

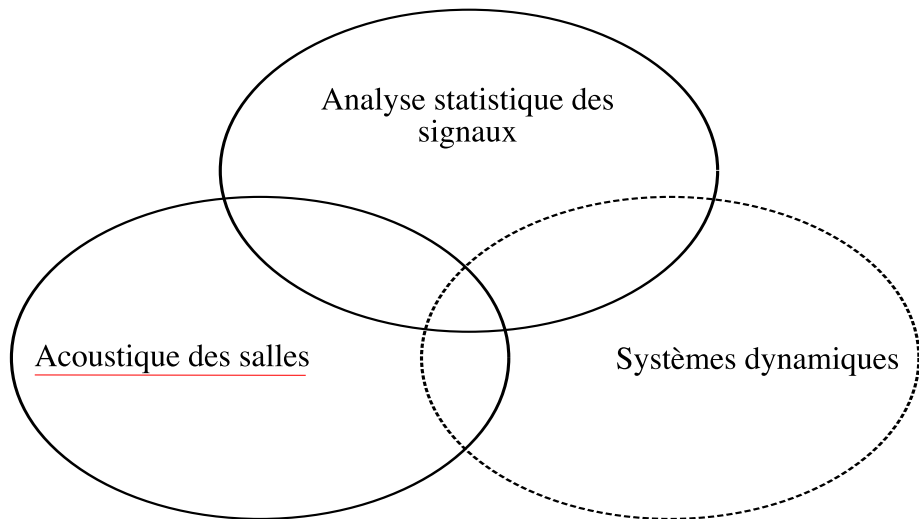
Caractérisation du mélange dans les réponses impulsionnelles de salles. Application à la détermination expérimentale du temps de mélange

Guillaume Defrance¹

¹UPMC Univ. Paris 06
Institut Jean Le Rond d'Alembert – Equipe LAM
CNRS UMR 7190
Ministère de la Culture et de la Communication

30/11/2009

Cadre de l'étude



Acoustique des salles

Rayons sonores, trajectoires, retours

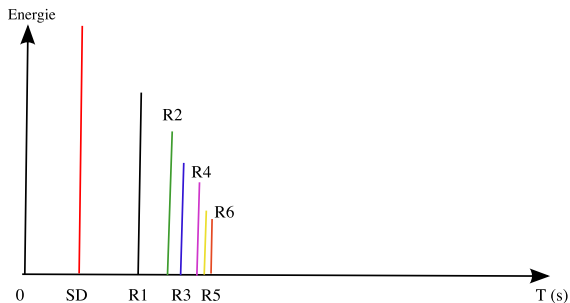
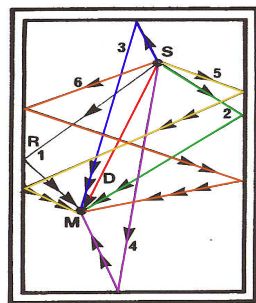
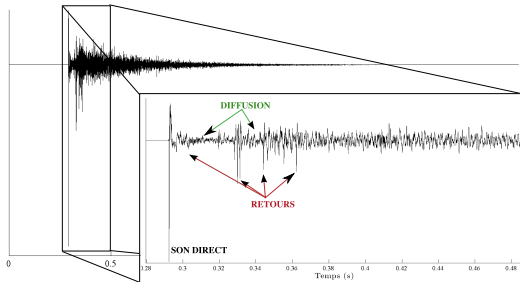
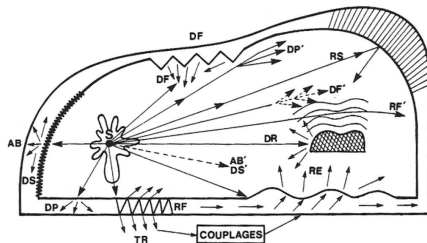


Schéma: J. Jouhaneau, "Acoustique des salles et sonorisation"

Phénomènes rencontrés: représentation



Cadre de l'étude

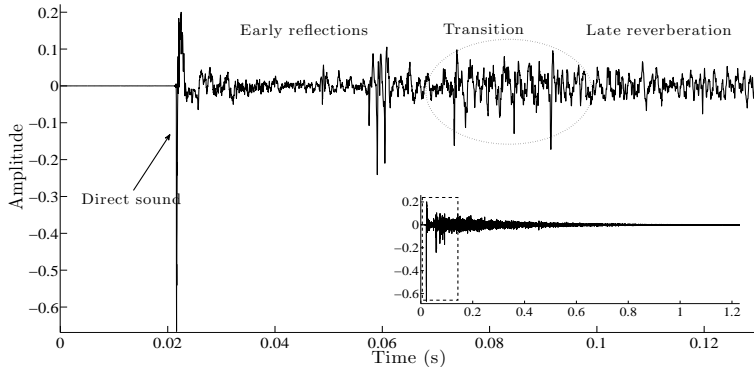
Réponse Impulsionnelle (RI) de salles

- documente l'acoustique d'une salle
- mesurée entre un point source et un récepteur
- filtre linéaire invariant dans le temps
- = superposition de retours

Retour: version modifiée du son original émis par la source et reçue par le récepteur après au moins une réflexion.

Une RI est composée de:

- son direct
- premiers retours
- réverbération tardive ou champ diffus



Objectif

Evaluation expérimentale du temps de transition entre deux régimes: premiers retours et champ diffus.

Dans la *littérature*, ce temps est appelé **temps de mélange**.

Mais nous trouvons aussi...

Temps de mélange= temps nécessaire à deux rayons initialement adjacents pour se disperser uniformément dans l'espace (densité homogène et isotrope).

Plan de l'exposé

- 1 Introduction
- 2 Bref aperçu de l'acoustique statistique des salles
- 3 Deux estimateurs du temps de mélange:
 - ▶ Matching Pursuit (MP)
 - ▶ eXtensible Fourier Transform (XFT)
- 4 Discussion des résultats & Conclusion
- 5 Perspectives

Bref aperçu d'acoustique statistique des salles

Dans le domaine fréquentiel

- 1912: *Weyl* montre que la densité des fréquences propres est une fonction quadratique de la fréquence
- 1954: *Schroeder* montre qu'aux hautes fréquences les modes se recouvrent/superposent - densité constante (*en apparence*) des modes
- Fréquence de transition entre 2 régimes: fréquence de Schroeder

Dans le domaine temporel

- Temps faibles: la densité de retours $De(t)$ n'est pas constante:

$$De(t) = 4\pi c_0^3 \frac{t^2}{V} \iff N(t) = 4\pi c_0^3 \frac{t^3}{3V} \quad (1)$$

où N est le nombre de retours de $t = 0$ à t , c_0 est la célérité du son ($m.s^{-1}$) et V est le volume de la salle (m^3)

Aux temps plus longs

Le système devient mélangé (*Joyce* – 1975).

- 1941: *Krylov* étudie les systèmes mélangeants. Perte graduelle de la mémoire de leur passé au cours du temps.
- Les trajectoires deviennent indépendantes de leur origine. Equiprobabilité d'atteindre une région de l'espace des phases.
- La densité de retours devient homogène et isotrope – constante et indépendante de la position d'observation.

Une formule du temps de mélange

- 1988: (*Polack*) le mélange est atteint quand $N = 10$ retours se superposent dans une fenêtre de $\Delta t = 24ms$. L'Eq.(1) devient:

$$t_m \approx \sqrt{V} \quad (2)$$

où t_m est le temps de mélange en ms et V est le volume de la salle (m^3)

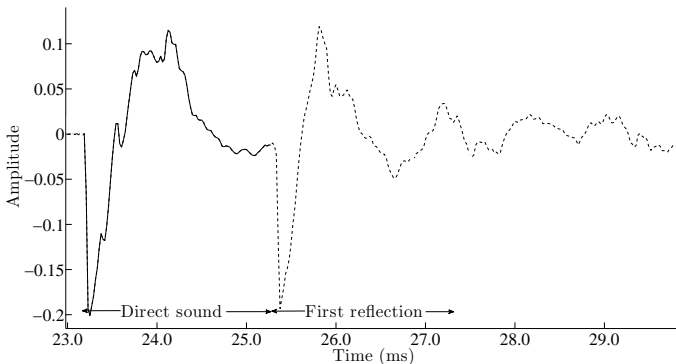
Le caractère mélangeant d'une salle dépend de sa géométrie et des matériaux.

Nota Bene

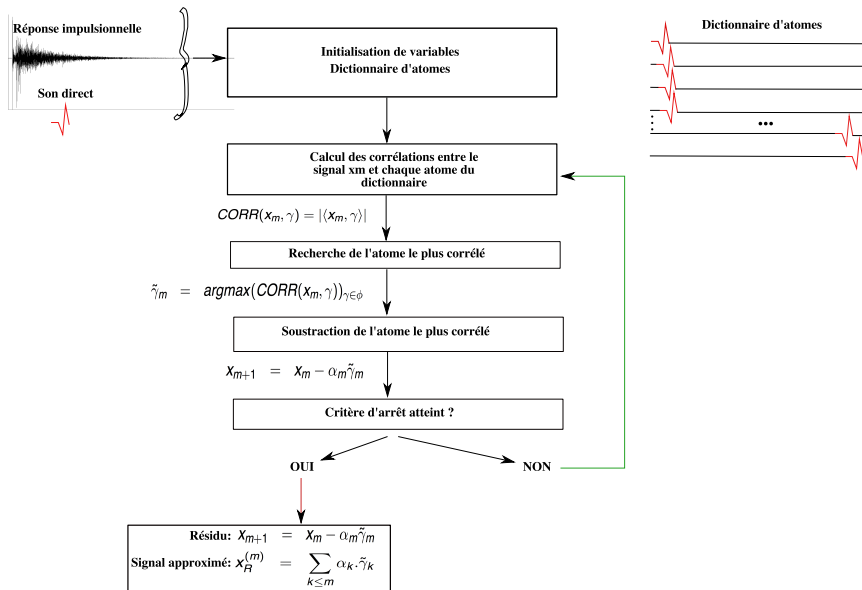
Le temps de mélange prend en compte le temps de propagation entre la source et le récepteur.

Matching Pursuit (MP) appliqué aux RIs

- Idée: RI \approx combinaison linéaire du son direct filtré et retardé
- Une technique basée sur des corrélations entre la RI et le son direct paraît appropriée pour détecter les retours



Algorithme de MP



Connaissance du son direct

Estimation des limites temporelles du son direct grâce à MP
(minimisation du nombre d'itérations pour différentes tailles du son direct).

Compensation de la décroissance de l'énergie

Assure l'équiprobabilité de détection des retours

Critère d'arrêt de la poursuite ($SRR = \text{Signal Residual Ratio}$)

$$SRR = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\|x\|_2}{\|R\|_2} \right) \quad (3)$$

La qualité de décomposition dépend du SRR

Détermination du SRR à partir de l'étude des variations des indices acoustiques entre le signal d'origine et celui reconstruit ($SRR = 5$ dB).

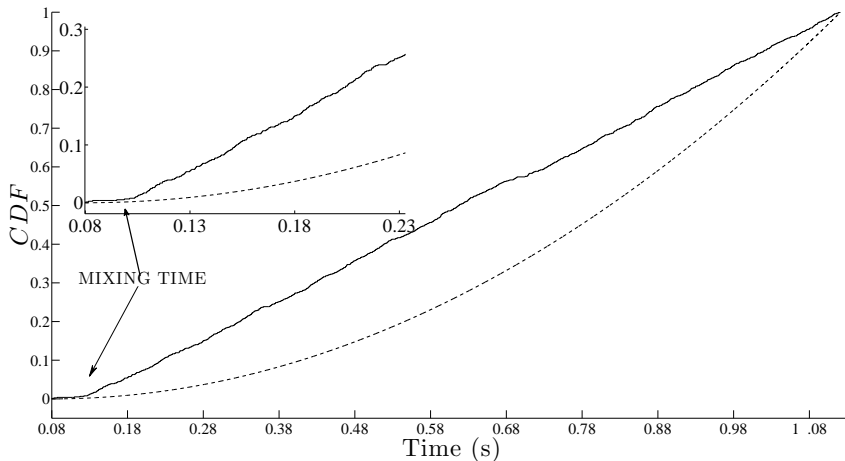
Validité de MP sur un modèle stochastique de RIs

- Modèle stochastique de réponses de salles (*Polack*) précédemment validé (indices acoustiques)
- Modèle:
 - ▶ Retours distribués selon un processus de Poisson dont le paramètre est le nombre de retours reçus:

$$N_{arr}(t) = \frac{4\pi c_0^3}{3V} t^3 \quad (4)$$

- ▶ Le nombre cumulé (CNA) de retours est une fonction cubique du temps
- ▶ Paramètres d'entrée: \overline{RT}_{30} , volume (V) de la salle, distance source/récepteur

Fonction de répartition estimée



Légende – Fonction de répartition attendue (- -) et estimée (-).

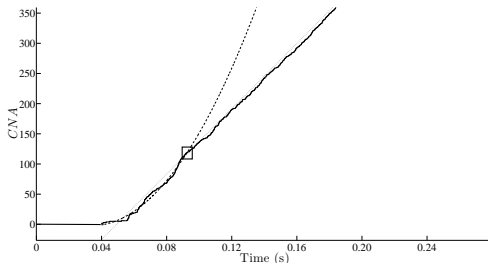
Estimation du temps de mélange grâce à Matching Pursuit

Temps de mélange

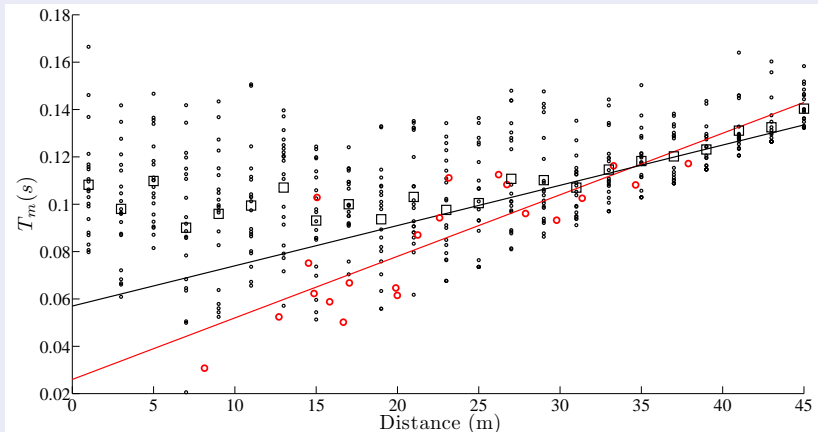
- Théorie de l'ac. des salles: les retours se recouvrent/superposent pour $t \geq T_M$
- Observation: MP confond 2 retours quand ceux-ci sont distants d'une durée \leq durée équivalente de l'atome
 - ▶ → **temps de mélange (T_M)**
- On vérifie expérimentalement que T_M marque le début de la partie linéaire des courbes de *CNA*

Salle Pleyel – 21 mesures dans toute la salle

- $t < T_M$: seuls quelques retours sont détectés après le son direct
 - ▶ CNA est une fonction cubique du temps \Rightarrow théorie de l'acoustique des salles.
- $t \geq T_M$: le nombre de retours croît d'un rapport constant avec le temps
 - ▶ Taux de croissance du nombre de retours est constant dans toute la salle ($\bar{N} = 1140$ arrivals/sec., $\sigma = 7\%$)



460 RIs synthétisées pour la Salle Pleyel



Légende – o : temps de mélange du modèle. □ : temps de mélange moyens du modèle. o : temps de mélange expérimentaux. — : régression linéaire sur le modèle. — : régression linéaire sur les RIs expérimentaux.

RIs expérimentales

Relation temps de mélange / distance source-récepteur:

$$T_M = 0.0026 \times d + 0.026 \quad (r = 0.82)$$

Temps moyen : $\bar{T}_M = 85 \text{ ms}$ ($\sigma = 30\%$)

RIs synthétisées

Relation temps de mélange / distance source-récepteur:

- $T_M = 0.0017 \times d + 0.057$ ($r = 0.97$) ($d \geq 25m$)
- $T_M = 0.0029 \times d$ ($r = 0.98$) (temps minimaux)

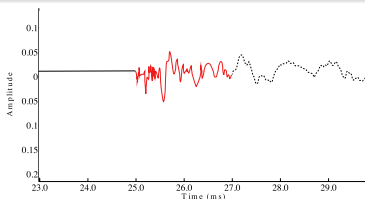
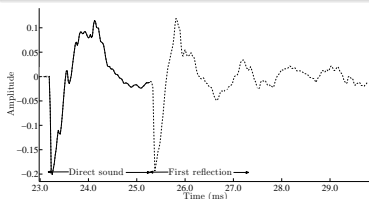
Temps moyen : $\bar{T}_M = 101 \text{ ms}$

Valeur théorique du temps de mélange

$$V_{Pleyel} = 19000 \text{ m}^3 \Rightarrow T_{Mth} \approx \sqrt{V} \approx 137 \text{ ms}$$

Différences

- mesure/modèle: diffusion, filtrage de la salle, estimation du son direct, source sonore (peu) reproductible
- MP: dictionnaire incomplet \Rightarrow compensation de ce choix



Paramètres importants

- estimation du son direct
- valeur du critère d'arrêt \Rightarrow nombre de retours détectés

eXtensible Fourier Transform (XFT) appliquée aux RIs

Introduction à la XFT

Principe

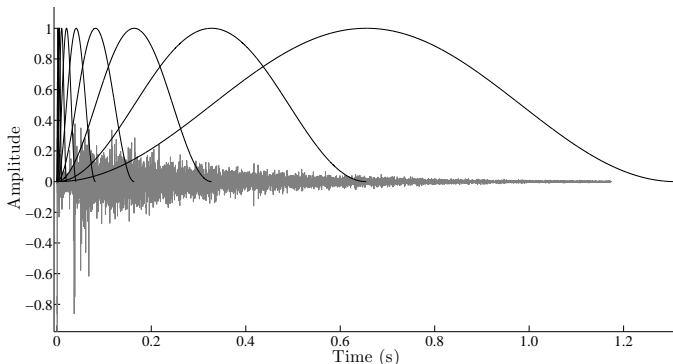
La XFT est comparable à un effet “mémoire”.

- Les temps d'occurrence des événements sonores sont détectés comparativement à ce qui s'est passé précédemment.
- Observation de l'évolution d'un signal respectivement à son état initial dans ses espaces temps et fréquence.

Définition

Calcul de Transformées de Fourier Discrètes du signal pour une taille de fenêtre d'analyse croissante.

$$X(p, f) = \sum_{n=0}^{N-1} w\left(\frac{nM}{Np}\right) x(n) e^{-2j\pi nf/N}, \quad \text{supp}(w(t)) = [0, 1] \quad (5)$$



But

Détecter le temps auquel les retours sont statistiquement distribués.

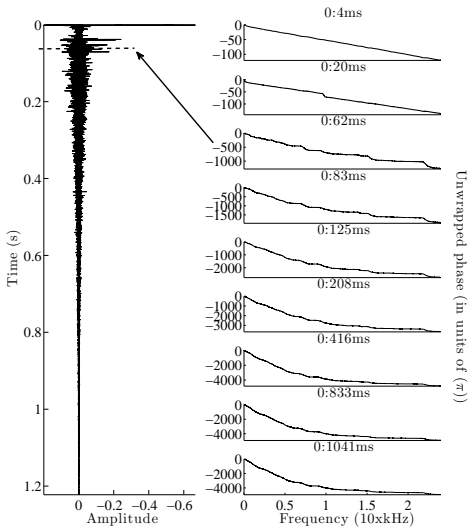
Nous montrons (*Rice*) aisément que pour:

- une taille de fenêtre d'analyse suffisamment grande et...
- un nombre de retours suffisamment grands...

... les coefficients de la série de Fourier d'une RI tendent vers une distribution Gaussienne.

Estimation du temps de mélange grâce à la XFT

Evolution de la phase de la XFT



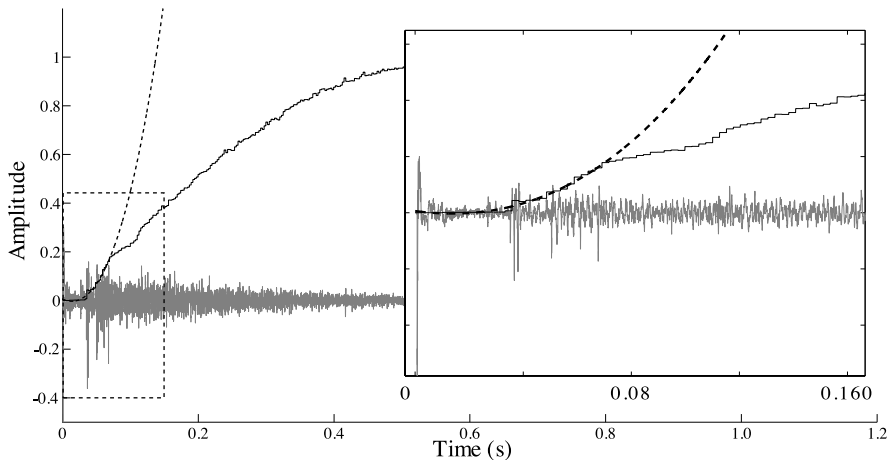
La **différence de phase** donne une idée de:

- nombre de retours reçus
- l'évolution temporelle de la corrélation du signal respectivement au son direct ($p = 1$)

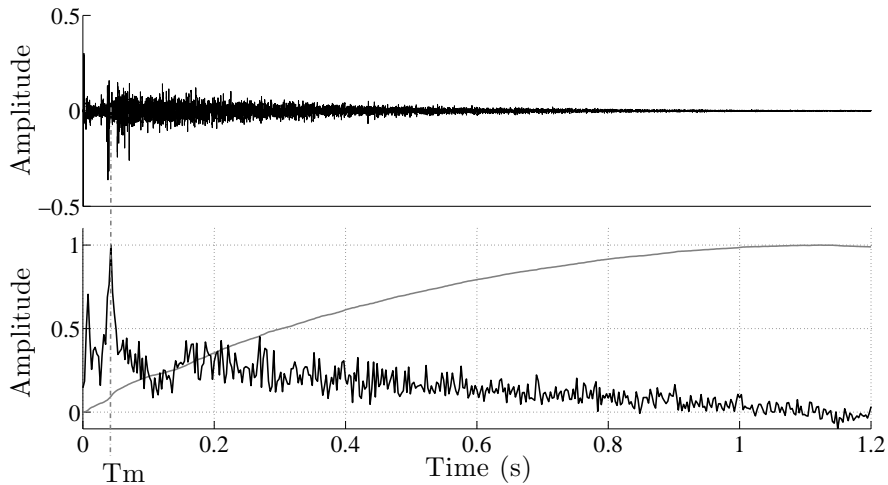
$$\delta\Phi(p) = \sum_{f=0}^{N-1} \text{unwrap} [\angle X(1, f)] - \text{unwrap} [\angle X(p, f)]. \quad (6)$$

Dans la pratique

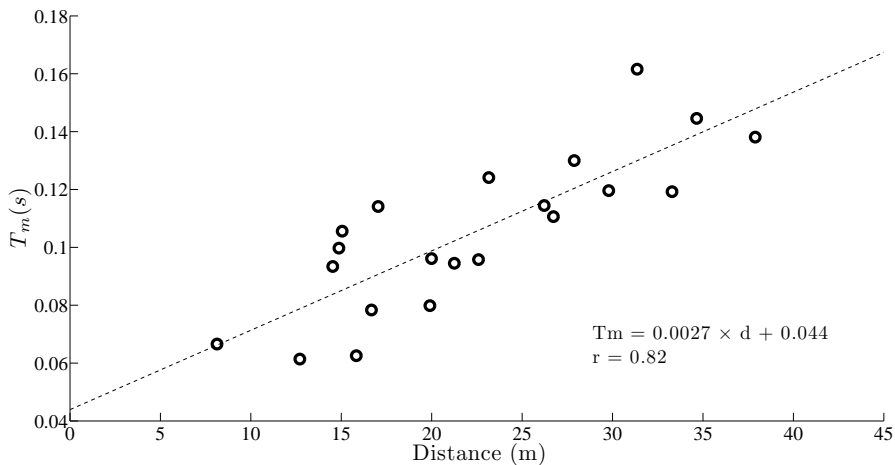
- détecter l'onset de la RI
- choisir une fenêtre d'analyse de la taille du son direct
- compenser la décroissance exponentielle de l'énergie de la RI (emploi d'une fenêtre rectangulaire)



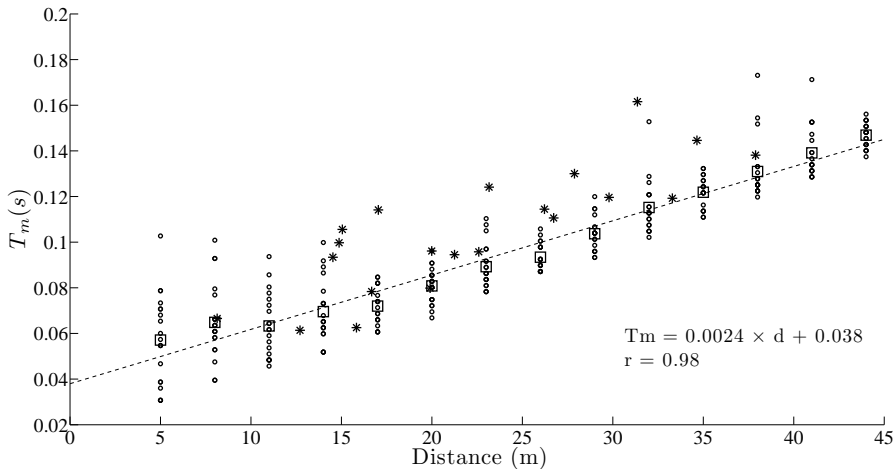
Légende —: différence de phase: —. fit en t^3 : - - -



Estimation du temps de mélange Salle Pleyel



Estimation du temps de mélange Modèle + Salle Pleyel



Légende – **o**: temps de mélange du modèle. **□**: temps de mélange moyens du modèle.
*****: temps de mélange de la Salle Pleyel.

Différences entre le modèle et la mesure

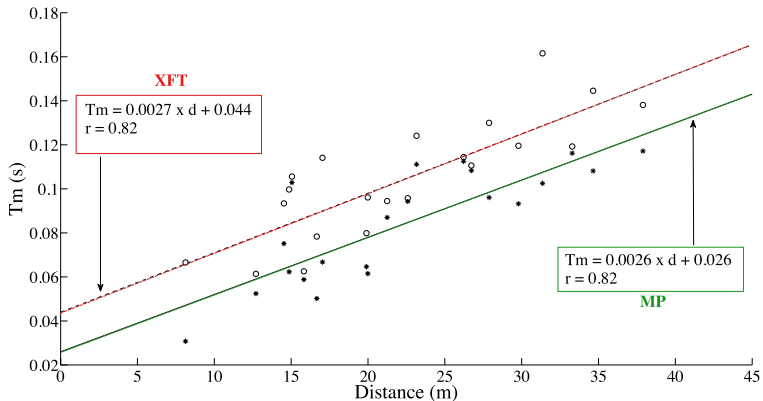
Diffusion, filtrage de la salle, nombre de sources

Paramètres importants

- Détection de l'onset
- Estimation de la durée du son direct \Rightarrow taille de la 1ère fenêtre d'analyse

Discussion des résultats & Conclusion

Comparaison XFT Vs. MP



Légende – Temps de mélange estimés dans la Salle Pleyel à l'aide de Matching Pursuit (*) et de la XFT (o).

Les temps de mélange

- théorie des systèmes dynamiques (espace des phases, suivi de trajectoires, isotropie, homogénéité)
- critère de J-D Polack (perception, 1 point dans la salle)
- ce qui précède (statistique des retours, évolution temporelle du spectre, 1 point dans la salle)

Nous n'estimons pas le temps de mélange au sens dynamique.

Proposition

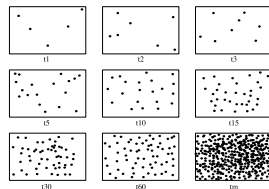
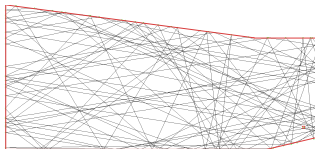
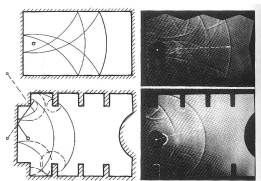
Le terme “**temps de transition**” (cross-over time) est plus adapté.
Transition vers un régime où les retours sont:

- statistiquement distribués
- moins corrélés au son direct

Perspectives

Regard sur les trajectoires...

- cuves à rides (méthode de Schlieren dans les maquettes)
- modèles numériques (tracé de rayons)
- antenne (matrice 3D) de microphones + MP



Un autre regard sur les réponses impulsionnelles.... à l'aide du traitement du signal

- **Estimation du filtrage** de la salle en un point d'observation
⇒ **estimation de la perte de mémoire** du système
- Etude de la **statistique des angles d'incidence** des rayons sonores en un point de mesure
⇒ **connaissance** approximative de la **géométrie** de la salle

Cette thèse a été financée par la Région Ile-de-France

Merci de votre attention !