

Master IGMMV

Synthèse d'images et de sons

George Drettakis

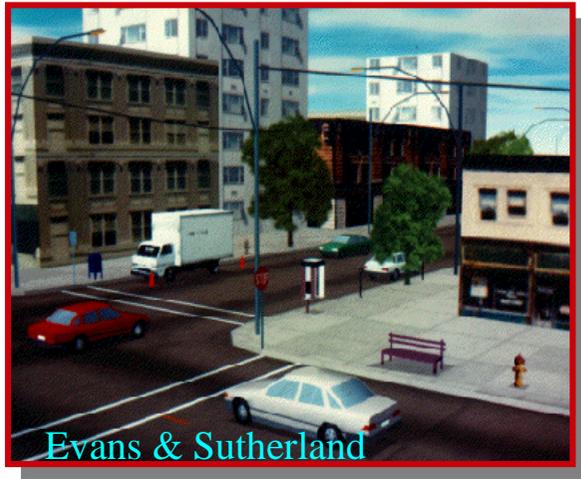
Nicolas Tsingos



Séance 2: Rendu Audio

- Diapositives en partie basées sur un cours à la conférence SIGGRAPH 2002
 - Thomas Funkhouser, Nicolas Tsingos and Jean-Marc Jot. **Survey of Methods for Modeling Sound Propagation in Interactive Virtual Environment Systems.**
- www-sop.inria.fr/reves/Nicolas.Tsingos
 - Article “Réalité virtuelle sonorisée”

Motivation



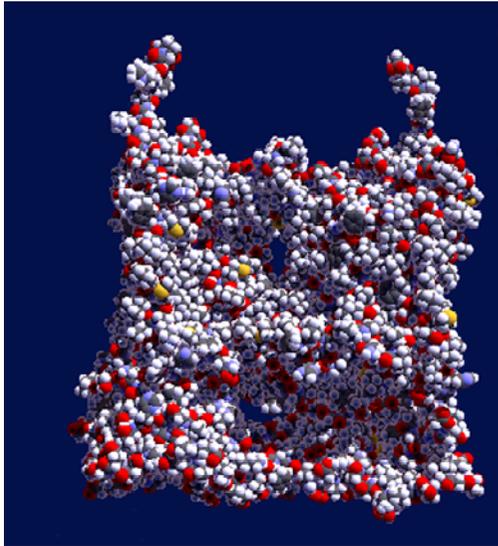
- L'apport du son est indéniable
 - films, jeux vidéos, simulation, réalité virtuelle
 - permet de localiser des sources sonores invisibles
 - nous informe sur la nature de l'environnement
 - augmente le réalisme et la sensation d'immersion

Motivation



- Le son doit être cohérent avec les visuels
 - synchronisation
 - cohérence des effets (distance, position, etc.)

Motivation



- Pour certaines applications le son est un facteur majeur
 - sonification, fouille de données, design sonore
 - télécommunications, acoustique architecturale

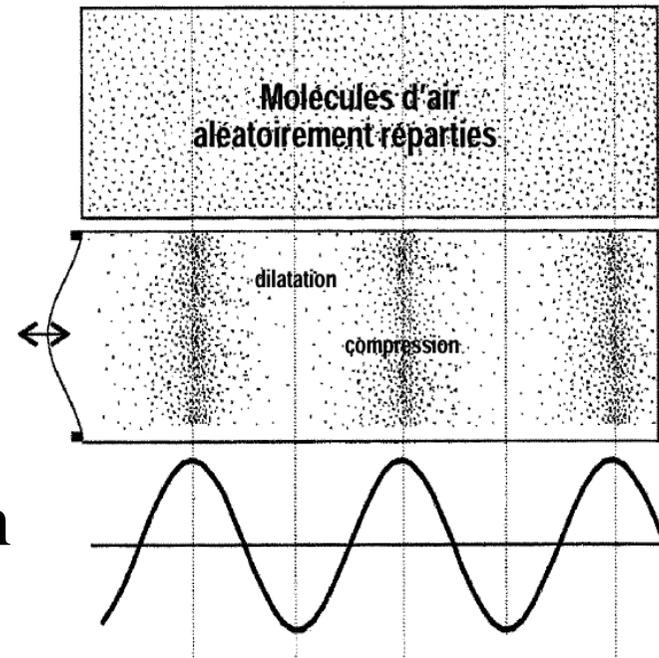
Plan

- Introduction au son
- Acquisition et numérisation
- Synthèse du son
- Traitement du signal audio
- Spatialisation/”rendu” du son
- Perception et restitution 3D du son

Introduction au son physique

- **Onde mécanique**

- compression/dilatation des molécules du milieu
- pas de son dans le vide !
- créée par un corps en vibration
- caractérisée par le niveau de **pression acoustique** (Pa ou N.m^{-2})
- également mesurée en décibels (dB) : $20 \log_{10}(P/P_{\text{réf}})$

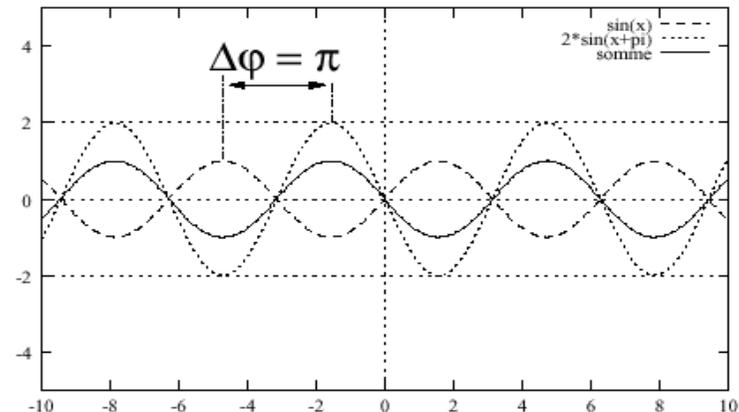
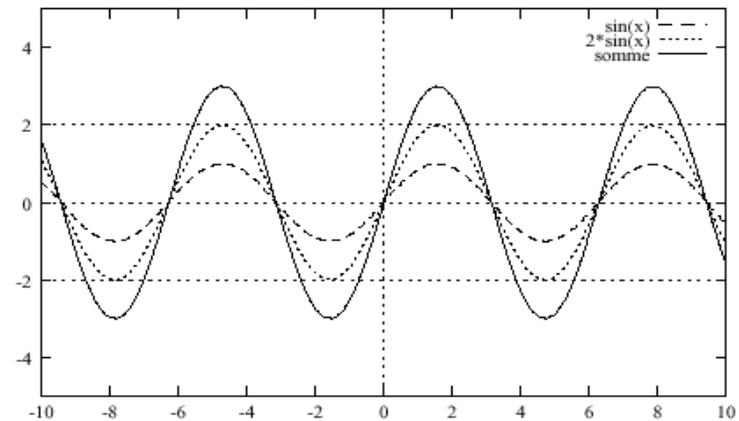
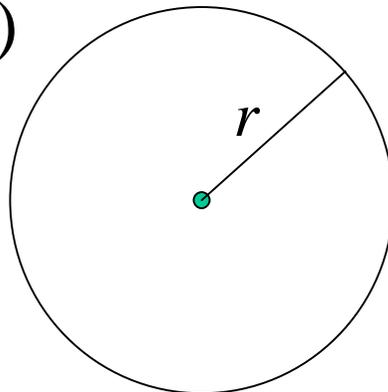


Introduction au son physique

- Ordres de grandeur
 - célérité : **340 m/s** (air) 1000 m/s (eau/métal)
 - fréquences: 0 - 400 kHz
(**audible de 20Hz à 20kHz**)
 - longueur d'onde : 100m - 1mm
- Lumière:
 - célérité : $3 \cdot 10^8$ m/s (vide)
 - fréquences: 10^{11} - 10^{17} Hz
 - longueur d'ondes: $7.8 \cdot 10^{-7}$ m (rouge) - $3.9 \cdot 10^{-7}$ m (violet)

Ondes harmoniques

- Onde sphérique:
 - $P(r,t) = P_0/r \sin(\omega t - kr)$
 - $\omega = 2\pi f$ (pulsation)
 - $k = \omega/c$ (nombre d'onde)
 - $\lambda = 2\pi/k$ (longueur d'onde)
 - $\varphi = kr$ (phase)

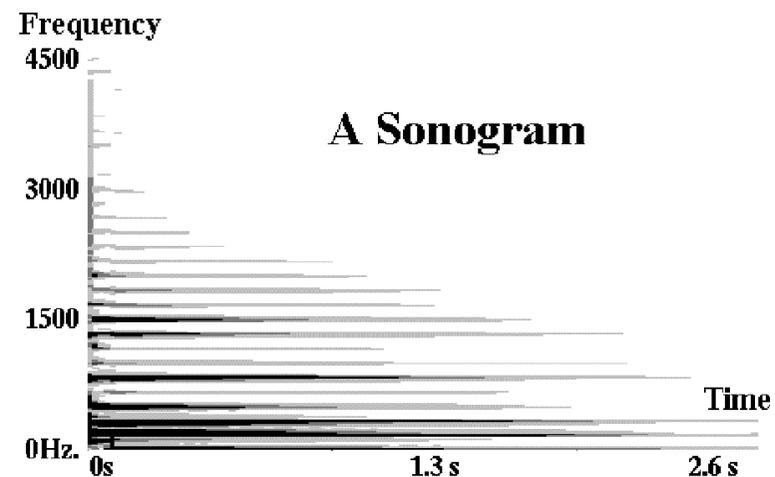


Ondes complexes

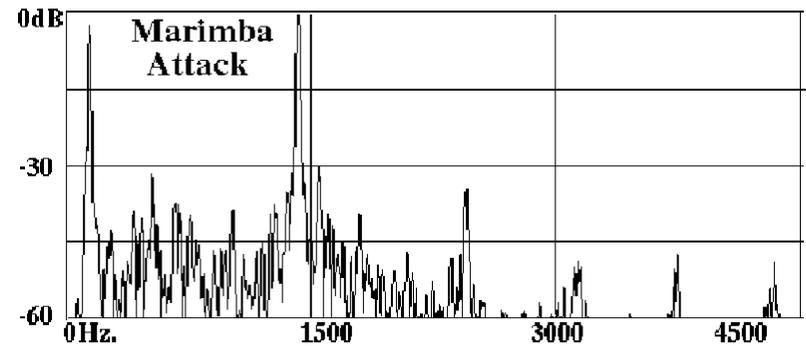
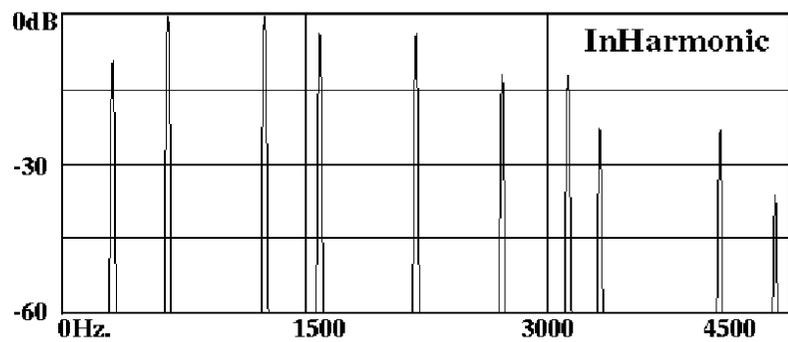
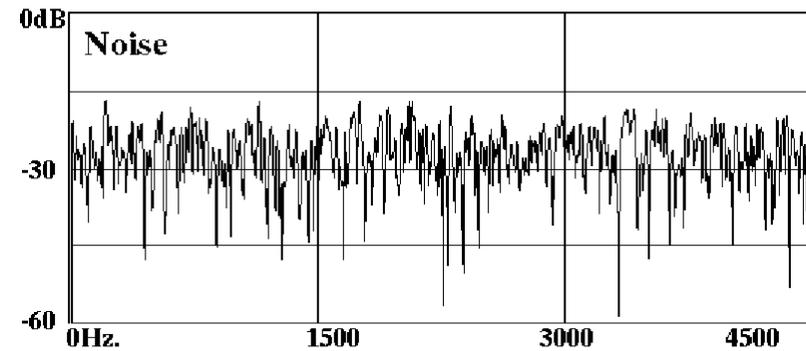
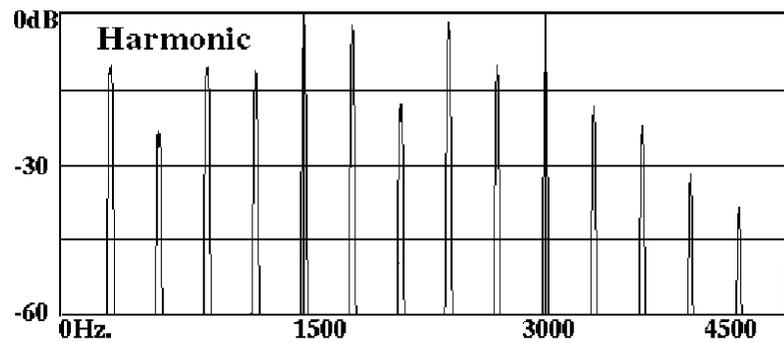
- Peuvent se décomposer en ondes harmoniques
 - décomposition linéaire

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{S}(f) e^{i2\pi ft} df$$

- Analyse de Fourier
 - FFT par blocs
 - spectrogramme



Ondes complexes

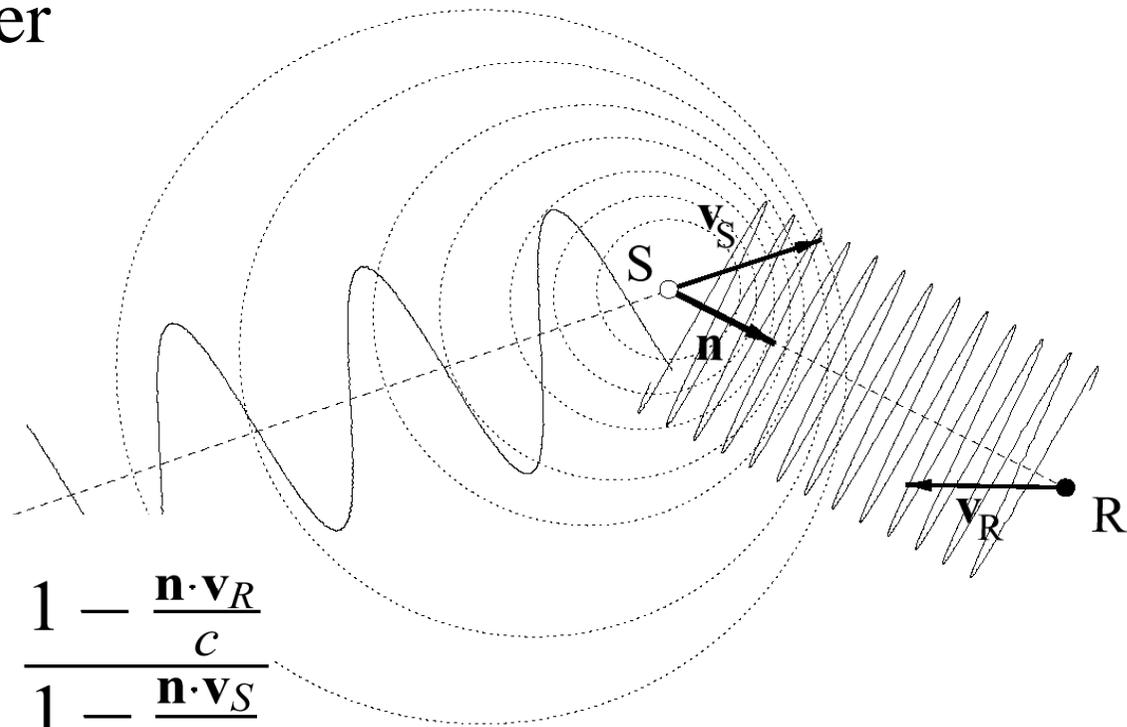


Propagation du son à l'air libre

- Atténuation par la distance
 - $1/r$ pour une source ponctuelle (onde sphérique)
- Absorption dans l'atmosphère
 - atténuation des hautes fréquences
- Phénomènes plus complexes
 - gradients de température
 - vents
 - discontinuités d'impédance acoustique

Propagation du son (2)

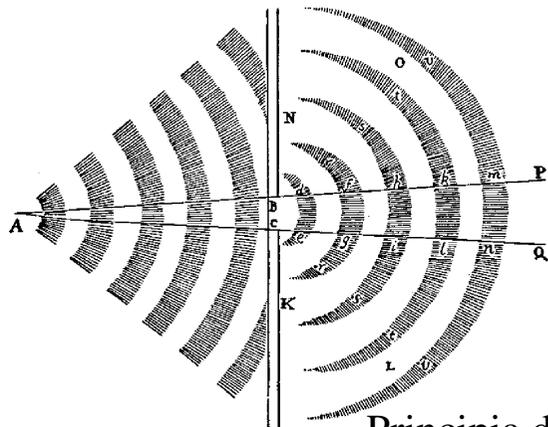
- Sources/Auditeur en mouvement
 - Effet Doppler



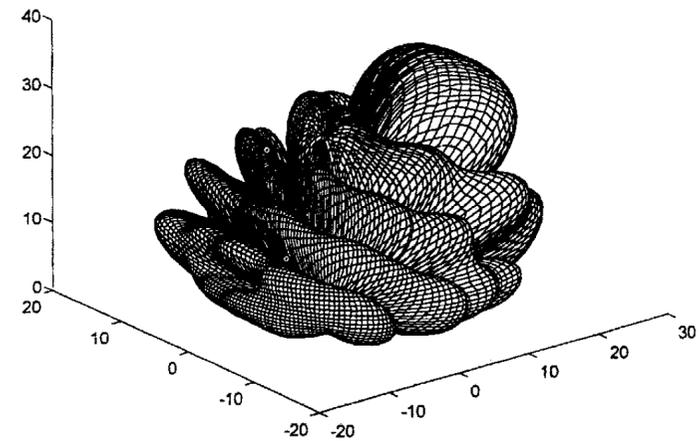
$$\Delta_{Doppler} = \frac{f_R}{f_S} = \frac{1 - \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R}{c}}{1 - \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_S}{c}}$$

Propagation du son (3)

- Diffraction du son



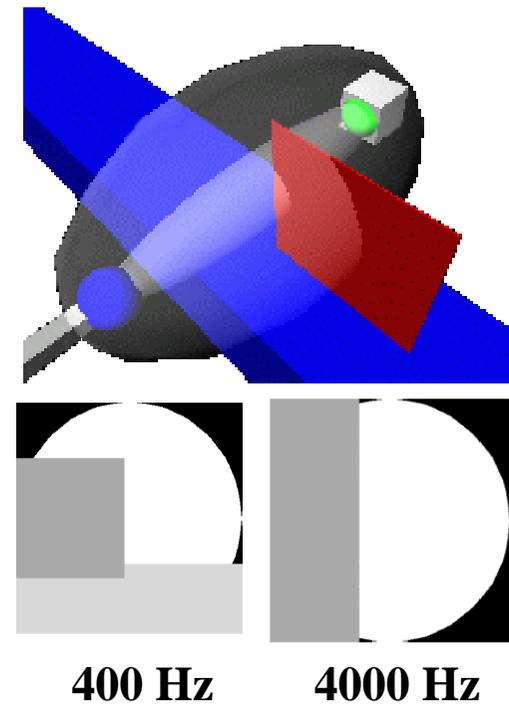
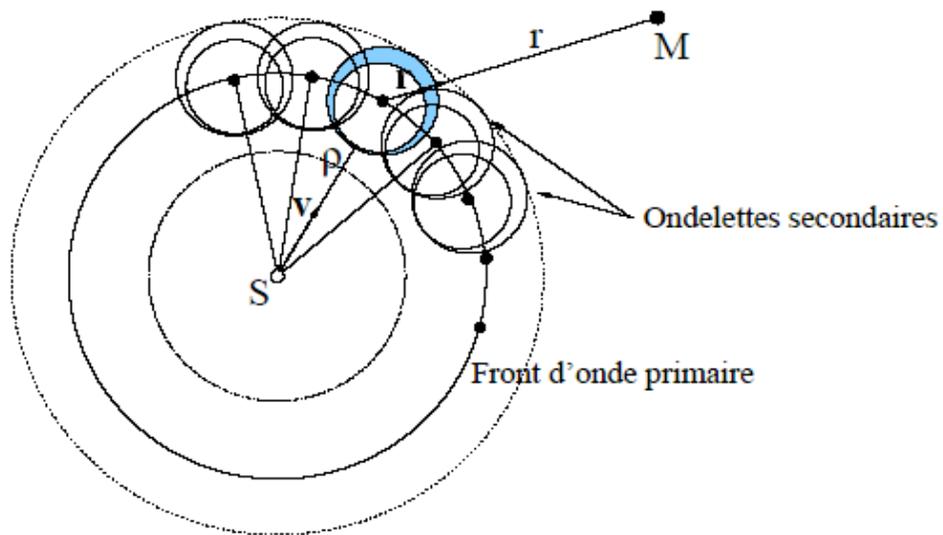
Principia de Newton (1868)



- « visibilité » non binaire
- rend difficile la définition d'un modèle de réflexion pour des surfaces complexes

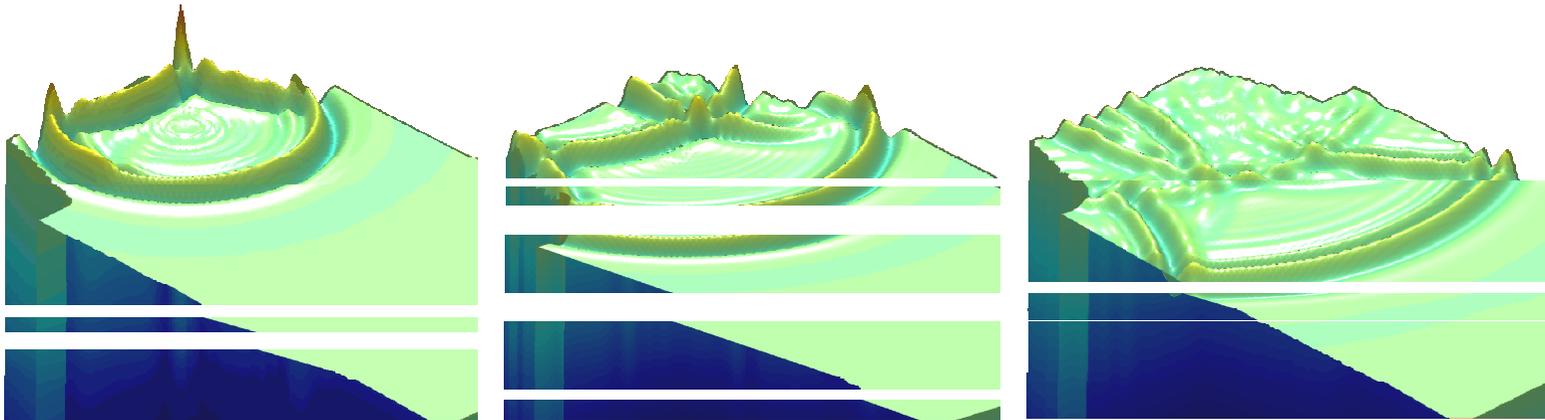
Propagation du son (4)

- Occlusion
 - théorie d'Huygens/Fresnel

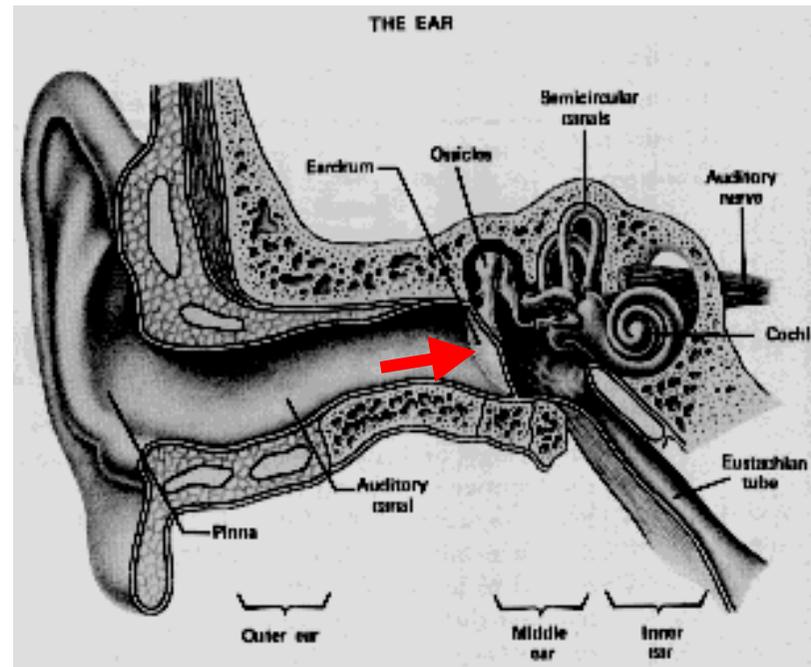


Propagation du son (5)

- Réverbération
 - superposition de réflexions/diffractions du son au cours du temps
 - particulièrement sensible dans les espaces clos



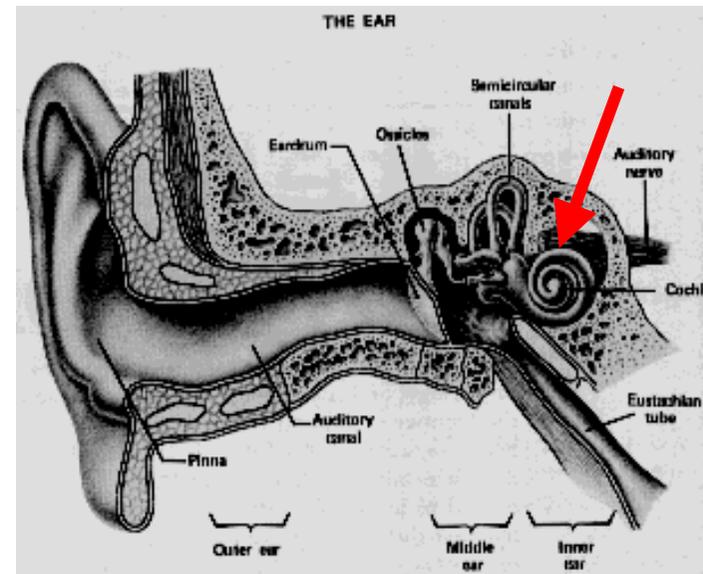
Perception du son



- L'oreille est un récepteur complexe
 - le tympan mesure la pression acoustique
 - convertie en atomes temps-fréquence par le cortex

Perception du son

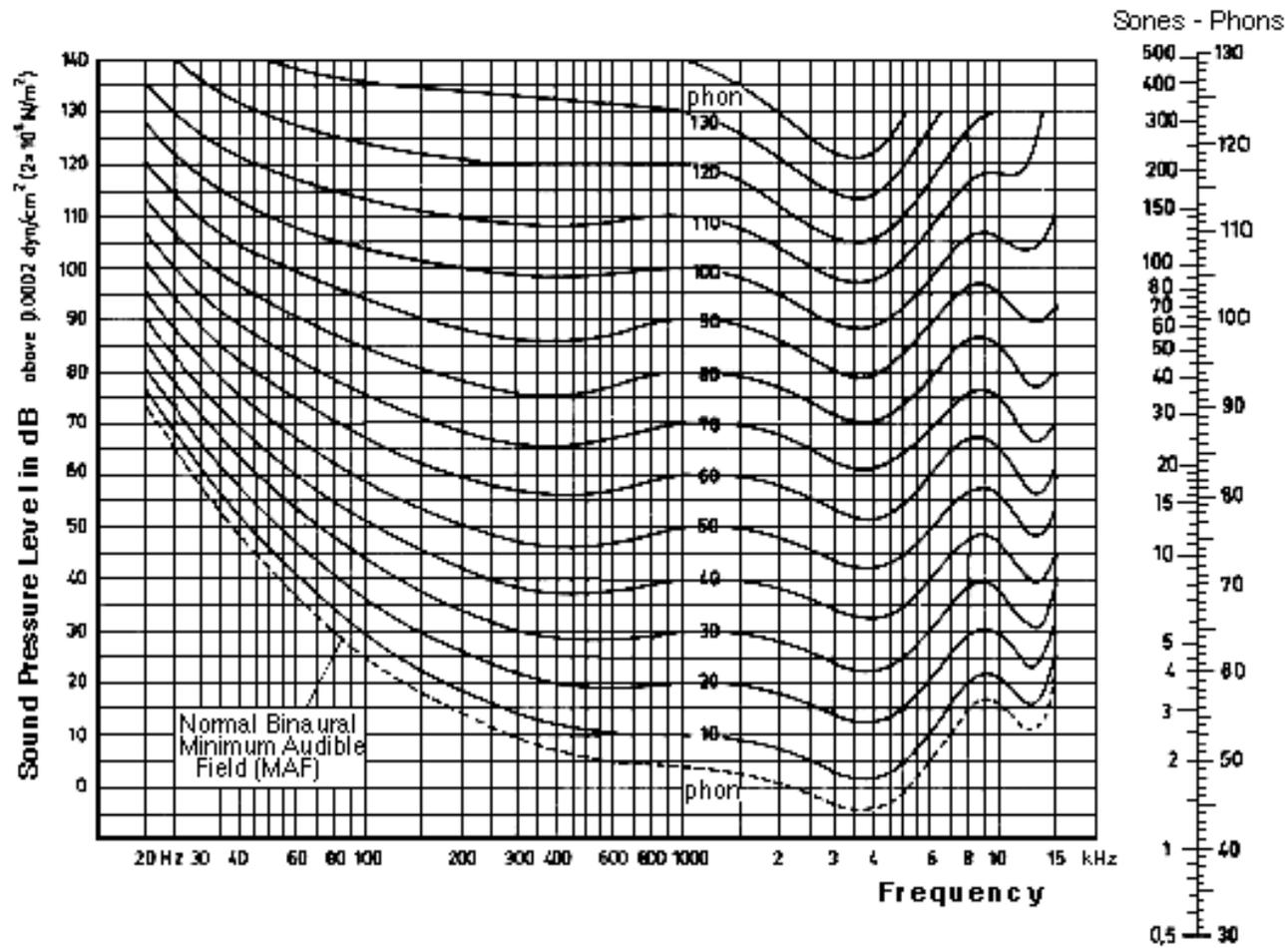
- Filtrage en « **bandes critiques** »
 - membrane basilaire (cochlée)
 - le son est découpé en **25 bandes** de fréquences
 - 1/3 octave



Perception du son

- Fréquences audibles: 20Hz- 20kHz
- Dynamique: 10^{12} W.m² (120 dB) du seuil d'audition au seuil de douleur

Perception du son



Perception du son

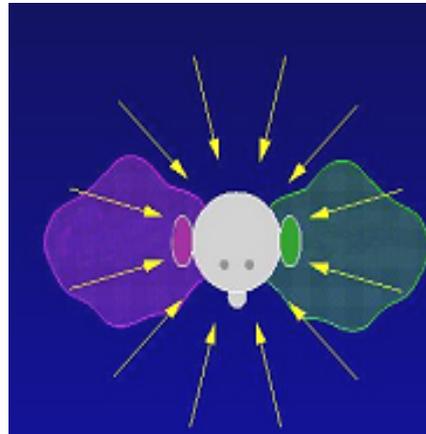
- Masquage
 - **Effet de précedence** : pour des signaux similaires le premier arrivé à l'auditeur masque le second (essayez avec votre chaine hifi)
 - **Masquage temporel** : un son fort masque un son faible immédiatement après...et même avant !
 - **Masquage fréquentiel**: une fréquence masque les fréquences voisines (+ dans les basses)

Perception du son

- Le spectre d'amplitude est perceptivement très important
 - la phase est rapidement altérée par la propagation dans l'environnement
- Mais la phase est importante
 - surtout pour les transitoires (attaques, consonnes)
- Amplitude/Phase correspondent mieux à notre perception que les variations de pression

Perception du son

- la perception **binaurale** (des 2 oreilles) donne des indications de **direction de provenance en 3D**



Plan

- Introduction au son
- Acquisition et numérisation
- Synthèse
- Traitement du signal audio
- Spatialisation/”rendu” du son
- Perception et restitution 3D du son

Le son numérique

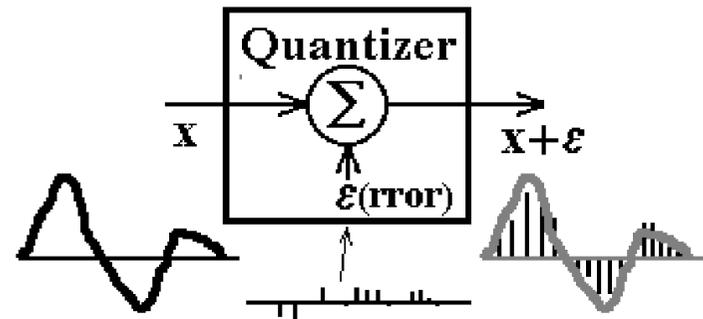
- Acquisition du son
 - microphone
 - convertit les variations de pression en variations d'intensité électrique
- Numérisation du son
 - convertit les variations d'intensité électrique en valeurs numériques
 - Pulse Code Modulation (PCM)
 - quantification et fréquence d'échantillonnage



Le son numérique

- **Quantification**

- nombre de bits utilisés pour encoder l'amplitude du signal
- virgule fixe ou virgule flottante
- linéaire ou non-linéaire
- **pas assez de résolution => bruit**
- détermine la **dynamique** possible du signal



Le son numérique

- **Fréquence d'échantillonnage** (sampling rate)
 - combien de fois par seconde va-t-on représenter la valeur du signal
 - **Critère de Nyquist**: il faut échantillonner à au moins **2x la plus haute fréquence** contenue dans le signal pour ne pas avoir de pertes

Le son numérique

- Quelques chiffres
 - CD : 16 bits, entiers, 44100 Hz (1.4 Mbits/sec.)
 - Téléphone: 8 bits, entiers, 8kHz, non linéaire (64 Kbit/sec.)
 - DVD: jusqu'à 192kHz, 24 bits, entiers

Synthèse du signal audio

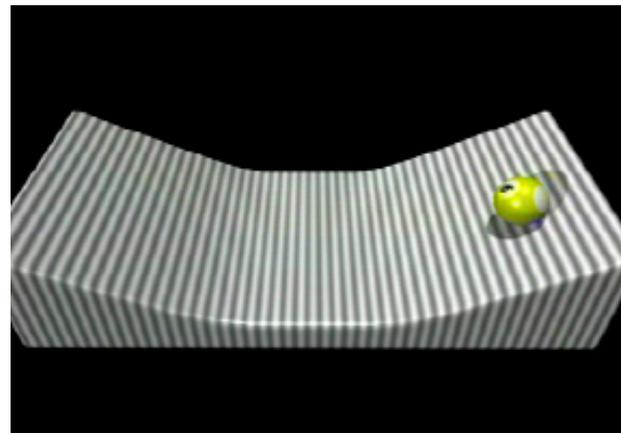
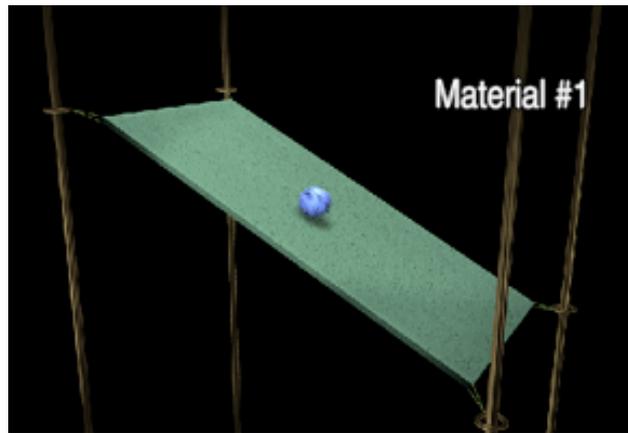
- Pourquoi synthétiser ?
 - acquisition difficile ou impossible
 - contrôle et variété des sons
 - représentation compacte
- Un vaste domaine !!!
 - synthèse additive, soustractive, granulaire, modale, concaténative...

Synthèse pour les applications audio-visuelles

- Bruits de contacts, de frottement, d'impacts
 - tout sauf voix et musique...
- Synthèse “modale”
 - sinusoides amorties + excitation
 - à base de mesures ou de simulation des modes de vibration
 - pilotée par des simulation de mécanique du solide (donnent les forces et points d'impacts)

Vidéos synthèse

- éléments finis (non interactif) [O'Brien et al. 2001]
- synthèse modale (enregistrement) [Van DenDoel et al. 2001]
- synthèse modale (modèles 3D) [O'Brien et al. 2002]



Traitement du signal audio

- Traitement audio
 - temporel : on traite chaque échantillon PCM
 - temps-fréquence : on traite la FFT de blocs courts successifs (« short-time Fourier transform »)
- Filtrage d'un signal audio
 - convolution avec un filtre

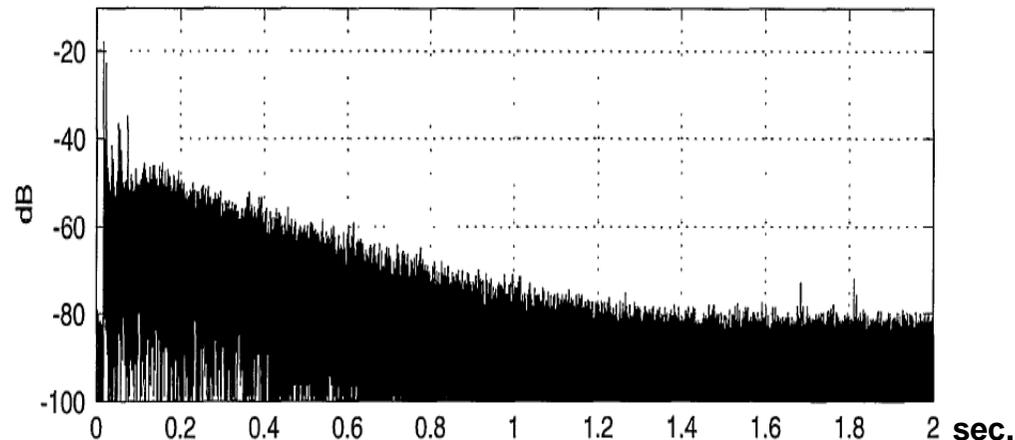
$$y(t) = \int_0^{+\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau \quad \begin{array}{c} \text{FFT} \\ \longleftrightarrow \end{array} \quad Y(f) = H(f) X(f)$$

DFT et FFT

- DFT : discrete Fourier transform $F_n \equiv \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2\pi i n k / N}$.
 - version discrète de la transformée de Fourier
- Transformée de Fourier rapide
 - calcul efficace de la transformée de Fourier Discrète
 - la DFT de N points peut être calculée en combinant 2 DFTs de N/2 points
 - algorithme récursif
 - en général N est une puissance de 2
- Complexité: $O(N \log_2 N)$ au lieu de $O(N^2)$

Réponse impulsionnelle

- la réponse d'un système lorsque l'entrée est une impulsion (Dirac)
 - suffit à décrire les propriétés du système
 - peut être mesurée : e.g., le réponse d'un haut parleur, d'une pièce (réverbération)



Filtres IIR et FIR

- Infinite Impulse Response: le filtre est décrit par une relation récurrente “infinie”

$$y(n) = \sum_{l=0}^L a_l x(n-l) - \sum_{k=1}^K b_k y(n-k).$$

- Finite Impulse Response : le filtre est décrit par un nombre de coefficients fini.

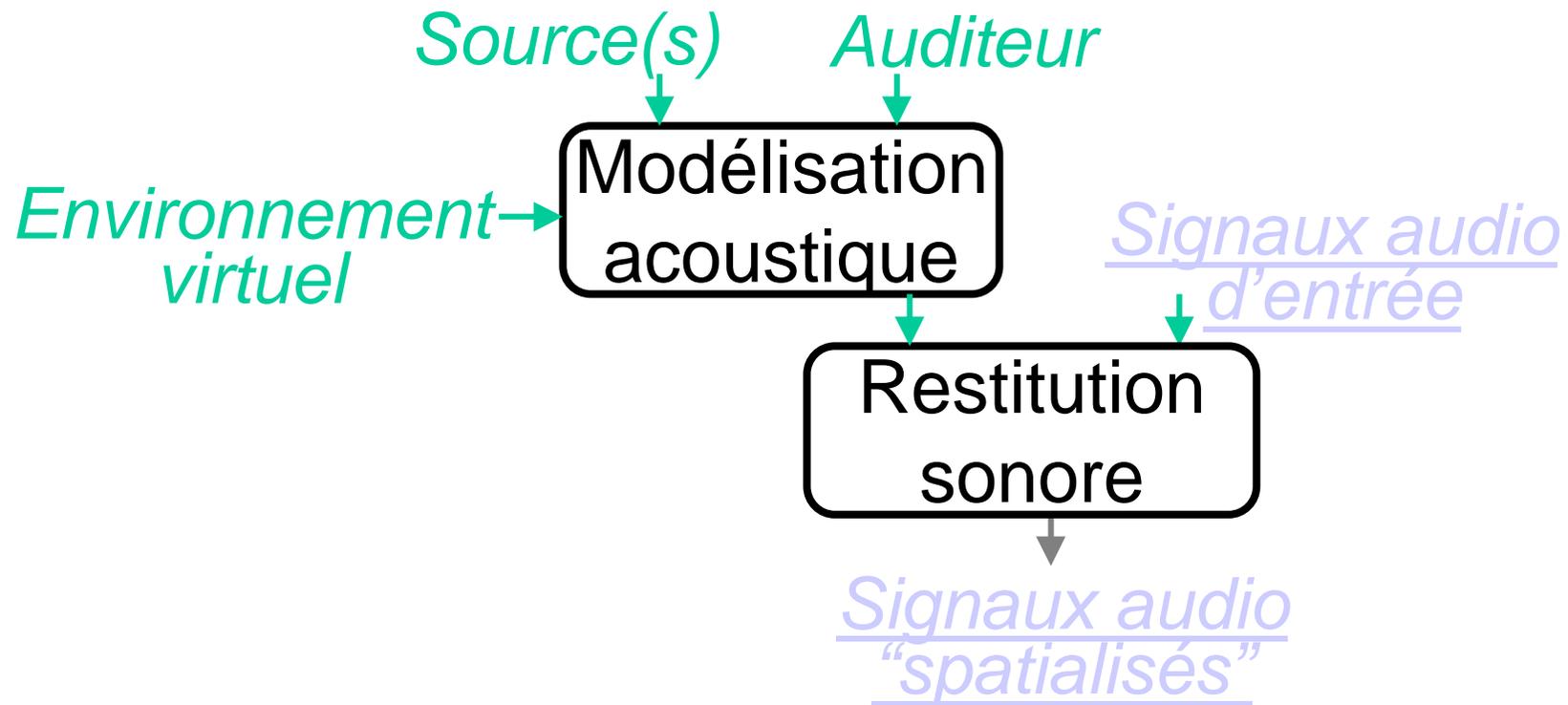
$$y(n) = \sum_m h(m)x(n-m), (n, m) \in \mathbb{N}^2$$

Plan

- Introduction au son
- Acquisition et numérisation
- Synthèse
- Traitement du signal audio
- Spatialisation/”rendu” du son
- Perception et restitution 3D du son

Auralisation ou “rendu” audio

- Rendre audible une scène sonore virtuelle



Modélisation acoustique

- **Propagation & réverbération**

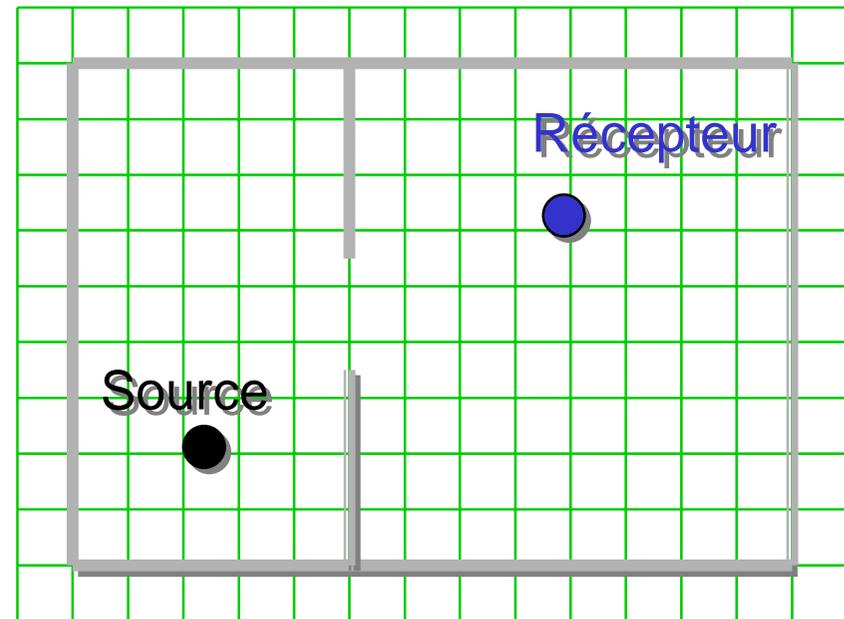
- résoudre l'équation d'onde avec les conditions aux limites du problème considéré

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = Q_0 \quad \text{dans le volume}$$
$$Z \frac{\partial p}{\partial n} + i\omega\rho_0 p = 0 \quad \text{sur les parois}$$

- Eléments finis, différences finies, éléments finis de frontière

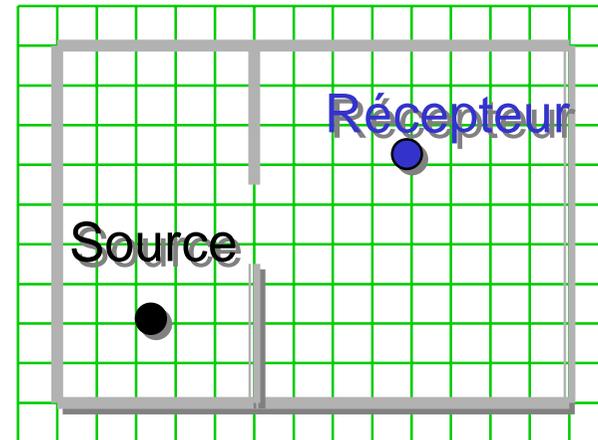
Eléments finis

- Résoudre l'équation d'onde sur une grille 3D
 - résolution en fréquence



Différences finies

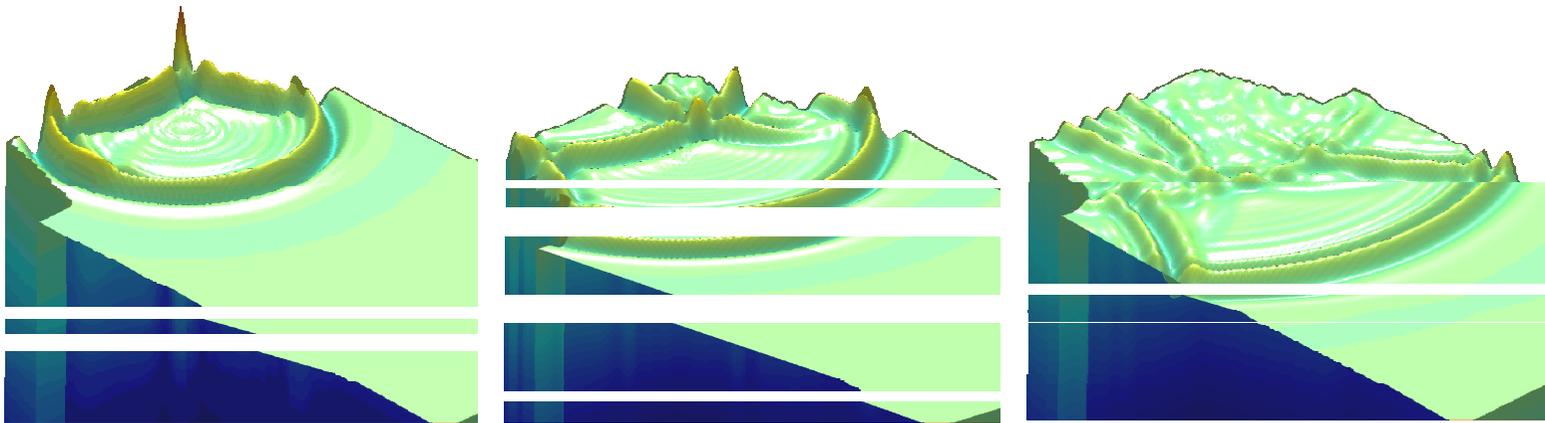
- Résolution en temps
 - équations simples
 - fréquence max : $1/4 f_s$
 - utilisable surtout à basse fréquence



$$p(t + 1, x, y, z) = 1/3 [p(t, x, y + 1, z) + p(t, x, y - 1, z)] - p(t - 1, x, y, z) + 1/3 [p(t, x, y, z + 1) + p(t, x, y, z - 1)]$$

$$f_s = \frac{c\sqrt{N}}{\Delta x} \approx \frac{589}{\Delta x} \text{ Hz},$$

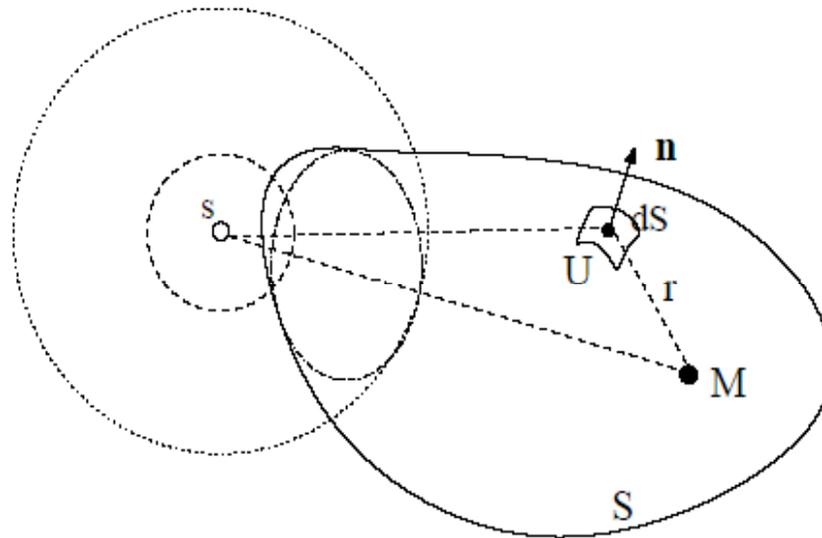
Différences finies



© Savioja-Lokki (Helsinki Univ. of Technology, 2001)

Elements finis de frontière

- Résoudre l'équation d'onde sur les surfaces discrétisées (théorème de Helmholtz-Kirchoff)



$$\hat{P}(M) = \hat{P}_0(M) + \left[\iint_S \hat{P}(U) \nabla \left(-\frac{e^{ikr}}{4\pi r} \right) \cdot \mathbf{dS} - \iint_S -\frac{e^{ikr}}{4\pi r} \nabla \hat{P}(U) \cdot \mathbf{dS} \right]$$

Avantages et inconvénients

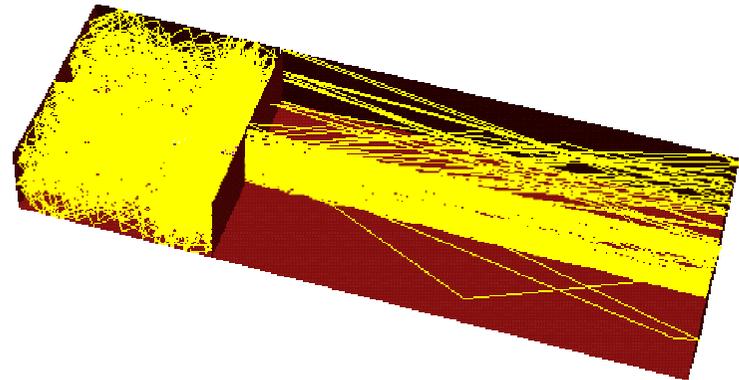
- Avantages
 - la solution de référence
 - prend en compte tous les phénomènes de manière unifiée
- Inconvénients
 - très coûteux
 - taille des éléments doit être inférieure à la longueur d'onde

Modélisation acoustique

- **Propagation & réverbération**

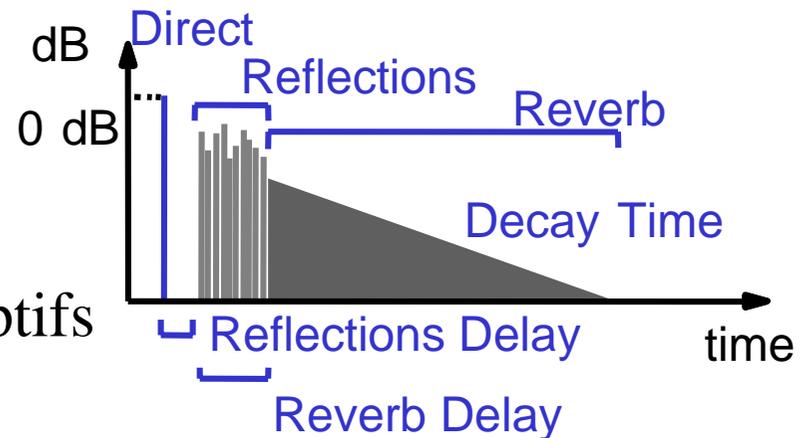
- Modèle géométrique

- Construire les réflexions
- En déduire un filtre



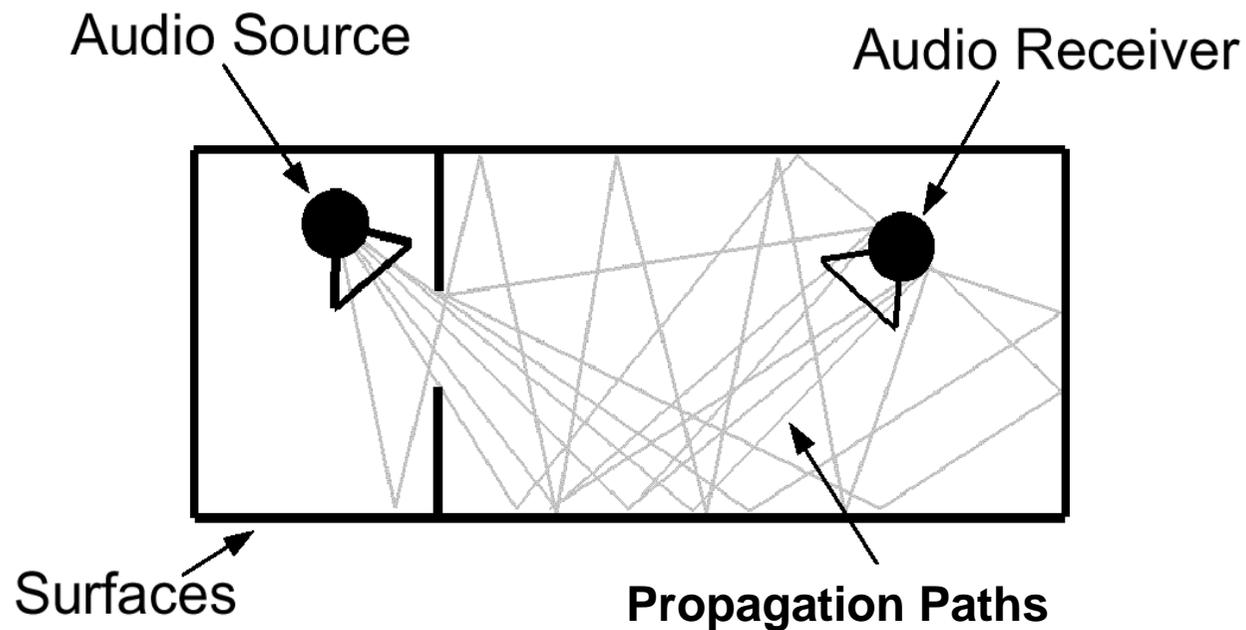
- Modèle perceptif

- approximation statistique
- réverbération artificielle
- contrôle par critères perceptifs



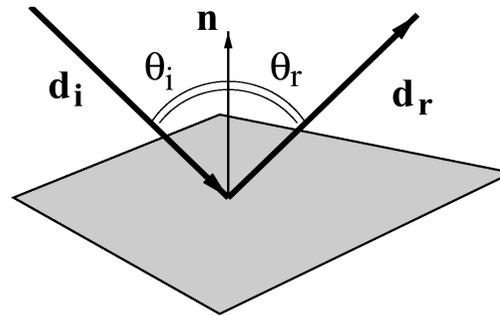
Acoustique géométrique

- “Echos” dus aux différents chemins de propagation du son

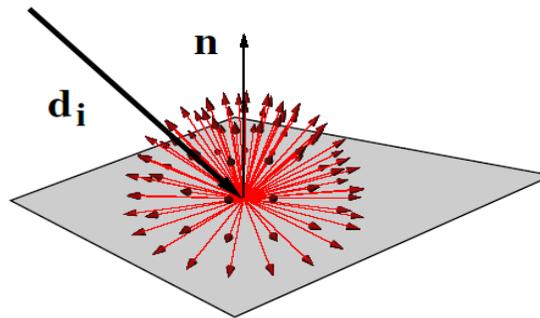


Acoustique géométrique (2)

- Réflexion
 - spéculaire

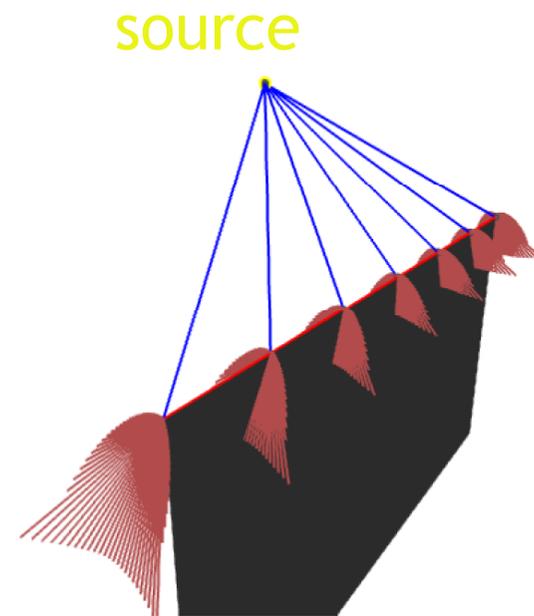
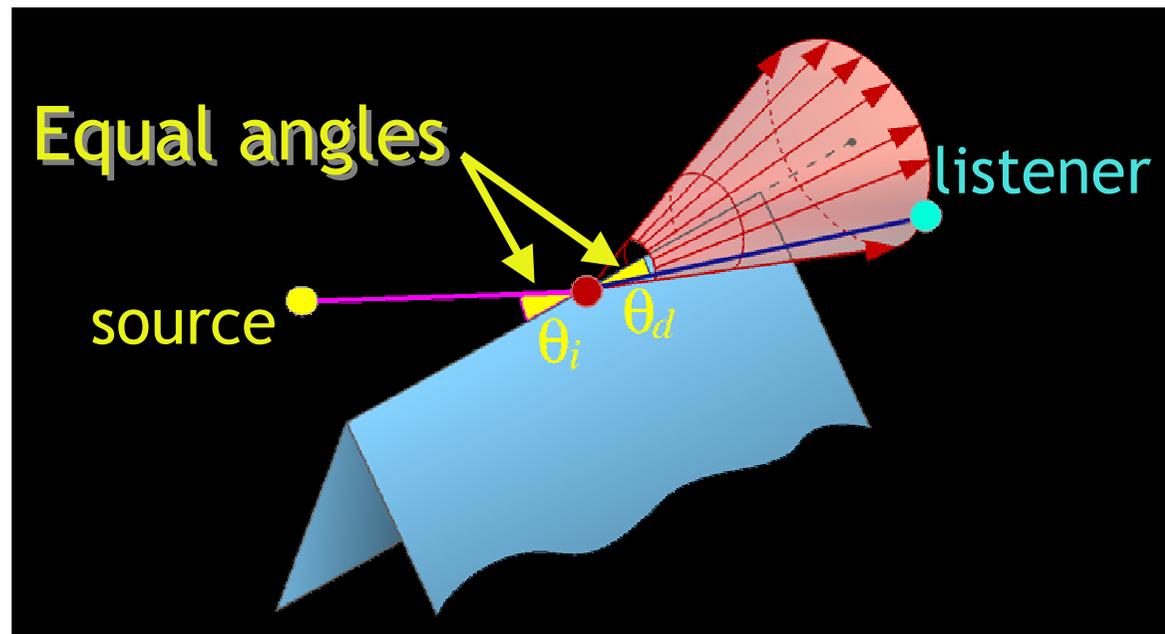


- (diffuse)



Acoustique géométrique (3)

- Théorie géométrique de la diffraction
 - les arêtes sont des sources de son



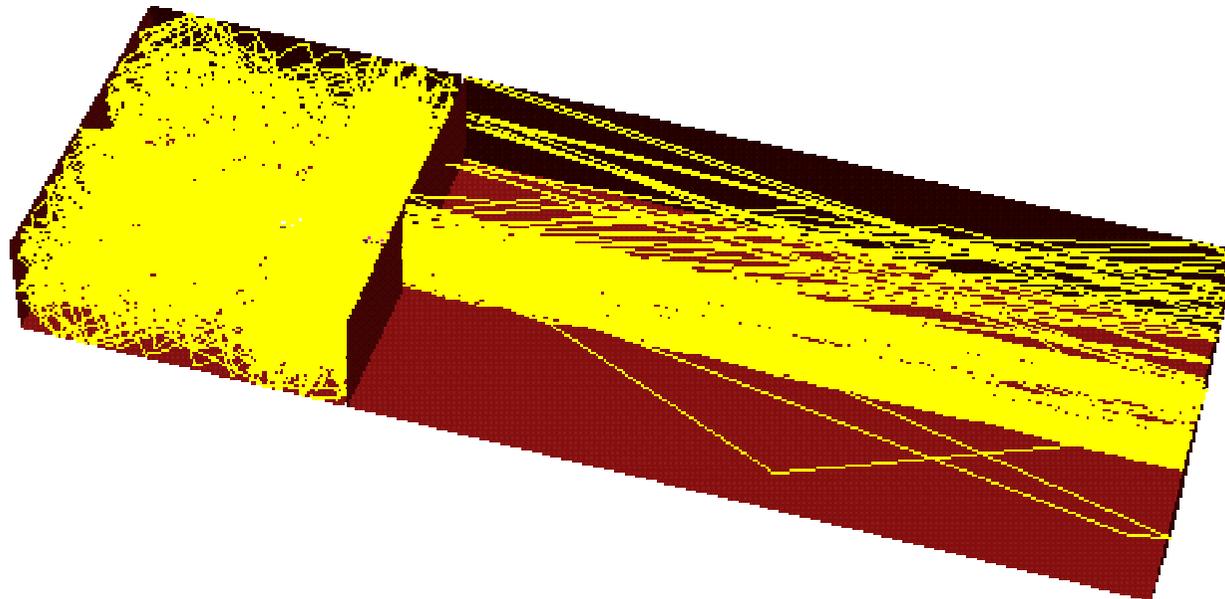
Différentes approches

- Sources images
- Tracer de rayon
- Tracer de faisceaux

- “Radiosité”

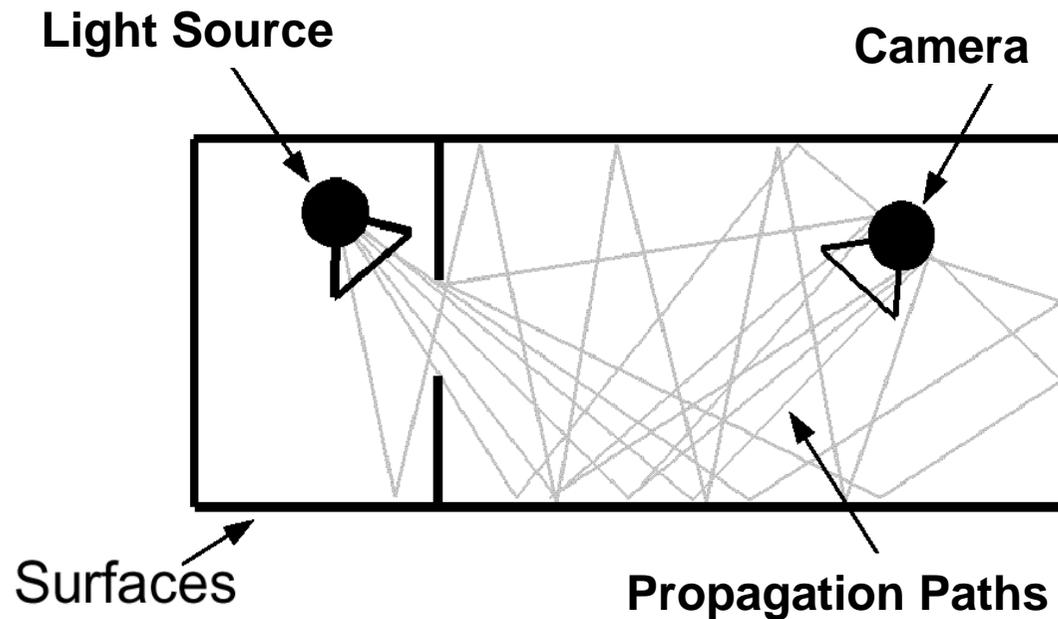
Exemples simples

- une pièce cubique
- deux pièces connectées par une porte
- Funkhouser et al. 98



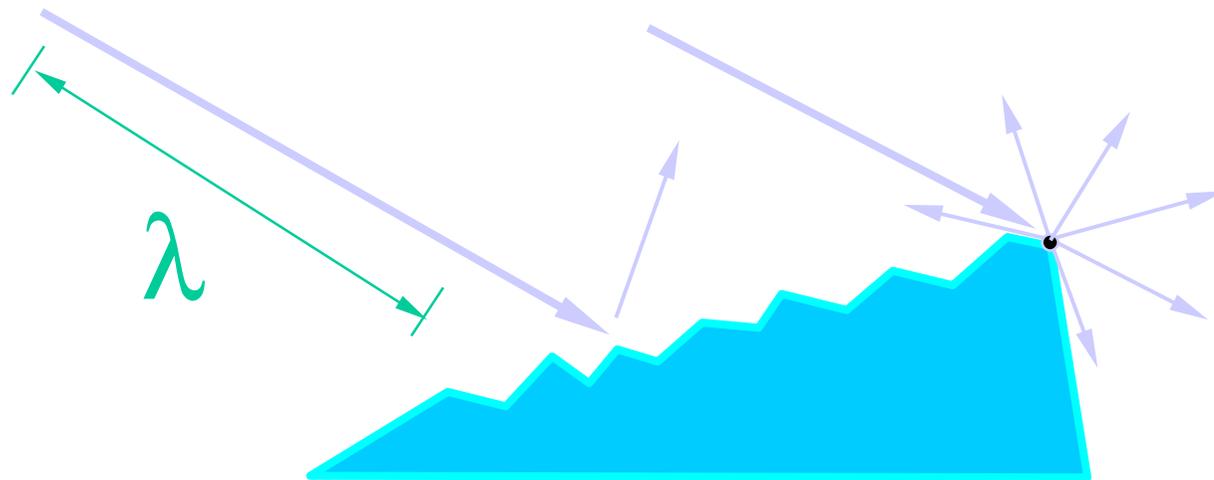
Similarité avec le rendu en synthèse d'image

- Modélise également la propagation d'une onde



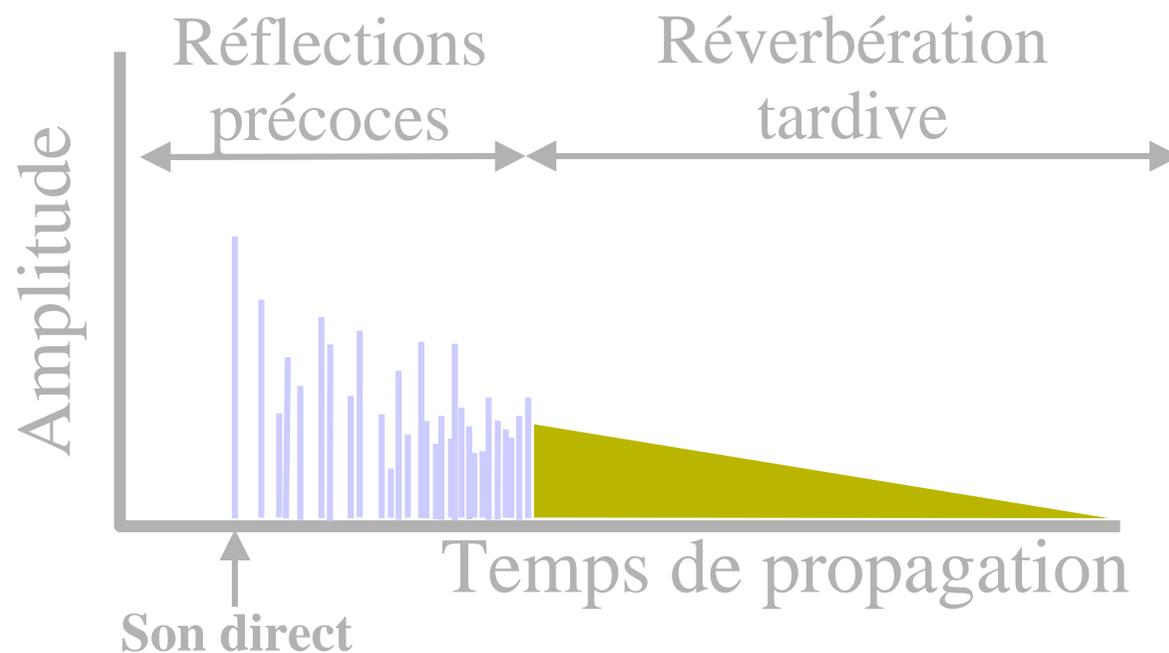
Différences avec le Graphique (1)

- Le son à des longueurs d'onde + grandes
 - les diffractions sont significatives
 - les réflexions spéculaires pré-dominent
 - les occlusions par de “petits” objets ont peu d'effet



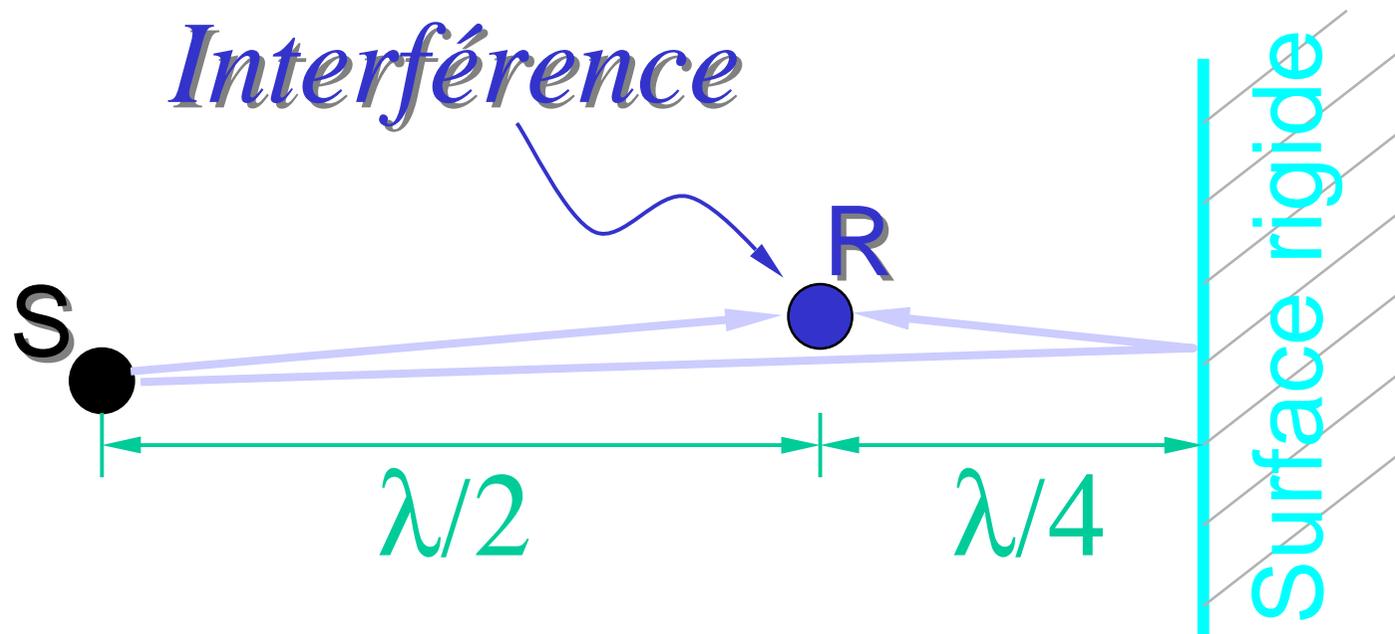
Différences avec le Graphique (2)

- Le son voyage moins vite que la lumière
 - la réverbération s'étale au cours du temps



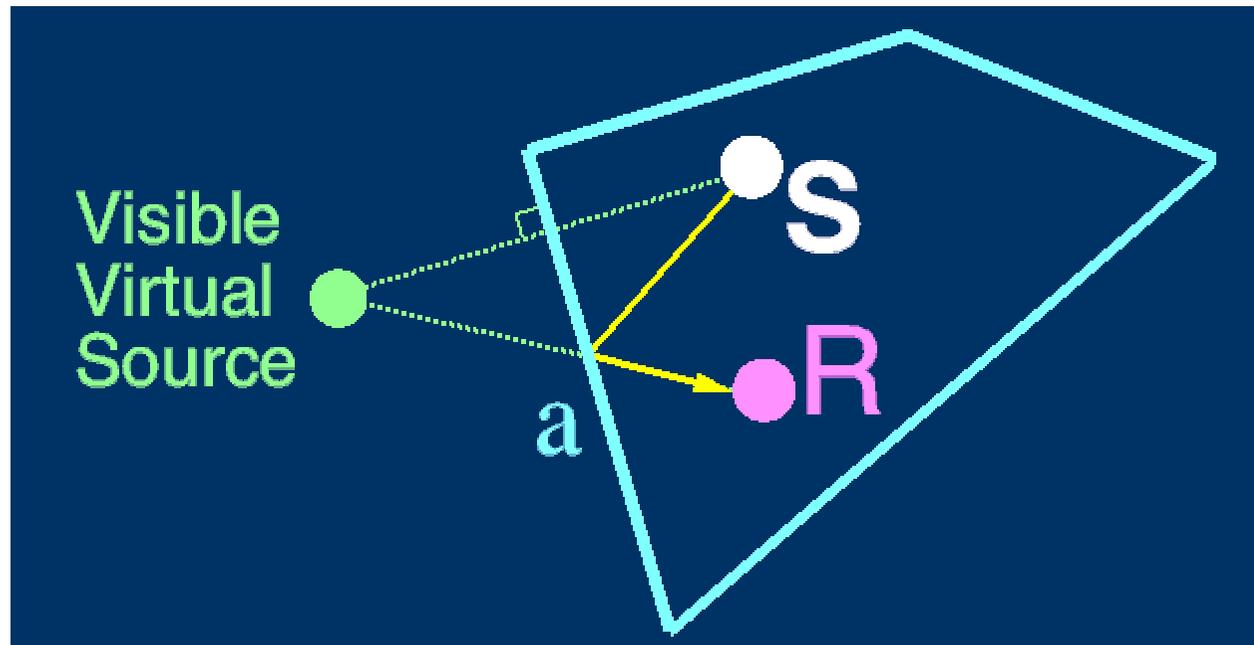
Différences avec le Graphique (3)

- Les ondes sonores sont (souvent) cohérentes
 - prendre en compte la phase est important



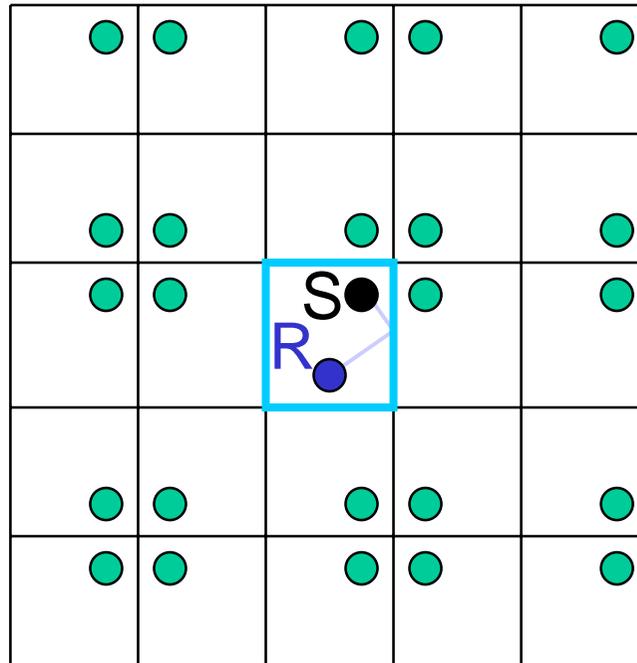
Sources- images

- Réflexion spéculaire = chemin direct depuis une source virtuelle



Avantages et inconvénients

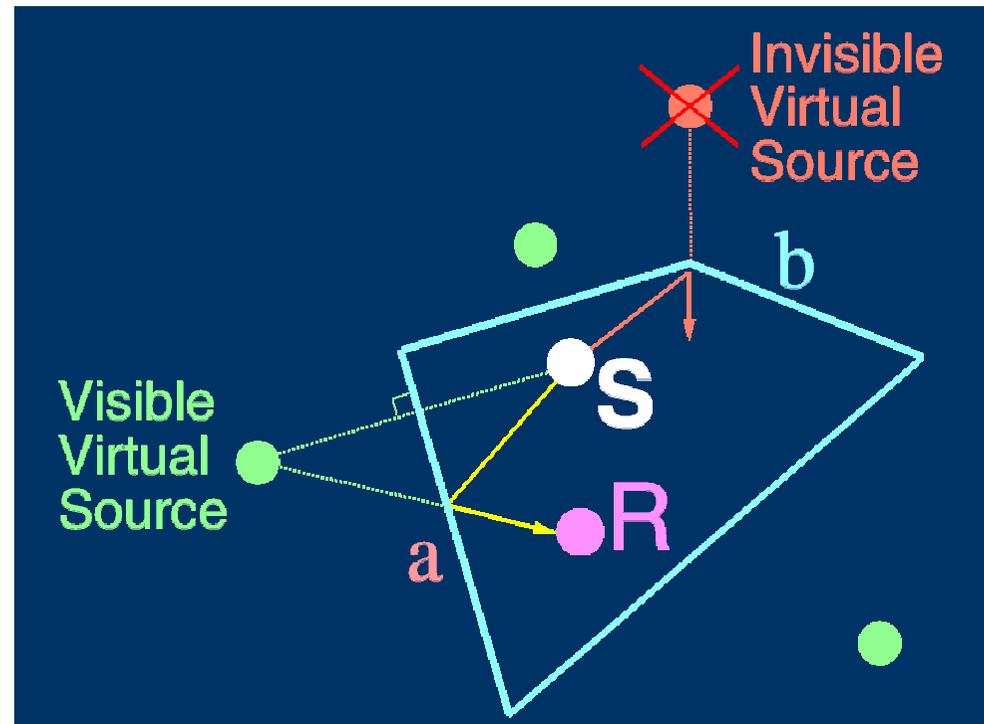
- Avantages
 - simple pour des pièces parallélépipédiques



*Les sources
virtuelles sont
alignées sur une
grille*

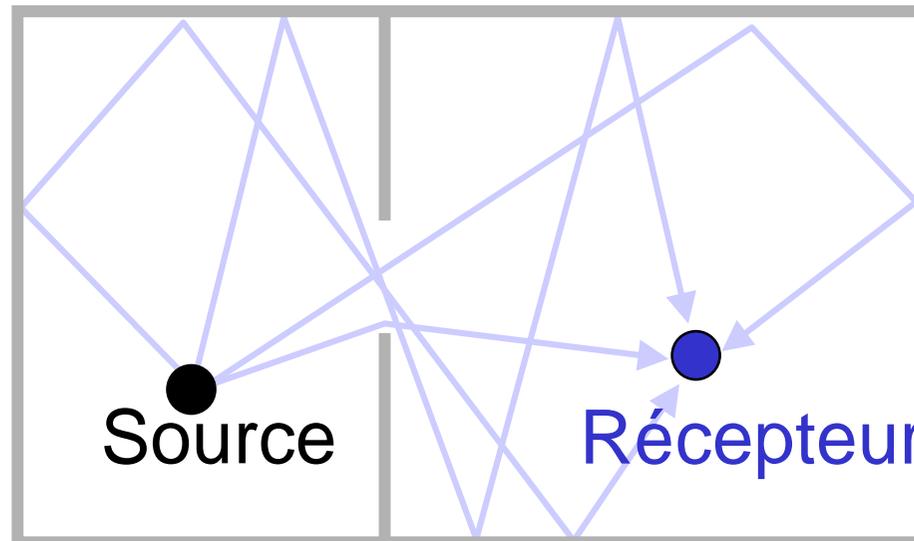
Avantages et inconvénients

- Inconvénients
 - $O(n^r)$ tests de “visibilité” dans le cas général
 - Réflexions spéculaires



Lancer de rayons

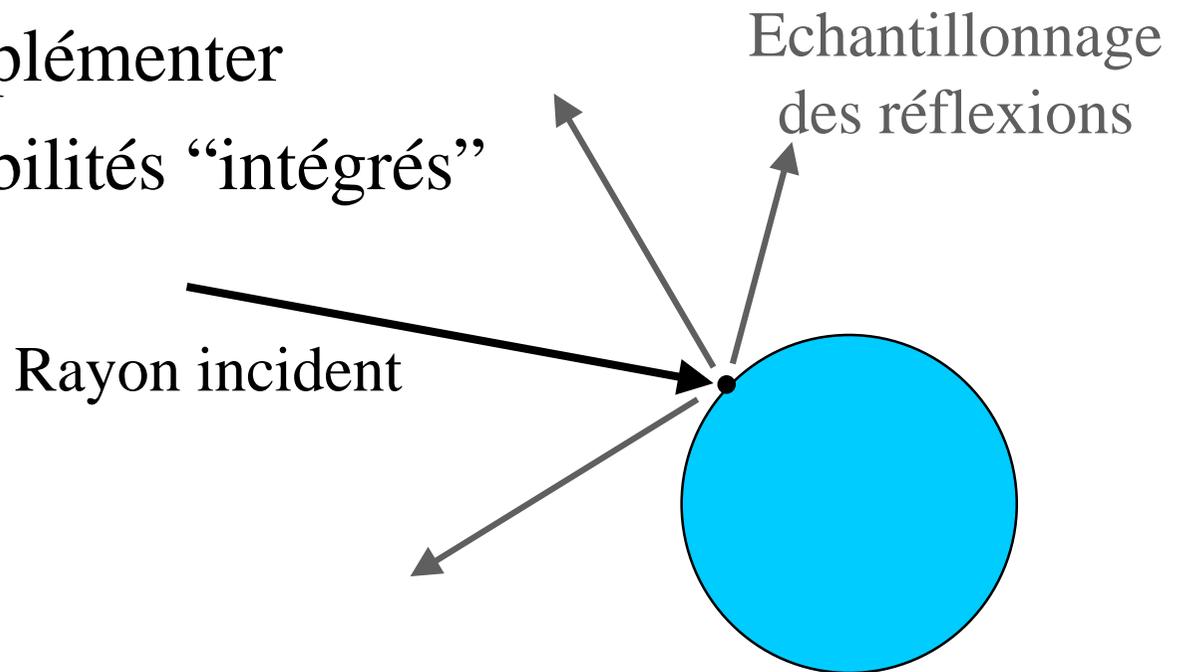
- Tracer des chemins entre la source et le récepteur



Avantages et inconvénients

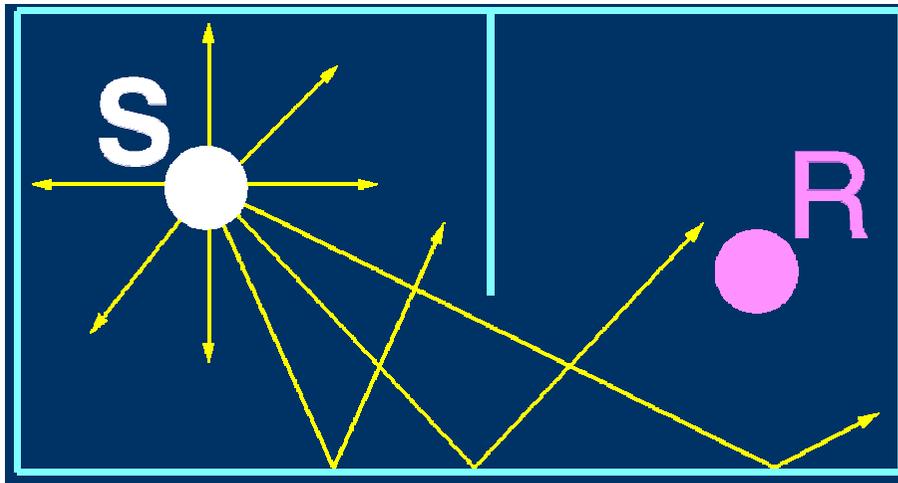
- Avantages

- traite tous les types de surfaces
- simple à implémenter
- tests de visibilité “intégrés”



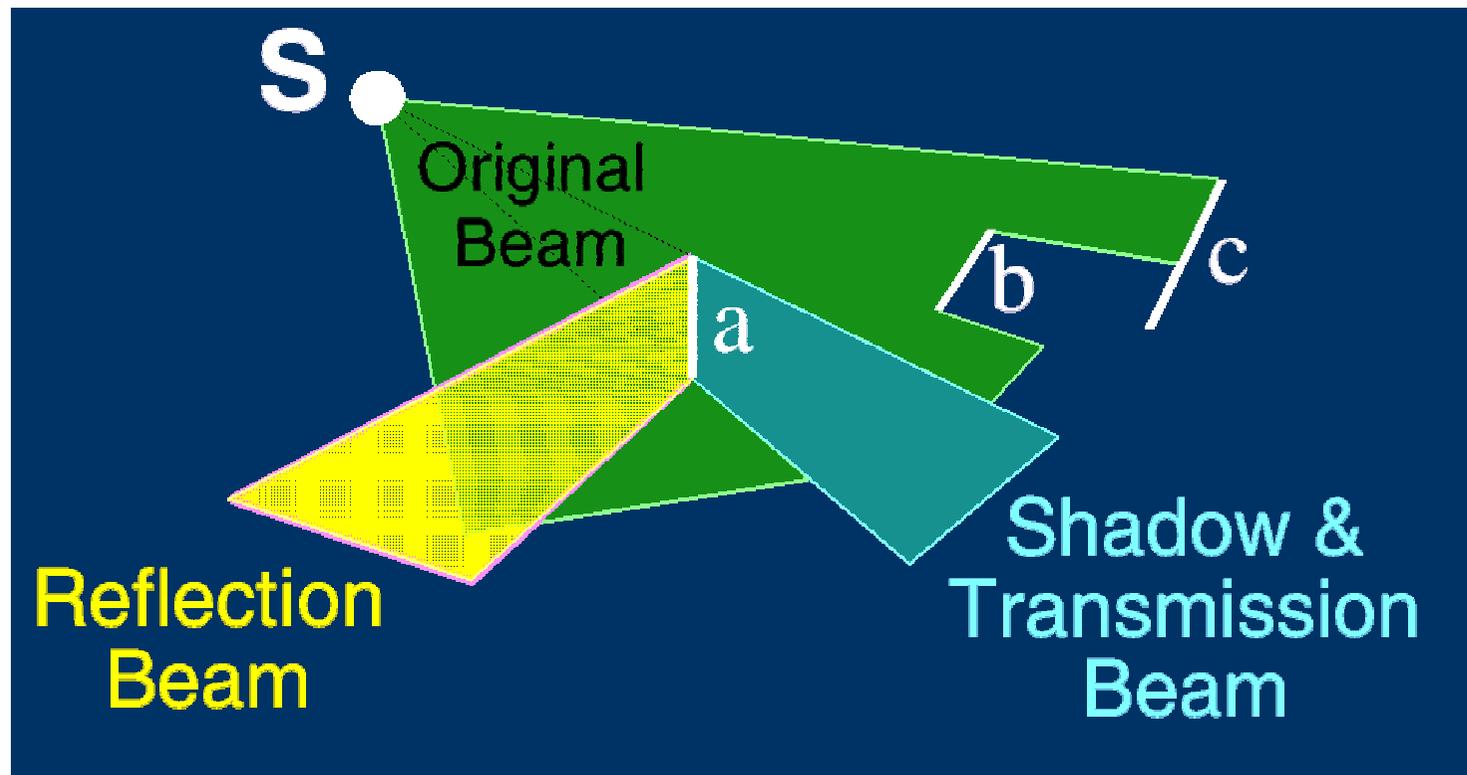
Avantages et inconvénients

- Inconvénients
 - Problèmes d'aliassage (chemins manqués)
 - Dépend de la position du récepteur



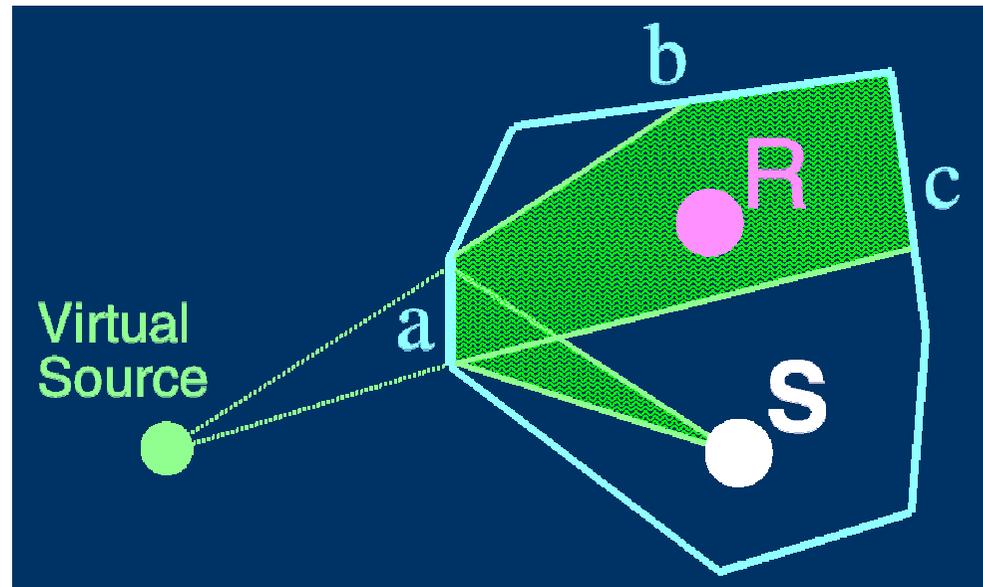
Lancer de faisceaux

- Lancer des “amas” de rayons depuis la source



Avantages et inconvénients

- Avantages
 - Trouve tous les chemins de manière déterministe (pas d'échantillonnage)
 - Cohérence spatiale
 - Prédétermine les sources images visibles

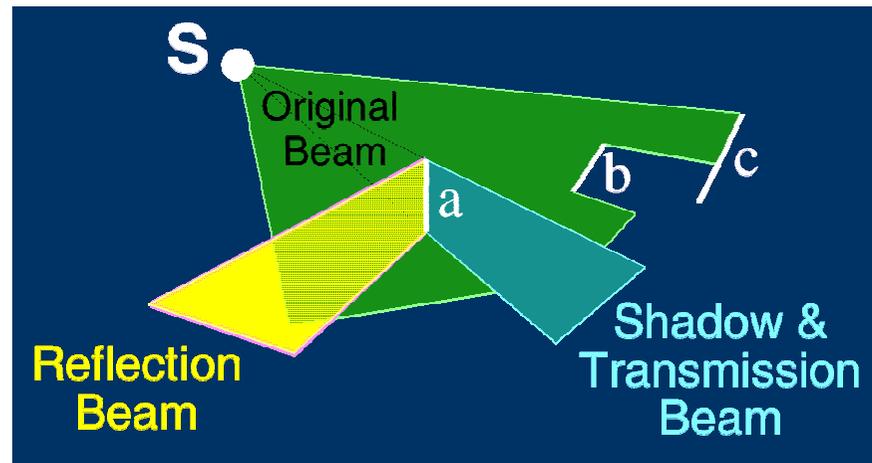


Avantages et inconvénients

- Plus d'avantages
 - faisceaux peuvent être précalculés
 - on peut les tracer depuis la source et le récepteur en même temps
 - permet un raffinement progressif

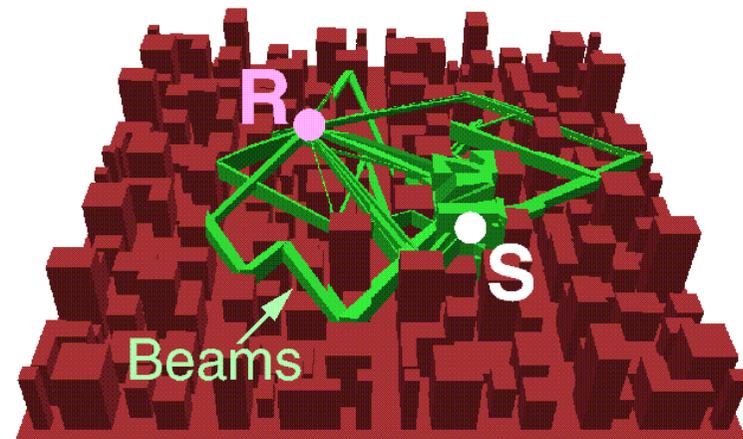
Avantages et inconvénients

- Inconvénients
 - Difficile pour des surfaces courbes ou des réflexions diffuses (inefficace)
 - Nécessite des calculs géométriques + complexes

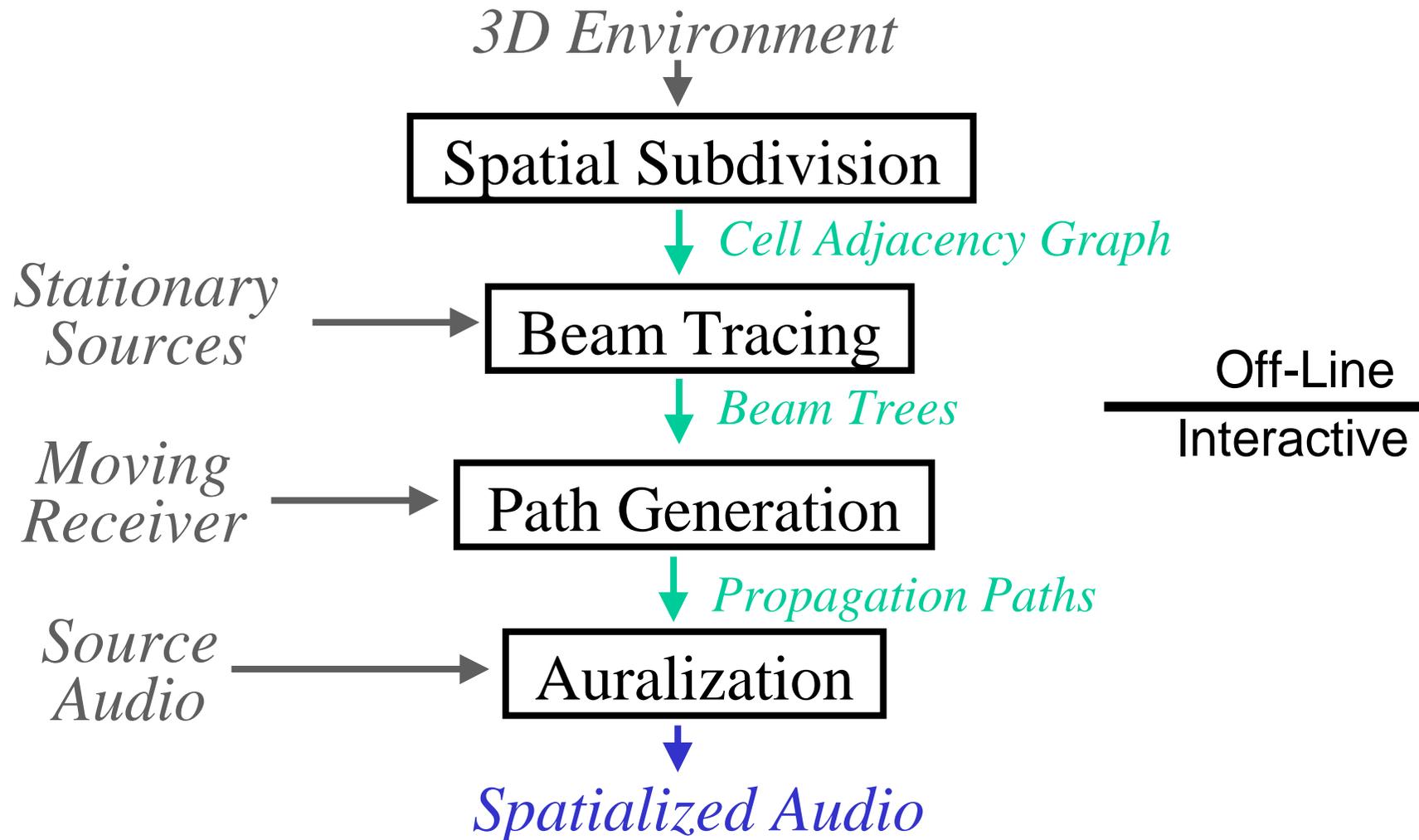


Travaux récents en lancer de faisceaux

- Calculs interactifs
 - Mise à jour plusieurs fois par seconde
 - Sources et récepteurs mobiles
- Environnements étendus
 - occlusions denses
 - Buildings, villes, etc.

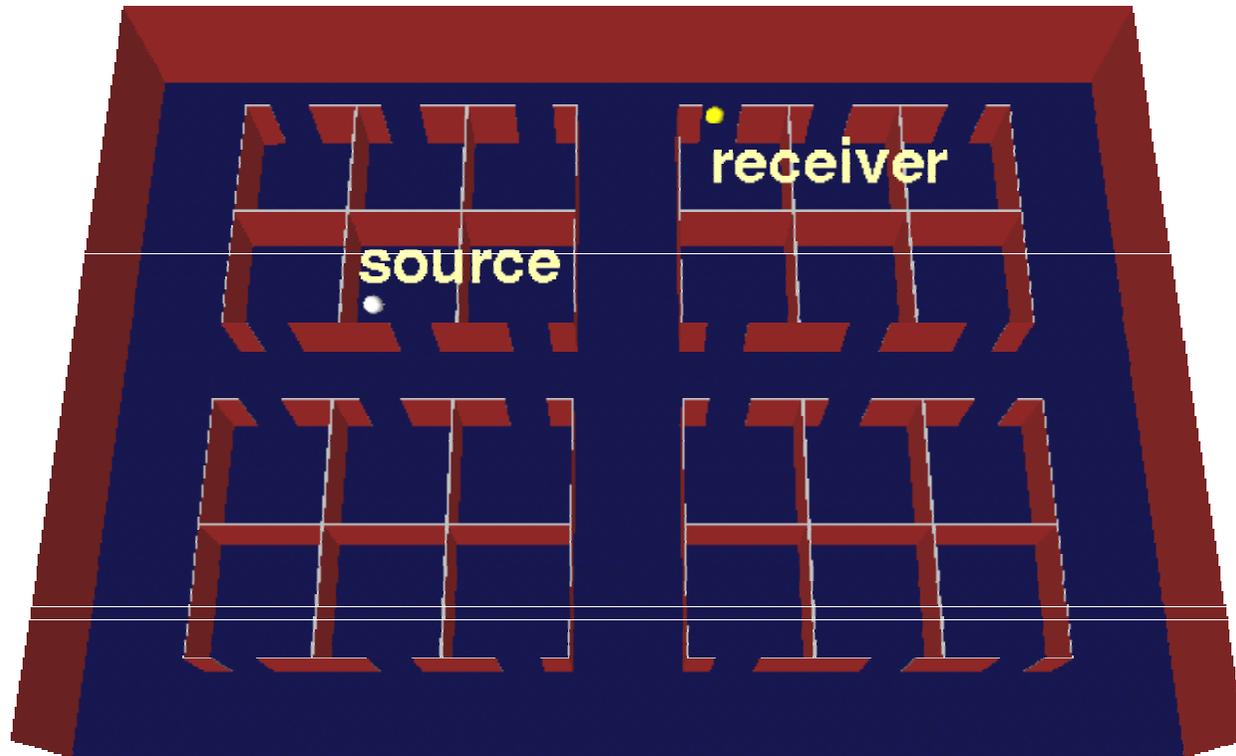


Un système de lancer de faisceaux interactif



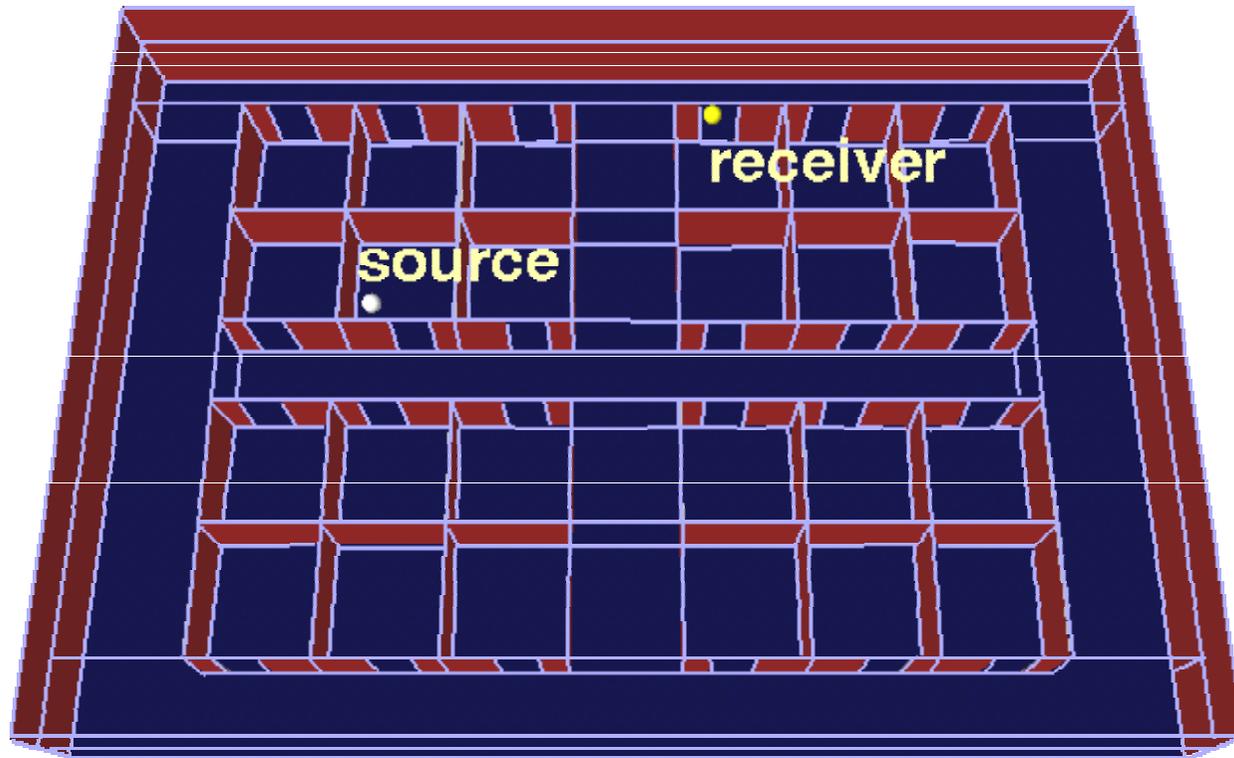
Survol de l'algorithme pas à pas

- Entrées: source, récepteur et modèle 3D



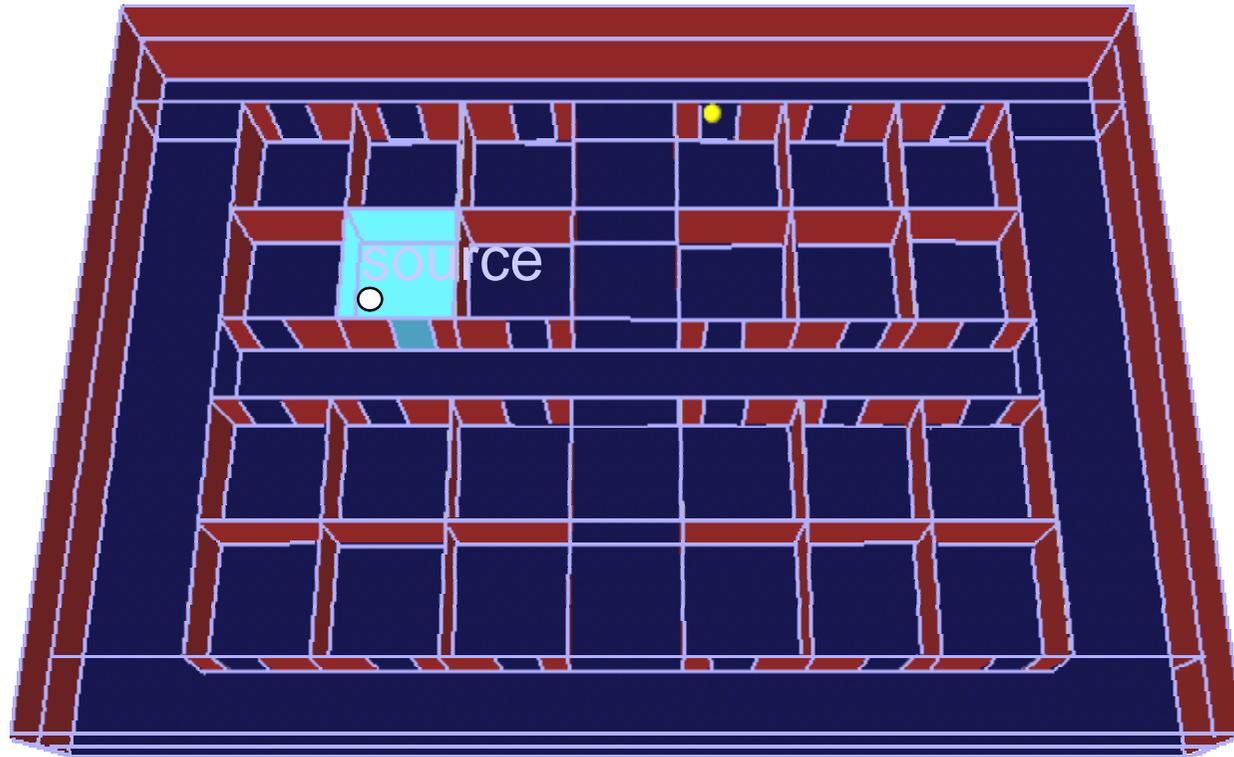
Etape 1: Subdivision spatiale

- Partitionne l'espace en cellules convexes
 - construit un graphe d'adjacence entre cellules



Etape 2:Lancer de faisceaux

- Trace les faisceaux en traversant le graphe d'adjacence



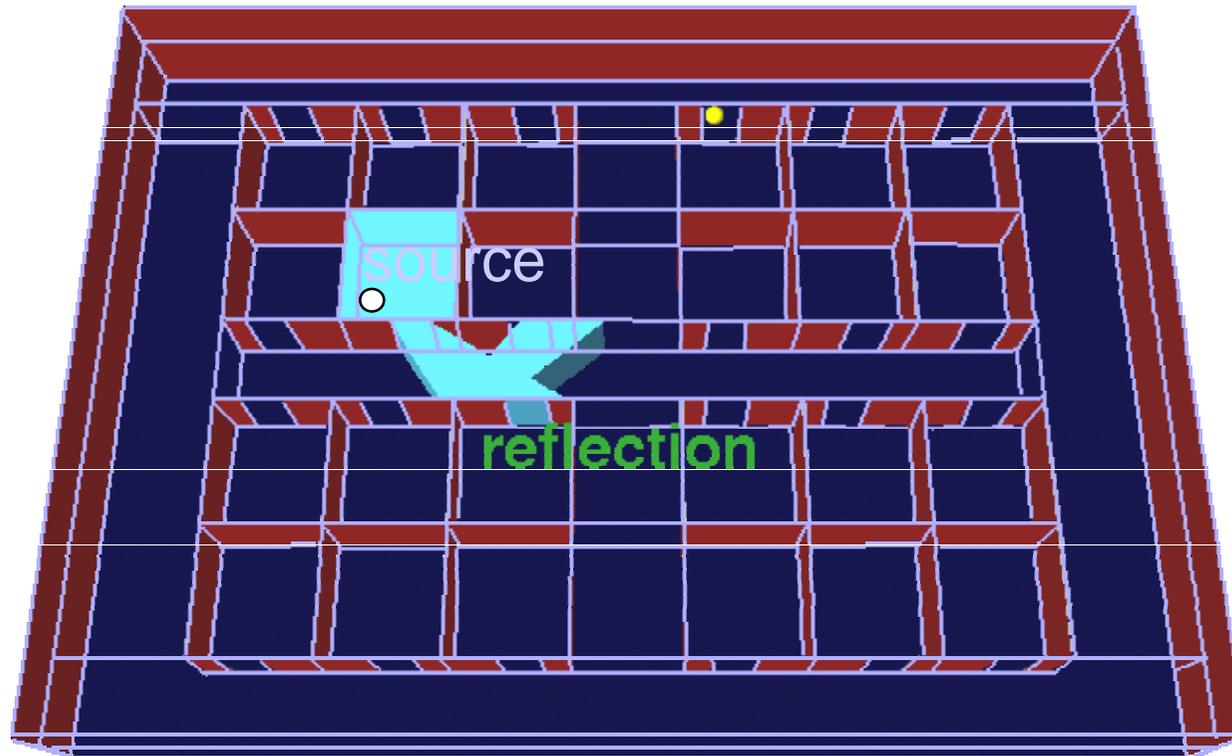
Etape 2:Lancer de faisceaux

- Trace les faisceaux en traversant le graphe d'adjacence



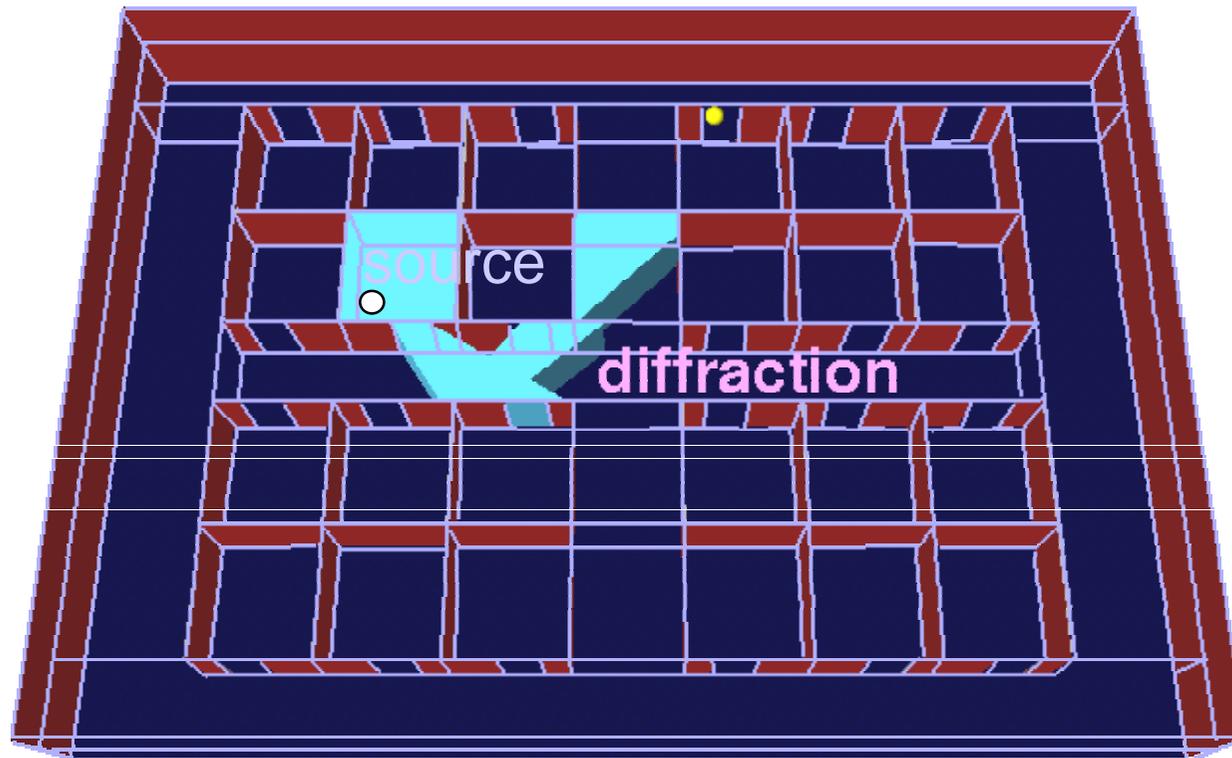
Etape 2:Lancer de faisceaux

- Trace les faisceaux en traversant le graphe d'adjacence



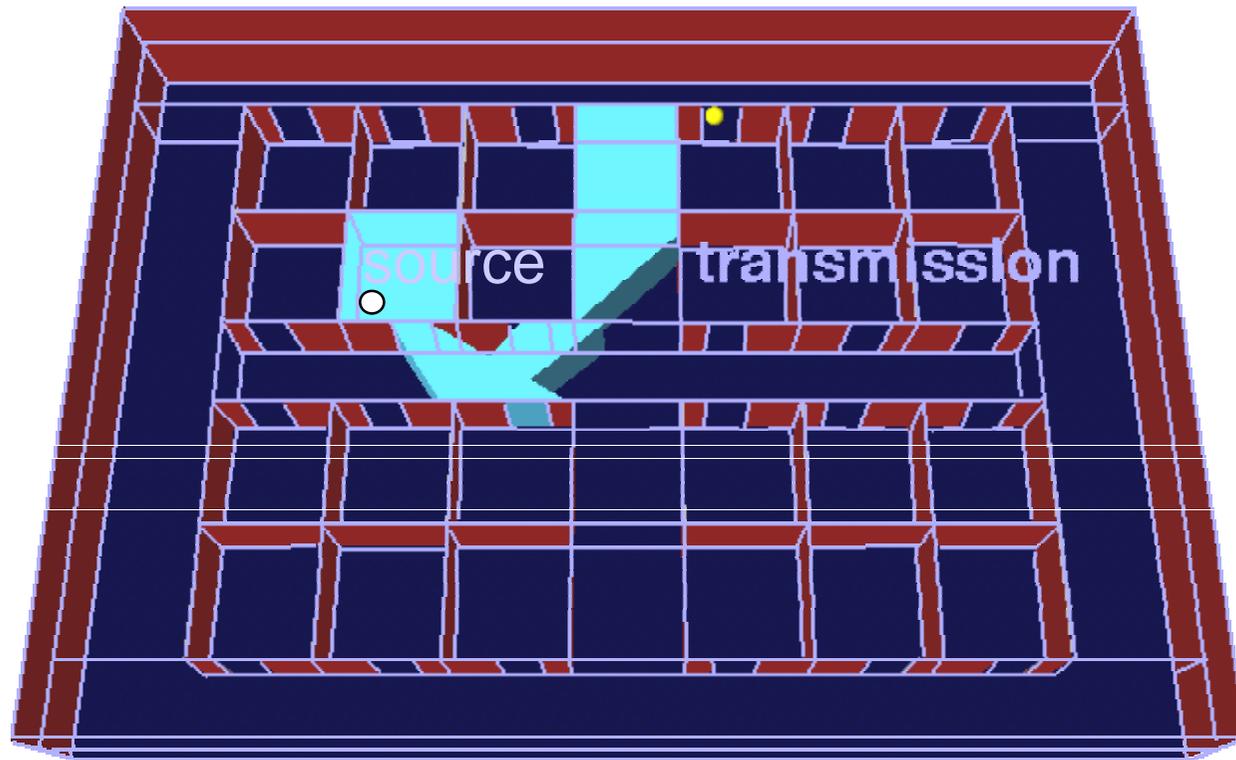
Etape 2:Lancer de faisceaux

- Trace les faisceaux en traversant le graphe d'adjacence



Etape 2:Lancer de faisceaux

- Trace les faisceaux en traversant le graphe d'adjacence



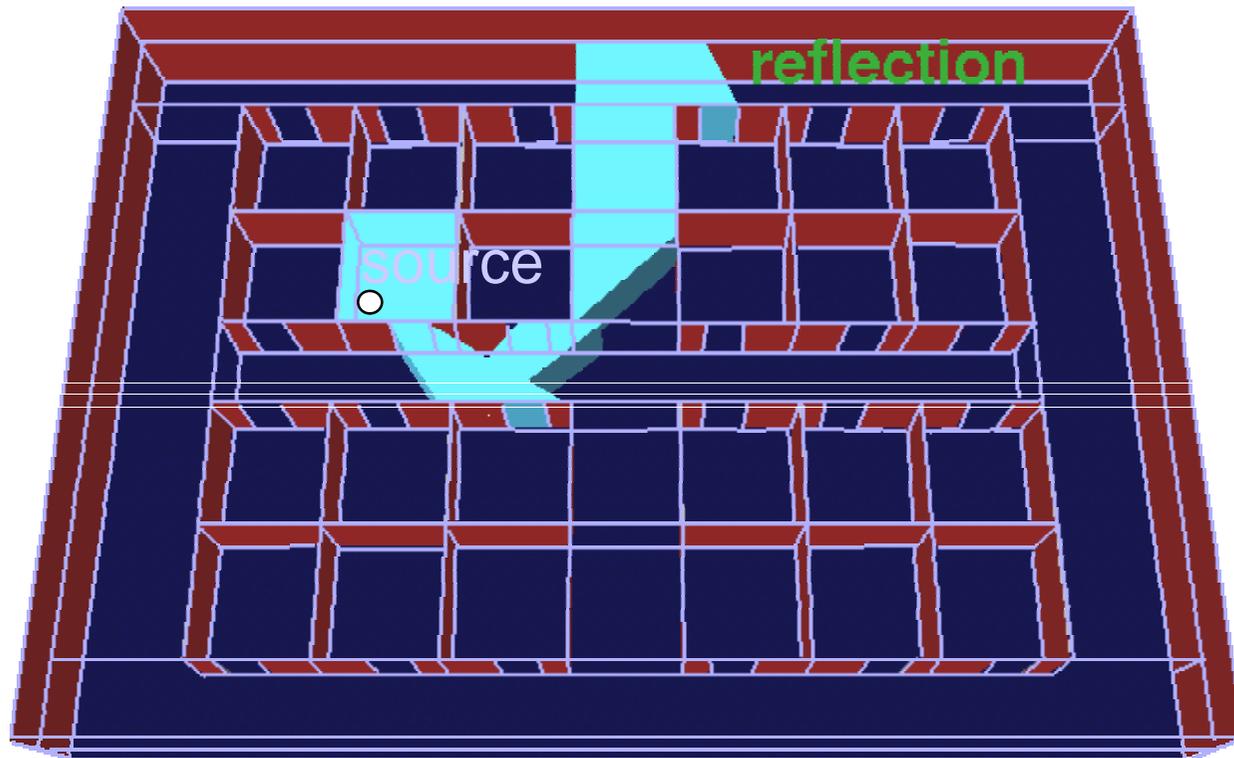
Etape 2:Lancer de faisceaux

- Trace les faisceaux en traversant le graphe d'adjacence



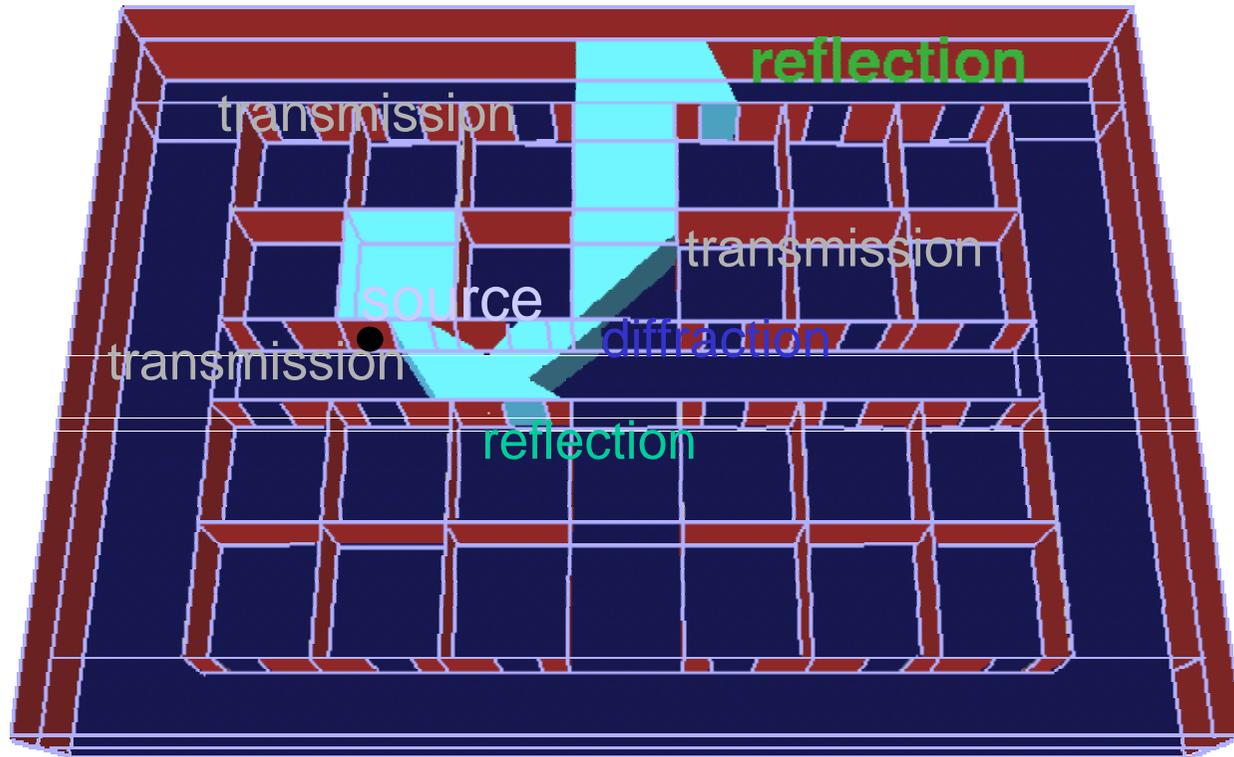
Etape 2:Lancer de faisceaux

- Trace les faisceaux en traversant le graphe d'adjacence



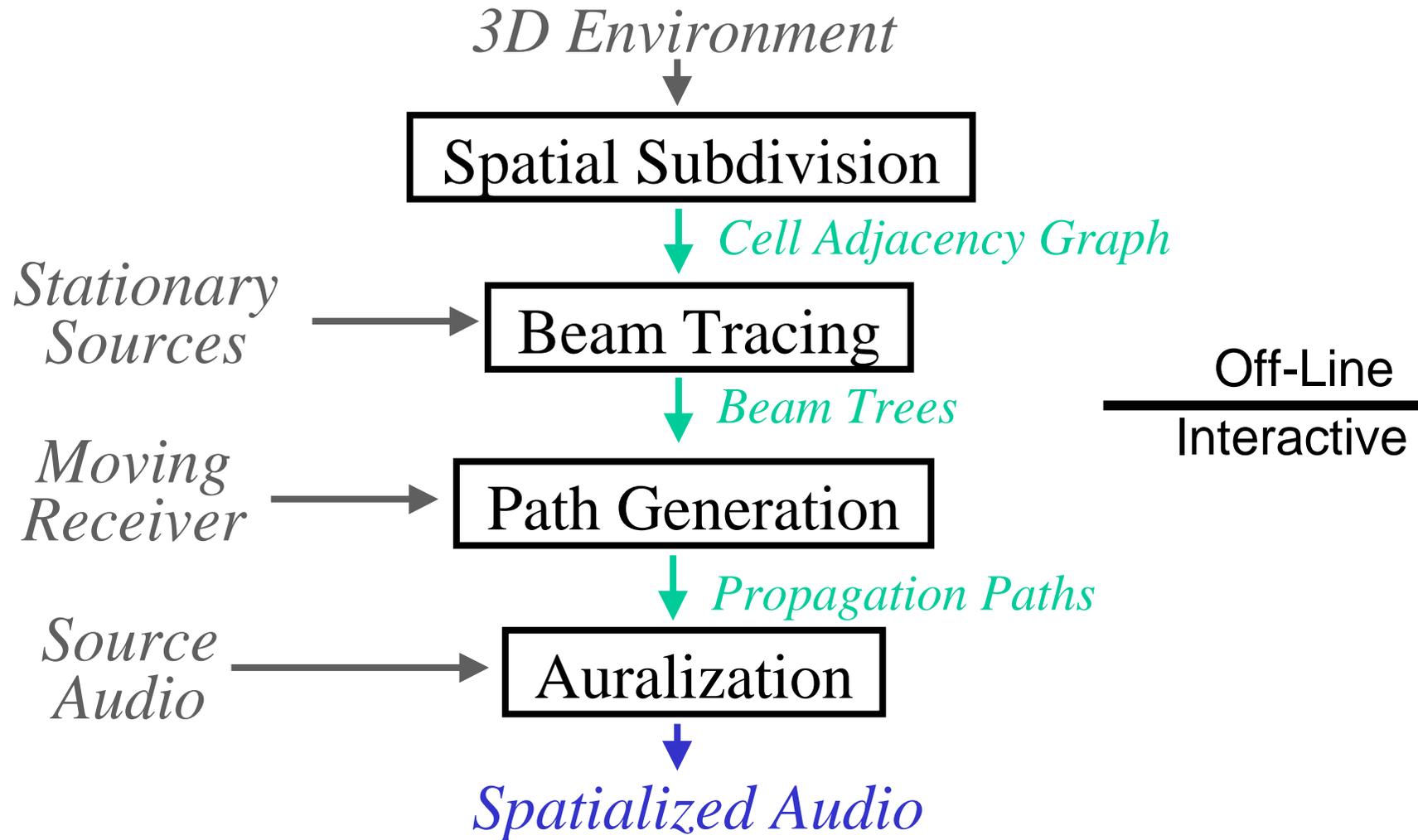
Etape 2:Lancer de faisceaux

- Range les faisceaux dans un “arbre de faisceaux”



Cet arbre encode les différentes régions atteignables par différentes séquences d'évènements depuis la source

Un système de lancer de faisceaux interactif



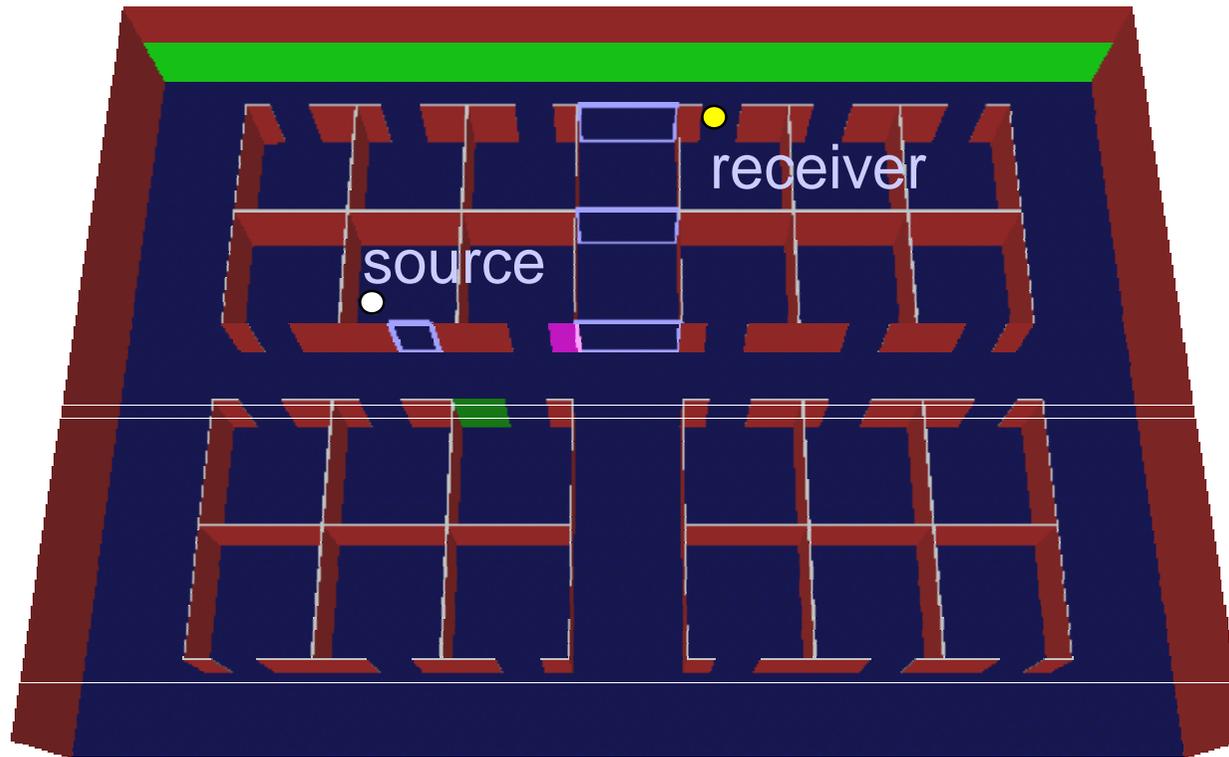
Etape 3: Génération des chemins

- Pour chaque faisceau qui contient le récepteur



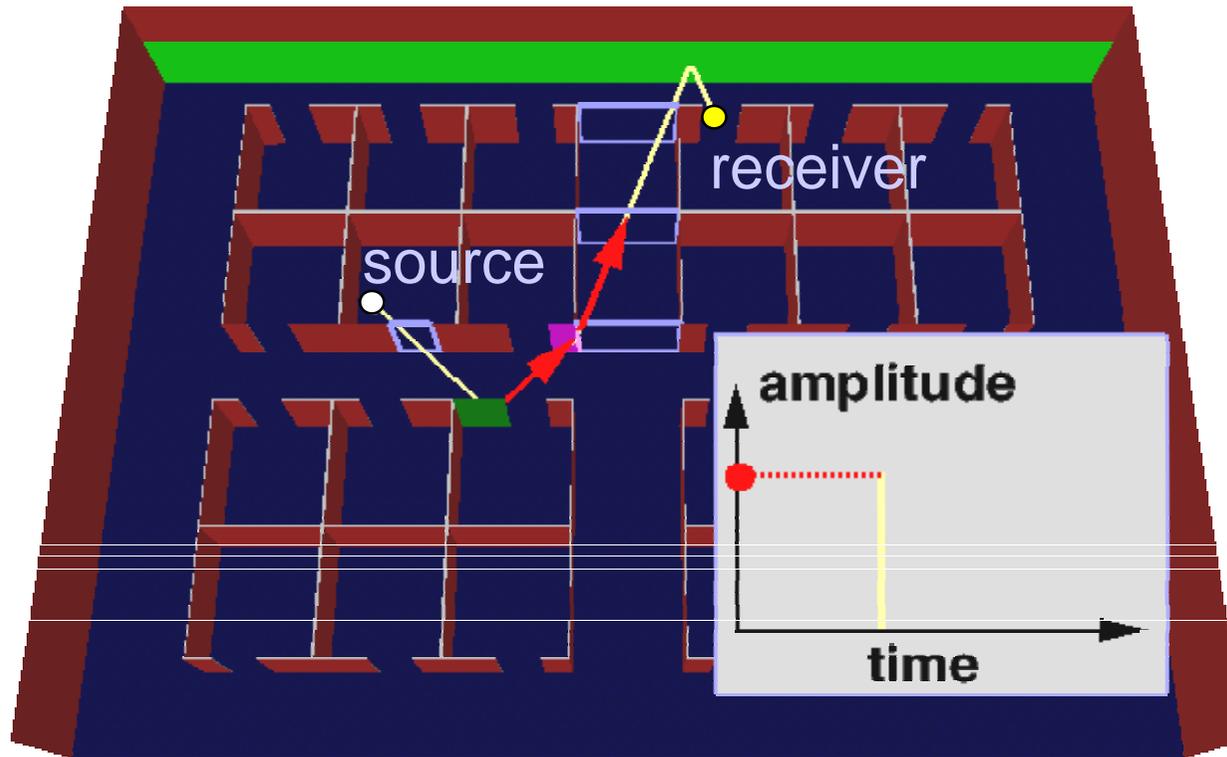
Etape 3: Génération des chemins

- Récupère la séquence d'évènements dans l'arbre



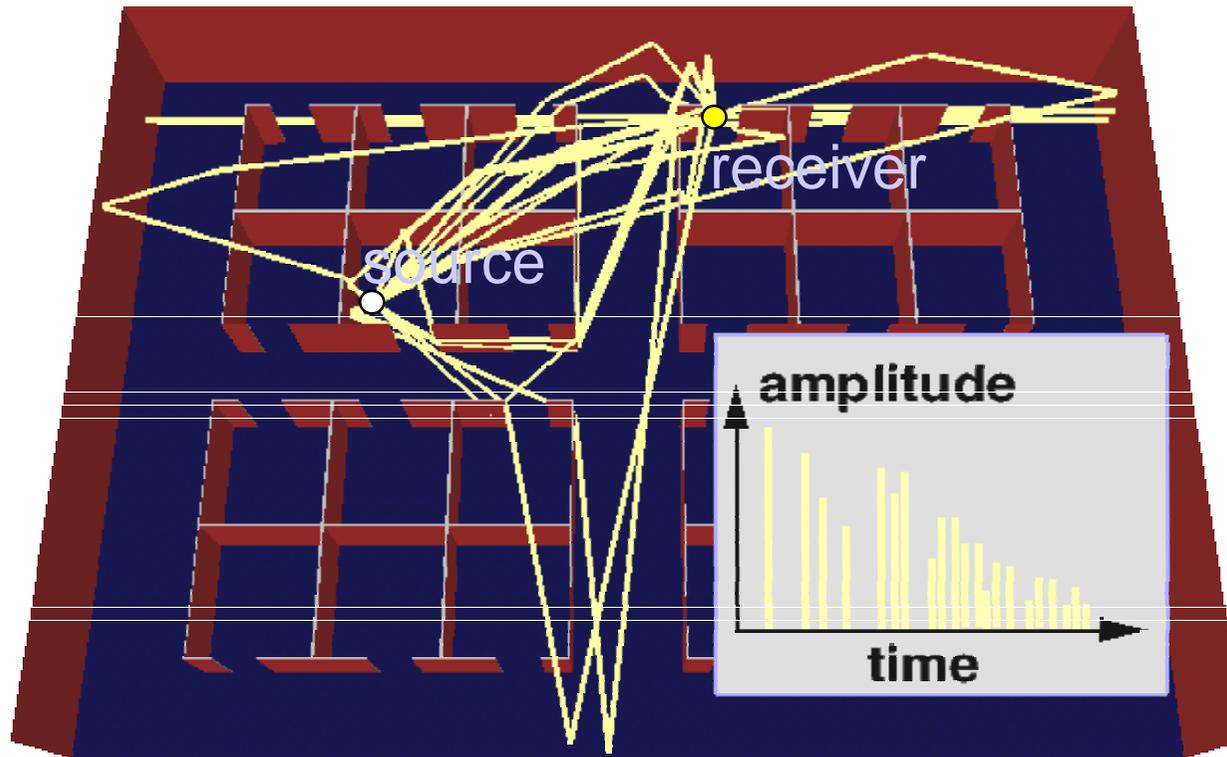
Etape 4: Auralisation

- Applique un filtre pour chaque chemin

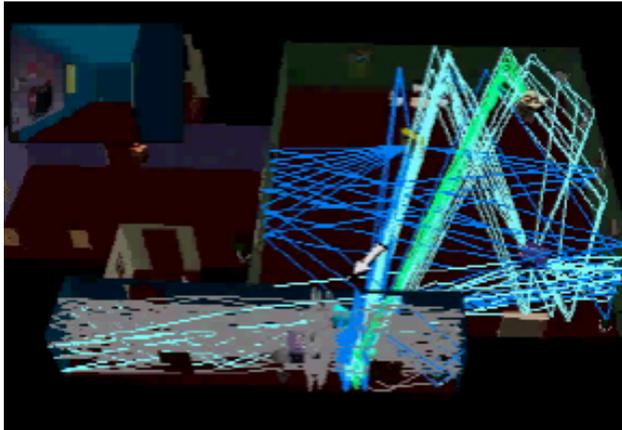


Etape 4: Auralisation

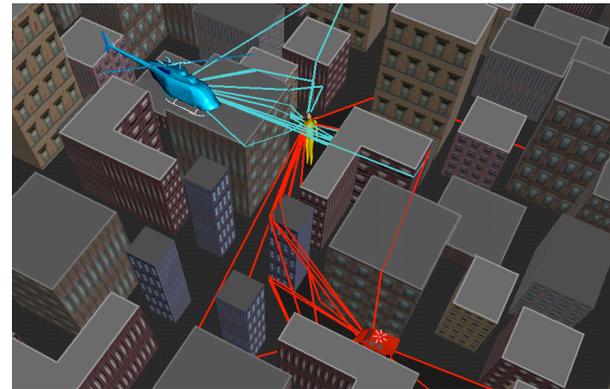
- Combine les chemins pour avoir la réponse impulsionnelle (au moins le début...)



Vidéos



Funkhouser et al 1999

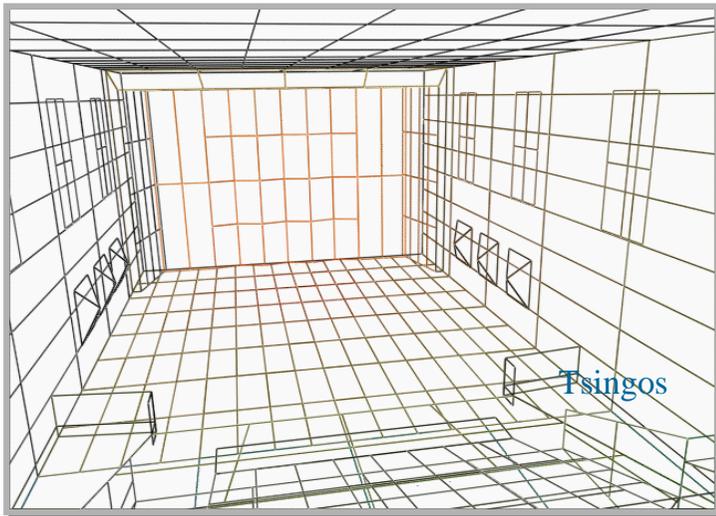


Tsingos et al. 2001

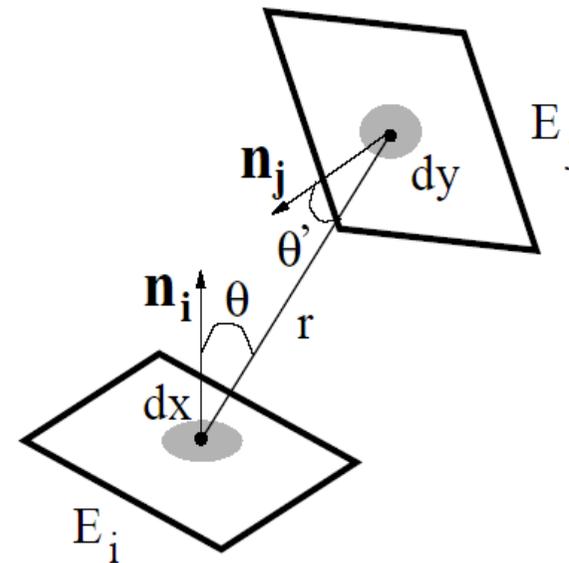
Radiosité

- Propagation d'énergie entre surfaces discrétisées

$$I^\lambda(x, t) = Ie^\lambda(x, t) + \gamma^\lambda(x) \int_{y \in S} \kappa^\lambda(x, y) I^\lambda \left(y, t - \frac{r}{c} \right) dy,$$



Maillage de radiosité

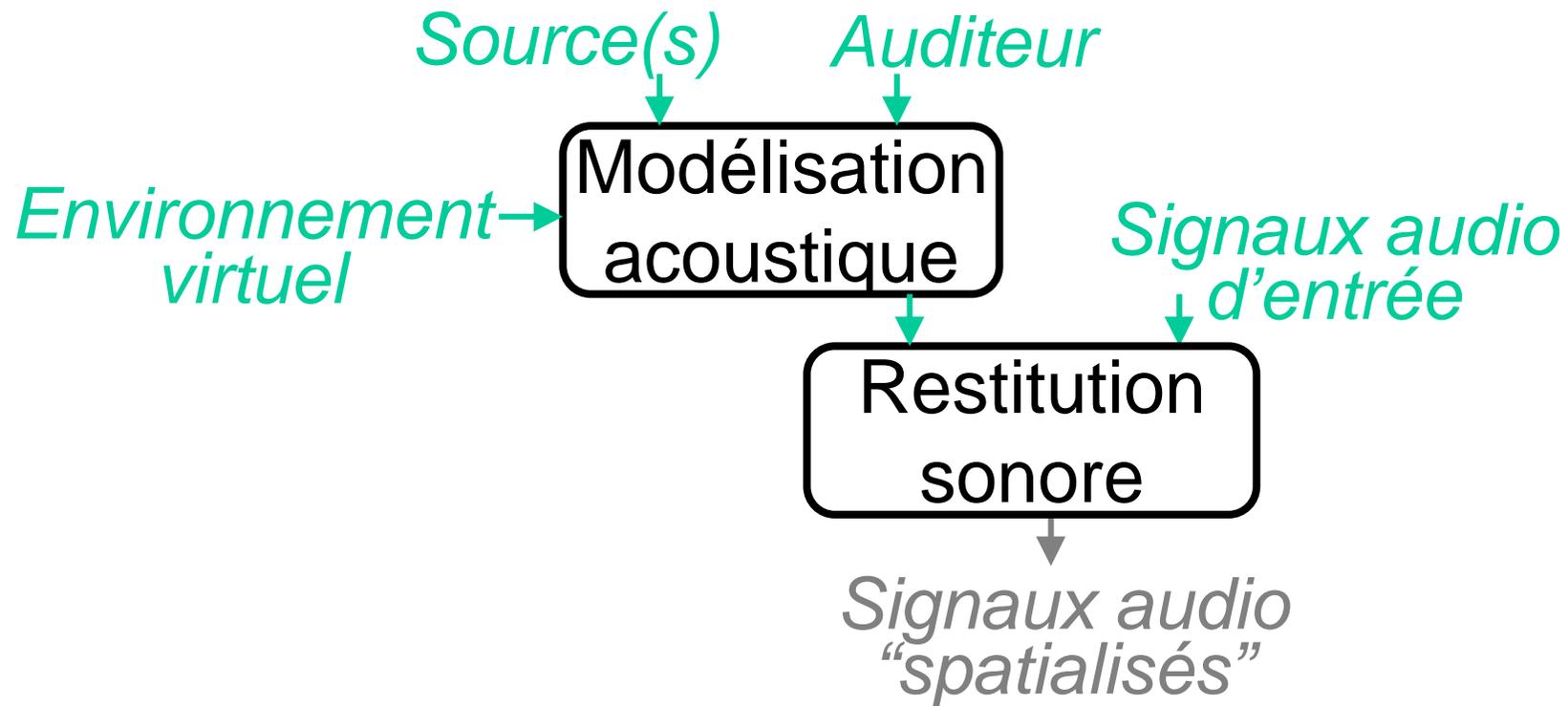


Avantages et inconvénients

- Avantages
 - bien adapté aux échanges diffus
 - bien adapté à la modélisation de la réverbération tardive
 - formulation hiérarchique
- Inconvénients
 - aspect temporel lourd
 - réflexions spéculaires doivent être traitées séparément

Auralisation ou “rendu” audio

- Rendre audible une scène sonore virtuelle



Calcul de réponse impulsionnelle

- Pour chaque chemin
 - construire le filtre correspondant
 - ajouter a la réponse impulsionnelle globale
- Convolution avec une réponse “longue”

➡ **Il faut une grosse puissance de calcul**

➡ **Environnements statiques**

Calcul de réponse impulsionnelle

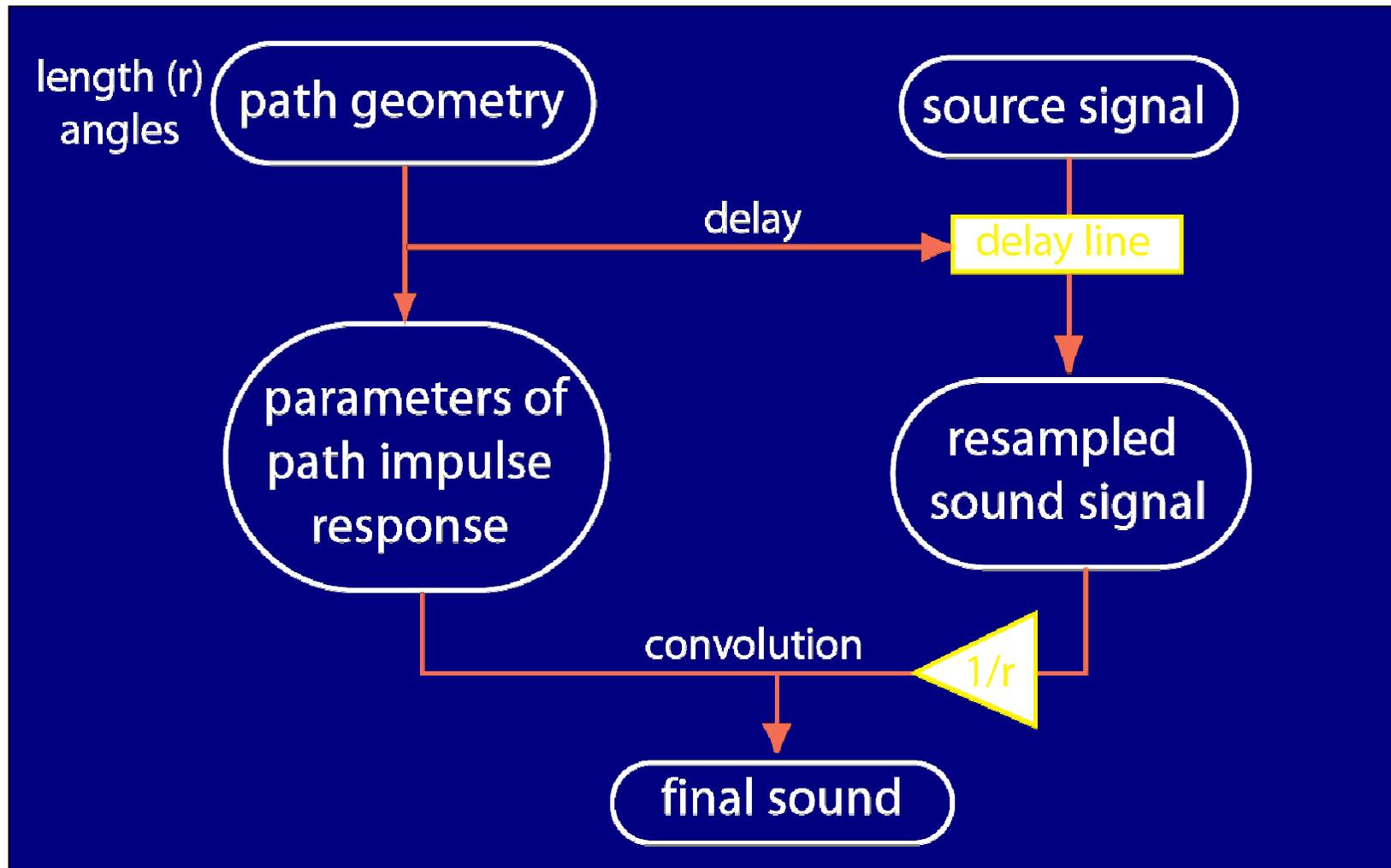
- Pour chaque chemin
 - Construire un filtre “court”
 - Convolution avec un bloc du signal d’entrée
 - Mixage vers la sortie
- ➡ **1 convolution courte par chemin**
- ➡ **Supporte de l’interpolation ou des modifications des paramètres des chemins**

Les évènements le long des chemins et le filtre

- Délai de propagation : retard
 - proportionnel a la longueur du chemin
 - L'effet Doppler est un indice perceptif fort
- Reflexion, diffraction, transmission, occlusion, atténuation atmosphérique
 - Dépend de la géométrie du chemin et des matériaux
 - Filtres d'atténuation (passe-bas)

 **Ré-échantillonnage et filtrage**

Exemple de traitement



Ré-échantillonnage

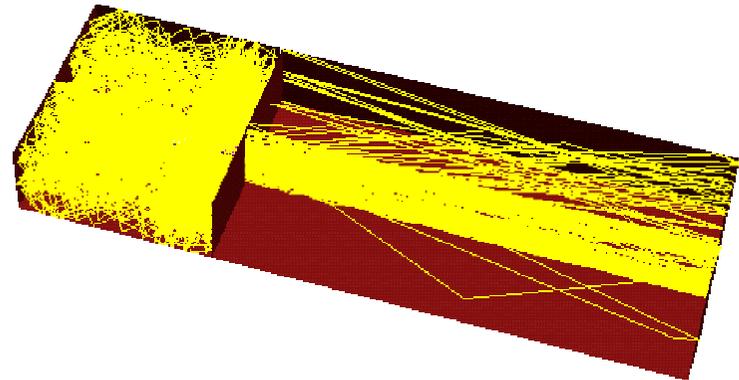
- Ligne à retard variable
 - un son entendu au temps t a été émis à $(t\text{-retard})$
 - filtrage FIR
 - Interpolation en domaine temporel
- 1/ Interpolation du délai sur un bloc de signal
- 2/ Trouver la valeur du signal à $(t\text{-retard})$
 - En général, l'échantillon at $t\text{-retard}$ n'existe pas.
 - Interpolation entre les échantillons les plus proches

Spatialisation du son

- **Propagation & réverbération**

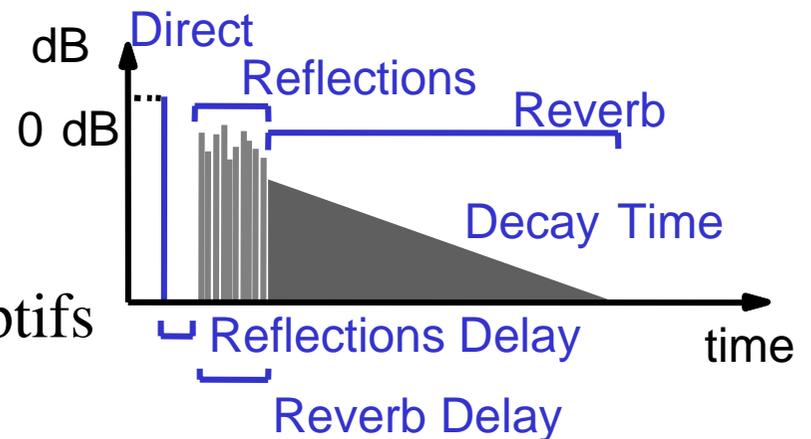
- Modèle géométrique

- Construire les réflexions
- En déduire un filtre



- Modèle perceptif

- approximation statistique
- réverbération artificielle
- contrôle par critères perceptifs



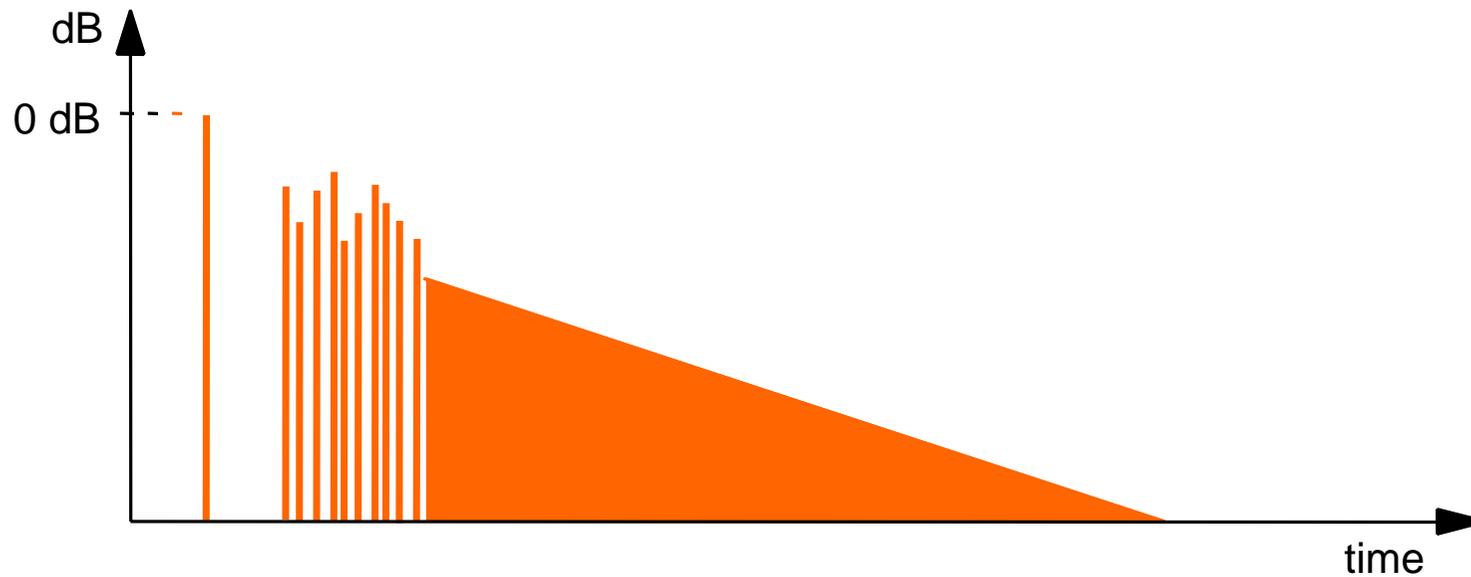
Attributs perceptifs

- Acoustique des salles
(design de salles de concert)



Attributs perceptifs

- Acoustique des salles
Total energy (amplification)



Attributs perceptifs

- Acoustique des salles

Total energy (amplification)

Decay time (reverberance)



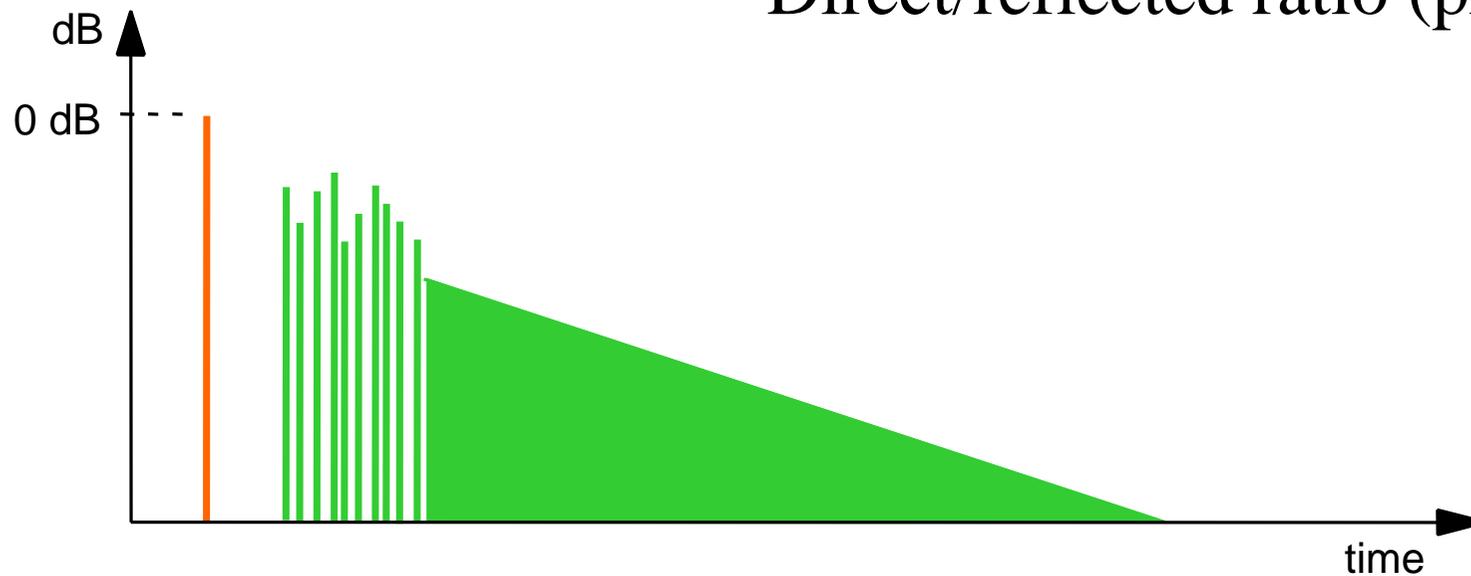
Attributs perceptifs

- Acoustique des salles

Total energy (amplification)

Decay time (reverberance)

Direct/reflected ratio (proximity)



Attributs perceptifs

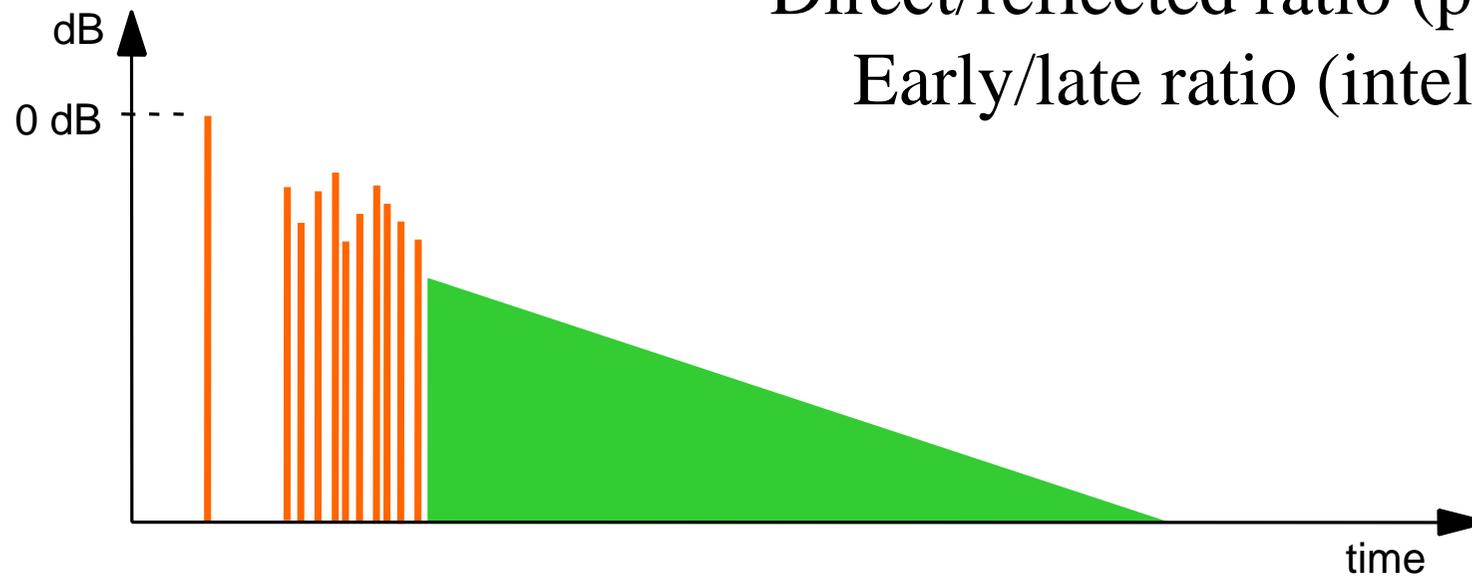
- Acoustique des salles

Total energy (amplification)

Decay time (reverberance)

Direct/reflected ratio (proximity)

Early/late ratio (intelligibility)



Attributs perceptifs

- Acoustique des salles

Total energy (amplification)

Decay time (reverberance)

Direct/reflected ratio (proximity)

Early/late ratio (intelligibility)

Initial delay time (room size)



Attributs perceptifs

- Acoustique des salles

Total energy (amplification)

Decay time (reverberance)

Direct/reflected ratio (proximity)

Early/late ratio (intelligibility)

Initial delay time (room size)

Lateral energy fraction

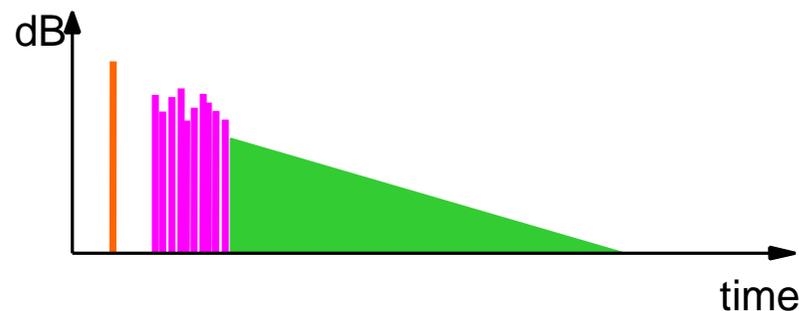
(envelopment)



Attributs perceptifs

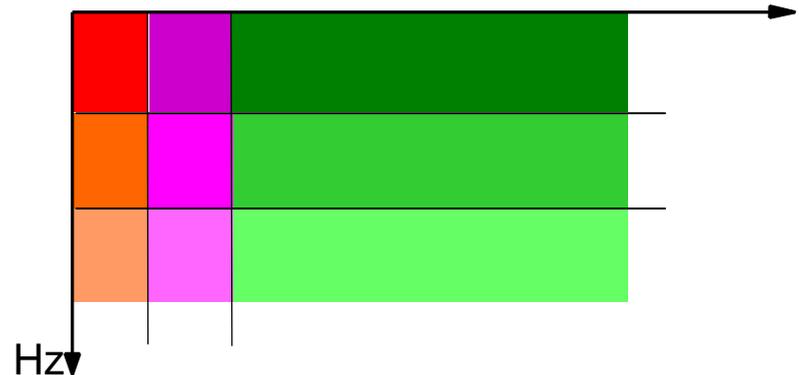
On divise la réponse impulsionnelle en 3 parties

- le son direct
- réflexions précoces
- réverbération (tardive)



fréquences: 3 bandes

- basses [20-500 Hz]
- médium [500-2000 Hz]
- aigus [2000+ Hz]



Attributs perceptifs

- Distribution spatiale (typique)
 - son direct: directionnel
 - réflexions individuelles: directionnelles
 - réverbération: diffuse (de partout)
- Réflexions précoces ne sont pas perçues individuellement
 - mais:**
 - le son direct peut être bloqué
 - echos audibles (environmt. extérieurs)
 - “phasing” avec les sources en mouvement

Reverbération: Modèle physique

- Les réflexions précoces dépendent de la position
 - se remarque surtout sur les sons émis par l'auditeur (voix, bruits de pas)
- Réverbération tardive: uniforme dans la pièce

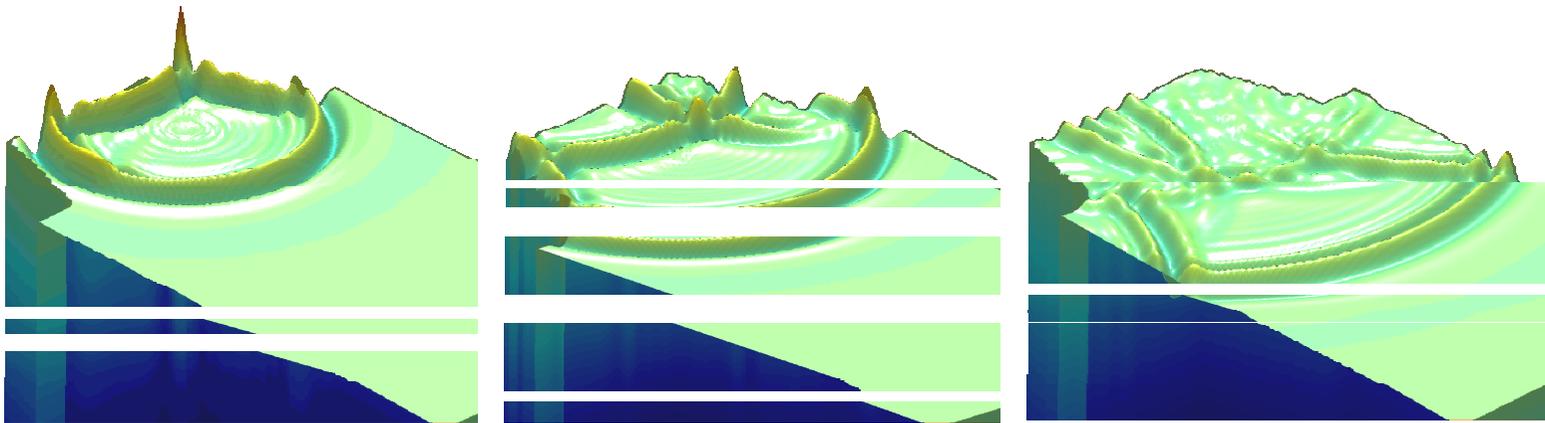
Acoustique statistique
nombreux fronts d'ondes se superposent
nombreuses réflexions au point d'écoute

Modèle statistique de réverbération

- Analogie avec une baignoire

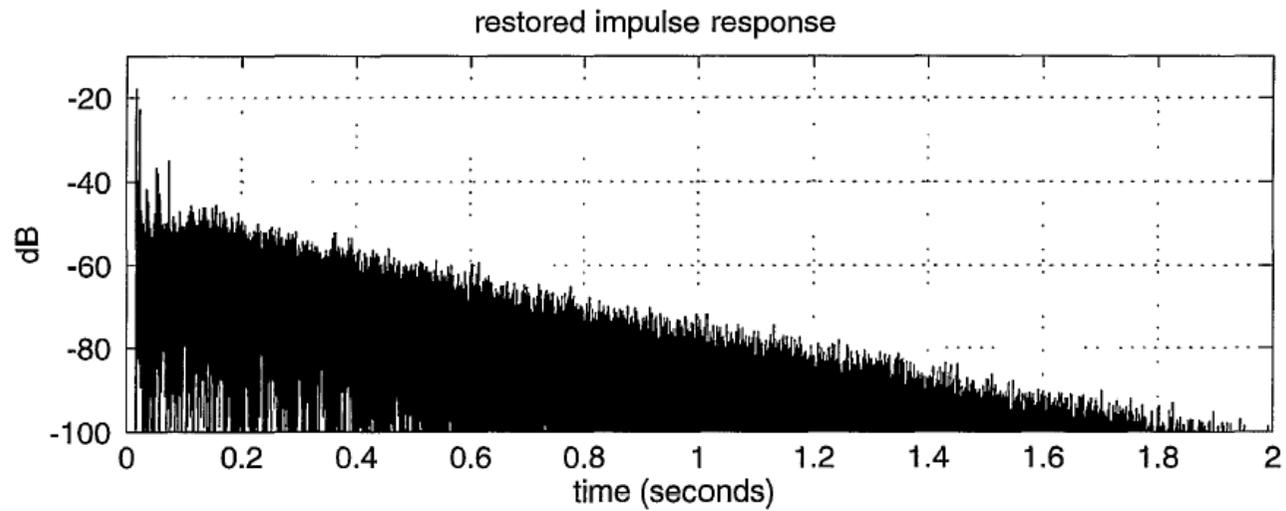
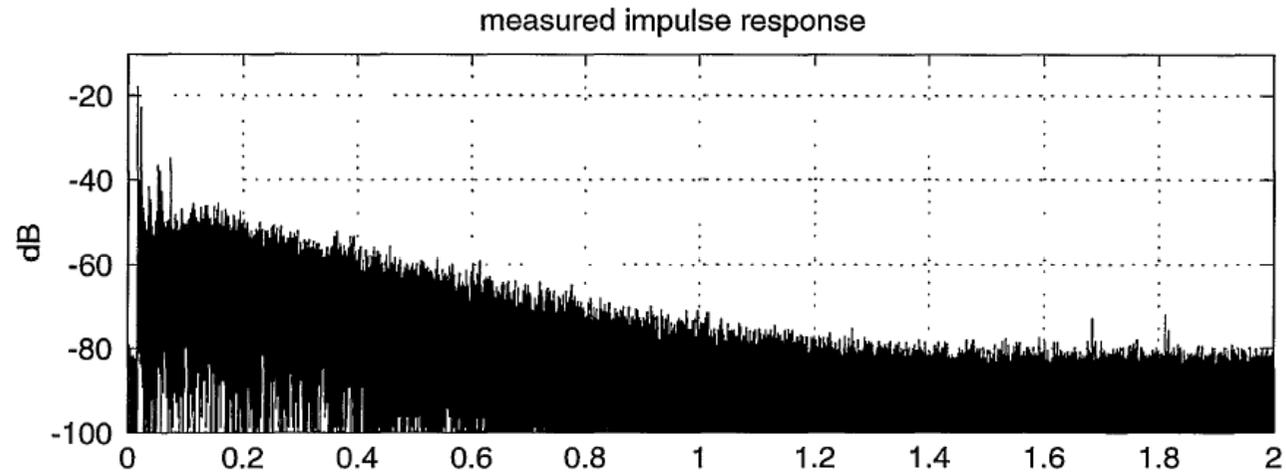
- laisser tomber une pierre dans une baignoire...
- Une onde circulaire se propage et se réfléchit...
- Les fronts d'onde deviennent plus complexes...
- Après un moment (“temps de mélange”)...
 - on ne peut plus déterminer où la pierre est tombée
 - les ondes s'atténuent uniformément à la surface

Modèle statistique de réverbération

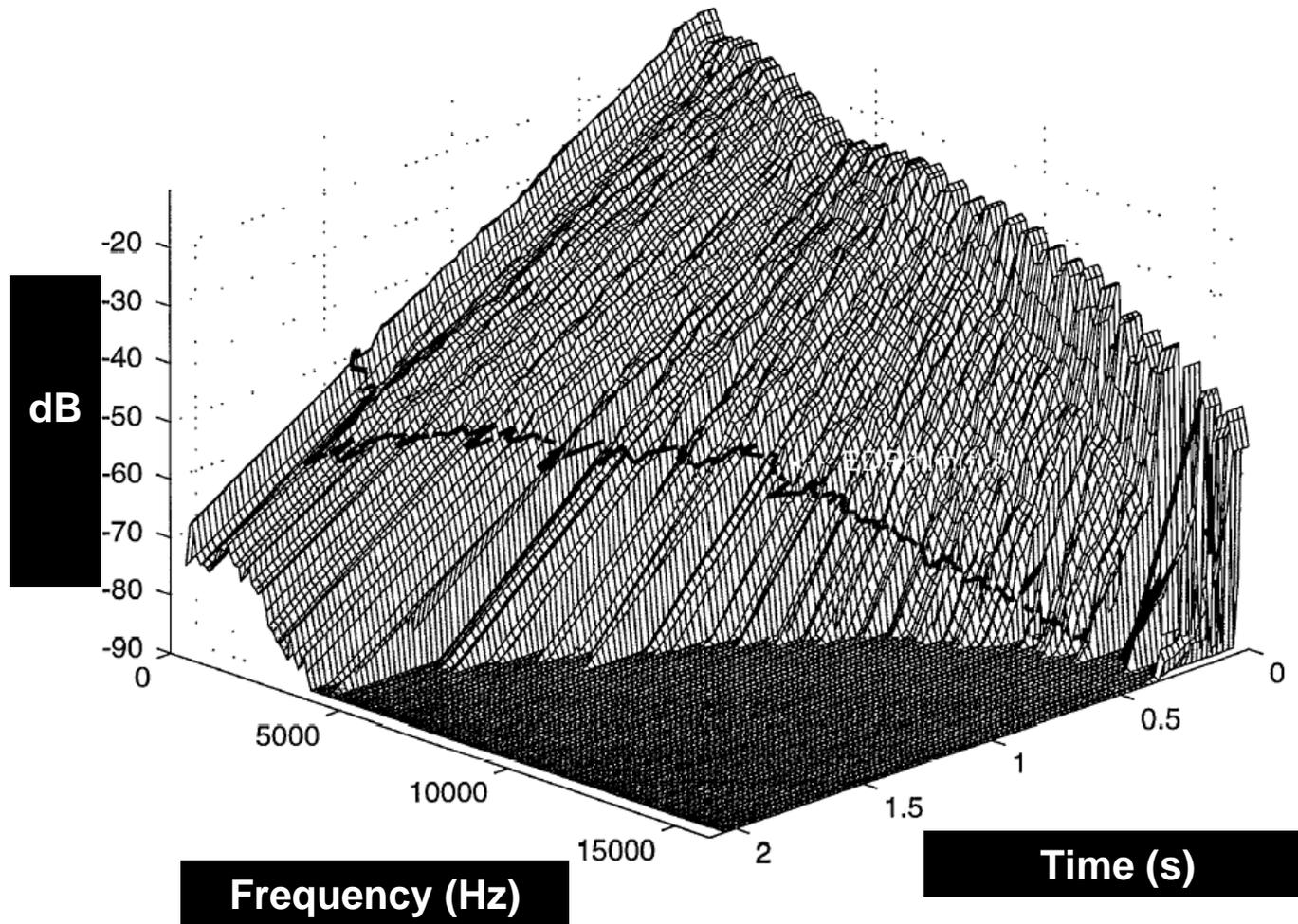


© Savioja-Lokki (Helsinki Univ. of Technology, 2001)

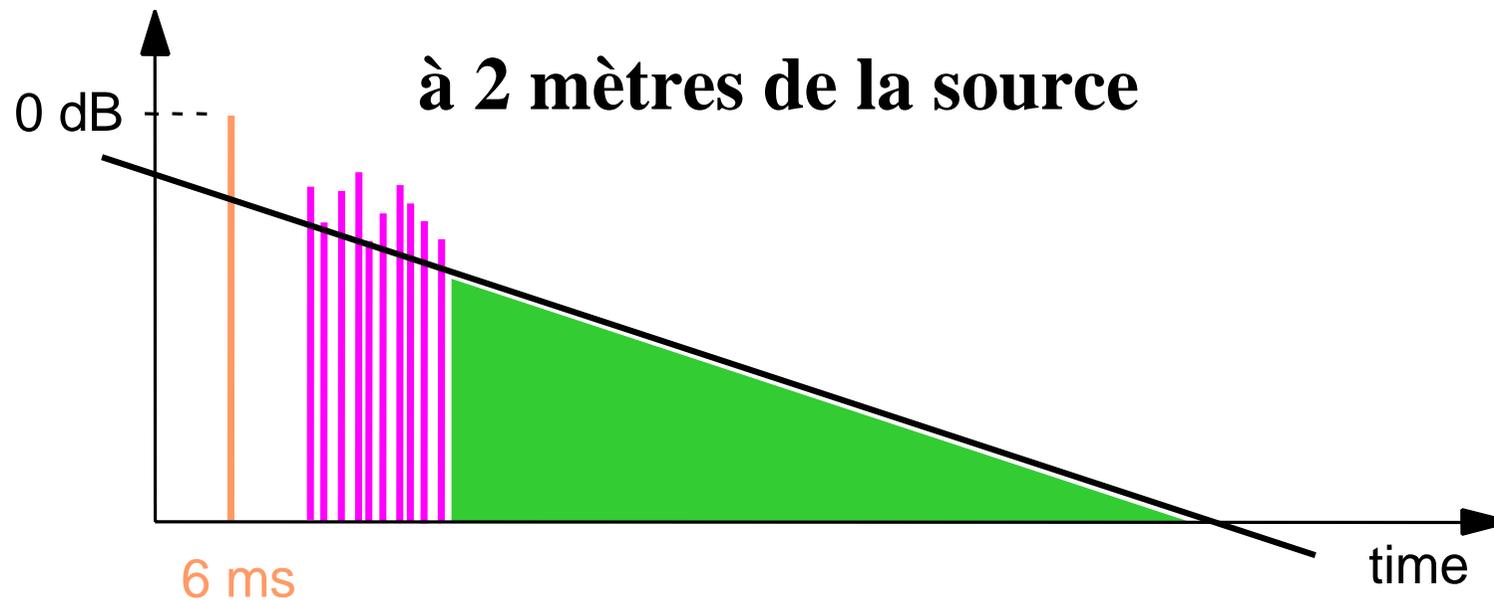
Réponse mesurée



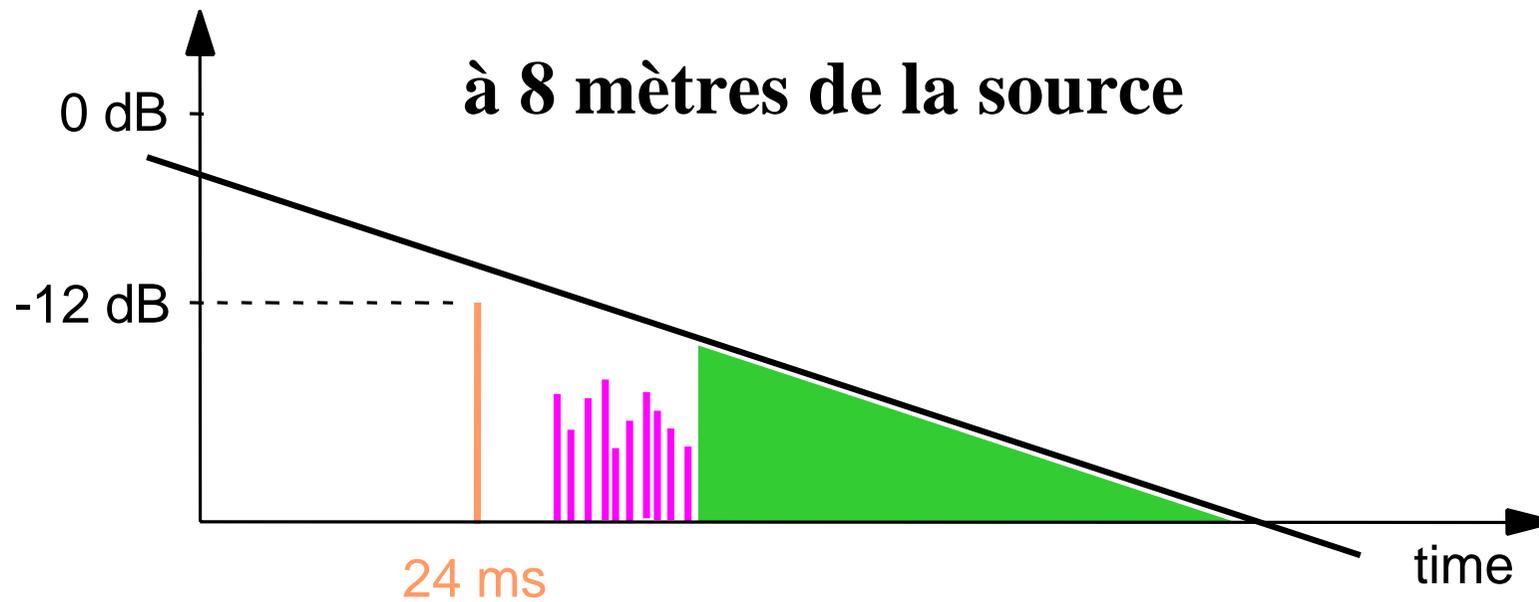
Relief de décroissance énergétique



Modèle statistique de réverbération



Modèle statistique de réverbération



Modèle statistique de réverbération

- Complètement décrit par
 - **Energie initiale**
 - **Vitesse de décroissance exponentielle**

Modèle statistique de réverbération

- Complètement décrit par
 - **Energie initiale**
proportionnelle à
 - l'inverse du volume
 - l'énergie émise par la source
(moyennée sur les directions)
 - **Vitesse de décroissance exponentielle**

Modèle statistique de réverbération

- Complètement décrit par

- **Energie initiale**

proportionnelle à

*Dépendant
de la fréquence*

- l'inverse du volume

- l'énergie émise par la source
(moyennée sur les directions)

- **Vitesse de décroissance exponentielle**

dépend de

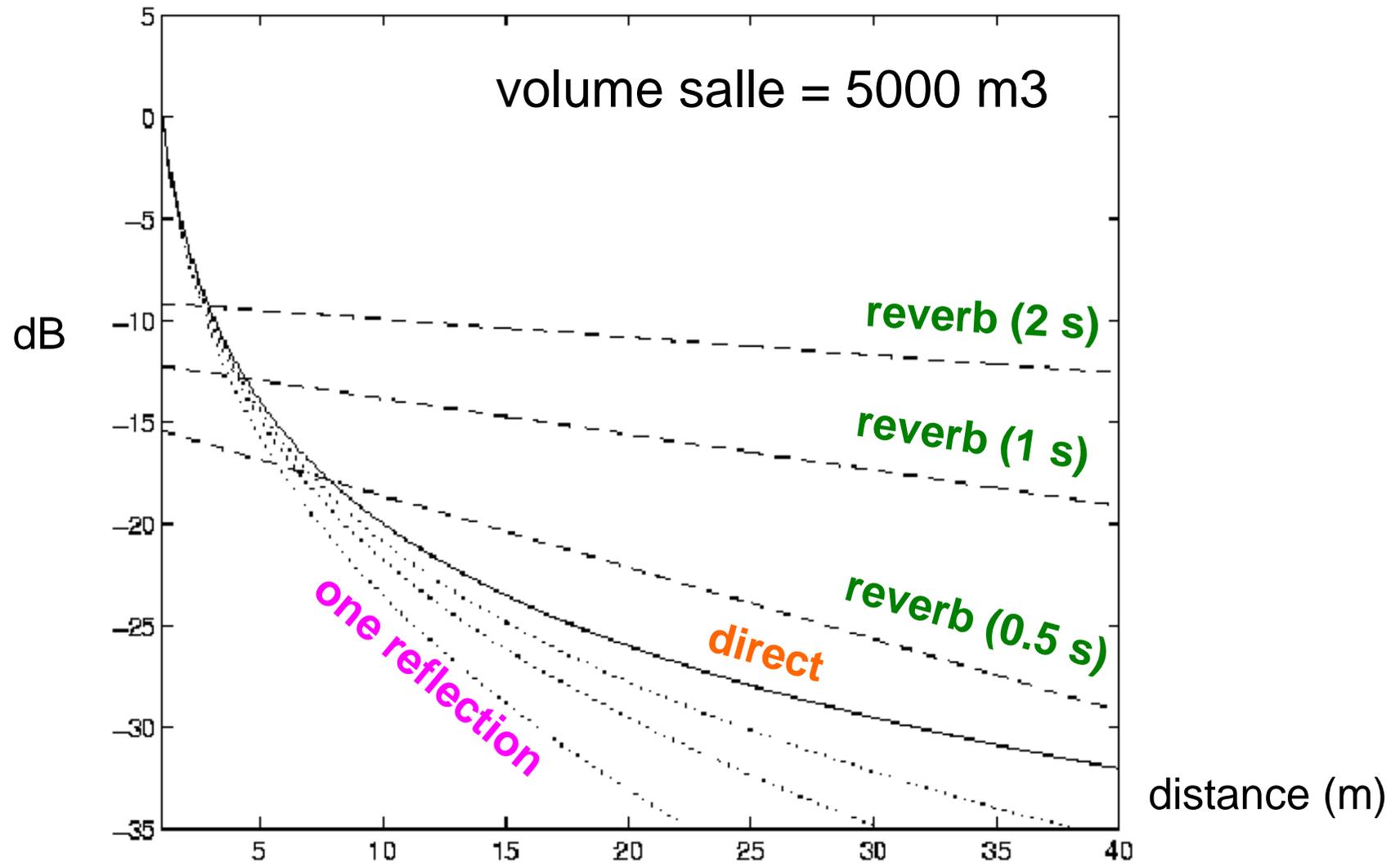
*Dépendant
de la fréquence*

- taille de la pièce

- l'absorption des murs

- l'absorption de l'air

Effet de la distance



Quelques règles intuitives

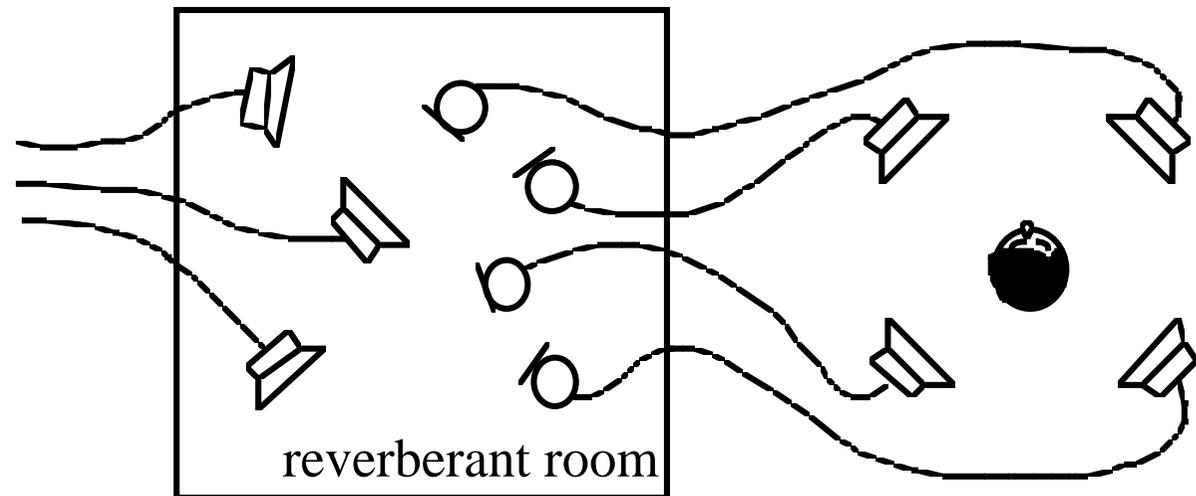
- Effets de la distance:
 - Atténuation $1/r$ du chemin direct et des réflexions
 - Réduction de la reverb (passe-bas)
 - Absorption de l'air (passe-bas)
- Effets d'une source plus directive:
 - chemin direct: passe-bas dépendant de la direction
 - son réfléchi : passe-bas indépendant de la direction

Quelques règles intuitives

- Effets d'une pièce plus grande
(à **absorption constante**)
 - le temps de décroissance augmente proportionnellement
 - l'énergie totale de la réverb. est inchangée
 - l'énergie initiale de la réverb. diminue

Algos de réverbération artificielle

- **Modèle conceptuel**



- **2 approches:**

- Convolution directe (FIR)
- Feedback delay network (FDN)

Algos de réverbération artificielle

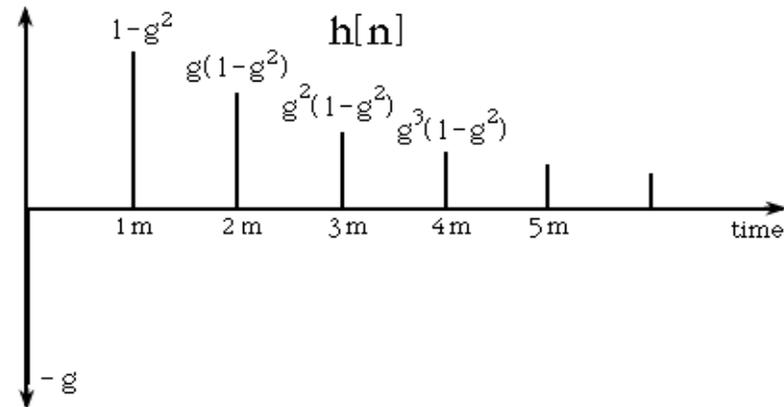
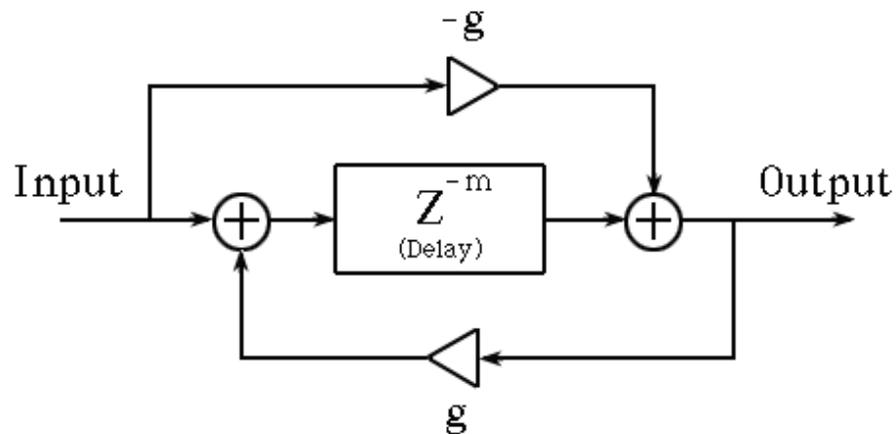
- Avantages de la convolution directe:
 - Reproduction exacte de la réverbération (mesurée ou simulée)
 - Décroissances non exponentielles
- Inconvénients:
 - Couteux

Algos de réverbération artificielle

- Avantage du FDN :
 - Efficace (~ 10 MIPS)
 - Contrôle paramétrique simple
- Inconvénients
 - limité à des décroissances exponentielles
 - peut simuler des environnements “ouverts”
 - contrôle de la densité d’écho et du “flutter”
 - contrôle par rapport à une géométrie précise non trivial

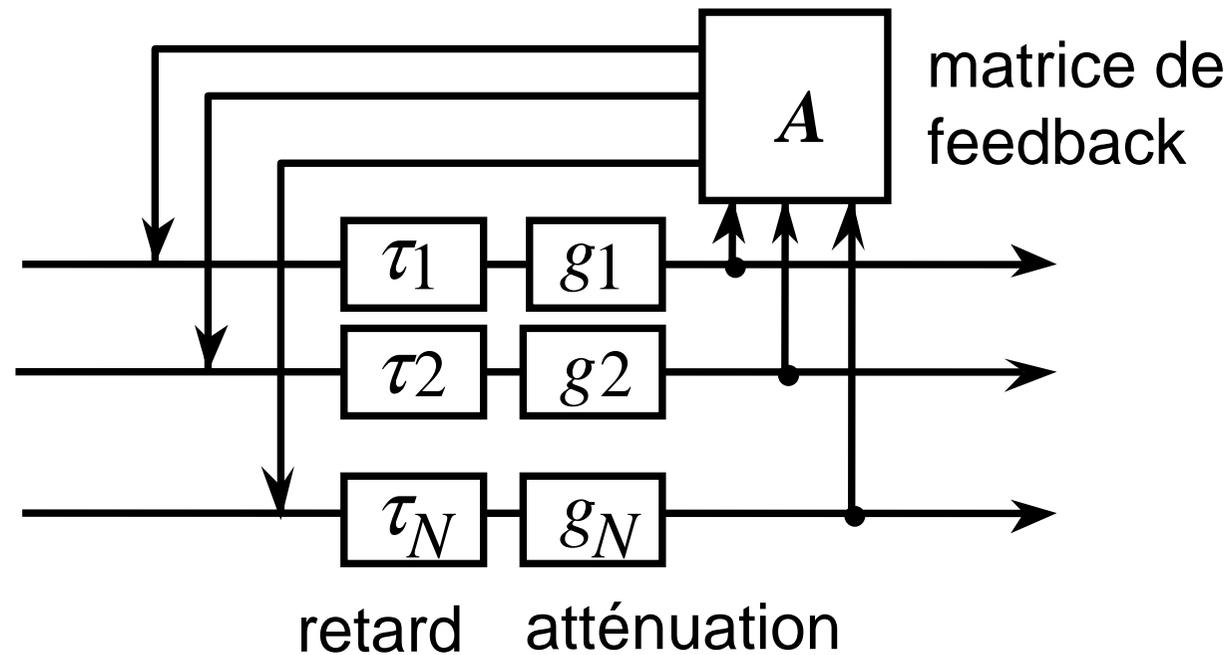
Algos de réverbération artificielle

- Très (trop) basique : le filtre passe-tout
 - ne modifie pas le spectre d'amplitude
 - effet métallique



Algos de réverbération artificielle

- Un FDN simple



Design d'un FDN

- 1) Construire un prototype “sans perte”
 - sans perte \Leftrightarrow temps de décroissance infini
 - utiliser des retards, des filtres passe-tout, des matrices unitaires.
 - Le retard total dans la boucle doit être de l'ordre de 1 seconde
 - Maximiser la recirculation entre les retards
Réponse impulsionnelle est un bruit blanc

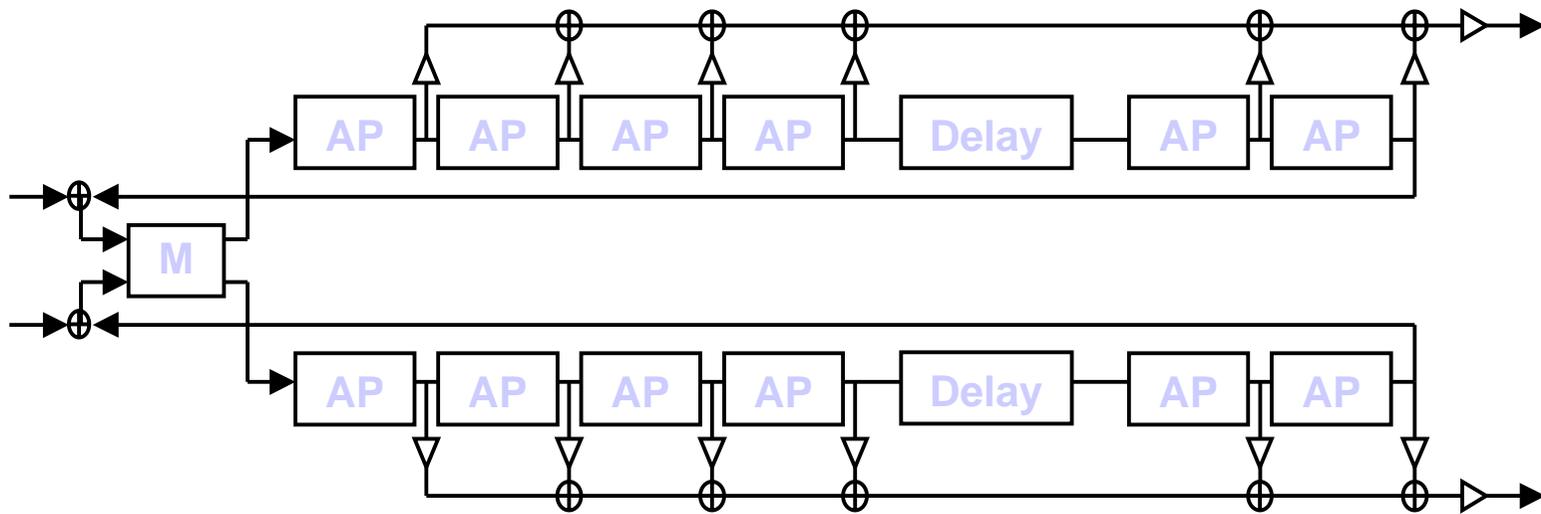
Design d'un FDN

2) Associer un **filtre absorbant** à chaque retard

L'absorption en dB est proportionnelle à la durée du retard et inversement proportionnelle au temps de décroissance

Algos de réverbération artificielle

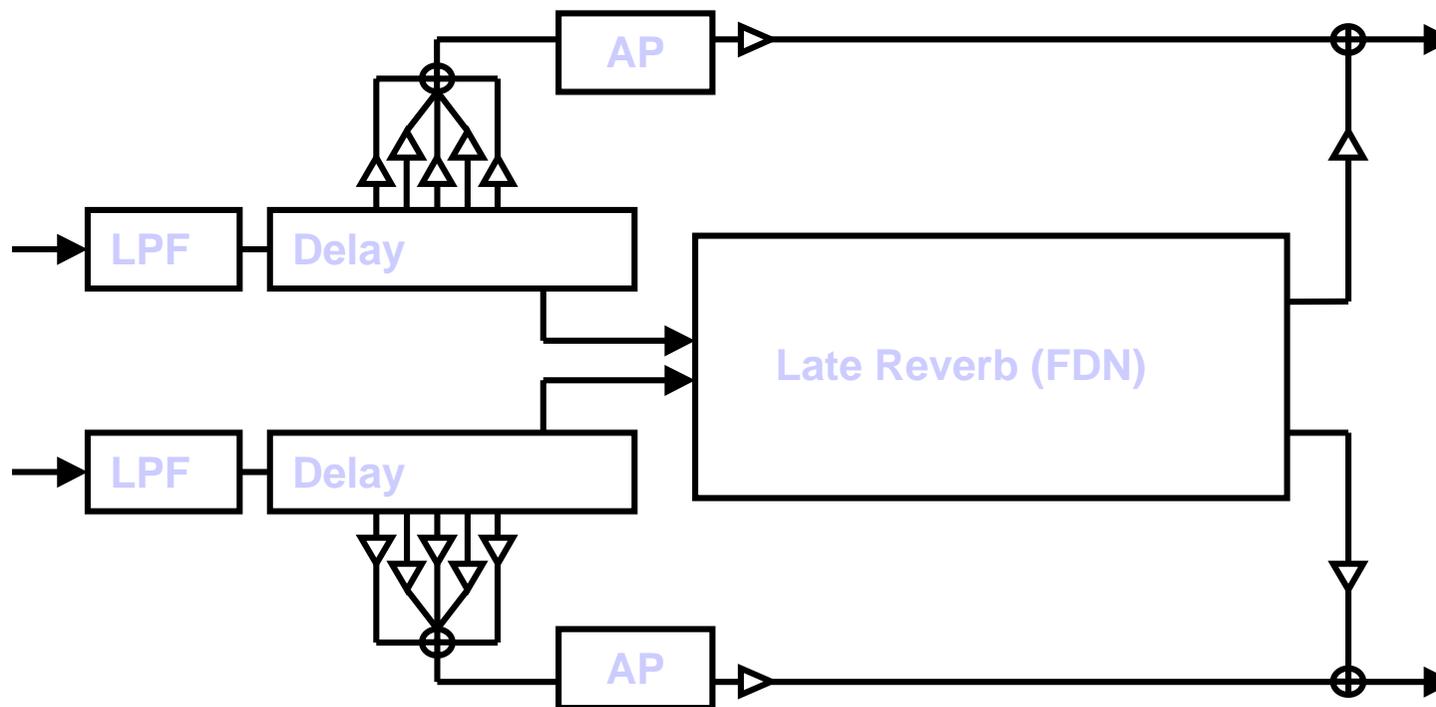
Exemple: un prototype à 2 canaux



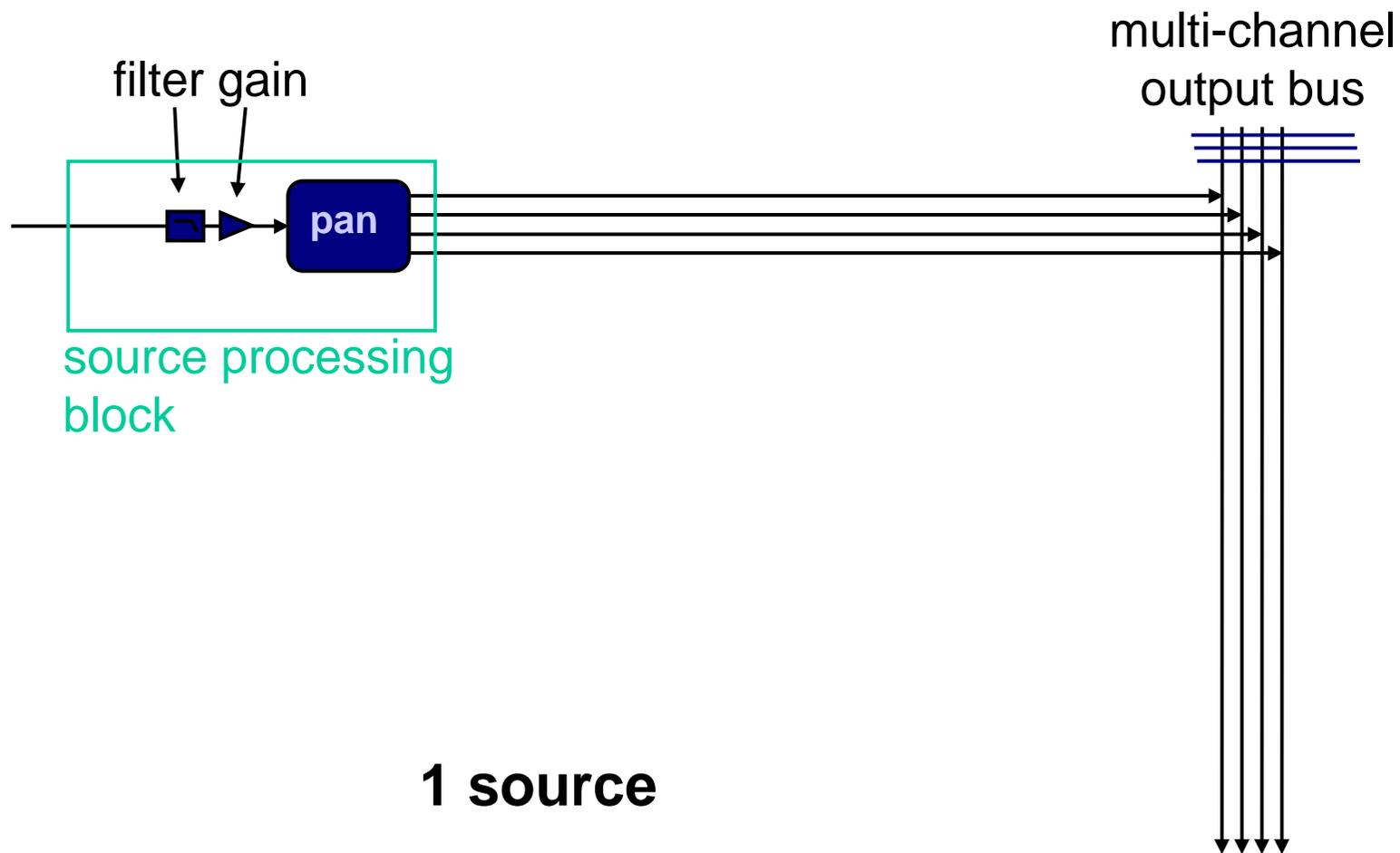
2 chaines de filtres passe-tout

Artificial Reverberation Algorithms

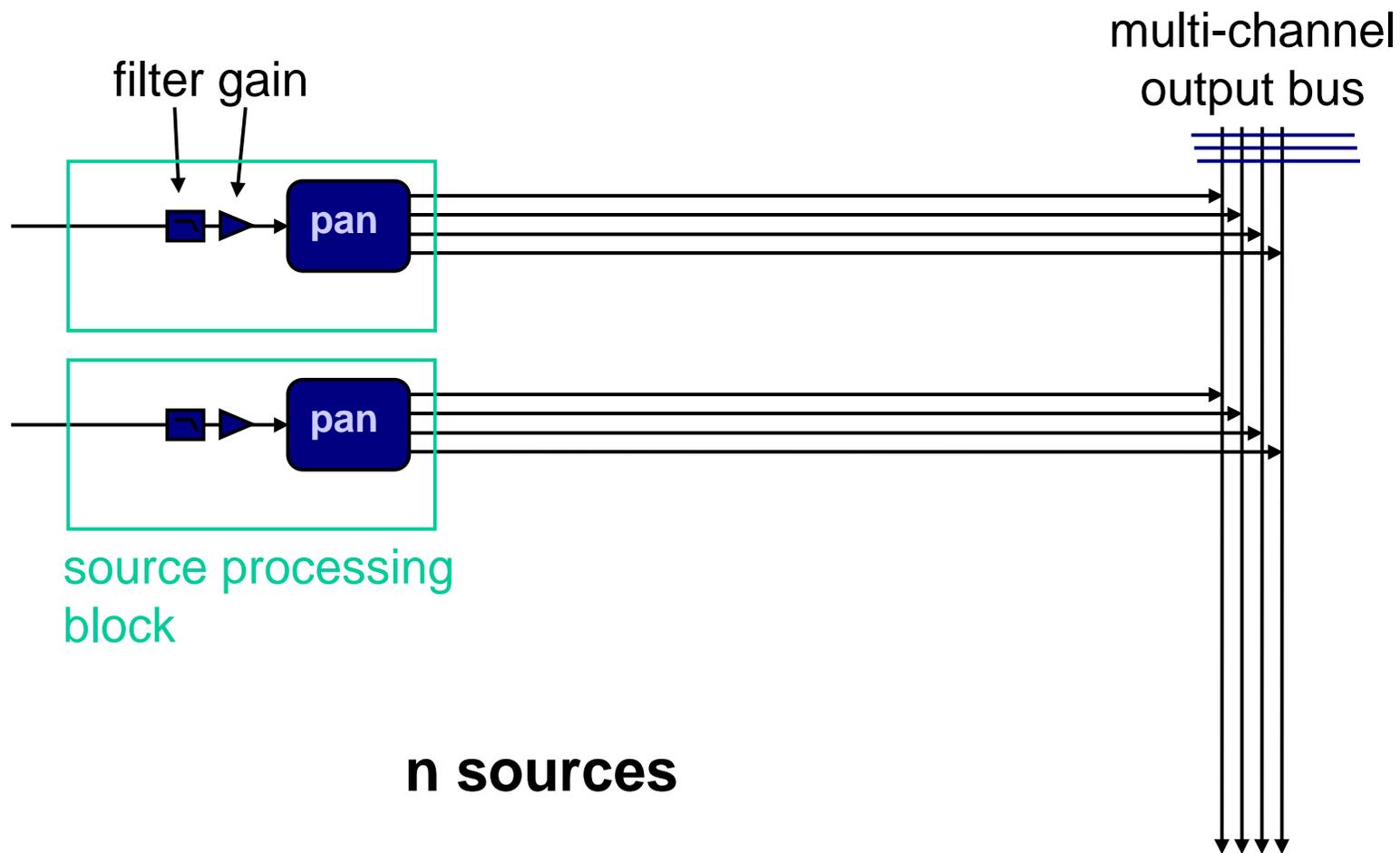
Exemple: bloc de réverbération complet



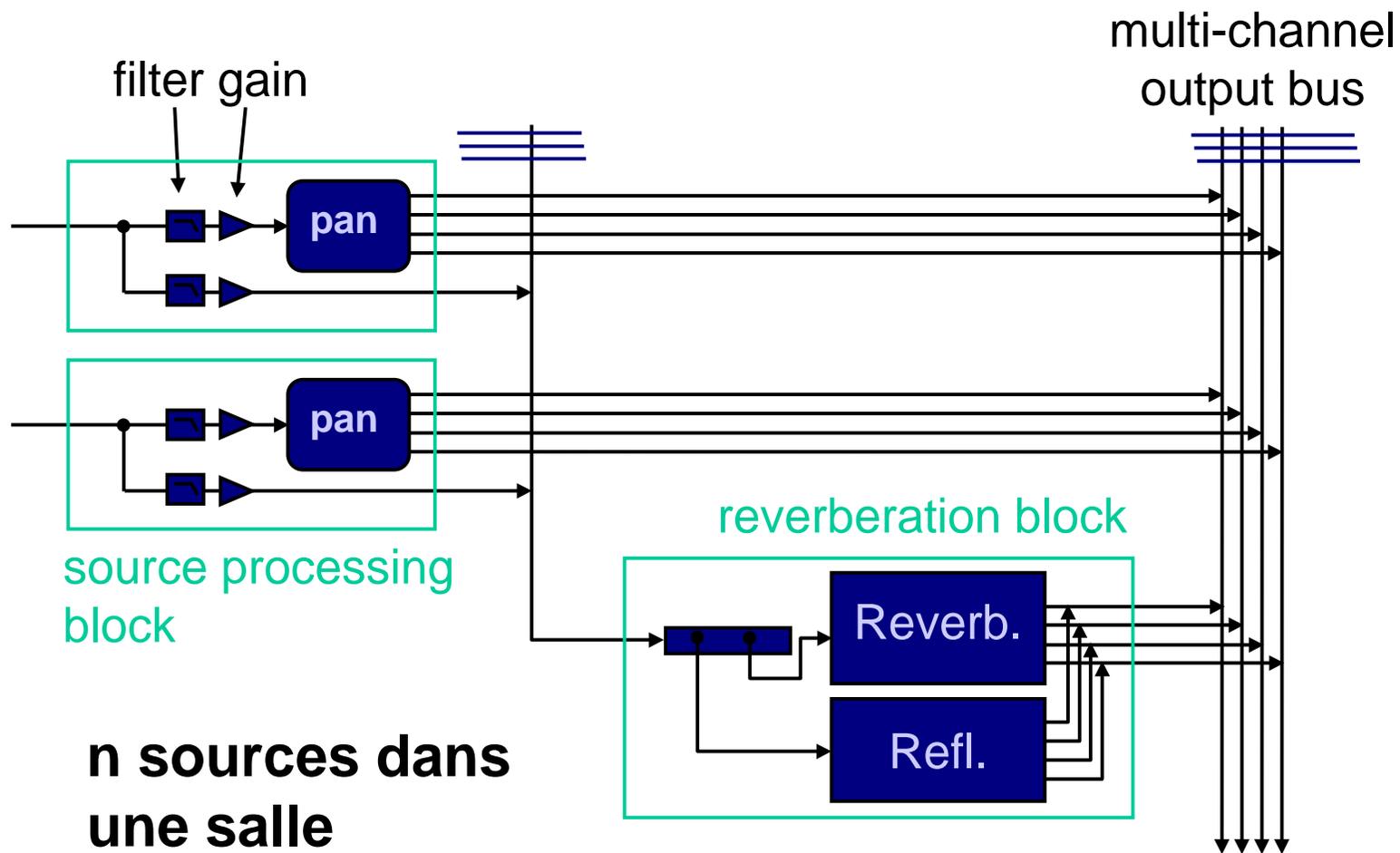
Architecture de mixage



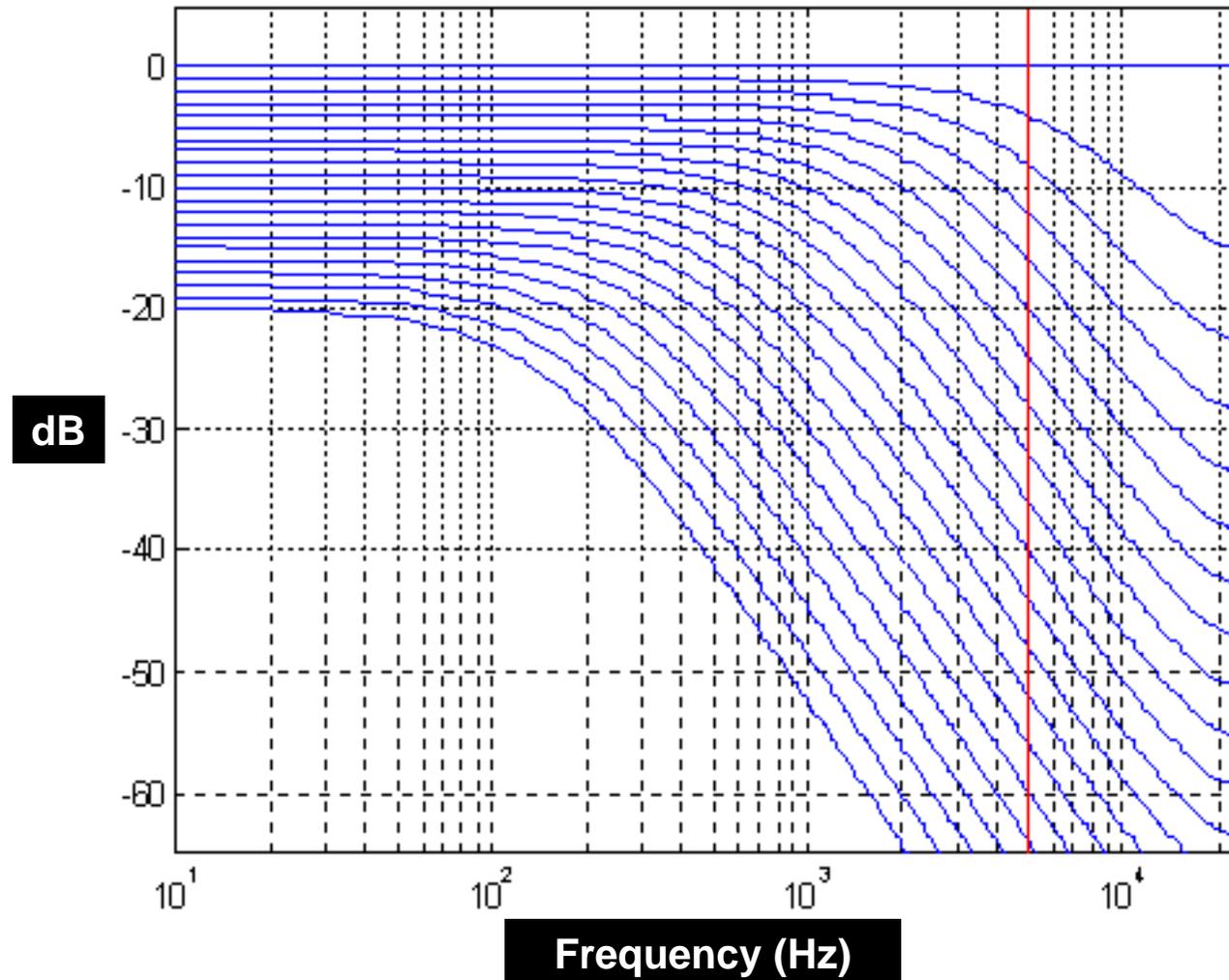
Architecture de mixage



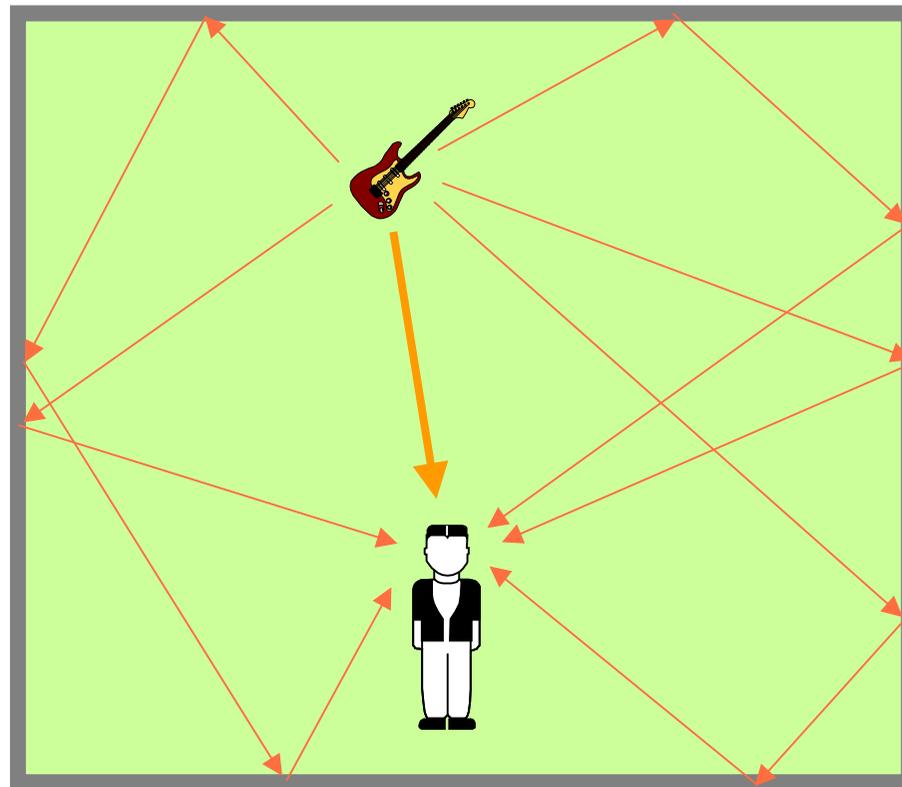
Architecture de mixage



Filtres d'atténuation typiques

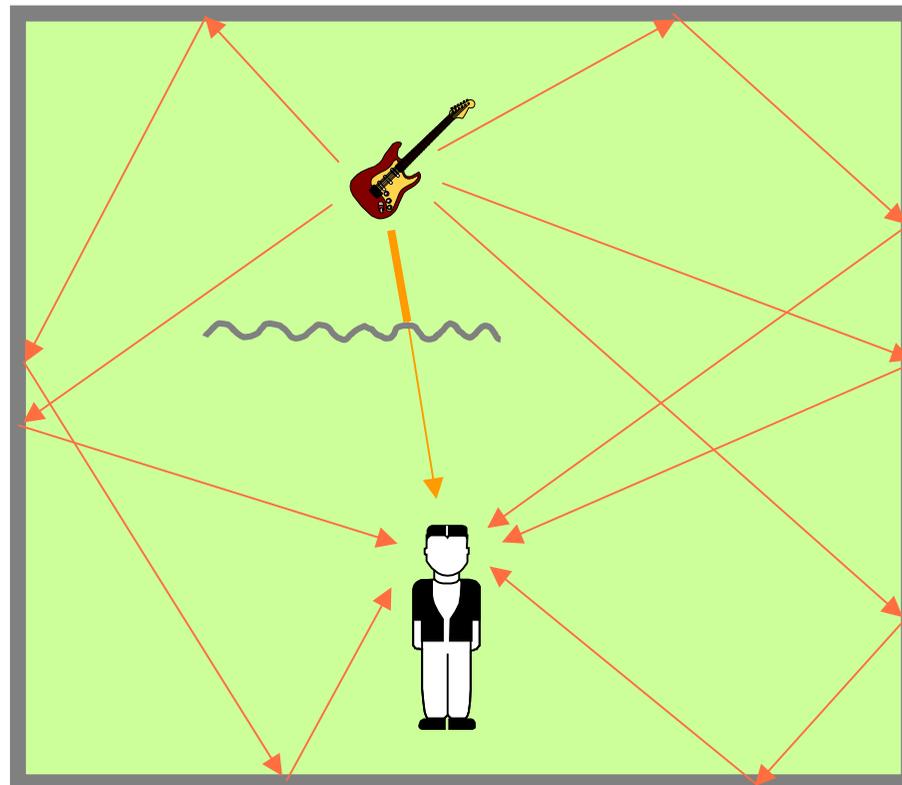


Environnements complexes



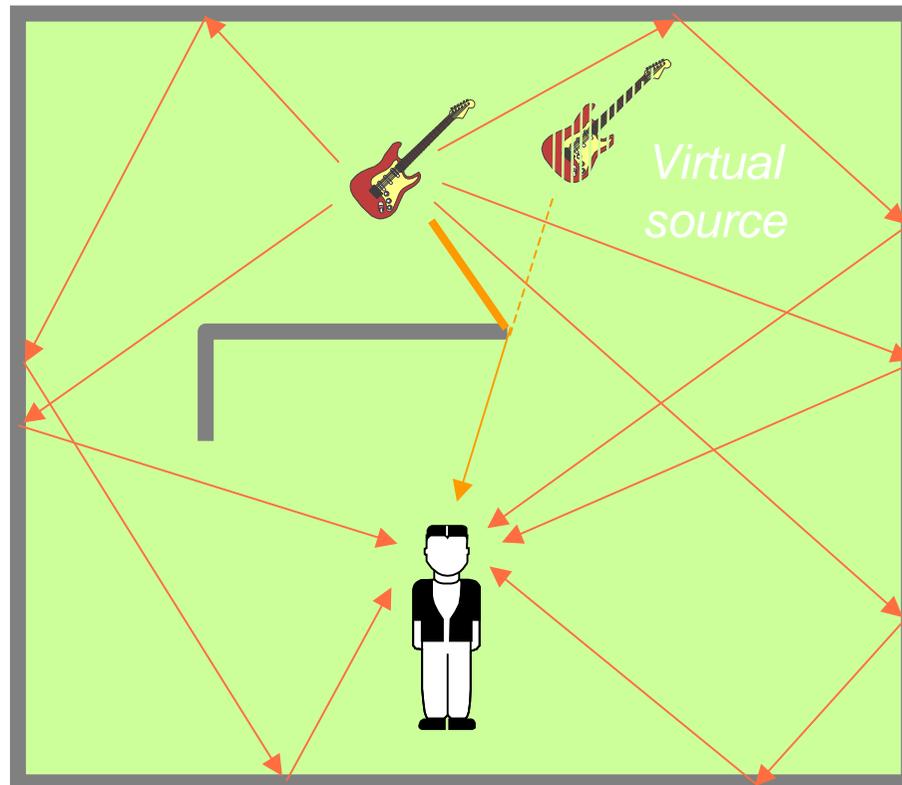
Environnements complexes

Obstruction (transmission)



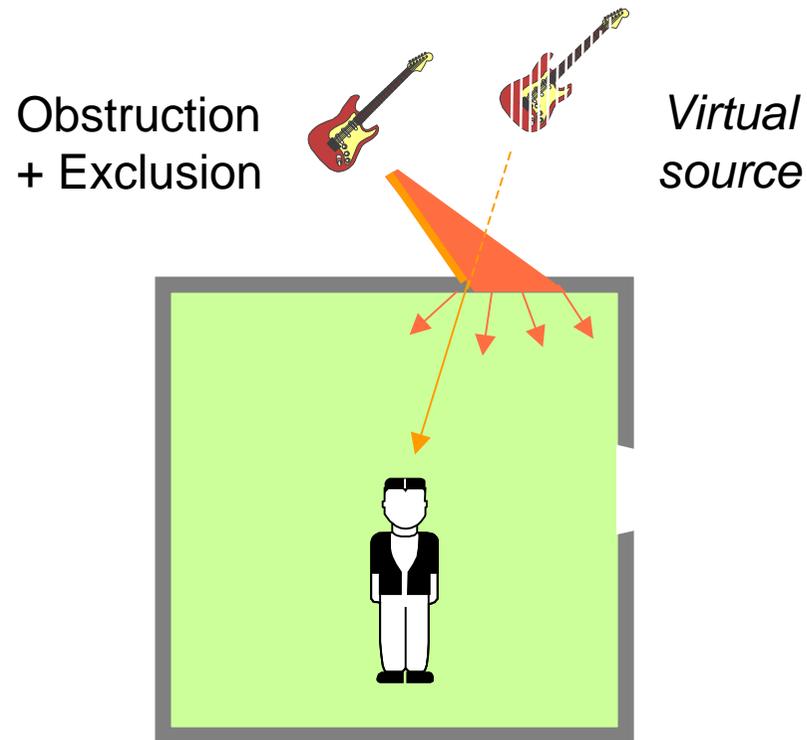
Environnements complexes

Obstruction (diffraction)



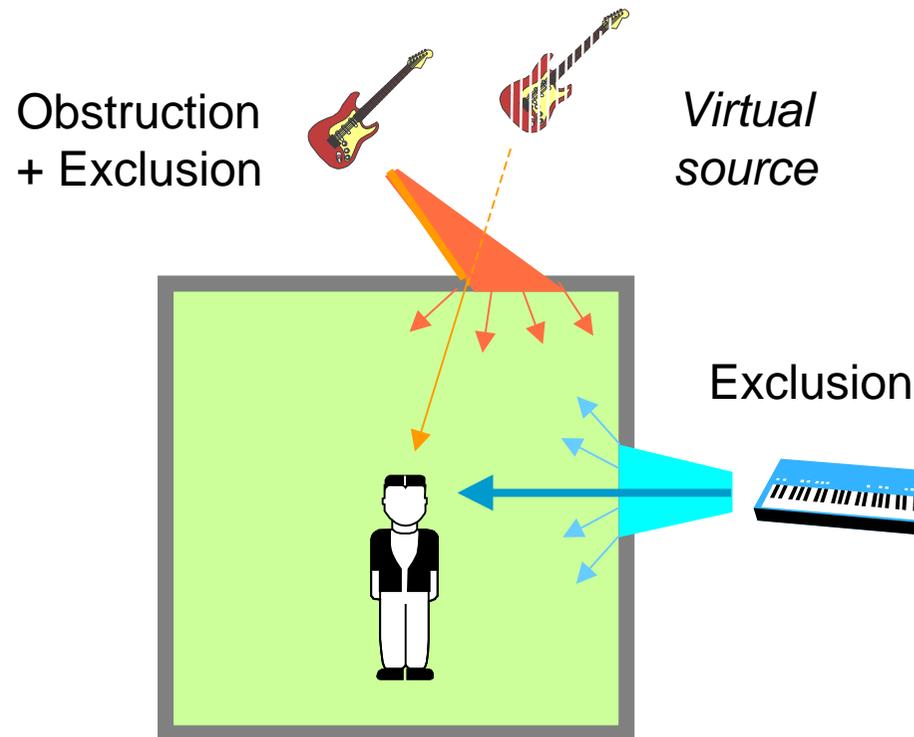
Environnements complexes

Obstruction + exclusion



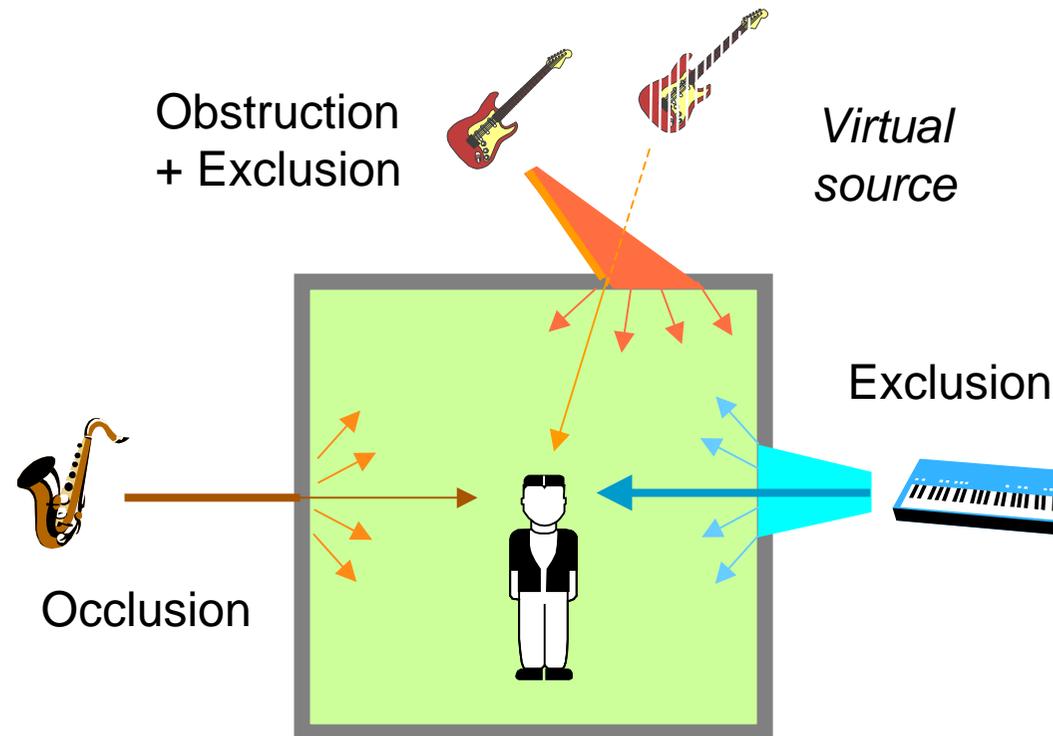
Environnements complexes

Exclusion



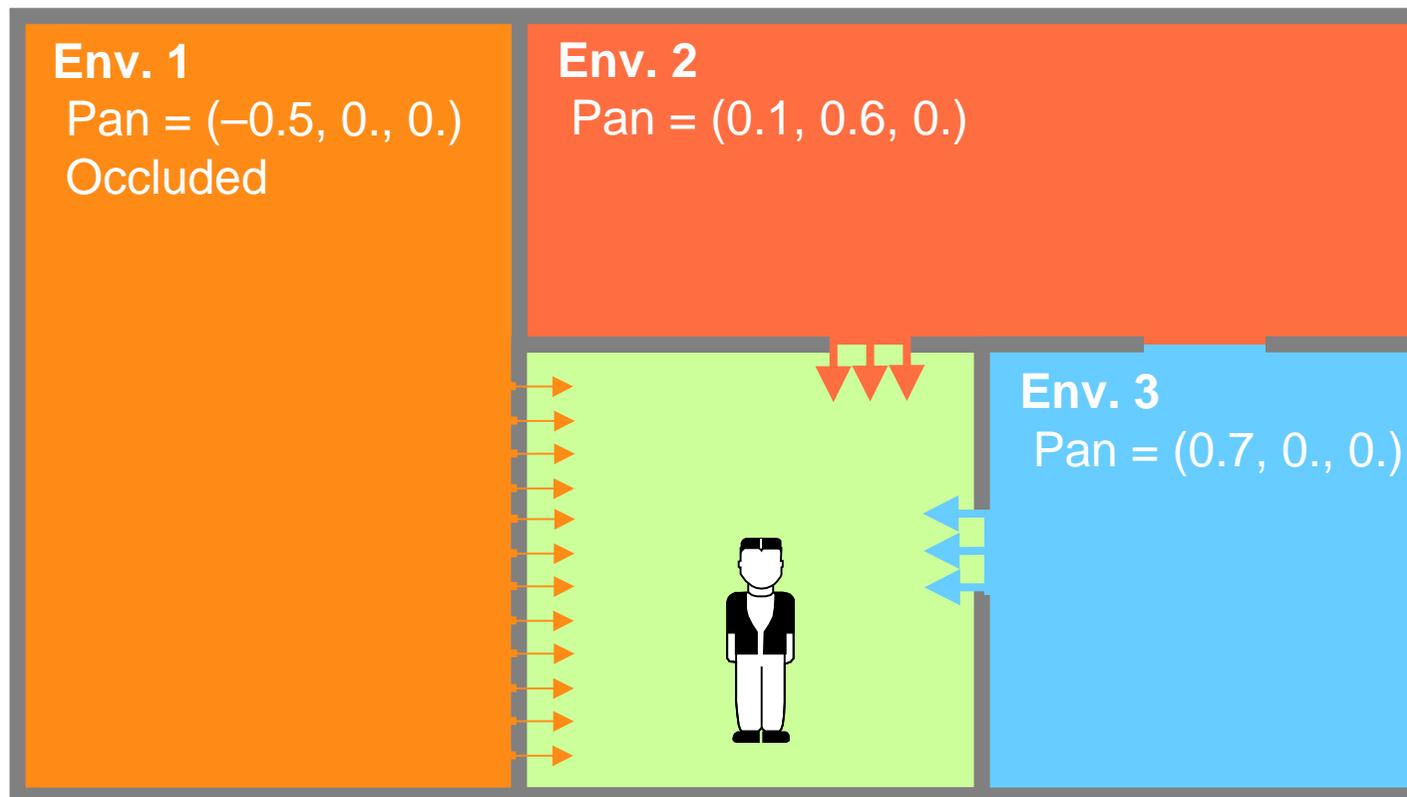
Environnements complexes

Occlusion



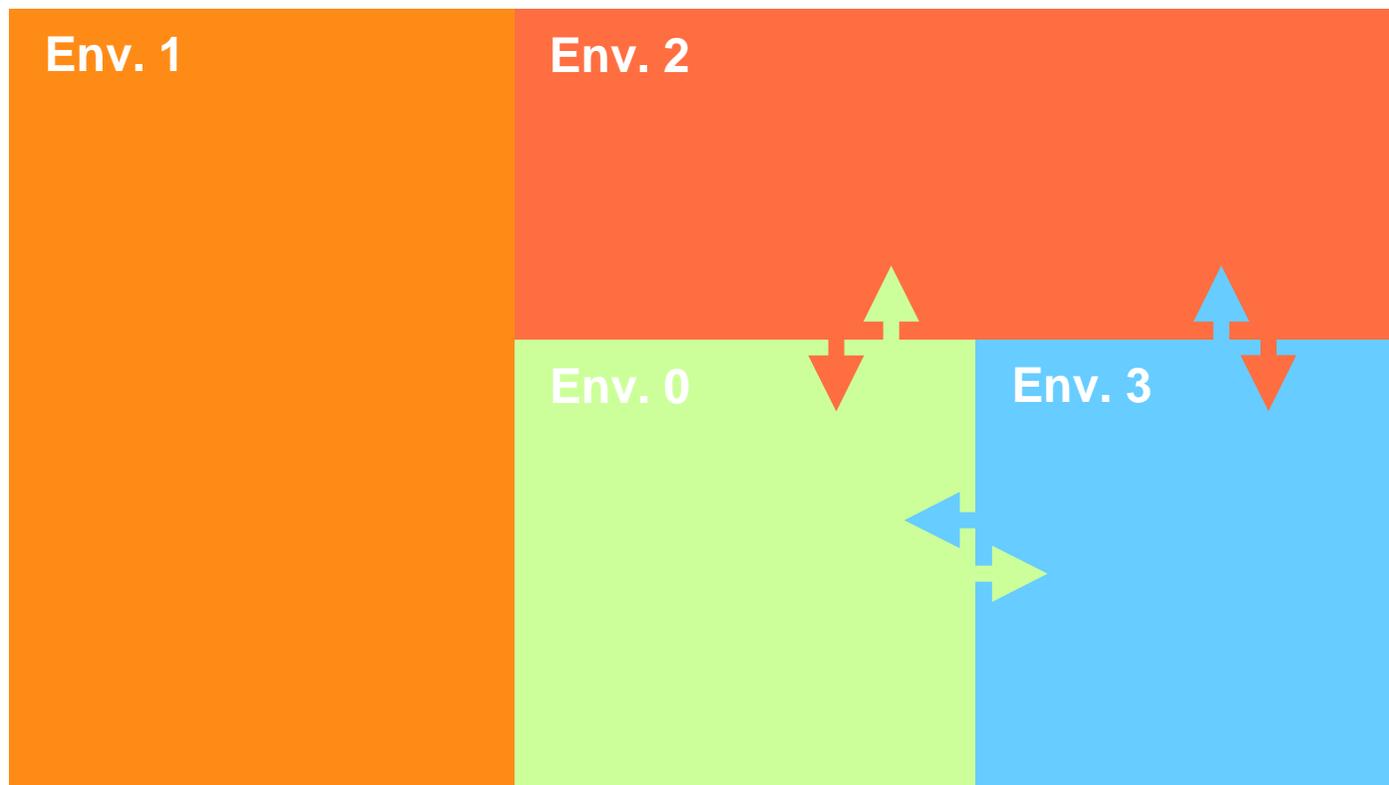
Environnements complexes

Superposition de reverb pour des pièces voisines

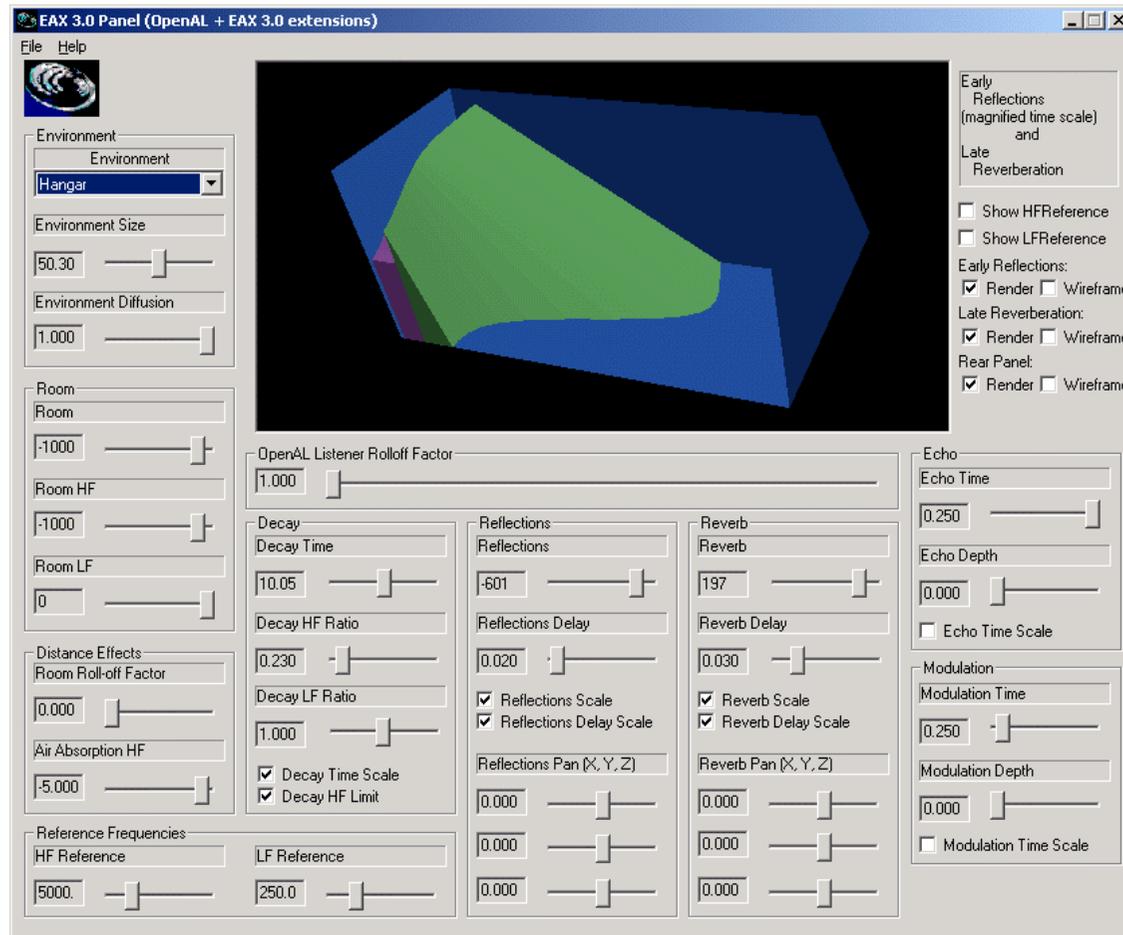


Environnements complexes

Couplage des réverbérations



Démo: EAX

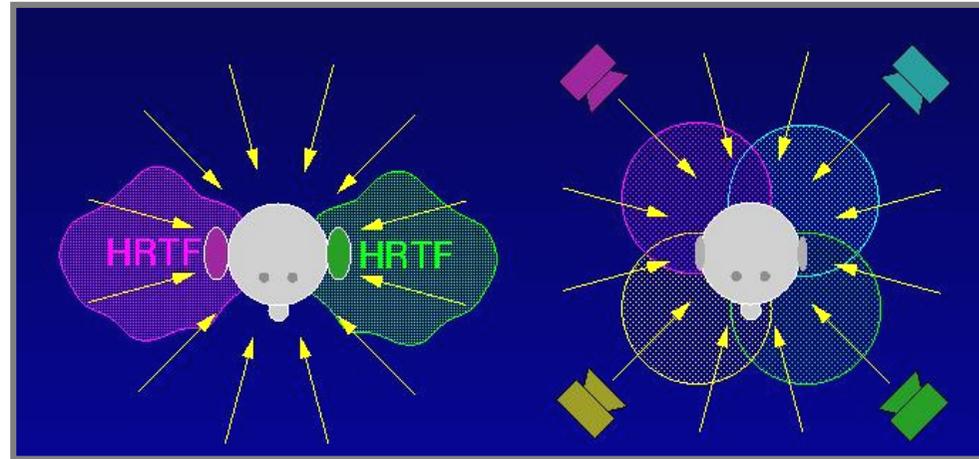


Plan

- Introduction au son
- Acquisition et numérisation
- Synthèse
- Traitement du signal audio
- Spatialisation/”rendu” du son
- Perception et restitution 3D du son

Positionnement 3D du son

- Systèmes de restitution
 - stéréo
 - multi haut-parleurs



Spatialisation du son

- **Positionnement** du son dans l'espace
 - différence de temps d'arrivée aux oreilles
 - masquage/diffraction par le torse et la tête
 - filtrage complexe dû aux réflexions/diffractions dans le pavillon de l'oreille
 - => dépend de la direction d'incidence

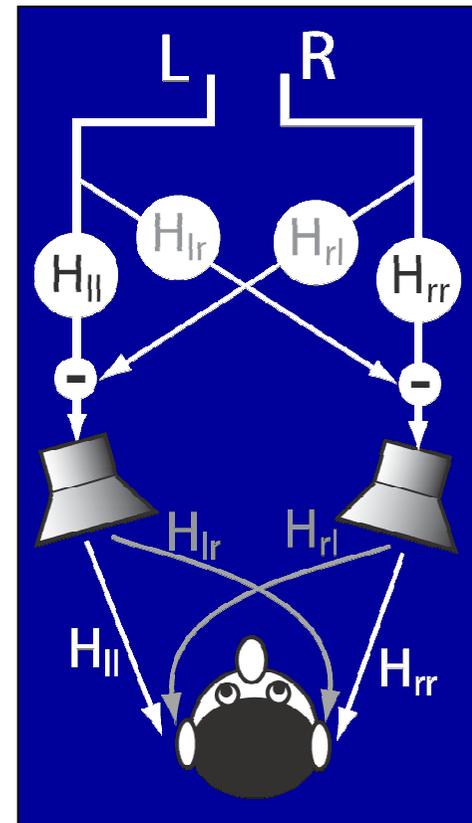
Positionnement 3D du son

- En stéréo
 - pas besoin de plus !
 - appliquer une paire de filtres à un signal mono
 - filtres sont directionnels
- HRTFs
 - Head Related Transfer Functions
 - mesurés ou simulés
 - dépendent de l'auditeur



Positionnement 3D du son

- Extension à des enceintes stéréo
 - transaural stereo
 - suppression des chemins croisés (cross-talk)



Positionnement 3D du son

- Multi-haut parleur
 - Son surround 5.1 et +
 - Ambisonics
 - Holophonie

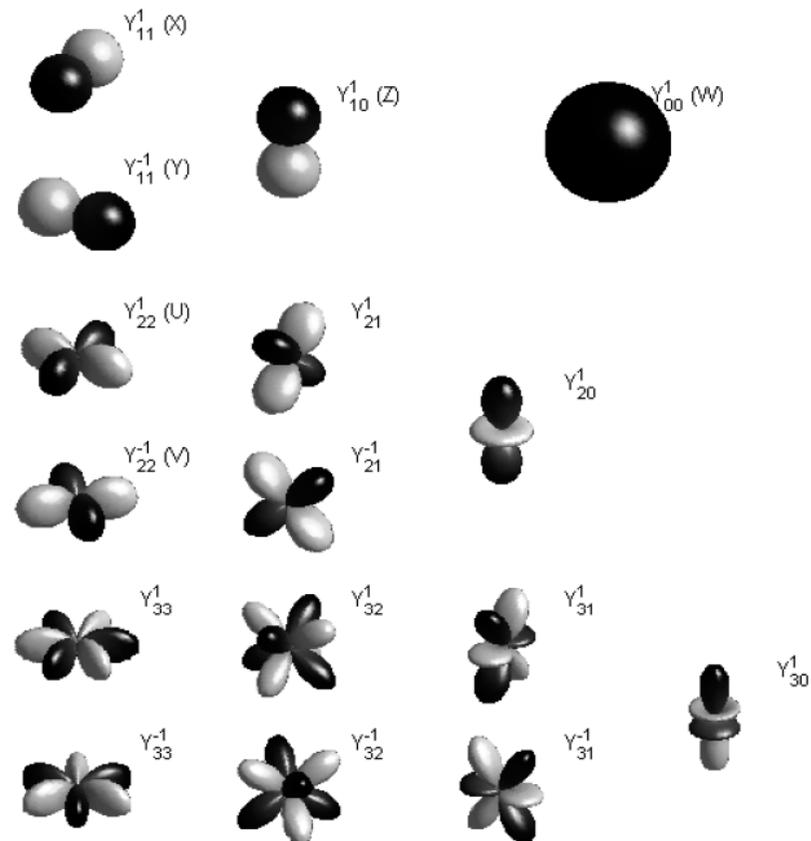
Pan-pot d'amplitude et d'intensité

- Le son « surround » de base
- Applique le gain bien choisi à chaque HP pour reproduire la direction de provenance
- Systèmes d'enceintes complexes (3D)
 - Vector-Based Amplitude Panning (VBAP)
 - Optimisation
 - Compromis entre le nombre de HP et la précision de la localisation

Décomposition en harmoniques sphériques

sphériques

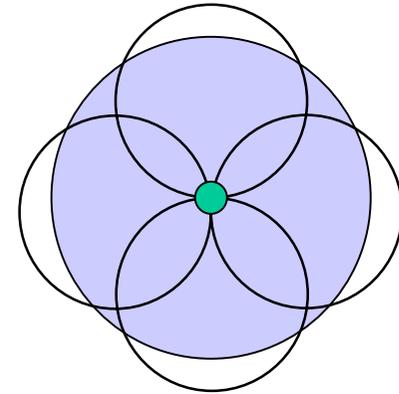
- Projection de la pression en un point sur une base de fonctions sphériques
 - équivalent de l'analyse de Fourier



Décomposition en harmoniques sphériques

- Décodage sur plusieurs configurations
 - haut-parleurs, casque
- Permet de manipuler le signal à la restitution
 - rotations
 - distorsions de la perspective sonore
 - focalisation

Ambisonics



- 1st order spherical harmonics
 - Sound field can be reproduced from 4 components
 - 1 omnidirectional and 3 orthogonal cosine lobes (equivalent to figure-of-8 microphones)
- Microphone “SoundField”
 - permet la prise de son à l’ordre 1
 - 4 capsules cardioïdes montées en tétraèdre
 - modélise n’importe quelle paire stéréo coïncidente



Wave Field Synthesis

- Reproduire les fronts d'onde sonores exact dans l'espace de restitution
- Utilise des HP sur les murs
 - théorème de Kirchoff
- Le champ sonore est correct en tout point
- Très couteux (jusqu'à 300 canaux)
 - limité à une configuration 2D.

Quel système pour quel environnement ?

- Système binauraux pour le desktop
 - inclus la stéréo transaurale
 - mono-utilisateur
- Multi-HP pour multi-utilisateurs
 - bien adapté aux *RealityCenters*
 - Limitation de place
 - Contraintes de projection vidéo

Autres problèmes pour les applis immersives

- Latence du système
 - moins que 100ms => OK
- Tracking de la tête de l'utilisateur
 - Mettre à jour les filtres transauraux/binauraux
 - Corriger les gains des HP
 - Permet une meilleure localisation
- Traitement de la salle
 - surfaces réfléchissantes

Récapitulatif

| Technique | Setup (# chans) | DSP | elevation | imaging | Sweet spot | recording |
|----------------------|--------------------|----------|-------------------|---------|---------------|-----------|
| HRTF | light (2) | moderate | yes | v.good | n/a | yes |
| Transaural | light (2+) | moderate | yes | good | small | yes |
| Amplitude Panning | average (4+) | low | yes (3D array) | average | small | ? |
| Ambisonics | average (4+) | moderate | yes (3D array) | good | small | yes |
| WFS | heavy (100+) | high | ? | v.good | n/a | ? |

Standards

- Direct Sound 3D
 - spatialisation, reverberation, effets
 - EAX (Creative Labs)
 - OpenAL (multi-plateforme)
 - => support hardware par les cartes sons
 - 64 voix 3D + 4 reverb simultanées
- MPEG4 audio
- JAVA 3D

Conclusions

- Introduction au son, son traitement dans le cadre de la spatialisation
- Modélisation acoustique interactive
- Systèmes de restitution audio “3D”
- A mettre en parallèle avec l’image dans les prochain cours
- Importance de la perception
- Prochain cours : programmation