

Abbatiale Saint-Jacques à Liège: ont été munis de consoles, assurant la solidarisation transversale entre les clairements.

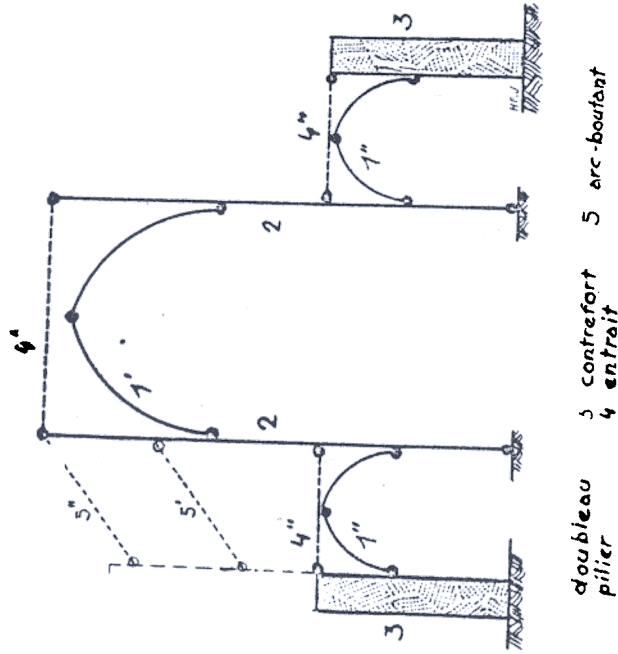


Fig. 1

Abbatiale Saint-Jacques à Liège: assimilation de sa structure gothique à un mécanisme articulé. Les organes 1 à 3 sont des unités structurales gothiques; 4 et 5 sont les solidarisations transversales; 5 est la batterie d'arcs-boutants fréquente dans les cathédrales gothiques classiques françaises.

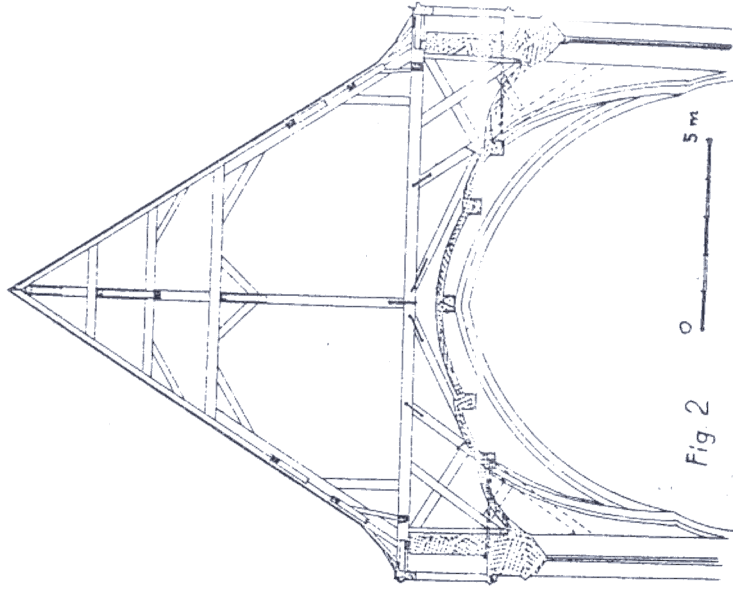


Fig 2

## LES CHARPENTES COMME PARTIE INTEGRANTE DE LA STRUCTURE DE L'EDIFICE

Robert F. JOWA

### Parties de la structure souvent oubliées

Suivant leur type ou leur époque, les édifices historiques sont ressentis plus spécialement sous tel ou tel aspect. Ainsi, les édifices de la Renaissance expriment surtout une composition d'espaces; les constructions romanes s'articulent en volumes; l'architecture gothique retient l'attention par son système structurel de pierre: le spectateur participe en quelque sorte aux poussées réciproques des voûtes et des contrebutements.

Cela fait oublier souvent d'autres parties cachées de l'organisme structurel gothique, essentielles au bon comportement, mais combien de restaurateurs les ont négligées. Ces parties nécessaires à l'équilibre sont les charpentes.

L'étude des conditions d'équilibre d'édifices gothiques des régions de la Meuse moyenne, du 13<sup>ème</sup> au 16<sup>ème</sup> siècle, a fait apparaître à l'auteur la nécessité de solidarisation latérale, soit entre les clairements, soit entre les parties médianes des piliers et les contre-forts ou culées extérieurs. Cette étude est facilitée en assimilant une travée transversale gothique à un mécanisme articulé, et les théories actuelles de la plasticité permettent de rejoindre ainsi la géométrie constructive des maîtres d'œuvre médiévaux.

### La géométrie constructive gothique

Des déformations caractéristiques se marquent dans les édifices gothiques, après une évolution séculaire. La genèse même du système gothique: les tâtonnements constatés sur l'importance et sur l'emplacement des organes de butée... fait apparaître l'ossature gothique comme constituée d'unités structurales, articulées entre elles en un système organique.

Ces unités observées à l'abbatiale Saint-Jacques de Liège, fig 1, sont les voûtes supérieures et inférieures (1' et 1''), les piliers (2) et les contre-forts ou culées (3); les édifices gothiques classiques français comportent en plus les arcs-boutants (5).

Les charges de la voûte se concentrent principalement sur l'arc-doubleau: celui-ci se comporte comme un arc articulé aux naissances et à la clef. Ces articulations sont des zones où les déformations éventuelles plus accentuées se localisent. Les articulations des naissances sont situées à plus ou moins 30° sur l'horizontale à partir du centre de courbure et en relation avec le tas de charge. L'articulation centrale est située à la clef dans l'arc plein-cintre; dans les arcs pointus, il y a trois articulations au voisinage de la clef, qui a tendance à remonter.

Le pilier se comporte comme articulé à sa base; le contre-fort ou la culée se comportent comme encastrés dans les fondations.

Une certaine logique géométrique était communément utilisée par les constructeurs gothiques, logique étayée par une solide pratique personnelle. En 1399, le maître d'oeuvre français Mignot pouvait se baser sur cette logique dans les discussions en vue de l'achèvement de la cathédrale de Milan.

L'assimilation à un mécanisme articulé permet de déterminer la disposition des résultantes successives, dont l'ensemble constitue la " Ligne de poussée ". Cela explicite les conditions d'équilibre aux divers niveaux et pour les diverses sollicitations : charges verticales permanentes et sollicitations latérales comme le vent.

Ces déterminations de la ligne de poussée ont été vérifiées par des recherches en photoélasticité et par des résultats concrets obtenus lors de stabilisations d'édifices " en mouvement " réalisées par l'auteur.

#### Solidarisations transversales indispensables aux édifices gothiques

Lorsque la résultante des sollicitations au-dessus d'une section tombe en dehors de la partie centrale de celle-ci, des efforts de traction se produisent du côté opposé et les joints ont tendance à s'ouvrir ; si l'élément est une colonne ou une culée, il tend aussi à se déformer latéralement ( tendance à "boucler " ).

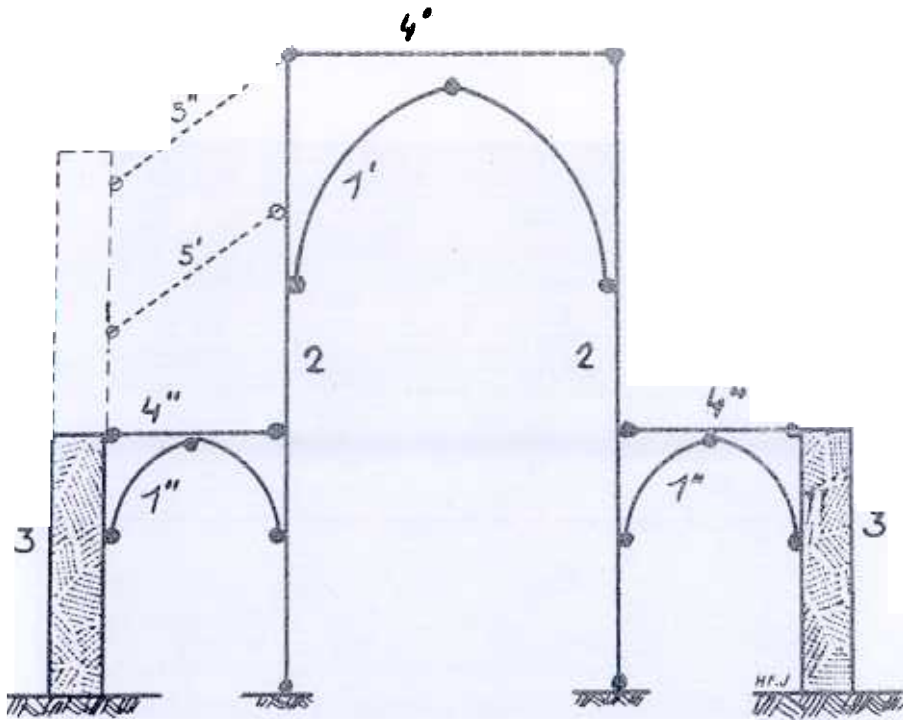
Le tracé de la ligne de poussée révèle des zones critiques, où la résultante se situe aisément vers les parties extérieures des sections : le seuil des fenêtres hautes, le niveau de l'arase du triforium, la base des piliers.

Déjà avec les charges permanentes verticales, certains édifices seraient instables au niveau du triforium si une solidarisation latérale avec la culée, ne venait s'opposer à une trop grande excentricité de la résultante. Cette excentricité est souvent produite par le contrefort supérieur important reposant directement sur le doubleau de la nef latérale, comme à l'abbatiale Saint-Jacques à Liège, ou à la basilique Saint-Hubert en Ardenne.

Ce sont surtout les sollicitations dues au vent qui décentrent la résultante et rendent les parties instables. Dans la face sous le vent, la poussée des voûtes supérieures se compose avec la dépression du vent. Cette face doit être solidarifiée avec la face du vent.

#### Dispositions constructives réalisant ces solidarisations

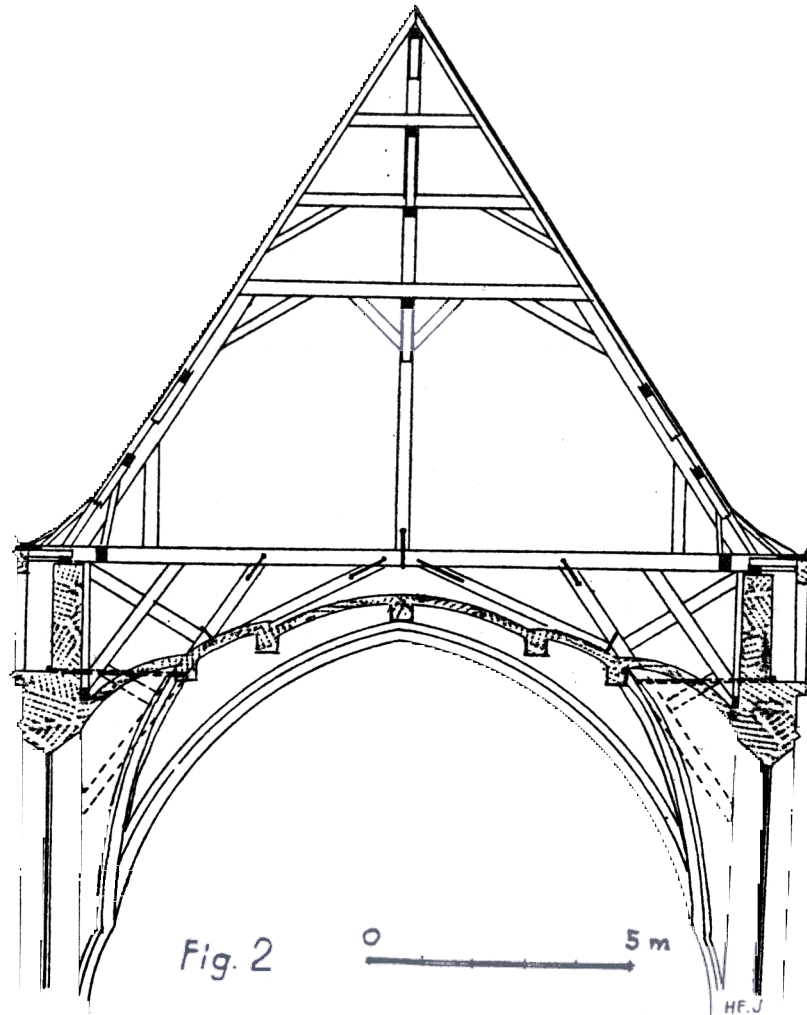
Les premiers maîtres d'oeuvre gothiques avaient ressenti cette nécessité : les clairs-étages étaient solidarifiés par des refends en pierre établis sur les doubleaux, comme à la cathédrale de Reims ou à la cathédrale Saint-Paul à Liège ( 13<sup>ème</sup> Siècle ). Les entrails de charpente sont établis plus importants que ne l'exige la charpente et l'entrait est muni de puissantes consoles ( fig. 2 ). La présence de ces entrails est éprouvée bien nécessaire lorsque l'on peut voir l'édifice sans voûte et sans vitraux exposer les maçonneries du clair-étage, à des hauteurs vertigineuses, à l'action du vent. L'importance des entrails peut aussi provenir de l'usage par les maîtres d'oeuvre d'établir un plancher de manoeuvre sur les entrails pour la construction de la toiture et des voûtes.



- 1 doubleau      3 contrefort      5 arc-boutant  
2 pilier          4 entrait

Fig. 2

L'exemple d'entrait avec consoles est celui de l'abbatiale Saint-Jacques à Liège. Les nefs ont été achevées en 1538 par maître Arnold Van Mulcken : la voûte est couverte par un filet de nervures ; la nef centrale n'est épaulée que par des contreforts, impuissants à éviter la déformation vers l'extérieur des murs goutterots. En coupe transversale, la nef centrale se contorsionne en forme d'"S" symétriques.



Bien que de proportions plutôt trapues, cette église est vulnérable aux sollicitations latérales : dans la face sous le vent, considérée indépendante, la résultante des efforts tomberait à plus d'un mètre du centre du pilier, au niveau de la base. Pour ramener cette résultante au bord du noyau central, il faudrait un effort de près de 8 tonnes : c'est l'effort que doit transmettre l'organe de solidarisation entre les deux faces, soit ici l'entrait pourvu de consoles.

Les édifices pourvus de batteries d'arcs-boutants superposés sont favorisés pour la reprise des efforts du vent : l'arc-boutant supérieur se révèle efficace à cette fin. Les interprétations sur le rôle précis des arcs-boutants sont diverses, mais l'analyse par la ligne de poussée montre l'intervention de l'arc-boutant supérieur très utile pour s'opposer à l'action du vent, et spécialement lorsque l'entrait ou le refend supérieur permet la butée par la batterie des arcs-boutants sous le vent. L'auteur l'a constaté en particulier pour la collégiale Sainte-Croix à Liège, église-halle du 14<sup>ème</sup> siècle, où les trois nefs d'égale hauteur doivent être épaulées par la culée profonde sous le vent : des essais en photoélasticité l'ont confirmé.

#### Solidarisations latérales à surveiller

Ces solidarisions préviennent des mouvements dangereux ou stabilisent aisément une situation déjà compromise.

Certains édifices n'ont pas de solidarisation latérale apparente, surtout dans les nefs latérales ; la solidarisation peut souvent alors s'exercer au travers de maçonneries transversales suffisamment chargées, sinon, un tirant devrait intervenir, comme à la collégiale Notre-Dame à Huy (15<sup>ème</sup> siècle).

Les entrails de charpente doivent être bien assurés dans les maçonneries qui les supportent ; les consoles assurent une prise suffisante dans la maçonnerie pour résister aux poussées horizontales.

Les parties inférieures des charpentes sont parfois altérées par les infiltrations des toitures : lors du remplacement des parties altérées, il faut veiller à ce que les assemblages des pièces bout à bout puissent transmettre des efforts de flexion et de compression. Sinon, l'affaissement des parties centrales de l'entrait est préjudiciable aussi bien à la stabilité générale de l'édifice qu'aux voûtes elles-mêmes. Par exemple, à la basilique Saint-Martin, à Liège, (16<sup>ème</sup> siècle), les parties inférieures des fermes ont remplacées avec assemblages se sont déformés, écrasant les voûtes et rendant encore plus précaire la stabilité des claire-étages, dépourvus de contreforts ou d'arcs-boutants.

#### Les charpentes structurales

Les réalisations gothiques qui nous sont parvenues, sont souvent très astucieuses dans leurs dispositions constructives. Les restaurateurs du 19<sup>ème</sup> siècle, bien que rationalistes à la manière de Viollet-le-Duc, n'ont pas toujours compris

les organes destinés à s'opposer aux sollicitations latérales, en particulier par les arcs-boutants supérieurs ou par les charpentes.

Les solidarisations latérales, en particulier par les charpentes, sont une nécessité de fait, explicitée à nouveau par des recherches contemporaines. Les charpentes sont un moyen déjà en place, qu'il suffit d'exploiter judicieusement. Ces charpentes deviendront " structurales " parce que participant à la structure générale , par des associations correspondantes avec les maçonneries qui les supportent.

Si les charpentes en bois doivent être remplacées par des fermes métalliques, il y aurait lieu de tenir compte spécialement des compressions éventuelles venant dans l'entrait par suite des solidarisations transversales.

## SUMMARY

### ROOFING AS AN INTEGRAL PART OF THE BUILDING'S STRUCTURE

Structural parts that are often forgotten refer to the roofing system which is fundamental to the equilibrium of the building.

The genesis of the gothic architectural system gives birth to the gothic ossature, composed of structural unities which are articulated together to form an organic system. The burden of the vault's weight is concentrated primarily on the transverse rib which acts as an arch-articulated at its base and at the crown. Gothic builders sensed the necessity of the structural arrangements which would achieve transversal "solidarizations" essential to gothic buildings.

Gothic buildings are often quite astute in their constructive arrangements. The nineteenth century restorers, although "rational" in the sense of Viollet-le-Duc, did not always understand those elements destined to oppose lateral pulls, in particular, the upper flying buttresses and the roofing.

The roofing becomes "structural" because it participates in the general structure through its corresponding associations with the masonry that supports it. In the case of wood roofings that are to be replaced by metal trusses, we must consider eventual compression stress on the tie-beam, caused by transversal "solidarizations".