

RAPPORT FINAL PRÉSENTÉ PAR :

MIVILLE-DESCHÊNES Philippe,

Équipe de recherche Avenues GSU, Compiègne

Étudiant en Génie de la Construction, ÉTS, Montréal



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

Sous la direction de M. BECKERS Benoit,

Recherche en acoustique architecturale

Présentée à l'association « Des orgues pour Saint-Jean-aux-Bois »

Génie des Systèmes Urbains

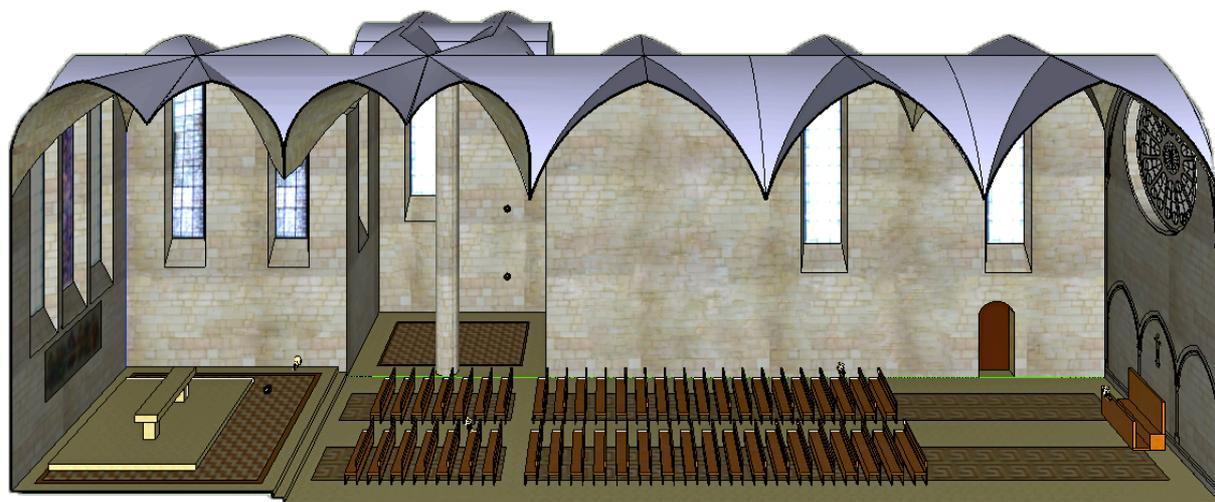
2011-2012

REMERCIEMENTS

Gracieusement offert par l'association « Des orgues pour Saint-Jean-aux-Bois », le logiciel *CATT Acoustic™ v9 Prediction* pour la simulation acoustique permet, dans cette deuxième étude, de faire une analyse plus approfondie du champ sonore dans l'abbatiale. Que Messieurs Christian Delage, Jacques Boutellier, Jean-Marc Rey, et Philippe Luisin, membres de cette association soient ici remerciés. Ce projet n'aurait pu avoir lieu sans leur soutien et leur intérêt pour la recherche.

Que Messieurs Benoit Beckers et Frédéric Monette, superviseurs du stage à l'Université de Technologie de Compiègne soient également remerciés ainsi que Jean-Michel Ville et Jean-Marc Gherbezza pour le prêt de matériel au département de Génie Mécanique en filière Acoustique.

Un remerciement spécial est adressé à Michèle Castellengo pour le prêt d'enregistrements d'orgue numérique en salle anéchoïque.



Vue perspective en coupe vers côté Sud de l'abbatiale

Sommaire

REMERCIEMENTS	i
INTRODUCTION	iii
DÉMARCHE ACOUSTIQUE	1
1. MÉTHODOLOGIE DE LA MODÉLISATION DE L'ABBATIALE DE SAINT-JEAN-AUX-BOIS	2
1.1 Positionnement des récepteurs	2
1.2 Modélisation et positionnement des sources	2
1.3 Entrée des paramètres des matériaux	3
1.4 Autres paramètres	3
2. RÉSULTATS DE LA RÉVERBÉRATION	4
2.1 Analyse des résultats	4
2.2 Simulation d'un public, salle comble	4
2.3 Contrôle de la réverbération par absorption	5
3. GÉOMÉTRIE ET HOMOGENÉITÉ	5
3.1 Distribution du champ sonore	6
3.2 Focalisations	7
4. HAUTEUR DE LA SOURCE	8
4.1 Clarté et Spatialité	8
5. PERCEPTIONS SUBJECTIVES	10
CONCLUSION	11
ANNEXES	12
INSTRUMENTATION DE MESURE	12
RÉSULTATS <i>CATT ACOUSTIC™</i> (SURFACES ET ABSORPTION)	12
RÉSULTATS <i>CATT ACOUSTIC™</i> (SOURCE S1 à 2m, RÉCEPTEUR R1)	13
RÉSULTATS <i>CATT ACOUSTIC™</i> (SOURCE S2 à 5m, RÉCEPTEUR R1)	14
BIBLIOGRAPHIE	15

INTRODUCTION

Présentation générale du projet de l'association

« Des orgues pour Saint-Jean-aux-Bois »

L'association « Des orgues pour Saint-Jean-aux-Bois », fondée en 2010, a pour vocation de concevoir, financer, et installer des orgues dans la remarquable abbatale du 12^e siècle de ce petit village de 350 habitants, perle historique au cœur de la forêt de Compiègne. Au-delà d'un support aux offices religieux, l'objectif est de contribuer à l'animation culturelle et touristique de la commune et de sa région, par l'organisation de concerts et l'éducation musicale, en liaison avec le Conservatoire de musique de Compiègne. L'association s'est donné pour objectif de réaliser pour fin 2015 au plus tard un instrument de qualité dont le coût devra être inférieur à 250 K€HT.

Lancée sur l'hypothèse volontairement prudente d'un orgue classique à tuyaux d'une quinzaine de jeux, avec console à 2 claviers intégrée dans le buffet de l'appareil, le projet évolue vers une conception innovante « d'orgue mixte ».

L'idée consiste à associer des jeux à tuyaux placés dans un buffet traditionnel, à une console numérique mobile au sol pouvant, lors de concerts, rejoindre l'orchestre dans le chœur, l'organiste étant alors au contact du public et des autres musiciens. Les enceintes audio des jeux numériques sont logées dans le buffet, à l'arrière des tuyaux. Les récents développements en matière d'instrumentation et de contrôle des variations de température et d'humidité développés par la société Allen¹, référence internationale de l'orgue numérique, garantissent la bonne coordination musicale des jeux numériques et des jeux à tuyaux. Un instrument de ce type, très convaincant, a été visité début 2011 à Tröna, au nord de Stockholm en Suède.

En ce début d'année 2012, l'association travaille, en coordination avec la société Allen et plusieurs facteurs d'orgues intéressés par cette innovation, sur l'hypothèse d'une dizaine de jeux à tuyaux associés à une console numérique de 30 à 40 jeux, et dont le coût total serait inférieur à celui de l'orgue traditionnel de 15 jeux!

Soucieuse de déterminer l'emplacement optimal pour cet ensemble d'orgue mixte, l'association a proposé à l'UTC – Université de Technologie de Compiègne – de mener une étude acoustique. Compte-tenu de la géométrie générale de l'édifice, avec sa nef unique et ses nombreux vitraux périphériques de grande hauteur, seules deux positions sont sérieusement envisageables : en fond de nef, côté Ouest, ou en transept Sud dans l'espace sans vitrail voisin de la sacristie.

Une première étude menée par 4 étudiants : Paul Peyret, Tanguy Mercier, Philippe Miville-Deschênes et Sophie Renot, a été remise au premier semestre 2011. Elle a démontré l'excellente qualité acoustique générale de l'édifice et a validé la possibilité des deux implantations.

¹ <http://www.allenorgan.com/>

À la réflexion, la position « fond de nef » (figure 1), qui pourrait paraître plus attractive et spectaculaire, cumule plusieurs inconvénients :

1. Le respect de la grande rosace et des élégantes arcatures en partie basse du mur, réduit très sensiblement la zone d'implantation possible pour l'instrument, et nécessite la construction onéreuse d'une tribune.
2. L'importante variation thermique due au fort effet d'ensoleillement de cette rosace plein Ouest, peut engendrer des difficultés répétées de réglage de l'orgue à tuyaux.
3. La distance de l'instrument par rapport au chœur, lieu d'accueil de l'orchestre, est d'environ 35 m, introduisant un déphasage de l'ordre du dixième de seconde dans la perception du son par les musiciens, qui devient dommageable.

La deuxième phase d'étude, objet du présent rapport, est menée par Philippe Miville-Deschênes, l'un des membres de la première équipe. Cette étude approfondit l'analyse de la qualité acoustique obtenue avec un buffet d'orgue dans le transept Sud, côté sacristie.

Le travail proposé vise à intégrer la géométrie complète de l'abbatiale en 3 dimensions dans un logiciel de simulation acoustique qui analyse la distribution du champ sonore, ses réflexions et ses focalisations, avec par ailleurs la possibilité de faire varier la hauteur de la source sonore pour optimiser la position du buffet contre le mur.



Figure 1 : Visualisation 3D – Rosace et arcatures en fond de nef

DÉMARCHE ACOUSTIQUE

La qualité acoustique d'une salle se définit par diverses observations. De l'enveloppe du bâtiment jusqu'au dimensionnement des bancs, la modélisation de l'abbatiale de Saint-Jean-aux-Bois permet d'analyser la distribution du champ sonore et certains comportements propres à cette enceinte. « La réponse impulsionnelle est considérée maintenant comme la source de base d'information concernant les propriétés audibles du champ acoustique dans une salle » (Gramez, 2010). Il s'agit d'une impulsion sonore de courte durée provenant d'une source omnidirectionnelle. La sphère sonore pulsante émise par la source se propage dans toutes les directions. Cette information de base permet d'observer le premier son reçu par l'auditeur ainsi que les autres parties de l'onde ayant subi des réflexions sur les surfaces de son environnement.

L'approche géométrique du logiciel *CATT Acoustic*² permet de construire des échogrammes² sur la base du tir de cônes énergétiques. Certains critères sont alors exprimés à la fois sur la base de décroissance énergétique des rayons ainsi que sur la base d'une décroissance calculée à partir des réponses impulsionnelles synthétisées. Les temps de calculs prennent de 15 minutes à 2 heures selon les résultats requis. Le premier algorithme de *CATT Acoustic*TM a été utilisé avec une moyenne de 33000 rayons lancés pour une durée de 1 seconde sur l'échogramme.

Ce rapport d'étude acoustique de l'abbatiale présente d'abord la méthodologie de modélisation employée, les temps de réverbération et ses caractéristiques géométriques particulières. La hauteur de la source sera ensuite étudiée en fonctions de divers critères acoustiques. De plus, comme chaque personne peut définir la qualité acoustique en fonction du degré de confort qu'il perçoit, il sera intéressant de retourner dans l'abbatiale et de diffuser un son d'orgue préalablement enregistré en salle anéchoïque. Cette démarche expérimentale découle d'une présentation de la première étude expérimentale à la conférence « Faites de la Mesure 2011 » chez *Brüel & Kjaer*³. Des perceptions subjectives seront finalement présentées.

² Niveau acoustique du son dont l'unité est le décibel en fonction du temps en millisecondes.

³ Présentation de l'*Étude acoustique du placement de grandes orgues dans l'abbatiale de Saint-Jean-aux-Bois* [23 juin 2011 à Mennecy, 16h30] <http://www.bksv.com/>

1. MÉTHODOLOGIE DE LA MODÉLISATION DE L'ABBATIALE DE SAINT-JEAN-AUX-BOIS

A partir des plans de l'abbatiale relevés par M. Luisin, le modèle 3D a pris naissance dans le logiciel *Google Sketchup 8*. Une fois la modélisation complétée, un long processus débute afin de ne pas avoir d'erreur d'importation dans le logiciel *CATT Acoustic™*. Le transfert des informations se fait via un « plugin » Sk2Geo version 1.1.6 @EUPHONIA⁴. Un total de 5 récepteurs, 4 sources, 3760 points et 2558 faces est importé pour la création d'un modèle de simulation acoustique. Les erreurs rencontrées sont principalement générées par la complexité de l'architecture de l'abbatiale présente dans les ogives sexpartite au croisement du transept et de la nef.

1.1 Positionnement des récepteurs

Les calculs ont été effectués en différents points appelés récepteurs (R1, R2, R3, R4 et R5). Ils ont été positionnés à 1,2 mètre du sol et à une distance des surfaces réfléchissantes du quart de la longueur d'onde, correspondant à environ 1 mètre. Ces distances ont été choisies selon la réglementation ISO3382, pour les mesures du temps de réverbération⁵. De plus, leurs différentes positions tiennent compte de la distribution sonore dans l'espace étudié. Dans le cas présent, il y a un récepteur positionné dans le chœur et deux dans chaque axe de l'abbatiale, soit deux dans le transept et deux dans la nef.

1.2 Modélisation et positionnement des sources

La source virtuelle doit se rapprocher le plus possible de celle de l'orgue tant sur le plan de la puissance que sur la bande de fréquences qui sera excitée. La tessiture de l'orgue est la plus large de tous les instruments de musique et le registre des autres instruments se retrouve dans cette échelle de notes. La tessiture d'un orgue peut aller de 16,5 Hz (premier do grave du jeu de 32 pieds) à 16 000 Hz.

Quatre sources omnidirectionnelles ont été positionnées dans le modèle 3D émettant un bruit rose de 90 dB à 1 kHz (S0, S1, S2 et S3). 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. Ce type de bruit avait d'ailleurs été utilisé lors de la première étude expérimentale *in-situ*. La première source (S0) est positionnée sur l'autel. Elle permet d'analyser le mélange sonore entre l'orgue et un musicien ou une voix humaine se trouvant à cet endroit. Les trois autres sources (S1, S2 et S3) se retrouvent dans la partie Sud du transept à 2m, 5m et 8m du sol pour observer les différences perçues en installant l'orgue à différentes hauteurs à cet endroit. Ces trois sources sont situées au centre de l'espace dédié à l'orgue ne pouvant faire plus de 6 m de large. Compte-tenu de la taille possible du futur instrument, une seule source est nécessaire pour simuler le son de l'orgue dans l'abbatiale (Martellota, 2009). La figure 2 présente la distribution des sources et des récepteurs positionnés dans le modèle.

⁴ <http://www.euphonia.fr/>

⁵ ISO-3382. Acoustics – measurements of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. Geneva, Switzerland : ISO ; 1997

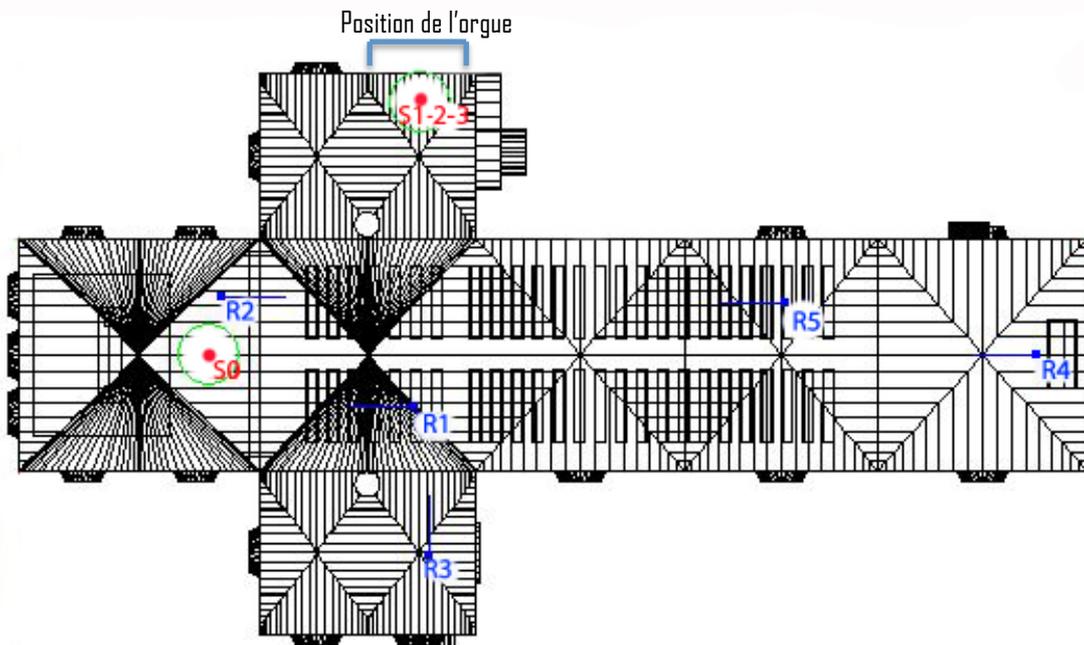


Figure 2 : Distribution des sources (S0, S1, S2, S3) et des récepteurs (R1, R2, R3, R4, R5)

1.3 Entrée des paramètres des matériaux

L'absorption acoustique est une transformation d'une partie de l'énergie acoustique en énergie mécanique. Ce paramètre est grandement lié au temps de réverbération d'une salle. La modélisation a été ajustée en modifiant les coefficients d'absorption des différents matériaux présents dans l'abbatiale sur les octaves centrés sur 125 à 4 kHz. La plupart des faces ont un coefficient correspondant à la pierre calcaire. Les choix d'absorption pour les différents matériaux composant l'abbatiale ont été inspirés et choisis via le logiciel *AlphaDoc*⁶ de M. Erwan Jacq ainsi qu'une étude de Xavier Quelen sur les restitutions d'ambiances sonores dans les abbayes cisterciennes (Quelen, 2007). Les coefficients d'absorption sélectionnés pour le modèle virtuel sont présentés au tableau 1.

Tableau 1 : Coefficients d'absorption des divers matériaux

Type de surface	Bandes de fréquences					
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Plancher, Couleur_C04 { 255 204 153 }	3%	3%	3%	4%	4%	4%
Murs, Couleur_C03 { 255 178 101 }	3%	3%	3%	4%	4%	4%
Vitreaux, Couleur_009 { 0 0 0 }	27%	27%	33%	34%	35%	35%
Bancs d'église (vide), Couleur_B18 { 102 56 40 }	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Bancs d'église (occupé), Couleur_B18 { 102 56 40 }	57%	61%	75%	86%	91%	86%
Portes en bois, Couleur_B22 { 51 20 10 }	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Coefficient d'absorption global (vide)	7,2%	7,2%	7,6%	8,4%	8,5%	8,5%
Coefficient d'absorption global (occupé)	12,5%	13,1%	15,5%	18,0%	18,8%	18,0%

1.4 Autres paramètres

Les calculs de *CATT Acoustic*TM prennent en compte la température, l'humidité et la masse volumique de l'air ambiant. Les mesures prises *in-situ* servent de référence pour le modèle virtuel, soit 15°C, 58 % d'humidité et 1,2 kg/m³. De plus, l'absorption de l'air est estimée.

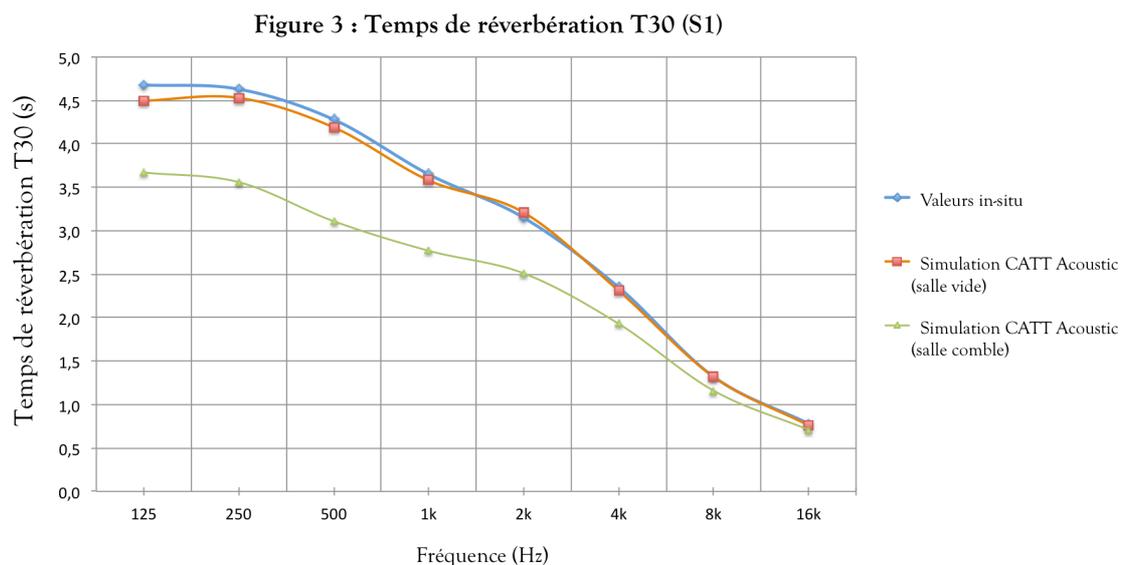
⁶ http://www.freeacoustics.com/logiciels_fr.html#AlphaDoc

2. RÉSULTATS DE LA RÉVERBÉRATION

La réverbération est un phénomène de persistance du son dans un espace clos après l'arrêt d'émission sonore. Elle représente le degré de vivacité de la salle. En acoustique, il s'agit concrètement du temps que met le niveau sonore à décroître d'un certain nombre de décibels. Cette étude est faite sur une décroissance de 30 dB (T-30).

2.1 Analyse des résultats

Les mesures *in-situ* révèlent que le temps de réverbération T-30 sur une bande haute fréquence entre 500 Hz et 1000 Hz est évalué à 3,88 secondes avec une source dans le transept. Pour la musique d'orgue, un temps de réverbération élevé entre 3 et 4 secondes est souhaitable et les valeurs trouvées semblent bien adaptées à ce type de musique. Il est donc possible de comparer la réverbération mesurée à celle calculée par *CATT Acoustic™*. Les résultats obtenus et présentés à la figure 3 démontrent bien la validité du modèle. Le plus grand écart de réverbération entre les valeurs *in-situ* (courbe bleue) et celles calculées (courbe rouge) n'est que de 0,18 seconde à 125 Hz.



2.2 Simulation d'un public, salle comble

La présence d'un public influence significativement le temps de réverbération à cause de l'absorption que celui-ci apporte à l'enceinte de l'abbatiale. Les résultats obtenus⁷ en utilisant les coefficients d'absorption pour les bancs occupés à pleine capacité sont présentés à la figure 3 (courbe verte). Dans ce cas, une salle comble diminue le temps de réverbération sur une moyenne de 0,90 seconde. Dans l'abbatiale, la plupart des matériaux sont peu absorbants et les bancs d'église occupés peuvent faire varier de manière significative les résultats acoustiques s'ils couvrent une large surface de l'enceinte (Martellota, 2009).

La surface occupée par le public est de l'ordre de 120 m² pour une superficie totale (sol, murs, vitraux et ogives) d'environ 2750 m².

⁷ Autres mesures acoustique en salle comble : Spatialité (LF) : 5 % d'augmentation, Clarté (C80) : 0,7 dB d'augmentation, premier ordre de la réponse impulsionnelle, l'onde directe arrive plus rapidement d'environ 40 ms.

2.3 Contrôle de la réverbération par absorption

Afin de diminuer la réverbération de l'abbatiale en dessous de deux secondes, il faudrait installer des matériaux absorbants comme par exemple des tentures. Ils absorbent le son de façon substantielle et la nécessité d'un public devient optionnelle pour exécuter des mesures acoustiques dans l'enceinte. En simulation acoustique, il suffit de modifier les coefficients d'absorption de certaines faces constituant les murs de l'abbatiale pour obtenir un T30 sous les deux secondes. Pour cette étude, environ 200 m² de rideaux épais seraient nécessaires pour obtenir ces résultats *in-situ*. Installés sur les murs de l'abbatiale, cette grande superficie couverte serait équivalente à couvrir tous les vitraux, incluant les rosaces de ce matériau absorbant⁸.

3. GÉOMÉTRIE ET HOMOGENÉITÉ

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. À priori, la symétrie de l'architecture entraîne une meilleure homogénéité si l'orgue est positionné sur les axes principaux de l'abbatiale. Selon l'institut IBO : « Sound travels best in straight lines, so an organ should ideally be placed on the main longitudinal axis of a building »⁹ En observant la figure 4, la propagation des rayons acoustiques confirme l'idée que les sons voyagent en ligne droite. Sur l'image de droite, les murs parallèles de l'enceinte permettent aux rayons de continuer leurs propagations perpendiculaires à ceux-ci. Les positions du futur orgue en fond de nef ou en transept sont privilégiées.

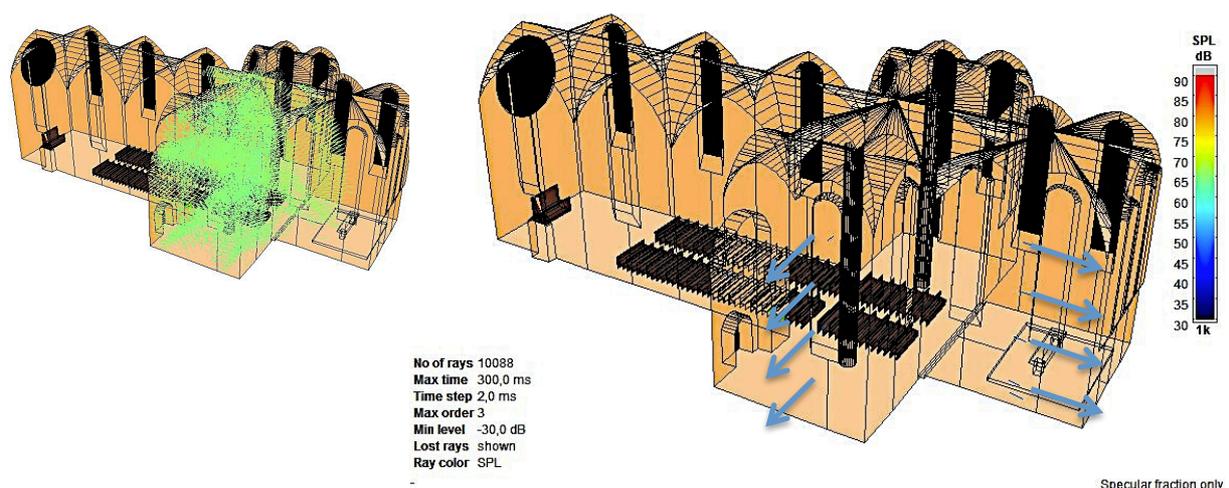


Figure 4 : Visualisation du parcours sonore à 40 ms et à 220 ms avec la source S1 en transept

⁸ Coefficients d'absorption avec octaves centrés sur 125 à 4kHz (rideau épais profondément replié) : 15 - 45 - 90 - 92 - 95 - 95 (%)

⁹ THE INSTITUTE OF BRITISH ORGAN BUILDING, (2004) Acoustics and Church Music, Northwood, UK.

Sur la figure 5, avec une source à 2 m du sol dans le transept, le tiers de l'assemblée reçoit le champ direct et plus de la moitié du chœur est couverte. Dans le cas d'une messe ou d'un concert, il est probable qu'une voix ou un musicien accompagne l'organiste. Il est alors conseillé de positionner ces deux sources sonores à moins de 15 mètres de distance.

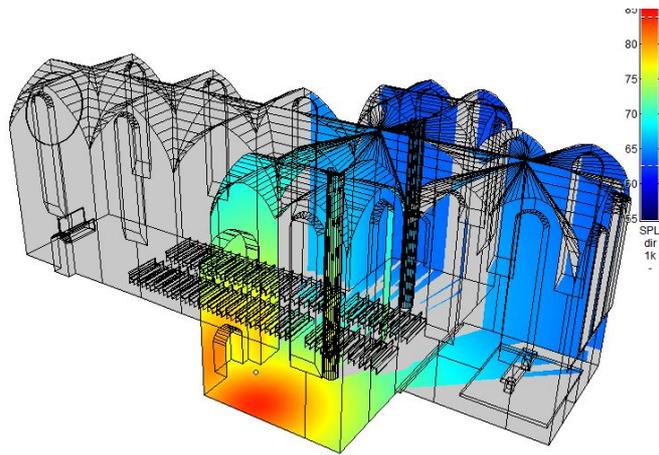


Figure 5 : Visualisation du champ direct avec la source S1

3.1 Distribution du champ sonore

En observant la figure 6, la distribution du champ sonore avec les sources S0 et S1 est homogène. Celles-ci sont à une distance d'environ 12 mètres. Du point de vue des qualités d'interprétation et d'écoute, l'emplacement de l'orgue dans le transept est très favorable, notamment parce qu'il assure une proximité entre l'orgue et les instruments ou la voix. « If the organ is placed at a distance from the choir, the player may find it difficult to achieve a good musical balance with the singers. »¹⁰ En utilisant une console séparée du buffet et du grand orgue, l'organiste n'est pas assourdi par le jeu le plus proche de lui. Cette position permet un contact cognitif entre les musiciens et le public, élément essentiel pour le vécu authentique d'un concert.

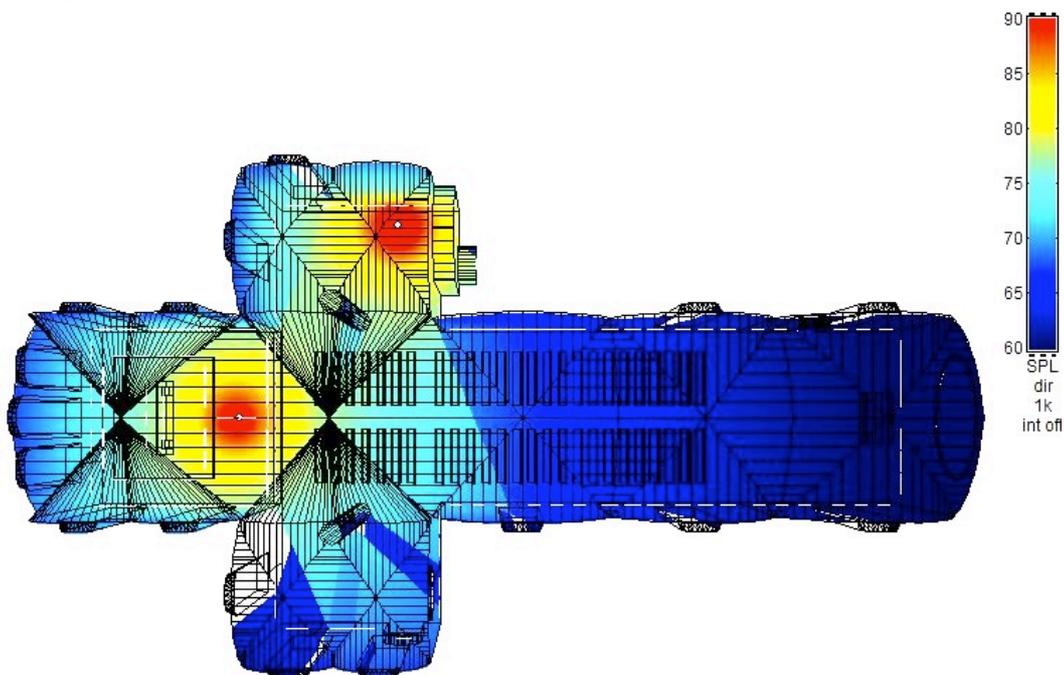


Figure 6 : Visualisation du champ direct avec les 2 sources (chœur et transept)

¹⁰ THE INSTITUTE OF BRITISH ORGAN BUILDING, (2004) Acoustics and Church Music, Northwood, UK.

3.2 Focalisations

Les focalisations sont un phénomène pour 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. 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 (Rossi, 1999). 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 vague de rayons sonores. Il sera noyé dans l'ensemble de ces réflexions. Au niveau de la perception, l'oreille humaine est sensible à ce qu'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 et celle du premier indirect est supérieur à 60 ms. Pour des temps inférieurs, par exemple 45 ms, la qualité du son est fortement diminuée. Les limites pour l'intervalle entre le direct et le premier réfléchi, sont de 20 à 30 ms pour les auditeurs. Le son est de qualité sonore dite optimale lorsque le rayon direct fusionne avec les rayons réfléchis. Pour les musiciens, ces limites sont abaissées à 10 ms, voire 20 ms. En deçà, la qualité sonore est amoindrie. Les réflexions des voûtes sont donc très importantes pour la spatialisation du son. « La réverbération naturelle d'une pièce est l'effet d'amalgame de ces sons retardataires qui se décalent dans le temps. Une certaine portion de cet effet de réverbération est nécessaire pour produire ce que nous percevons comme son agréable » (Lefevre, 2005).

En analysant une voûte simple avec *CATT Acoustic™*, il existe bien des focalisations, mais aucun problème n'a été discerné. Les images ci-dessous présentent les différentes trajectoires participant au foyer phonique à 1,2 mètres de sol. Avec une source positionnée à 6 mètres du sol, les premiers sons à converger vers ce foyer, après une réflexion sur la voûte, arrivent avec un retard d'environ 40 ms. L'auditeur reçoit tout de même des réflexions latérales en bas des 20 ms. De plus, ce sont les cent premières réflexions dans une salle qui caractérisent subjectivement la qualité d'une réverbération. La densité de l'échogramme de la figure 7 démontre bien la qualité de l'enveloppement sonore.

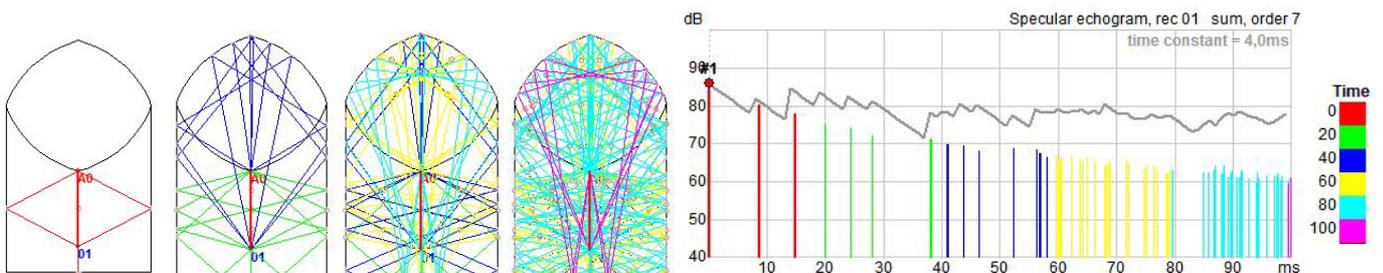


Figure 7 : Ordre 1, Ordre 2, Ordre 3 et Ordre 5 des rayons convergeant au foyer phonique en fonction du temps

4. HAUTEUR DE LA SOURCE

Le positionnement en hauteur de l'orgue est un autre des éléments 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 soient assourdis par le volume sonore¹¹ et qu'ils puissent profiter du mélange des différents timbres » (Desarnaulds, 2002). Ainsi, une surélévation de l'orgue permet une meilleure homogénéisation et répartition du niveau sonore dans l'assemblée. De plus, cette 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. Pour les fidèles, la musique divine semble alors arriver du ciel ! Selon l'institut IBO: « A shallow freestanding organ in an open position is the most efficient for sound projection, allowing a smaller instrument to sound bigger than it really is. » L'idée de mettre l'orgue en hauteur dans une position autoportante est priorisée.

4.1 Clarté et Spatialité

La qualité acoustique se définit scientifiquement selon différentes méthodes expérimentales associées à certaines sensations subjectives. Il est alors intéressant de comparer ces paramètres en fonction de la hauteur de la source (2 m, 5 m et 8 m) dans la partie Sud du transept. (figure 8)



Figure 8 : Coupe en axe du transept, Hauteurs et positions des sources

Deux paramètres ont été retenus :

-Le facteur de clarté (C80) représente la capacité de perception de tonalités distinctes émises par plusieurs instruments joués en même temps.

La clarté devrait être comprise entre -4 dB et 6 dB pour être qualifiée de favorable.

-La spatialité (LF) calcule la sensation d'être enveloppé par le son. Il s'agit du rapport entre les réflexions directes et les réflexions latérales. Les calculs ont été faits avec une simulation en salle comble puisque le son de l'orgue est absorbé par le public et les réflexions latérales seront diminuées en fonction du temps. En modifiant la hauteur de la source, le son parvenant à l'auditeur subit une atténuation variant avec l'angle d'incidence (Beckers, 1992).

¹¹ Isoir relevait « qu'au 19^{ème} siècle, à l'époque romantique, beaucoup de facteurs ont augmenté la pression dans les sommiers afin d'obtenir une plus grande intensité sonore. À Notre Dame (de Paris), Viollet le Duc a ainsi dû surélever la tribune d'environ 10m » (cf. "Influence de l'acoustique des salles sur l'évolution du style musical." Bulletin GAM Vol II (1965), pp. 2-11)

4.2 Analyse des résultats

Il est important de noter que les deux paramètres étudiés ne varient pas de la même manière. Concernant la clarté, aucune différence majeure n'apparaît entre les différentes hauteurs de la source. Cette énergie utile reçue dans les 80 premières millisecondes de la réponse impulsionnelle diminue au fur et à mesure que l'auditeur se déplace vers le fond de la nef. La qualité de l'audition demeure tout de même acceptable sur l'ensemble de la cartographie et plus le récepteur est proche de la source, plus la clarté augmente (figure 9a).

Les figures 9b et 9c présentent le pourcentage de l'énergie latérale reçue à partir d'une source à 2 m et à 5 m de hauteur. Si la hauteur de l'orgue n'est pas suffisante par rapport à la proximité de l'assemblée, il y aura un manque d'homogénéité spatiale. Les personnes proches de l'orgue seront assourdies et elles ne profiteront pas du mélange sonore des jeux de l'orgue alors que celles qui sont éloignées l'entendront plus faiblement du fait de l'absorption du public. L'espace occupé par les bancs d'église est analysé dans les rectangles des figures 9b et 9c. Avec une source à 5 m, la spatialité augmente globalement de 10 à 15% et le côté droit de l'assemblée est priorisé concernant ce paramètre. Selon les résultats, la fraction d'énergie latérale augmente, sur les octaves centrés de 1 kHz à 16 kHz, de 2 à 15 % lorsque la source passe d'une position de 2 m à 5 m avec une position RI. À partir de 8 m, la spatialité diminue et elle tend à diminuer si la hauteur de la source augmente. Concernant ce paramètre d'enveloppement sonore et sur la base des résultats obtenus, la position de l'orgue devrait se situer entre 5 et 8 m de hauteur.

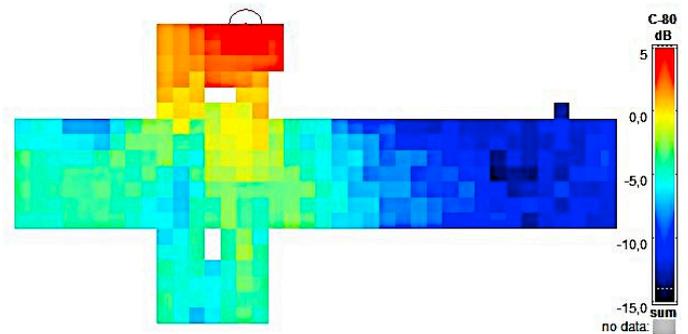


Figure 9a : Cartographie de la clarté avec source à 2m de hauteur du sol

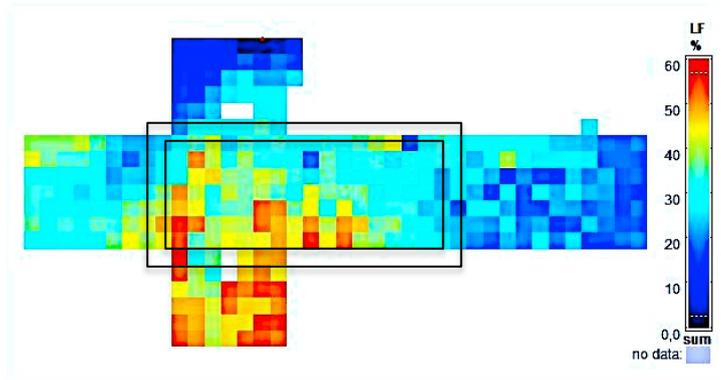


Figure 9b : Cartographie de la spatialité avec source à 2m de hauteur du sol

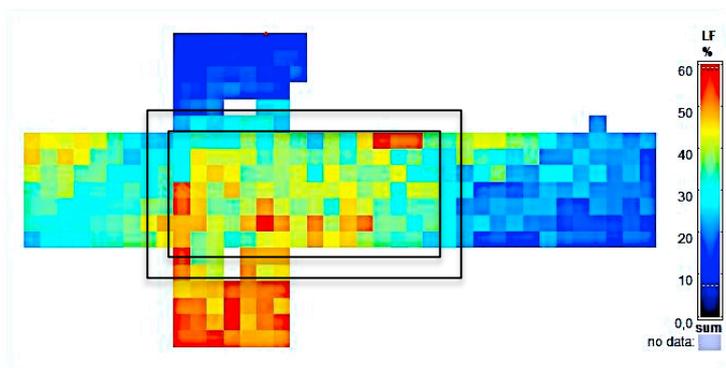


Figure 9c : Cartographie de la spatialité avec source à 5 m de hauteur du sol

5. PERCEPTIONS SUBJECTIVES

Des essais expérimentaux ont été réalisés à l'abbatiale mercredi 14 décembre 2011 à 15h avec des sons d'orgue numérique enregistrés en salle anéchoïque (aucune réverbération). Ces enregistrements m'ont été gracieusement prêtés par Mme Michèle Castellengo, professeur-chercheur en acoustique à Paris. Ils ont été utilisés pour les tests effectués à la Primatiale de Lyon en 1992. L'extrait comporte trois séquences improvisées par Marc Pinardel : une introduction fuguée pour écouter la netteté de la polyphonie, un passage lent et chantant pour apprécier l'enveloppement et une finale « tutti » avec des jeux couvrant tout le spectre, depuis l'extrême grave (jeu de 16') jusqu'aux limites aiguës de l'instrument.

L'écoute critique est tout aussi importante que les autres paramètres de cette étude. Elle permet concrètement d'appréhender certains phénomènes acoustiques. Les auditeurs présents, MM Chénard, Delage, Rey et Miville-Deschênes ont été satisfaits des résultats perçus. Les graves sont très bien entendus et le jeu en finale est massif et complet. La réverbération de l'abbatiale répond aux attentes. En comparant l'extrait sans réverbération et le signal enregistré *in-situ*, il est remarquable de constater à quel point la réverbération de l'abbatiale rend l'énergie du signal plus riche (figure 10).

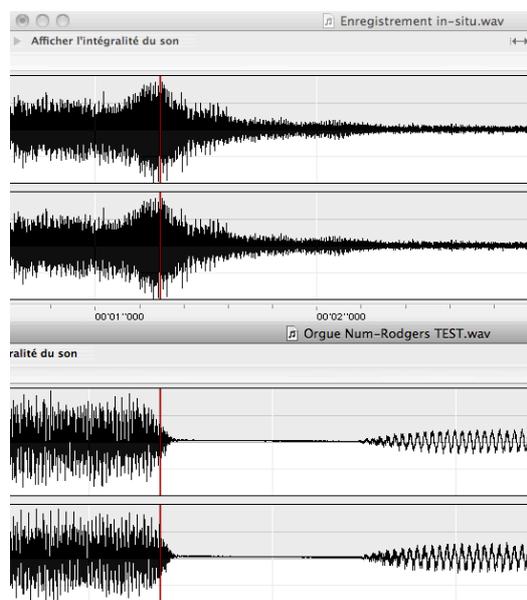


Figure 10 : Comparaison entre le signal *in-situ* et le signal non réverbéré)

Par ailleurs, en restituant le parcours sonore, *CATT Acoustic™* permet de faire une écoute binaurale d'une réponse impulsionnelle (figure 11) dans l'abbatiale. Avec le module en démonstration dans la version *Prediction*, il est possible aussi d'entendre une voix humaine accompagnée de sa réverbération. Ce module effectue la convolution avec ce signal anéchoïque et permet l'écoute en champ réverbéré. Le signal vocal enregistré *in-situ* et le fichier traité par le filtre calculé par *CATT-Acoustic™* se ressemblent, mais pour obtenir de meilleurs résultats, la modélisation devrait être plus détaillée et l'achat d'une licence d'auralisation complémentaire au logiciel permettrait une écoute complète des extraits choisis.

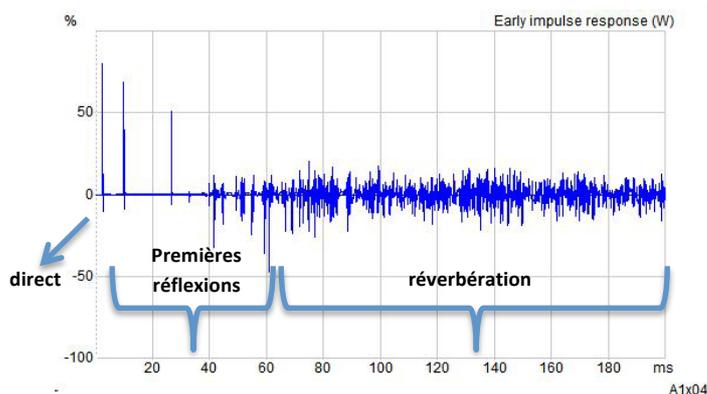


Figure 11 : Réponse impulsionnelle générée par *CATT Acoustic™* v9 (S1 - R4)

CONCLUSION

L'intégration du modèle 3D de l'abbatiale dans le logiciel de simulation acoustique *CATT Acoustic™* a permis d'analyser la distribution du champ sonore, ses réflexions et ses focalisations. La présente étude valide un positionnement du buffet d'orgue dans le transept sud de l'abbatiale pour les raisons suivantes :

- La géométrie de hauts murs et voûtes multiples de l'édifice, qui réfléchissent les sons avec un impressionnant temps de réverbération de 3 à 4 secondes, en génère la diffusion dans l'ensemble de l'édifice. Un orgue en transept, à priori moins favorisé qu'en fond de nef, obtient ainsi des performances acoustiques comparables pour le public. La surélévation de 5 à 8 mètres de son buffet par rapport au sol serait par ailleurs idéale pour maximiser l'effet de spatialité du son recherché pour ce type d'instrument.
- L'homogénéité sonore entre le chœur, lieu d'accueil d'un orchestre ou d'une chorale, et le transept où sera implanté le buffet d'orgue, est optimale pour l'organisation de concerts. Leur distance n'est que d'une douzaine de mètres, alors qu'elle serait de 35 mètres avec un orgue en fond de nef, engendrant dans la perception du son par les musiciens ou chanteurs, un déphasage de l'ordre du dixième de seconde qui devient gênant.

Enfin, selon Michèle Castellengo¹², chaque orgue est un instrument unique du point de vue sonore, tant par sa conception intrinsèque, que par le lieu où il est placé. La prochaine étude, ainsi que les mises au point de l'instrument, seront l'œuvre du facteur d'orgue que l'association aura sélectionné. Je reste évidemment disponible pour toute question acoustique, et j'aurais grand plaisir à retourner à Saint-Jean-aux-Bois pour assister à un concert avec votre orgue futur.

¹² Michèle CASTELLENGO, (2002) Étude de l'orgue, présentation des recherches, Paris.

ANNEXES

INSTRUMENTATION DE MESURE

- Enceinte omnidirectionnelle B&K de référence 4296 avec un ampli
- Sonomètre B&K modèle 2250 (Hand-held Analyzers Types 2250)
- Microphone Sony stereo 120° electret condenseur ECM-MS907
- Carte de son Firebox, Presonus. Class-A préamplificateur de microphone, 24-Bit/96k



Figure 12 : Source omnidirectionnelle positionnée à 2 mètres du sol dans le transept, côté sacristie.

RÉSULTATS CATT ACOUSTIC™ (SURFACES ET ABSORPTION)

The absorption is used as follows:

Key name	Area [m ²]	Relative absorption area [%]									
		Area [%]	< 125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	> Used
(MURS ET PLANCHERS) COULEUR_C03	1442,6	46,7	< 19,6	19,6	18,5	22,2	22,0	22,0	22,0	22,0	> 641
(OGIVES) COULEUR_C04	976,6	31,6	< 13,2	13,2	12,5	15,0	14,9	14,9	14,9	> 822	
(BANCS) COULEUR_B18	447,6	14,5	< 40,5	40,5	38,3	34,4	34,2	34,2	34,2	> 1071	
(VITRAUX) COULEUR_O09	207,6	6,7	< 25,3	25,3	29,3	27,2	27,7	27,7	27,7	> 19	
(PORTES) COULEUR_B22	14,5	0,5	< 1,3	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	> 3	
SANS_DEF	1,5	0,0	< 0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	> 2	
TOTAL	3090,4										

RÉSULTATS CATT ACOUSTIC™ (SOURCE S1 à 2m, RÉCEPTEUR R1)

"CAG-file : "C:\Program Files (x86)\CATT\01 Projets\SAINT-JEAN FINAL 3\projectname_6.CAG"
 "Creator : "Philippe Miville-Deschenes" "CATT-Acoustic v9.0a (build 1.00)"
 "Algorithm : l. max split order l"
 "Air abs. : on" room considered closed (fraction lost rays: 0.3%):
 volume = 5585.62 m³ (calculated from mfp).

"Project : "SAINT-JEAN-AUX-BOIS"
 "Date/Time : " 2011-12-12 10:08:58
 "Prim.rays : 32922" " IR length : 4915 ms"
 mfp = 7.23 m
 "Measures for A2x01"

"Measure"		"125"	"250"	"500"	"1k"	"2k"	"4k"	"8k"	"16k"	"lin"	"A-w"	"Hz"
"D-50"	"(h)"	31.10	25.03	13.32	22.90	29.77	30.45	52.75	80.85	26.44	26.87	"%"
	"(E)"	14.74	14.38	17.24	20.24	24.71	30.36	52.39	82.62	21.01	24.80	"%"
	"(h-E)"	16.36	10.65	-3.92	2.65	5.06	0.09	0.36	-1.76	5.43	2.07	"%"
"C-80"	"(h)"	-2.41	-3.15	-6.35	-2.76	-1.95	-0.46	4.35	12.37	-2.58	-2.09	"dB"
	"(E)"	-5.13	-5.13	-4.20	-3.64	-2.63	-0.73	3.72	13.51	-3.35	-2.41	"dB"
	"(h-E)"	2.72	1.99	-2.15	0.88	0.68	0.27	0.63	-1.14	0.77	0.31	"dB"
"Ts"	"(h)"	264.82	295.25	283.81	233.42	203.51	144.60	61.05	19.69	238.14	207.66	"ms"
	"(E)"	323.46	305.11	280.42	243.63	209.48	146.90	62.49	17.31	254.14	212.48	"ms"
	"(h-E)"	-58.64	-9.86	3.39	-10.20	-5.97	-2.30	-1.43	2.37	-16.00	-4.82	"ms"
"EDT"	"(h)"	4.39	4.54	3.69	3.47	3.21	2.24	1.11	0.62	2.78	---	"s"
	"(E)"	4.70	4.26	4.06	3.59	3.18	2.25	1.13	0.60	4.07	3.48	"s"
	"(h-E)"	-0.31	0.28	-0.37	-0.11	0.03	-0.02	-0.02	0.02	-1.29	---	"s"
"T-30"	"(h)"	4.50	4.53	4.19	3.58	3.21	2.31	1.32	0.76	3.69	---	"s"
	"(E)"	4.57	4.60	4.15	3.51	3.21	2.29	1.10	0.44	4.33	3.80	"s"
	"(h-E)"	-0.07	-0.07	0.04	0.08	-0.00	0.02	0.22	0.32	-0.65	---	"s"
"T-Sabine"		4.06	3.99	3.69	3.23	2.91	2.14	1.07	0.41	---	---	"s"
"T-Eyring"		3.91	3.85	3.56	3.10	2.80	2.08	1.06	0.41	---	---	"s"
"LF"	"(h)"	124.20	95.09	91.13	45.47	64.24	48.54	51.67	36.75	76.37	58.18	"%"
"SPL"	"(h)"	82.11	82.45	82.79	81.42	80.86	79.54	76.04	71.04	89.69	87.53	"dB"
	"(E)"	83.96	84.13	83.86	82.89	82.42	80.93	77.46	71.09	91.18	88.95	"dB"
	"(h-E)"	-1.85	-1.69	-1.07	-1.47	-1.56	-1.39	-1.41	-0.05	-1.49	-1.42	"dB"
"G"	"(h)"	12.13	12.48	12.83	11.48	10.97	9.88	7.20	4.81	---	---	"dB"
	"(E)"	13.99	14.17	13.90	12.96	12.54	11.27	8.61	4.86	---	---	"dB"
	"(h-E)"	-1.85	-1.69	-1.07	-1.47	-1.56	-1.39	-1.41	-0.05	---	---	"dB"
"IACC (sphere)"	"(h)"		0.95	0.86	0.68	0.53	0.68	0.26	0.30	0.22	0.18	---
	" BQI: "	0.37										
"Mean abs."		7.16	7.16	7.56	8.41	8.48	8.48	8.48	8.48	---	---	"%"
"Mean scat."		10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	---	---	"%"

RÉSULTATS CATT ACOUSTIC™ (SOURCE S2 à 5m, RÉCEPTEUR R1)

"CAG-file : "C:\Program Files (x86)\CATT\01 Projets\SAINT-JEAN FINAL 3\projectname_6.CAG"
 "Creator : "Philippe Miville-Deschenes" "CATT-Acoustic v9.0a (build 1.00)"
 "Algorithm : l, max split order 1"
 "Air abs. : on" room considered closed (fraction lost rays: 0.3%):
 volume = 5585.62 m³ (calculated from mfp).

"Project : "SAINT-JEAN-AUX-BOIS"
 "Date/Time : " 2011-12-12 10:08:58
 "Prim.rays : 32922" " IR length : 4915 ms"
 mfp = 7.23 m
 "Measures for Alx01"

"Measure"		"125"	"250"	"500"	"1k"	"2k"	"4k"	"8k"	"16k"	"lin"	"A-w"	"Hz"
"D-50"	"(h)"	16.45	13.95	21.65	25.17	22.26	29.38	53.59	84.94	22.75	25.83	"%"
	"(E)"	16.46	15.40	19.05	19.71	19.24	27.26	50.23	85.02	20.30	22.36	"%"
	"(h-E)"	-0.01	-1.44	2.60	5.46	3.02	2.12	3.36	-0.07	2.45	3.47	"%"
"C-80"	"(h)"	-4.93	-5.51	-4.54	-2.83	-3.76	-1.48	2.96	10.95	-3.52	-2.78	"dB"
	"(E)"	-5.14	-5.28	-4.85	-4.18	-4.02	-1.75	2.45	11.59	-4.03	-3.38	"dB"
	"(h-E)"	0.21	-0.23	0.32	1.35	0.26	0.26	0.51	-0.64	0.51	0.60	"dB"
"Ts"	"(h)"	285.24	305.22	309.33	230.66	230.32	153.59	72.20	24.48	252.18	221.06	"ms"
	"(E)"	323.32	318.99	292.72	255.38	227.40	158.20	74.45	21.62	267.83	227.93	"ms"
	"(h-E)"	-38.09	-13.78	16.61	-24.72	2.92	-4.61	-2.24	2.86	-15.66	-6.87	"ms"
"EDT"	"(h)"	4.63	4.80	4.31	3.47	3.27	2.20	1.10	0.48	2.75	---	"s"
	"(E)"	4.68	4.51	4.06	3.55	3.11	2.23	1.15	0.49	4.08	3.46	"s"
	"(h-E)"	-0.04	0.29	0.25	-0.08	0.16	-0.03	-0.05	-0.01	-1.33	---	"s"
"T-30"	"(h)"	4.66	4.47	4.23	3.61	3.18	2.40	1.35	0.75	3.72	---	"s"
	"(E)"	4.63	4.52	4.21	3.50	3.19	2.34	1.12	0.42	4.34	3.82	"s"
	"(h-E)"	0.03	-0.05	0.01	0.10	-0.01	0.06	0.23	0.33	-0.62	---	"s"
"T-Sabine"		4.06	3.99	3.69	3.23	2.91	2.14	1.07	0.41	---	---	"s"
"T-Eyring"		3.91	3.85	3.56	3.10	2.80	2.08	1.06	0.41	---	---	"s"
"LF"	"(h)"	104.78	55.72	76.03	60.27	66.70	61.20	61.36	52.17	68.19	63.73	"%"
"SPL"	"(h)"	80.93	82.20	81.47	81.39	80.22	78.82	75.19	70.01	88.99	86.93	"dB"
	"(E)"	84.04	83.76	83.49	82.62	82.07	80.45	76.43	69.73	90.87	88.55	"dB"
	"(h-E)"	-3.11	-1.56	-2.02	-1.22	-1.85	-1.64	-1.25	0.28	-1.88	-1.62	"dB"
"G"	"(h)"	10.95	12.23	11.51	11.46	10.34	9.15	6.34	3.78	---	---	"dB"
	"(E)"	14.06	13.79	13.53	12.68	12.19	10.79	7.59	3.50	---	---	"dB"
	"(h-E)"	-3.11	-1.56	-2.02	-1.22	-1.85	-1.64	-1.25	0.28	---	---	"dB"
"IACC (sphere)"	"(h)"		0.92	0.81	0.61	0.42	0.35	0.28	0.43	0.29	0.26	---
	" BQL: "	0.54										
"Mean abs."		7.16	7.16	7.56	8.41	8.48	8.48	8.48	8.48	---	---	"%"
"Mean scat."		10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	---	---	"%"

BIBLIOGRAPHIE

- BECKERS, B. (1992). Acoustique des salles, Étude numérique et expérimentale de l'aspect temporel, Liège. [En ligne]. <<http://www.heliodon.net/downloads/Beckers%201992%20Mt%20Acoustique%20des%20salles.pdf>>. 165 p. Page consultée le 16 décembre 2011.
- CASTELLENGO, Mme. (2002). Étude de l'orgue, présentation des recherches, Paris. [En ligne]. <<http://www.lam.jussieu.fr/Membres/Castellengo/04-orgue.pdf>>. 12 p. Page consultée le 20 novembre 2011.
- DESARNAULDS, V. (2002). De la position des orgues dans les églises, Lausanne. [En ligne]. <<http://library.epfl.ch/theses/?nr=2597&lang=fr&mode=print>>. 20 p. Page consultée le 28 mars 2011.
- DESARNAULDS, V. (2002). De l'acoustique des églises en Suisse – Une approche pluridisciplinaire, Lausanne. [En ligne]. <biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2002/2597/EPFL_TH2597_screen.pdf>. 315 p. Page consultée le 10 mai 2011.
- GRAMEZ, A. (2010). Étude du comportement acoustique des salles – 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Lyon. 6 p.
- LEFEVRE, T. (2005). Introduction à l'acoustique d'église – Christian Sound & Song, Elkhart, IN. 6 p.
- MARTELLOTTA, F. et E. CIRILLO. (2009). Experimental studies of sound absorption by church pews – Applied Acoustics, Bari. 9 p.
- MARTELLOTTA, F., CIRILLO, E., CARBONARI, A. et P. RICCIARDI. (2009). Guidelines for acoustical measurements in churches – Applied Acoustics, Bari. 11 p.
- MERCIER, T., MIVILLE-DESCHÊNES, P., PEYRET, P. et S. RENOT. (2011). Étude acoustique du placement de grandes orgues dans l'abbatiale de Saint-Jean-aux-Bois – Étude expérimentale, UTC, Compiègne. [En ligne]. <http://www.heliodon.net/downloads/Mercier_2011_lr_UTC_PR_4130.pdf>. 37 p. Page consultée le 15 octobre 2011.
- QUELEN, X. (2007). Restitutions d'ambiances sonores dans les abbayes cisterciennes – Rapport de stage, Nantes. 30 p.
- ROSSI, M. (1999). Église St-Vincent, Étude acoustique de l'orgue - emplacement optimum de l'orgue, Lausanne. 10 p.
- THE INSTITUTE OF BRITISH ORGAN BUILDING. (2004). Acoustics and Church Music, Northwood, UK. [En ligne]. <<http://www.ibo.co.uk/1802005/publications/infoSheet/downloads/Acoustics%20and%20Church%20Music.pdf>>. 8 p. Page consultée le 26 avril 2011.
- VERNHES, C. (1999). Étude acoustique église des 3 sœurs, Provence. 8 p.
- ISO-3382. Acoustics – measurements of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. Geneva, Switzerland : ISO ; 1997. 27 p.