

CHAPITRE XII

LES ÉGLISES VOUTÉES

(Suite.)

POUSSÉES LOCALISÉES. — RÉSISTANCES DIVERSES

SOMMAIRE. — Les combles. — Couvertures sur les massifs des voûtes. — Charpente. — Poussée des combles neutralisée.

Tirants en fer des voûtes italiennes.

Fonction de l'arc-boutant. — Point d'application de la résistance. — Écoulement des eaux pluviales.

Bas-côtés doubles, absides.

L'arc-boutant, condition nécessaire des compositions d'églises du Moyen-âge.

Peu aurait servi d'alléger les voûtes, si on les avait chargées. Or, au-dessus des voûtes, il y a les toitures : ces toitures que vous indiquez parfois dans vos projets avec de graves contresens.

Rappelez-vous la salle des thermes : la voûte, comme vous le savez, est chargée des épaisseurs nécessaires pour atteindre le plan incliné des toitures, ou plutôt la construction, depuis l'intrados de la voûte jusqu'au plan des toitures, ne forme qu'un seul massif. Disposition excellente avec le mode de construction des voûtes romaines : ces voûtes en blocages avec d'excellent mortier forment un véritable monolithe qui ne pousse que s'il se casse : pour des voûtes ainsi constituées, on

est peut-être dans l'erreur en appliquant les méthodes de contrôle qui vérifient la stabilité des voûtes appareillées, et peut-être la section rationnelle serait-elle celle qu'on chercherait pour un véritable monolithe.

Si, en effet, on considère la voûte — la voûte en berceau si vous voulez — comme un assemblage de prismes tendant au centre et pouvant glisser l'un contre l'autre dans leurs joints, ainsi qu'on le fait dans les épures de stabilité, la voûte aura son épaisseur *minima* à la clef, la plus forte à sa naissance. Mais si nous considérons cette voûte comme un linteau cintré, ou en d'autres termes comme un couvercle monolithe posé sur les deux murs et n'agissant sur eux que par pression verticale

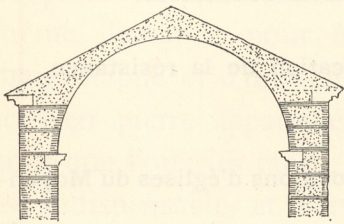


Fig. 1058. — Voûte romaine en blocages, solidaire avec la toiture.

— aussi longtemps du moins que ce linteau ne se cassera pas, — cette pierre d'un seul morceau, ou ce blocage devra avoir sa plus grande épaisseur à la clef. La voûte romaine avec ses pentes de toiture (fig. 1058) se trouvait donc être fort bien comprise : l'épaisseur renforcée à la clef lui donnait la consistance du monolithe et en même temps la masse de matière accumulée à la base était une sauvegarde pour le cas où le monolithe serait venu à se rompre. Les Romains agissaient donc judicieusement en demandant au même massif la voûte et la toiture.

Mais lorsque dans l'architecture romane, par exemple dans les églises si remarquables de l'Auvergne, on suivit avec d'autres moyens le même parti de coucher la couverture sur les voûtes, la voûte étant appareillée à part, ce n'était plus une même masse monolithe : on fit donc des toitures en dalles de pierre, d'ardoise, de lave, qui soit par l'interposition d'un remplissage plein,

soit par l'intermédiaire de divers systèmes, notamment de petits murs, s'appuyaient sur la voûte. C'était évidemment une charge considérable portée par la voûte, surcharge qui naturellement se traduisait en surcroît de poussée. Ce système obligeait d'ailleurs à avoir des toitures assez plates (fig. 1059).

Est-ce l'exemple des charpentes des anciennes basiliques, est-ce la simple logique qui inspira les architectes ? Toujours est-il qu'ils prirent avec raison le parti de constituer la toiture au moyen d'une charpente absolument indépendante des voûtes, se reportant sur les murs latéraux, à un niveau plus élevé que toute partie quelconque des voûtes, et au moyen de fermes sans poussée.

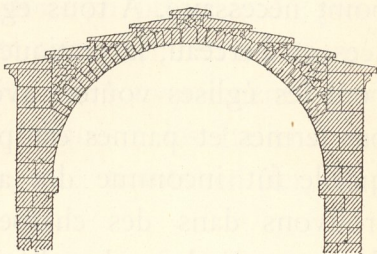


Fig. 1059. — Voûtes avec toitures en pierre.

Et cela eut un autre avantage ; pour atteindre ce niveau du comble en charpente, il fallut élever quelque peu les murs latéraux ; or, il est toujours bon que les piédroits d'une voûte soient chargés ; de plus, tout le poids du comble, poids considérable, se reportant sur ces mêmes murs les charge encore ; enfin, les combles ainsi rendus indépendants des voûtes, pouvaient prendre telle pente qu'on voulait, et il fut ainsi possible de leur donner ces silhouettes accentuées qui contribuent tant au bel effet des églises, sans compter qu'un comble élevé en augmentant le cube et par conséquent le poids du bois, la surface et par conséquent le poids des couvertures, charge davantage les murs latéraux, et contribue ainsi à la résistance aux poussées des voûtes.

Il s'introduisit cependant à propos des combles une pratique dont l'explication m'échappe : dans un grand nombre d'églises, vous le savez, chaque chevron est une ferme, avec son entrant,

son poinçon, ses liens. Outre l'excès de bois qui résulte de cette disposition coûteuse, on perd ainsi le bénéfice, au point de vue même d'un édifice voûté et à poussées localisées, de la disposition du comble par fermes. Toute la poussée des voûtes se localisant en dernière analyse sur le pilier et non sur le mur, c'est sur le pilier qu'il faut accumuler la résistance : avec les fermes, tout le poids de la travée de comble se reporte sur les piliers seuls, appliquant ainsi cet élément de résistance verticale au point nécessaire. A tous égards donc, si, pour des églises voûtées en berceau, la pratique des chevrons-fermes est judicieuse, pour les églises voûtées avec poussées localisées la disposition par fermes et pannes est préférable. On ne peut pas supposer qu'elle fût inconnue des architectes d'alors, puisque nous la trouvons dans des charpentes apparentes contemporaines et dans un grand nombre d'églises voûtées dont la charpente a été plus logiquement étudiée.

Quoi qu'il en soit, rappelez-vous que dans toute église voûtée il faut au-dessus des voûtes un espace que vous appellerez *comble ou grenier*, espace considérable, affecté à la charpente du comble dont vous déterminerez la pente. J'ajouterai que cet espace est précieux, non pas comme débarras, ainsi qu'on l'emploie trop souvent malgré le risque d'incendie, mais pour la surveillance et l'entretien des voûtes, pour permettre l'accès aux toitures, aux cheneaux, etc. Dans quelques combles d'églises, on a même poussé la prévoyance jusqu'à établir à mi-hauteur une série de pièces horizontales diversement disposées, qui peuvent le cas échéant servir de support d'échafaud pour les réparations.

Et puisque je vous parle de combles, n'oubliez ni de les aérer, ni de les éclairer. C'est facile et nécessaire.

Voilà donc des voûtes légères dont la combinaison aura tou-

jours pour résultante de poussée une ligne X tracée dans le plan vertical des piliers; ce pilier est chargé du poids du mur au-dessus de l'adossement des voûtes, et du poids du comble reporté par les fermes sur les piliers. Tout le possible est donc fait pour atténuer la poussée et augmenter la résistance du point d'appui.

Cependant, il reste une poussée, poussée très sérieuse, qu'il faut neutraliser, car le point d'appui, même chargé, n'y suffit pas : il est trop mince. Nous voici donc en présence du problème d'équilibrage qui domine toute cette architecture. Comment fera-t-on équilibre à cette poussée, à ce renversement ? Par les deux moyens que je vous ai indiqués : les Italiens en munissant résolument leurs voûtes de tirants en fer, les Occidentaux au moyen des arcs-boutants.

Que n'a-t-on pas dit à propos des tirants en fer ? Toute une école intransigeante n'avait pas assez de malédictions pour cette pratique qui se permettait d'employer d'autres moyens que ceux qu'on proclamait les seuls admissibles. On disait que la voûte, ouvrage de maçonnerie, ne doit rien emprunter qu'à la maçonnerie ; que ce n'est pas triompher d'une difficulté que de la supprimer par une sorte d'escamotage ; que supprimer la poussée des voûtes, c'était la négation même de l'architecture des voûtes... etc..., etc.

Phrases que tout cela. Le procédé est pratique, il est d'une efficacité absolue ; il permet la voûte avec tous ses avantages dans des conditions d'économie autrement irréalisables ; et j'ajouterai que si la vue d'un tirant en fer choque les regards de quelques théoriciens du contrefort et de l'arc-boutant, il ne choque nullement l'œil de l'homme de goût qui entre sans parti pris dans un édifice voûté, et qui ne s'aperçoit même pas de l'existence de ce mince morceau de fer qui traverse de dis-

tance en distance la naissance des voûtes, avec la régularité du parti voulu, et non avec le disparate de la réparation.

Je sais que pour oser y recourir de notre temps, il faudrait braver des critiques et même des colères; il faudrait quelque

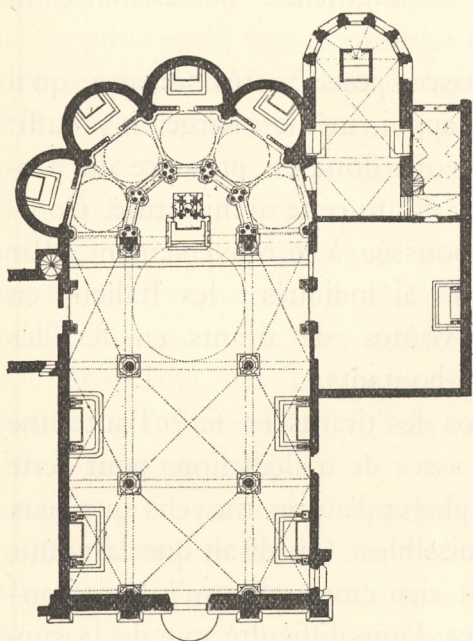


Fig. 1060. — Église Saint-Zacharie de Venise.

courage; et pourtant une solution simple, facile et pratique ne peut pas m'apparaître autrement que comme une solution légitime; et je ne puis oublier d'autre part que c'est à l'emploi de ce procédé si simple que nous devons de pouvoir admirer la Loge des Lanzi ou le Palais ducal de Venise, les églises de Sainte-Marie-des-Fleurs à Florence, de San-Petronio à Bologne, de Saint-Zacharie à Venise (fig. 1060 et 1061). Une pratique architecturale qui peut se réclamer de tels répondants me paraît au-

dessus des *veto* et des indignations de théoriciens exclusifs.

Si vous y recourez, les difficultés disparaissent comme par enchantement, et vous pouvez sans crainte et par des moyens faciles réaliser un édifice comme cette église de San Petronio dont je vous parlais à l'instant, un des plus grands et des plus magnifiques monuments de l'architecture du Moyen-âge.

En tous cas et sans prendre parti pour ou contre les tirants en fer des voûtes, que pour ma part je ne maudis pas plus que je ne maudis les tirants des fermes de comble, il m'a paru inté-

ressant d'établir la comparaison, sur un même édifice, de ce qu'a commandé le recours aux résistances extérieures et de ce qu'aurait permis l'emploi de tirants en fer. Je prendrai pour exemple une église justement célèbre par ses proportions har-

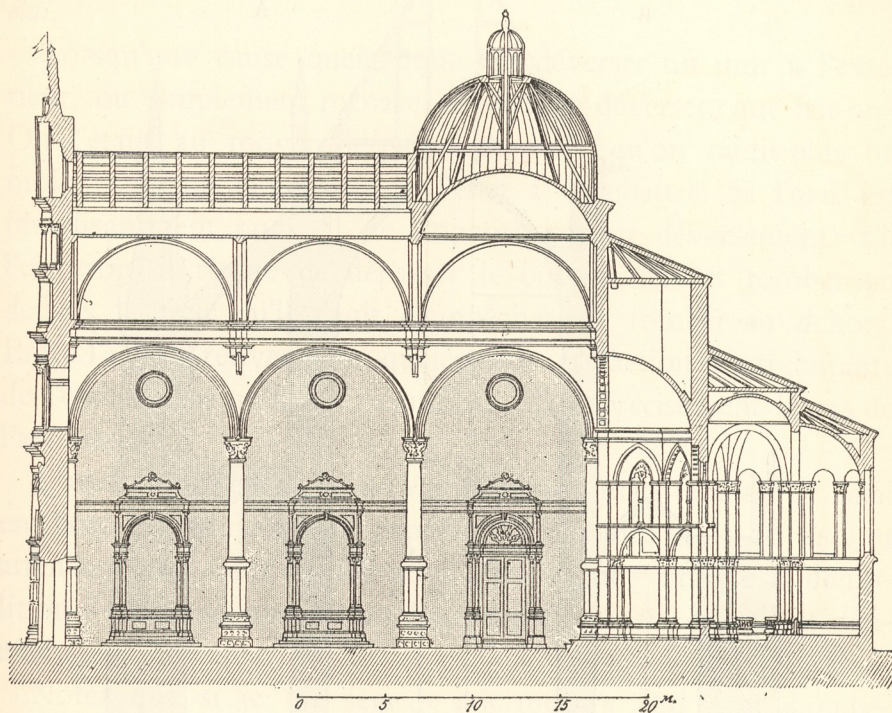


Fig. 1061. — Église Saint-Zacharie de Venise. Coupe longitudinale.

dies et sa grande élégance, Saint-Ouen de Rouen : l'architecture du moyen âge n'a pas de plus bel intérieur à nous offrir. Je suppose donc que sans rien changer à ces proportions, à ces élégances, à cette richesse, en un mot sans changer quoi que ce soit à cet intérieur admirable, on y ajoute seulement de minces tirants en fer rond, à chaque travée de la nef et des bas-côtés, et qu'ainsi la poussée des voûtes soit neutralisée non par contre-poussée, mais par obstacle à l'écartement.

Alors, si je considère la coupe prise sur Saint-Ouen, au droit des piliers, elle sera d'un côté en A (fig. 1062) celle qui résulte

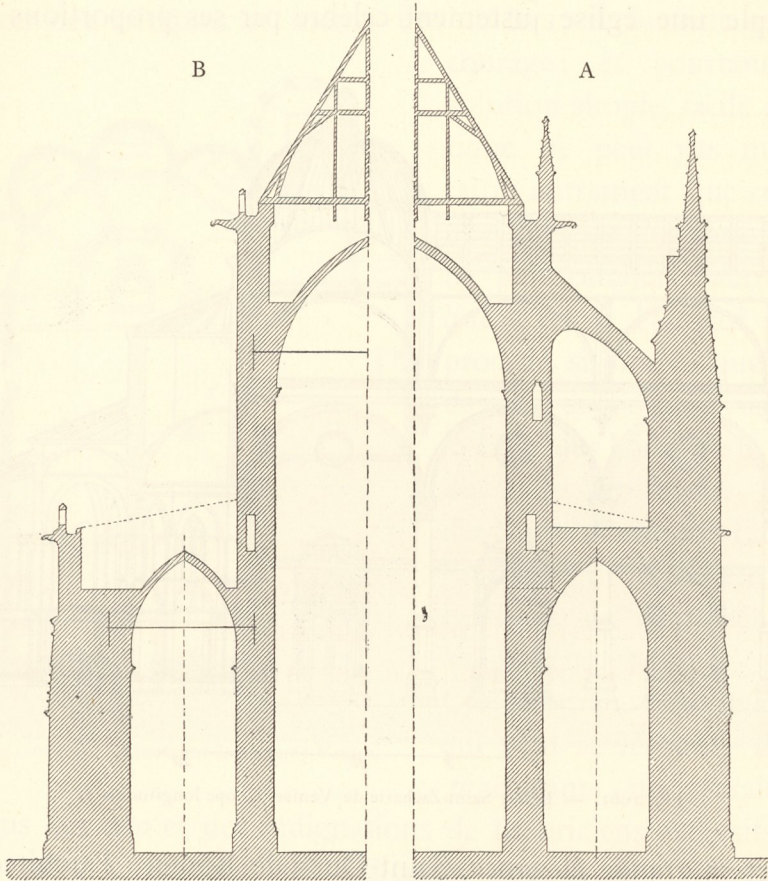


Fig. 1062. — Résistance aux poussées des voûtes :
 par des tirants en fer à la naissance des voûtes. par des contreforts et arcs-boutants.
 Exemple pris à l'église Saint-Ouen à Rouen.

des relevés du monument — de l'autre côté en B celle que permettrait l'emploi des tirants. La différence saute aux yeux ; je ne vais pas plus loin, je ne me charge pas de dire comment en ce cas l'artiste aurait étudié ses extérieurs ; je constate seulement

l'économie considérable, l'absence de fragilité des organes essentiels, et sans conclure je livre ce sujet à vos réflexions.

Quant à l'arc-boutant, son rôle est facile à définir : c'est un *étai*.

Lorsqu'une cause quelconque fait déverser un mur à l'extérieur, ou simplement menace de le faire déverser, que fait-on ? On l'étaie, au moyen de pièces de bois, qu'on raidit plus ou moins suivant l'intensité de l'effet à combattre. Si l'étaie est insuffisamment raidi, il ne s'oppose pas au déversement ; s'il l'est trop, il risque de dépasser le but en faisant tomber en dedans le mur qu'il s'agit d'empêcher de tomber au dehors. Entre l'action renversante quelconque et l'action contreboutante de l'étaie, il faut qu'il y ait équilibre. C'est précisément le cas de l'arc-boutant.

L'arc-boutant est donc *un étai en pierre* ; mais tandis que l'étaie en bois est toujours un expédient provisoire dont on use en attendant une solution définitive quelconque — fût-ce la démolition — l'arc-boutant est un étai permanent, un expédient définitif.

Notez que si je me sers de ces mots « étai » et « expédient » ce n'est pas dans un sens critique ou injurieux. Mais c'est une vérité : voyez Notre-Dame du côté du chevet : qui donc pourra dire que ce n'est pas là un monument étayé ? Étais d'ailleurs nécessaires, car, à moins d'admettre les tirants en fer des Italiens, l'architecture des églises des XIII^e, XIV^e et XV^e siècles était, avec les moyens de construction dont on disposait alors, absolument impossible sans les arcs-boutants. Qui veut la fin veut les moyens : qui voulait le programme de ces églises, que j'ai indiqué plus haut, voulait des édifices qui ne pouvaient devoir leur stabilité qu'à l'étalement. Pour ces monu-

ments, l'étalement, qui est d'ordinaire un accident, faisait inévitablement partie de la composition initiale.

En effet si au début on a construit des églises à poussée localisée sans arcs-boutants, avec de simples contreforts, c'est que les piliers entre la nef et les bas-côtés étaient épais, et que cette forte épaisseur, avec un peu d'encorbellement, permettait des contreforts peu saillants; d'ailleurs, les contreforts étaient toujours plus ou moins en porte à faux, au-dessus des arcs-doubleaux des bas-côtés, comme vous en voyez un exemple à Saint-Germain-des-Prés, et cette disposition ne peut être employée qu'avec prudence, car elle deviendrait bien vite dangereuse; mais ces églises ne satisfaisaient pas au désir de large circulation et d'unité d'effet qui résultent de la finesse des piliers.

Si ensuite, à Caen, à Noyon, dans quelques autres églises, on a recouru à une sorte d'arc-boutant, mais en l'enfermant, comme je vous l'ai dit, sous la toiture en appentis des bas-côtés ou des tribunes, on ne pouvait éclairer la nef que par de petites fenêtres, on ne pouvait ni lui donner la grande élévation désirée, ni les grandes verrières dont on voulait l'éclairer.

Non, pour réaliser Notre-Dame, Amiens, Reims, Bourges, l'arc-boutant est une nécessité, l'étalement permanent est une condition *sine qua non*.

Je sais tous les inconvénients de l'arc-boutant, et je vous les dirai tout à l'heure; mais ici encore je vous dirai :

« Une pratique architecturale qui peut se réclamer de tels répondants me paraît au-dessus des *veto* et des indignations de théoriciens exclusifs. »

On pourrait dire que l'étude des arcs-boutants de nos diverses églises est l'étude presque complète de ces églises, tellement son rôle est considérable, tellement l'arc-boutant est la clef de l'étude. Je ne puis entrer dans tous les détails des variantes

innombrables d'arcs-boutants : je veux plutôt, en vous engageant à voir par vous-mêmes un grand nombre d'exemples, vous indiquer les réflexions que ce sujet peut provoquer.

L'arc-boutant, étayant le pilier de la nef vers la hauteur des naissances des voûtes, franchit la largeur du bas-côté pour trouver son point d'appui dans le contrefort rectangulaire qui prolonge dans l'espace le contrefort séparatif des travées de bas-côtés. Ces contreforts sont souvent, comme à Notre-Dame, les murs de séparation des chapelles latérales. Organe nécessaire de construction, ils deviennent ainsi en même temps un organe de distribution.

L'arc-boutant est toujours un arc rampant ; je ne connais pas d'exemple d'arc-boutant horizontal, sauf à la cathédrale de Palerme (fig. 1063) ; mais ceux-ci, contreboutant la façade principale, ont leur point d'appui sur un autre édifice ; ils jouent en réalité le rôle d'un pont sur une rue. Les architectes du moyen âge savaient-ils ou non chercher les résultantes des poussées, faire ce que nous appelons un tracé d'épure de stabilité ? Je l'ignore ; mais le bon sens suffit à montrer que le point d'appui sera plus résistant si on raccourcit son bras de levier. L'arc-boutant est donc incliné comme un étau, faisant avec le mur de

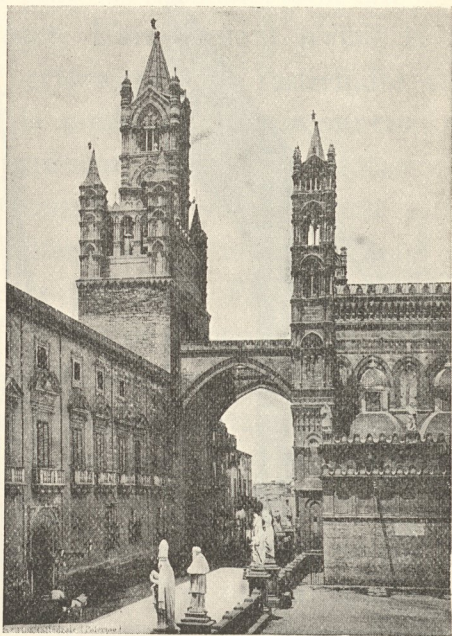


Fig. 1063. — Cathédrale de Palerme.

la nef un angle, soit droit (à l'intrados de l'arc), soit plutôt aigu, et retombant en tangente sur le contrefort. Ce n'est que vers la fin du moyen âge qu'on a tracé des arcs-boutants en courbe à plusieurs centres, s'appuyant tangentiellement à la nef

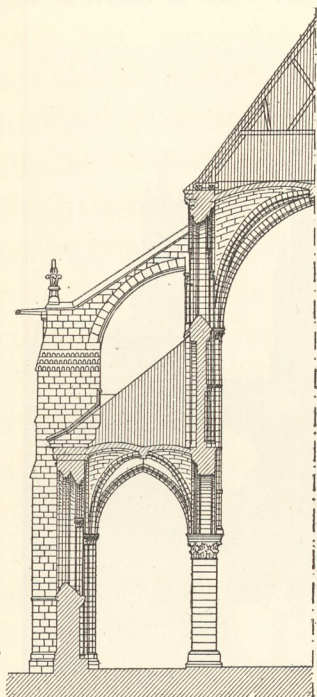


Fig. 1064. — Église Saint-Pierre de Lisieux.
1/2 coupe transversale.

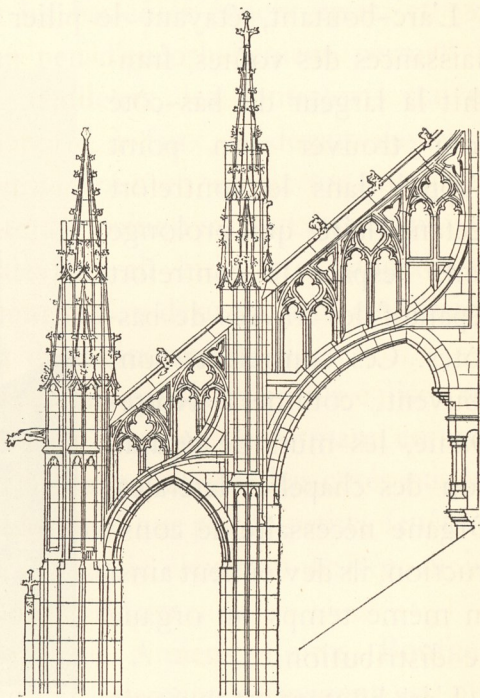


Fig. 1065. — Arc-boutant de l'église Saint-Vulfrand d'Abbeville.

aussi bien qu'au contrefort, peut-être pour obvier à cette apparence d'étaie si sensible dans les églises du XIII^e siècle. Il n'est pas inutile à ce sujet de rapprocher deux combinaisons d'arcs-boutants, l'une très simple et très nette, empruntée à l'église de Saint-Pierre de Lisieux (fig. 1064), l'autre au contraire avec introduction de la fantaisie dans cet organe constructif, pris dans la trop riche église de Saint-Vulfrand (fig. 1065) à Abbeville.

Il est à peine besoin d'ajouter que l'arc-boutant doit aller chercher son point d'appui aussi près que possible. Un arc-boutant dont la portée serait plus large que la distance réelle entre le pilier résistant et le pilier à étayer serait un crime en construction.

Disons tout de suite que le pilier de résistance doit être lourd et l'arc-boutant lui-même léger. L'arc-boutant n'étaie la nef qu'en poussant sur le pilier extérieur; pour restreindre cette poussée, il faut restreindre le poids de la maçonnerie qui l'exerce. Tandis que le pilier extérieur, sollicité au déplacement horizontal dans le sens de la poussée, ne résistera à cette action que par son poids et par le frottement des assises les unes sur les autres : deux modes de la pesanteur. Plus ce contrefort pourra être long, plus il sera en état de s'opposer à la poussée, cela va sans dire; mais si de plus il est plus large que l'arc-boutant, cette largeur lui donnera du poids et partant de la stabilité. C'est ainsi que vous voyez le plus souvent le contrefort plus épais que l'arc-boutant.

Le mur évidé d'un arc constitué par l'arc-boutant se termine toujours par une ligne inclinée droite. Très ordinairement, l'assise supérieure qui suit cette inclinaison est un caniveau. C'était en effet une difficulté sérieuse de rejeter au dehors les eaux pluviales tombant sur la toiture de la grande nef. Dans certaines églises, elles s'égouttent tout simplement sur la toiture des bas côtés : solution simple, mais qui ne va pas sans inconvénients. L'arc-boutant s'élevant à peu de distance de l'égout du toit supérieur, on pouvait avec un court tuyau conduire les eaux du chéneau de la nef dans le caniveau dont on couvrait l'arc-boutant. Souvent même le caniveau s'élève absolument jusqu'au niveau du chéneau supérieur, et devient ainsi un branchement incliné de ce chéneau, comme par exemple à l'église de Saint-Maclou, à

Rouen (fig. 1066). Les eaux prennent dans ce caniveau un courant rapide, et s'échappent par des gargouilles qui les rejettent le plus loin possible de l'édifice.

Comme l'arc-boutant exerce sur le contrefort extérieur une

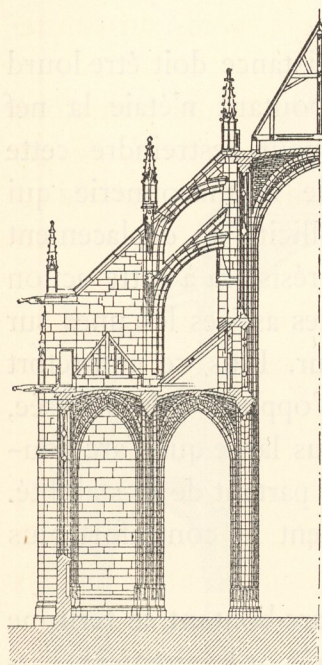


Fig. 1066. — Arc-boutant en caniveau de l'église Saint-Maclou à Rouen.

poussée accentuée, celui-ci a besoin, je le répète, d'une grande force de résistance. Il ne la trouve pas seulement dans sa forme et son épaisseur toujours très grande, il la trouve aussi dans le poids de toute la hauteur dont il dépasse le point de retombée de l'arc. C'est donc cette raison de poids, en vue de la résistance, qui a motivé les *pinacles* dont sont couronnés ces contreforts. Certes, les pinacles multipliés et pyramidaux sont un élément précieux de silhouette et de pittoresque; mais avant tout ils sont un élément de construction; ils sont un poids, là où le contrefort a besoin d'être chargé.

Une question toujours très délicate à propos d'arcs-boutants, est la détermination, ordinairement demandée au simple tâtonnement empirique, du point où ils viendront épauler la nef. Trop bas, ils poussent le pilier à l'intérieur; trop haut, ils poussent à l'intérieur le mur sous le comble : dans les deux cas, ils laissent la poussée des voûtes agir sur un point qui n'est pas directement soutenu. Il n'est pas possible de déterminer *a priori* ce point d'application : si le pilier est épais, il devra être plus bas que s'il est mince, car la résultante du poids et des poussées est une oblique qui descend de l'intérieur vers l'extérieur, et qui

à son tour se décompose en verticale (pression sur le pilier) et en horizontale (poussée définitive). Il faut donc au préalable déterminer cette résultante par une épure de stabilité, et combiner l'arc-boutant en tenant réciproquement compte de ses éléments de résistance, poussée, poids propre, poids du contrefort.

De même pour contrôler l'épaisseur à donner aux contreforts extrêmes, l'épure de stabilité est nécessaire pour vous assurer que la résultante finale ne sort pas des limites de ce point d'appui. Je ne puis qu'indiquer cette étude de contrôle que le cours de construction vous enseigne à appliquer.

Mais il faut encore remarquer que l'architecte n'a pas pourvu à tout lorsqu'il a résolu le problème de la stabilité des voûtes de la haute nef. Là, le pilier peut être mince, l'arc-boutant allant chercher au delà du bas-côté le point d'appui épais et résistant. Mais il reste le problème de la stabilité des bas-côtés. Or, entre le bas-côté et la nef, le pilier aussi est mince, et cependant la voûte des bas-côtés le pousse vers la nef à un point dangereux de sa hauteur. Soumis à cet effort latéral, le pilier subit ainsi un travail à *la flexion*, c'est-à-dire une action renversante. Et ici nul moyen n'existe de contrebuter directement cette action.

Pour que le pilier résiste au renversement, il n'y a qu'une ressource : le charger. Déjà, il est chargé naturellement par le surplus de sa hauteur jusqu'aux combles, et si une église venait à être démolie sauf les bas-côtés, il y en a bien peu dont les piliers ne fussent pas renversés par la poussée des bas-côtés. Les parties hautes sont nécessaires à la solidité des parties basses. Mais malgré cela, il est arrivé parfois, assez souvent même, que les piliers aient fléchi sous cette poussée et présentent une courbure convexe vers la nef : l'église Saint-Michel de Bordeaux a été très compromise par cet effet ; cela se remarque un peu à l'église

Saint-Séverin. Il faut donc admettre que la charge normale est insuffisante : ainsi, il semble qu'une église avec nef et bas-côtés voûtés en voûte d'arête, contrebutée par des arcs-boutants, n'aurait besoin — à ne considérer que la nef — que de piliers continuant l'épaisseur des piliers bas; il semble même, d'après nos habitudes de construction pyramidale, que ces piliers pussent être réduits à mesure qu'ils s'élèvent. Ce serait une erreur.

Les architectes du moyen âge ont été conduits au contraire, et judicieusement conduits, à donner au pilier supérieur une épaisseur plus grande par l'addition d'un contrefort en surplomb sur la naissance de la voûte des bas-côtés; ce contrefort, apparent ou non de l'intérieur, est souvent prolongé jusqu'au comble, et même chargé encore à ce niveau d'un pinacle, comme à Saint-Ouen de Rouen. C'est d'ailleurs ce qui permet la circulation si utile du *triforium* au-dessus des minces piliers de la nef. C'est ainsi que vous voyez à Saint-Germain-des-Prés, par exemple, des colonnes assez minces suffire à neutraliser la poussée des bas-côtés vers l'intérieur, parce que ces colonnes sont chargées et par le mur plein de la nef qui n'est percé que d'une fenêtre assez restreinte, et par les contreforts que vous apercevez de l'extérieur, et qui reposent sur les *reins* de la voûte des bas-côtés. C'est un cas où, par exception, le porte-à-faux est légitime et même nécessaire.

Mais il ne faut pas que ce porte-à-faux soit assez prononcé pour venir compromettre la partie fragile de la voûte des bas-côtés; il ne doit pas dépasser la partie stable, assez peu large, qui se limite presque au sommier. Dans ce problème très délicat, assez de porte-à-faux est prudence, trop de porte-à-faux est danger; et entre assez et trop la latitude est minime. C'est vous dire que la question mérite d'être étudiée de très près; elle n'est pas d'ailleurs susceptible de solution générale, car les facteurs

sont multiples : section du pilier, portée des voûtes, hauteur des nefs et des bas-côtés, dureté et densité de la pierre.

Et je crois que pour vous faire comprendre toute l'importance de ces considérations, il était utile de vous montrer la coupe transversale d'une église, non comme ordinairement en coupant suivant l'axe d'une travée, mais par une section des éléments constructifs en coupant sur un pilier. C'est ce que j'ai fait (V. plus haut, fig. 1062) en prenant pour exemple l'église Saint-Ouen de Rouen, parce que c'est l'une des plus belles, et l'une de celles où par l'élégance des piliers et par la légèreté des murs de nef, le problème se posait avec toutes ses difficultés. Je vous donne également la coupe analogue de Notre-Dame de Paris, en raison de sa composition exceptionnelle (fig. 1067).

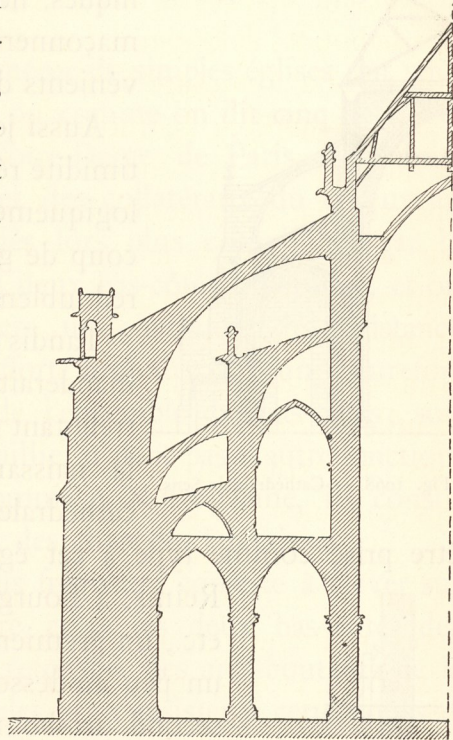


Fig. 1067. — Coupe transversale sur l'axe des piliers de l'église Notre-Dame de Paris.

Est-ce à dire cependant que les architectes du Moyen-âge qui ont construit de si nombreux arcs-boutants fussent en possession de méthodes scientifiques permettant de déterminer ou plus simplement de contrôler avec sûreté l'importance et la direction de ces poussées. J'en doute, ils n'ont dû agir que par tâtonnements, d'après les résultats de l'expérience; et c'est précisément le grand nombre des applications qui a dû leur permettre, à défaut de méthodes scientifiques, un

empirisme assez certain pour établir des recettes qu'on se

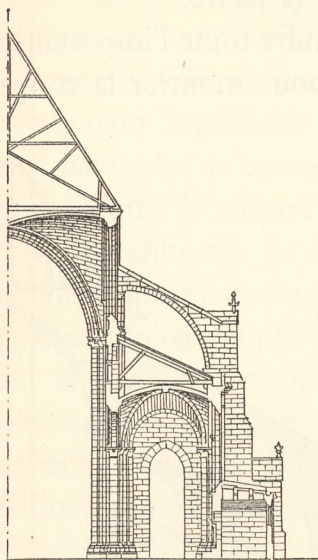


Fig. 1068. — Cathédrale de Sens.

transmettait à titre d'expérience acquise. Si d'ailleurs le tracé n'est pas ce qu'aurait exigé la décomposition des efforts mécaniques, heureusement la solidarité d'une maçonnerie bien faite atténue les inconvénients de ce défaut de rigueur.

Aussi je ne puis expliquer que par la timidité résultant de l'incertitude le parti, logiquement anormal, adopté dans beaucoup de grandes églises : je veux dire le redoublement des arcs-boutants.

Tandis que la science rigoureuse demanderait un arc-boutant unique, contrebutant le pilier un peu au-dessus de la naissance des voûtes, comme à la cathédrale de Sens (fig. 1068) qui peut

être prise comme type à cet égard, vous voyez à Amiens, à

Reims, à Bourges, au Mans, à Saint-Eustache, etc., un premier arc-boutant qui étaie le pilier un peu au-dessous de cette naissance, puis un second arc-boutant qui l'étaie plus haut. Le point critique P de la poussée, et par conséquent de la dislocation possible, est certainement entre ces deux têtes d'étais (fig. 1069); mais on comptait — et le raisonnement est juste en pratique — que le pilier sollicité à la flexion entre ces deux résistances assez rapprochées ne se déformerait pas grâce à sa

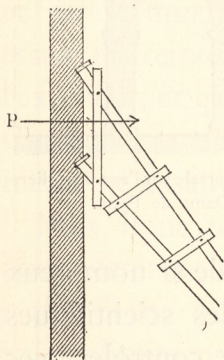


Fig. 1069. — Étalement par deux contrefiches en dessus et en dessous d'une poussée.

solidarité. Mais il n'y en a pas moins un arc-boutant de trop.

Il est vrai que l'arc-boutant supérieur remplit en outre la

fonction de caniveau pour l'écoulement des eaux de la toiture supérieure. Mais à ce point de vue, l'arrangement qui consiste à surmonter l'arc-boutant d'une sorte de galerie à jour portant le caniveau, est bien plus rationnel, et crée d'ailleurs une élégante combinaison architecturale, comme par exemple à l'église de Saint-Gervais à Paris.

Les grandes cathédrales et même de simples églises ont souvent deux rangs de bas-côtés, ou comme on dit cinq nefs. Tel est le cas de Bourges, de Notre-Dame de Paris, de Reims, d'Amiens, de Saint-Eustache et des collatéraux du chœur au Mans. Le problème devient dès lors plus compliqué, car la rangée de piliers qui sépare les deux bas-côtés est mince, et on ne peut asseoir sur ces piliers un contrefort de résistance suffisante : il faut reporter l'effort, toujours sur un contrefort extérieur, c'est-à-dire au delà de l'ensemble des bas-côtés ; soit que ces contreforts, établis en saillie, n'aient pas d'autre fonction, comme à Reims, soit que, comme à Notre-Dame, ils constituent des murs séparatifs entre des chapelles latérales.

Alors, la combinaison la plus fréquente consiste à élever sur le rang de piliers intermédiaire entre les deux bas-côtés des piliers aériens qui reçoivent la retombée des arcs-boutants de la nef ; mais ces piliers, trop faibles pour résister à cette poussée, doivent à leur tour et comme les piliers de la nef être maintenus en équilibre par des poussées inverses ; ils sont donc à leur tour contrebutés par une deuxième série d'arcs-boutants qui se reportent sur les contreforts extrêmes. Telle est la disposition à Bourges, où les arcs-boutants multipliés témoignent de l'incertitude du constructeur (fig. 1070 et 1071), au Mans, à Beauvais, etc.

A Notre-Dame, le parti est plus hardi et plus dégagé, l'arc-boutant franchit tout l'espace entre la nef et les contreforts, sans

aucune division intermédiaire (fig. 1072 et 1073). C'est comme si au lieu de deux bas-côtés, on n'en avait qu'un seul d'une largeur double. L'arc-boutant a donc une très grande portée, et accentue encore l'impression d'un étai. On est volontiers étonné

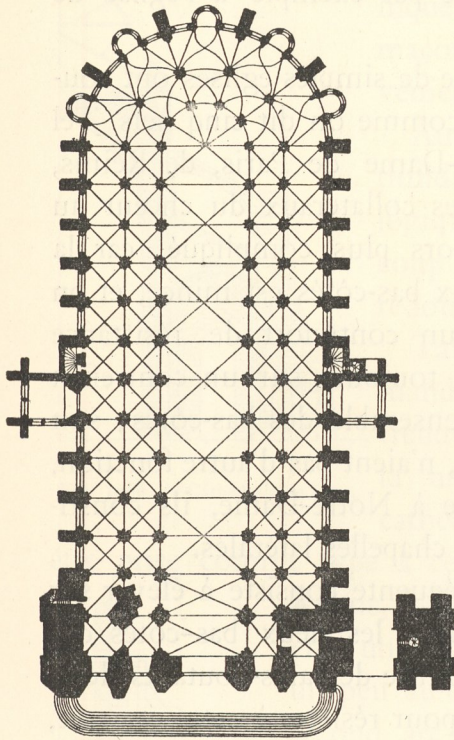


Fig. 1070. — Cathédrale de Bourges. Plan.

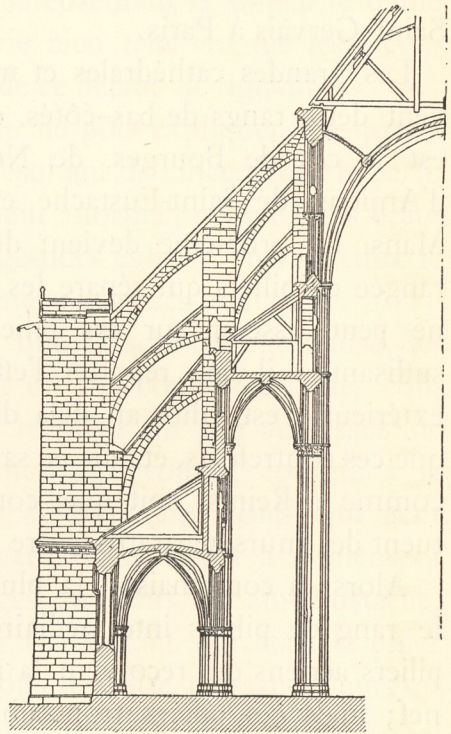


Fig. 1071. — Cathédrale de Bourges. Coupe transversale.

de cet immense enjambement, et la courbe en étant nécessairement plus tendue, il faut une exécution irréprochable, et la certitude qu'il ne se produira pas d'affaissements. C'est un des motifs les plus audacieux qu'on rencontre dans l'architecture du Moyen-âge, et aussi un exemple de l'esprit de perfectionnement continu qui était celui des architectes du Moyen-âge : car on

assure que la disposition première était celle que nous venons de voir à Amiens ou à Reims, et que les arcs-boutants doubles et leurs piliers intermédiaires ayant été compromis par un incendie, on ne craignit pas de leur substituer ces hardis arcs-boutants de double portée.

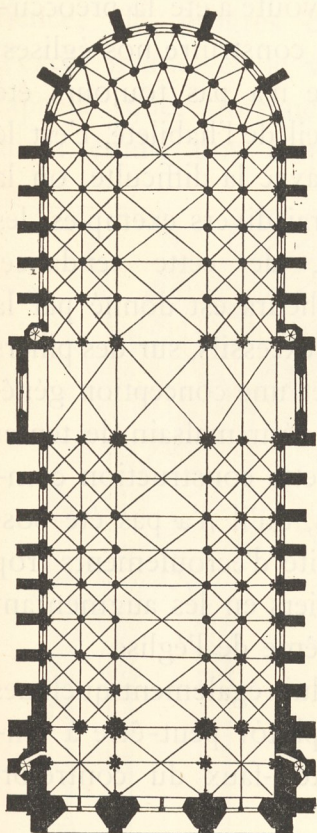


Fig. 1072. — Notre-Dame de Paris.
Plan.

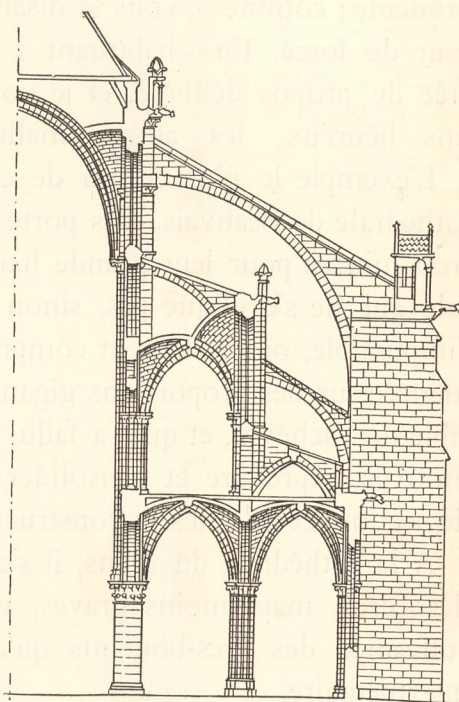


Fig. 1073. — Notre-Dame de Paris.
Coupe transversale.

Enfin, on peut citer peut-être comme l'expression finale du parti d'étaie par arcs-boutant poussé jusqu'à ses extrêmes limites, quelques églises — Notre-Dame de Chalons entre autres — où les contreforts sont tout à faits extérieurs, chez un voisin en quelque sorte. Le contrefort devient alors un monument à part, hors de l'église, uniquement destiné à rece-

voir la butée des étais. Rien ne montre mieux la conception des résistances *extérieures*, car il est impossible d'imaginer une résistance plus extérieure que celle-là : et rien ne montre mieux non plus combien le souci des dangers de la voûte a été la préoccupation constante des artistes qui ont eu à construire nos églises.

Du reste, l'architecture du Moyen-âge n'a pas toujours été prudente ; comme je vous le disais, l'écueil de l'habileté, c'est le tour de force. En s'habituant à jouer avec la difficulté, on la crée de propos délibéré, et je vous citerai divers exemples, les uns heureux, les autres malheureux, de cette tendance.

L'exemple le plus connu de ces malheurs est donné par la cathédrale de Beauvais. Des porte-à-faux excessifs, sur des piliers trop minces pour leur grande hauteur, et une conception générale qui ne s'explique pas, sinon par le désir malsain de tenter l'impossible, ont tellement compromis cette construction commencée sur des proportions gigantesques, qu'il n'a pas été possible de l'achever, et qu'il a fallu, à la suite d'écroulements trop motivés, reprendre et consolider les piliers en les augmentant de section, et cela dès la construction même de l'église.

À la cathédrale du Mans, il s'est produit également quelques désordres, mais moins graves, et dus plutôt peut-être à l'insuffisance des arcs-boutants qu'au porte-à-faux du contrefort intermédiaire.

L'église Notre-Dame de Dijon, très originale dans sa composition intérieure et extérieure, atteint peut-être les limites extrêmes de la prudence ou du bonheur. Sa coupe transversale (fig. 1074 et 1075) rend bien compte de toute l'habileté de son architecte. Il faut ajouter d'ailleurs qu'il était admirablement servi par la nature résistante des pierres de la Côte-d'Or, que nous employons encore lorsque nous voulons demander à la pierre son maximum de résistance et de dureté.

Dans tout ce qui précède, j'ai traité assez aridement un sujet aride. Je vais le traiter avec plus d'aridité encore. Car enfin, je vous ai parlé jusqu'ici d'expérience, de progrès continu, d'excès même, et je vous ai rappelé que, lorsque vous aurez étudié une disposition

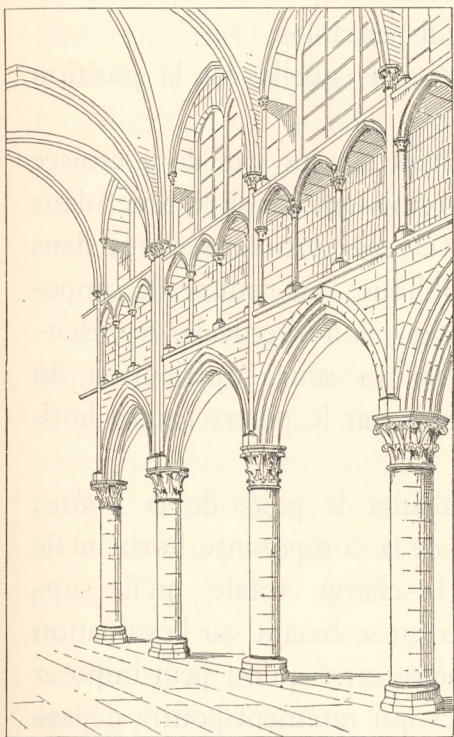


Fig. 1074. — Nef de Notre-Dame de Dijon.

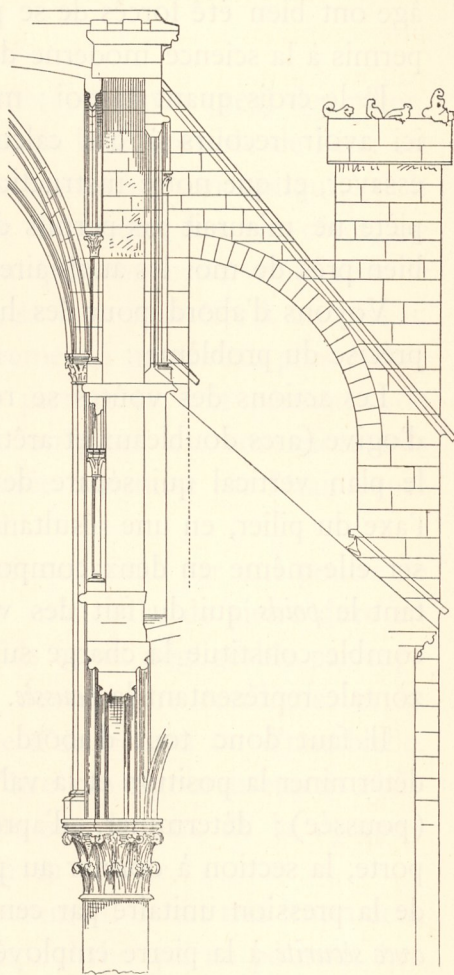


Fig. 1075. — Nef de Notre-Dame de Dijon. Coupe.

de contreforts et d'arc-boutants, les méthodes de construction vous permettent de contrôler son efficacité. Mais je pressens la question que vous vous posez sans doute : En dehors de l'enseignement des exemples, et de la vérification des

tâtonnements, n'existe-t-il donc pas une théorie qui puisse guider dans ces difficiles études ? Et si les architectes du Moyen-âge ont bien été forcés de se passer de cette théorie, n'est-il pas permis à la science moderne de l'établir ?

Je le crois quant à moi ; mais je dois vous avertir qu'il faut ici avoir recours à des calculs que vous ne pourrez pas tous essayer, et que notre instruction scientifique encore trop incomplète ne m'aurait pas permis d'affronter si je n'avais pu trouver bien près de moi les auxiliaires indispensables.

Voyons d'abord pour les hautes nefs quelle est la position précise du problème :

Les actions des voûtes se reportant sur les arcs de la croisée d'ogive (arcs doubleaux et arêtiers) finissent par se résumer dans le plan vertical qui sépare deux travées, par conséquent dans l'axe du pilier, en une résultante oblique, qui peut se décomposer elle-même en deux composantes : l'une verticale, représentant le *poids* qui du fait des voûtes, du mur supérieur et du comble constitue la charge supportée par le pilier ; l'autre horizontale représentant la *poussée*.

Il faut donc tout d'abord : calculer le poids de la voûte ; déterminer la position et la valeur de la composante horizontale (poussée) ; déterminer, d'après la charge totale qu'il supporte, la section à donner au pilier en se basant sur l'évaluation de la pression unitaire par centimètre carré qu'on peut imposer *avec sécurité* à la pierre employée, et qui rarement pourra dépasser 20 kilog. pour nos pierres dures et devra le plus souvent rester au-dessous de cette limite.

Ces déterminations sont assez simples — relativement — et s'obtiendront par les méthodes de calcul et de tracés que vous enseigne le cours de construction.

Supposons donc cette première partie du problème résolue. Et

dès lors, il reste une poussée d'une valeur Q , ayant son point d'application en M , et qu'il faut équilibrer par un étaielement, sans quoi l'édifice serait renversé.

Comment sera réalisé cet étaielement ?

Le point à étayer est à l'aplomb (ou à peu près) des piliers qui séparent la nef des bas-côtés; la base possible de l'étaie est reportée au delà de la largeur des bas-côtés; son obliquité doit en tous cas rester au-dessus de la voûte des bas-côtés, ou plus exactement de l'arc doubleau qui dans cette voûte relie le pilier de la nef au pilier extérieur; sa base peut être à un niveau plus élevé, et est en effet ordinairement à un niveau plus élevé; la composition générale du plan permet et doit permettre de constituer au delà des bas-côtés un pilier ou contrefort très résistant, qui contrebutera la poussée transmise par l'étaie, lequel pourra être plus ou moins incliné.

Il est évident que si cet étaie était constitué par une poutre de bois ou de fer, ou même par un monolithe de pierre dure en délit, de marbre, etc., dont le poids serait négligeable par rapport aux forces en question, il devrait être rectiligne, et sa section se calculerait comme celle d'un poteau ou d'une bielle. L'inclinaison pourrait d'ailleurs n'être pas rigoureusement obligatoire, et n'aurait d'influence que sur la part de la composante verticale que l'étaie prend à sa charge.

Mais si cet étaie est en pierre, comme il serait très imprudent de le constituer par un prisme monolithe qui ne pourrait être qu'en délit, il faudra que ce soit un arc : ce sera l'arc-boutant; et son poids ne pourra plus être négligé dans les calculs. Les nécessités de l'appareil et celles de la statique seront d'accord pour exiger un tracé courbe.

Or, la théorie permet de calculer exactement la courbe que devra prendre la ligne médiane ou *la fibre neutre* de cet arc, de

façon à ce que d'une part il soit en équilibre parfait, c'est-à-dire que pour chaque section la résultante passe au centre de gravité de cette section, et que d'autre part la pierre travaille partout uniformément, ce qui sera évidemment la solution la plus économique si on la fait travailler à une pression voisine de celle admise comme sécurité.

Sans entrer dans des développements mathématiques¹, il ressort de ce qui précède les résultats suivants :

1° Il existe mathématiquement une courbe nécessaire de la *fibre neutre* d'un arc-boutant d'égale résistance, en équilibre parfait, capable de faire équilibre à une poussée horizontale connue, en un point connu, et de prendre appui en un autre point donné;

2° Cette courbe est indépendante de l'intensité de la poussée à équilibrer; la surface de chaque section de l'arc se déterminera après qu'on aura tracé la courbe, et c'est cette surface seule qui dépendra de la poussée (elle lui sera proportionnelle);

3° Le tracé de la courbe ne dépend, outre les points de départ et d'arrivée, que de la nature des matériaux employés, densité et coefficient de sécurité à l'écrasement;

4° Quels que soient les points de départ et d'arrivée, la courbe à tracer sera toujours une portion d'une courbe théorique indéfinie, asymptotique vers le bas à une verticale déterminée, et ayant pour formule :

$$\frac{y}{b} = - \text{Log. cos. } \frac{x}{b}$$

où x est la distance horizontale entre les deux points;

y la hauteur;

b , la hauteur maxima d'une tour cylindrique construite avec la pierre employée, et ne subissant pas à sa base une pression

1. Pour l'étude scientifique complète de la question, je ne puis que renvoyer par avance à une publication qui sera prochainement faite sur cette intéressante question.

supérieure à celle que permet le coefficient de sécurité;

Log. le symbole des logarithmes népériens.

L'asymptote verticale de cette courbe est à une distance de son point d'origine exprimée par $\frac{\pi}{2} \times b$.

La portion à prendre sera déterminée par l'obligation de passer par ses points de départ et d'arrivée.

4° La construction d'un arc-boutant qui descendrait jusqu'à un massif encastré dans le sol, serait plus économique de matière que celle d'un arc-boutant et d'un contrefort.

Il faut remarquer d'ailleurs :

1° Que si la théorie pure conduirait à une configuration de l'arc-boutant telle que chaque section fût plus étendue que la suivante en largeur aussi bien qu'en hauteur, les nécessités ou tout au moins les exigences de la construction limitent la largeur de l'arc-boutant dans tout son parcours entre deux plans verticaux parallèles, et que c'est par conséquent la hauteur de la section qui peut seule varier ;

2° Que si le point supérieur de contrebutement est fixe, le point inférieur d'appui peut varier, pourvu qu'il reste à distance suffisante des parements intérieur et extérieur du pilier dont on pourra disposer comme éperon ou contrefort depuis le *dans-œuvre* du bas-côté jusqu'à l'extérieur de l'édifice; mais qu'en général il y aura intérêt à le rapprocher le plus possible du parement intérieur.

Et maintenant, d'après tout ce qui précède, il est intéressant de voir par un exemple dans quelle mesure ce tracé théorique de l'arc-boutant suffisant et nécessaire pour équilibrer la poussée des voûtes s'écartera de celui d'une église du Moyen-âge. Je prendrai de nouveau pour exemple l'église Saint-Ouen de Rouen (fig. 1077) dans l'exposé théorique qui va suivre. (Pages 198 et suiv. Fig. 1076.)

Il n'est pas possible de donner ici *in extenso* la série des calculs relatifs à cette question. Il faudra se limiter aux résultats.

Si l'on suppose l'une des églises voûtées du moyen âge — par exemple Saint-Ouen de Rouen, considérée ici comme type parfait de ces églises — édifiée sans aucune modification même minime de son intérieur, verrières, triforium, galeries, etc., on peut se demander si l'étalement extérieur est excessif, et s'il est rationnellement dirigé.

Or, la figure 1076 montre que, en employant uniquement les modes de construction du moyen âge, il pouvait être fait une très sérieuse économie de matière. Cette figure montre, à droite, la coupe de l'église Saint-Ouen prise dans l'axe d'un pilier, et telle qu'elle est ; et à gauche le tracé d'arc-boutant et de contrefort suffisant pour assurer la stabilité.

De l'étude approfondie de la question, il ressort :

1° Qu'un arc-boutant est nécessaire, le contrefort adossé au pilier ne suffisant pas à neutraliser les efforts renversants ;

2° Que l'arc-boutant doit, pour réaliser la plus grande économie, être construit en ayant pour axe (*ou fibre neutre*) une courbe mathématiquement déterminée ;

3° Que le tracé de cette courbe est indépendant de l'intensité de la poussée, et résulte seulement de deux facteurs : la densité de la pierre employée et la résistance à la compression qu'on admettra pour cette pierre comme coefficient de sécurité ; les valeurs des sections de l'arc-boutant dépendent seules de la poussée.

Le problème posé revient en effet à chercher un arc-boutant d'égale résistance et en équilibre parfait. Un tel arc, en effet, travaillera dans toutes ses parties à une même pression fixée d'avance, et aucune portion de matière n'y sera inutilisée. Ce sera donc le plus économique. Le passage de la résultante aux centres de gravité de chaque section droite réalise l'équilibre parfait, et la proportionnalité de cette résultante à l'aire de ces sections réalise l'égalité de résistance.

Si on appelle x la distance d'un point variable, de la *fibre neutre*, à la verticale du sommet de la courbe, et y la hauteur de ce même point au-dessous du même sommet, on obtient par une double intégration la formule suivante :

$$y = -b \operatorname{Log} \cos \frac{x}{b} \quad (1)$$

où b représente la hauteur d'une pile de la pierre employée, dont la base travaillerait à la pression de sécurité donnée R , et où Log est le symbole des logarithmes népériens. Les sections droites, a , seront données par la formule :

$$a = \frac{Q}{R \cos \frac{x}{b}}, \quad (2)$$

où Q est la poussée supérieure.

Mais si on applique ces formules en prenant l'origine des x et des y au point M on trouvera une courbe beaucoup trop horizontale et sortant très rapidement des limites imposées par les dimensions du monument, à moins de prendre le coefficient b très petit. La pierre serait alors mal employée puisqu'elle travaillerait à une pression beaucoup trop faible, et on obtiendrait des sections droites démesurées. On est donc amené à chercher une portion de courbe inclinée même en M . Pour cela on se donnera le point M et le point N , on se donnera aussi le coefficient b , que l'on a pris ici égal à 20 m, correspondant à de la pierre pesant 2500 kilog. le mètre cube et travaillant à 5 kilog. par centimètre carré ou 50000 kilog. par mètre. La faible section de ces sortes de constructions, par l'instabilité qui en résulte, et la difficulté d'exécution de l'appareil et des joints justifient cette basse pression de sécurité. On posera alors :

$$y = -20 \operatorname{Log} \cos \frac{x}{20} \quad \text{et} \quad x_{20} - x_1 = 6 \text{ m}, 50 \quad y_{20} - y_1 = 14 \text{ m}, 60,$$

en appelant x_1, y_1 , et x_{20}, y_{20} les coordonnées des points M et N, par rapport au sommet théorique inconnu de la courbe, et on en tirera facilement, par éliminations et en posant :

$$\text{Log } \varphi = \frac{14,60}{20} :$$

$$\text{tg } \frac{x_1}{20} = \frac{\varphi \cos \frac{6,50}{20} - 1}{\varphi \sin \frac{6,50}{20}} \quad \frac{x_1}{20} = 55^\circ 33' 56'' 77 = 0^m, 96979$$

$$x_1 = 19^m, 3959 \text{ et } y_1 = 11^m, 4024$$

Puis, une fois ce point de départ connu, on n'aura qu'à appliquer la formule (1) pour autant de valeurs de x que l'on désirera obtenir de points $(x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4) \dots$, etc. De même on obtiendra les sections a ou, puisque la largeur est constante, leurs épaisseurs b par la formule (2). On obtient ainsi la figure MNSUTV, où la courbe MN figure la fibre neutre, et SU et TV l'extrados et l'intrados. On a supposé en T un raccord circulaire pour éviter l'angle aigu et intéresser une plus grande hauteur de la pile.

Mais, lorsque l'on prend ainsi une portion limitée de la courbe générale, on devra, pour rester dans les conditions d'équilibre, remplacer sa partie supérieure par une force équivalente à son action, c'est-à-dire par son poids ; sa poussée étant par hypothèse égale à celle de la voûte de la nef. C'est dire que l'arc-boutant devra, pour être en équilibre, trouver en M une résistance égale au poids de la partie d'arc non existante, qui sera donnée par les formules suivantes, où P est ce poids, V le volume et D la densité de la pierre.

$$P = VD$$

$$\text{Or : } V = \int_0^{x_1} a ds = \frac{D}{R} \int_0^{x_1} Q \frac{ds}{dx} ds = \frac{1}{b} Q \int_0^{x_1} \frac{ds^2}{dx^2} dx = Q \text{tg } \frac{x_1}{20}$$

$$\text{Donc : } P = DQ \text{tg } \frac{x_1}{20} = 11954^k.$$

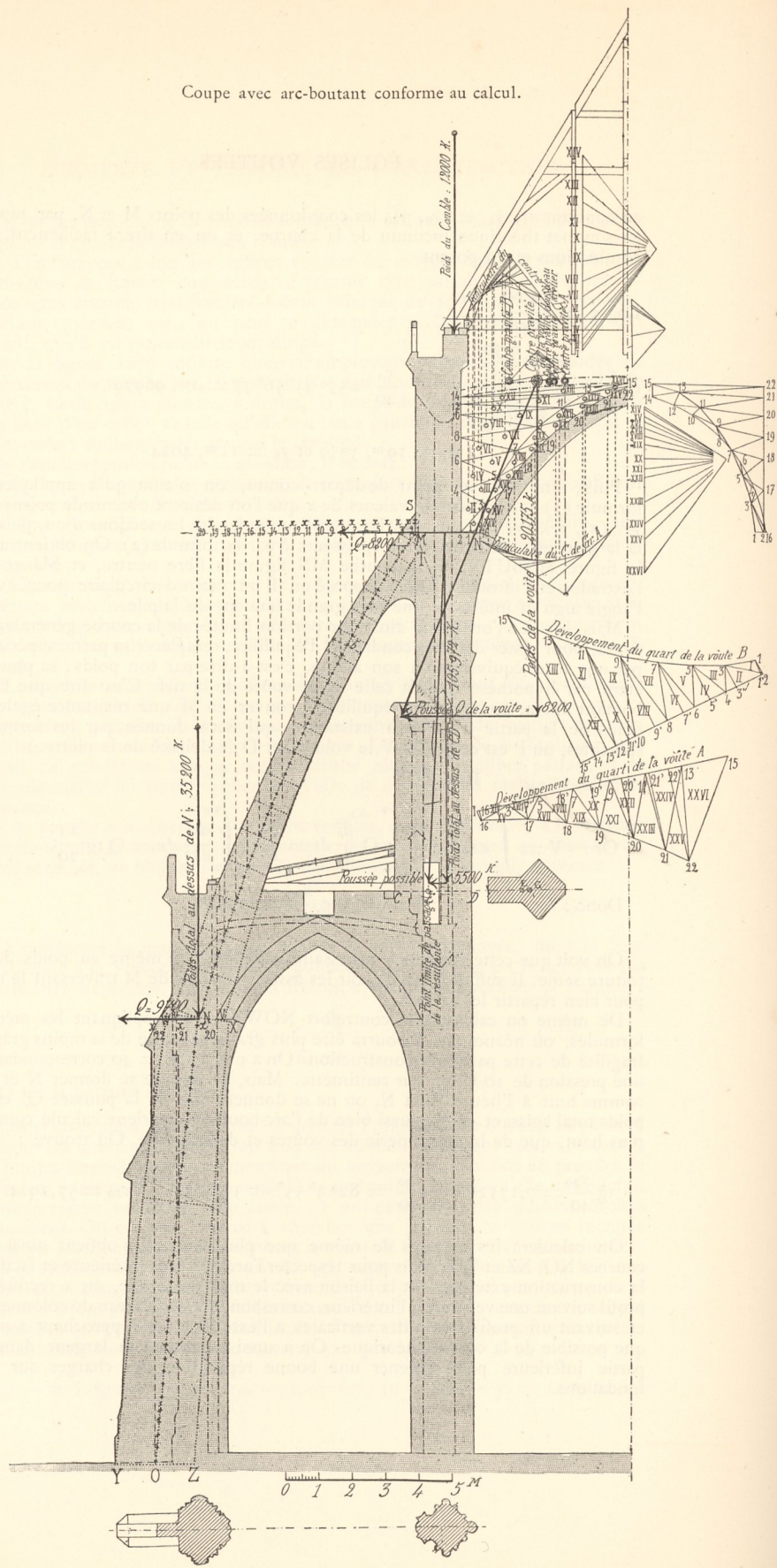
On voit que cette résistance nécessaire est inférieure même au poids de la toiture seule. Il suffira donc d'avoir les assises voisines de M traversant le mur pour bien répartir les actions.

De même on calculera le contrefort NOWYXZ en appliquant les mêmes formules, où néanmoins b pourra être plus grand par suite de la moins grande fragilité de cette partie de construction. On a pris ici $b = 40$ correspondant à une pression de 10 kilog. par centimètre. Mais, au lieu de se donner N et O, comme tout à l'heure M et N, on ne se donnera que N, la poussée Q' et le poids total agissant en N, aussi bien de l'arc-boutant supérieur calculé comme plus haut, que de la maçonnerie des voûtes et de la façade. On trouve :

$$\text{tg } \frac{x_{20}}{40} = 7,17526 \quad \frac{x_{20}}{40} = 82^\circ 3' 55'' = 1,43231 \quad x_{20} = 57,2924.$$

On calculera les sections de même que plus haut. On obtient ainsi les courbes NO, XZ et WY. Mais pour respecter l'architecture intérieure et faciliter la construction extérieure et la liaison avec le mur de façade, on a rectifié le profil suivant une verticale à l'intérieur, correspondant au faisceau de colonnettes et suivant un profil à retraites verticales à l'extérieur, se rapprochant autant que possible de la courbe théorique. On a aussi augmenté la largeur dans la partie inférieure pour amener une bonne répartition des charges sur les fondations.

Coupe avec arc-boutant conforme au calcul.



Coupe conforme à la construction existante.

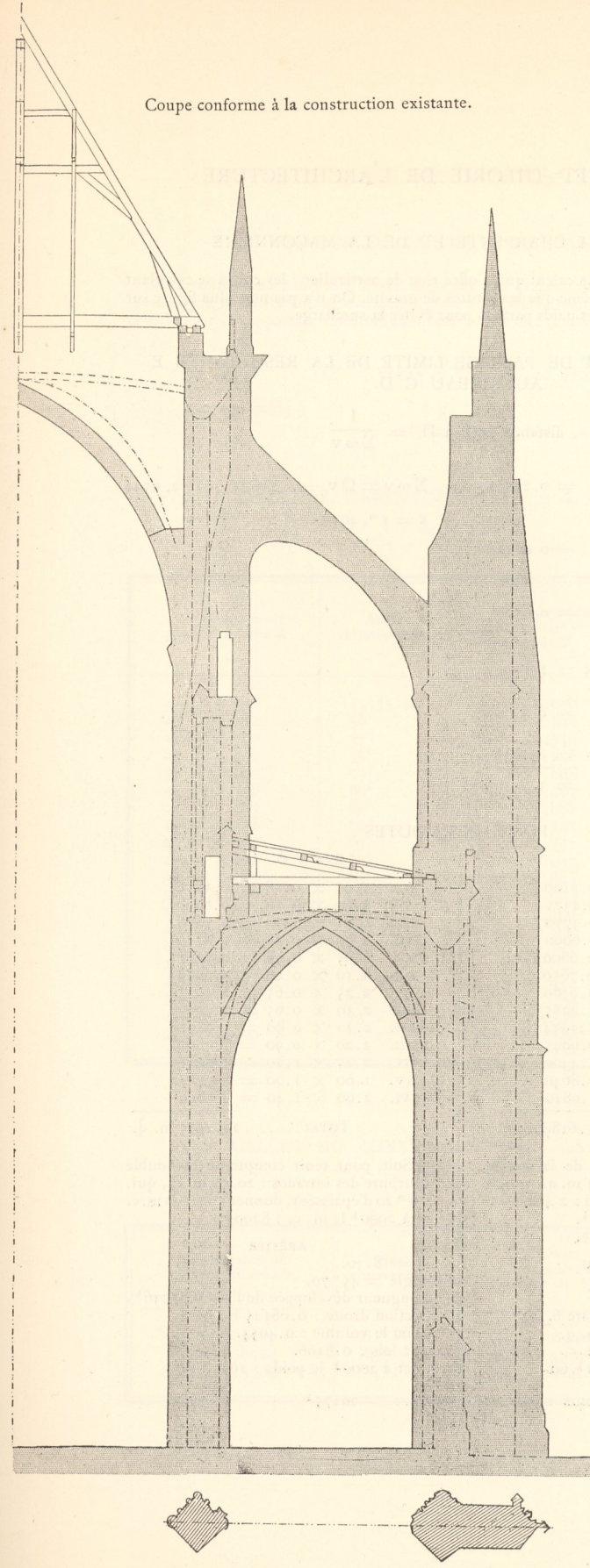


Fig. 1076. — Coupe de l'église Saint-Ouen de Rouen suivant l'axe des piliers.

POIDS DE LA CHARPENTE ET DE LA MAÇONNERIE

On ne détaillera pas ici ce calcul qui n'offre rien de particulier : les cubes se calculant de la façon ordinaire, de même que les centres de gravité. On n'a pas non plus figuré sur l'épure les compositions des poids partiels pour éviter la surcharge.

CALCUL DU POINT DE PASSAGE LIMITE DE LA RÉSULTANTE E AU NIVEAU C D.

$$x, \text{ distance de E à D, } = \frac{I}{\sum \omega v}$$

$$I = \frac{0,75 \cdot \overline{1,5}^3}{12} = 0,21093 \quad \sum \omega v = \Omega v_G = 2,216 \cdot 1,20 = 2,6592$$

$$+ 2 \frac{\overline{0,53}^3}{36} = 0,00436 \quad x = 1^m, 403$$

$$+ 2 \frac{\overline{0,9}^3}{36} = 0,03695$$

$$+ 1,65 \cdot \overline{1,5} \cdot 0,75 = 2,86031$$

$$+ 1,08 \cdot \overline{0,53}^2 = 0,32764$$

$$+ \overline{0,6}^2 \cdot \overline{0,9} = 0,29160$$

$$= 3,73179$$

POIDS DES VOUTES

QUART B

I.	0.60 × 0.35 = 0.2100
II.	1.25 × 0.35 = 0.4375
III.	0.65 × 0.58 = 0.3770
IV.	1.05 × 0.58 = 0.6090
V.	0.80 × 0.85 = 0.6800
VI.	0.90 × 0.85 = 0.7650
VII.	0.80 × 1.17 = 0.9360
VIII.	1.05 × 1.17 = 1.2285
IX.	0.78 × 1.53 = 1.1934
X.	0.65 × 1.53 = 0.9945
XI.	0.75 × 1.92 = 1.4400
XII.	0.45 × 1.92 = 0.8640
XIII.	0.80 × 2.48 = 1.9840

TOTAL..... 11.6189 m. q.

Soit, pour tenir compte de la double courbure des intrados : 12 m. q., qui, à 0^m 20 d'épaisseur, donnent : 2 400 m. c. et à 2000^k le m. c. : 4800^k.

Pour les deux : — 9600^k.

ARC DOUBLEAU

R = 8,50.
angle = 41° 428.
Longueur développée de l'arc 6.1437^m.
Section droite : 0.06125 m. q.
D'où le volume : 0.376 m. c.
et à 2000^k le poids : 752^k.60.

QUART A

XIV.	1.95 × 0.18 = 0.3510
XV.	4.60 × 0.18 = 0.8280
XVI.	1.95 × 0.30 = 0.5850
XVII.	2.70 × 0.30 = 0.8100
XVIII.	2.05 × 0.48 = 0.9840
XIX.	2.10 × 0.48 = 1.0080
XX.	2.25 × 0.65 = 1.4625
XXI.	2.30 × 0.65 = 1.4950
XXII.	2.20 × 0.90 = 1.9800
XXIII.	2.20 × 0.90 = 1.9800
XXIV.	2.25 × 1.20 = 2.7000
XXV.	1.60 × 1.20 = 1.9200
XXVI.	2.90 × 1.40 = 4.0600

TOTAL..... 20.1535 m. q.

Soit, pour tenir compte de la double courbure des intrados : 20,50 m. q., qui, à 0^m 20 d'épaisseur, donnent : 4 100 m. c. et à 2000^k le m. c. : 8200^k.

ARÊTIER

R = 8,30.
angle = 45° 70.
Longueur développée de l'arc 6,61736^m.
Section droite : 0,06125 m. q.
D'où le volume : 0,4053.
2 fois : 0,8106.
et à 2000^k le poids : 1621^k 20.

POIDS TOTAL DES VOUTES.... 20175^k

CALCUL DE LA VOÛTE DU BAS-COTÉ

Cette voûte étant semblable à celle de la nef, et l'évaluation du poids et de la poussée n'ayant pas besoin d'autant d'exactitude par suite de la hauteur peu élevée, on pourra calculer par le rapport de similitude; ce qui donne une poussée :

$$Q' = 1500 \text{ k et } Q + Q' = 9700$$

et un poids :

$$P' = 3400 \text{ k}$$

CALCUL DE L'ARC-BOUTANT $y = -20 \text{ Log } \cos \frac{x}{20}$
de M à N

x = distance du point considéré à M	Angle correspondant	y = hauteur du point considéré au-dessous de M	b = épaisseur de l'arc-boutant, la largeur dans le sens perpendiculaire étant de 0,40 c.
$x_1 = 0.000$	$55^0 33' 57''$	$y_1 = 0.000$	$b_1 = 0.756$
$x_2 = 0.152$	56^0	$y_2 = 0.223$	$b_2 = 0.778$
$x_3 = 0.500$	57^0	$y_3 = 0.750$	$b_3 = 0.803$
$x_4 = 0.850$	58^0	$y_4 = 1.298$	$b_4 = 0.826$
$x_5 = 1.199$	59^0	$y_5 = 1.868$	$b_5 = 0.849$
$x_6 = 1.548$	60^0	$y_6 = 2.461$	$b_6 = 0.874$
$x_7 = 1.897$	61^0	$y_7 = 3.078$	$b_7 = 0.902$
$x_8 = 2.246$	62^0	$y_8 = 3.721$	$b_8 = 0.932$
$x_9 = 2.595$	63^0	$y_9 = 4.431$	$b_9 = 0.964$
$x_{10} = 2.944$	64^0	$y_{10} = 5.091$	$b_{10} = 0.998$
$x_{11} = 3.293$	65^0	$y_{11} = 5.823$	$b_{11} = 1.034$
$x_{12} = 3.642$	66^0	$y_{12} = 6.589$	$b_{12} = 1.076$
$x_{13} = 3.991$	67^0	$y_{13} = 7.392$	$b_{13} = 1.120$
$x_{14} = 4.340$	68^0	$y_{14} = 8.235$	$b_{14} = 1.168$
$x_{15} = 4.689$	69^0	$y_{15} = 9.122$	$b_{15} = 1.220$
$x_{16} = 5.039$	70^0	$y_{16} = 10.055$	$b_{16} = 1.278$
$x_{17} = 5.388$	71^0	$y_{17} = 11.041$	$b_{17} = 1.312$
$x_{18} = 5.737$	72^0	$y_{18} = 12.085$	$b_{18} = 1.416$
$x_{19} = 6.086$	73^0	$y_{19} = 13.192$	$b_{19} = 1.496$
$x_{20} = 6.500$	$74^0 11' 11''$	$y_{20} = 14.599$	$b_{20} = 1.604$

CALCUL DU CONTREFORT $y = -20 \text{ Log } \cos \frac{x}{20}$
de N à O

x = distance du point considéré à P	Angle correspondant	y = hauteur du point considéré au-dessous de P	b = épaisseur du contrefort, la largeur étant de 0,40 c.
$x_{20} = 0.0000$	$82^0 3' 55''$	$y_{20} = 0.0000$	$b_{20} = 1.88$
$x_{21} = 0.6524$	83^0	$y_{21} = 5.9792$	$b_{21} = 2.12$
$x_{22} = 1.3504$	$84^0 1''$	$y_{22} = 13.40$	$b_{22} = 2.62$

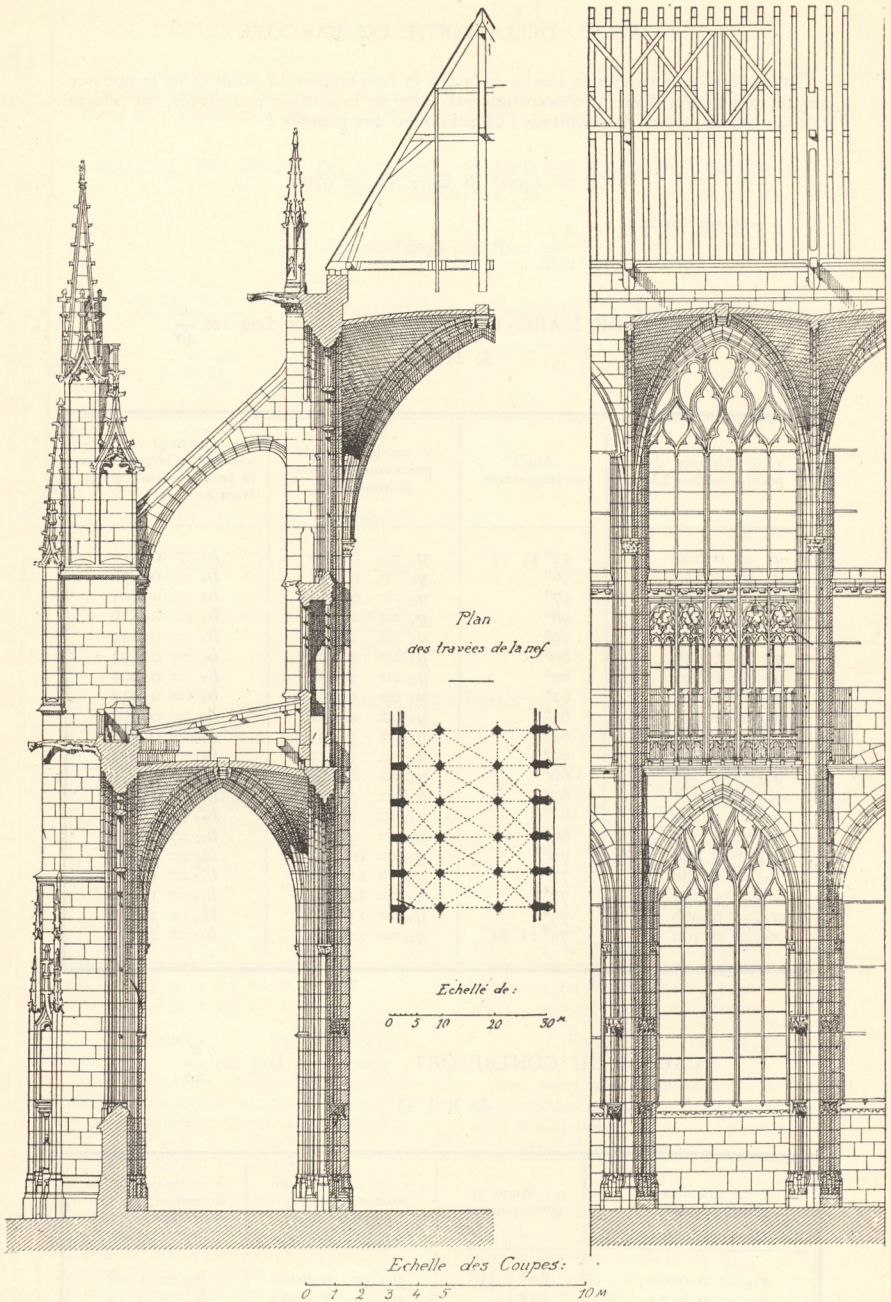


Fig. 1077. — Église Saint-Ouen à Rouen. Coupes transversale et longitudinale. Plan.

Dans tout ce qui précède, j'ai supposé que rien absolument n'est changé à l'aspect intérieur, aux proportions des divers éléments de l'église, et que le problème se posait uniquement ainsi :

L'architecte de Saint-Ouen *a voulu* une composition intérieure qui est admirable. Pour la réaliser, il *a subi* les nécessités de résistances extérieures — contreforts et arcs-boutants. L'intérieur a été son but, l'extérieur a été son moyen. Ce moyen pouvait-il être plus simple, plus économique? OUI. Plus scientifique, affranchie de la méthode des tâtonnements qui seule était à sa portée, l'architecture du Moyen-âge aurait pu simplifier notablement ses complications et ses fragilités extérieures, diminuer notablement par conséquent ses risques de destruction; et cela avec ses moyens, sans emploi de méthodes de construction qui n'ont été trouvées que plus tard, par exemple la simple poutre métallique qui, passée dans l'axe des piliers au-dessus des voûtes des bas-côtés, *nous* permettrait aujourd'hui de faire cette même église sans aucun arc-boutant, avec de simples contreforts appuyant la partie haute du mur de nef.

Je suis bien hardi! — Revenons au Moyen-âge.

Malgré tout, vous n'auriez pas encore l'idée complète des difficultés que présentent les voûtes du Moyen-âge si vous ne considérez que les travées courantes de la nef et des bas-côtés. Il faut voir encore ce qui les termine.

Du côté de la façade principale, il n'y a pas en général de complication; la série des travées de nef bute contre l'arrêt des tours. Mais à la rencontre des nefs avec les transepts, la complication s'impose. Pour étayer la grande nef, il faut des arcs-boutants dirigés du nord au sud, pour étayer le transept, il en faut de dirigés de l'est à l'ouest. De là des croisements, des con-

treforts communs aux deux fonctions ; ce n'est qu'en étudiant attentivement le plan des grandes églises que vous pourrez vous rendre compte des combinaisons nécessaires en pareil cas,

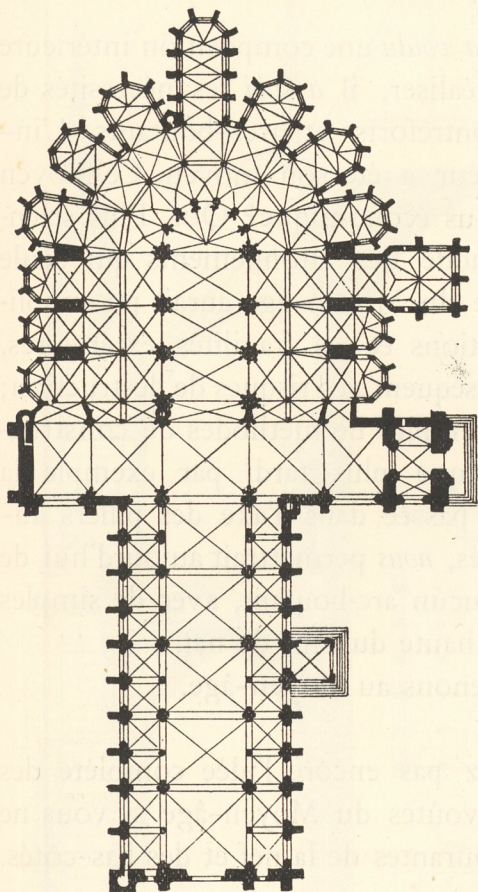


Fig. 1078. — Cathédrale du Mans, plan.

en essayant de constituer le plan au-dessus des toitures. Vous êtes agiles, montez au sommet de Notre-Dame, vous verrez de là très nettement l'ossature d'une grande église.

La combinaison est compliquée aussi autour des absides, par la disposition rayonnante des arcs-boutants : complication d'exécution plutôt que de composition, car là il n'y a pas de doute sur la place des arcs-boutants. Ils se placent tout naturellement dans le plan de la résultante des poussées exercées sur chaque pilier, c'est-à-dire en rayonnant vers le centre de l'abside. Cependant à la cathédrale du Mans (fig. 1078 et 1079), dont il

n'a été construit que le chœur et le transept, sur des proportions colossales, la disposition est différente. A chaque pilier du chœur aboutissent deux arcs-boutants dont la direction est parallèle à l'axe de la travée ; ils encadrent donc un espace rectangulaire, et forment entre eux un angle dièdre aigu dont le

sommet est le milieu du pilier lui-même. Ce parti double le nombre des arcs-boutants et encombre en somme le chevet de l'église. Aussi n'a-t-il pas été suivi, bien que la cathédrale du Mans soit d'ailleurs un édifice d'une très haute valeur.

Parfois on a fait des arcs-boutants sans que la construction les motivât, par exemple dans des façades; c'est ainsi que à Saint-Nicolas-des-Champs vous voyez des arcs-boutants qui ne contrebutent rien. Ce n'est plus qu'un motif de fantaisie : un étai, là où il n'y a rien à étayer, n'a évidemment pas de raison d'être. Je n'insisterai pas sur ces exemples qui échappent à la théorie.

Voilà donc dans ses éléments de composition l'église à arcs-boutants, le type général de l'église du Moyen-âge à partir du XIII^e siècle. Je vous ai surtout parlé des nefs, parce que c'est ce qui engage et motive la composition du reste, mais tout ce qui précède peut s'appliquer à toute partie d'église ayant des bas-côtés ou collatéraux, transept, abside ou autre.

L'arc-boutant, vous devez le voir, est la cheville ouvrière de ces compositions; réalisables grâce à lui, sans lui elles auraient été impossibles. Cette architecture est fondée sur l'étalement résolument accepté comme moyen permanent et comme élément

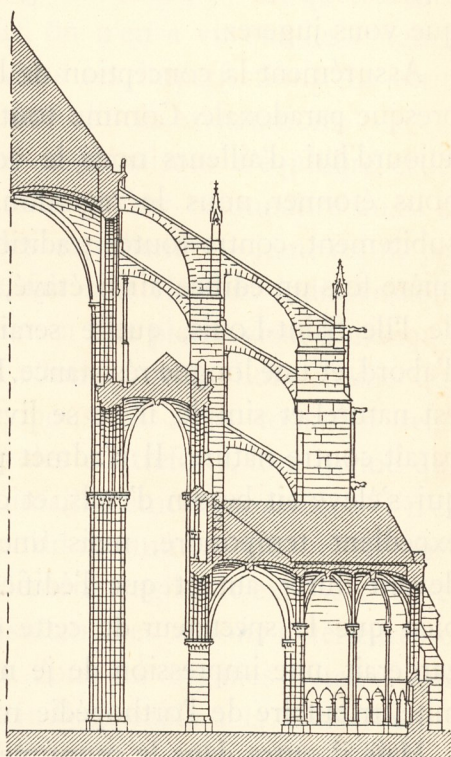


Fig. 1079. — Cathédrale du Mans. Coupe.

définitif de stabilité. C'est là à la fois la haute originalité et la servitude infrangible de cette théorie. Examinons donc le fort et le faible de l'arc-boutant, ses avantages et ses dangers : en le jugeant, c'est l'architecture religieuse du Moyen-âge tout entière que vous jugerez.

Assurément la conception de l'arc-boutant est d'une hardiesse presque paradoxale. Comme toute chose, il est venu peu à peu ; aujourd'hui d'ailleurs nous le voyons si souvent que, loin de nous étonner, nous le regardons à peine. Mais supposez que, subitement, contre toutes traditions, on construise pour la première fois un édifice ainsi étayé, par exemple Notre-Dame vue de l'île Saint-Louis, quelle serait l'impression ? L'étonnement d'abord, et une longue résistance. L'esprit accepte d'instinct ce qui est naturel et simple, il ne se livre pas sans combat à ce qui lui paraît contre nature. Il n'admet pas d'emblée que le monument qui s'élève ait besoin d'étais, et que ces étais soient non pas un expédient temporaire, mais une nécessité de la construction devant durer autant que l'édifice. Étais ou béquilles, je crois bien que le spectateur de cette exhibition, supposée subite, en garderait une impression de je ne sais quelle irrémédiable infirmité, tributaire de l'orthopédie monumentale.

Mais il entre dans le monument : alors, il est émerveillé à la vue de ces nefs élevées, de ces voûtes aériennes, de ces grandes verrières, de la superposition de tout cela à des piliers minces qui divisent les diverses parties de l'église sans les encombrer, de la profondeur et de la variété de ces aspects, de l'impression surprenante de difficulté vaincue, de réalisation de l'in vraisemblable, de mélange du triomphe et du mystère : tout cela obtenu sans autres moyens apparents que le prodige et le miracle, car le spectateur n'aperçoit pas la rançon de sa jouissance. Et alors, je me figure une balance d'une extrême sensibilité : sur l'un des

plateaux, ces splendeurs; sur l'autre, ces précarités. Lequel l'emportera? Les appréciations sur l'architecture religieuse du Moyen-âge ont singulièrement varié. Depuis la Renaissance jusqu'au commencement du xix^e siècle, on n'a voulu y voir que barbarie et ignorance; plus près de nous, on n'en a vu que les magnificences, on l'a admirée même dans ses imperfections. La vérité comme toujours est également loin de ces exagérations.

Il faut admirer ces très habiles combinaisons d'équilibre, et les résultats qu'elles ont produits; mais il faut reconnaître aussi ce qu'il y a d'aventureux dans les expédients — je ne recule pas devant le mot — dont elle a fait son élément indispensable. Voyez par exemple Notre-Dame : si une pierre vient à manquer dans un arc-boutant, c'est un effondrement. Lors même que tout sera parfaitement calculé, poussées dans tous les sens, résistance des points d'appui et des contreforts, lors même que les éléments statiques seront infailliblement contrôlés, il n'en est pas moins vrai que l'existence du monument est subordonnée à la durée des arcs-boutants, élément fragile, et exposé à toutes les causes de destruction qui résultent des actions extérieures et atmosphériques; c'est un corps dont les organes vitaux sont extérieurs : ce qui est le plus indispensable à la conservation est le plus exposé.

Cependant, ces édifices durent depuis sept siècles, et ce n'est que depuis un temps relativement court qu'on les a sérieusement entretenus. Ils se sont donc défendus longtemps par eux-mêmes et sans secours. C'est qu'ils étaient admirablement construits, avec d'excellents matériaux, par d'excellents ouvriers. Dans ces chefs-d'œuvre contestables à certains égards, chaque pierre est un chef-d'œuvre incontestable, et c'est là un des plus beaux caractères de cette architecture, un enseignement bien instructif qu'elle nous donne, au delà même de son programme particulier.

Que conclure de tout cela ? C'est à chacun de vous qu'appartient la conclusion : je n'ai quant à moi à vous en proposer qu'une seule : étudier sérieusement ces monuments, et par conséquent apprendre quelles sont les conditions nécessaires de leur construction. Si vous êtes assez heureux quelque jour pour avoir à vous mesurer avec ce magnifique programme d'une grande église, et si vous voulez faire des nefs comme à Notre-Dame ou à Saint-Eustache, sur des plans analogues à ceux de ces monuments, et en vous restreignant aux moyens dont disposaient leurs architectes, vous saurez qu'ils ne sont réalisables que moyennant l'une de ces conditions : neutraliser les poussées par des tirants en fer comme dans les églises italiennes ; ou neutraliser les poussées par l'arc-boutant. Lorsqu'on sait, on peut composer : vouloir faire une église sans savoir quels sont les moyens dont on dispose, c'est se préparer un désastre.

Arrivé à la fin de cet exposé général, permettez-moi de résumer brièvement l'évolution des anciennes églises.

La basilique civile des Romains est leur point de départ, les églises sont d'abord des basiliques, édifices couverts par des charpentes, avec nef, bas-côtés, ordinairement des tribunes ; une grande abside pour les offices, de petites absides au fond des bas-côtés ; souvent un transept.

Mais en Orient surtout, on veut l'église voûtée, et tout d'abord la composition des églises grecques avec une coupole centrale ; soit que cette coupole soit unique comme à Sainte-Sophie de Constantinople, soit que l'église, disposée en *croix grecque*, ait quatre autres coupoles dans les axes de la coupole centrale, comme à Saint-Marc de Venise ou à Saint-Front de Périgueux.

Pendant la forme basilicale étant plus appropriée au culte,

on veut l'église rectangulaire voûtée. Au début, de nombreuses églises ainsi disposées sont sans bas-côtés, soit que la nef unique soit voûtée en berceau, soit que, comme à Angoulême, elle soit couverte par une suite de voûtes en pendentifs.

Mais une église sans bas-côtés n'est pas complète, et les bas-côtés des basiliques réapparaissent dans les églises voûtées, d'abord avec des voûtes en berceau sur la nef et les bas-côtés et des voûtes en demi-berceau sur les tribunes, épaulant la nef, comme à Issoire, à Notre-Dame-du-Port de Clermont, etc. Seulement cette construction timide livre des églises sombres : ce n'est qu'un acheminement vers une solution plus complète.

Cette solution sera demandée aux voûtes d'arête, permettant l'éclairage des nefs au-dessus des bas-côtés, des chapelles, etc. C'est la substitution des poussées localisées aux poussées uniformément réparties, et le retour ou plutôt la fidélité aux traditions de l'architecture des salles des Thermes des Romains ou de la Basilique de Constantin.

Dès lors se posent pour l'architecte des problèmes bien plus difficiles : à ces poussées localisées, il lui faut opposer des résistances localisées. Elles sont intérieures, tout comme dans l'architecture romaine, avec les églises lombardes, intérieures encore dans un grand nombre d'églises du XII^e et même du XIII^e siècle. Mais cela ne permet pas les grandes élévations des nefs, les élégances de points d'appui, les grandes verrières ; et pour obtenir ces résultats, à la recherche de la stabilité intérieure se substitue celle de l'équilibre neutralisant les poussées et demandé à des organes extérieurs du monument : c'est la fonction de l'arc-boutant. L'architecture, en vue des splendeurs intérieures, accepte, après des tâtonnements successifs, le parti de l'édifice étayé, étayé par des étais permanents qui au travers des airs vont chercher sur des points d'appui extérieurs la résistance néces-

saire à l'équilibrage des actions renversantes des voûtes : condition *sine qua non* de la réalisation de ces édifices, de Notre-Dame à Saint-Eustache, à moins de recourir comme les Italiens à l'emploi des tirants en fer pour s'opposer à l'écartement des piliers.

Entre tout cela, il y a de profondes différences de styles et de moyens d'exécution; mais une marche continue, un développement séculaire des mêmes principes et des mêmes aspirations; cette étude, si diverse dans ses éléments, doit s'élever au-dessus des classifications superficielles pour en laisser voir l'unité.

