

Histoire des techniques

J P Laurent

2008

Construction gothique

Mutations ROMAN - GOTHIQUE

- On distingue deux périodes:
- Age de formation reposant sur des emprunts notamment romain mais aussi asiatique :
l'époque romane
- Puis une période d'originalité totale de pleine maîtrise d'un développement constructif à l'image de la société :
la période Gothique

Mutations ROMAN - GOTHIQUE

- **Gothique**

- Liberté innovation expression
- L'édifice devient un être organisé ou chaque partie constitue un membre ayant sa forme réglée non pas sur un modèle traditionnel mais sur sa fonction
- A l'époque romane , la voûte d'arête était une coque liaisonnée ou les panneaux se tenaient et ne faisaient qu'un
- A l'époque Gothique la voûte se décompose en panneaux indépendants portés par un squelette de nervures
- Les poussées plus ou moins diffuses et peu canalisées se concentrent à l'époque gothique sur la nervure

Mutations ROMAN - GOTHIQUE

- **Gothique**

- La résistance spécifique est identifié
- Le mur plein de l'architecture romane est inutile
- Les percements se multiplient
- L'édifice est organisé comme le société
- Les forces sont guidées à travers des processus de stabilisation plus complexe et moins directe que pendant le roman (sollicitation va trouver des réaction multiple non localisées au droit de la sollicitation)
- Le pilier n'intervient plus dans la résistance en poussée il reprend que les seules charges verticales
- Les poussées sont dissociées des charges verticales st sont combattues séparément
- Le pilier termine sa décomposition . Il se décompose en autant de membre qu'il a de nervures Il se présente comme un ensemble de colonnettes se continuant en nervures (disparition du tailloir et du chapiteau)
- La construction passe aux mains des laïques

CONSTRUCTION GOTHIQUE- *Le contexte social*



CONSTRUCTION GOTHIQUE *Le contexte social*

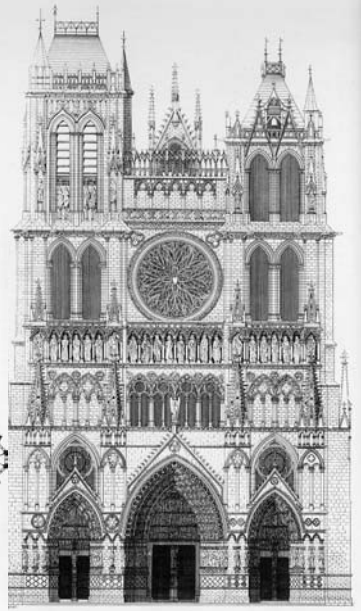
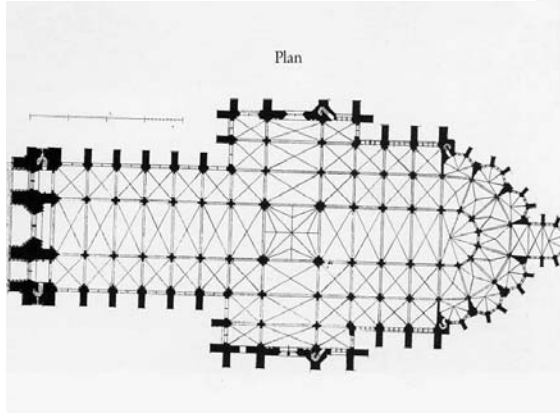
REORGANISATION DE LA VILLE AUTOUR DE LA CATHEDRALE

- La construction gothique est liée à un essor général de l'occident
- Elle résulte d'un rayonnement du domaine royal qui s'étend avec un raffermissement de l'autorité centrale sur les provinces annexées à la couronne.
- les premières villes touchées par la révolution gothique sont les villes rattachées directement au prefectorat royal
- Viollet le duc souligne le lien étroit entre la construction gothique et l'affranchissement des communes (Bourges , Amiens, Reims)
- Les premières cathédrales sont conçues comme de vastes salles sans division intérieure accessibles de toute part à la foule

CONSTRUCTION GOTHIQUE- Le contexte social

REORGANISATION DE LA VILLE AUTOUR DE LA CATHEDRALE

Les premières cathédrales sont conçues comme de vastes salles sans division intérieure accessibles de toute part à la foule



CONSTRUCTION GOTHIQUE- Le contexte social

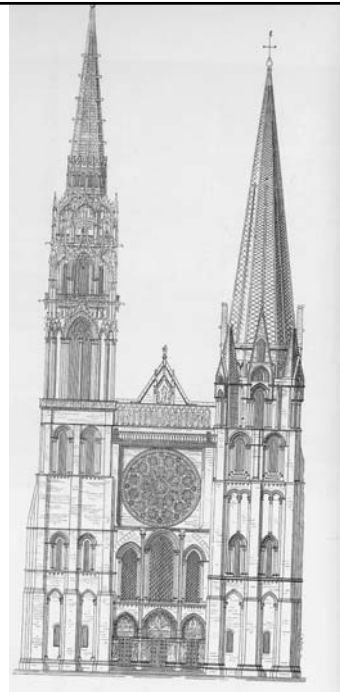
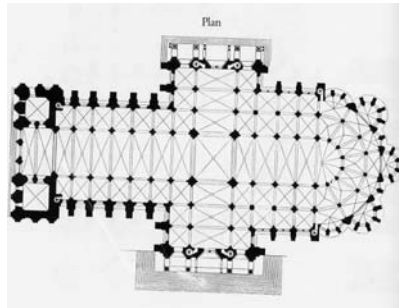
LA CATHEDRALE SE REFERME

- Pour les villes franches , la cathédrale n'est pas seulement le lieu de culte mais aussi le lieu d'assemblées publiques , de réunions municipales , fêtes civiles, représentation de mystères :
C'est le centre unique de l'existence communale . C'est le cœur de la cité.
- C'est à la fois le lieu de réjouissances profanes et de l'expression de la foi
- Les populations s'accaparent de fait la cathédrale , ce qui explique l'enthousiasme qu'elles mettent à la construire.
- De plus se crée une émulation entre les villes qui se traduit par des édifices toujours plus complexes et plus hauts . L'innovation technologique est la représentation d'une population en plein essor (qui se sert de la cathédrale pour afficher son image)
- Mais à la fin du 13 eme siècle , les manifestations profanes devenaient démesurées. Les églises se clôturent peu à peu pour restituer son espace au culte

CONSTRUCTION GOTHIQUE- Le contexte social

REORGANISATION DE LA VILLE AUTOUR DE LA CATHEDRALE

Plan de



CONSTRUCTION GOTHIQUE- Le contexte social

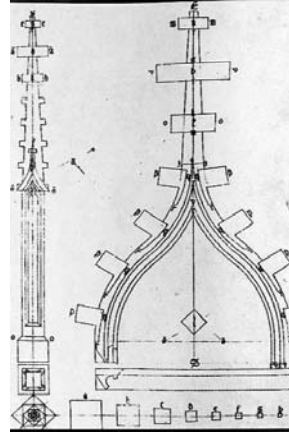
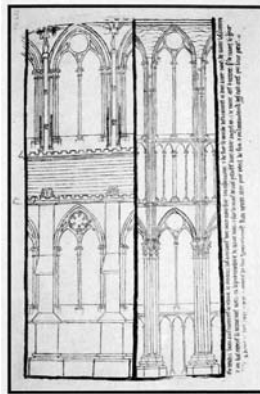
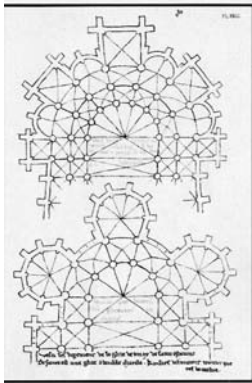
L'ARCHITECTE DES CATHEDRALES

- Les architectes proviennent de la population civile dont il traduisaient les aspirations.
Alors que l'époque romane n'avait d'autres artistes que les moines des abbayes.
A l'époque gothique les concepteurs et les constructeurs passent du domaine religieux au domaine laïque
- La principale formation de ces architectes étaient le voyage. Ils allaient de chantier en chantiers. (cf les croquis de voyage de Villard de Honnecourt)
- C'est Louis XIV qui fonda l'Académie d'architecture
- Avant l'architecte est pris dans les corps de métier et en particulier les tailleurs de pierre (ce qui reste dans la culture des compagnons aujourd'hui)
Des cette époque ils sont représentés par l'équerre et le compas. L'architecte manie d'abord l'art du trait.
L'architecte gothique connaît et vit pleinement la vie du chantier.

CONSTRUCTION GOTHIQUE- Le contexte social

L'ARCHITECTE DES CATHEDRALES

- Premières représentations



CONSTRUCTION GOTHIQUE- Le contexte social

L'ARCHITECTE DES CATHEDRALES

- Les choix des projets se faisaient de cette époque (en particulier 14 et 15 eme siècle) par l'épreuve des **concours**
- Les architectes de renom sont appelés partout en Europe .
- Ce sont principalement des architectes français qui construisirent les églises de l'Europe ou qui sont à l'origine des grandes écoles anglaises et allemande.
- Cet ascendant de la France sera contrebalancé à la renaissance par l'école Italienne



CONSTRUCTION GOTHIQUE- *Le contexte social*

LES OUVRIERS DES CATHEDRALES

- L'éducation de l'ouvrier est comme pour l'architecte l'atelier et le chantier .En particulier le compagnonnage reposant sur les maîtres , le voyage , le tour de France .
- Les ouvriers sont comme des solistes qui improvisent sur un thème donné par l'architecte . Le tailleur de pierre en particulier laisse sa trace sur l'édifice , il possède sa frise et ses motifs propres . L'ouvrier n'est pas passif , on attend de lui des initiatives; Il y a de plus une grande émulation entre les ouvriers



CONSTRUCTION GOTHIQUE- *Le contexte social*

LES OUVRIERS DE CATHEDRALES et La Franc Maçonnerie

- Les chantiers sont assez rapides et comparables aux chantiers actuels en temps . Cependant ils sont souvent interrompus .
- Notre dame débute ses fondations en 1196 la toiture s'achève en 1196
- La contribution au chantier de la cathédrale était de 2 ordres :
 - En argent
 - En travail volontaire
- La contribution principale en argent venait des communes.
Venaient ensuite les dons de bienfaiteurs.
L'entretien du bâtiment était à la charges des habitants.



CONSTRUCTION GOTHIQUE- Le contexte social

LES OUVRIERS DE CATHEDRALES École
française et école anglaise



ARCHITECTURE GOTHIQUE

Nervures et arc boutant

- Le progrès de l'époque gothique sera de résoudre le double problème de l'appareil de voûte à pénétration et leur équilibre
- Ce sont les voûtes nervurées qui facilitera l'organisation de l'appareil
- Ce sera l'arc boutant qui résoudra le problème de l'équilibre posé par les plus grandes hauteur des édifices et la diminution de matière pour le construire



ARCHITECTURE GOTHIQUE

Vocabulaire

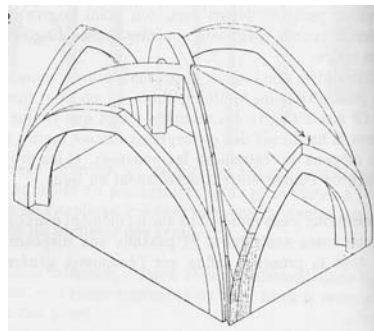
- CULEE: massif de maçonnerie destiné à contenir la poussée d'un arc ou d'une voûte
- CONTREFORT :
 - Pilier ou mur servant d'appui à un autre mur supportant une charge
- CONTREBUTTEMENT:
 - Soutien par un contrefort ou un pilier
- PINACLE:
 - Pyramide ajourée et ornée de fleurs ou de feuilles servant de couronnement à un contrefort



ARCHITECTURE GOTHIQUE

La voute d'arête

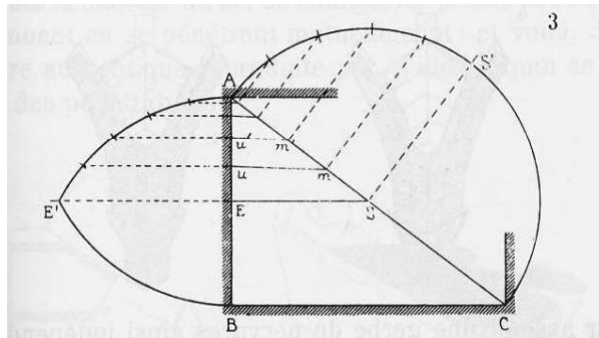
- Panneau indépendant et supporté par les nervures
- Nervures beaucoup plus raide que la voute-tassent beaucoup moins que les panneaux
- Concentre l'effort principal que l'on peut composer et diriger
- Grace aux nervures l'effort dans les voute se localise
- Par une orientation convenable des nervure l'architecte dirige les efforts vers les points de résistance
- Limitation de poids par rapport à la voute d'arete en voussoir d'arétier
- La voute est dans l'ensemble plus souple que la voute d'arete sur aretiers



ARCHITECTURE GOTHIQUE

Tracé

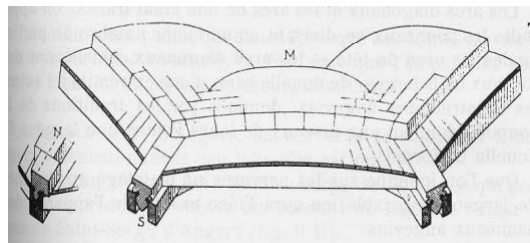
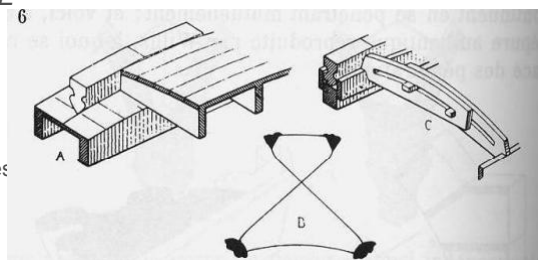
- Arc de tête : doubleaux et formeret
- L'arc diagonal est presque toujours un plein cintre
- Les arcs de tête sont tracés en arc brisé
- Les panneaux de remplissage sont tracés en fuseaux d'égale longueur
- On fractionne AS' et on projette sur AE'



ARCHITECTURE GOTHIQUE

Mode de cintrage

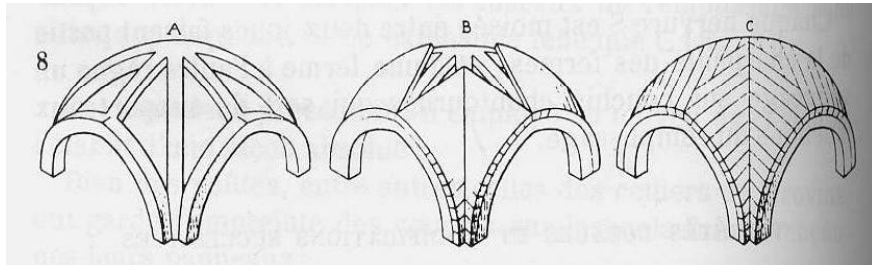
- A première vue les voûte d'arête gothique semble très compliquée à réaliser
- Pour les voûte de faible longueur on réalise une ferme de cintre sous chaque nervure sur lequel on positionne une cerce extensible fig C:
- Variante
- Chaque nervure est moisée entre deux joues faisant partie de la charpente
- D'une ferme à l'autre règne une ferme sur couchis qui sert de support aux moellons de remplissage



ARCHITECTURE GOTHIQUE

vaiente

- VOUTE angevine
- On redivise les arc diagonaux de manière à retrouver des secteurs identiques
- Les état d'avancement peuvent se réaliser sans coffrage suivant les dimensions



ARCHITECTURE GOTHIQUE

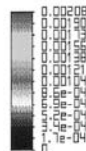
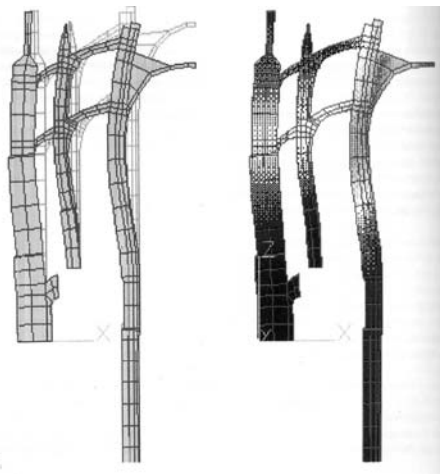
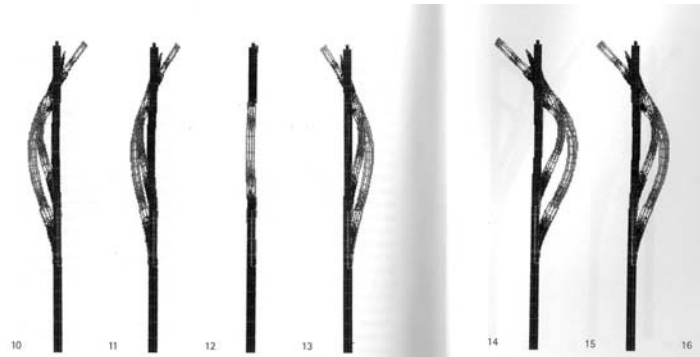


figure 8, un exemple sous poids propre :
charge : déformée et amplitude du
vecteur de déplacement

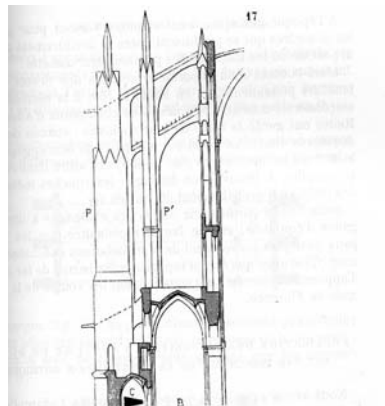
9



ARCHITECTURE GOTHIQUE



ARCHITECTURE GOTHIQUE

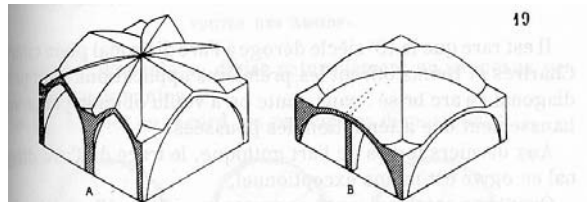
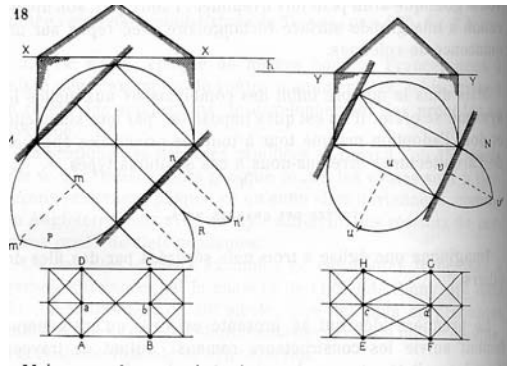


ARCHITECTURE GOTHIQUE

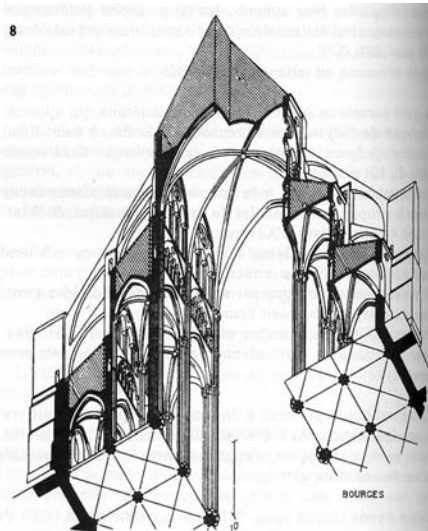
La voute sur plan carré divisé en six panneaux

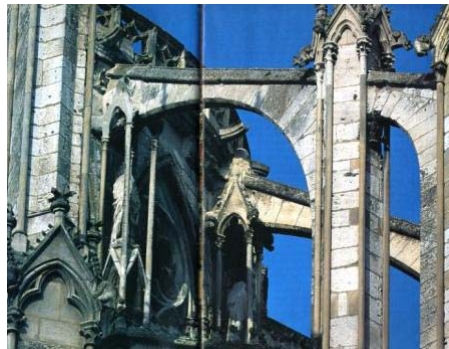
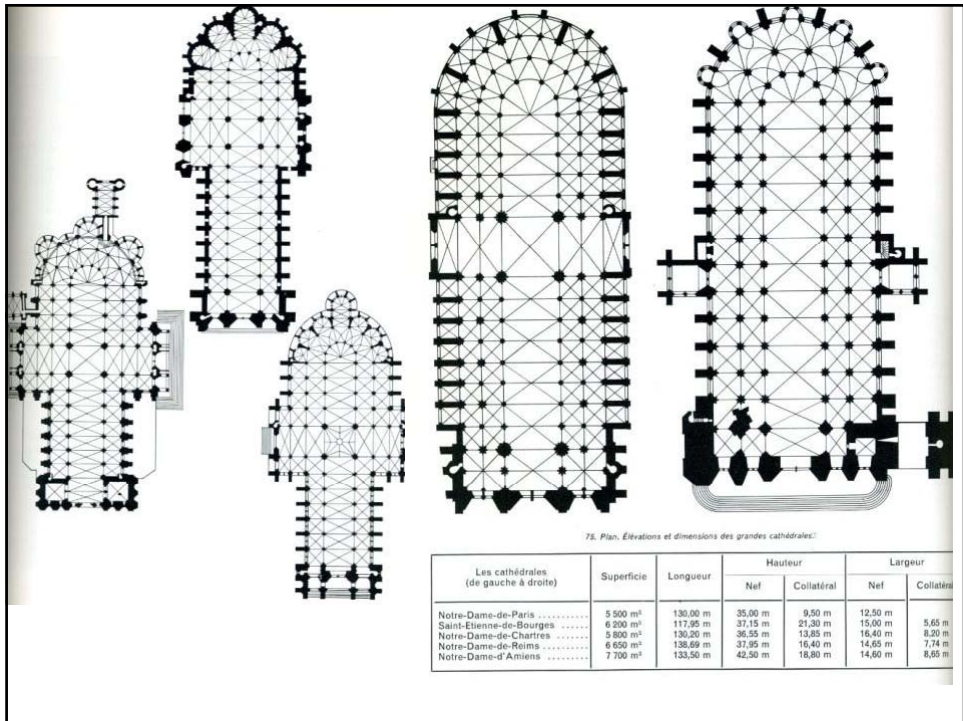
La voute de la grande nef repose sur 4 piles maitresse ABCD entre lesquelles s'élèvent des piles intermédiaires ab

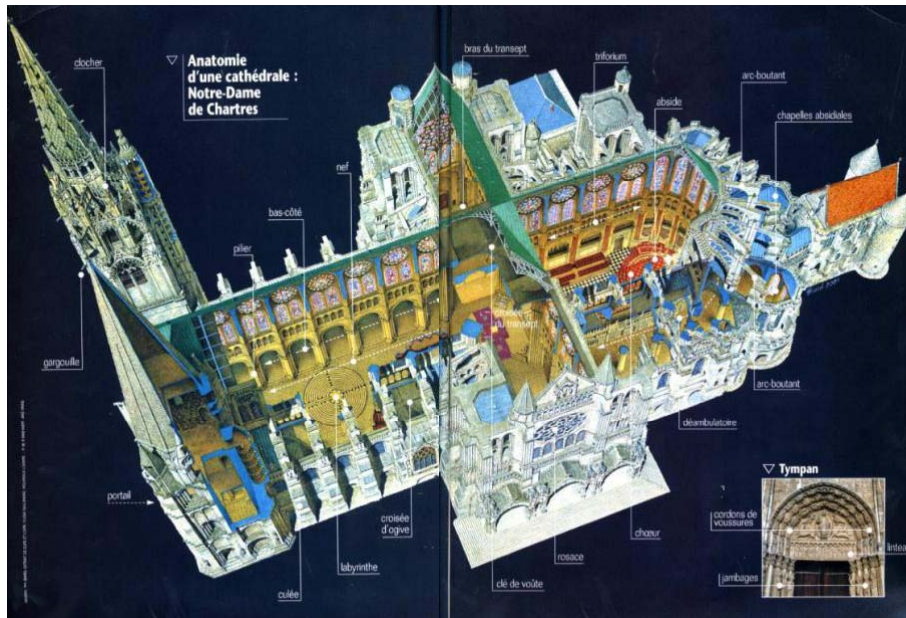
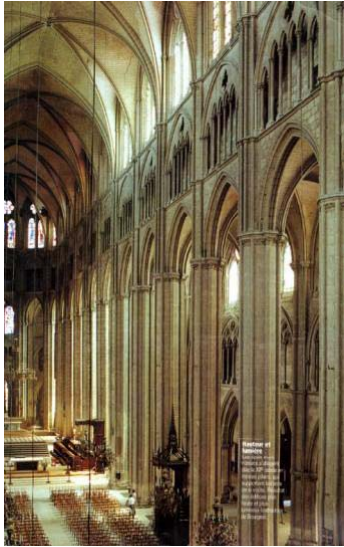
Afin de charger ab les architecte élève une nervure qui reportera une partie des efforts et allègera d'autant les piles maitresses



ARCHITECTURE GOTHIQUE

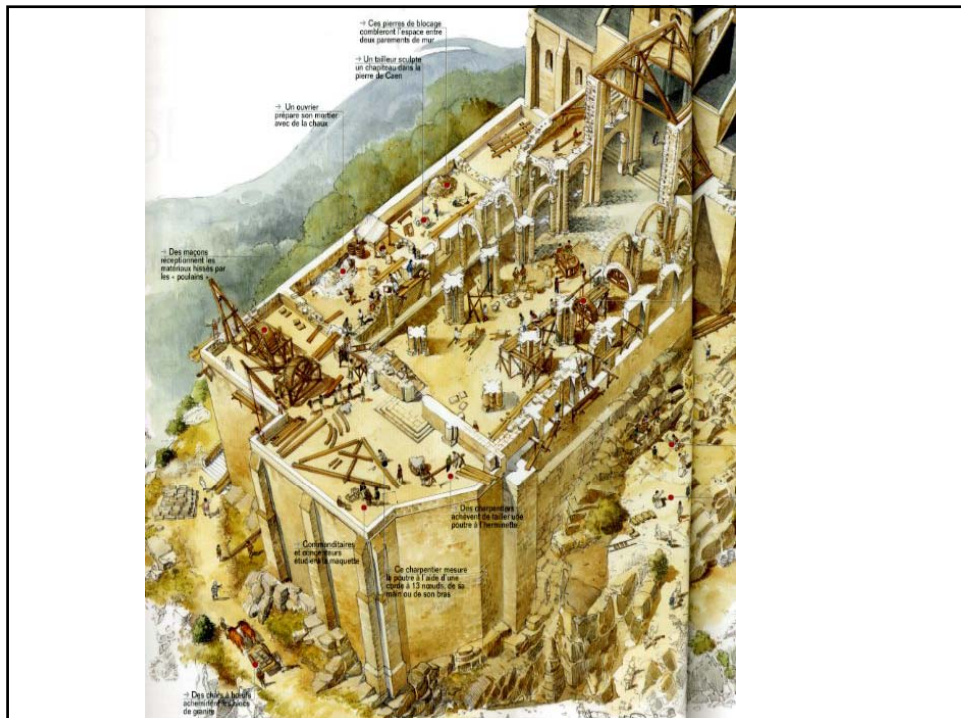
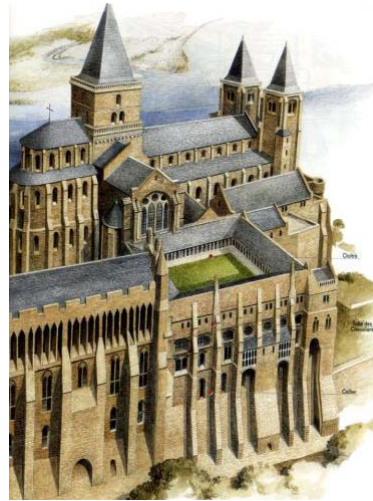


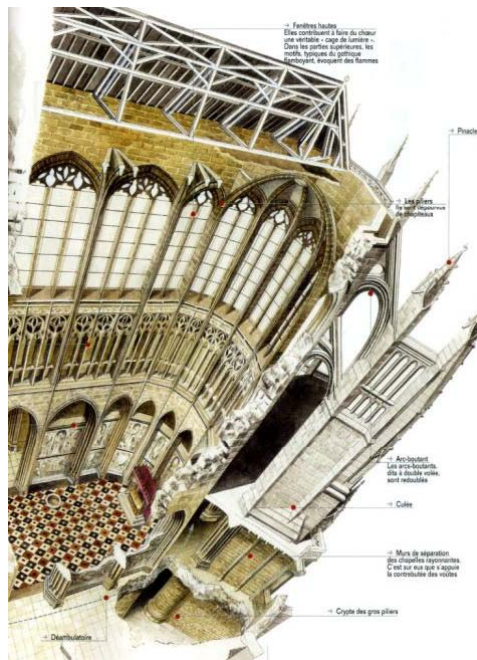




L'abbaye romane

XI^e-XII^e siècle





CONSTRUCTION
GOTHIQUE-
outils et matériaux



CONSTRUCTION GOTHIQUE-
outils et matériaux

Homogénéité et souplesse

- Les matériaux sont ceux de l'époque romane : moellons de petits modules
- Les carrières les plus proches (difficultés de communication)
- Remédier à l'augmentation du poids liée aux édifices plus haut
- Conception de structure globale
On passe d'une logique de résistance par la masse à une logique de résistance par la forme (cf l'oeuf)
L'effort de poussée est décomposé entre un effort horizontal et un effort vertical
- volontairement élastique, contrairement à l'époque romaine et romane, c'est la conception de la structure dans son ensemble qui va répondre aux sollicitations. L'édifice gothique est un squelette homogène et élastique

CONSTRUCTION GOTHIQUE- outils et matériaux

conception de structure Homogénéité et souplesse répartition

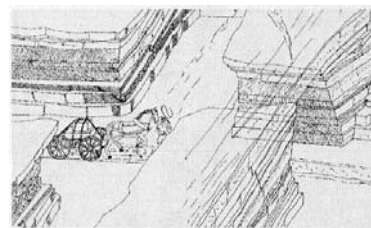
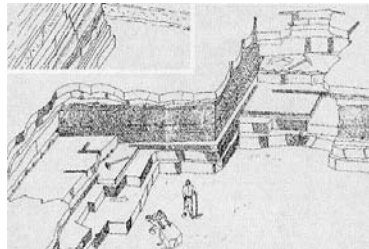
- Les plus grandes contraintes ramenées sur le sol, les tassements attendus, et la nouvelle solidité attendue de l'ouvrage ont conduit les constructeurs gothiques à diffuser les contraintes dans la totalité du squelette. L'édifice n'attend plus sa stabilité d'une masse de matériau empilé, mais de l'organisation de la structure élastique
- Parer à l'insuffisance des matériaux par une bonne répartition des charges, laisser aux ouvrages une certaine flexibilité : sont les deux idées maîtresses qui guident les constructeurs gothiques
- L'ouvrage gothique est un être vivant doué d'un pouvoir d'adaptation aux évolutions du contexte



CONSTRUCTION GOTHIQUE- Techniques de construction

FONDACTIONS APPROXIMATIVES

- Il est peu d'édifice construit sur pilotis (pieux)
- Les fondations sont réalisées par des massifs de blocage en pierre dont l'empâtement devait permettre la répartition des charges
- Pour atténuer les effets de glissement ces fondations étaient reliées entre elles (type semelles filantes surtout pour les colonnes)
- Souvent une liaison transversale permettait de réaliser un grill et bloquait les mouvements dans les deux directions



CONSTRUCTION GOTHIQUE- Techniques de construction

FONDATIONS APPROXIMATIVES

- Mais les cathédrales étaient souvent réalisées grâce aux fonds de donateurs qui préféraient voir leur argent employé en superstructure qu'en infrastructure
- ...
- C'est pourquoi bon nombre de cathédrales possèdent des fondations trop faibles (complexité de la maîtrise des efforts sur le sol)
- On dénombre un bon nombre de cathédrales (Meaux, Troyes ...) qui se sont déformées mais qui ont néanmoins franchi les siècles grâce à leur structure souple
- Ce qui pose le problème des réhabilitations ou restaurations :
Chaque période projetant sur un édifice sa conception des structures (cf. l'analyse)



CONSTRUCTION GOTHIQUE- Techniques de construction

MAÇONNERIES GOTHIQUES

Pierre de taille- Joints

- L'usage de poser des pierres entièrement taillées (sans ravalement) introduit à l'époque romane est observé de façon encore plus stricte à l'époque gothique.
- Les plans de lits sont dressés avec encore plus de soin, c'est à ce prix seulement que l'on pouvait utiliser les murs pour transmettre de fortes charges.
- Les joints sont taillés avec autant de soin que les faces vues.





aille

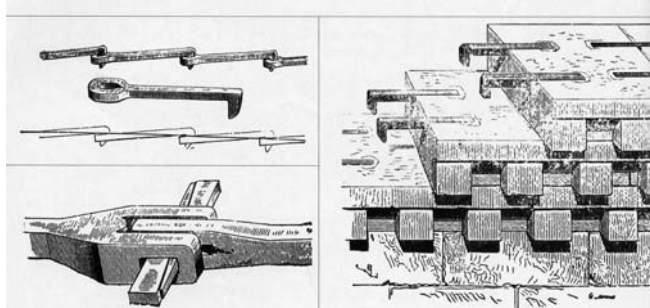


CONSTRUCTION GOTHIQUE- Techniques de construction

MACONNERIES GOTHIQUES

Pierre de taille- Joints et crampons

- De plus l'épaisseur de mortier augmente permettant de renforcer à la fois la souplesse de répartition et le transfert des charges (lits pouvant aller jusqu'à 1,5cm)
- Apparaît les attaches métalliques mais avec un scellement en plomb permettant le jeu nécessaire ;
- Certain niveau assise , toutes les pierres sont reliées entre elles par des attaches métalliques formant ceinture



CONSTRUCTION GOTHIQUE- - Techniques de construction

MACONNERIES GOTHIQUES

Montage de l'appareillage

- Les grues sont semblables aux grues antiques (croquis de Villard de honnecourt)
- Les petites tailles de modules permettait de minimiser les échafaudages Qui laissaient leur trace (trou de boulin de Notre Dame)

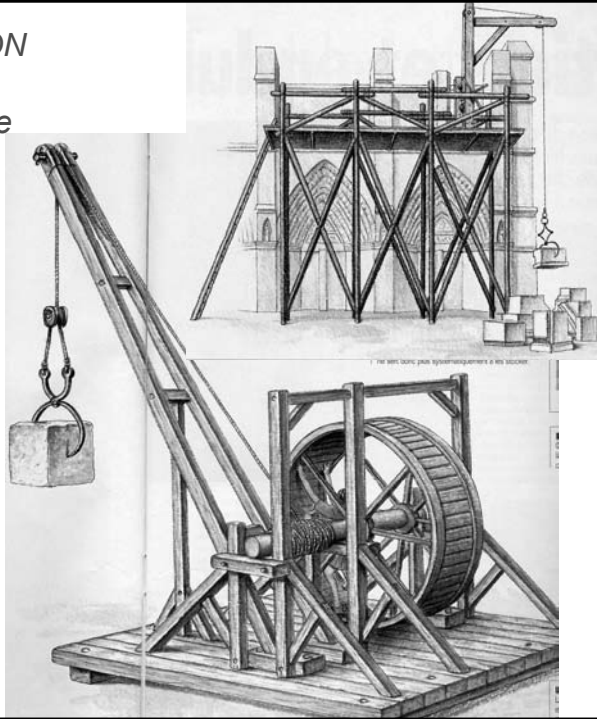


Détail de L'appareil

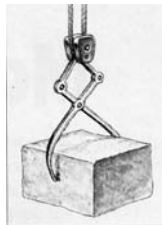
- Les gros chaînage d'angle en gros module de l'époque romane tendent à disparaître puisque créant des ruptures dans l'homogénéité de l'édifice



CONSTRUCTION GOTHIQUE- Techniques de construction



CONSTRUCTION ROMANE- Techniques de construction



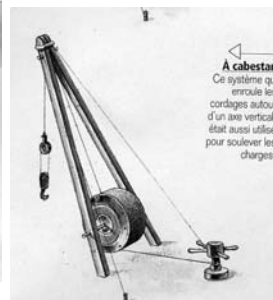
*Écureuil encore présent dans
les combles de Beauvais*



**Chèvre
à manivelle**
Connue depuis l'An-
tiquité, la chèvre est
« l'outil de tous les
charpentiers ». Certaines étaient
actionnées par une
double manivelle.



À roue
Un troisième type
de chèvre, celle à
roue d'écureuil, se
transformera en
grue, caractérisée
par une flèche
horizontale.



À cabestan
Ce système qui
enroule les
cordages autour
d'un axe vertical,
était aussi utilisé
pour soulever les
charges.

CONSTRUCTION ROMANE- Techniques de construction

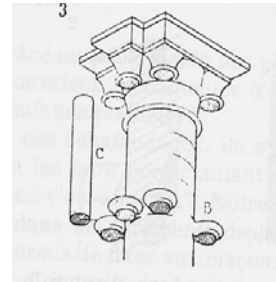
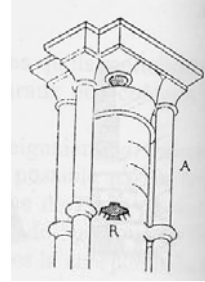
MACONNERIES GOTHIQUES

La compensation des déformations

- Le pilier raidi par de colonnettes . Le pilier est composé de plusieurs pierres jointées alors que la colonnette est d'un seul tenant . De ce fait le pilier a tendance à plus tasser que les colonnettes et suivant les charges se décharge sur les colonnettes .

On retrouve souvent cette organisation structurale à plusieurs modes de transfert de charges en fonction de l'importance de cette charge. (cf explication de la cathédrale de BEAUVAIS)

- Néanmoins dans la mise en place du pilier et sa mise en charge et son adaptation première on attend que la partie la plus importante des tassement soit réalisée pour poser les colonnettes



CONSTRUCTION ROMANE- Techniques de construction

EXEMPLE BEAUVAIS-

La compensation des déformations

- Explication de JI Taupin sur la cathédrale de Beauvais la plus haute de France : chœur :48m au dessous de la clef de voûte- Hauteur
- Manifeste démonstration
- Grande maîtrise de la géométrie
- Le rôle du fer est déterminant
- Situation vent
- Commencée en 1225 le bâtiment voit s'effondrer une partie du chœur en 1284 . Après reconstruction et interruption les travaux reprennent en 1499 . En 1569 la flèche coiffant la lanterne culmine à 153m de haut
- puis en 1573 la tour et ses flèches s'effondrent
- Origine de l'effondrement : un tassement différentiel des piles érigées à des profondeurs différents (10 et 20 m)
- Bâtiment à stabilité statique mais pas dynamique
- Le vent entraîne des mise en résonance des piles qui atteignent leur fréquence propre (en relation avec les rafales de vents)

CONSTRUCTION ROMANE- Techniques de construction

EXEMPLE BEAUVAIS-

La compensation des déformations

- EN 1960 une campagne de restauration enlève les tirants métalliques qui reliaient les différentes culées qui ceinturent l'ensemble du chœur
- La présence de ces tirants est alors interprétée comme un péché contre la logique gothique qui voulait qu'une cathédrale soit entièrement réalisée en pierre .
- Les architectes s'appuyaient sur le fait que ces tirants étaient détendus. Le raisonnement était le suivant : puisqu'ils sont détendus , ils ne servent à rien , .

CONSTRUCTION ROMANE- Techniques de construction

EXEMPLE BEAUVAIS-

La compensation des déformations

- . Quelques années plus tard alors que la moitié des tirants a été retiré, des coups de vents en rafales font osciller de plusieurs centimètres les grands pylônes privés des tirants
- L'analyse est réalisée en 1993 par le laboratoire mécanique de Grenoble
- Les écoulements d'air entre les culées créent des turbulences qui entre en résonance avec l'oscillation de la culée et en accentue dangereusement le mouvement .

Les tirants distendus formaient en fait un ingénieux système d'amortisseur conçu certainement au 13^{ème} siècle en réponse à l'écroulement du chœur

- Aujourd'hui une ensemble de tirants- boutons a été positionné en périphérie. Ils bloquent l'ensemble du chœur dans une structure rigide
- JL Taupin est persuadé que c'est une erreur . Les cathédrale ne cesse de bouger et de se modifier . Charpentes mur et sol se remodelent avec le temps

