

du
ÉCOLE SPÉCIALE DES TRAVAUX PUBLICS
DU BATIMENT ET DE L'INDUSTRIE
M. Léon EYROLLES, C. ✱, ✱, I., Ingénieur-Directeur

COURS
DE
BÉTON ARMÉ

LIVRE II
COMPLÉMENTS ET APPLICATIONS

PAR M. G. ESPITALIER
Lieutenant-Colonel du Génie,
Ancien Professeur du Cours de Construction à l'École d'Application de Fontainebleau.

DIXIÈME ÉDITION

PARIS
ÉCOLE SPÉCIALE DES TRAVAUX PUBLICS
Rue Du Sommerard, Rue Thénard et Boulevard Saint-Germain
PROPRIÉTÉ DU DIRECTEUR DE L'ÉCOLE

1925

Tous droits réservés

B

Le poteau B travaillera peu. Pour plus de simplicité on lui donnera, sur les deux faces latérales, les mêmes armatures qu'au poteau C dont le moment est $M_2 = 1\ 080\ 000$ kgcm.

Les dimensions étant $b = 125$, a ou $H = 60$, $H' = 55$, on sera conduit à placer près des faces latérales, où il existe déjà 2 aciers $\Phi 29$ m/m (section $13,2$ cm²), 2 aciers intercalaires $\Phi 20$ (section $6,28$ cm²) soit au total une section totale $19,48$ cm². Ces fers intercalaires, placés à l'encastrement en tête et au pied, auront une longueur limitée de 1,5 m.

Le pilier D, où le moment est $M_3 = 1\ 620\ 000$ kgcm., se trouve dans une situation particulière, par suite de son épaisseur réduite à 30 cm au lieu de 60 cm., par la rainure du joint qui le divise en deux.

Pour le mettre en situation de céder à la sollicitation, il sera bon d'établir des semi-articulatifs en tête et au pied, ainsi qu'au potelet supérieur au-dessus de la poutre. Ce dispositif aura pour effet de supprimer les effets du moment fléchissant.

CHAPITRE XI

DE L'EMPLOI DES VOUTES DANS LES COMBLES

- § 1. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES. — La raison d'être d'un comble courbe.
 § 2. A) VOUTES BANDÉES PAR UN ENTRAÎT. — a) Nervures en arc avec hourdis d'intrados ; b) Bowstrings de grande portée ; c) Voûtes à culées perdues.
 § 3. B) FERMES-CONSOLES.
 § 4. C) VOUTES ARTICULÉES AUX SOMMETS DES PYLONES. — Hangar à dirigeables.

§ 1. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

214. La raison d'être d'un comble courbe. — L'emploi des voûtes en ciment armé pour la couverture des combles a donné lieu, pendant la guerre, à des applications nombreuses et remarquables. Ce mode de construction est susceptible de prendre en outre un développement considérable, et il nous paraît nécessaire d'en faire une étude particulière.

Nous avons tellement accoutumé de voir les combles composés de surfaces planes, que les formes cylindriques peuvent nous apparaître comme le résultat singulier et imprévu du caprice d'un artiste, la seule façon d'écouler l'eau d'un toit étant de la recevoir sur un plan incliné.

A la vérité, cette solution s'impose, en quelque sorte, avec les matériaux que l'on a de tout temps employés pour réaliser les charpentes et qui sont des pièces de bois naturellement droites. L'habitude est si bien prise que, alors même que la ferme affecte inférieurement une courbure régulière (ferme Philibert Delorme ou ferme Emy) on se croit obligé de rétablir la pente régulière et uniforme par une membrure supérieure droite, tangente à la courbe inférieure.

215. A la vérité, cependant, une pente uniforme n'a rien de rationnel *a priori*.

La pente, en s'éloignant du faitage, devrait au contraire aller en croissant, à mesure que s'accroît la quantité d'eau à égoutter.

Le toit à la Mansard est la plus ancienne dérogation à la vieille règle de la pente uniforme, encore ce mode de couverture a-t-il été inspiré surtout par des raisons d'esthétique, de convenances et d'aménagement d'un comble habitable.

Dans les constructions modernes et notamment pour les grands halls industriels, on constitue souvent aujourd'hui des charpentes métalliques à membrure supérieure polygonale, d'où résulte une certaine économie de matière; mais, au contour polygonal, il est rationnel de substituer un arc à courbure régulière, aussitôt que les matériaux le permettent, et c'est à quoi se prête particulièrement le béton armé.

En outre, l'adoption d'une voûte conduit à une transformation complète du principe des charpentes. Tandis que les systèmes habituels comportent des réseaux compliqués de barres destinées à soustraire les arbalétriers aux effets de flexion, une voûte en chaînette ou sensiblement parabolique affecte par elle-même la forme d'une courbe d'équilibre sous les charges à prévoir. Elle se suffit à elle-même, sans adjonction de tout treillis triangulé, pourvu que les matériaux qui la composent aient les propriétés élastiques correspondantes.

Telle est l'idée générale qui peut guider dans l'emploi des voûtes en ciment armé pour la couverture des bâtiments.

Dans la figure 77, nous avons déjà rencontré une toiture courbe, d'une portée modérée, il est vrai, mais qui présentait l'avantage de dégager complètement l'étage du comble et de le rendre facilement habitable. Or, on peut généraliser l'emploi de ce mode de construction, lorsqu'il s'agit de franchir de vastes espaces, dans les établissements industriels importants par exemple.

216. Trois cas peuvent alors être envisagés suivant que :

- 1° La voûte est bandée par un entrait inférieur;
- 2° La demi-voûte fait corps avec le montant ou pylône, et l'on a une ferme en console allant du sol à la clef;
- 3° La voûte est articulée au sommet de pylônes rigides.

§ 2. VOUTES BANDÉES PAR UN ENTRAIT

217. a) Hourdis d'intrados avec nervures en arc formant fermes. — On résout le problème d'une façon relativement simple et facile à calculer en composant la couverture par un hourdis continu placé à l'intrados, où se manifestent les efforts de compression dus au moment fléchissant négatif sur lequel il faut compter dans une voûte. Ce hourdis est soutenu par des arcs-nervures saillants à l'extérieur.

Enfin la poussée est équilibrée par un entrait réunissant les deux naissances. Toutefois, un entrait en ciment armé de grande longueur a besoin d'être soutenu sur le parcours, et l'on devra le plus souvent compléter le système en disposant plusieurs aiguilles pendantes, dans ce but (*fig. 77*).

Pour que le hourdis n'ait pas une grande épaisseur, si l'on se dispense de mettre des pannes, il convient de ne pas écarter les arcs-nervures outre mesure. On peut admettre en moyenne 3,5 m. de distance entre eux.

Les bâtiments ainsi couverts ayant en général une très grande longueur, il est nécessaire de tenir compte de la dilatation, et tout le berceau sera coupé tous les 30 à 50 m. par des joints de dilatation de 2 cm. de largeur.

218. b) VOUTE DE GRANDE PORTÉE ET BOWSTRING (*système Considère*). — (1) Au centre d'aviation d'Alger, la Société Pelnard-Considère-Caquot a construit un double hangar pour aéroplanes d'un type original dont nous allons donner les principales caractéristiques.

Le programme comportait deux hangars accolés présentant 32 m. d'ouverture libre avec 7 m. de hauteur pour l'entrée des appareils. La longueur du hangar était de 40 m.

Il s'agissait donc de couvrir une grande surface sans supports intermédiaires. La couverture prévue était en tuiles, et la charpente de soutien, en ciment armé, se réduisait ainsi à une série de fermes et de pylônes espacés de 5 m. dans le sens longitudinal et de 32,75 m. dans le plan de ferme, entre axes.

Les fermes sont reliées par des pannes et des sablières.

(1) Voir *Génie Civil*, 24 mai 1919.

Chacune de ces fermes est formée d'un arc parabolique présentant une flèche d'environ le quart de la portée, dont les poussées sont équilibrées par un entrait horizontal soutenu lui-même par deux aiguilles pendantes, aux 2/7 de la portée. Les fermes d'about sont constituées en bowstrings à montants multiples limitant des panneaux de vitrage. Ces montants sont écartés de 2,2 m.

Au sommet de la voûte, une petite fermette auxiliaire permet de relever le faitage de manière à maintenir la couverture sous une pente suffisante.

Les eaux de pluie des deux versants contigus sont recueillies dans une noue en ciment armé présentant une largeur de 50 cm. et une profondeur allant de 15 à 20 cm.

Les tuyaux de descente espacés de 10 m. débouchent dans un égout collecteur.

Dimensions des pièces de ferme :

Section de l'arbalétrier courbe.	70 × 25 cm.
— de l'entrait et du poinçon	40 × 16 cm.
— des pannes écartées de 2 m. 25	40 × 10 cm.

En raison du voisinage de la mer et de l'action éventuelle de l'air salin, on a adopté un béton à fort dosage de ciment.

Ciment.	500 kg.
Sable.	400 litres.
Gravier.	300 litres.

219. Nature des appuis. Variations linéaires dues à la dilatation. — Ce qui caractérise le système général adopté, c'est le mode d'appui sur les pylônes. Les deux arcs qui se prolongent dans un même plan sont fortement encastrés sur la tête du pylône médian, tandis qu'ils reposent à rotule par les extrémités libres sur les pylônes extrêmes:

Ces pylônes de rive eux-mêmes sont pourvus d'une semi-articulation sur leurs semelles de fondation qui s'enfoncent de 3 m. dans le sol, avec une surface d'assiette de 2,7 m².

Le pylône intermédiaire, qui doit présenter une grande rigidité, mesure, dans sa section horizontale, 120 cm. de largeur avec 50 cm. d'épaisseur. Les pylônes extrêmes qui ne sont soumis qu'à des efforts longitudinaux par suite des articulations (et sauf l'action fléchissante du vent) ont une section réduite à 70 × 50 cm.

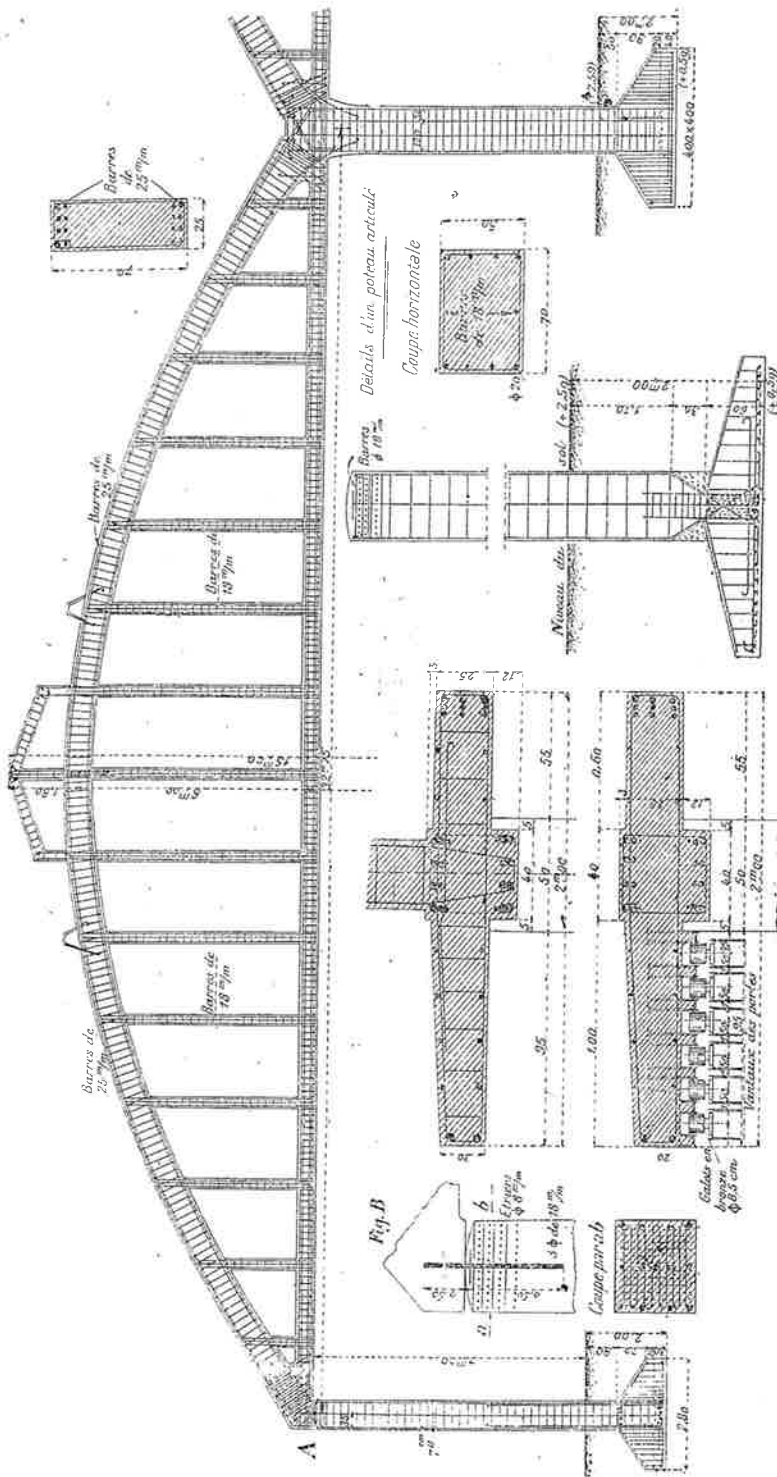


Fig. 82. — Hangar pour hydravions du centre d'aviation maritime d'Alger. — Ferme d'about.

La semi-articulation est constituée par le croisement des barres longitudinales d'armature, pliées en conséquence et fortement ligaturées.

La tête du pylône est arrondie en cylindre de grand rayon et armée de quatre nappes horizontales de fer en quadrillage. Le pied de ferme repose sur cette partie cylindrique par un méplat et le tout est traversé par trois forts goujons en acier de 18 m/m qui empêchent ces deux éléments de glisser et de se séparer, ce qui entraînerait la chute de tout l'ouvrage.

Ce dispositif a pour but d'assurer la libre dilatation de la ferme, cette dilatation pouvant produire des variations linéaires assez notables en raison même de la grande portée. Les effets de la température ne sont pas les seuls en cause d'ailleurs ; il y a lieu, en définitive, de tenir compte des trois éléments suivants :

- Retrait de prise du béton ;
- Dilatation due à la température ;
- Allongements élastiques sous l'influence des efforts de traction.

Le retrait de prise peut être, il est vrai, assimilé aux effets d'un changement de température, et il a paru suffisant d'examiner ce qui se passerait pour un écart global de température de $\pm 25^\circ$, y compris l'influence du retrait.

Le constructeur a admis un coefficient de dilatation de 0,00001 pour le béton ce qui donne une variation linéaire maximum de 0,25 m/m par mètre.

D'autre part, en admettant un coefficient d'élasticité des aciers de $E = 22\ 000$ kg par m/m^2 et un taux de travail de 12 kg par m/m^2 , on a un allongement spécifique par mètre linéaire de

$$\lambda = \frac{12 \times 1\ 000}{22\ 000} = 0,55 \text{ m/m.}$$

La tête du pilier central constituant un point fixe, la variation linéaire au droit du pilier extrême peut donc atteindre au maximum

$$32,75 (0,25 \times 0,55) = 26 \text{ m/m.}$$

Ce déplacement est facilement réalisé grâce à la flexibilité du pilier oscillant autour de sa semi-articulation de base, en même temps que la rotule cylindrique du sommet permet les faibles variations de l'angle du pilier et de l'entrait.

Théoriquement, la ferme ne touchant le cylindre que le long d'une génératrice, il en résulte, il est vrai, une fatigue exceptionnelle du béton. En admettant même que l'assiette intéresse 10 cm. de développement, la pression pourrait atteindre 150 à 200 kg par cm^2 , mais l'emploi d'un béton particulièrement riche, et le fretage à quatre nappes superposées, permettent au béton de supporter cette fatigue exceptionnelle.

220. Ferme d'about. Action du vent. — La ferme de tête est soumise à des exigences spéciales :

1^o Elle doit être organisée pour assurer le guidage des panneaux de porte qui, au nombre de six, glissent les uns derrière les autres et occupent, par conséquent, une grande épaisseur en dehors du plan de ferme ;

2^o Elle doit, en outre, subissant la pression normale du vent, être solidement contreventée en arrière.

Pour satisfaire à ces deux conditions, l'entrait de cette ferme est constitué comme une poutre posée à plat et capable de résister à une flexion horizontale.

Cette poutre de 2 m. de largeur présente par rapport à la ferme, deux encorbellements : l'un de 0,60 m. de saillie à l'intérieur servant de passerelle, l'autre à l'extérieur, avec une saillie de 1 m. servant de chapeau au-dessus des panneaux de porte et soutenant les organes de guidage.

221. — En ce qui concerne l'action du vent, on compte généralement que celui-ci peut exercer une pression de 150 kg par m^2 de surface plane frappée normalement.

Lorsque le vent prend le hangar par le travers, les efforts de renversement sont absorbés par les pylônes et surtout par la rangée des piliers centraux qui sont particulièrement rigides. Mais, lorsque le vent souffle dans le sens longitudinal, la ferme d'about, dont les vides sont garnis de châssis vitrés, reçoit une poussée considérable dont les efforts sont reportés pour la plus grande partie, sur la poutre constituant l'entrait horizontal. Celui-ci reçoit en outre la moitié de la poussée qui s'exerce sur les panneaux de la porte quand celle-ci est fermée.

C'est la poutre-passerelle horizontale de 2 m. de largeur qui