

Applications de l'auralisation

Michael Vorländer

Institut für Hörtechnik und Akustik

RWTH Aachen

Pourquoi l'auralisation ?

En général : pour une meilleure communication
dans le domaine de l'acoustique

- Oublions les décibels et autres mesures
- Ne regardons pas le „son“ dans des cartes ou des tableaux mais écoutons-le !
- Cela permet d'éviter toute ambiguïté
- Et c'est amusant !

Pourquoi l'auralisation ?

En architecture

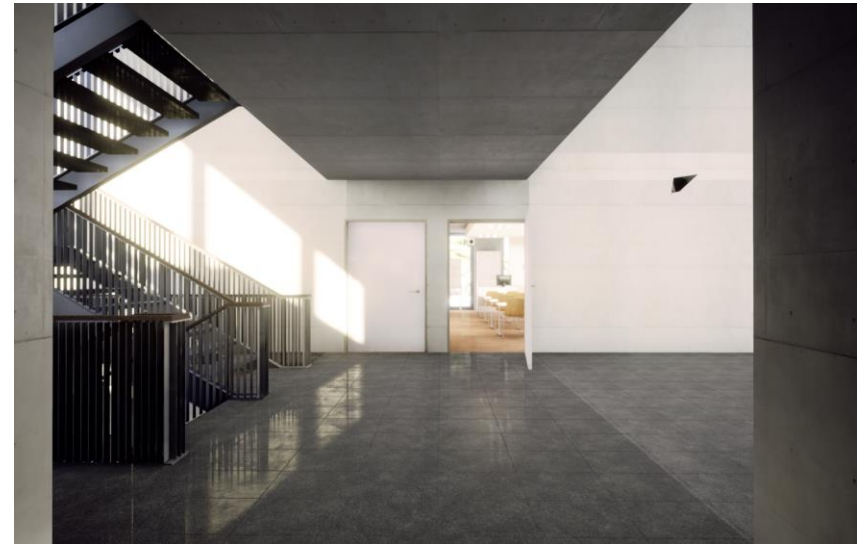
- Processus de conception avec retour d'information immédiat.
- Compléter le processus de conception par d'autres informations que celles purement visuelles.
- Ne pas regarder les données sonores, mais les écouter !
- Éviter ainsi toute ambiguïté.
- Prise en compte de la complexité de la situation en exploitant la perception auditive humaine.

- S'amuser !

... pour l'acoustique intérieure



Dr. Josep Llorca-Bofi (Unreal Engine)



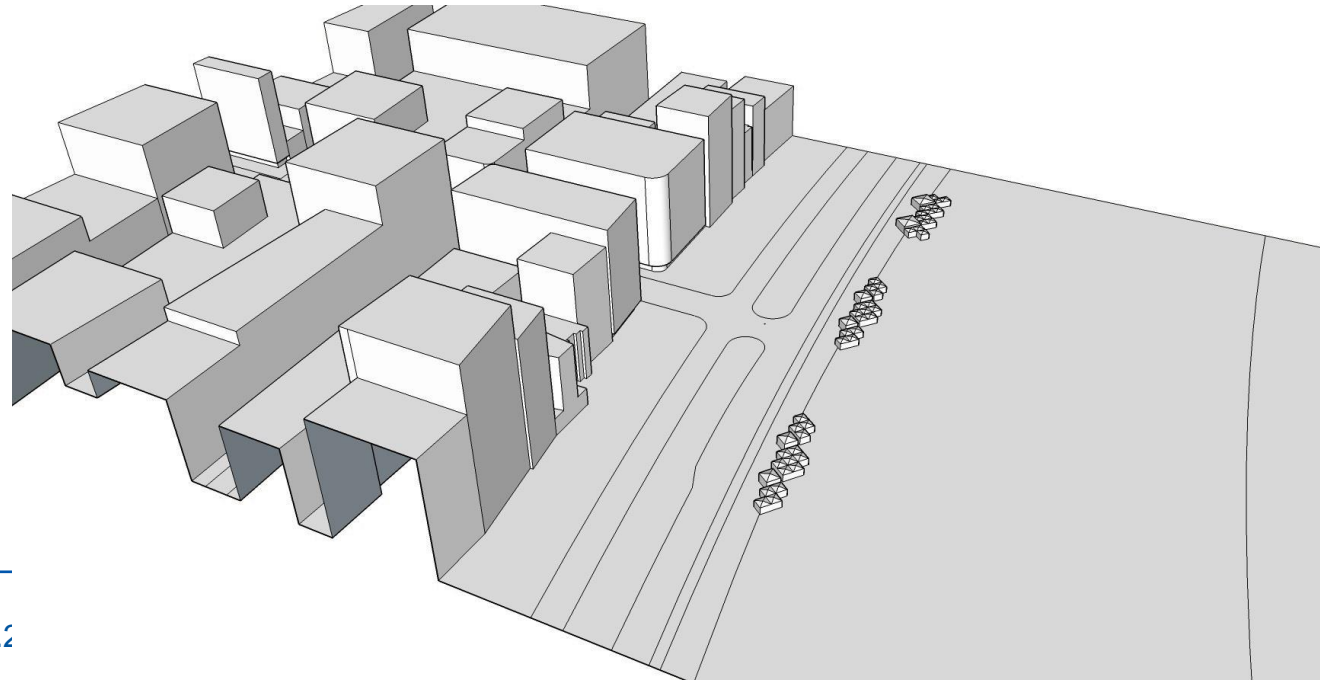
Dr. Josep Llorca-Bofi (Unreal Engine)

Pourquoi l'auralisation ?

... aussi pour l'urbanisme



Copacabana, Rio de Janeiro

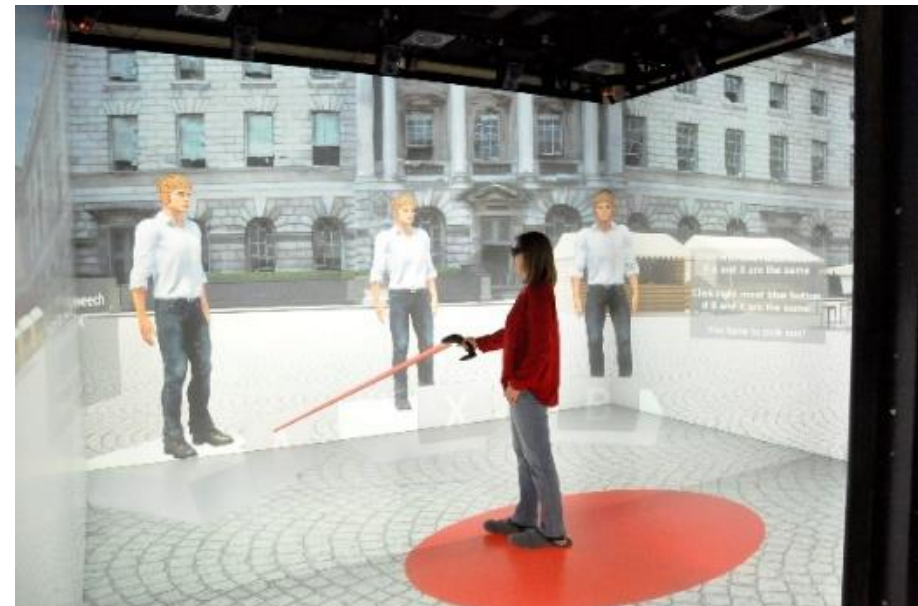


Wozu Auralisation?

Pour la recherche sur l'audition

- Des stimuli plus réalistes !
- Prise en compte de situations plus complexes et de la perception auditive humaine.
- S'amuser !

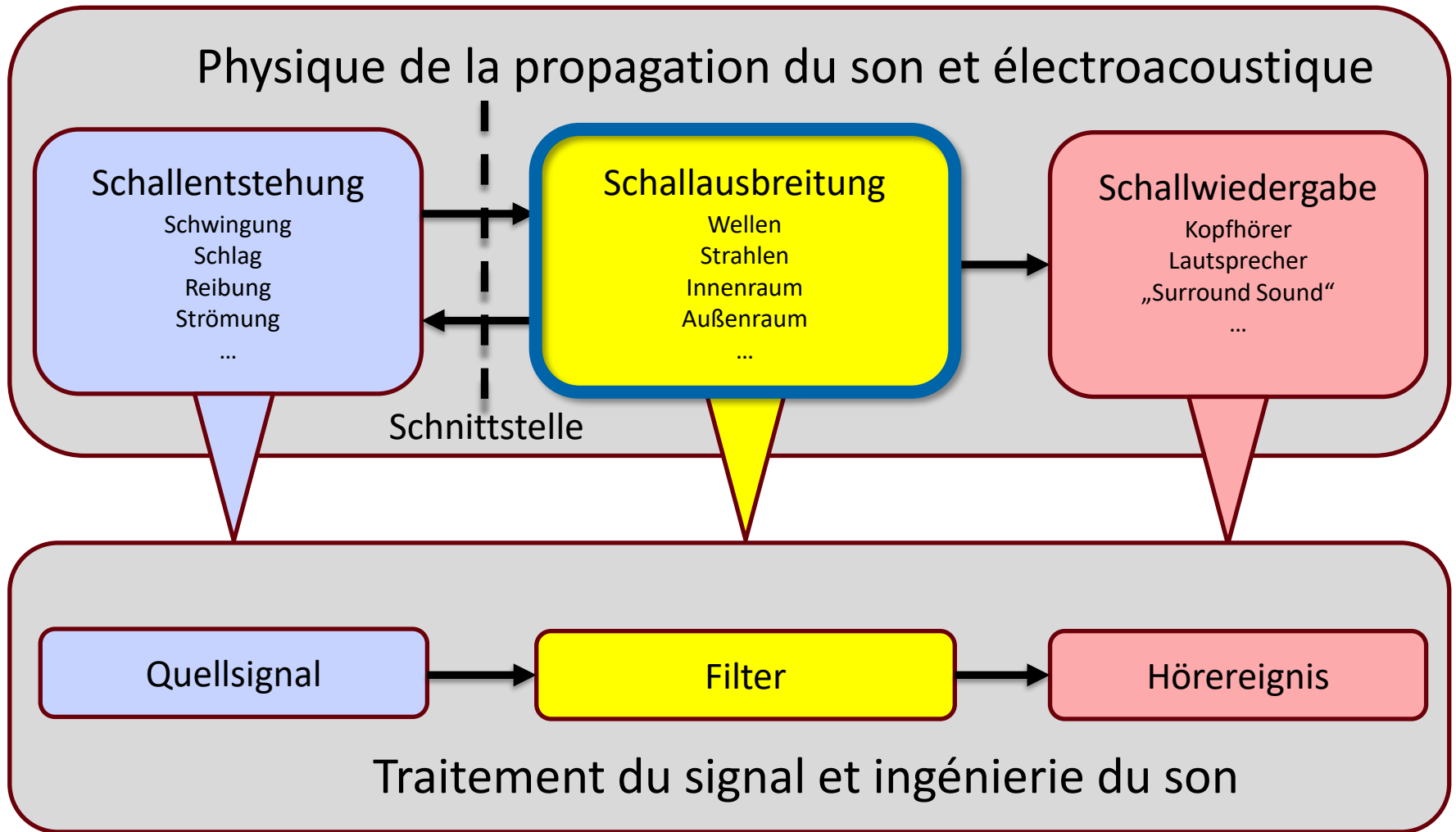
... des expériences d'écoute



Aperçu

- Introduction
- Algorithmes de simulation : sources et propagation
- Traitement du signal dans le modèle source-filtre
- Acoustique virtuelle
- Exemples : auralisation des espaces intérieurs et extérieurs
- Conclusions et perspectives

Auralisation - des données au son



État de l'art du calcul de la propagation du son

- Solution "exacte" de l'équation d'onde
 - Équation de Helmholtz + conditions aux limites
 - Méthodes numériques
 - Gamme de fréquences → IFFT → Gamme de temps
 - ou directement dans le domaine temporel BE/FE ou FDTD
- Acoustique géométrique (approximations)
 - Sources sonores miroirs, diffraction
 - Lancers de rayons
 - Radiance
 - Équation de diffusion



Calcul de la propagation du son

Acoustique des salles

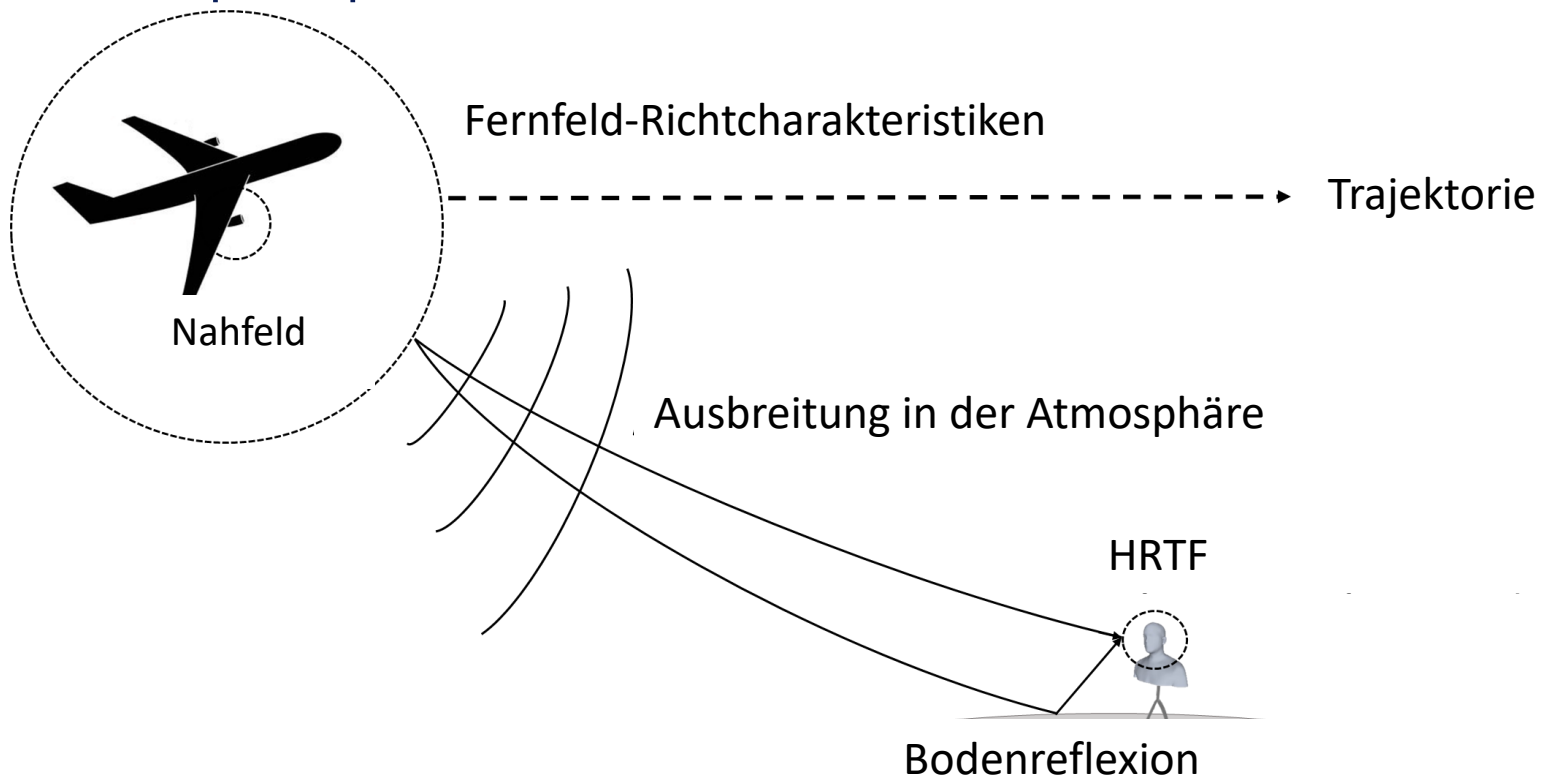
✓ (si l'on dispose de bonnes données sur les matériaux)

Propagation du son à l'extérieur

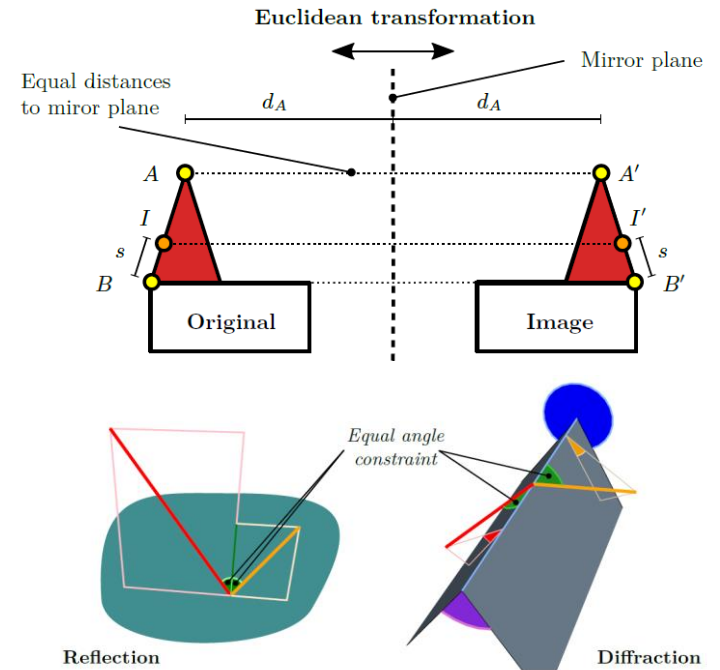
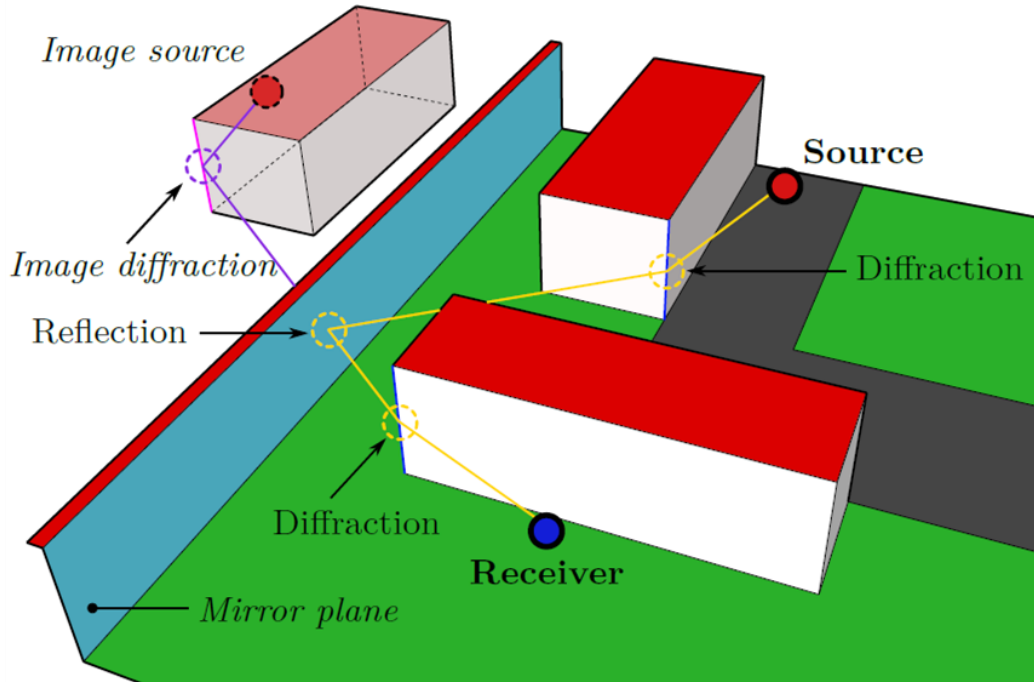
?

Propagation du son pour les sources mobiles dans l'atmosphère

- Rendu de scènes acoustiques basé sur des données numériques (simulées, mesurées, synthétisées)
- Variables de la propagation : température, humidité, pression atmosphérique, vent



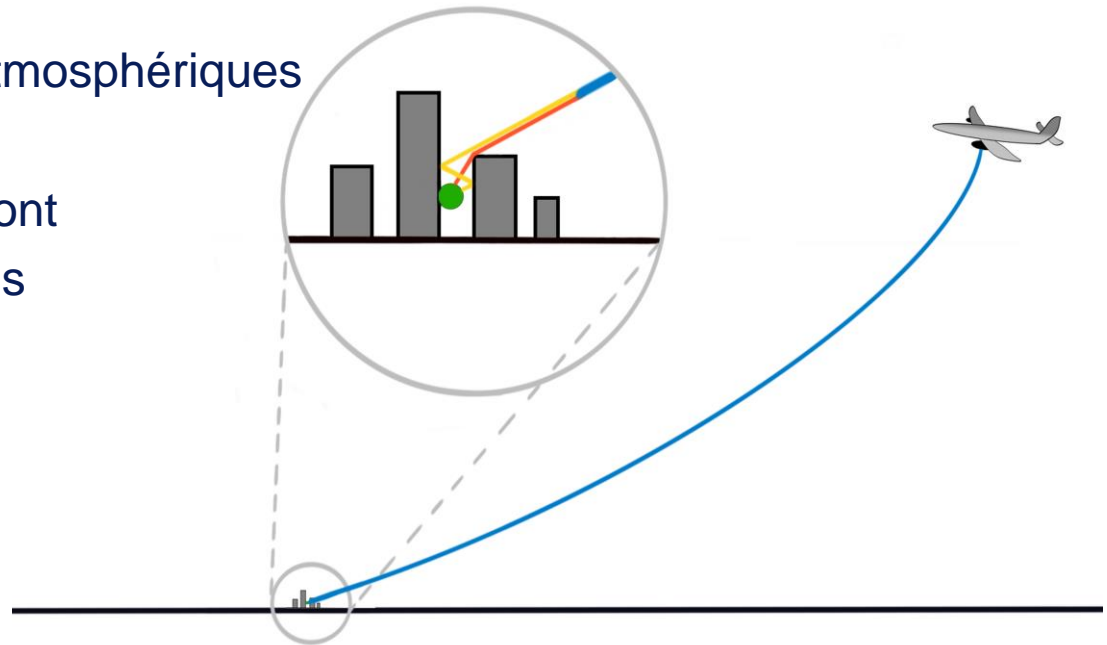
Propagation du son dans les zones urbaines



aus: Erraj et al., The image edge model. Acta Acustica united with Acustica, 2021

Combinaison du modèle atmosphérique et du modèle urbain

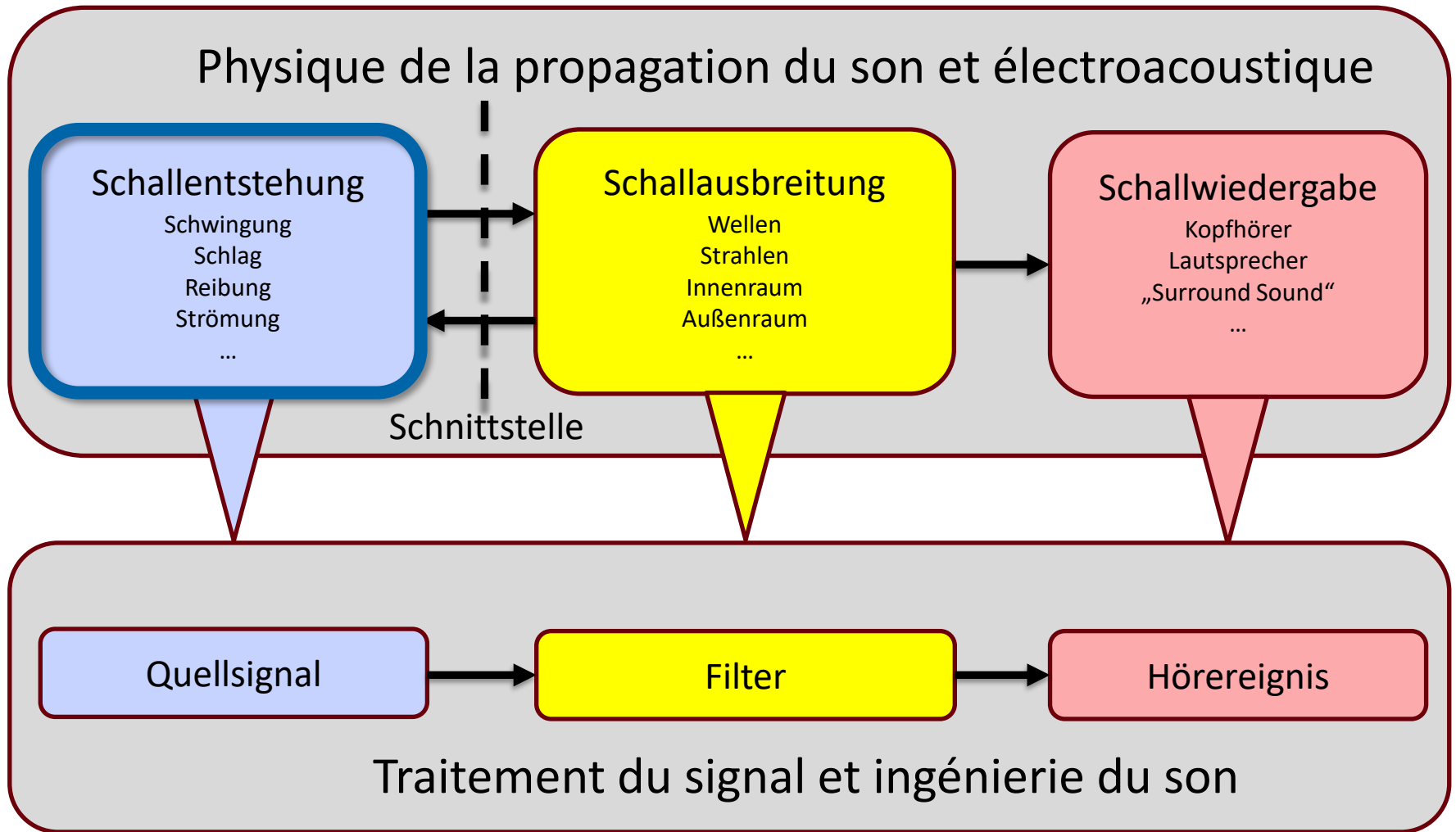
- Distance avion-ville - dimensions du bâtiment
- Sentiers urbains - sentiers atmosphériques
- Les effets atmosphériques sont similaires pour tous les chemins
- Effets dans l'espace urbain
 - Réflexion
 - Dispersion
 - Diffraction



Exemple ...

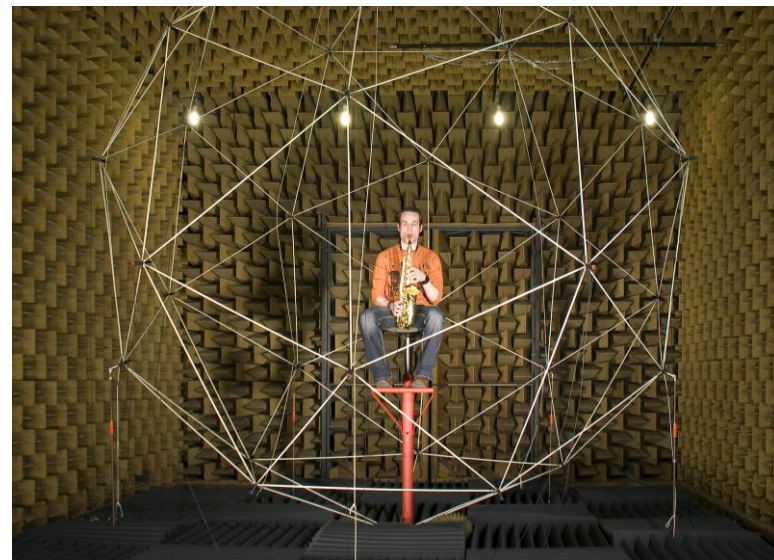
Aus: Schäfer et al., Linking atmospheric and urban auralization model. Acta Acustica united with Acustica, 2022

Auralisation - des données au son



Mesure / enregistrement en 3D !

- Meyer
- Weinreich
- Zotter
- Rindel&Otondo
- Lokki
- Behler, Weinzierl
- Leishman



Caractérisation de la source

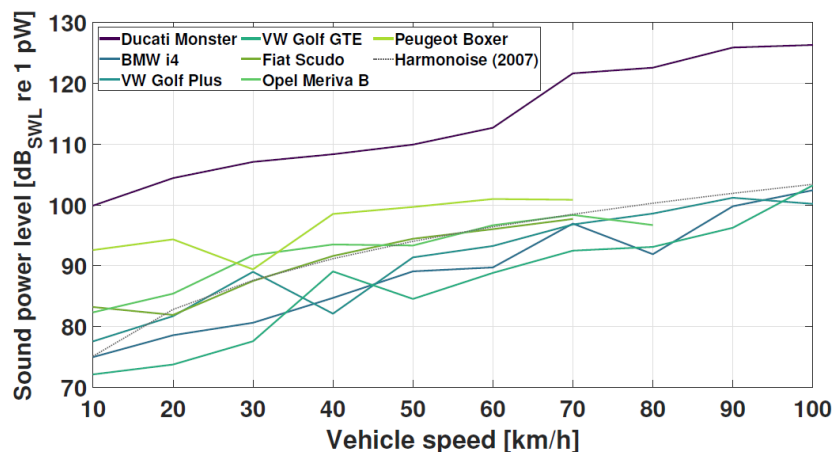
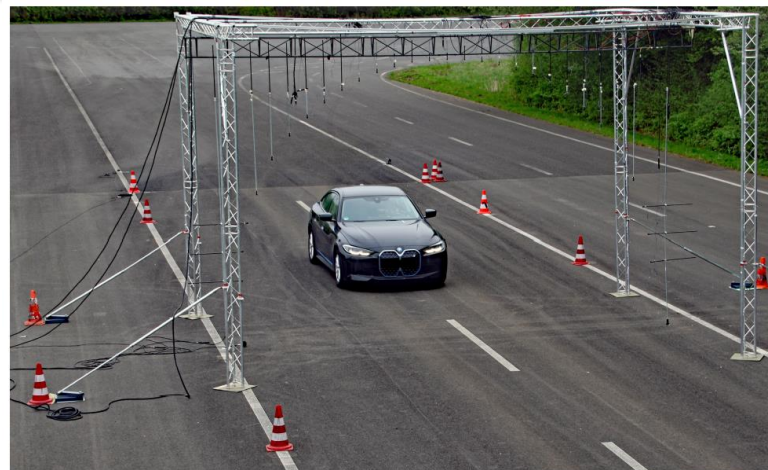
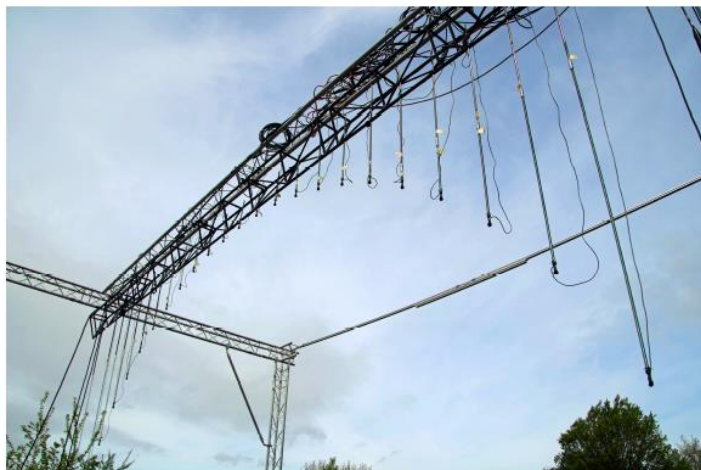
- Sources sonores à l'extérieur :
 - Voitures, motos, camions, trains, avions, transformateurs, ventilateurs, compresseurs, éoliennes ???

Problèmes : champ proche / champ lointain / vibrations

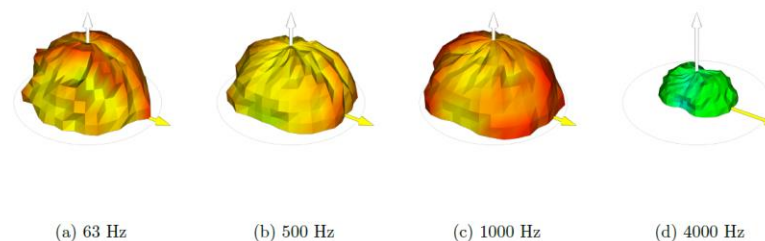
- Sources vibro-acoustiques :
 - Bruits d'impact, bruits de pas, machines, bruits d'installation, sources de bruit solidien sur des structures légères ???

Problèmes : Couplage d'impédance, degrés de liberté

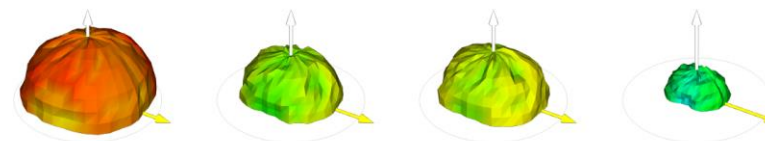
Véhicules routiers (1 exemple)



Electric drivetrain at speed of 50 km/h



ICE drivetrain at speed of 50 km/h



Dreier, C. et al. (2025) Speed-dependent directivity patterns of road-traffic vehicles. JASA (in review)

Rail (1 exemple)

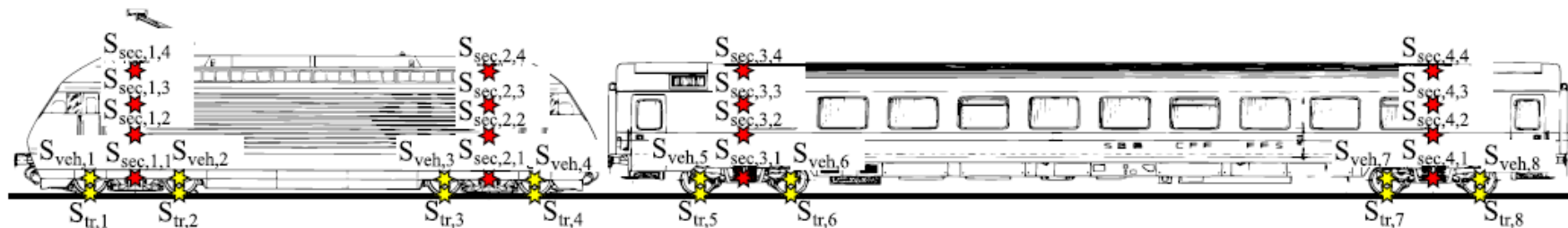


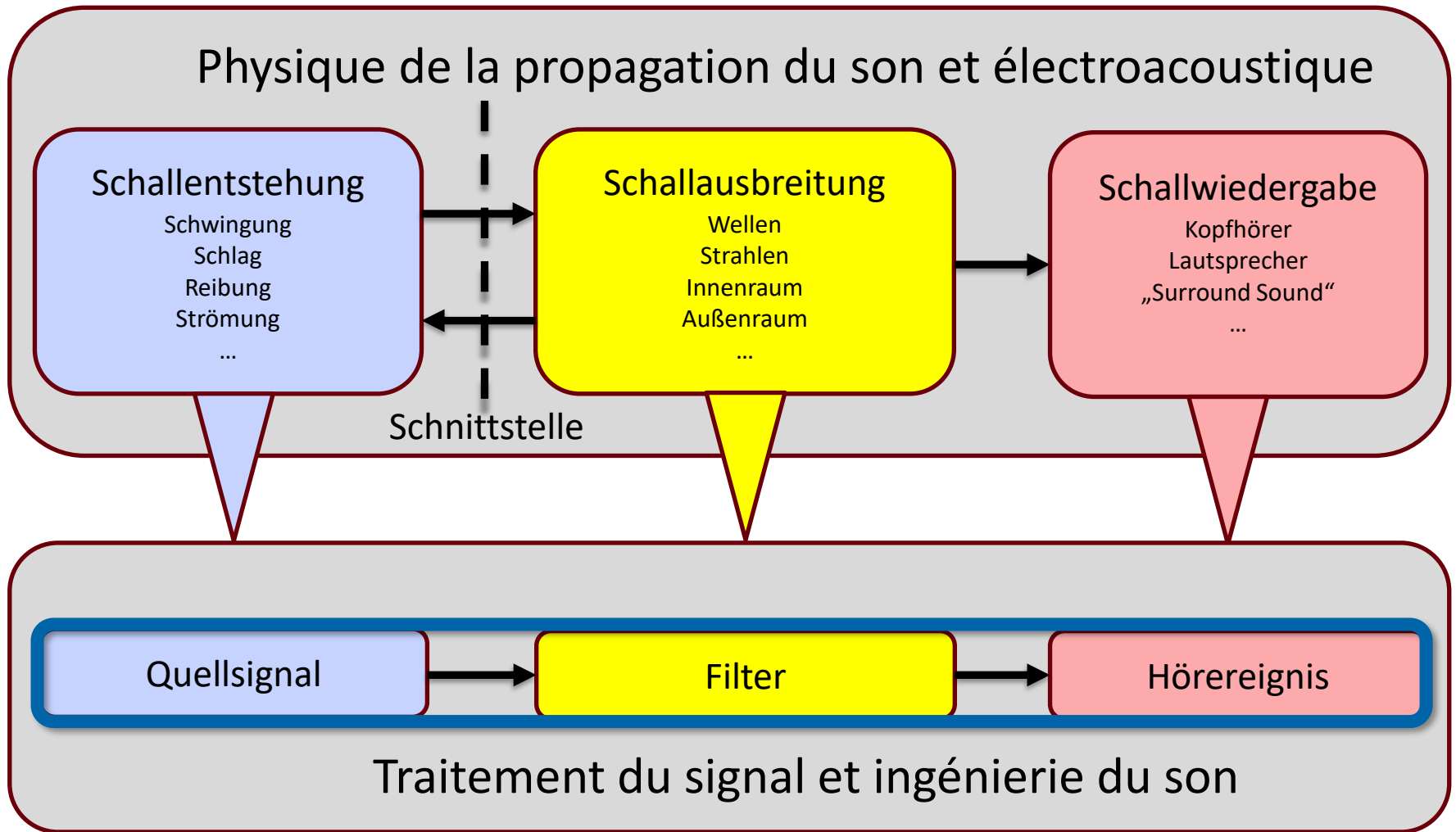
Figure 5.1: Example of equivalent point source locations marked by colored stars along two Swiss rail vehicles of type SBB Re 460 and Bpm RIC.

Pieren, R. (2018) Auralization of Environmental Acoustics Sceneries - Synthesis of road traffic, railway and wind turbine noise. PhD dissertation, TU Delft, NL

→ Caractérisation des sources sonores techniques de l'acoustique environnementale

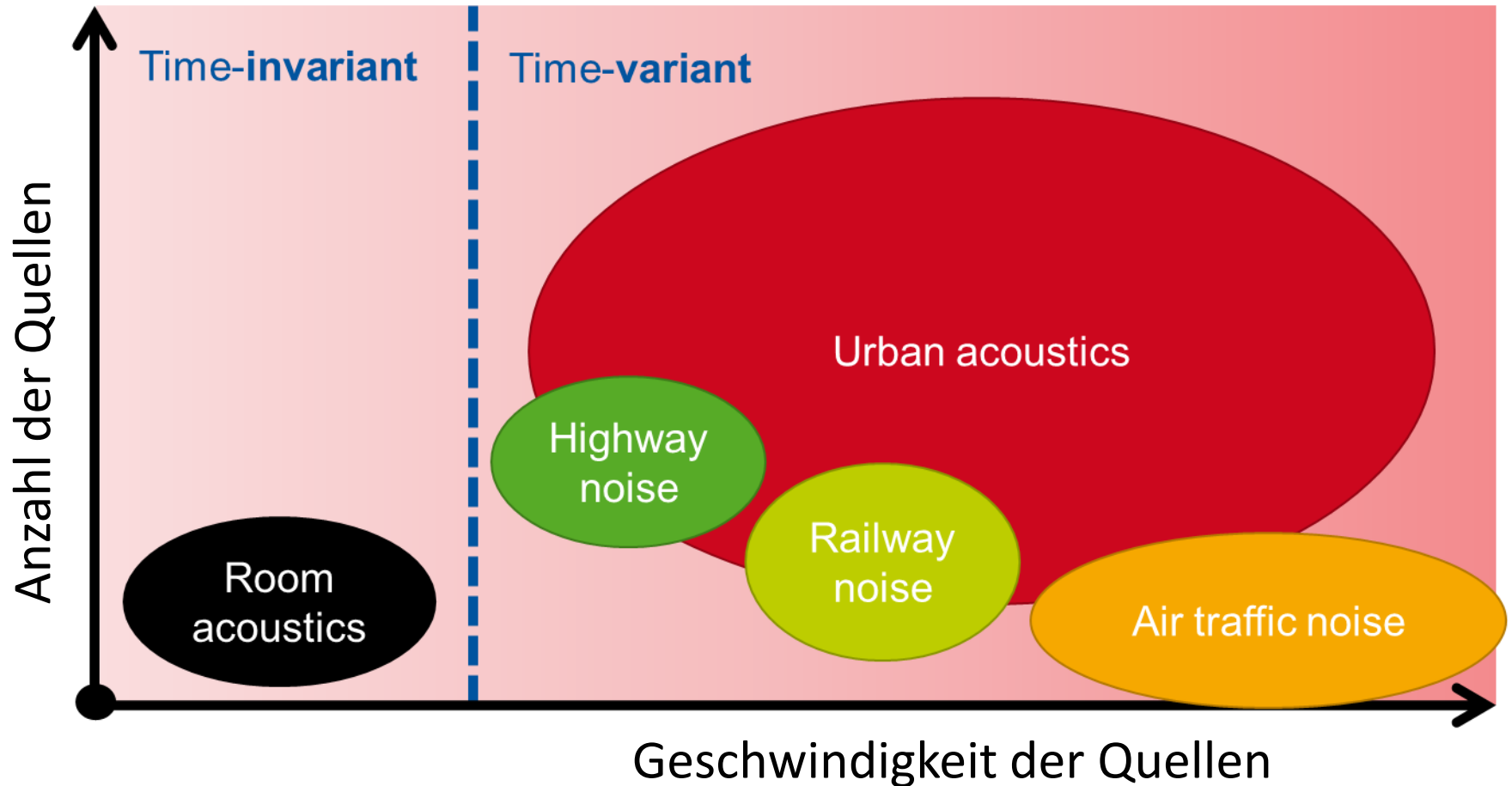
<https://www.empa.ch/web/s509/sound-generation-of-environmental-noise-sources>

Auralisation - des données au son



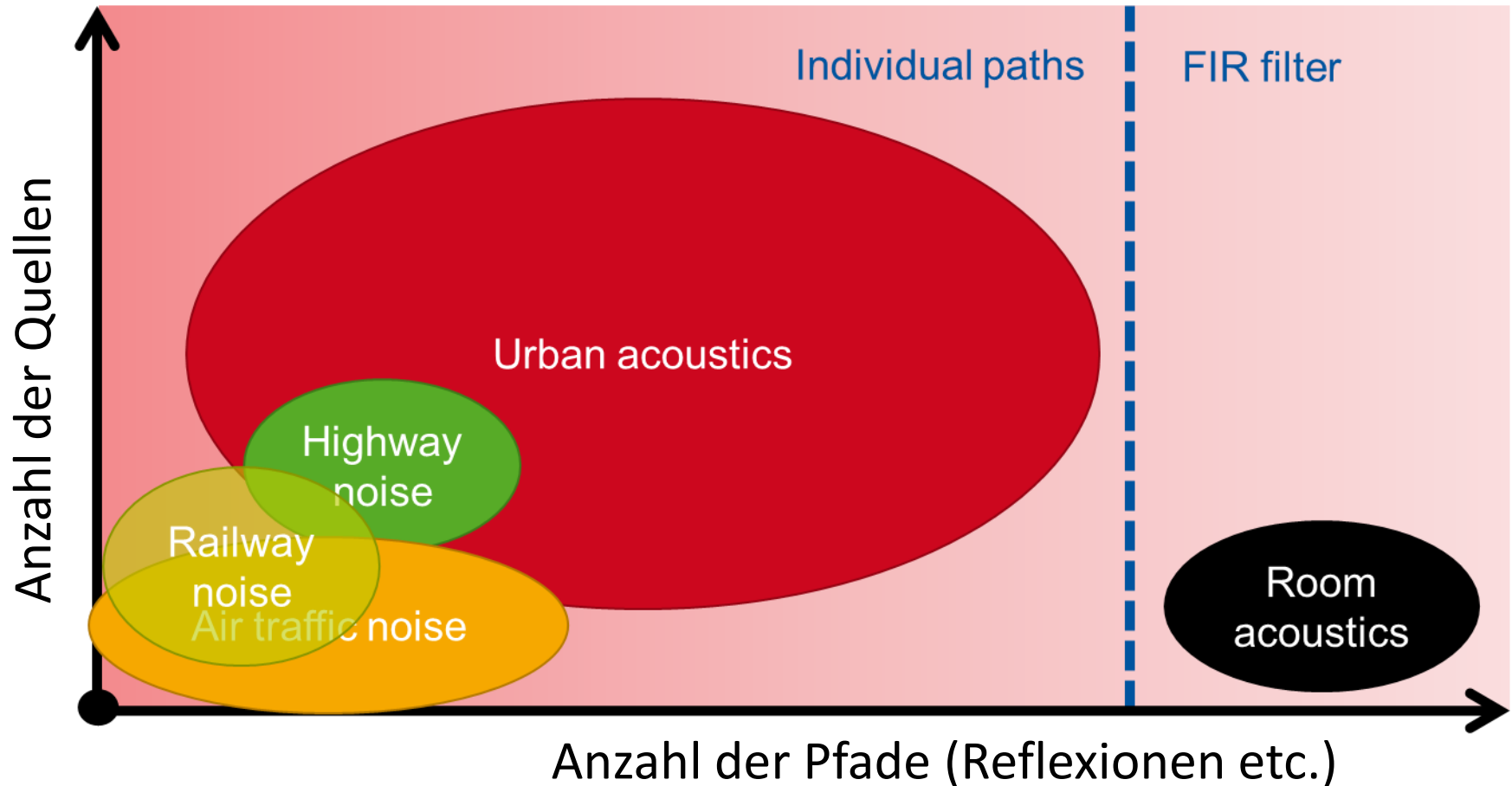
Auralisation - Conception de filtres pour l'intérieur et l'extérieur

Catégories d'auralisation



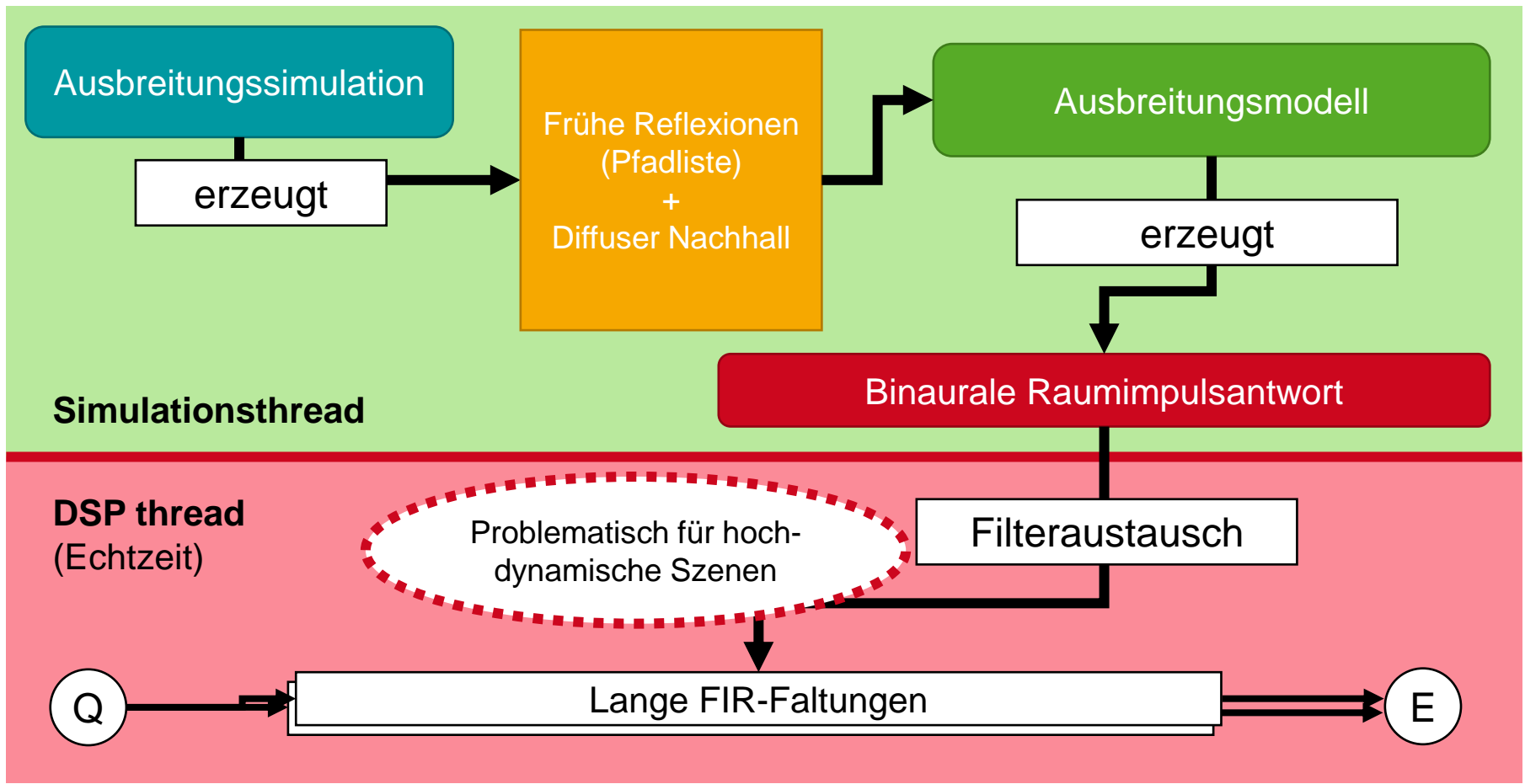
Auralisation - Conception de filtres pour l'intérieur et l'extérieur

Catégories d'auralisation



Traitement numérique du signal

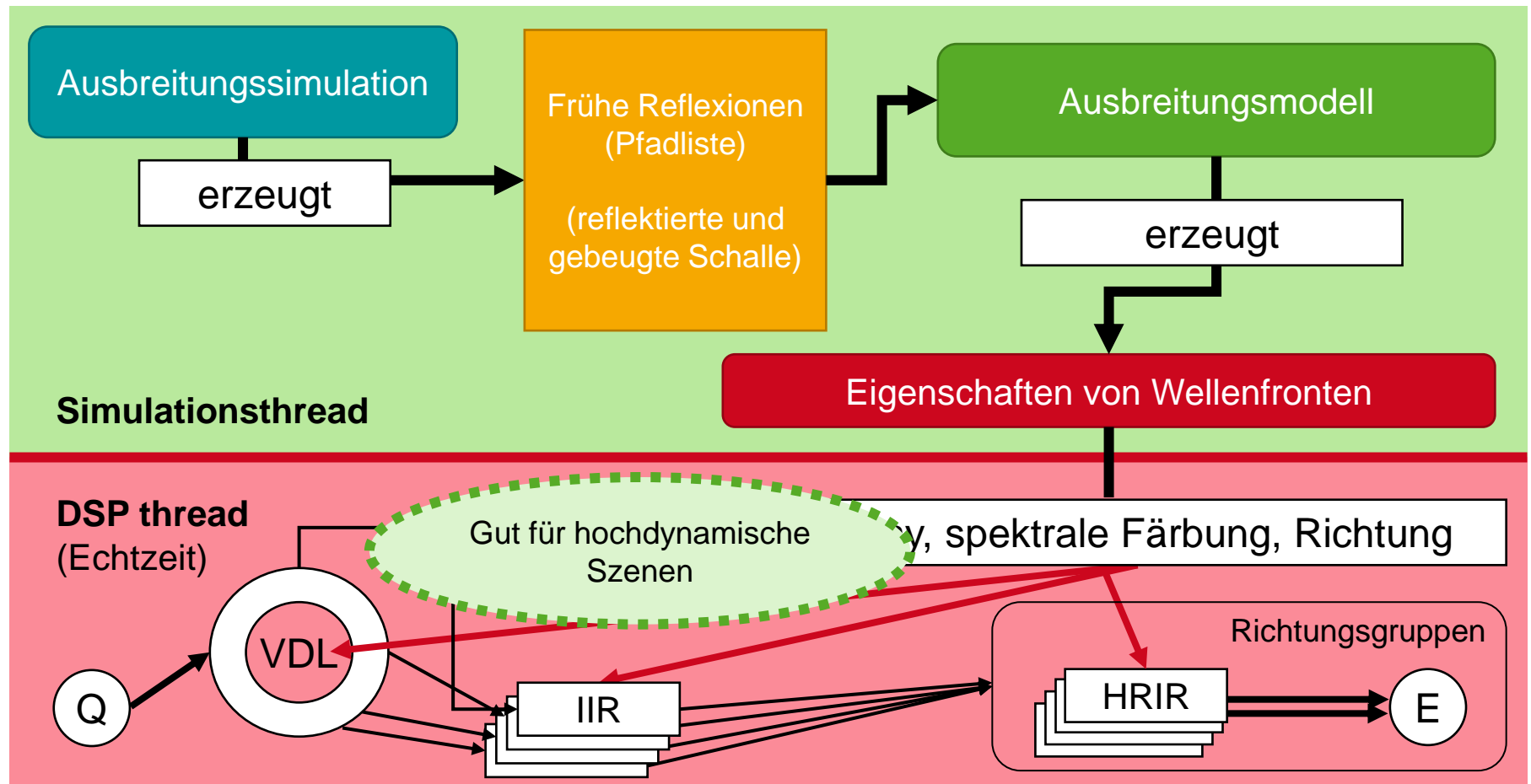
Contexte : Acoustique ambiante binaurale



FIR = Finite Impulse Response

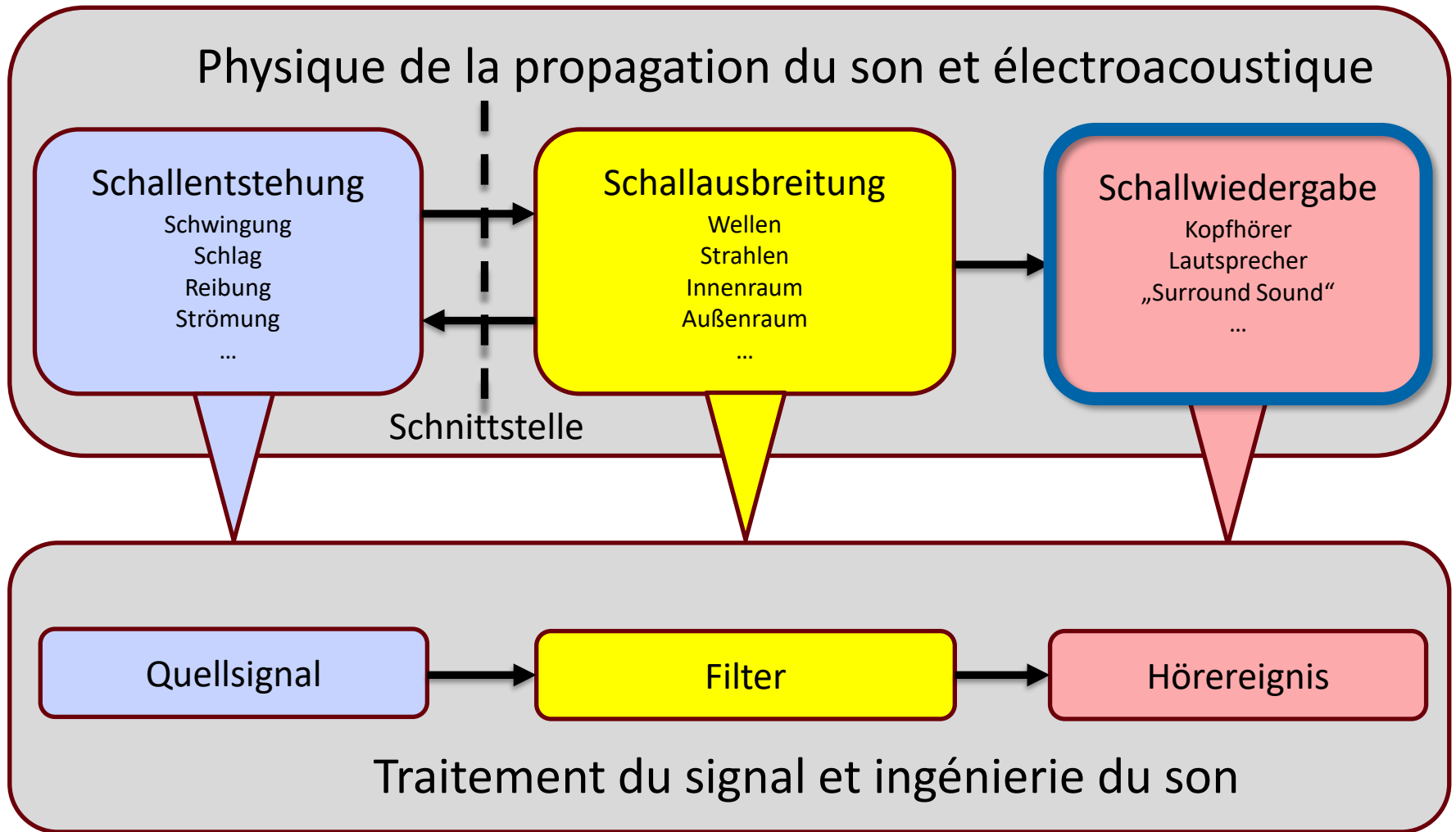
Traitement numérique du signal

Contexte : Acoustique urbaine binaurale

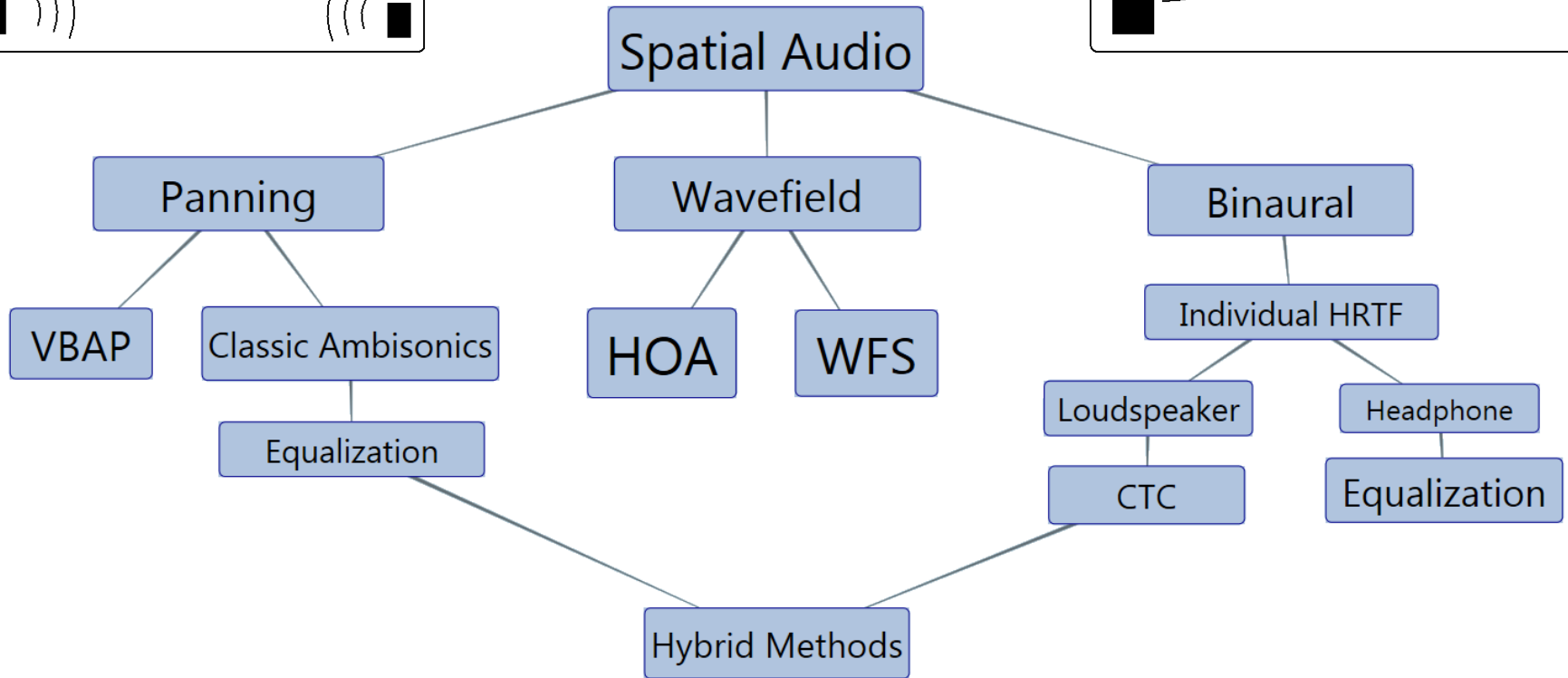
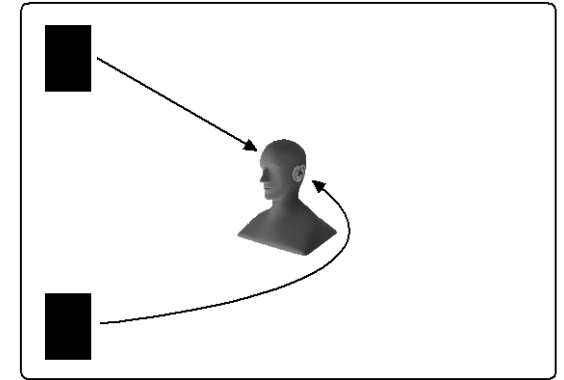
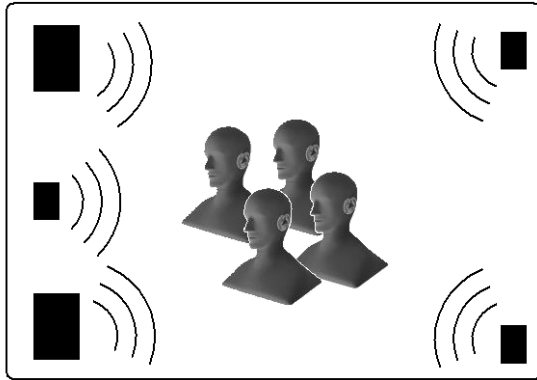


IIR = Infinite Impulse Response
VDL = Variable Delay Line

Auralisation - des données au son

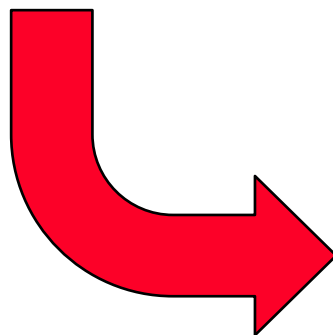


Techniques d'audition (3D)



Intégrer tout - et faire tourner très vite

Sources
Simulation acoustique
Traitement du signal
Lecture 3D

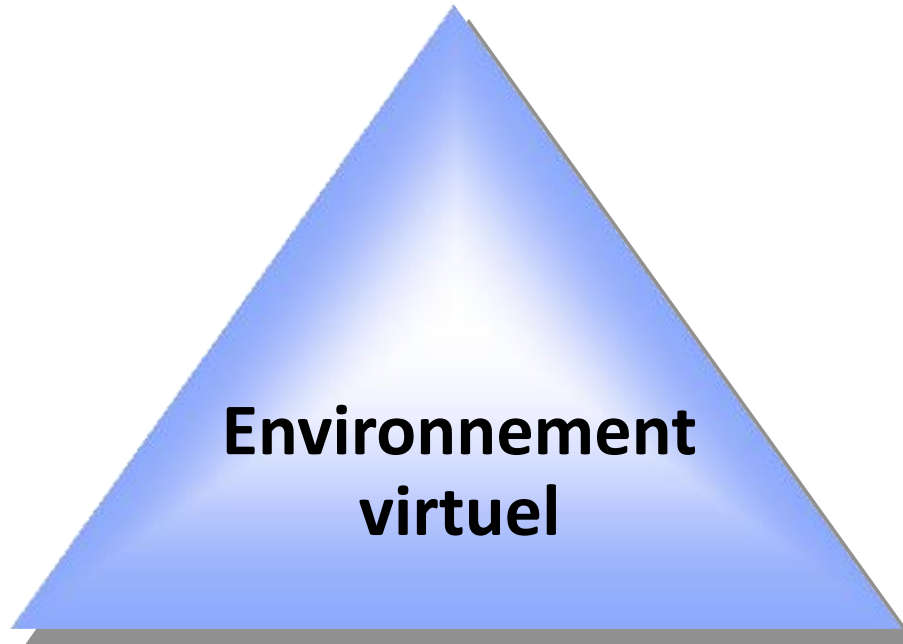


Réalité virtuelle acoustique

temps réel
multimodalité
interaction

Qu'est-ce que la "réalité virtuelle" ?

Interface intuitive, **tridimensionnelle**, immersive



Interaction multimodale :

- visuelle
- **acoustique**
- haptique/tactile

Interaction **en temps réel** :

- navigation
- manipulation
- typique : latence de 50 ms max.

Qu'est-ce que le "temps réel" ?

- Quelle dynamique/interaction est nécessaire ?
- Les utilisateurs contrôlent-ils les sources dans la scène ou les sources sont-elles "préprogrammées" ?
- Les utilisateurs changent-ils la scène ?
- Les utilisateurs se déplacent-ils ? Comment ?

Le système doit réagir en temps réel à toutes ces interventions sur l'auralisation.

- "Temps réel" : typiquement avec des latences de 50 ms maximum

Exemples d'application

- **Acoustique des salles**

(source stationnaire, très nombreuses réflexions (spécifiquement pertinentes), le récepteur peut tourner la tête) -> Filtre FIR, HOA ou binaural adaptatif

- **Espaces sonores**

(sources en mouvement, peu de réflexions, le récepteur peut se déplacer)

-> Filtre VDL, gestion des scènes nécessaire (par ex. "Game Engine")

- **Isolation phonique**

(source stationnaire, courbe d'atténuation relativement lisse (spécifiquement pertinente), le son diffus n'est pertinent que globalement, le récepteur peut tourner la tête)

-> Filtre FIR, binaural adaptatif

- **Simulateur de conduite et de vol**

(sources en mouvement, l'utilisateur contrôle la source, transmission relativement lisse de l'information, etc. (spécifiquement pertinent), le son diffus n'est pertinent que globalement, le récepteur peut tourner la tête)

- **Recherche sur l'audition**

(conditions variables selon la question posée)

Acoustique des églises - Cluny



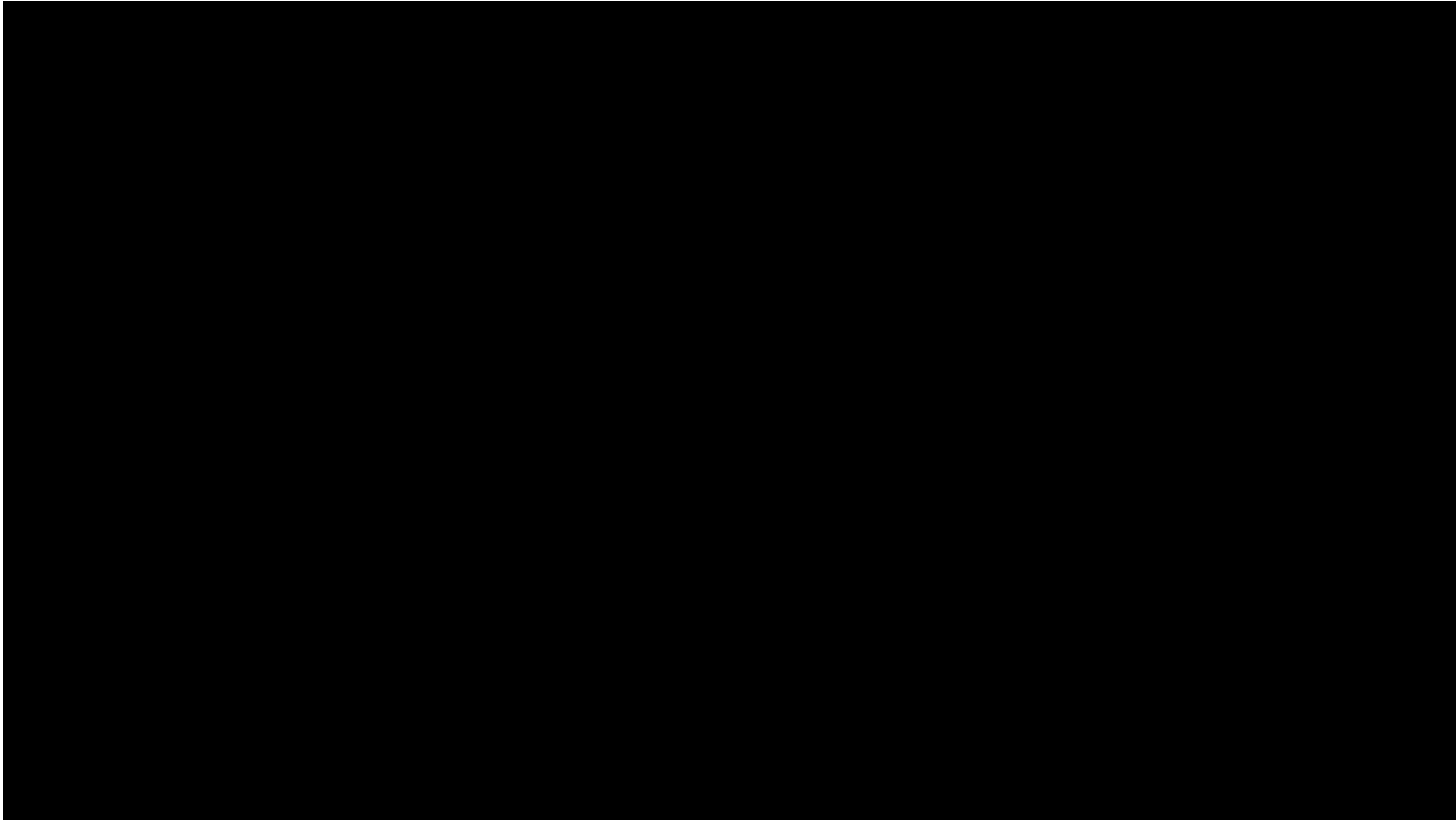
Dokumentation ARD

→ Mediathek
„SWR Cluny“

Acoustique de la salle de classe (compréhension de la parole dans un environnement bruyant)

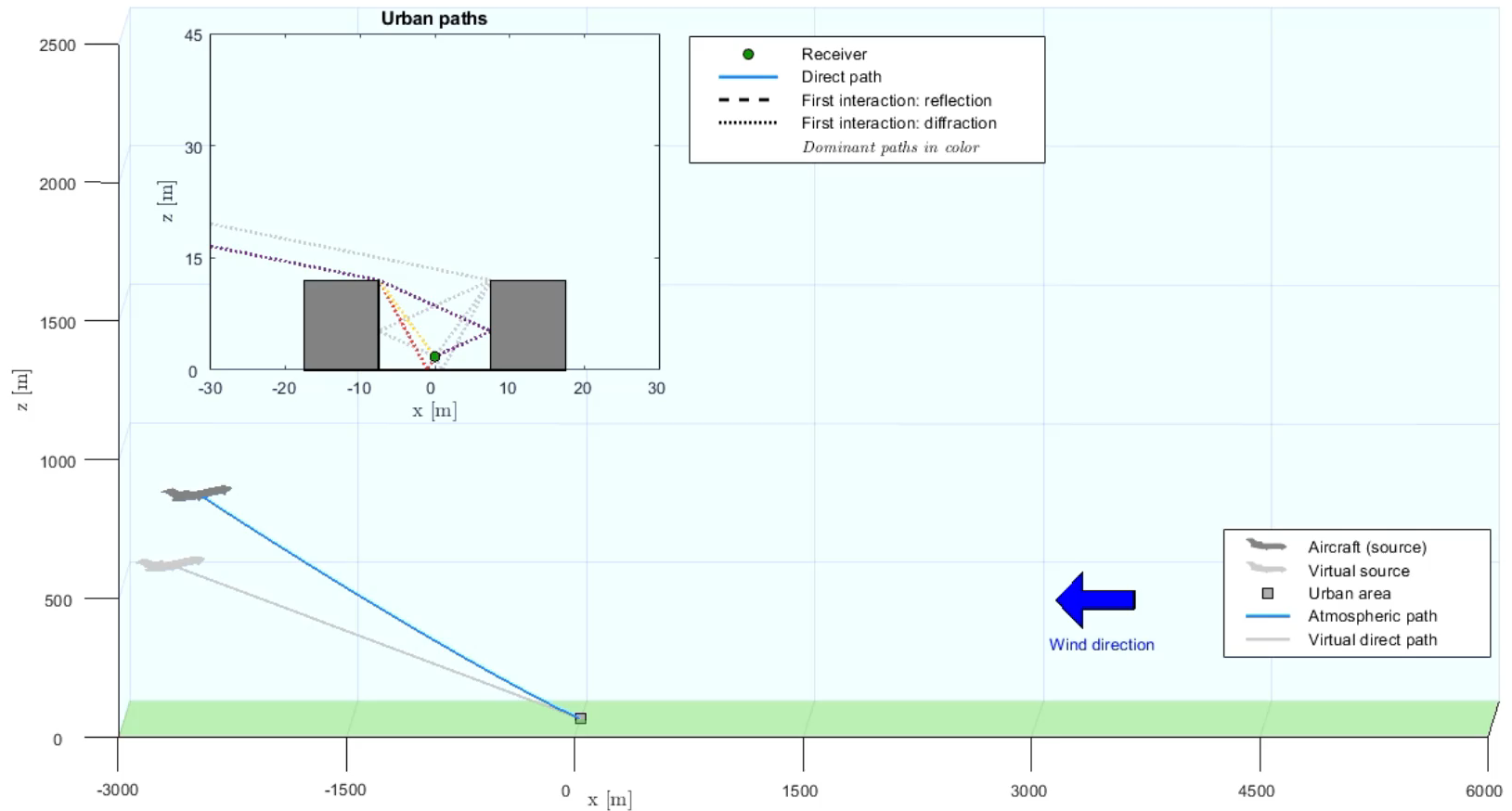


Soundscapes „IHTA-Park“



<https://youtu.be/rudxfV94UwA>

Survol d'une ville par un avion



Perspectives : applications dans la recherche et la pratique

- Opération : modèle CAO, sources, modèles de propagation, implémentation (si audiovisuel : via Unity, Unreal, ect.), interface audio 3D
- Tout cela est disponible, mais malheureusement pas dans des formats standard
- Défis à relever :
 - nous avons besoin de formats standard pour les données de modèles (acoustiques)
 - des simulations plus précises (y compris des modèles d'ondes)
 - meilleur audio 3D (interaction, tracking, temps réel, ...)
 - programmation : intégration plus efficace de la simulation et traitement du signal -> scénarios plus complexes

APPLICATIONS DE L'AURALISATION

Un grand merci à :

Lukas Aspöck, Christian Dreier, Jonas Heck, Anne Heimes, Josep Llorca-Bofi, Pascal Palenda, Philipp Schäfer



mvo@akustik.rwth-aachen.de

Plus d'informations/démonstrations :
www.akustik.rwth-aachen.de



Open Source: www.virtualacoustics.org
Open Access: RAVEN