

Journées de printemps de la SSA
3 avril 2025, Yverdon

Application et limites de l'auralisation dans le domaine de l'acoustique des salles

Victor Desarnaulds

EcoAcoustique SA, 24. av. Université, 1005 Lausanne, desarnaulds@ecoacoustique.ch



1

Plan de la présentation

- 1) Introduction
- 2) Exemple 1 : intelligibilité avec sonorisation
- 3) Exemple 2 : musique dans une salle de concert
- 4) Exemple 3 : archéoaoustique des églises
- 5) Discussion et conclusion



2

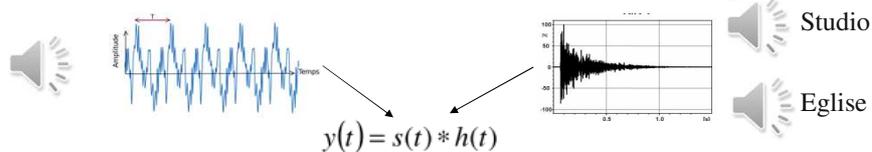
Introduction

- ◆ L'auralisation est une technique utilisée en acoustique des salles pour simuler et reproduire l'expérience sonore dans un espace donné.
- ◆ Elle permet de créer une représentation auditive réaliste de la façon dont un son serait perçu dans un environnement spécifique, en tenant compte des caractéristiques acoustiques de la salle (réverbération, réflexions, absorption, etc.)
- ◆ Elle permet de prédire et optimiser les propriétés acoustiques d'une salle avant sa construction et de tester différents matériaux, formes et configurations pour atteindre la qualité sonore souhaitée



3

Introduction - Auralisation



$$y(t) = (s * h)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau$$

$T=0.5 \text{ s}$ 
 $T=1.5 \text{ s}$ 

$s(t)$ est un son enregistré en chambre anéchoïque

$h(t)$ est la réponse impulsionnelle de la salle (pour une position de source et de réception donnée)

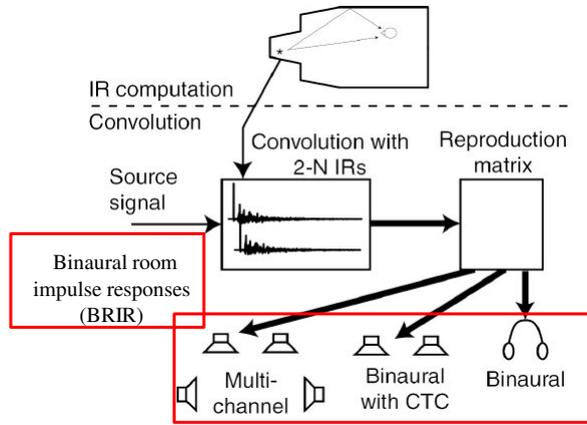
$y(t)$ est le son issu de la convolution de $s(t)$ et $h(t)$

C.J.M. Hak, Room in Room Acoustics: Using Convolutions to find the Impact of a Listening Room on Recording Acoustics. International Symposium on Room Acoustics 2013



4

Introduction - Auralisation

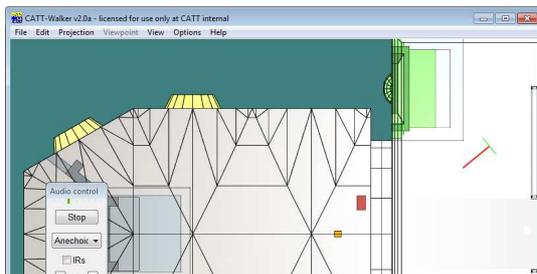


U.P. Svensson, Modelling acoustic spaces for audio virtual reality Conference: Proc. MPCA-2002

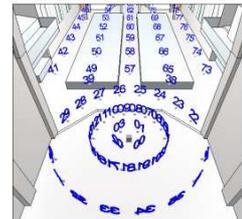
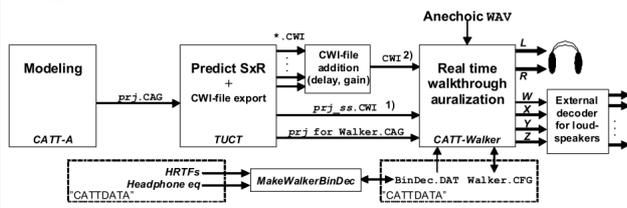


5

Introduction - Audiospatialisation



- Ecoute d'une situation statique (récepteur fixe)
- parcours sonore précalculé
- ou dynamique au casque (CATT-Walker)



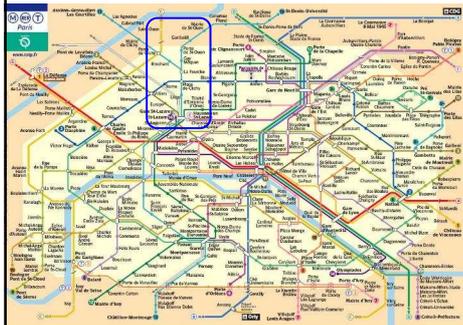
https://euphonia.fr/presentation_catt.html



6

Exemple 1: Intelligibilité dans le metro de Paris

4 stations profondes L14



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles

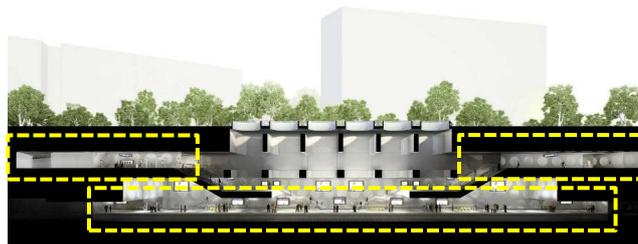


7

7

Station Pont Cardinet

- ◆ Hall
- ◆ Circulations
- ◆ Quais



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles



8

8

Vérification de l'intelligibilité par calcul et auralisation

Paramètres étudiés :

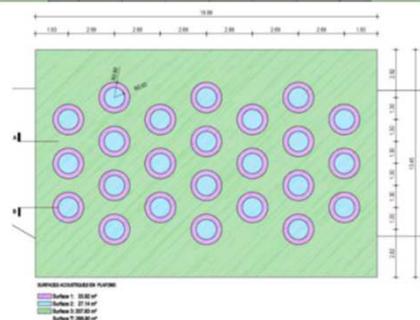
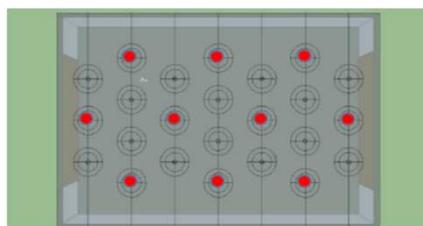
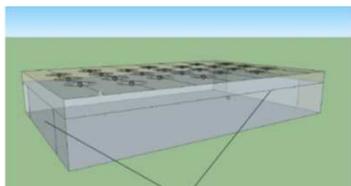
- ◆ Traitement acoustique (types, positions matériaux)
- ◆ Sonorisation (types, positions haut-parleurs)



9

Exemple 1.1 : Hall

- ◆ HP plafonniers ■
- ◆ Variante 1 (absorbant):
seulement cercles
- Variante 2:
Cercles + faux plafond
absorbant



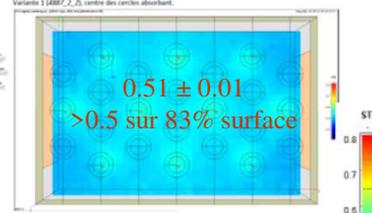
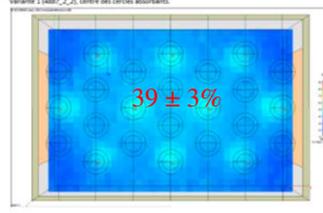
10

Intelligibilité dans Hall

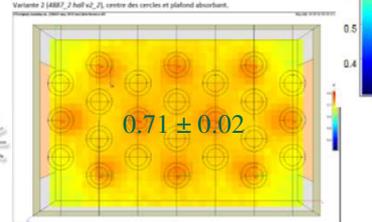
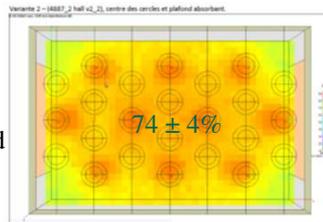
Définition D50
(exigence >60%)

Speech Transmission Index
STI (exigence >0.50)

Variante 1:
Cercle



Variante 2:
Cercle + plafond



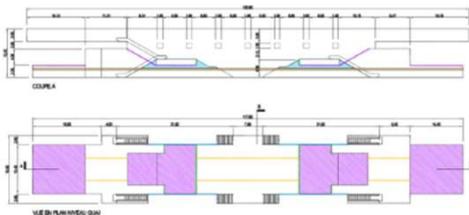
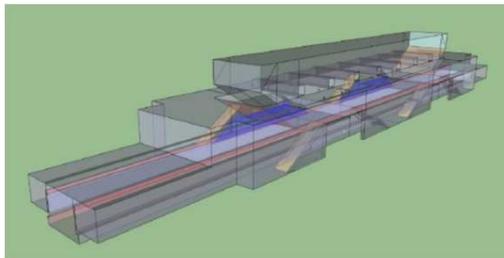
V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles



11

11

Exemple 1.2 : Quai



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles



12

12

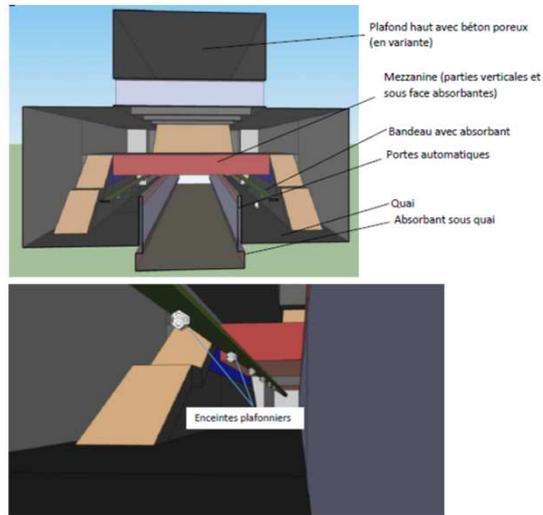
Modèle Sketchup du quai

Paramètres:

- ◆ HP plafonniers (bandeau) /colonnes (arceaux)
- ◆ Sans/avec plafond haut absorbant

Variantes (HP/absorb plafond)

- ◆ V1 Plafonniers Sans
- ◆ V2 Plafonnier Avec
- ◆ V3 Colonnes Sans
- ◆ V4 Colonnes Avec



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles

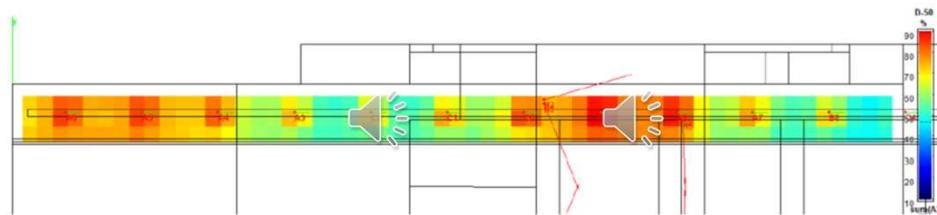


13

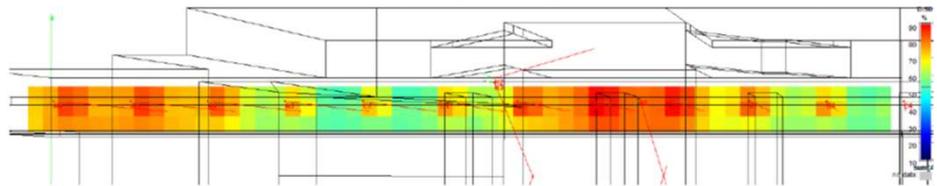
13

Effet de l'absorption en plafond (D50)

Variante 1 : Plafond haut réfléchissant (haut-parleurs plafonniers sous bandeau)



Variante 2 : Plafond haut absorbant (haut-parleurs plafonniers sous bandeau)



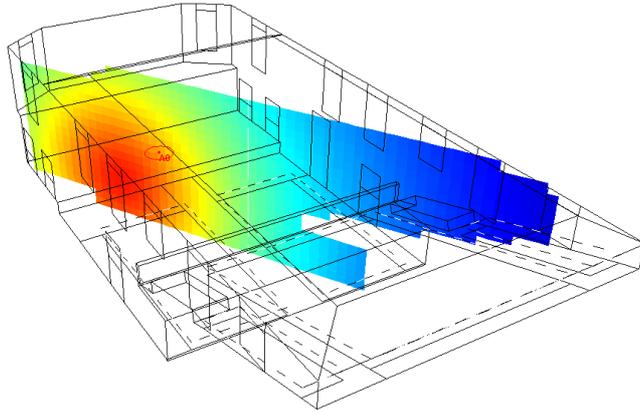
V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles



14

14

Exemple 2: Salle de concert Temple du Bas de Neuchâtel



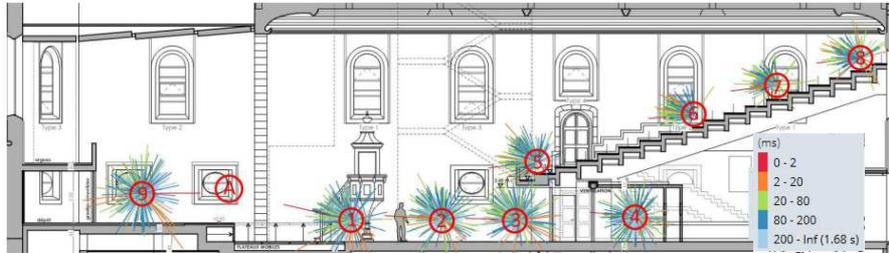
15

Mesurages avant travaux



16

Mesurages avant travaux

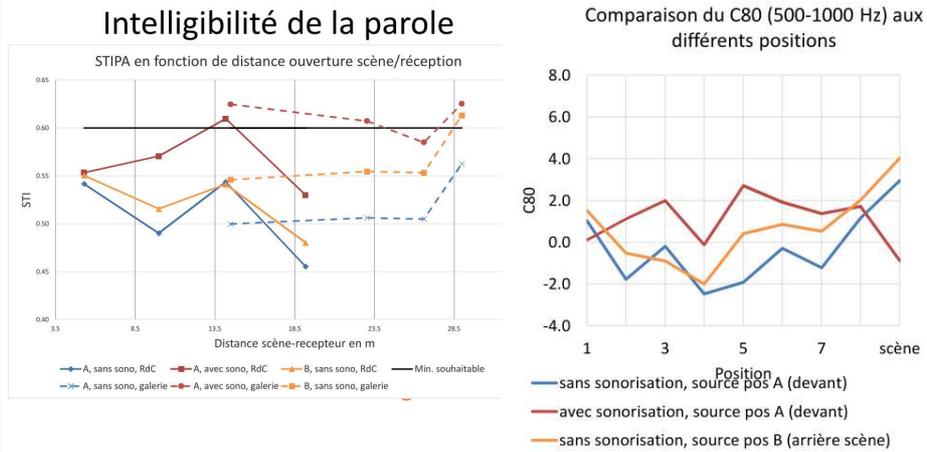


Mesurages avec système IRIS selon ISO 3382-1 : Acoustique des salles de spectacles



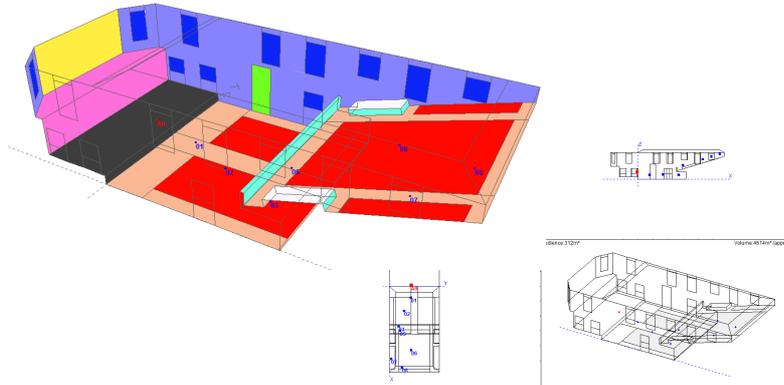
17

Mesurages avant travaux



18

Modèle simulation Catt Acoustic



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles

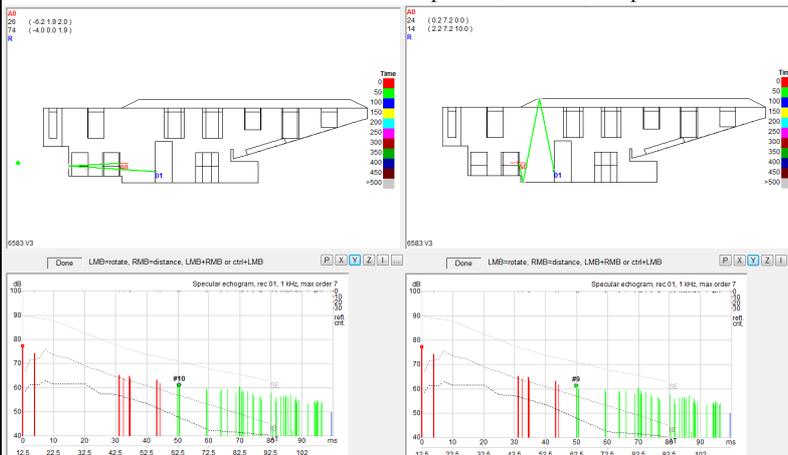


19

19

Analyse réflexions position A1

Réflexions mur et plafond, source A, récepteur 1



"SE" is related to the audibility of a "Separate Echo"

"IS" is related to "Image Shift or Spreading"

"AT" is related to "Absolute Threshold"



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles

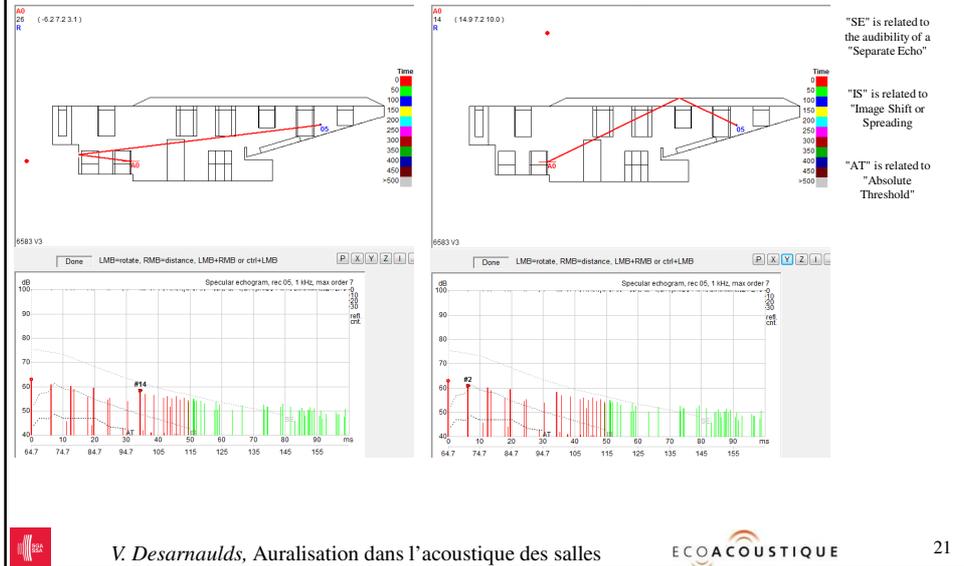


20

20

Analyse réflexions position A5

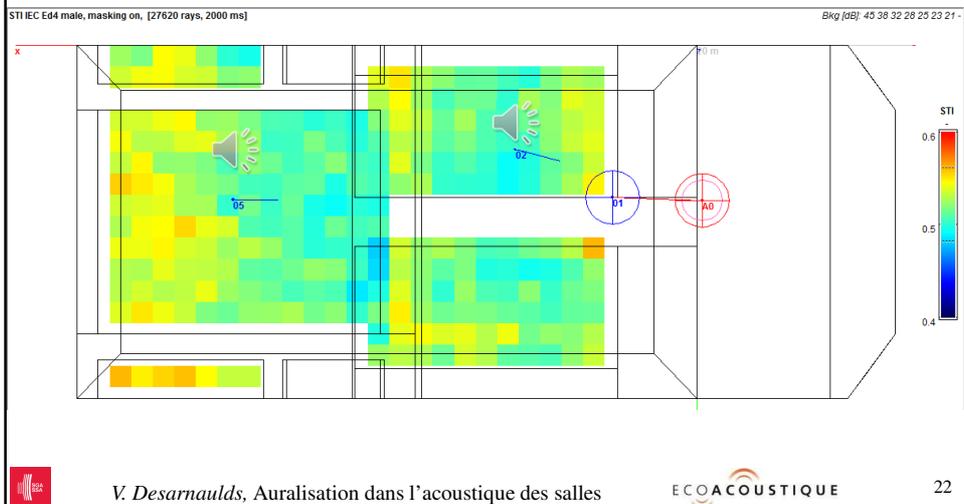
Réflexions mur et plafond, source A, récepteur 5



21

Auralisation parole position A2 et A5

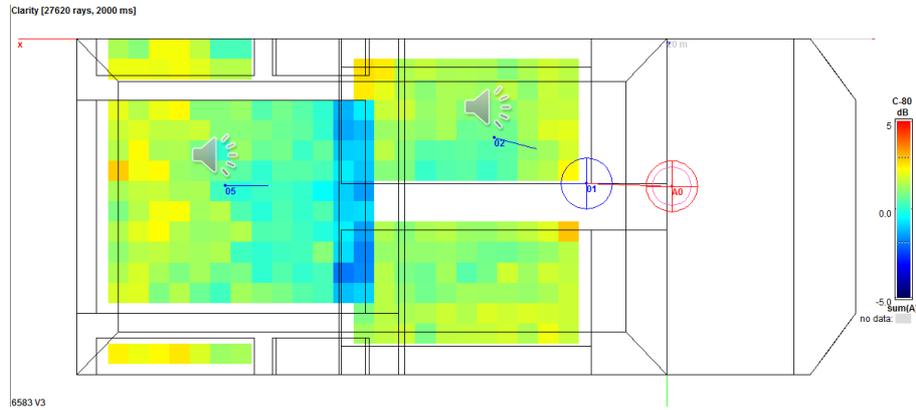
Carte d'intelligibilité (STI)
Speech Transmission Index



22

Auralisation musique position A2 et A5

Carte de clarté musicale (C80 en dB)



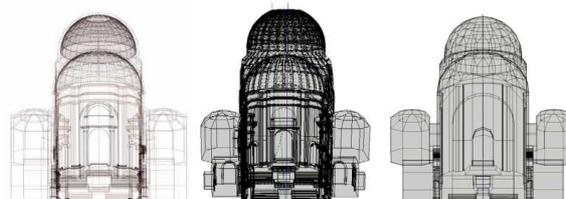
V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles

ECOACOUSTIQUE

23

23

Exemple 3: Archéoacoustique Cathédrale de Séville



T_{30m} (s)	EDT _m (s)	T_{sm} (ms)	C_{80m} (dB)	D_{50m} (-)	G_m (dB)	L_{lav} (dB)	J_{LFm} (-)	STI (-)
3.75	3.54	190.25	-0.46	0.40	5.59	-1.99	0.17	0.52



Figure 2: Picture of the Royal Chapel of the Cathedral of Seville towards the altar (left) and similar view in the VR simplified model (right).

Lidia Álvarez-Morales, *VIRTUAL REALITY IN CHURCH ACOUSTICS: VISUAL AND ACOUSTIC EXPERIENCE IN THE CATHEDRAL OF SEVILLE, SPAIN*. ICSV24, London, 23-27 July 2017

V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles

ECOACOUSTIQUE

24

Cathédrale de Séville

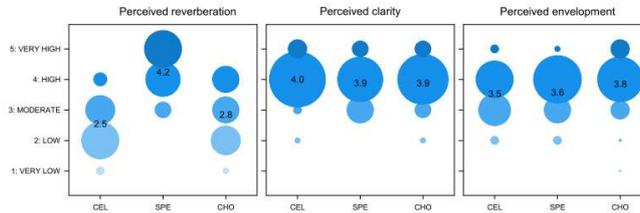


Figure 3: Listeners' perception of the reverberance of the space (left), of the clarity of the message (centre), and of the feeling of envelopment (right), in response to the three types of stimuli: Cello piece (CEL); male speech (bible reading) (SPE); and choral singing (CHO).

Avec visualisation VR

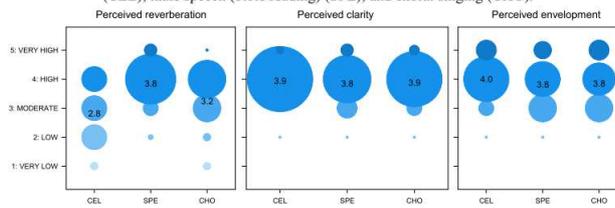
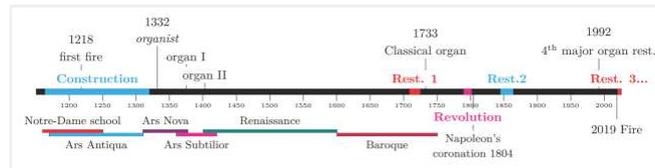
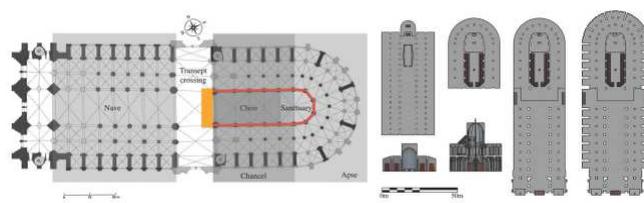


Figure 5: Listeners' perception, including visual environment, of the reverberance of the space (left), of the clarity of the message (centre), and of the feeling of envelopment (right), in response to the three types of stimuli: Cello piece (CEL); male speech (bible reading) (SPE); and choral singing (CHO).



Notre Dame de Paris - Histoire



Sarabeth S. Mullins and Brian F. G. Katz, *The Past Has Ears at Notre-Dame Cathedral: An Interdisciplinary Project in Digital Archaeoacoustics*. *Acoustics Today* Volume 20, issue 2 Summer 2024 •



Notre Dame de Paris - Mesurages

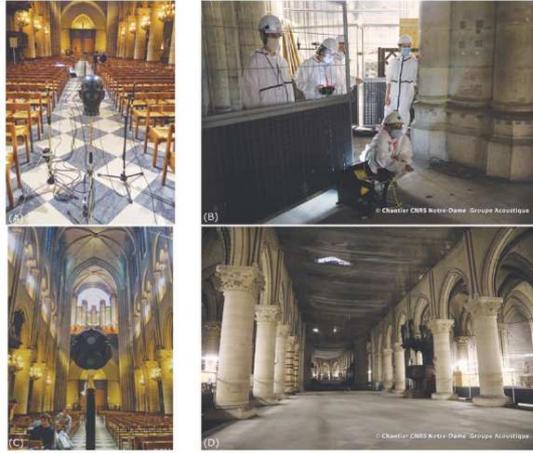


Figure 3. Prefire measurement photos. A: setup for binaural room impulse response measurement and the miniature dodecahedron source. Postfire measurement photos. B: measurement team in protective gear in the safe zone; C: driving the remote vehicle that towed the microphone arrays; and D: view of the nave, off-limits to all persons, after the initial debris cleanup. C and D reproduced from acoustic-task-force-notre-dame.dalembert.upmc.fr; courtesy of Chantier CNRS Notre-Dame Groupe Acoustique.

Sarabeth S. Mullins and Brian F. G. Katz, *The Past Has Ears at Notre-Dame Cathedral: An Interdisciplinary Project in Digital Archaeoacoustics*. *Acoustics Today* Volume 20, issue 2 Summer 2024 •



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles



27

27

Notre Dame de Paris Mesurages et simulations

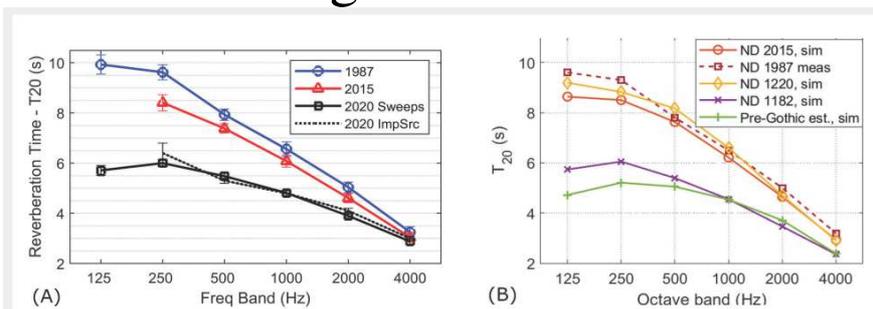


Figure 4. Mean reverberation times (T_{20}) over omnidirectional receivers for measured (meas; A) and simulated (sim; B) conditions for Notre-Dame (ND) and the speculative pre-Gothic church. Freq, frequency; ImpSrc, sweep and Impulsive type source stimuli.

Sarabeth S. Mullins and Brian F. G. Katz, *The Past Has Ears at Notre-Dame Cathedral: An Interdisciplinary Project in Digital Archaeoacoustics*. *Acoustics Today* Volume 20, issue 2 Summer 2024 •



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles

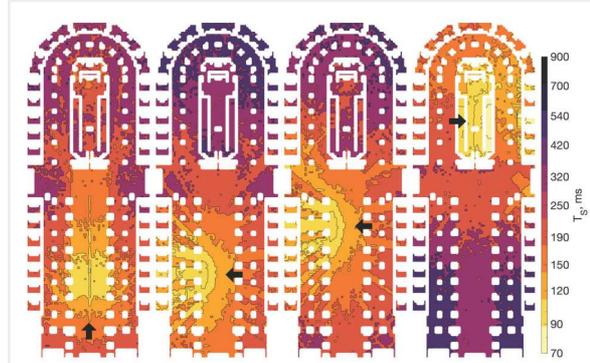


28

28

Notre Dame de Paris - Simulations

Figure 5. Center time (T_c) for unoccupied condition, comparing organ position/orientations (black arrows). Left to right: location of the contemporary grand organ in the tribune; two positions in the nave; and the location of the contemporary choir organ. Lower values indicate earlier arriving energy and hence more musical clarity. Reproduced from Carfield-Dufilou et al. (2023), with permission.



Présentation (En) <https://youtu.be/83QC1pt3hyU>

Sarabeth S. Mullins and Brian F. G. Katz, *The Past Has Ears at Notre-Dame Cathedral: An Interdisciplinary Project in Digital Archaeoacoustics*. *Acoustics Today* Volume 20, issue 2 Summer 2024 •



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles



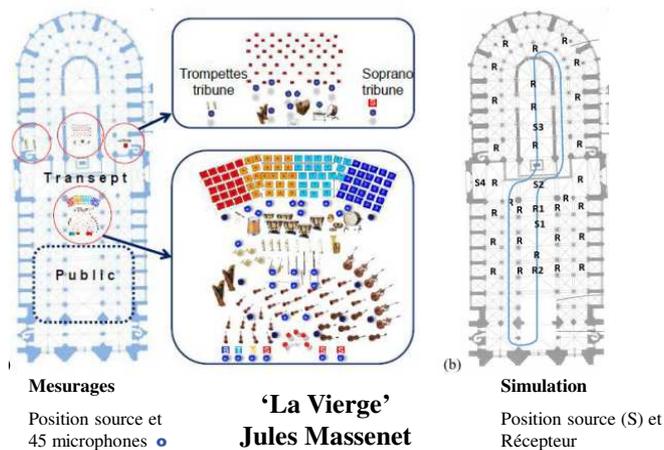
Notre Dame de Paris - Auralisation



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles



Notre Dame de Paris - Auralisation



B. Postma et al., *Virtual Reality Performance Auralization in a Calibrated Model of Notre-Dame Cathedral*, Proc. EuroRegio 2016



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles

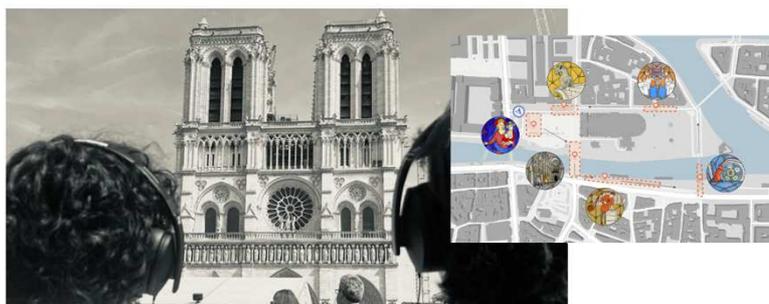


31

31

NOTRE-DAME WHISPERS

ekko of Notre-Dame de Paris
La balade audio-immersive



VALORISER L'IDENTITÉ SONORE DE LA CATHÉDRALE

Sorbonne Université et Talkartive lancent « Notre-Dame Whispers », une balade audio-immersive inédite qui invite à redécouvrir le monument parisien en se plongeant dans son **histoire sonore et musicale**.

[Ekko of Notre-Dame de Paris – Applications sur Google Play](#)
ndwhispers.pasthasears.eu



V. Desarnaulds, Auralisation dans l'acoustique des salles



32

32

4) Limites de l'auralisation

Modèles

- ◆ **Précision des simulations:** Les modèles acoustiques doivent tenir compte de nombreux paramètres (géométrie de la salle, propriétés des matériaux, diffusion, etc.). Une erreur dans l'un de ces paramètres peut fausser les résultats.
- ◆ **Limites des algorithmes :** Les algorithmes de simulation (comme la modélisation par rayons ou les méthodes numériques) ont des limites en termes de précision et de temps de calcul.
- ◆ **Ressources informatiques :** Les simulations acoustiques détaillées nécessitent des calculs intensifs, ce qui peut limiter leur utilisation en temps réel
- ◆ **Effets non linéaires :** Certains phénomènes acoustiques, comme les distorsions ou les interactions complexes entre les ondes sonores, sont difficiles à modéliser avec précision.
- ◆ **Interactions humaines:** La présence d'un public ou de musiciens dans une salle peut modifier son acoustique, ce qui est difficile à simuler



Limites de l'auralisation

Diffusion et perception subjective

- ◆ **Couplage avec la salle d'écoute :** L'auralisation dans une salle (non anéchoïque) modifiera sensiblement les conditions d'auralisation en fonction de ses caractéristiques acoustiques (T_r)
- ◆ **Systèmes de haut-parleurs :** Pour une auralisation réaliste, un système de reproduction sonore de haute qualité (par exemple, un système ambisonique ou binaural) est nécessaire. Les systèmes grand public peuvent ne pas offrir une fidélité suffisante.
- ◆ **Casques audio :** L'écoute au casque est souvent utilisée pour l'auralisation, mais elle peut ne pas reproduire fidèlement l'expérience spatiale d'une salle réelle (nécessité d'utiliser Head-Related Transfer Functions HRTFs)
- ◆ **Variabilité individuelle :** La perception du son varie d'une personne à l'autre en fonction de la morphologie de l'oreille, de l'âge et de l'expérience auditive.
- ◆ **Contexte psychologique :** L'expérience subjective du son peut être influencée par des facteurs psychologiques ou émotionnels, difficiles à modéliser



Conclusion et perspectives

- ◆ **L'auralisation est un outil puissant** pour l'acoustique des salles, en particulier pour la conception ou la transformation de salles. Elle est surtout utile pour rendre plus accessibles et perceptibles les changements des paramètres acoustiques
- ◆ Cependant, ses **limites techniques et subjectives** nécessitent une approche critique et une amélioration continue des méthodes et des technologies:
- ◆ **Amélioration des modèles acoustiques** : Les méthodes numériques (comme la méthode des éléments finis) deviennent plus précises et accessibles.
- ◆ **Réalité virtuelle et augmentée** : L'intégration de l'auralisation dans des environnements VR/AR ouvre de nouvelles possibilités pour des expériences immersives.
- ◆ **Apprentissage automatique** : L'IA pourrait aider à optimiser les simulations acoustiques et à personnaliser l'expérience sonore en fonction des préférences individuelles.



35

Merci de votre attention



36