

THIERRY BAUTIER

**Contrebuter la poussée des voûtes / l'architecture romane
/ la conception hétérogène**

Publications de l'Institut de recherche mathématiques de Rennes, 1985, fascicule 2
« Science, histoire et société », , p. 1-21

http://www.numdam.org/item?id=PSMIR_1985__2_1_0

© Département de mathématiques et informatique, université de Rennes,
1985, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la série « Publications mathématiques et informatiques de Rennes » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

CONTREBUTER LA POUSSEE DES VOUTES / L'ARCHITECTURE

ROMANE / LA CONCEPTION HETEROGENE (*)

CONTREBUTER LA POUSSEE DES VOUTES

1 - La construction d'un voûtement en pierres tient du paradoxe : il s'agit en effet, ni plus ni moins, que de "faire tenir des tonnes de pierres au-dessus des foules qui prient" !

Il faut empêcher un effondrement dans la partie médiane et un déversement vers l'extérieur sur le pourtour. Pour répondre à ce double risque, les architectes romans et gothiques eurent recours à un appareillage en pierres taillées de forme trapézoïdale et à des éléments spécifiques de contrebutement.

Plus précisément, c'est la différence entre l'extrados et l'intrados de la pierre qui répond le mieux au risque d'effondrement Et cela, par trois effets conjugués :

La pierre ne peut tomber par simple *effet de charge*, car son extrados est de dimension plus grande que son intrados : "les pierres sont enfoncées comme des coins entre les pierres voisines".

Ces pierres vont donc avoir tendance à s'écartier de leur position initiale, sous l'effet de charge. Ceci produit un *effet de poussée*. La poussée est prise en charge par les pierres avoisinantes et "de proche en proche, les poussées latérales s'additionnent".

Au delà d'une certaine ligne critique qui est située en retrait de l'aplomb (les reins...) de la voûte, celle-ci connaît un risque de déversement vers l'extérieur. En effet, le déversement est évité au-dessus de cette ligne critique par l'*effet de butée* ou *effet de contre-poussée* des pierres avoisinantes. Dans la région critique au contraire, l'effet de butée ne peut plus être réalisé efficacement par la voûte seule, il faut la renforcer et utiliser ces éléments de contre-poussée que sont les contreforts, les arcs-boutants...

Bien entendu, si rien ne venait s'opposer à cette tendance au déversement, la voûte s'effondrerait. Il n'y a donc pas lieu de distinguer trop finement entre *risque d'effondrement* et *risque de déversement* vers l'extérieur. C'est la seule masse de la voûte, qui en différents points manifeste ses effets. On peut dire pour résumer que la ligne critique démarque sur la voûte le risque d'effondrement et le risque de déversement.

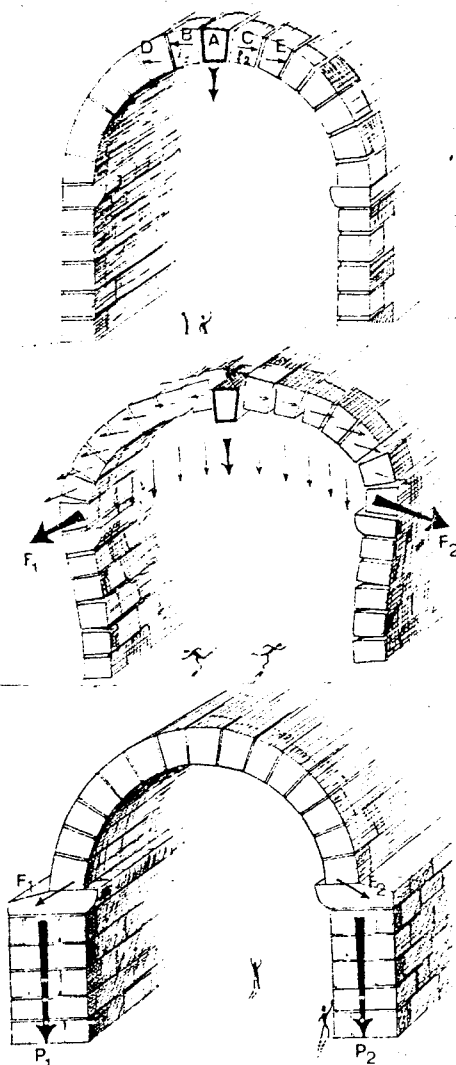


fig 1 : une analyse moderne, en termes de forces, de la statique de la voûte romane en berceau.

(*) Ceci est le chapitre 2 d'une publication qui va se poursuivre dans les prochains cahiers du séminaire. Le titre général de ce travail est "GÉOMÉTRISÉS, ou l'HOMOGÉNÉISATION de l'ESPACE au sens des PLEINS et des VIDES".

On peut distinguer trois types d'*effets de masse* : l'*effet de charge*, l'*effet de poussée* et l'*effet de butée* ou *effet de contrepoussée* (*).

Les effets de poussée peuvent être mis en relation avec la forme de la voûte. Ainsi, la poussée est-elle négligeable pour les coupôles, puis, par ordre de poussée croissant, viennent les voûtes sur croisées d'ogives, les voûtes d'arêtes et enfin les berceaux.

Pour s'en convaincre, il suffit d'imaginer une coupole découpée en "tranches régulières" dont la largeur est nulle à la clé de voûte et va croissant ensuite. L'effet de poussée tout comme les effets de charge et de contrepoussée augmentent simultanément sur toute l'élévation, ce qui réalise un équilibre optimal.

Le berceau découpé de même, donne des tranches de largeur constante : les effets de charge et de poussée sont importants dès la ligne de fait. La voûte doit donc être contrebutée, sur toute sa longueur.

Les deux berceaux orthogonaux que constituent la voûte d'arêtes se contrebutent efficacement l'un l'autre. La résultante de ces poussées est donc canalisée le long de l'arête d'intersection, jusqu'aux piliers.

Enfin, les voûtes sur croisées d'ogives permettent "de réduire les poussées des voûtes de 50 %" par rapport aux voûtes d'arêtes couvrant une même surface. Ce prodige est obtenu par la forme ogivale de la voûte, mais surtout par l'important allègement des surfaces de remplissage que permet le recours aux ogives (cf chap IV).

En contrepartie de sa qualité d'autosustentation, la coupole doit être supportée sur tout son pourtour. De même, les *effets de masse* d'un berceau longitudinal se réalisent presque uniformément sur tout le mur porteur, seuls les doubleaux permettent de rompre partiellement cette monotonie.

La localisation des *effets de masse* est acquise avec les voûtes sur croisées d'ogives, mais uniquement de manière approchée avec les voûtes d'arêtes (cf chap. IV et ce chapitre).

Une forme de voûte étant choisie, par exemple la voûte sur croisée d'ogives, l'obliquité de la poussée résultante dépend principalement de la courbure de la voûte.

Si la voûte est bombée (c'est le cas du Gothique de l'Ouest de la France, cf chap. III), l'effet de poussée devient vite presque vertical. Il est donc pris en charge principalement par le mur porteur. Comme la poussée doit être effectivement conduite jusqu'aux supports de la voûte pour y être équilibrée, on voit qu'il est nécessaire qu'une telle voûte possède une cohésion, c'est-à-dire ici une épaisseur, suffisante pour réaliser l'effet de contrepoussée adéquate.

Au contraire bien sûr de la voûte plate (comme dans le Gothique de l'Île de France, cf chap IV) qui nécessite le recours à des éléments spécifiques de contrebutement : les arcs-boutants.

(*) Une analyse détaillée de la localisation de ces effets de masse dans l'architecture romane sera faite au point 7.

Une voûte de forte courbure a donc besoin d'être massive pour assurer la fonction de contrebutement. Au contraire, la voûte plate peut s'accomoder d'être allégée grandement, car aucun effet de décalottement ne peut se produire si les éléments de butée sont bien placés.

On a voulu montrer ici à quel point le problème du contrebutement de la poussée des voûtes était au coeur de la compréhension des systèmes architectoniques romans et gothiques, et justifier ainsi sa mise en avant dans ce chapitre.

2 - La plus célèbre des solutions au *problème du contrebutement* de la poussée des voûtes est certainement l'arc-boutant gothique.

Apparemment, il résoud de manière éclatante la question : l'effet de poussée est localisé sur les points d'attache de l'arc-boutant et est transmis par sa *cohésion*, propre au contrefort extérieur. Dans certains cas, le recours à des pinacles a permis de réduire la volée de l'arc-boutant en augmentant la *résistance* du pilier extérieur au déversement consécutif à une poussée trop importante.

Malgré l'apparente imparabilité de cette solution technique au *problème constructif* du contre-butement des voûtes, il faut savoir que l'arc boutant connut une genèse difficile, et essayer d'en rendre compte.

Les arcs-boutants sont apparus relativement tard dans l'Histoire de l'Architecture monumentale, vers le milieu du XII^e siècle. Ils "paraissent nécessaires (et non placés après coup) dès la construction pour les édifices du premier art gothique qui ont adapté, avant CHARTRES, une élévation à trois niveaux dont un étage de simples fausses tribunes : cathédrale de SENS, St MARTIN-d'ETAMPES, chœur de St LEU-d'ESSERENT".

Ils sont étonnamment rejetés, à l'époque même de leur grande diffusion, par toute une école de constructeurs qui sera désignée ici par le terme générique d'Architecture Gothique de l'Ouest de la France. Les raisons de ce rejet restent obscures mais deux points méritent d'être relevés.

On peut admettre comme étant un facteur décisif de ce rejet, le fait que ces constructeurs aient réussi à répondre, par des procédés techniques bien différents (cf chap. III) au problème du contre-butement des voûtes.

Cela ne fait que repousser plus loin la question précédente : qu'est-ce que les gothiques de l'Ouest de la France pouvaient reprocher à l'emploi des arcs-boutants, qui les conduisit à élaborer une technique architecturale relativement originale ?

Des éléments de réponse à cette question se trouvent dans l'ouvrage de J. GUADET. L'auteur nous livre une remarque très perspicace, car elle va à contre-courant de tout l'émerveillement moderne que suscitent les arcs-boutants : les arcs-boutants seraient le prix à payer pour jouir d'une verticalité et d'une luminosité encore jamais atteinte, ni même pensée. Et le prix à payer, ce serait l'*extraversion de l'équilibre* qu'exige le recours à la solution des arcs-boutants.

"Si une pierre vient à manquer, c'est un effondrement. L'existence du bâtiment est subordonnée à la durée des arcs-boutants, éléments fragiles et exposés à toutes les causes de destruction qui résultent des actions extérieures et atmosphériques ; c'est un corps dont les organes vitaux sont à l'extérieur ; ce qui est le plus indispensable à la conservation est le plus exposé".

Cette remarque doit être nuancée par l'observation qu'aucun cas d'arc-boutant détruit n'a pu permettre de conforter cette hypothèse hardie. Les arcs-boutants, parce qu'en pierre dure, résistent bien aux agressions du temps.

L'extraversion de l'équilibre, c'est-à-dire le report des problèmes constructifs hors des murs d'enceinte de l'édifice est la caractéristique essentielle de l'arc-boutant. Elle permet en partie de rendre compte de son apparition tardive.

Cette extraversion peut être facilement observée en abordant par exemple, NOTRE DAME de PARIS, du côté du chevet. Un grand mur blanc et des constructions immobilières masquent pendant un long moment la signification de ces fins éléments de pierre qui se détachent dans le ciel, telles les pattes d'une gigantesque sauterelle. Leurs apparitions créent un effet d'irréalité assez saisissant...

Les arcs-boutants ne peuvent donc prétendre à une valeur universelle. Ils sont la solution optimale et la conséquence logique du système de contraintes spécifiques à l'Architecture Gothique de l'Île de France (cf. chap IV).



Fig 2 : Notre-Dame de PARIS

3 - L'ARCHITECTURE ROMANE

Il est vraiment remarquable que toutes les techniques romanes de voûtement (berceaux et doubleaux, voûtes d'arêtes, coupoles) se caractérisent par le recours nécessaire à de lourdes *surfaces de remplissage*, mais aussi par l'important *effet de charge* qu'elles réalisent sur le pourtour de leur *support* (cf. chap IV) Seule exception, les voûtes d'arêtes permettent, en partie, la localisation des effets de masse aux points d'appui isolés.

E. GOMBRICH justifie la présence de ces lourds massifs par la nécessité de répondre au problème constructif du contrebutement. Ainsi :

"Ce n'est pas une mince affaire que de couvrir d'une voûte toute la largeur de la grande nef. La solution la plus simple semblait être de lancer la voûte comme on lance un pont sur une rivière. On construisit des piliers formidables de chaque côté de la nef pour supporter les arcs de ces ponts. Il devint vite évident qu'une telle voûte pour ne pas menacer de s'écrouler devait être solidement assemblée, et qu'il y fallait un grand poids de terre. Pour supporter ce poids énorme, murs et piliers devinrent encore plus forts et plus massifs. Les voûtes en "berceau" nécessitèrent d'immenses entassements de pierre "

Cette importance du contre-butement dans l'élaboration des techniques architecturales, se poursuivit par la suite et de nouvelles solutions furent conçues et systématisées lors du "second âge roman".

R. BECHMANN en fournit une rapide description.

"Les Romains avaient parfaitement senti la nécessité de contrebuter les voûtes des nefs principales le plus haut possible, et l'aboutissement logique de leur démarche a été la solution clunisienne des nefs latérales en demi-berceaux s'opposant à la poussée des berceaux de la nef principale".

4 - Afin de rendre compte plus précisément de l'ensemble des solutions techniques que les Romains apportèrent au problème du contrebutement, voici un condensé du guide établi par R. POISNARD pour la visite de l'abbatiale St PHILIBERT de TOURNUS (*)

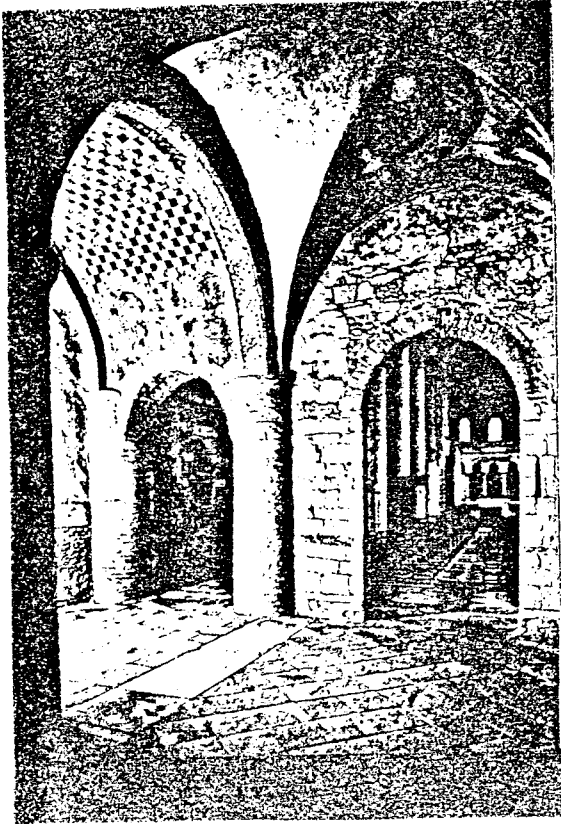


Fig 3: Le Narthex

"Le NARTHEX (fin du X^e siècle ou début du XI^e siècle)

Cette première partie est rectangulaire, massive sans être écrasante, bien proportionnée.

...[1] se compose de trois nefs à trois travées voûtées :

- au centre de croisées d'arêtes,
- sur les côtés, de berceaux transversaux (épaulement de la nef)

On remarque les quatre énormes piliers ronds (1,50 m de diamètre) supports de l'ensemble. Tout est en maçonnerie de petits moellons taillés dans la pierre de la région... et réunis par de gros joints de mortier.

La structure imposante des masses aux voûtes un peu aplaties s'explique par la nécessité de porter également l'étage supérieur (ou "chapelle St MICHEL").

LA CHAPELLE St MICHEL (début du XI^e siècle)

La chapelle haute constituant l'étage du narthex (conformément aux grandes églises de l'époque) en a donc le plan. Au point de vue architectural c'est, sans aucun doute, la partie la plus hardie de l'abbatiale...

Contrairement au rez-de-chaussée, la chapelle est d'une légèreté extraordinaire : la grande nef s'élève à 12,50 m au-dessus de nos pieds. Voûtée d'un berceau longitudinal, elle est soutenue, elle aussi, par quatre gros piliers ronds.

De part et d'autre, nous notons :

- dans les travées de façade : les deux tours de guet...
- dans les deux autres travées : des voûtes en demi-cerceaux devant faire office d'arcs-boutants.

On notera encore les nombreuses fenêtres de la nef centrale qui éclairent abondamment le sanctuaire ainsi que les encorbellements (à la base des voûtes) qui réduisent la portée et stabilisent l'édifice vers l'intérieur.

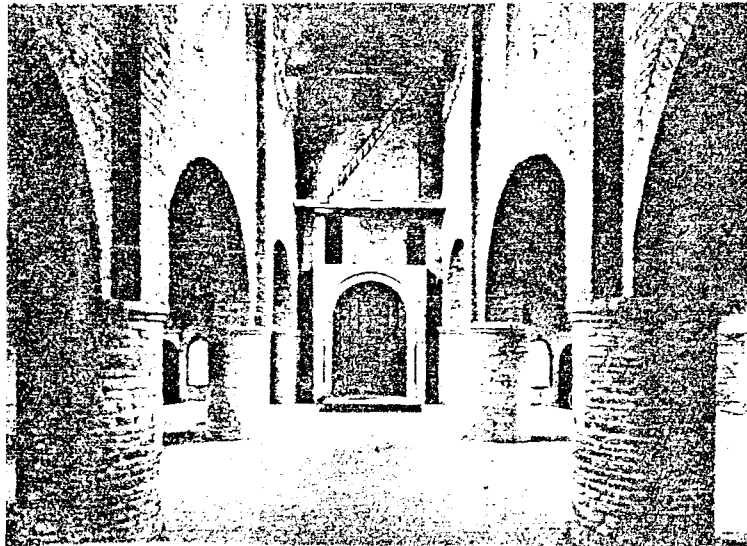
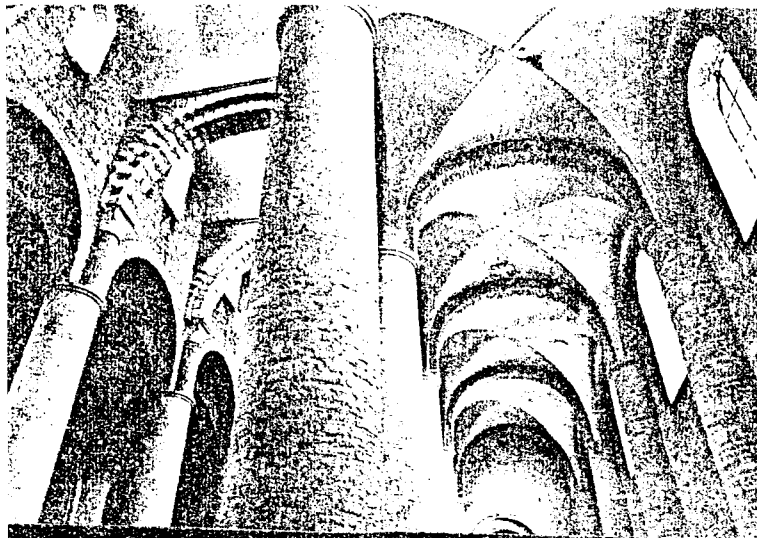


Fig 4: La Chapelle St Michel

(*) Comme l'indique TH. CASTEAU dans "l'Art Roman" de l'excellente petite collection "la grammaire des styles", la diversité des solutions de voûtement roman se voit quasiment réunie à St PHILIBERT de TOURNUS (Saône et Loire) à la fin du XI^e siècle... et avec elle, la diversité des solutions de contrebutement. Ce qui justifie le choix de TOURNUS comme exemple générique de l'Architecture Romane.



LES NEFS DE LA GRANDE EGLISE (XI^e et XII^e sc)

L'ensemble est joyeux, clair, élancé et contraste ainsi avec le massif ouest plutôt sombre et trapu. Remarquer la grandeur et le nombre considérable de fenêtres...

La nef centrale : elle est couverte selon le système (peu fréquent à cet endroit) des berceaux transversaux, principe ingénieux réalisé à la manière des arcs d'un pont. On n'en connaît que deux emplois seulement : TOURNUS et Mt St VINCENT (également en SAONE et LOIRE). (*)

Les nefs latérales : hautes et larges, elles portent des voûtes d'arêtes. Ainsi la couverture des trois nefs est-elle le contraire de celle du narthex.

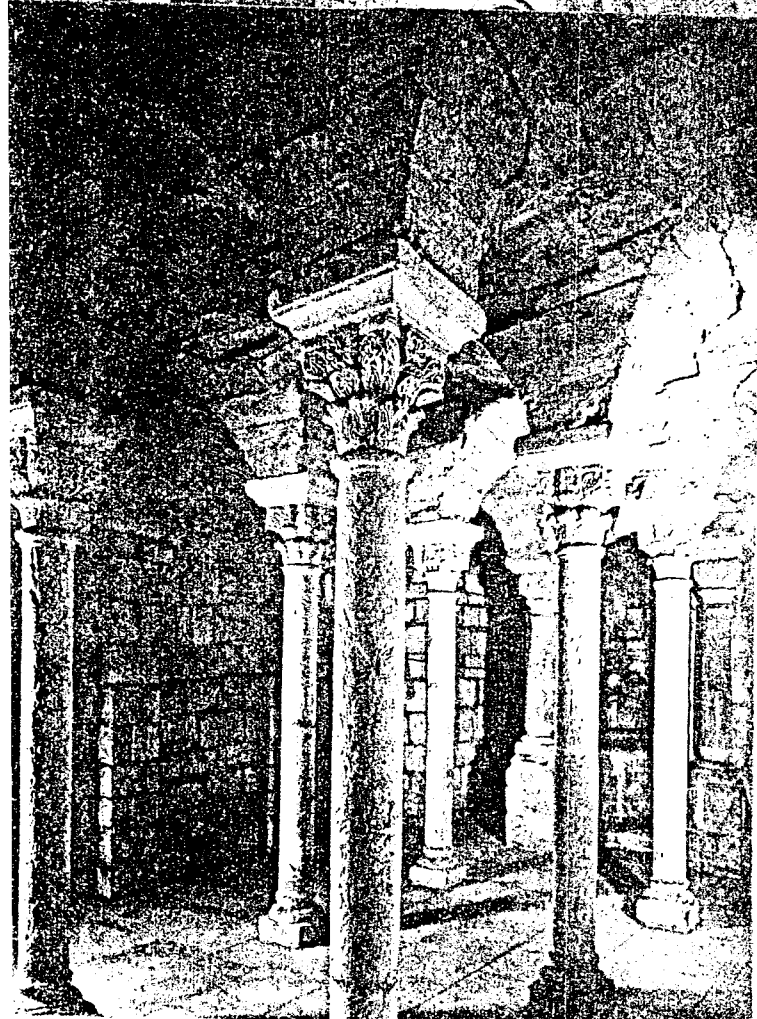
LE CHOEUR ET LE DEAMBULATOIRE (XI^e - XII^e sc)

Le chœur, comme le pourtour de la coupole et ses retombées, est le domaine de la sculpture...

[Le déambulatoire] est couvert d'un berceau "tournant" à compartiment.

Fig 5: Les nefs de l'Abbaye
St Philibert.

Fig 6 : La crypte.



(*) L'idée viendrait peut être des pays arabes, par l'intermédiaire des croisades : A Sousse, en Tunisie, on retrouve ces mêmes berceaux transversaux dans la cour de la grande Mosquée (dès la seconde moitié du IX^e siècle !). Mais les emprunts possibles ne s'arrêtent pas là : dans cette même Mosquée, on remarque la salle de prières qui est couverte "de voûtes en berceau dont les arcs doubleaux reposent sur de massifs piliers cruciformes" (IX^e sc), de voûtes d'arêtes ajoutées à la fin du X^e sc et d' "une coupole reposant sur des trompes en coquille". Autant de techniques de voûtement reconnues dans nos architectures européennes comme spécifiquement romanes.

Tout près de la Grande Mosquée, au Ribat, autre important foyer religieux de SOUSSE, on note que la "voûte du vestibule...est remarquable avec son blocage de moellons s'appuyant sur deux arêtes croisées, véritable prototype de la voûte sur croisée d'ogives". La date de cette construction est étonnante : fin du VIII^e sc ! C'est donc toute l'architecture occidentale qui puise ses racines dans celle de l'Islam !

LA CRYPTÉ (fin du X^e sc)

Elle a le même plan que le chœur de l'église et a conditionné la construction de celle-ci. Ainsi voyons-nous un sanctuaire central entouré de chapelles débouchant sur un déambulatoire...

Les voûtes, brutes de décoffrage, portent encore des traces de bois : elles semblent romanes et on ne pense pas qu'elles aient été restaurées.

La maçonnerie est en grosses pierres blanches à larges joints de mortier. L'éclairage naturel, indirect, est peu abondant.

LE CLOITRE

... "[la galerie] voûtée sur ses cinq travées de croisées d'arêtes, elle retombe sur l'intérieur par de gros piliers demi-circulaires solidaires du mur de l'abbatiale."

Fig 7 : Le cloître.

L'abbatiale est exemplaire par sa diversité et la grande complexité de son plan. La superposition de trois niveaux permet une richesse d'organisation exceptionnelle, qui ne sera peut-être jamais dépassée dans toute l'Architecture Romane monumentale.

Les solutions techniques au problème du contrebutement y sont très nombreuses : contreforts, tours faisant office de contrefort d'angle, berceaux d'épaulement, demi-berceaux, encorbellement, poutres d'étréssillonement, mais aussi effet de charge des cellules supérieures (ainsi, la Chapelle St MICHEL vis-à-vis du Narthex), et effet de butée des cellules latérales (ainsi, les nefs latérales calent efficacement la nef principale).

5 - Les réponses au problème du contrebutement de la poussée des voûtes, dérivent en fait, malgré leurs importantes différences, d'une *conception unique de l'équilibre des objets dans l'espace*. Pour montrer cela, chaque technique sera spécifiée par son mode d'intervention sur l'édifice, et la localisation de ses *lignes critiques*, ou lignes de moins grande *résistance*. Nous constaterons alors que toutes ces techniques décrivent, en négatif, une même *conception* de ce qu'est l'*effet de poussée* des voûtes et des moyens que l'on doit mettre en oeuvre pour y remédier.

Le contrefort roman intervient dans l'équilibre de l'édifice par le *calage* du mur porteur. Il opère son *effet de calage* (cas particulier d'*effet de contrebutement*) sur toute la hauteur du mur, mais de manière discontinue, localisée. Cette technique met ainsi en danger les surfaces de mur comprises entre les contreforts. S'il n'y a pas de déversement vers l'extérieur, c'est que le mur absorbe par sa *propre cohésion interne* une part du contrebutement. De ce point de vue, murs et contreforts forment une unité de contrebutement (mais aussi de *soutènement* !) indivisible. Au coeur de cette indivision, se trouve le *principe de cohérence entre les parties de l'ensemble mur-pilier-contrefort* (cf point 7.).

La galerie du cloître, mais aussi le narthex épaulent les voûtes de la nef. Le terme d'épaulement signifie que l'élément de contrebutée n'opère pas sur toute la hauteur. Ici par exemple, on ne dépasse pas le tiers de la hauteur totale. Des fissures pourraient se développer au fait de ces voûtes. Mais là aussi, *mur sustentateur* et *élément de contrepoussée* forment une unité indistincte, réalisée par une importante masse de remplissage, dont les constructeurs ont postulé une cohésion suffisante. Au contraire du calage, l'épaulement opère tout au long d'une ligne continue de poussée.

Par ses différents caractères (taille, lieu de la contrepoussée), les tours massives fournissent un exemple de contrebutement intermédiaire entre le *calage* et l'*épaulement*.

Ces premières solutions constructives se rangent dans une même classe relativement à la *conception de l'équilibre* qui s'y développe. On retrouve en particulier *la même indifférenciation entre fonction porteuse et fonction de contrepoussée*: les murs massifs sont des contreforts généralisés, les contreforts sont comme des béquilles, et participent à ce titre à la fonction porteuse. (cf point 7).

L'effet de charge est évidemment inclus dans cette catégorie. On le trouve également dans l'*effet de tassement* que produit toute cellule supérieure (la chapelle St MICHEL, par exemple) sur les voûtes d'une cellule inférieure et ainsi anéantit tout risque de déversement. Mais, c'est également le principe constructif des pinacles gothiques associés aux piliers extérieurs des arcs-boutants. Il trouve sa justification dans le *principe de cohérence des éléments entre eux*, qui porte ici le nom de *frottement* puisque l'un des termes est le sol de l'édifice.

Une deuxième classe de solutions techniques se différencie de la première par le fait qu'elle assure le contrebutement par l'intérieur de l'édifice.

Il s'agit des poutres, "frustres tirants de bois", qui contrairement à leurs fonctions habituelles ne servent pas à soutenir la charpente, mais à empêcher le déversement vers l'extérieur par un étrésillonnement adéquat. Ce terme désigne tout effet qui tend à contrecarrer un autre effet jugé destructeur, par l'adjonction d'un élément spécifique à cette tâche.

De même, l'encorbellement des supports de la voûte sur les piliers permet d'annuler le risque d'*un déversement vers l'extérieur*, par le risque d'*un déversement vers l'intérieur*.

Dans les deux cas, les éléments constructifs sont soumis à de rudes effets antagonistes (de traction ou de torsion) qu'ils ne peuvent absorber que sous la condition expresse d'avoir une *cohérence suffisante entre eux*. Il est à noter que ces solutions constructives se retrouvent partout dans le Roman, mais aussi le Gothique de l'ouest de la France (cf chap. III).

Les demi-berceaux paraissent mieux adaptés à *leur fonction de contrebutement*. En effet, leur ligne d'appui se trouve localisée en hauteur sur la paroi qui reçoit la poussée des voûtes. Cela permet de reporter l'effet de poussée aux pieds du berceau. Mais comme précédemment, c'est de *la cohésion du matériau utilisé* et de *la cohérence de l'ensemble* demi-berceau-paroi que dépend la réussite constructive. Comme cet effet de poussée se manifeste continûment, le demi-berceau exerce lui aussi une contre-poussée non localisée.

L'arc boutant gothique marque sa nette supériorité par le fait que le recours systématique au voûtement par croisée d'ogives a changé la nature de *l'effet de poussée*: arcs-boutants et ogives sont indissociables pour comprendre comment *les effets de poussée* (mais aussi *les effets de charge* et *les effets de butée*!) sont *comme* canalisés le long des ogives pour être amortis ponctuellement par l'arc-boutant et le pilier extérieur.

Des conséquences importantes de *cette localisation des effets de masse de la voûte* seront développées au chap. IV.

La nécessité d'*une cohésion suffisante de l'élément de contrebutée* (ici, l'arc boutant) n'a curieusement plus grand sens ici. En effet, *le principe de cohésion interne du matériau* qui a été relevé si souvent précédemment, suppose implicitement *l'existence d'unités indivisibles* (comme les pierres taillées, ...) *noyées dans un mortier de qualité suffisante pour assurer convenablement l'unification des parties*. Or, l'arc boutant est taillé dans le granit et les différentes sections qui le constituent ne sont pas scellées par un mortier.

Le commun dénominateur de toutes les solutions romanes de contrebutement est donc *ce principe de cohésion interne des matériaux* et de *cohérence entre les parties*

On a vu d'ailleurs qu'il disparaissait avec l'avènement du gothique de l'Île de France. C'est ce principe qui assure *l'unité de la conception spatiale* qui a présidé aux réalisations de l'Architecture Romane.

6 - Cette idée se trouve exprimée, avec force, chez VIOLLET-LE-DUC.

De manière très précise, VIOLLET-LE-DUC reconnaît deux spécifications distinctes de *ce principe de cohésion interne* et de *cohérence entre les parties*. La première, baptisée *principe de stabilité inerte*, se verrait à l'oeuvre dans l'Architecture Romaine monumentale. Elle aurait inspiré aux constructeurs Romains, et faute de moyens techniques suffisants pour la copier, une variante, baptisée par VIOLLET-LE-DUC *principe d'élasticité*

"Le principe de la construction romaine est le suivant : établir des points d'appui présentant par leur assiette et leur parfaite cohésion, des masses assez solides et homogènes pour résister au poids et à la poussée des voûtes ; répartir ces pesanteurs et poussées sur des piles fixes dont la résistance inerte est suffisante.

La construction romaine n'est qu'une concrétion habilement calculée dont toutes les parties dépourvues d'élasticité se maintiennent par les lois de la pesanteur et leur parfaite adhérence. Pour cela, ils composaient des maçonneries homogènes, au moyen de petits matériaux, de cailloux ou de pierrailles réunis par un mortier excellent, et enfermaient ces blocages dans un encaissement en briques ...

Cette méthode était la conséquence de l'état social et politique de la société romaine. En effet, elle demandait une bonne direction, en n'exigeant qu'un nombre restreint d'ouvriers habiles et intelligents, sous lesquels pouvaient travailler un nombre considérable de simples manoeuvres ...

... Manquant de savoir, ne possédant que des traditions presque effacées, n'ayant ni ouvriers habiles, ni engins puissants, les architectes de l'époque carolingienne, firent des efforts inouis pour élever des édifices d'une petite dimension, pour les rendre solides et pour les voûter...

Les constructeurs romans reconnurent bientôt que leurs bâtisses n'offraient pas un ensemble concret lié, une agglomération parfaitement stable, que les piliers formés de placages de pierre enfermant un blocage composé souvent de médiocre mortier, subissaient des effets, des tassements inégaux qui causaient des déchirures dans les constructions et par suite des accidents graves.

Il fallut donc chercher les moyens propres à rendre ces effets nuls. Il fallut que leur intelligence suppléât à ce défaut de puissance...

Le système de construction que l'on voit naître est basé sur le principe de l'élasticité, remplaçant le principe de stabilité absolue adapté par les Romains.

Ainsi, les arcs doubleaux, sortes de cintres permanents élastiques, suivaient les mouvements des piles, se prêtaient à leur tassement, à leur écartement et maintenaient ainsi, comme l'aurait fait un cintre en bois, les concavités en maçonneries bâties au dessus d'eux".

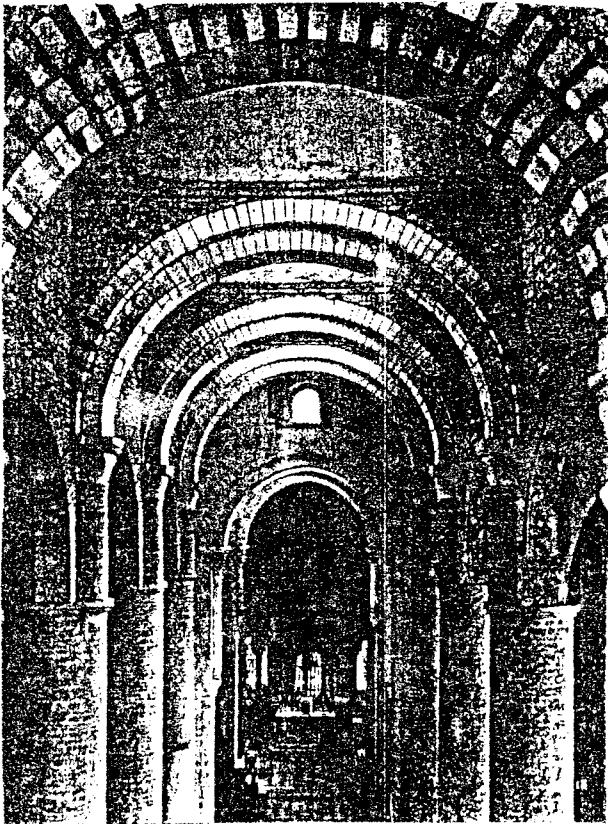
J'aurai au chapitre IV, d'autres occasions de rendre compte de cet auteur si souvent précurseur dans ses analyses.

La conception hétérogène

7. J'appellerai *conception hétérogène de l'espace*, la conception spatiale qui préside à la plupart des grandes réalisations d'Architecture Romane (*). La suite de ce chapitre sera consacrée à justifier cet emploi du terme *hétérogène* pour qualifier la conception, particulière aux Romains, de ce qu'il est possible de faire en architecture et de ce qui est considéré comme impossible.

Dans un premier temps, je vais reprendre cette phrase centrale de l'analyse : *le principe de cohésion interne des matériaux et de cohérence entre les parties est ce par quoi il y a indifférenciation entre fonction porteuse et fonction de contrebutement.*

Et pour ce faire, je vais analyser successivement la statique de l'arc diaphragme qui reçoit les doubleaux transverses de la nef centrale, puis d'une travée du mur d'enclos de l'abbatiale St PHILIBERT. Je distinguerai nettement entre *effets de masse* et *fonctions constructives*, montrant que si les premiers sont bien localisés, les seconds au contraire sont assurés par la totalité de l'édifice et de manière indifférenciée, sous couvert du principe de cohésion interne des matériaux et de cohérence des éléments entre eux.



Il est reconnu que l'agencement original selon des doubleaux transverses à TOURNUS, a pour effet singulier d'annuler toute poussée latérale. Cette affirmation mérite d'être commentée car elle nous mettra sur la voie d'une analyse de la statique de l'arc-diaphragme.

S'il est vrai que les effets de poussée de chaque travée se compensent longitudinalement de part et d'autre de l'arc, ils n'en disparaissent pas pour autant... L'importante masse des voûtes se retrouve uniformément répartie sur l'arc diaphragme.

Pour la raison habituelle (cf point 1), la partie médiane connaît un effet de poussée certain. Les régions latérales, plus proches des piliers ne connaissent qu'un effet de charge vertical.

Fig 8 : L'arc-diaphragme de l'abbaye St Philibert de TOURNUS.

(*) Il est difficile de déterminer exactement pour quels édifices architecturaux on peut affirmer avec certitude que la conception mise en oeuvre est de type *hétérogène*. On dira simplement que c'est une *forte tendance* de l'Architecture Romane monumentale, mais que les exceptions partielles ou totales existent.

Cette classification selon les *conceptions spatiales* ne recouvre pas, évidemment, la classification classique selon les *styles* et la chronologie.

Que signifie alors l'affirmation précédente selon laquelle, globalement, l'arc diaphragme ne communiquerait aucune poussée aux nefs latérales ? Une réponse s'impose : le risque de déversement de la partie médiane est évité par l'effet de tassement exercé sur les parties latérales de l'arc diaphragme : ces dernières assurent indistinctement une fonction porteuse et une fonction de contrebutement.

De même, la partie médiane assure une fonction porteuse par effet de poussée, mais également une fonction de contrebutement en transmettant cet effet de poussée aux parties latérales qui le stoppe.

Le principe de cohésion interne de l'arc diaphragme se manifeste ici par l'épaisseur constante du mur diaphragme. C'est lui qui assure la réalisation de cette double fonction constructive, pour la totalité de l'arc diaphragme (*): cette cohésion est juste suffisante pour transmettre les risques d'effondrement et de déversement de la partie médiane aux parties latérales, résister aux effets de charge spécialement pour les parties proches des piliers, et équilibrer le risque de déversement par le risque d'effondrement.

L'indifférenciation entre fonction porteuse et fonction de contrebutement, sous couvert du principe de cohésion interne des matériaux, n'est pas un phénomène isolé. On le retrouve dans toute l'architecture romane, par exemple, le mur d'enclos de la nef latérale de l'abbatiale St PHILIBERT.

Les grandes fenêtres dans la partie supérieure du mur, montrent que la partie, dite médiane, qui est située entre les piliers, ne reçoit pas d'effet de charge important. C'est par contre le cas des piliers et des régions voisines, latérales.

Le contrebutement de la voûte latérale se fait bien sûr en partie, par les contreforts. Mais ils sont pratiquement inexistant à St PHILIBERT et l'on peut supposer qu'ils ne suffisent pas à eux seuls, à contrebuter ces importantes masses de pierres. Il a donc fallu noyer les contreforts dans les parties latérales du mur d'enclos, pour assurer un contrebutement efficace au niveau des piliers. On trouve une vérification du bien fondé de cette hypothèse dans la relative grande épaisseur du mur qui sinon n'aurait pas eu de justification constructive, particulièrement la partie médiane basse. Mais aussi, dans le fait que les contreforts ne sont pas des entités distinctes du mur, ils s'imbriquent dans le mur d'enclos, et sont faits du même matériau.

De même que dans l'analyse précédente portant sur l'arc-diaphragme, on retrouve ici une localisation assez précise et bien différenciée des effets de charge et de butée. Néanmoins, cette délimitation des zones porteuses et des zones de contrebutement ne doit pas masquer que toute zone participe aux deux fonctions constructives.

Il suffit pour s'en convaincre d'appliquer le *principe de cohésion interne du mur* qui se manifeste par l'épaisseur égale du mur en ses différentes parties, mais aussi le *principe de cohérence entre éléments* qui se manifeste ici par l'étroite imbrication entre mur d'enclos, piliers et contreforts.

Les piliers et les parties latérales du mur ont manifestement une fonction porteuse. Ils exercent, également une fonction de contrebutement, par cohérence entre le contrefort et l'ensemble mur-pilier.

Le contrefort a manifestement une fonction de contrebutement. Pour les mêmes raisons que précédemment, les contreforts peuvent être assimilés à des éléments raidisseurs du mur, exerçant par ce fait, une fonction porteuse.

Enfin, la partie médiane basse du mur participe également aux deux fonctions constructives par cohésion interne avec les parties latérales de ce même mur.

La grande épaisseur du mur d'enclos n'est donc pas inutile du point de vue constructif. Elle est ce par quoi les effets destructeurs de la masse de la voûte sont maîtrisés.

(*) Parties médiane et latérales de l'arc diaphragme ont été distinguées en termes d'effets de masse, ils se retrouvent indistincts, à l'image de leurs réalités constructives, au niveau des fonctions constructives qu'ils remplissent.

Une inflation d'éléments massifs qui dénote une *indifférenciation entre fonction porteuse et fonction de contrebutement* et que provoque *le principe de cohésion interne des matériaux* à l'intérieur d'un élément constructif donné, et de *cohérence entre les éléments*, telle se manifeste la conception relative à l'espace qui s'établit à l'époque romane.

Une tentative de dépassement de cette conception originelle, sous la forme d'un début de différenciation entre les fonctions constructives, s'observe dans l'emploi des demi-berceaux dans les grandes réalisations romanes. Il faudra néanmoins attendre l'avènement du Gothique de l'Île de France pour pouvoir affirmer que cette différenciation est enfin pleinement accomplie. Mais, ce n'est plus la même *conception architectonique* qui prévaut alors, *l'"espace" a changé* (cf chap 4)

8 – Cette indifférenciation entre fonction porteuse et fonction de contrebutement se double d'une égale confusion avec la *fonction d'enclos*

Dans *la logique de la masse pesante et du principe de cohésion-cohérence*, tels qu'ils sont apparus dans l'étude de l'abbaye St PHILIBERT, toute fonction constructive ne peut être remplie que par une masse, *un plein d'espace* possédant une cohésion suffisante. Or cette cohésion requiert un volume, une expansion minimale. Les murs d'enclos ne peuvent donc être que massifs et épais.

Il est d'ailleurs inconcevable que dans une construction romane, une partie du mur d'enclos puisse ne pas avoir la même cohésion que le reste de l'édifice. En effet, toutes les parties de l'édifice sont solidaires, elles forment bloc et doivent donc posséder la même cohésion interne. Non pas par décision esthétique ou idéologique, mais par conséquence nécessaire de la non localisation des effets de contrepoussée et de soutien.

L'équilibrage d'une poussée, même localisée en un petit nombre de points espacés comme c'est le cas pour le voûtement par voûtes d'arêtes, nécessite le recours à un mur qui, dans sa totalité, participe à l'effort de contrepoussée (cf points 5. 6. et 7.).



Dans le même ordre d'idées, il est clair que les nefs latérales participent de plein droit au contrebutement de la nef centrale. Elle sont en fait d'immenses solutions de contrebutement. Il est d'ailleurs très net, lorsque l'on observe l'extérieur du chevet de beaucoup d'édifices romans (SOUILLAC par exemple) que les nombreuses absides, et absidioles ont en plus de leur fonction évidente de clôture, une fonction constructive de contrebutement à assurer.

Fig 9 : SOUILLAC.

Les surfaces d'enclos, par leur réalité massive, participent toujours soit au contrebutement, soit au soutien de l'édifice, le plus souvent aux deux de manière indifférenciée.

Pour résumer, on dira que *la contrepoussée des voûtes est à l'origine de la double indifférenciation* : indifférenciation entre fonction porteuse et fonction de contrebutement, indifférenciation de ces deux fonctions avec la fonction d'enclos.

9 - Ce serait une erreur "historique" de considérer séparément les fonctions constructives. Elles se réalisent indistinctement toutes ensemble . Il est alors clair que si cette distinction ne peut avoir un sens pour nous aujourd'hui, dans cet effort de reconstitution de la conception architectonique romane d'origine, *elle ne devait pas même exister au X^{ème} et au XI^{ème} siècle:*

Le *principe d'économie de logique* (*) postulé par P. BOURDIEU dans "Le sens pratique" permet d'affirmer que *la distinction entre les fonctions constructives* est le fait de l'analyse moderne mais *n'appartient pas à la conception architectonique romane historique*

Pour le maître d'oeuvre roman, l'élément constructif trouve sa raison d'être, non pas dans sa *fonction*, puisque cela n'a pas de sens, mais dans sa *présence*: un contrefort qui cale un mur, c'est bien autre chose qu'un arc-boutant qui renvoie l'effet de poussée au sol. C'est la présence du contrefort et l'hypothèse faite de sa cohésion et de la cohérence du contrefort, du mur et de l'ensemble qu'ils constituent qui prend en charge l'effet constructif escompté.

C'est pourquoi, j' avance la thèse suivante :

Le maître d'oeuvre roman "pense" en termes de présence-absence de masses, mais pas en termes de fonctions constructives différenciées.

Cette thèse me paraît être à la définition même de la conception spatiale cherchée. *La conception hétérogène de l'espace*, telle qu'elle apparaît dans toute l'Architecture Romane monumentale, *se fonde sur le primat de l'objet, considéré dans sa matérialité.*

L'*espace* est bien entendu identifié aux *pleins des objets*, et le *vide* n'y a aucun statut (**). Mais il y a plus : les seules propriétés reconnues pertinentes de cet "espace roman" sont *la cohérence à l'intérieur des pleins* et *la cohésion entre les parties*, toutes deux jugées suffisantes pour assurer l'équilibre de l'édifice.

(*)selon lequel , "on ne mobilise pas plus de logique qu'il n'en faut pour les besoins de la pratique"

(**) C'est ce traitement différencié des pleins et des vides de l'espace qui justifie le recours au terme *hétérogène* pour qualifier la conception architectonique romane.

L'édifice lui même est une totalité dont les parties ne se distinguent ni par leurs cohérences particulières, ni par leurs cohésions mutuelles, ni enfin par les fonctions constructives qu'elles rempliraient. Dans une architecture romane, et contrairement à ce qui se passe pour une cathédrale gothique, tout élément constructif est maintenu dans sa position par la totalité de son environnement immédiat. Ainsi, de proche en proche, tout l'édifice devient solidaire.

Voilà sans doute la caractérisation la plus remarquable de l'architecture Romane monumentale : *l'édifice est un* et aucune relation particulière ne s'établit entre les parties qui en ferait *une totalité organisée, et différenciée du point de vue statique*.

Les différentes parties (narthex, nef, chevet, crypte, chapelles, ...) sont à leur tour des totalités indivisibles. Les relations constructives qu'elles entretiennent (les plans identiques par exemple, pour des cellules superposées), mais aussi esthétiques (le jeu de renversement dans les voûtements à TOURNUS, par exemple) ne parviennent pas à déstabiliser l'impression de juxtaposition de cellules, qui est très nette à TOURNUS.

Cette idée se trouve souvent exprimée dans les ouvrages d'histoire de l'Architecture. Les auteurs parlent alors de "*compartimentalisation de l'espace*", d'"*espace agrégat*", ...

Il n'y a qu'une apparente contradiction dans l'affirmation que l'édifice Roman *soit un et multiple*. L'unité constructive de l'édifice n'exclut pas la diversité dans ses parties, car toutes deux sont le produit de la même *conception hétérogène de l'espace*.

Cette même conception *massive* de l'équilibre en architecture, permet de rendre compte de la nécessaire parcimonie dans l'aménagement des ouvertures de fenêtres dont les constructeurs romans doivent faire preuve. Les ouvertures réfutent en effet *le principe de cohésion du matériau* qui est au fondement de *la conception hétérogène*.

Les volumes sont hermétiques, sans liens esthétiques avec l'extérieur. La rupture entre *intérieur* et *extérieur* a été souvent relevée par les auteurs qui parlent alors de l'"*austérité des extérieurs*". (*)

(*) Notons que le discours idéologique peut être mis à contribution afin de justifier, paradoxalement, la réalité constructive. Ainsi :

"L'ouverture sur le cosmos qu'est le cloître, l'église l'intériorise".

Il est reconnu d'autre part qu'une articulation esthétique et constructive entre intérieur et extérieur n'est devenu possible qu'avec les progrès décisifs dans la maîtrise technique de la production du verre. Le discours idéologique a suivi, il est devenu le promoteur de la "lumière divine". On est alors en pleine époque gothique.

Primauté de la masse pesante sur l'effet qu'elle produit,

Indifférenciation entre les fonctions constructives.

Principes de cohésion interne et de cohérence entre les parties.

Compartmentalisation d'un espace agrégat.

Absence d'articulation entre un intérieur diversifié et un extérieur austère:

Autant de caractérisations importantes de la conception hétérogène de l'espace, telles qu'elles peuvent apparaître au travers d'une analyse de l'Architecture Romane monumentale.

10 - Une seconde caractérisation de la *conception hétérogène* est que, quelque soit le style, que ce soit l'austère simplicité des ordres cisterciens, ou la relative profusion de lignes dans les grandes réalisations du premier âge roman (par exemple TOURNUS) on note toujours *une très grande lisibilité constructive de l'édifice*.

Dans tous les cas, c'est la réponse aux choix constructifs qui détermine la *réalité constructive* de l'édifice. L'absence de "trompe-l'œil", de "cache" ou de "faux-semblant" pris en charge par la construction même, peut être prise comme un trait distinctif de la conception hétérogène de l'espace (*). Au contraire, de tels artifices apparaîtront avec profusion avec l'avènement des différentes architectures gothiques.

La complexité, ou au contraire la simplicité (l'austérité) des lignes n'est qu'une exacte transcription de la technique de construction. Il est très facile de reconstituer celle-ci d'après celles là.

De là provient sans doute le charme indéniable qui se dégage de la visite d'un édifice roman quelconque.

(*) "Le spectateur contemplant les églises du Moyen-Âge devrait se rendre compte...que l'apparence actuelle de l'édifice ne correspond que rarement à son apparence originelle. Les verres colorés des fenêtres créaient souvent dans l'intérieur des effets de lumière et de couleur différents. Le crépi, l'enduit et souvent aussi les fresques ornementales ou figuratives donnaient aux murs une apparence différente de celle d'aujourd'hui...L'appareil de la construction en moellons n'était jamais visible, même de l'extérieur! [!!!...]...Ce sont peut être les églises cisterciennes qui se rapprochent le plus de cet idéal moderne"

Cet extrait indique que *si* les Romains ont cherché à masquer l'épaisseur du volume (mais rien ne l'indique...) cela n'aurait été obtenu que par des *effets de surface*.

A la différence des gothiques, la réalité constructive ne prend jamais en charge cette *fonction de masque* de la réalité constructive.

Simplicité de l'esthétique romane qui peut se résumer à l'exposition sans ajout de la réalité constructive : son principal effet esthétique réside paradoxalement dans son absence d'effet.

Mais aussi, simplicité de la conception spatiale qui privilégie la masse pesante et comme immobilisée : la conception hétérogène de l'espace est certainement la conception la plus "primitive", mais ô combien "naturelle" de l'équilibre architectural qui se puisse imaginer.

Les raisons qui font que l'édifice est stable sont donc doublement manifestes.

Si l'on se peut sentir aussi bien dans une abbaye romane, c'est sans doute parce qu'elle est immédiatement transparente à l'esprit et qu'elle ne remet pas en cause les idées les plus simples sur l'équilibre architectonique : tout élément de la construction est en effet ostensiblement soutenu ou calé par un autre élément à proximité immédiate.

Ces deux caractères concourent certainement à produire cette impression de sécurité, mais aussi de simplicité, de naturel et de sérénité qui se dégage inmanquablement de tout édifice roman. Certains auteurs ont relevé cela sous l'heureuse expression de "sécurité utérine". Et il est vrai que tout participe à cette impression : la rareté des ouvertures dans la grande majorité des constructions romanes, l'abondance des éléments porteurs, mais aussi l'inflation des éléments massifs dans toutes les parties de l'édifice.

L'Architecture Romane monumentale se présente donc comme un système architectural complexe qui présente sur différents plans une adéquation parfaite.

Elle s'exprime aussi bien comme réalisation des valeurs existentielles de l'époque, que comme réponse optimale aux diverses contraintes constructives et idéologiques (cf les ouvrages donnés dans la bibliographie, pour ces aspects).

Elle peut aussi être appréhendée par une caractérisation cohérente du système constructif que forment les différentes techniques romanes, de la conception relative à l'espace qui s'y exprime, mais aussi de la relation spatiale qui s'établit entre le fidèle et l'édifice, et enfin des multiples interactions entre ces trois pôles. L'objet de ce chapitre était de le montrer.

C'est sans doute le propre des grandes réalisations humaines que de concentrer en elles toutes ces aspirations et de les exprimer sous une forme cohérente.

Thierry BAUTIER
I.R.E.M.
Université de RENNES I

CITATIONSPoint 1**Gérard GUILLIER et Georges PUCHAL :**

"2000 ans d'Architecture vivante"
Editions OUEST -FRANCE p. 38

Point 2**Jean-Pierre WILLESME**

"L'Art Gothique"
Collection : la grammaire des styles.
Flammarion p. 22

J. GUADET

"Eléments et théorie de l'Architecture"
Librairie de la construction moderne p. 329 du
Tome 3

Point 3**Ernst GOMBRICH**

"Histoire de l'Art"
Flammarion p. 128

Roland BECHMANN

"Les racines des cathédrales"
Le regard de l'histoire - Payot p. 205

Point 4**Robert POISNARD**

"TOURNUS, Abbaye St PHILIBERT"

Jean-Jacques FAUVEL

"Tunisie"

Les guides bleus - Hachette

p. 312

X

"Bourgogne Romane"

Editions du Zodiaque

Point 9**Pierre BOURDIEU**

"Le sens pratique"

Collection "Le sens commun"

Les éditions de Minuit

p. 145

Emmanuël MIHEIM

"L'abbaye de Sénanque"

Editions OUEST-FRANCE

p. 21

Point 10**Bernard CHAMPIGNEULLE**

"Histoire de l'Architecture"

SOMOGY

BIBLIOGRAPHIE SUCCINTE

L'architecture comme réponse optimale aux contraintes de la bio-éco-sphère : Roland BECHMANN "Les racines des cathédrales, l'Architecture Gothique, expression des conditions du milieu" - Payot 1984.

L'architecture comme réalisation des valeurs existentielles : Norberg-Schulz "La signification dans l'Architecture occidentale" Mardaga 1977.