indications sur les travaux qu'il a réalisés jusqu'à ce jour. Ces travaux sont très variés, parce qu'il s'est efforcé, non de développer telle ou telle application particulièrement facile, mais de prouver, par des réalisations variées, la valeur et l'ampleur du champ d'action des méthodes qu'il préconise.

C'est ainsi qu'après avoir exécuté, de 1932 à 1934, plusieurs milliers de poteaux de 8 à 12 mètres de longueur, M. Freyssinet a réalisé, de 1933 à 1935, la consolidation des fondations de la gare maritime du Havre, pour laquelle ont été notamment établis 712 pieux de 30 mètres de longueur et 0<sup>m</sup> 60 de diamètre, supportant une charge unitaire de 200 à 250 tonnes.

Il a ensuite réalisé en Algérie, de 1937 à 1939, le barrage des Portes de Fer, sur l'oued Fodda (fig. 1), et les canalisations de distribution pour l'irrigation de l'eau du réservoir formé par ce barrage (1 à 1<sup>m</sup> 40 de diamètre, 45 km de longueur) (fig. 4), ainsi que la surélévation du barrage des Béni-Bahdel, sur l'oued Tafna (fig. 2), dont la conduite d'amenée des eaux à Oran (diamètre 1<sup>m</sup> 10, longueur 200 km) est actuellement en cours d'exécution sous licence. A Brest, 19 caissons ont été construits, en 1937 et 1938, pour les quais de grande profondeur de la Marine nationale.

Actuellement, on construit dans la région parisienne, à Montesson, un émissaire souterrain de 3<sup>m</sup> 50 de diamètre qui amènera les eaux usées à la station de traitement d'Achères ; on construit également un pont sur la Marne de 55 mètres de portée à Luzancy (fig. 3) et des dalles de 20 mètres de portée.

En Allemagne, la fabrication des tuyaux « Freyssinet » a été entreprise à échelle industrielle et plusieurs ponts et halles ont été exécutés.

Enfin, M. Freyssinet indique qu'il a étudié de nombreux avant-projets de pont, notamment celui d'une travée de 640 mètres qui réaliserait une économie de métal de 80 % par rapport à un pont suspendu rigide, et conclut en ces termes :

La création d'un matériau nouveau et des techniques que nécessite son utilisation soulève de nombreuses difficultés de réalisation à l'occasion de chaque problème pratique, mais grâce à la foi robuste et au travail opiniâtre de mes collaborateurs, elles sont peu à peu résolues ; dès à présent, nous sommes en possession de nombre de solutions pratiques, mises au point et éprouvées par la préparation et l'exécution d'un ensemble de travaux dont la valeur est de l'ordre d'un demi-milliard de francs 1938. Presque tous sont dus à mon concessionnaire général, la Société des Entreprises Campenon Bernard qui, dès 1934, a compris l'importance économique de l'idée de précontrainte et assumé les risques de son application à de grandes œuvres d'intérêt public.

Ces réalisations permettent de prévoir ses possibilités futures. Tout ce qui peut être construit par les procédés actuels, quels qu'ils soient, peut être réalisé en béton précontraint ; son domaine recouvre notamment en entier celui du béton armé, en augmentant les portées et en allégeant les formes. En outre, le béton précontraint permettra nombre de réalisations actuellement jugées impossibles, par exemple : presses hydrauliques de deux cent mille tonnes ou même davantage ; bâtis de machines gigantesques ; îles et ports flottants ; navires de plusieurs kilomètres ; machines à capter l'énergie du vent qui mettront à la disposition de l'humanité vingt fois plus d'énergie que tous les fleuves, rivières et marées réunis et libéreront les nations de la servitude de la houille et du pétrole puisqu'il y a du vent partout ; tubes-laboratoires aux dimensions et pressions énormes, ponts et bâtiments immenses, constructions dont rien ne saurait, actuellement, nous suggérer l'idée.

Ces nouveaux procédés associeront tous les matériaux avec le maximum des qualités qui pourront leur être données, car le système des précontraintes n'est pas un moyen limité à un domaine technique déterminé. En réalité, c'est un état d'esprit,

une affirmation de la volonté de l'ingénieur, de ne plus subir les conséquences des états élastiques initiaux, résultant du hasard des procédés d'exécution, mais de les considérer, au contraire, comme une donnée de ses projets, modifiable à son gré, au même titre que les résistances spécifiques et les sections de ses poutres, et cela, dans tous les cas et quels que soient l'objet et l'étendue de la construction. Il se trouve que cette décision transforme de tout au tout les données et les résultats de tous les problèmes de construction et ouvre une ère nouvelle de l'art de construire.

Le plus curieux en tout ceci, c'est que ce moyen, si nouveau et si puissant, n'est en fait rien d'autre que la généralisation du plus ancien moyen d'assemblage connu de l'homme. C'est le geste du primitif fixant une pierre à une branche avec un lien fortement tendu, de l'homme de l'âge de fer emmanchant une hache par serrage ; c'est le moyen du mur et de la voûte, du boulon du mécanicien et du rivet ; c'est aussi la frette de la roue et du canon. Ce vieux procédé, élevé à la hauteur d'une doctrine générale, devient le plus fécond des perfectionnements de l'art de construire, réalisé depuis la généralisation de l'emploi du métal dans les charpentes.

## PHYSIQUE INDUSTRIELLE

### LA MISE EN EXPLOITATION DES TOURBIÈRES FRANÇAISES

Depuis que l'on a réussi à sécher et à agglomérer la tourbe et que, par suite, on peut mieux l'utiliser, elle a cessé d'être le très mauvais combustible auquel on ne recourait autrefois qu'en temps de crise. Dans un grand nombre de pays, et notamment en France, les tourbières sont nombreuses et sont loin d'être une richesse négligeable. Aussi, une des préoccupations de l'heure présente est-elle de les mettre en valeur, ce qui suppose toute une organisation entièrement nouvelle.

C'est ce problème qu'a traité M. R. Chéradame, Ingénieur des Mines, directeur du Comité d'Organisation de l'Industrie des Combustibles minéraux solides (C.O.H., abréviation de Comité d'Organisation des Houilles), dans un cours-conférence qu'il a donné le 13 novembre à la Maison de la Chimie et qui était présidé par M. L. Crussard, Inspecteur général des Mines.

Le conférencier a supposé connues les solutions qui ont permis de vaincre les difficultés techniques qui, jusqu'en ces dernières années, s'opposaient à une exploitation continue, rationnelle, des tourbières ; nous n'y reviendrons pas, car ce sujet a été traité, à plusieurs reprises, dans le *Génie Civil*, et notamment dans les numéros du 6 avril 1940, p. 231, et des 24-31 mai 1941, p. 222.

Dans ce qui suit, nous résumerons, puis commenterons la conférence de M. Chéradame.

ORGANISMES ADMINISTRATIFS DONT DÉPEND LA TOURBE. — On distingue trois sortes d'organismes. Dans les organismes de contrôle, les ingénieurs du Corps des Mines accordent les exploitations et veillent à ce qu'elles soient entreprises dans les règles de l'art. Leur contrôle s'étend à la production et à la transformation de la tourbe. L'exploitation des tourbières dépend donc du Secrétariat d'État à la Production industrielle.

Il existe au C.O.H. un service qui est chargé d'organiser l'industrie et le commerce de la tourbe. D'autres comités s'intéressent également aux questions tourbières : la Commission générale des Carburants de remplacement, le Comité des Carburants de Synthèse, le Comité des Combustibles minéraux pour gazogènes, etc. Pour ne pas disséminer les efforts, il a été décidé que le C.O.H. serait le principal opérant, soit pour son propre compte, soit comme intermédiaire entre les autres comités et l'industrie. Il n'y a donc qu'un organisme de contrôle et qu'un service d'organisation.

Il existe, enfin, des organismes de répartition, car la tourbe ne fait pas l'objet d'une répartition nationale. Son utilisation est presque toujours régionale, et la vente en est libre presque partout. Dans un très petit nombre de régions, la production est suffisante pour procurer un appoint non négligeable aux consommateurs de combustibles solides ; dans ce cas, les organismes de répartition sont ceux du charbon. Dans d'autres cas, l'Administration préfectorale s'occupe de coordonner la répartition.

LA TOURBE AVANT LA GUERRE. — La tourbe, qui avait suscité un assez grand intérêt de 1917 à 1920, par suite de la disette de charbon à cette époque, était, depuis, à peu près tombée dans