

N° 47

NOTE

SUR

LA CONSTRUCTION DES VOUTES SANS CINTRAGE

PENDANT LA PÉRIODE BYZANTINE

Par M. CHOISY, ingénieur des ponts et chaussées.

Une mission en Orient que l'administration des ponts et chaussées a bien voulu me confier pour compléter des travaux antérieurs sur l'art de bâtir chez les anciens, m'a permis d'observer certains types de voûtes byzantines dont la structure essentiellement simple paraît offrir aujourd'hui même un intérêt pratique : ce sont des voûtes exécutées sans aucun support auxiliaire. Les Romains d'Occident s'étaient attachés à réduire les frais de cintrage ; les Romains d'Orient, et après eux les Byzantins leurs successeurs directs, ont fait un dernier pas dans cette voie : ils sont parvenus à s'affranchir absolument de tout cintre. Je n'entreprends point d'exposer l'histoire de leurs méthodes, elle m'entraînerait à des discussions de dates, de textes et de traditions qui sortent du cadre d'une publication technique : je dois me contenter ici d'indiquer sommairement l'esprit des procédés et le principe de leurs applications.

I. — VOUTES EN BERCEAU.

L'artifice qui permet aux Byzantins de se passer ainsi de cintrage, consiste à exécuter les voûtes par tranches

en briques de champ. Voici, dans un exemple simple, la manière dont ils procédaient.

Je suppose qu'il s'agisse (Pl. XXI, *fig. 4*) de construire en briques un berceau terminé par un mur de tête *ab* : au lieu de maçonner par lits rayonnants, on chemine par tranches verticales. Les briques de la première tranche sont appliquées contre le mur de tête *ab* à l'aide de mortier à prise rapide. Tant que la tranche demeure inachevée, les briques se maintiennent par leur seule adhérence au mortier ; mais une fois la tranche terminée, elle constitue un arceau parfait, capable de résister comme une voûte ordinaire : c'est un premier tronçon du berceau. A ce tronçon on en accolera un second comme on a fait adhérer le premier au mur de tête, et ainsi de suite.

Si le mortier est trop faible pour que les briques se maintiennent momentanément par simple adhérence, on atténue l'effort qui les porte au glissement, en renonçant à construire par tranches exactement verticales, pour procéder par tranches plus ou moins inclinées. (Voir la projection *fig. 5* et la perspective *fig. 1.*)

Si l'on veut réduire davantage encore la tendance des briques à se détacher en glissant, on donnera aux tranches une légère conicité (*fig. 10* et *11*), et la voûte se composera, non plus d'anneaux à faces planes qui s'accolent, mais de couches tronc-coniques qui s'emboîtent.

En somme et quelle que soit la forme attribuée aux tranches, les briques sont temporairement retenues en place par le mortier, au lieu d'être portées sur un cintre : tel est le principe ; là réside la différence entre les berceaux byzantins et les nôtres.

La tradition de ce mode de structure s'est conservée dans les régions de l'Asie centrale, d'où il paraît tirer son origine. On bâtit aujourd'hui à Mossoul (*) comme les

(*) Je dois ce renseignement à l'obligeance de M. Guise, consul

Byzantins de Salonique ou d'Éphèse bâtissaient il y a douze siècles; et l'interprétation si claire d'ailleurs des ruines trouve dans les pratiques contemporaines une vérification décisive. Est-il besoin de faire ressortir les avantages que nous pouvons nous-mêmes attendre de ces procédés sans cintrage, surtout dans les travaux en sous-œuvre, les voûtes de nos tunnels, tant de cas enfin où l'emploi des cintres n'est pas seulement une dépense, mais une cause d'encombrement et une gêne?

Ces généralités admises, venons aux détails d'application :

1^o Les briques employées sont d'ordinaire assez minces et fort grandes, double circonstance qui en facilitait l'adhérence; les plus petites ont rarement moins de 0^m,30 de côté, et les plus épaisses ne dépassent guère 0^m,04. Quant au mortier qui les relie, il se compose de chaux grasse et de ciment de tuileaux, et se présente par lits de 0^m,04 à 0^m,05 au moins. Voici, je crois, comment cette épaisseur des lits est obtenue :

Dès qu'une tranche de la voûte est achevée, on la recouvre d'une couche générale de mortier formant sur

de France à Damas, qui m'a décrit tous les détails d'une construction de voûte réalisée sous ses yeux. Les mortiers; à Mossoul, étaient remplacés par du plâtre, et les briques par de très-petits moellons. Quant au procédé, il était de point en point celui que je viens d'exposer. Ce procédé, du reste, je l'ai mis moi-même à l'épreuve dans les conditions suivantes :

La voûte d'essai que j'ai construite est un berceau en plein cintre de 3^m,40 de diamètre sur 0^m,11 d'épaisseur. Les matériaux sont des briques de 0^m,055, sur 0,11 et 0,22. Je les ai fait poser par tranches inclinées par rapport à la verticale d'une dizaine de degrés au plus. La conicité des tranches est à peine sensible. Enfin, pour rendre l'expérience plus concluante, j'ai remplacé le mortier par de la terre légèrement argileuse, sans y incorporer la moindre parcelle de chaux. Les circonstances étaient aussi défavorables que possible, et pourtant la voûte a parfaitement réussi.

toute sa surface comme un enduit, et sur cet enduit presque sec on applique une seconde couche de mortier destinée à faire adhérer la nouvelle assise de briques. L'avantage qu'on trouve à procéder ainsi est d'abord de réduire la dépense de briques, ensuite et surtout de régulariser la surface qui doit recevoir une nouvelle assise.

2° On ne fait jamais commencer les tranches au niveau des naissances. Ces assises de champ sont moins simples à établir que les lits rayonnants de nos voûtes ordinaires ; aussi les Byzantins n'y ont recours qu'à l'instant où les lits cessent de se maintenir sans cintre. La *fig. 1* montre cette association des lits convergents qui constituent la voûte vers les naissances, avec les tranches qui en forment toute la partie haute.

3° Il faut que la voûte ait pour point de départ soit un mur-pignon comme *ab* (*fig. 4 à 11*), soit un arc de tête, qui, bien entendu, s'établira sur cintre et d'après le système vulgaire des assises convergentes.

4° Quand le berceau doit couvrir l'intervalle compris, soit entre deux arceaux de tête, soit entre deux murs-pignons, il peut s'exécuter de deux manières différentes :

L'une des solutions consiste à partir d'un seul des murs-pignons, cheminer vers l'autre mur dont on approche le plus possible, et combler l'intervalle resté vide à l'aide d'une fourrure en briques à lits convergents.

L'autre solution (la plus ordinaire) est indiquée par les projections *fig. 12 et 13* et la perspective *fig. 3* : on part à la fois des deux murs formant têtes ; et, au moment où les deux tronçons sont sur le point de se rejoindre, on resserre progressivement le vide en faisant alterner les tranches transversales avec des lits rayonnants. Les lits rayonnants s'inclinent à mesure qu'on approche du sommet ; mais en même temps ils diminuent de longueur, et leur exécution n'entraîne de fait aucune difficulté sérieuse.

Citons maintenant quelques exemples.

En suivant autant que possible l'ordre des dates, nous trouvons :

A Nicomédie, plusieurs voûtes des Thermes, qui paraissent remonter à Dioclétien, et se rapportent au type *fig. 1* ;

A Éphèse, les voûtes des évidements pratiqués dans les piliers de la basilique de la Trinité (époque constantinienne, *fig. 12*) ; les voûtes de la catacombe dite église des Sept-Dormeurs ;

A Constantinople, ceux des berceaux de Sainte-Sophie dont j'ai pu vérifier la structure ; les panneaux remplissant l'intervalle entre les arcs-doubleaux de Sainte-Irène ; quelques fragments parmi les ruines du palais des Blanches ;

A Salonique, l'arc romain dit de Constantin ; une citerne sous la basilique de Saint-Dimitri ; les nefs latérales de Sainte-Sophie ; la porte de l'enceinte et la fontaine des Saints-Apôtres ;

A Nicée, les voûtes des tours. Plusieurs présentent la disposition *fig. 13*. L'une d'elles est construite par lits alternatifs de briques et de moellons ; les moellons, taillés d'ailleurs dans une pierre poreuse et légère, ont jusqu'à 0^m,20 d'épaisseur ; il fallait, pour arriver à les maintenir en place pendant la construction d'une assise, donner aux lits une très-forte inclinaison : aussi, dans ce cas particulier, l'inclinaison des assises a été portée à 45°.

II. — VOUTES D'ARÊTE.

La construction par lits tronç-coniques s'étend évidemment au cas où deux berceaux se pénètrent pour former une voûte d'arête (*fig. 8*) : on part des quatre murs de tête, et l'on fait marcher de front l'exécution des deux berceaux ; les tranches de l'un s'appuient à leur naissance

sur les tranches correspondantes de l'autre, et la construction s'achève sans difficulté.

Plus précisément, pour réaliser la voûte *fig. 8*, la marche est celle-ci :

On met en place les assises tronc-coniques *a, a'* formant les têtes du premier berceau ;

Puis on pose les assises de tête *b, b'* du second berceau : celles-ci trouvent leur appui, leur sommet en quelque sorte, sur la face conique des assises *a, a'* ;

Revenant au premier berceau, on établit les assises *c, c'* ; on passe de nouveau au second berceau, et ainsi de suite.

Ainsi furent construites diverses voûtes du monastère de Vatopedi à l'Athos, etc. Ce n'est pas là toutefois le cas ordinaire des voûtes d'arête : les Byzantins, pour en augmenter la stabilité, imaginèrent d'en surhausser le sommet ; ils renoncèrent dès lors à les engendrer par la pénétration de deux berceaux cylindriques, et adoptèrent un mode de génération plus complexe sans doute, mais donnant plus de solidité et moins de poussée. La *fig. 6* fera saisir ce type usuel.

L'arête n'est point une ellipse, mais un arc de cercle (l'arc rabattu en *mnr* et ayant le point *c* pour centre) ; et l'intrados de la voûte est déterminé par un cercle de rayon variable, qui s'appuie sans cesse sur cette arête, a son centre sur l'axe *ox* du rectangle de base et son plan perpendiculaire à cet axe. En d'autres termes, chaque panneau *mno* forme autour de *ox* une surface de révolution dont l'arc diagonal est la directrice.

Partant de cette définition, on conçoit par quel moyen l'ouvrier doit se guider pour exécuter la voûte :

En *c'*, centre de l'arc arêtier, il articule une tige dont la longueur correspond au rayon même de cet arc. Il articule une seconde tige au point *o'*, et, en *a'*, il attache un fil. Se plaçant ensuite dans le plan diagonal, il règle sur l'ex-

trémité s de la tige c' , les longueurs de la tige o' et du fil a' ; et il lui suffit, pour obtenir à la fois une courbe de lit ss' et les génératrices de la surface tronc-conique qui lui correspond, de faire tourner le triangle $o'sa'$ autour de l'axe $o'x'$.

Tel est le mode d'exécution des voûtes d'arête byzantines. On a depuis longtemps observé que les arêtes de ces voûtes sont saillantes vers les naissances et s'effacent vers le sommet pour laisser à la partie supérieure l'aspect d'une calotte sphérique. Toutes ces bizarreries résultent directement du mode de génération, et l'on s'en rendra compte soit en discutant l'équation de la surface, soit en traçant par les procédés graphiques une série de sections. — Autre détail caractéristique : la coupe de la voûte suivant l'axe ox donne une courbe à inflexion se relevant vers les arceaux de tête. Cette courbe insolite se remarque à toutes les voûtes tant des collatéraux que du narthex inférieur de Sainte-Sophie; bien que le parement soit voilé par des enduits, un tel indice suffit assurément pour révéler la structure. Au reste, on peut citer comme des exemples d'une vérification plus facile les voûtes de la citerne dite des Mille et une colonnes à Constantinople, une citerne en ruine près et au sud-ouest du monastère de Chora, etc.

Dans ces divers exemples, le sommet a été placé aussi haut que possible. La hauteur manquait pour exécuter des coupoles; on s'est du moins rapproché de la coupole, utilisant ainsi tout l'espace libre au profit de la stabilité. Le système byzantin, grâce à l'indétermination qu'il laisse pour la position du sommet, se prête fort bien à ces combinaisons, et c'est là un de ses principaux avantages.

III. — COUPOLES.

Ce qui vient d'être dit des voûtes d'arête (type de la fig. 6) convient de tout point aux coupoles sur pendentifs.

La coupole sur pendentifs n'est qu'un cas particulier de la voûte d'arête byzantine : elle répond à l'hypothèse où l'arc diagonal devient un demi-cercle. Les Byzantins ont saisi cette liaison d'idées, et en ont déduit pour la coupole sur pendentifs le procédé d'exécution le plus élégant comme aussi le plus logique ; la *fig. 7* dispense d'entrer dans aucun détail sur son application. C'est d'après ce modèle que furent construites les voûtes de la grande citerne de Constantinople que les Turcs appellent *Yere batan serai*, celle de la fontaine de Chilandari à l'Athos, etc.

Une seconde solution, adoptée concurremment avec celle de la *fig. 7*, consiste à disposer, comme nous le faisons nous-mêmes, les lignes d'assises suivant des cercles horizontaux, et les surfaces de lits suivant des troncs de cône renversés à axe vertical (*fig. 15*). Dès qu'un lit tronc-conique est achevé, il peut recevoir à son tour, sans aucun cintrage et par la seule adhérence du mortier, les briques d'un nouveau lit annulaire, et ainsi de suite. Mais l'adhérence est d'autant mieux assurée que l'angle du cône est plus ouvert ; et ici commence la différence entre la structure byzantine et la nôtre. Au lieu de faire converger vers le centre *o* les surfaces tronc-coniques des lits, les Byzantins atténuent l'inclinaison des génératrices, et par là exagèrent l'adhérence. Je ne connais aucune exception à cette règle ; et l'une des coupoles où elle se manifeste avec le plus de netteté est celle de la grande rotonde de Saint-Georges à Salonique.

Quelquefois même, pour faciliter le travail dans la région supérieure où l'intrados tend à se confondre avec un plan horizontal, le constructeur rompt franchement la continuité du profil, et remplace la courbe circulaire *akb* par un profil brisé *ampnb*. Cette anomalie apparente se remarque à deux citernes de Constantinople, l'une située près de celle des Mille et une colonnes, l'autre récemment découverte au N.-E. de l'Et-Meidan. Ajoutons qu'à partir

du niveau *mn*, on a substitué des tuileaux minces aux briques qui forment le corps de la coupole ; on ne pouvait mieux parer aux chances de glissement.

Maintenant, si, au lieu de placer la brisure *mn* au-dessus des sommets *a*, *b* des arcs de tête, on place cette brisure dans le plan même de *ab*, on obtient le profil surhaussé *acb* ; ce fut le profil le plus usité au Bas-Empire, c'est celui de la grande coupole de Sainte-Sophie, et c'est aussi le type que la tradition a le plus fidèlement conservé. J'ai assisté à son application sur le chantier d'une mosquée nouvelle à Smyrne. La coupole fut montée sans cintre jusqu'à 0^m,60 environ du sommet ; alors seulement les maçons eurent recours à une légère plate-forme en planches pour recevoir une sorte de blocage qui leur servit à la fermer. Les bou-lins de leur échafaudage traversaient simplement la voûte, et ils auraient pu même éviter la sujétion d'une plate-forme auxiliaire au sommet en substituant, comme font les Arabes, à la calotte supérieure de la coupole un profil en pointe tel que *rst*.

En résumé, les dispositions de coupoles définies par les *fig. 7* et *15* doivent être regardées comme les types généraux de l'architecture byzantine ; celles qui restent à décrire n'existent guère qu'à titre de solutions très-particulières, de véritables exceptions ; il suffira de les énumérer d'une façon sommaire.

1° Citons d'abord les coupoles à côtes. A part les ondulations de leur surface, elles rentrent, quant à la structure, dans le type représenté *fig. 15* ; peut-être ne doit-on voir dans la disposition de ces voûtes qu'une simple fantaisie décorative ; on en trouve l'application à Saint-Serge et au monastère de Chora à Constantinople, à l'église de Chilandari à l'Athos, etc.

2° La *fig. 14* montre un arrangement de briques adopté pour la coupole du tombeau de saint Dimitri à Salonique :

une série d'arceaux étagés constituent cette singulière coupole. On comprend, d'ailleurs, au seul aspect de la figure, comment le maçon s'est guidé pour la construire : *os* est une tige directrice, *as* le fil qui la sous-tend; il suffisait de faire tourner autour de l'axe *oa* le triangle *oas* pour que la tige *os* décrivit la surface conique d'un des arceaux, dont la superposition ou l'emboîtement mutuel constitue la voûte.

3° Le temple rond (aujourd'hui cathédrale) de Spalatro présente, lui aussi, une coupole faite d'une série de trompillons étagés et fort semblable, au point de vue de la construction, à celle de Saint-Dimitri. Ici encore, chacun des trompillons superposés avait ses assises coniques, et, pour tracer ces cônes dans l'espace, il suffisait d'un système de tiges directrices sous-tendues par des fils.

Un mot encore sur l'emploi des poteries dans la construction des voûtes.

On connaît depuis longtemps, par l'exemple des monuments de Ravenne, l'ingénieuse idée qui permettait d'obtenir une coupole légère et sans poussées à l'aide de tubes emboîtés, décrivant de la naissance au sommet une spirale continue et inextensible. J'ai vainement cherché l'application de ces spirales en poterie dans les édifices byzantins de l'Orient. Néanmoins on conserve, entre Naplouse et Jaffa, la tradition des voûtes en poteries creuses, et une coupole du vieux couvent de Saint-Panteleemon à l'Athos m'a rendu, sous une forme différente, l'idée de construction par anneaux inextensibles. Les matériaux sont des tuiles creuses, et, d'un lit au suivant, ces tuiles s'enchevêtrent ainsi que l'indique le croquis *fig. 16*; de cette sorte, deux assises successives constituent comme une chaîne annulaire incapable de s'élargir, par suite aussi incapable de pousser à l'écartement.

Je bornerai là cette revue de procédés byzantins. Si l'on essaye de remonter aux origines, on verra ces méthodes

se rattacher à de très-anciennes influences émanées de la haute Asie, on les aperçoit en germe jusque dans l'antiquité ninivite; ainsi, à Ninive, les briques d'une voûte d'aqueduc se présentent par tranches inclinées. Mais rien n'autorise à croire que de telles méthodes aient, dès ce moment, servi de base à un système d'architecture complet et logiquement coordonné; c'est sous la domination romaine que le système a pris naissance; il représente une école locale dans l'architecture de l'Empire, c'est l'école romaine d'Orient. Éphèse, Sardes, Philadelphie, Magnésie du Méandre, nous offrent des monuments construits de toutes pièces d'après le système byzantin, et que les caractères les plus nets reportent au moins à l'époque constantinienne. Ces exemples, du reste, sont les plus anciens que je connaisse, et apparemment la région où je les ai recueillis est celle même où l'art byzantin s'est formé. Nulle autre n'eût été plus favorable à son développement. La grande voie du commerce, telle que Strabon l'a décrite, conduisait de la haute Asie à Rome par Éphèse : Éphèse était comme un lien entre les deux civilisations; les idées, les exemples, toutes les influences de l'Orient s'y trouvaient en contact avec celles de Rome, et la race hellénique qui possédait la contrée était plus apte qu'aucune autre à fondre ces éléments de provenances si diverses en une architecture originale et neuve.

Je ne puis, sans m'engager dans une discussion archéologique qui serait déplacée ici, préciser ces aperçus ni montrer l'harmonie qui règne entre le système de construction propre aux populations romaines de l'Orient, leur régime social et les ressources matérielles dont elles disposaient. Je me contente d'indiquer les questions; j'essaierai de les traiter plus tard dans un travail d'ensemble sur les transformations de l'art et de la société en Orient à l'issue de la période romaine.
