

# <u>Rapport final de l'équipe pr</u>

MERCIER Tanguy - GMO2

MIVILLE-DESCHÊNES Philippe - GSU04

PEYRET Paul - GMO2

RENOT Sophie - GSU04



# ÉTUDE ACOUSTIQUE DU PLACEMENT DE GRANDES ORGUES DANS L'ABBATIALE DE SAINT-JEAN-AUX-BOIS

PR nº 4130 - étude expérimentale
Présenté à M. BECKERS Benoît et M. VILLE Jean-Michel,
Professeurs de l'UTC, filière acoustique,
Génie des Systèmes Urbains et Génie Mécanique
Année académique 2010-2011

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions les membres de l'Association «Des Orgues pour Saint-Jean-aux-Bois », sans laquelle ce projet n'aurait pu avoir lieu. Plus particulièrement Messieurs Christian Delage, Philippe Luisin et Jean-Marc Rey, qui nous ont chaleureusement accueillis, nous ont largement offert de leur temps et nous ont permis de réaliser nos mesures acoustiques.

Nous remercions également Monsieur Benoît Beckers qui a été notre suiveur tout au long de cette étude expérimentale.

Nous souhaitons remercier Messieurs Jean-Michel Ville et Félix Foucart pour leur aide ainsi que pour le prêt du matériel acoustique de l'Université de Technologie de Compiègne.

# Sommaire

REME	ERCIEMENTS	2			
NTR	ODUCTION	4			
1.	Temps de réverbération	8			
	1.1 Protocole des mesures	8			
	1.2 Résultats des mesures	10			
	1.3 Interprétation et exploitation des résultats obtenus	12			
2.	. Niveaux d'intensité acoustique	15			
	2.1 Protocole de mesures	15			
	2.2 Résultats des mesures	16			
	2.3 Interprétation et exploitation des résultats obtenus	17			
3.	. Homogénéité sonore	20			
4.	. Réflexions et focalisations	22			
5.	. Température et hygrométrie	24			
6.	. Caractérisation auditive	25			
7.	Modes propres de l'édifice	26			
8.	. Recommandations diverses	27			
CON	CLUSION	28			
ANNEXES					
POURSUITE DE L'ÉTUDE					
NSTRUMENTATION DE MESURE					
TEMPS DE RÉVERBÉRATION PAR BANDES DE FRÉQUENCES					
COMI	PTE RENDU DU JEUDI 7 AVRIL 2011	32			
	ELISATION 3D DE L'ABBATIALE DE ST-JEAN-AUX-BOIS				
BIBLI	IOGRAPHIE	37			

#### INTRODUCTION

À la demande des membres de l'association « Des orgues pour Saint-Jean-aux-Bois », nous avons réalisé une étude acoustique, en vue de définir le meilleur emplacement pour un orgue dans l'Abbatiale de Saint-Jean-aux-Bois. Ce rapport préconise un emplacement optimal au point de vue de l'acoustique. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une Unité de Valeur PR, orchestrée par M. BECKERS Benoît, enseignant chercheur à l'Université de Technologie de Compiègne.

Par emplacement optimal, nous nous apparentons au point de vue physique, c'est-à-dire l'adéquation entre l'instrument et l'espace environnant mais également, au point de vue des qualités d'écoute les meilleures possibles. Nos analyses sont de ce fait portées sur les propriétés physiques du lieu de culte d'une part et sur les qualités du son perçu d'autre part.

#### Historique de l'Abbatiale de Saint-Jean-aux-Bois

La construction de cette abbatiale fut entreprise par les abbesses Bénédictines dès le début du XIIème siècle. Elle fut édifiée en deux étapes sur un même plan: le chœur avec le transept, et enfin la nef. L'abbatiale comportait un clocher de bois ou de pierre.

À gauche de l'entrée nord se trouve un tombeau arqué supposé être celui d'Agathe de Pierrefonds. En 1761, avec l'extinction de la communauté des chanoines de Saint-Augustin, ce bâtiment devient église paroissiale. La pureté de son architecture intérieure et ses vitraux en grisaille en font notamment sa renommée. Classée au titre de monuments historiques en 1849, sa restauration fut entreprise dès 1865, elle se poursuit durant plus de vingt ans. Viollet-le-Duc vint à cette époque y faire quelques croquis. La toiture en ardoise fut refaite et remplacée en 1992 par une couverture en tuiles plates.



L'association des orgues pour Saint-Jean-aux-Bois

La première assemblée générale de l'association s'est tenue le 5 juin 2010 au cœur même de l'Abbatiale. Cette association a pour vocation de pourvoir l'édifice d'un orgue. À la fois pour l'accompagnement du culte, pour lequel un orgue de qualité serait plus entraînant pour l'assistance qu'un instrument électronique, mais aussi pour animer l'activité culturelle et touristique autour de l'Abbatiale. La vocation pédagogique de l'instrument, pour des cours et des concerts scolaires, pourra être également développée. Étant donné la taille et le volume de l'Abbatiale ainsi que les moyens financiers de l'association, un orgue de 15 jeux pourra suffire. Cela représente une somme conséquente puisqu'elle avoisine les 250 000 euros.

#### Historique de l'orgue<sup>1</sup>

#### Apparition de l'orgue dans les édifices religieux

Au Moyen Age, cet instrument désignait aussi bien une polyphonie liturgique que le service religieux lui-même. La musique européenne est née dans les églises. L'orgue fut l'instrument principal dans les églises dès le XIVème siècle. Avant cette époque, l'orgue était un instrument portatif d'une église à l'autre. Il est important de remarquer qu'à aucun moment de l'histoire de l'architecture sacrée médiévale il n'y avait de place destinée spécialement pour l'orgue, et qu'il n'y avait aucun principe universel pour fixer sa position.

Du XIVème au XVIIIème siècle, l'amélioration technique invite le répertoire à se développer grandement dans les principaux centres européens. Sa musique est directement liée avec celle de la polyphonie à 4 parties. Dès la fin du Moyen Age, l'orgue devient plus volumineux, on y ajoute un clavier et un pédalier pour faciliter l'usage, il prend plus de place et il faut construire une tribune pour cet instrument. Il se retrouve alors dans le cœur au-dessus des stalles.





Figure 1 : Orgue de cœur Notre-Dame de Bon Cœur de Nantes<sup>2</sup>

Figure 2 : Orgue en tribune au fond la nef Eglise de Moncourt<sup>3</sup>

À la Renaissance, on trouve l'orgue parfois au fond du transept (comme dans la Cathédrale de Reims, 1487) ce qui permet de faire le lien sonore entre la nef et le chœur. Le jubé, séparant le chœur de la nef, était également parfois utilisé comme support pour un orgue entendu aussi bien par la schola dans le chœur que des fidèles dans la nef; audessus des piliers des murs latéraux de la nef, au niveau du triforium.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Victor DESARNAULDS, (2002) De la position des orgues dans les églises, Lausanne. biblion.eofl.ch/EPFL/theses/2002/2597/EPFL\_TH2597\_screen.odf

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Figure 1 : http://www.flickr.com/photos/vebests/5198584971/

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Figure 2 : http://fr.topic-topos.com/orages-et-tribune-moncontour

#### Les principales positions des orgues dans les églises

Au cours des siècles, les orgues ont été disposés dans les lieux de culte à différents endroits plus ou moins favorable à l'acoustique :

- La position la plus répandue est en tribune, au-dessus du portait occidental.
- En nid d'hirondelle, sur le côté de la nef (cathédrale de Chartres, Strasbourg, Bruxelles) ou dans le transept.
- Dans le triforium (coursive située au-dessus des nefs latérales), comme la Cathédrale Saint-Étienne de
   Metz, disposition suspendue la plus courante en Espagne.
- À même le sol, dans le chœur, dans l'abside, position régulière de l'orgue dit « de chœur », instrument plus petit et historiquement dédié à l'accompagnement de la chorale uniquement. Avec l'émergence du chant d'assemblée, l'orgue de chœur prend dans certaines églises tout ou une partie du rôle d'accompagnateur de l'assemblée.
- À même le sol, sur un côté ou les deux côtés du chœur, le plus souvent suspendu. Cette disposition s'observe surtout en Italie, en Espagne et dans les pays d'influence hispanique. Les orgues prennent alors le nom d'orgue d'épitre et d'orgue d'évangile. Il est à noter que fréquemment, seul un des deux orgues existe réellement, l'autre étant un buffet vide. Cette disposition se retrouve aussi dans les grandes églises catholiques du sud de l'Allemagne.
- Au-dessus de l'autel et de la chaire, le plus souvent dans les églises réformées ou piétistes en Allemagne,
   aux Pays-Bas et en Suisse.

Sur le jubé, comme on le rencontre parfois en Angleterre. L'image ci-après est un exemple de ce type

d'emplacement.

Figure 3 : Orgue de jubé Southwell à Nottinghamshire en Angleterre<sup>4</sup>



\_

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Figure 3 : http://www.flickr.com/photos/gmleuty/tags/organ/

#### Emplacements potentiels à l'abbatiale de Saint-Jean-aux-Bois

Le placement d'un orgue doit être étudié avec attention. En effet, un tel instrument ne peut être placé au hasard dans un édifice religieux. C'est pourquoi l'emplacement de l'orgue doit être finement étudié.

Les emplacements suivants ont été envisagés : dans le transept, endroit où se trouve l'orgue électronique actuel, et dans le fond de la nef.

Le placement de l'orgue dans le transept s'avère être la position la plus judicieuse selon des experts, mais surtout la moins complexe. Le fond de nef présente en effet quelques inconvénients. L'abbatiale est un monument classé, de ce fait, les arcatures ne peuvent être masquées. L'orgue devra alors être placé en hauteur, au-dessus des arcatures. Par ailleurs, une magnifique rosace orne le mur du fond de la nef, ce qui restreint davantage l'espace destiné à accueillir l'orgue. Une seule possibilité s'offre à nous: il s'agit de fixer l'orgue au mur entre les arcades et la rosace, ce qui laisse une marge d'environ 3 mètres. La console devra donc être mobile et séparée de la commande. Les plus grands tuyaux (16pieds) devront être disposés aux extrémités du fond de la nef de façon à ne pas cacher la rosace.

#### Démarche acoustique

La tessiture de l'orgue est la plus large de tous les instruments et nous retrouvons le registre des autres instruments dans cette échelle de notes. La tessiture d'un orgue de grandeur moyenne peut aller de 33 Hz (premier do grave du jeu de 16 pieds) à 16 000 Hz. Pour cette étude acoustique, nous avons porté notre attention sur divers phénomènes acoustiques: le temps de réverbération, les niveaux d'intensité acoustique, les focalisations, les réflexions, la caractérisation auditive et les modes propres. Nous avons ainsi entrepris des mesures dans l'abbatiale à l'aide d'un sonomètre et d'une source omnidirectionnelle permettant de générer un bruit émettant un large spectre fréquentiel comparable au registre de l'orgue. Nous avons ensuite analysé nos résultats afin d'en tirer des conclusions sur les deux emplacements envisagés pour le futur orque de l'abbatiale de Saint-Jean-aux-Bois.

#### l. Temps de réverbération

La réverbération est ce phénomène de persistance du son dans un espace clos après l'arrêt d'émission sonore. En acoustique il s'agit concrètement du temps que met le niveau sonore à décroître d'un certain nombre de décibels. Généralement, l'étude est faite sur une décroissance de 60dB (Tr60) soit une réduction à un millionième du son, bien que différents types de réverbérations puissent êtres étudiés (Tr30 pour une décroissance de 30dB, Tr20 pour 20dB etc.). Il existe aussi la notion d'Early Decay Time (EDT), qui correspond au temps de réverbération sur les 10 premiers décibels, d'où l'appellation. Cette mesure est très utile dans le sens où elle se rapproche beaucoup de ce que perçoit l'oreille humaine, alors que des réverbérations sur de plus grandes plages de décibels sont plus représentatives des caractéristiques de l'édifice en lui-même.

Le temps de réverbération optimal varie en fonction de l'usage fait de la salle étudiée, de son volume et des différents intervenants. Son appréciation est très subjective cependant le recoupement de plusieurs sources peut nous mettre sur la piste du temps de réverbération optimal pour la musique d'orgue dans le cas de notre étude. Cette musique réclame généralement un temps de réverbération élevé. L'architecture des églises, leur volume et leurs matériaux permettent d'atteindre ce critère. Cependant le temps de réverbération optimal dépend de l'usage que l'on souhaite faire de l'édifice. L'intelligibilité pour la parole demande par exemple, un temps de réverbération relativement faible (d'où la nécessité d'installer des dispositifs électroacoustiques dans les églises).

Après ces premiers constats, il ne sera alors pas étonnant de trouver que les avis d'experts varient beaucoup sur le sujet. Même en se focalisant sur la musique d'orgue en église, les sources ne se recoupent pas forcément et des opinions contradictoires peuvent apparaître. Nous tenterons alors, lors de l'interprétation de nos mesures, de prendre en compte ces différents avis avec beaucoup de précaution en les adaptant à notre cas.

Dans notre étude, il s'agira alors pour les deux positions de l'orgue envisagées, de déterminer laquelle possède des temps de réverbération plus adaptés à la musique d'orque.

#### 1.1 Protocole des mesures

Nos mesures ont été effectuées en 4 points différents pour chaque position possible de l'orgue afin de rendre compte assez fidèlement de la spatialisation de la réverbération et de ses variations dans le volume de l'abbatiale. À ces positions a été installée une source émettrice de bruit rose. Ce type de bruit permet de balayer toute la bande de fréquence et permet ainsi de visualiser les mesures sur l'ensemble de la bande étudiée. Contrairement au bruit blanc, le bruit rose a été choisi, car il est plus adapté au niveau fréquentiel à ce que perçoit l'oreille humaine.

Pour chaque point de mesure, le sonomètre nous a permis d'effectuer trois mesures de réverbération et de les moyenner afin d'obtenir des valeurs cohérentes.

Nous noterons que la présence d'un public aurait influencé nos mesures à cause de l'absorption que celui-ci apporte au volume en nous donnant des valeurs plus faibles que celles que nous avons trouvées. Il serait peut être intéressant de faire des mesures de réverbération avec une assemblée afin d'obtenir des valeurs proches de la réalité d'une office ou d'un concert.

Le schéma suivant représente les points de mesures (T1, T2, T3 et T4) et les deux positions de la source (S1 et S2):

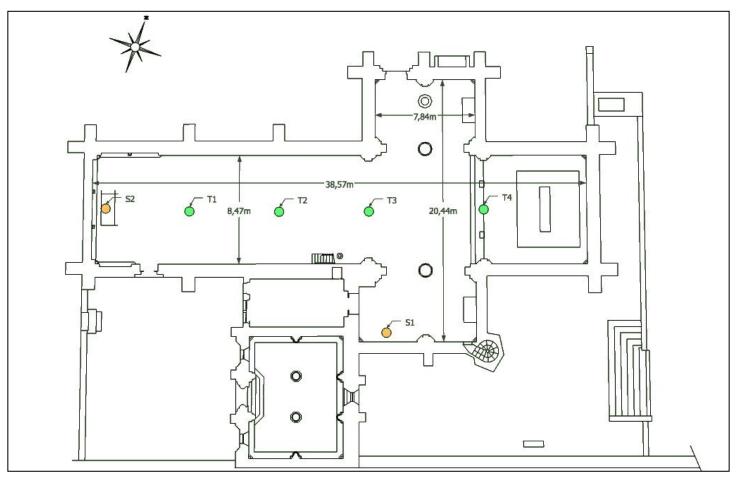


Figure 4 : Plan en coupe de l'abbatiale avec les différentes positions de source et du sonomètre

#### 1.2 Résultats des mesures

Une visite préliminaire dans l'abbatiale nous avait permis d'estimer, par un test auditif simple, le temps de réverbération de l'édifice autour de 3 à 4 secondes. Nos mesures nous ont confirmé ce constat plus, de manière plus détaillée, pour chaque position possible de l'orgue.

Ci-dessous les résultats obtenus lors de nos mesures après exportation des mesures du sonomètre vers un chiffrier Excel :

- TrOOI correspond à la position SI de la source (dans le transept), TrOO2 respectivement à la position S2 de la source (au fond de la nef).
- Les mesures sont représentées par fréquence en analyse de tiers d'octave. Le sonomètre utilisé calcule les mesures du T2O, du T3O et de l'Early Decay Time (EDT).

	<b>Tr001</b> - 7	Transept		Tr002 - Nef			
Fréquence	T20-1	T30-1	EDT1	Fréque	ence T20-2	T30-2	EDT2
63Hz	4,8	4,53	4,96	63Hz	3,99	4,28	5,53
80Hz	4,24	4,15	4,87	80Hz	4,67	4,61	4,57
100Hz	5,3	4,97	4,06	100Hz	4,62	4,7	4,17
125Hz	4,5	4,77	4,4	125Hz	4,87	4,84	3,91
160Hz	4,87	4,51	4,85	160Hz	4,17	4,5	3,53
200Hz	5	4,75	4,87	200Hz	4,47	4,57	4,36
250Hz	4,54	4,57	4,7	250Hz	4,46	4,48	4,12
315Hz	4,63	4,63	4,64	315Hz	4,29	4,48	4,46
400Hz	4,18	4,27	4,58	400Hz	4,33	4,35	4,26
500Hz	4,13	4,17	4,24	500Hz	3,97	4,16	4,26
630Hz	3,92	3,92	4,39	630Hz	3,93	4,05	3,83
800Hz	3,81	3,8	3,81	800Hz	3,85	3,85	3,62
1kHz	3,68	3,63	3,86	1kHz	3,66	3,72	3,7
1,25kHz	3,57	3,55	3,63	1,25kH	z 3,51	3,54	3,36
1,6kHz	3,49	3,37	3,37	1,6kHz	3,2	3,3	3,33
2kHz	3,08	3,11	3,3	2kHz	3,06	3,06	3,13
2,5kHz	2,81	2,84	2,83	2,5kHz	2,81	2,83	2,71
3,15kHz	2,55	2,56	2,46	3,15kH	z 2,54	2,51	2,4
4kHz	2,14	2,19	2,11	4kHz	2,15	2,15	2,08
5kHz	1,82	1,81	1,83	5kHz	1,8	1,82	1,6
6,3kHz	1,44	1,46	1,34	6,3kHz	1,41	1,41	1,3
8kHz	1,11	1,11	1,02	8kHz	1,09	1,1	1
10kHz	0,84	0,9	0,79	10kHz	0,82	0,88	0,88

Tableau 1 : Mesures des temps de réverbération

Ci-dessous des représentations graphiques comparatives pour les deux positions de la source des temps de réverbération et de l'EDT en fonction de la fréquence :

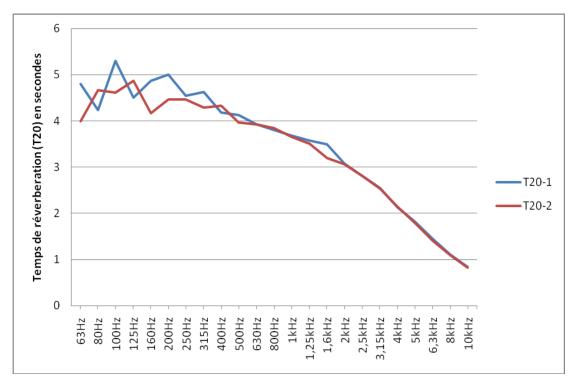


Figure 5 : Etude comparative des deux positions de la source et du temps de réverbération T20 en fonction de la fréquence

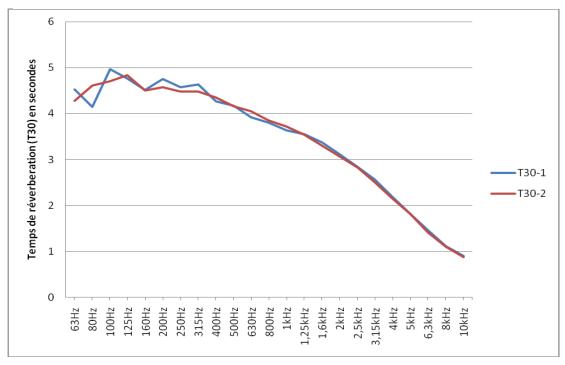


Figure 6 : Etude comparative des deux positions de la source et du temps de réverbération T30 en fonction de la fréquence



Figure 7 : Etude comparative des deux positions de la source et de l'EDT en fonction de la fréquence

1.3 Interprétation et exploitation des résultats obtenus

Valeurs remarquables des temps de réverbération

Afin de se représenter au mieux l'influence de la position sur la réverbération nous pouvons prendre quelques valeurs significatives et étudier leurs variations selon l'emplacement. Pour cela nous choisissons d'étudier les valeurs moyennes sur une bande haute fréquence (entre 500Hz et 1000Hz) à laquelle l'oreille humaine est sensible, et sur une bande basse fréquence (entre 63Hz et 125Hz), moins audible.

Tr moyen dans la bande 500Hz- 1000Hz						
	T30	EDT				
Position S1 Transept	3,89	3,88	4,08			
Position S2 Nef	3,85	3,95	3,85			

Tr moyen dans la bande 63Hz- 125Hz						
	T20	T30	EDT			
<b>Position S1 Transept</b>	4,71	4,61	4,57			
Position S2 Nef	4,54	4,61	4,55			

Tableaux 2 : Valeurs des temps de réverbération en fonction des deux positions de la source

Pour chacune des positions, nous constatons que les temps de réverbération sont relativement élevés, que ce soit en hautes ou en basse fréquences, ce qui témoigne de la grande capacité réverbérante de l'édifice. Les valeurs sont relativement proches pour ces deux bandes de fréquences ce qui ne va pas faciliter notre interprétation car à première vue, il n'y a pas de différences flagrantes pouvant nous amener vers telle ou telle conclusion.

Cependant nous constatons qu'en général, la position 1 (dans le transept) semble posséder une réverbération plus élevée. Nous noterons aussi que les basses fréquences possèdent une réverbération plus forte que les hautes fréquences ce qui peut compenser leur plus faible niveau perçu, c'est un phénomène sur lequel nous reviendrons lors de l'analyse des courbes fréquentielles.

Pour la musique d'orgue, un temps de réverbération élevé est nécessaire et les valeurs trouvées semblent bien adaptées à ce type de musique. Pour autant ces valeurs posent un souci d'interprétation : faut-il favoriser le temps de réverbération le plus élevé sachant que celui-ci est déjà conséquent et ce même pour la musique d'orgue, ou doit-on prendre la plus faible afin de ne pas être trop « excessif » dans la réverbération et améliorer peut-être la clarté d'écoute de la musique?

Pour répondre à ces questions nous pouvons nous référer à différentes sources préconisant des temps de réverbération optimaux pour ce type de musique. Malheureusement, comme nous l'avons déjà constaté précédemment, la grande variété d'opinions ne facilite pas l'interprétation.

Le graphique suivant<sup>5</sup> représente les temps de réverbération optimaux pour la musique d'orgue proposés par différents experts en la matière (acousticiens, organistes etc.) en fonction du volume :

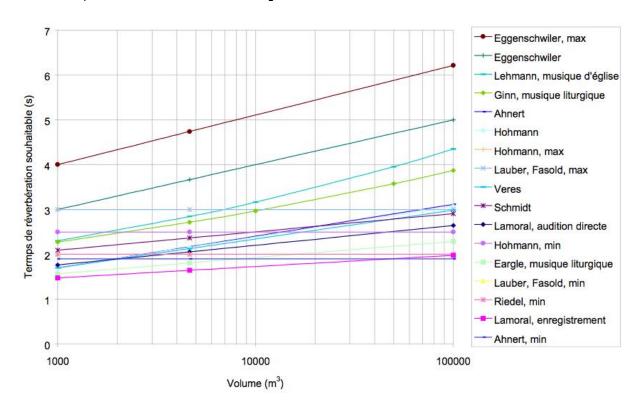


Figure 8 : Temps de réverbération optimaux pour la musique d'orgue

\_

Victor DESARNAULDS, (2002) De l'acoustique des églises en Suisse p.313 – Une approche pluridisciplinaire, Lausanne. http://library.epfl.ch/theses/?nr=25976lang=fre6mode=print

Notre temps de réverbération est relativement élevé, notre volume se situant autour des 5000m<sup>3</sup> il semble que dans notre cas nous surpassons toutes les valeurs préconisées par les acousticiens précédents. Malgré tout, l'ensemble de ces experts semblent proposer des temps de réverbération plus faibles ce qui peux donc nous amener à favoriser la position 2 de l'orque en fond de nef possédant en moyenne une réverbération plus petite.

#### Courbes fréquentielles :

Après avoir obtenu un début de réponse avec une approche globale sur les valeurs moyennes nous pouvons regarder plus en détail la réverbération en fonction de la fréquence pour nos différentes positions sur les courbes précédentes.

Avant toute chose, il est intéressant à noter que l'évolution fréquentielle du temps de réverbération diminue grandement dans les hautes fréquences, conséquence directe du volume de l'abbatiale et de l'absorption de l'air à l'intérieur. De même, l'augmentation en basse fréquence que l'on peut remarquer sur les graphes du T20 et du T30 est aussi caractéristique des grandes églises et notamment des églises en pierre (peu d'absorption du matériau). De ce phénomène, il peut se produire un effet de « masque » : les basses fréquences avec un temps de réverbération élevé peuvent venir « masquer » les hautes fréquences qui elles ont un temps de réverbération nettement plus faible. Bien que ceci puisse donner au son et particulièrement à la musique d'orgue une sonorité chaleureuse, il ne faut pas que cela soit excessif et ainsi éviter d'avoir un effet de masque prononcé.

Dans notre cas, il se trouve que nous nous trouvons déjà dans des réverbérations très élevées, il sera sûrement judicieux, par l'analyse des courbes fréquentielles, de choisir la position ou la décroissance dans les basses fréquences est la plus importante. Nous remarquons d'abord que les deux courbes du T3D sont très proches, ce qui ne nous fournit pas beaucoup de pistes sur le choix à adopter. On constate cependant de subtiles différences en basses fréquences, ce qui est confirmé et même accentué quand on regarde le T2D des deux positions. Hormis quelques pics, le T2D de la position 2 (en fond de nef) semble décroître plus rapidement que pour la position 1 (transept) en basses fréquences.

Afin d'affiner ces observations nous pouvons étudier avec attention les courbes de l'Early Decay Time. Comme nous l'avons vu précédemment, l'Early Decay Time correspond à la décroissance perceptible par l'oreille humaine, son intérêt est donc primordial. Cette fois-ci la différence est notable. La décroissance dans les basses fréquences est nettement plus marquée pour la position 2 en fond de nef que pour la position dans le transept. Ainsi, cette analyse nous orientera une fois de plus vers la position en fond de nef pour un orgue. De plus, un Early Decay Time trop élevé semble, pour un certain nombre de sources, nuire à la clarté de la perception de la musique.

Nous pouvons également faire l'hypothèse de la présence d'un mode propre ou d'une focalisation à la fréquence de 100Hz. En effet, nous constatons un pic de réverbération à cette fréquence. Ces phénomènes seront développés dans les chapitres suivants.

#### 2. Niveaux d'intensité acoustique

Dans notre étude, il s'agira alors pour les deux positions de l'orgue envisagées, de déterminer laquelle offre des niveaux de pression les plus homogènes en fonctions de différentes positions dans l'abbatiale. L'analyse spectrale d'un bruit rose généré par la source omnidirectionnelle a été enregistrée par un analyseur tiers d'octave du sonomètre.

#### 2.1 Protocole de mesures

Nos mesures ont été effectuées en 11 points différents pour chaque position possible de l'orgue afin de cartographier assez fidèlement les niveaux d'intensité acoustique perçus aux différentes fréquences. Pour chaque point de mesure, le sonomètre nous a permis d'obtenir les niveaux d'intensité acoustique (Lzeq) par bandes de fréquences non pondérées. Les points de mesure ont été choisis selon l'emplacement de l'assemblée, des chœurs et du prêtre.

Le schéma suivant représente les points de mesures (L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10 et L11) et les deux positions de la source (S1 et S2):

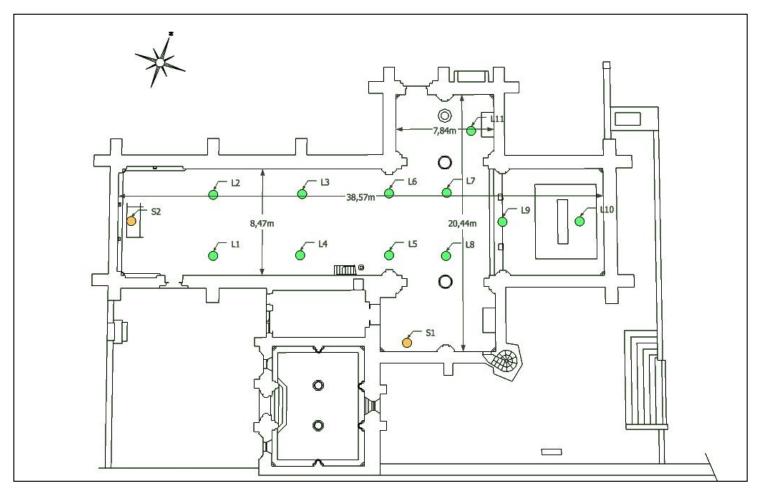


Figure 9 : Schéma de l'abbatiale avec les points de mesures et les deux positions de la source.

#### 2.2 Résultats des mesures

Ci-dessous 2 des résultats obtenus lors de nos mesures après exportation des mesures du sonomètre pour l'analyse en fréquence par tiers d'octave:

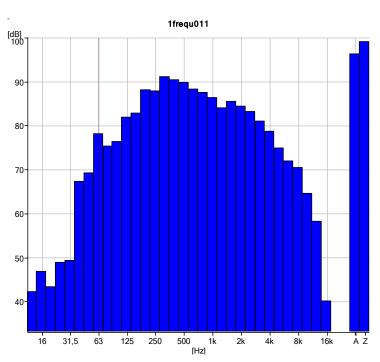


Figure 10 : Analyse en fréquence en tiers d'octave

#### **Source S1 TRANSEPT - POSITION 11**

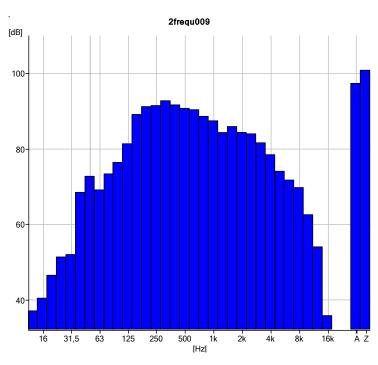


Figure 11 : Analyse en fréquence en tiers d'octave

**Source S2 NEF - POSITION 9** 

#### 2.3 Interprétation et exploitation des résultats obtenus

À l'aide des histogrammes des niveaux de pression, il est intéressant d'observer les pics à certaines bandes de fréquences. Lorsque la source omnidirectionnelle est située dans le fond de nef, 6 positions de mesures dans l'abbatiale ont démontré une augmentation du niveau de pression à 50 Hz soit la position L3, L4, L5, L6, L9 et L11.

Pour le transept, 4 positions de mesures ont créé une augmentation du niveau de pression à 63 Hz soit la position L7, L8, L10 et L11. Il est probable qu'un mode propre soit favorisé à ces endroits. De plus, en calculant la distance qui sépare les deux murs parallèles et opposés dans le transept, la fréquence de 16,64 Hz a une longueur d'onde de même grandeur. Il se crée donc possiblement des ondes stationnaires aux fréquences de 16 Hz, 31,5 Hz, 63 Hz. Selon M. Beckers: «Il arrive souvent dans les églises que l'une des notes de l'orgue semble mieux soutenue que ses voisines, et ceci parce qu'elle correspond à la fréquence d'un mode propre isolé qui s'en trouve sollicité. Ce phénomène advient surtout pour les sons graves, car les modes propres sont de plus en plus proches lorsque la fréquence augmente jusqu'à devenir indiscernables » <sup>6</sup>

Soit c =  $(\gamma R T)^{1/2}$  = 340,17 m/s, la vitesse du son dans l'abbatiale

Avec une longueur de 20,44m dans le transept:  $340,17 / 20,44 = 16,64 \text{ Hz} \approx 31,5 \text{ Hz} \approx 63 \text{ Hz}$ 

Une autre observation soutient nos hypothèses en faisant la différence entre les niveaux sonores perçus par les deux positions de source (Lzeq nef- Lzeq transept).

Les points de mesure L3 et L4 ont été retenus démontrant qu'à 31,5 Hz et 63 Hz, les niveaux d'intensité acoustique sont étrangement plus élevés lorsque le son provient du transept même si la source en fond de nef est plus rapprochée de ces points de mesures!

De plus, il est possible de comparer le niveau sonore dans l'abbatiale en fonction de la distance des 2 sources SI et S2. La page suivante présente les niveaux sonores en fonction de la distance.

3 pos		diff
ins	nef	
41.75	38.63	-3.12
44.13	48.79	4.66
43.42	46.58	3.16
47.35	52.3	4.95
54.54	53.9	-0.64
72.36	65.66	-6.7
67.85	72.55	4.7
71.74	70.68	-1.06
72.61	75.41	2.8
78.55	75.82	-2.73
78.82	82.3	3.48
82.32	87.28	4.96
86.77	91.5	4.73
88.37	95.46	7.09
91.05	93.89	2.84
89.5	93.66	4.16
90.12	92.75	2.63
88.22	92.2	3.98
87.37	91.56	4.19
85.76	90.35	4.59
83.82	88.06	4.24
85.19	89.9	4.71
84.03	88.74	4.71
82.96	88.61	5.65
80.76	85.66	4.9
77.97	83.08	5.11
73.97	79.27	5.3
71.2	77.45	6.25
69.67	75.57	5.9
63.03	66.77	3.74
56.62	60.17	3.55
36.33	40.11	3.78
31.83	32.77	0.94

Tableau 3 : Différence du niveau de pression entre les 2 sources S1 (trans) et S2 (nef) aux positions L3 et L4.

17

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Benoît BECKERS, (1992) Acoustique des salles, Étude numérique et expériementale de l'aspect temporel, Liège. http://www.heliodon.net/radit/index.html

En observant le graphique du niveau sonore en fonction de la distance pour la source S2 dans le transept, il y a deux points sourds autour de 10,9 m et 14,35 m. Ces deux points correspondent aux points de mesure L3 et L4. Cette observation maintient nos hypothèses et il est probable qu'un mode propre soit favorisé à ces endroits. «Les modes propres ont aussi une influence spatiale: ils modifient la courbe de décroissance du son avec la distance et provoquent l'apparition de points "sourds" alternant avec des points où le son est renforcé.» L'auditeur se retrouvant dans ces positions percevra une baisse de niveau sonore significative (de l'ordre de 4dB) en comparaison à des positions dans l'axe du transept (comme par exemple L7, L8).

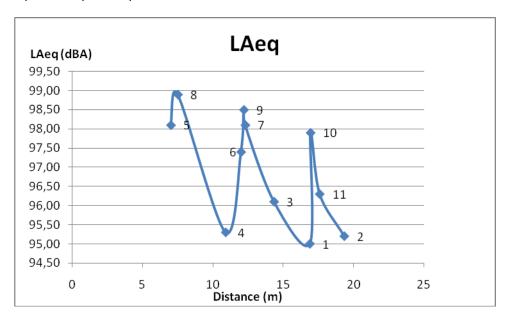
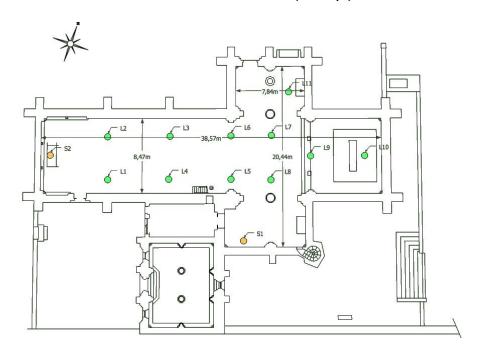


Figure 12 : Niveau sonore dans l'abbatiale en fonction de la distance à la source S1 (Transept)



Remarque: Les murs n'ont pas été pris en compte dans nos calculs de distance pour les positions L1, L2, L3, L4, L5, L6 et L10.

18

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Benoît BECKERS, (1992) Acoustique des salles, Étude numérique et expériementale de l'aspect temporel, Liège. http://www.heliodon.net/radit/index.html

La courbe du niveau sonore en fonction de la distance pour la source S1 en fond de nef démontre bien une décroissance du niveau sonore plutôt stable en fonction de la distance. Il est donc intéressant de se pencher sur le niveau équivalent moyen et de son écart-type pour démontrer l'homogénéité sonore dans l'abbatiale.

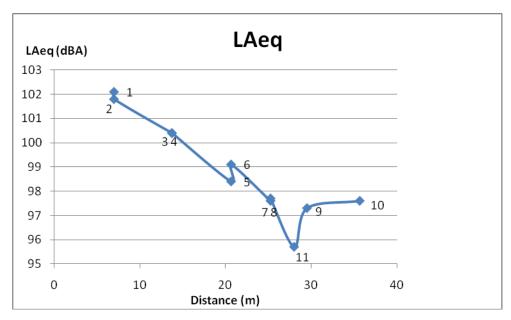
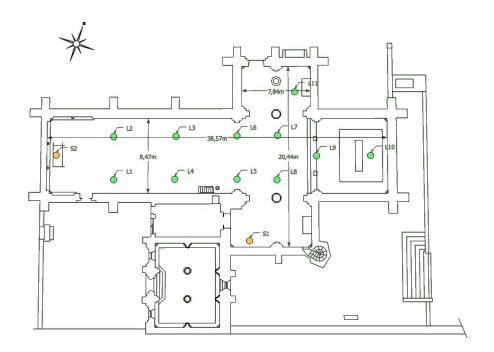


Figure 13 : Niveau sonore dans l'abbatiale en fonction de la distance à la source S2 (Nef)



#### 3. Homogénéité sonore

Une bonne répartition du son est essentielle pour une perception homogène de la musique par l'assemblée. L'orgue doit être entendu partout dans l'abbatiale (en particulier au niveau de l'assemblée) et idéalement de la même manière. Dans l'abbatiale, l'assemblée est disposée sur deux rangées (droites et gauches) de part et d'autre de l'allée centrale dirigée vers l'autel. Il est interessant de se demander si le public placé à gauche entendra la même chose que celui placé à droite (ce qui est souhaitable).

A priori, la symétrie de l'architecture et la symétrie dans la position de l'orgue entrainent une meilleure homogénéité qui privilégierait un orque dans la nef.

Le niveau sonore évalué est le LAeq, niveau sonore équivalent (moyenné) en dBA (pondération du décibel adaptée à la perception de l'oreille humaine). Nous avons comparé l'écart-type du niveau de pression à différentes positions afin d'illustrer l'homogénéité du signal émis. Plus l'écart-type sera faible, plus le niveau sonore sera homogène. Nous remarquons tout d'abord un niveau global plus élevé pour la source située dans la nef, cela est sans doute dû à un champ direct plus important sur la majorité des positions de mesures considérées.

De plus, on voit aussi que le niveau sonore global LAeq ne change pas en comparant le coté gauche ou droit de l'abbatiale. Il y a donc une homogénéité gauche/droite du niveau équivalent permettant de conclure que l'auditeur entendra le même volume global qu'il se place à droite ou à gauche dans l'assemblée et ce, quelque soit la position de l'orgue. Il reste maintenant à voir si cette observation reste stable à différentes fréquences.

Pour déterminer l'homogénéité gauche et droite par fréquence, nous avons comparé les spectres obtenus aux positions 3 et 4 (respectivement gauche et droite quand on se place face à l'autel).

En calculant la différence « delta » des niveaux à chaque fréquence entre ces deux positions de mesures, il est probable de trouver une valeur moyenne proche de D si la répartition est assez homogène.

Les calculs de niveau par fréquence à ces deux positions sont répertoriés dans le tableau à la page suivante.

(Note: Delta= LZeq 3- Lzeq 4)

	Transept							
Frequency	Lzeq 3	Lzeq 4	Delta					
12,5Hz	41,75	38,07	3,68					
16Hz	44,13	39,92	4,21					
20Hz	43,42	41,11	2,31					
25Hz	47,35	46,44	0,91					
31,5Hz	54,54	53,34	1,2					
40Hz	72,36	67,91	4,45					
50Hz	67,85	69,74	-1,89					
63Hz	71,74	72,93	-1,19					
80Hz	72,61	72,93	-0,32					
100Hz	78,55	75,7	2,85					
125Hz	78,82	77,6	1,22					
160Hz	82,32	83,55	-1,23					
200Hz	86,77	86,93	-0,16					
250Hz	88,37	87,81	0,56					
315Hz	91,05	90,43	0,62					
400Hz	89,5	89,97	-0,47					
500Hz	90,12	88,57	1,55					
630Hz	88,22	86,63	1,59					
800Hz	87,37	86,19	1,18					
1kHz	85,76	85,26	0,5					
1,25kHz	83,82	82,46	1,36					
1,6kHz	85,19	85,17	0,02					
2kHz	84,03	83,4	0,63					
2,5kHz	82,96	82,53	0,43					
3,15kHz	80,76	80,31	0,45					
4kHz	77,97	77,48	0,49					
5kHz	73,97	73,01	0,96					
6,3kHz	71,2	69,82	1,38					
8kHz	69,67	68,12	1,55					
10kHz	63,03	60,27	2,76					
12,5kHz	56,62	52,37	4,25					
16kHz	36,33	33,91	2,42					
20kHz	31,83	31,71	0,12					
		Moyenne	1,16					
		écart type	1,53					

	N	ef	
Frequency	Lzeq 3	Lzeq 4	Delta
12,5Hz	38,63	38,46	0,17
16Hz	48,79	48,09	0,7
20Hz	46,58	47,92	-1,34
25Hz	52,3	52,29	0,01
31,5Hz	53,9	53,25	0,65
40Hz	65,66	68,1	-2,44
50Hz	72,55	71,73	0,82
63Hz	70,68	70,57	0,11
80Hz	75,41	76,78	-1,37
100Hz	75,82	77	-1,18
125Hz	82,3	81,7	0,6
160Hz	87,28	87,55	-0,27
200Hz	91,5	92,57	-1,07
250Hz	95,46	95	0,46
315Hz	93,89	94,66	-0,77
400Hz	93,66	94,58	-0,92
500Hz	92,75	93,44	-0,69
630Hz	92,2	91,88	0,32
800Hz	91,56	91,73	-0,17
1kHz	90,35	89,72	0,63
1,25kHz	88,06	87,71	0,35
1,6kHz	89,9	89,48	0,42
2kHz	88,74	88,44	0,3
2,5kHz	88,61	88,48	0,13
3,15kHz	85,66	85,65	0,01
4kHz	83,08	83,24	-0,16
5kHz	79,27	78,85	0,42
6,3kHz	77,45	77,79	-0,34
8kHz	75,57	76,05	-0,48
10kHz	66,77	67,58	-0,81
12,5kHz	60,17	61,33	-1,16
16kHz	40,11	40,43	-0,32
20kHz	32,77	32,7	0,07
		Moyenne	-0,22
		écart type	0,75

Tableau 4 : Ecart-type et niveau sonore équivalent des 2 sources S1 (transept) et S2 (nef) aux positions L3 et L4.

On note que la moyenne de cette différence « delta » est la plus proche de O pour la position en fond de nef. De plus, l'écart type de delta est le plus faible pour cette position. Cela signifie que les valeurs de delta restent groupées autour de O (donc : LZgauche ≈ LZdroite ; ce qui est souhaité). Pour la source dans la nef, les niveaux sont répartis uniformément du coté gauche et droit de l'assemblée et ce, quelque soit les fréquences. La modification de spectre est à peine perceptible étant donné que les variations de niveaux restent inférieures à 1 dB (La plus petite variation de niveau perceptible par l'oreille humaine). Pour un orgue dans la nef, un auditeur ne verra aucune différence de timbre ou de niveau global qu'il soit placé à gauche ou à droite. C'est donc une position intéressante d'un point de vue de l'homogénéité sonore.

Il est moins évident de se prononcer lorsque la source est dans le transept. En effet, l'auditeur pourra noter une petite différence dans les bandes de fréquences entre 500HZ à 800Hz où l'écart entre les positions droite et gauche est supérieur à 1 dB. Cela peut donc modifier le timbre perçu par l'auditeur. Avec une position dans le transept, il est donc possible qu'il y ait plus de focalisations indésirables.

#### 4. Réflexions et focalisations

Les focalisations sont un phénomène dans lequel des ondes sonores, après réflexion sur un obstacle (en l'occurrence une paroi) convergent vers une position précise, s'accumulant en une sorte de foyer. Certaines positions au sein de l'édifice risquent alors d'être « privilégiées » (et donc d'autres délaissées) ou trop accentuées au niveau acoustique par rapport à d'autres, cela dépendant de la position même de l'orgue dans l'abbatiale. En général, pour avoir une bonne acoustique, le son doit être bien distribué ou diffusé dans la salle. Il faut donc minimiser la concentration du rayonnement acoustique en certains points de l'espace.

Les deux figures ci-dessus permettent de visualiser simplement le champ direct et la première réflexion. Avec le logiciel Radit 2D (Room Acoustic Design with the Image Theory in **2D**)8, il est facile de remarquer l'homogénéité de la pression sonore avec la position de la source dans la nef après la première réflexion du son. Cette simulation est un modèle 2D très simplifié. En effet, elle ne prend en compte que le champ direct et la première réflexion (d'où l'apparition de zones blanches qui sont les zones qu'le son n'est pas issu du champ direct ni de la première réflexion). De plus elle ne considère pas les réflexions des voûtes qui sont très importantes pour la spatialisation du son. Il s'agit bien ici d'une coupe d'une vue en plan de l'abbatiale. Cette modélisation est globalement cohérente avec la répartition des niveaux que nous avons obtenue par la mesure. Elle offre aussi un avantage visuel de l'homogénéité sonore. (Source positionnée dans le fond de la nef)

De plus, en considérant les hautes fréquences émises par les deux sources, nous pouvons remarquer un phénomène de diffraction selon l'institut IBO<sup>9</sup>. «Because the higher-pitched sounds necessary for clarity do not travel round corners well, an organ should ideally be placed on the main longitudinal axis of the building. (...) Equally, sound generated in a transept (other than extreme bass) also travels poorly round the corner into the nave.»

La position dans la nef est une fois de plus priorisée.

Une étude plus approfondie nous permettrait d'obtenir les réflexions subséquentes et d'observer des points de focalisation.

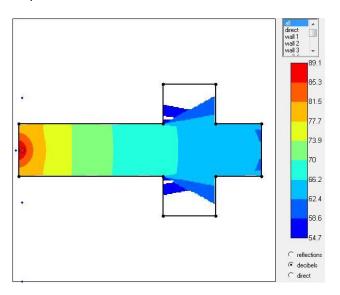


Figure 14 : Visualisation de la pression sonore avec la source dans le fond de la nef avec le logiciel Radit 2D

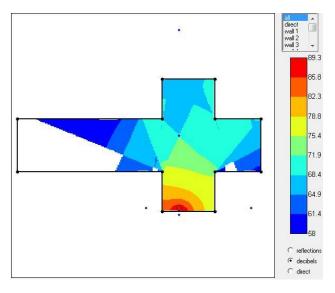


Figure 15 : Visualisation de la pression sonore avec la source dans le transept avec le logiciel Radit 2D

<sup>8</sup> http://heliodon.net/radit/index.html

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> THE INSTITUTE OF BRITISH ORGAN BUILDING, (2004) Acoustics and Church Music, Northwood, UK. http://www.ibo.co.uk/IBD2005/publications/infoSheet/downloads/Acoustics%20and%20Church%20Music.pdf

Il serait très intéressant d'obtenir la réponse impulsionnelle (échogramme) du signal sonore en fonction du temps. Pour aller plus loin dans notre étude, cette analyse nous permettrait de visualiser les réflexions sur le sol, les murs et les voûtes de l'abbatiale. L'échogramme est une représentation donnant en fonction du temps les contributions sonores arrivant en un point d'observation pour une position particulière d'une source de son. <sup>10</sup> Une première contribution provient du rayon sonore direct. Il passe par le plus court chemin entre la source et l'auditeur sans aucune réflexion. Les contributions subséquentes, les rayons indirects, impliquent une ou plusieurs réflexions et parviennent à l'auditeur avec plus de temps puisqu'ils parcourent des chemins nécessairement plus longs que le direct. Arrivant avec un certain retard sur le direct et en ordre dispersé, l'échogramme permet de les visualiser sur une échelle en millisecondes. De ce fait. l'auditeur va percevoir une vaque de ravons sonores. On peut alors se questionner sur la oerceotion. L'oreille humaine est sensible à ce ou'on appelle la structure temporelle, à savoir le rayon direct et les rayons indirects, même si les durées et les temps associés sont faibles. Un écho franc peut être perçu si le temps écoulé entre l'arrivée du rayon direct est celle du premier indirect est supérieur à 60ms. Pour des temps inférieurs, par exemple 45ms, la qualité du son est fortement diminuée. Les limites pour l'intervalle entre le direct et le premier réfléchi, sont de 20 à 30ms pour les auditeurs. Le son est de qualité sonore dite optimale lorsque le rayon direct fusionne avec les rayons réfléchis. Pour des exécutants, ces limites sont rabaissées à 10ms, voire 20ms. En decà, la qualité sonore est amoindrie.

Il serait donc intéressant d'obtenir la licence du logiciel BZ7224 Loging Software (Brüel & Kjaer) permettant d'obtenir la réponse impulsionnelle (Décibels en fonction du temps en millisecondes) pour une analyse plus approfondie des foyers de focalisation.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Dr. M. ROSSI. (1999) Éolise St-Vincent. Étude acoustique de l'orque - emplacement optimum de l'orque. Lausanne.

#### 5. Température et hygrométrie

Une grande différence de température est notable à l'entrée de l'abbatiale. Le 7 mai 2011 à 11h30, l'humidité était de 58% à l'intérieur. L'hygrométrie a une certaine influence par rapport à la propagation sonore et principalement dans l'atténuation des hautes fréquences. En effet plus l'hygrométrie d'un lieu est faible et plus les aigus sont atténués. A l'inverse, ce sont les graves qui sont atténués lorsqu'elle est élevée. Pour une meilleure conservation de l'orque, l'hygrométrie idéale se situe entre 50 et 80%. Nous notons que l'édifice réunit cette condition.

La température intérieure a été évaluée autour des 15°C. Il s'agit de 5°C de moins qu'à l'extérieur. Afin de ne pas perturber l'accordage des différents jeux de l'orgue, il faut donc éviter de le positionner dans une zone présentant des changements de température ou proche de sources de chaleurs ponctuelles. Cela permet aussi une meilleure conservation de l'instrument dans le temps et une meilleure conservation de l'accordage.

La position en fond de nef exposé à l'Ouest est à considérer, car la rosace laissera passer les rayons du soleil en été en fin de journée. Il faudra éviter le rayonnement direct du soleil sur les tubes. «Dans les églises, il en résulte pour l'onde réfléchie la réception plus rapide à l'oreille d'une plus grande étendue du registre réduisant la prépondérance des notes graves, ce qui peut par temps humide ou en été, affecter l'impact psychologique du son de la voix que l'on vient d'émettre.»

En hiver, la température extérieure se rapproche de celle de l'intérieur. Par contre, il sera important de disposer le chauffage loin de l'orgue. De plus, M. Desarnaulds note que la prise d'air à l'intérieur de l'église doit être située également dans une zone aux conditions stables et équivalentes à celles régnant aux abords des tuyaux. 12

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Claude Vernhes, (1999) Étude acoustique église des 3 sœurs, Provence.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Victor DESARNAULDS, (2002) De la position des orgues dans les églises, Lausanne. biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2002/2597/EPFL TH2597 screen.pdf

#### 6. Caractérisation auditive

L'écoute critique de concerts est tout aussi importante que les autres paramètres de notre étude. Elle permet concrètement d'appréhender certains phénomènes acoustiques. L'équipe PR a assisté à un concert à l'abbatiale. Il s'agit du Grand concert de trompes de chasse donné le samedi 9 avril à 18h. (Avec la participation de deux groupes de trompes et plusieurs sonneurs de haut niveau, des champions de France et un champion international, accompagné d'un piano-synthétiseur). Il était possible d'entendre certains modes propres. Il y avait une légère hausse du son à la dernière note soufflée. Auditivement, l'équipe PR a perçu une légère variation de hauteur tonale sans paraître pour autant fausse.

De plus, l'équipe PR s'est rendue à l'abbatiale pour faire un test d'intelligibilité sommaire. Ce test nous a permis de remarquer qu'il est difficile de comprendre un interlocuteur lorsqu'il est éloigné dans l'abbatiale. Les forts temps de réverbération brouillent le signal transmit.

L'équipe PR a contacté un facteur d'orgue, M. Gaillard afin de connaître son avis concernant les deux positions analysées et suggérées par l'association des orgues pour Saint-Jean-aux-Bois. M. Gaillard explique qu'un orgue nécessite des modifications après son installation. Cela consiste en une prospection auditive de l'instrument. «On le fait jouer et il est possible de modifier l'harmonie selon plusieurs méthodes; j'ai beaucoup d'expérience dans le domaine!» La longueur des tuyaux est un des paramètres qu'il est possible de modifier. Selon lui, il n'y a rien de scientifique à propos de l'installation d'un orgue, mais il s'agit de bien utiliser son oreille!

Par ailleurs M. Gaillard a appuyé sur le fait qu'un surplus de chauffage peut entraîner une forte dilatation du bois, il en va de même pour une hygrométrie élevée.

#### 7. Modes propres de l'édifice

Une forte réflexion peut conduire à ce que l'onde réfléchie revienne en phase avec l'onde directe, augmentant alors l'intensité du son, ou en opposition de phase en « l'annulant » presque. Charlin précise que dans ce dernier cas : « on continue à entendre, mais ce qu'on entend, ce n'est plus le "son fondamental" qui est réellement annulé, mais les harmoniques du tuyau qui subsistent. Dans ces conditions-là, l'instrument est franchement dénaturé ».

Ce phénomène est celui des ondes stationnaires, qui apparait lorsque l'onde émise correspond à un mode propre du volume, et notamment lorsque la longueur d'onde émise devient de l'ordre de grandeur des dimensions du volume. Ce phénomène est surtout présent en basse fréquence du fait des grandes longueurs d'onde dans ce domaine.

L'effet des modes propres est donc qu'il est possible qu'en certaines positions de l'abbatiale, certaines fréquences se trouvent trop « privilégiées » ou bien trop « assourdies » par rapport à d'autres. Finalement, « le phénomène le plus désagréable se produit lorsqu'une des fréquences de résonance de l'espace est très voisine de celle de la source ». <sup>13</sup> Ainsi il est déconseillé de placer l'orgue dans une position présentant un ou quelques modes propres trop importants. Il faut favoriser une position excitant le maximum de modes propres simultanément.

Les légères variations de hauteur tonale perçue par l'équipe PR lors du Grand concert de trompes (notamment le fait que certaines notes semblaient à leur interruption se « réfugier » et résonner à certaines fréquences) nous a permis auditivement de remarquer l'existence de tels modes propres dans l'édifice.

En ce qui concerne notre étude nous avons pu voir précédemment que plusieurs modes propres gênant ont pu être potentiellement identifiés.

Par exemple, on remarque sur les courbes de réverbération T20 et T30 qu'à 100Hz, un pic de réverbération est constaté. Ceci peut indiquer que nous sommes en présence d'un mode propre à cette fréquence, la grande réverbération témoignant de la forte intensité de cette fréquence particulière par rapport aux autres.

Nous avons aussi remarqué, dans le chapitre 2 sur les niveaux d'intensité acoustique, des possibles phénomènes de résonance à certaines fréquences, notamment à 63Hz pour la source située dans le transept et à 50Hz pour la source en fond de nef, ce qui a pu être remarqué sur les diagrammes en bandes d'octave.

-

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Dr. M. ROSSI, (1999) Église St-Vincent, Étude acoustique de l'orgue - emplacement optimum de l'orgue, Lausanne.

#### 8. Recommandations diverses

#### Concerts

Lors d'un concert, il est préférable que le public se trouve face à l'instrument et non pas dans son dos. Certains organisateurs de concerts d'orgues ont même pensé retourner complètement la situation en positionnant le chœur et les instruments sous l'orgue et en tournant l'assemblée vers le fond de la nef. En effet, pour un éventuel duo orgue/chœur ou un orgue avec d'autres instruments, il faut prendre en compte un phénomène de retard. Les instruments ou chanteurs doivent être capables d'écouter l'orgue et d'être entendus par l'organiste. Pour une meilleure synchronisation, il est possible de placer les musiciens à côté de l'orgue ou au moins à côté de la console d'orgue (place de l'organiste).

#### Pasitian de la cansale

Il est envisageable d'isoler la console. D'après certains spécialistes, l'avantage de séparer la console du buffet et du grand orgue est que l'organiste n'est pas assourdi par le jeu le plus proche de lui. Un des inconvénients serait un léger retard sonore qui n'a pas l'air très gênant d'après les propos des organistes qui ont pu essayer cette configuration.

#### Élévatinn

L'élévation de l'orgue est un autre des paramètres à prendre en compte pour une bonne écoute et une bonne réception de la musique par l'assemblée. « Il faut en effet ménager une hauteur suffisante entre l'instrument et l'assemblée pour diminuer les effets d'atténuation induits par les auditeurs et éviter que ceux-ci ne soit assourdis par le volume sonore et qu'ils puissent profiter du mélange des différents timbres ». L'Ainsi, une élévation de l'orgue permet une meilleure homogénéisation et répartition du niveau sonore dans l'assemblée. De plus, la surélévation permet de favoriser le rayonnement en offrant au son les réflexions nécessaires au bon mélange des différents jeux de l'orgue, apportant alors une meilleure spatialisation du son.

\_

Victor DESARNAULDS, (2002) De l'acoustique des églises en Suisse – Une approche pluridisciplinaire, Lausanne. http://library.epfl.ch/theses/?nr=25976lang=fre6mode=print

#### CONCLUSION

Suite à son étude expérimentale, l'équipe PR priorise l'emplacement de l'orgue dans le fond de la nef après plusieurs observations :

- 1. Temps de réverbération plus faible,
- 2. Meilleure homogénéité,

De plus, par de nombreuses hypothèses, il est probable que des modes propres soient privilégiés lorsque la source est positionnée dans le transept. Nous observons plus de problèmes en position de transept concernant certain phénomènes acoustiques non désirés, mais notre étude ne permet pas de prendre une décision définitive pour le placement des grandes orgues.

Nous souhaiterions néanmoins préciser que le placement d'un orgue dans le fond de la nef s'avère assez complexe du point de vue de l'installation. Il serait souhaitable de mettre en place un aménagement spécifique et adapté. En effet, les tuyaux de l'orgue pourraient être disposés en hauteur de façon à ne pas masquer les arcatures, mais ils devraient également avoir une hauteur restreinte de telle sorte que la rosace reste pleinement apparente. Aussi, du fait du caractère classé de l'édifice, il faudrait faire appel à un architecte en chef des monuments historiques nationaux pour que le projet puisse aboutir. Seul cet architecte pourra donner son accord pour la réalisation du projet puisqu'il remplit une mission d'avis, de conseil et d'assistance auprès des services du ministère de la Culture pour les bâtiments classés.

#### **PERSPECTIVES**

Pour aller plus loin dans cette étude, il serait très intéressant d'intégrer la modélisation 3D (en annexe) de l'abbatiale de Saint-Jean-aux-Bois dans un programme de simulation acoustique. Avec sa géométrie complexe, il serait possible de prédire et d'éviter les défauts graves comme:

- l'écho: répétition d'un son par réflexion sur une paroi.
- la focalisation: concentration du rayonnement acoustique en certains points de l'espace,
- l'ombre acoustique: insuffisance de réflexions primaires en certains endroits de la salle.

Par des constructions géométriques appropriées, il serait possible de trouver les endroits problématiques et ainsi reprendre les mesures à ces endroits pour ensuite discerner les meilleurs emplacements pour le futur orgue, pour des enceintes acoustiques et pour les musiciens de concerts donnés à l'abbatiale.

Nous suggérons l'achat du programme CATT Acoustic 8 (voir annexe) pour la simulation acoustique ainsi que la licence du logiciel BZ7224 Loging Software (Brüel & Kjaer) permettant d'obtenir la réponse impulsionnelle (Décibels en fonction du temps en millisecondes) pour une analyse plus approfondie des foyers de focalisation.

#### **ANNEXES**

### POURSUITE DE L'ÉTUDE

L'équipe PR suggère d'obtenir une licence supplémentaire pour le sonomètre permettant d'obtenir la réponse impulsionnelle (Décibels en fonction du temps en millisecondes) pour une analyse plus approfondie des foyers de focalisation :

• Logiciel BZ7224 Loging Software (Brüel & Kjaer, ~1000 euros)

L'équipe PR suggère le programme informatique de simulation acoustique suivant:

CATT Acoustic 8 (~1200 euros)

# CATT Acoustic 8

peut exporter ses données de géométrie au format DXF, rendant très aisés les échanges avec les logiciels supportant ce format : Autocad et SketchUp (pour lequel euphonia a développé un plugin d'export vers le format GEO CATT, rendant très simples les allers et retours entre les 2 logiciels.)

CATT Acoustic 8 permet de faire des simulations acoustiques offrant:

- · Des échogrammmes complets,
- · Des échogrammes détaillés sur la partie précoce,
- · Des échogrammes "directifs" sur la partie précoce (X, Y, Z),
- · Des statistiques d'impact sur les éléments de parois,
- · Des statistiques sur le libre parcours moyen,
- · Des statistiques sur l'absorption moyenne,
- · Des courbes de durées de réverbération,
- · Des paramètres de calcul proposés par défaut (nombre suffisant de cônes, temps de trajet suivi,..).

L'ensemble des paramètres calculés peut être exporté au format EXCEL.

Avec la version 8e, CATT poursuit l'enrichissement des fonctionnalités offertes dans la présentation et l'analyse des données. Leader dans le domaine de la modélisation de l'acoustique des salles, CATT acoustic accroit ses capacités dans l'analyse des systèmes de sonorisation. Encore plus ouverte aux domaines de la réalité virtuelle (export au format VRML, support des librairies OpenGL, audio-spatialisation dynamique d'un parcours, son surround 5.1), cette nouvelle version de CATT n'en néglige par pour autant l'accroissement des performances de calcul et la validation des résultats des modélisations.

#### INSTRUMENTATION DE MESURE

Nous avons utilisé une enceinte omnidirectionnelle B&K de référence 4296 avec un ampli Et un sonomètre B&K modèle 2250. (Hand-held Analyzers Types 2250)

#### <u>Liste du matériel :</u>

- ❖ Amplificateur (+câbles)
- ❖ Enceinte multidirectionnelle (Boule) (+ câbles)
- Rallonges (si disponibles)
- Casque antibruit
- ❖ 1 ou 2 sonomètre éventuellement
- Pied de micro
- Echelle
- Ordinateur portable
- Hygromètre
- Laser mètre

#### Mesure du temps de réverbération :

Matériel utilisé : Source (pied), sonomètre (pied), ampli

- 2 positions de la source : S1 (transept) et S2 (fond de nef)
- Configuration sonomètre :
- Explorateur de modèle (TR60)
- Temps d'intégration : 10 secondes
- 3 mesures successives par position
- Source : bruit rose
- 4 positions de mesure (M1, M2, M3, M4)
- Démarrage de la mesure à détection de valeur crête 60~80dB
- Hypothèse : (Champ réverbéré)
- Nombre de mesures total: 3\*4\*2 =24 mesures

#### Mesure des niveaux de pression :

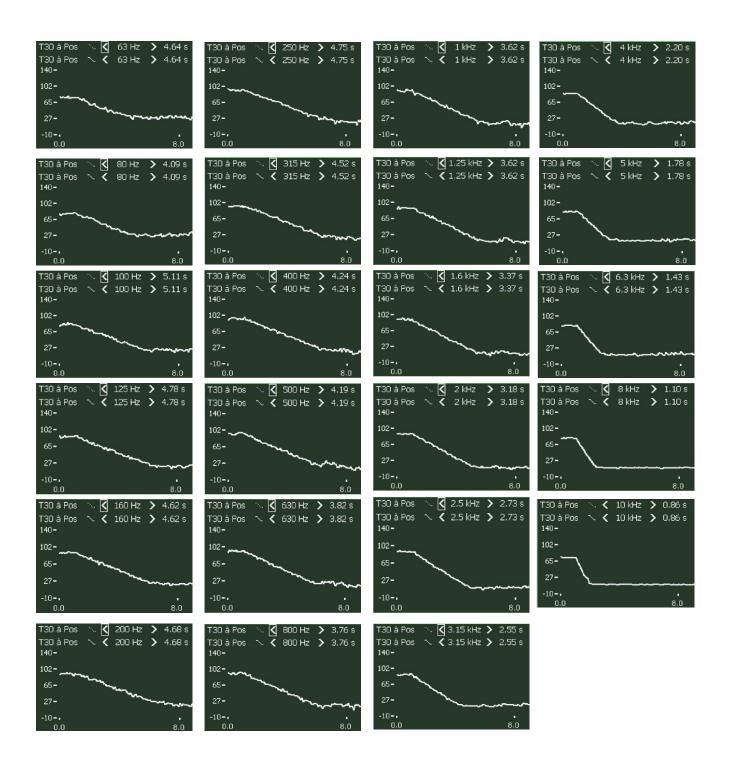
Matériel utilisé : Source (pied), sonomètre (pied), ampli

- 2 positions de sources : SI (transept) et S2 (fond de nef)
- Configuration sonomètre ;
- Explorateur de modèle (Analyse en fréquence)
- Ref source 4296
- Temps d'intégration (10s)
- 3 mesures successives par position
- II positions de mesure (L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11)
- Analyse à deltaF/F=constante
- 1/3 d'octave
- Largeur spectre : 32Hz-16000Hz
- Pondération aucune LZ
- Source : Bruit rose

Nombre de mesures total: 11\*2 = 22 mesures

### TEMPS DE RÉVERBÉRATION PAR BANDES DE FRÉQUENCES

(source S1 - transept, position 3 - 63 Hz à 10 kHz)



#### COMPTE RENDU DU JEUDI 7 AVRIL 2011

#### **PRESENTS**

DELAGE Christian - Ingénieur

LUISIN Philippe - Architecte

MERCIER Tanguy - Etudiant GM

MIVILLE-DESCHENES Philippe - Etudiant GSU

PEYRET Paul - Etudiant GM

RENOT Sophie - Etudiante GSU

#### ASSOCIATION - REFLEXIONS ANTERIEURES

1<sup>ère</sup> Assemblée Générale, le 5 juin 2010.

Diagnostic des techniciens spécialisés en acoustique : étant donné la taille et le volume de l'Abbatiale ainsi que les moyens financiers de l'association, un orgue de 15 jeux serait amplement suffisant. Cela représente une somme approchant les 250000 euros. Le transept serait l'emplacement le plus favorable.

Rencontre antérieure de M. Delage avec Martin Renshaw. Il s'agit d'un Britannique qui démonte, transporte et remonte, à des prix très bas, des orgues dans les églises anglaises. Depuis peu, il s'attaque à la France. Travail et prix très intéressants, cependant le type d'orgue ne semble pas convenir à l'Abbatiale.

Jacques Bouteiller (organiste sur Noyon) et Alain Rémi (trompettiste, chef d'orchestre sur Compiègne et futur directeur du Conservatoire de Compiègne) soutiennent et s'investissent activement pour le projet. M. Bouteiller pense qu'un orgue mixte (orgue comportant une partie numérique) pourrait répondre aux attentes de l'association. Une console mobile pourrait également être intéressante.

Un projet similaire, à savoir pourvoir un édifice religieux d'un orgue, dure entre 3 et 13 ans. L'association s'est donnée pour délai : 2015. C'est très court pour un si petit village (360 habitants). L'association doit récolter des fonds c'est pourquoi elle organise des concerts dans l'Abbatiale, tels que le Concert de Trompes et Piano du 9 avril 2011.

#### OBEJCTIFS DE L'ASSOCIATION

- Reconquête religieuse : prêtres, cœur et pratiquants
- Attraction touristique et culturelle : organisation de visites, concerts, spectacles, ...

#### NOTRE ETUDE

Deux options se présentent à nous :

- Placement de l'orgue dans le transept
   Position la plus judicieuse semble-t-il, la moins complexe.
   Mise en valeur de l'instrument, meilleure acoustique.
- Placement de l'orgue dans le fond de la nef
   PROBLEMES : Arcatures ne pouvant être masquées (monument classé)

  Rosace

Seule possibilité : fixer l'orgue au mur entre les arcades et la rosace, ce qui laisse une marge d'environ 3m. La console devra donc être mobile et séparée de la console. Les plus grands tuyaux devront être disposés aux extrémités du fond de la nef de façon à ne pas « cacher » la rosace. Les plus grands jeux (16pieds) devront être disposés aux extrémités du fond de la nef de façon à ne pas « cacher » la rosace.

#### CE QUI A ETE CONVENU

- Mesures acoustiques : le 7 mai (disposer d'une grande échelle) pour les 2 emplacements
- Modélisation 3D de l'Abbatiale

# MODELISATION 3D DE L'ABBATIALE DE ST-JEAN-AUX-BOIS

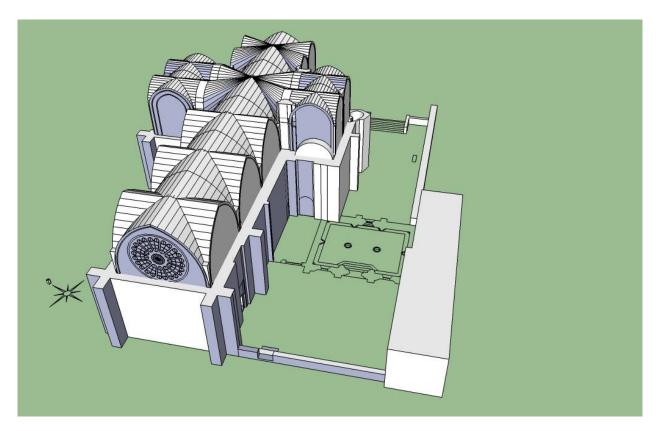


Figure 16 : Visualisation 3D - extérieur (sans toiture)

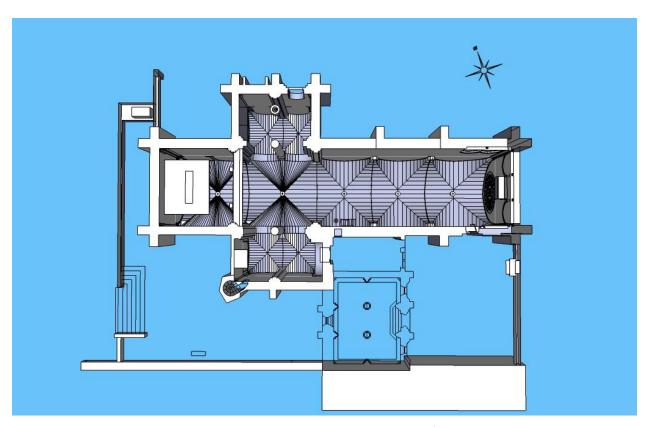


Figure 17 : Visualisation 3D – vue en dessous de l'abbatiale

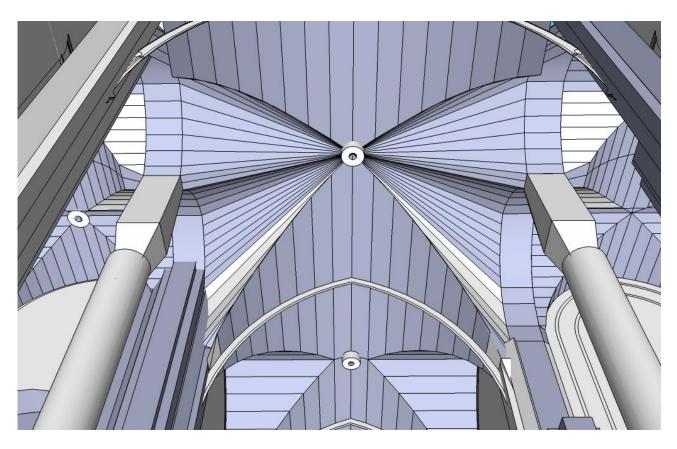


Figure 18 : Visualisation 3D – voûte centrale d'ogive sexpartite

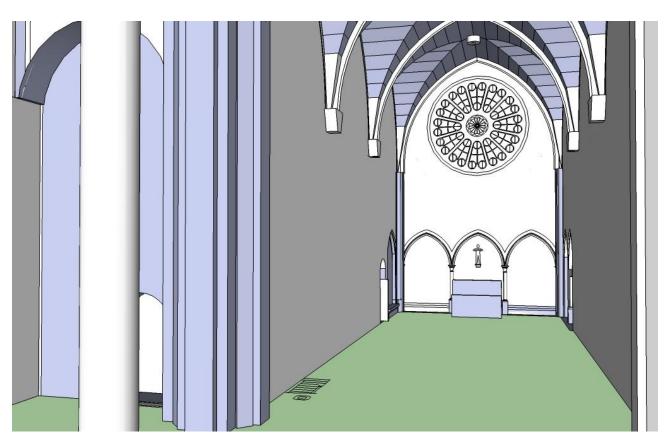


Figure 19 : Visualisation 3D – vue de l'autel - croisées d'ogives et rosace

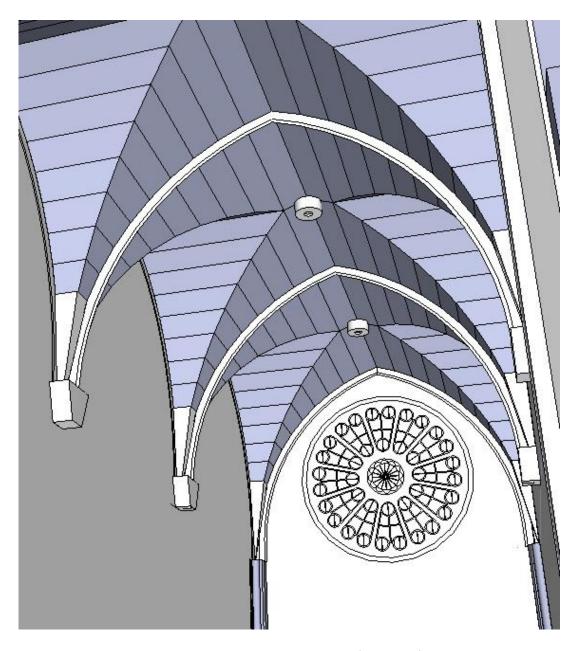


Figure 20 : Visualisation 3D – Rosace en fond de nef

### **BIBLIOGRAPHIE**

Victor DESARNAULDS, (2002) De la position des orgues dans les églises, Lausanne.

biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2002/2597/EPFL\_TH2597\_screen.pdf

Victor DESARNAULDS, (2002) De l'acoustique des églises en Suisse – Une approche pluridisciplinaire, Lausanne.

http://library.epfl.ch/theses/?nr=2597&lang=fre&mode=print

THE INSTITUTE OF BRITISH ORGAN BUILDING, (2004) Acoustics and Church Music, Northwood, UK.

 $http://www.ibo.co.uk/IBO2005/publications/infoSheet/downloads/Acoustics\%2\,Oand\%2\,OChurch\%2\,OMusic.pdf$ 

Claude VERNHES, (1999) Étude acoustique église des 3 sœurs, Provence.

Dr. M. ROSSI, (1999) Église St-Vincent, Étude acoustique de l'orque - emplacement optimum de l'orque, Lausanne.

Michèle CASTELLENGO, (2002) Étude de l'orgue, présentation des recherches, Paris.

Benoît BECKERS, (1992) Acoustique des salles, Étude numérique et expérimentale de l'aspect temporel, Liège.

http://www.heliodon.net/radit/index.html