



Master MVA

Effets sonores
Réverbération

Gaël RICHARD
Janvier 2016



« Licence de droits d'usage"
http://formation.enst.fr/licences/pedago_sans.htm





Effets sonores

➤ Effets

- Compression/Expansion – Limiteur
- Flanging - Phasing
- Modifications de l'échelle temporelle et fréquentielle,
 - Définition
 - La technique de la mémoire circulaire
 - PSOLA
- *Harmoniseur*
- *Le chorusing*
- *La distorsion*

➤ Réverbération artificielle

- Introduction
- Algorithmes de réverbération artificielle



Compression/Expansion – Limiteur

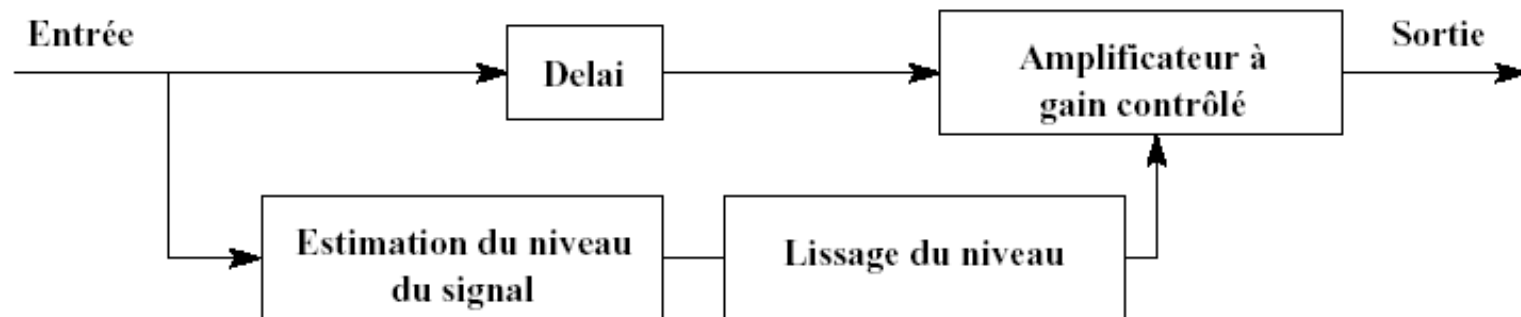
- **Utilisés depuis longtemps en analogique pour contrôler la dynamique des signaux**
 - **Dynamique des signaux:** rapport entre la puissance du signal le plus fort et celle du signal le plus faible
- **Ordres de grandeur:**
 - Dynamique d'une salle: > 100 dB
 - Dynamique d'une émission de radio FM : < 70 dB
- **Principe:**
 - Compression avant transmission
 - Expansion après transmission pour restaurer la dynamique initiale



Compression/Expansion – Limiteur

■ Principe:

- Calcul du niveau du signal en entrée.
- Actualisation des paramètres de contrôle dynamique.
- Contrôle dynamique du niveau du signal en échelle logarithmique.



Estimation du niveau du signal en entrée

- Valeur efficace: Amplitude du signal continu de même puissance

$$P_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t x^2(u) du} \qquad P_{eff} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=n-N+1}^n x_i^2}$$

- Niveau crête à crête: Amplitude maximale du signal

$$P_{crete} = \max_{n-M < i < n} |x_i|$$

- Pour une sinusoïde:

$$P_{eff} = A/\sqrt{2}$$

$$P_{crete} = A$$



Estimation du niveau du signal en entrée

■ Facteur de crête: rapport du niveau crête à crête à la valeur efficace

- Toujours plus grand que 1
- Mesure la présence de pics dans le signal
- Pour une sinusoïde: Facteur de crete= $P_{crete} / P_{eff} = \sqrt{2}$

■ Le niveau d'entrée est estimé

- en valeur efficace pour la **compression/expansion**,
- et en valeur crête à crête pour les **limiteurs**.



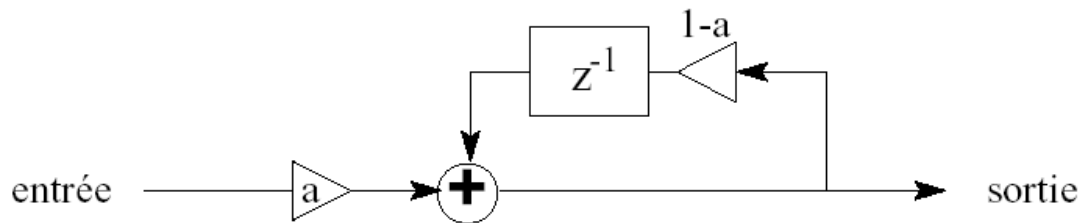
Actualisation des paramètres de contrôle dynamique

- **Lissage du niveau d'entrée pour éviter les variations trop brusques de gain d'amplification.**
- **Comportement dynamique contrôlé par 2 paramètres:**
 - **Temps de montée:** Le temps mis par le signal de gain pour atteindre le niveau réel à moins de 2dB
 - **Temps de relaxation:** Le temps mis par le signal de gain pour atteindre le niveau réel à moins de 2dB lorsque le niveau chute brutalement.



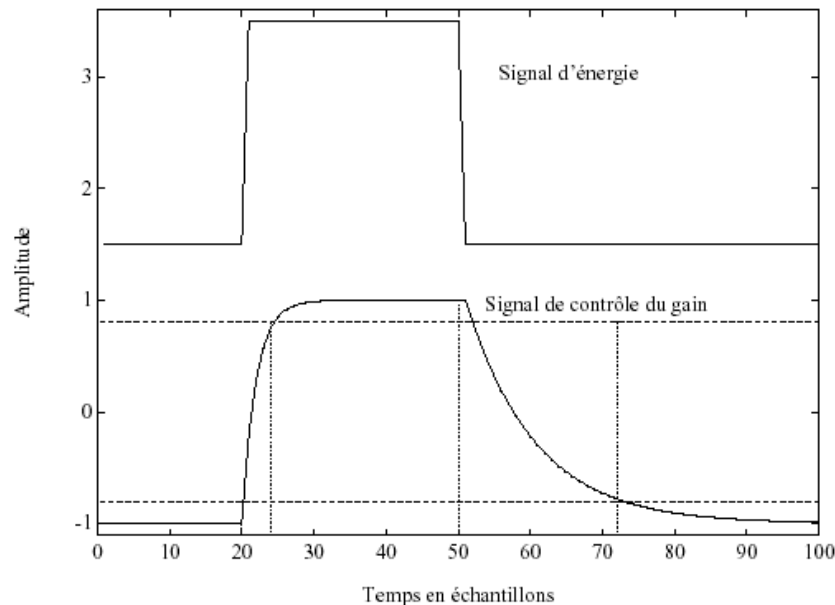
Actualisation des paramètres de contrôle dynamique

■ Implémentation passe-bas



$$H(z) = \frac{a}{1 - (1 - a)z^{-1}}$$

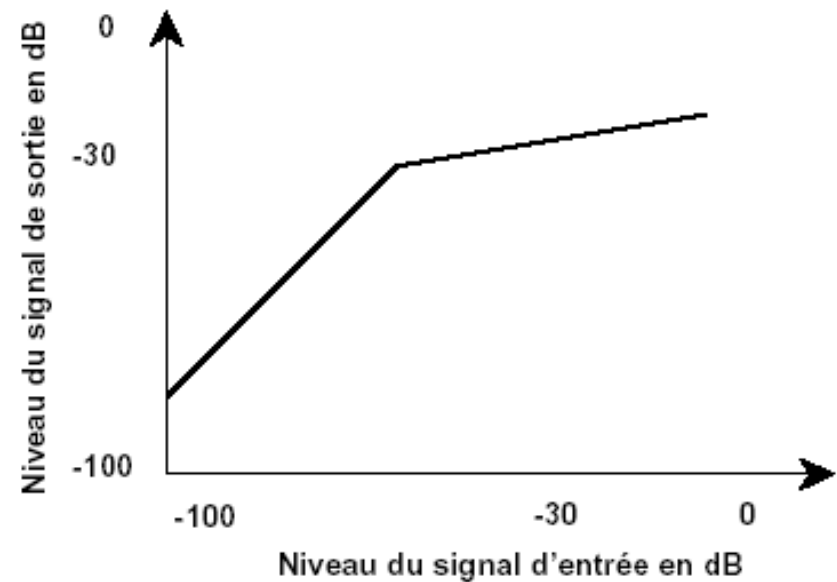
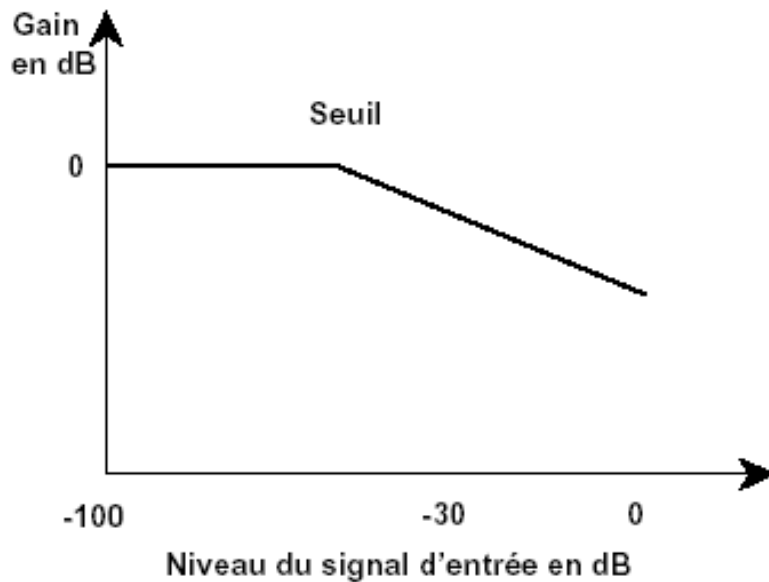
■ Exemples:



Compression de dynamique

■ La courbe de compression est caractérisée par:

- Un seuil
- Un taux de compression



Compression de dynamique

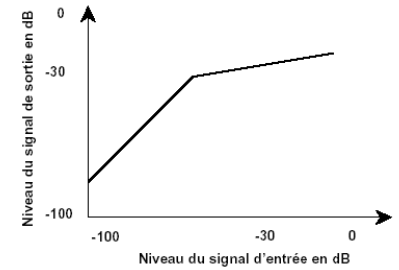
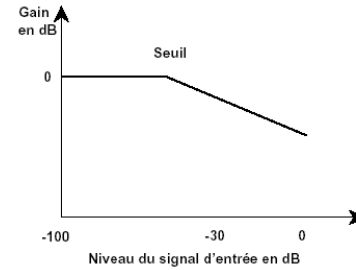
- Le gain d'amplification est donné par:

$$Y_{eff} = X_{eff} + g(X_{eff})$$

$$\text{Où } \frac{dY_{eff}}{dX_{eff}} = 1 + \frac{dg(X_{eff})}{dX_{eff}} = 1 + \alpha$$

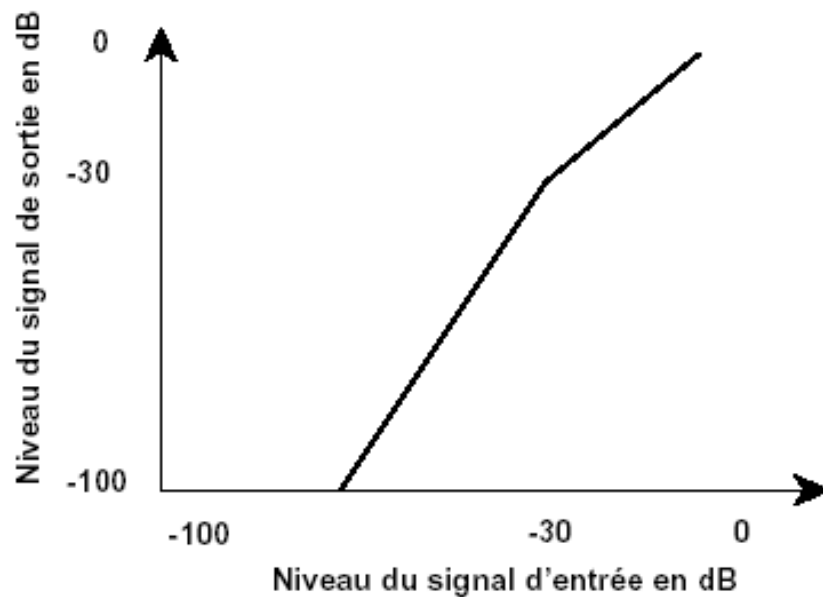
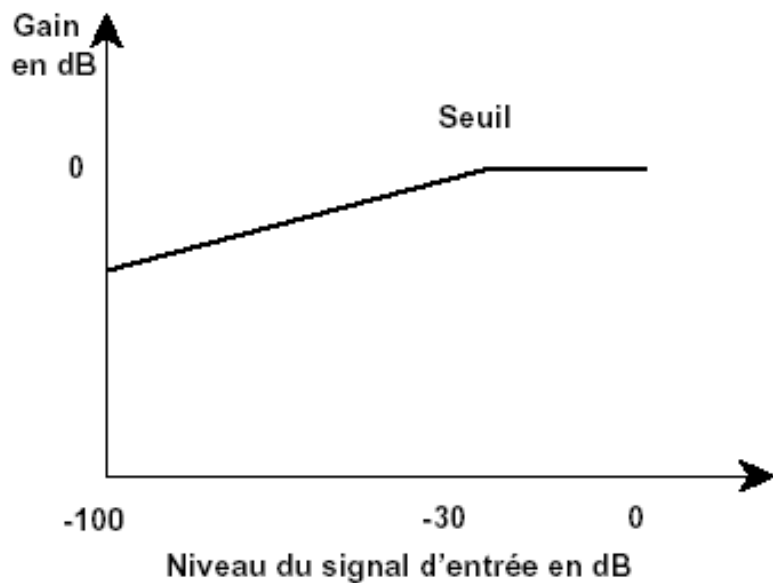
Si le gain est linéaire en X_{eff} de pente α la caractéristique entrée/sortie est aussi linéaire avec une pente égale à $1 + \alpha$

En pratique: rapports de 2:1 à 10:1



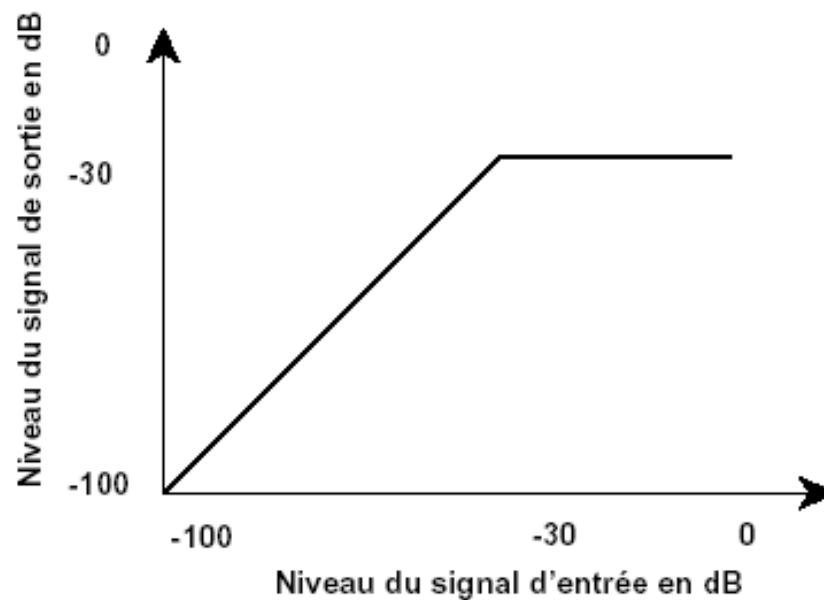
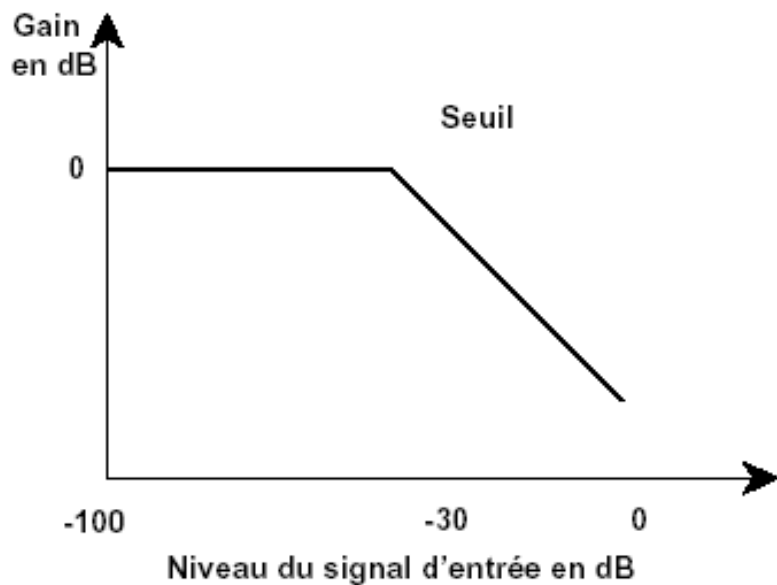
Expansion dynamique

■ Courbes d'expansion



Limiteur

■ Courbes de limitation



Utilisation

- Réduction du bruit de fond:
 - Dolby B, C...sont basées sur une compression/expansion réversible
- Enregistrement d'un signal à grande dynamique (CD) sur un support traditionnel (cassette)
- Compression à fort taux utilisée pour l'effet « sustain » fort apprécié des guitaristes...
- Compresseurs largement utilisés par certaines radios...qui émettent à niveau fort constant...
- Limiteurs utilisés en protection et pour éviter la saturation (plus néfaste au signal que l'effet du limiteur!!)



Flanging / Phasing

■ Origine:

- Provient de l'origine analogique
- Utilisation du pouce sur les plateaux de 2 platines jouant simultanément le même morceau.
- **Effet du pouce** : ralentissement d'un morceau par rapport à l'autre qui se retrouvaient tantôt synchronisés, tantôt légèrement déphasés.

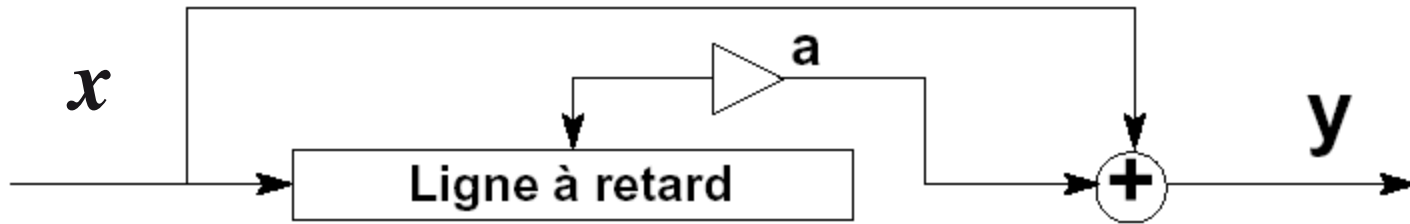
■ Interprétation:

- les signaux arrivant des deux platines sont retardés d'un délai qui varie au cours du temps.
- Lorsque ces signaux sont ajoutés, certaines composantes sinusoïdales sont annulées car elles se retrouvent en opposition de phase.
- Le flanging introduit des trous équirépartis en fréquence dans le spectre et leur position varie en fonction du temps



Flanging / Phasing

■ Implémentation



□ Fonction de transfert

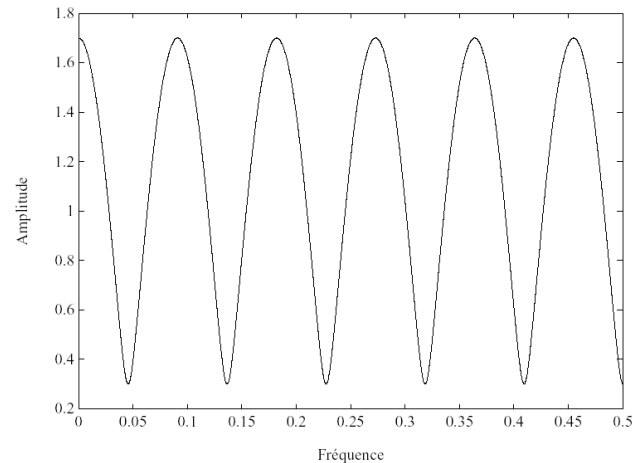
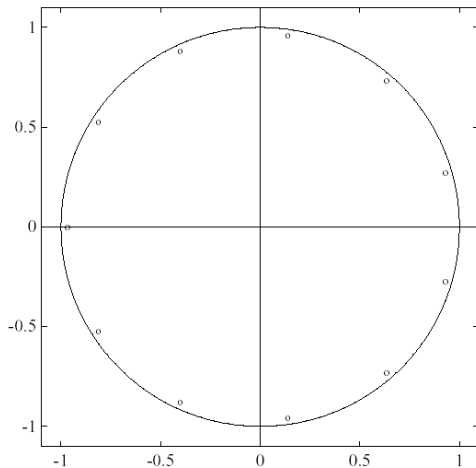
$$H(z) = 1 + a z^{-p} \quad |H(e^{j\omega})| = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cos(p\omega)}$$

□ p minima aux multiples impairs de $F_e/2p$



Flanging / Phasing

■ Fonction de transfert du système figé



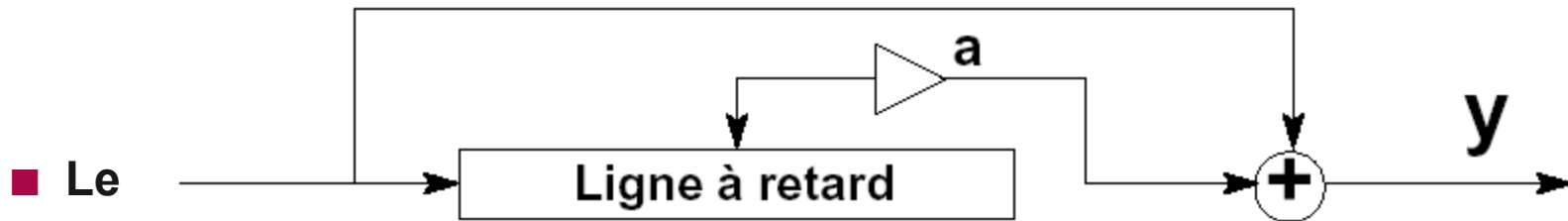
- Cette fonction de transfert a un sens pourvu que la variation du retard p est lente dans le temps....
- Réglage de la profondeur de l'effet: paramètre a

$$R_{dB} = 20 (\log_{10}(1 + a) - \log_{10}(1 - a))$$



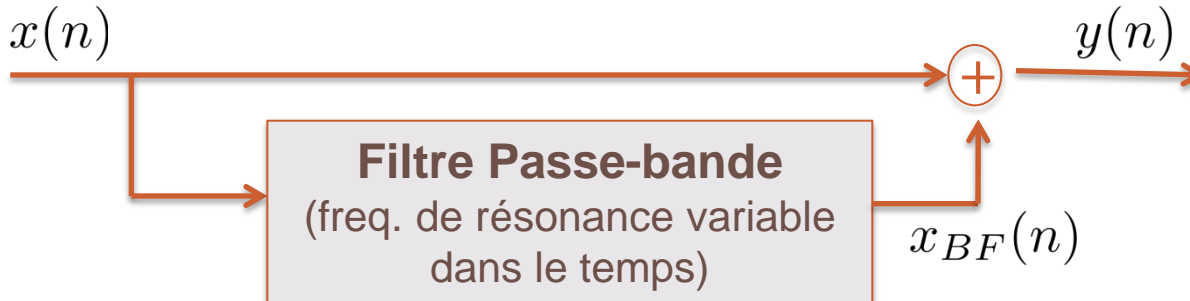
Phasing

- Le phasing est basé sur l'utilisation d'un filtre en peigne variant au cours du temps, mais ici c'est le gain a de la boucle qui est variable



Effet “Wha-wha”

- Effet “Wha-wha”: on remplace le délai (e.g. notch filter) par un filtre passe-bande variant dans le temps:



- Implémentation possible à l'aide de filtres à variables d'état

- Démonstration:

Original



Wah-wah (modulation de la réquence de résonance par fonction en triangle entre 500 et 3000Hz)



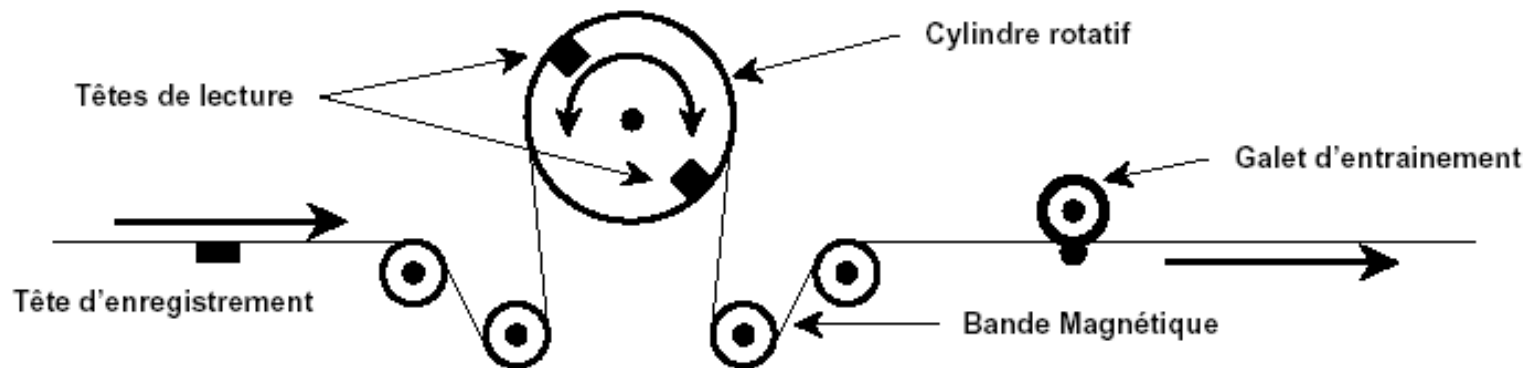
Modifications de l'échelle temporelle et fréquentielle

- **Modification de l'échelle temporelle: modifier la durée sans en modifier le contenu fréquentiel**
- **Modification de l'échelle fréquentielle: modifier la hauteur tonale sans en modifier la durée**
 - Changement de hauteur sans modification des principales résonances (ou formants pour la parole)
 - Changement de hauteur « simple »
- **De nombreuses méthodes existent**
 - TD-Psola, Vocodeur de phase
 - Méthodes spécifiques audio



Technique de la mémoire circulaire

■ L'origine analogique

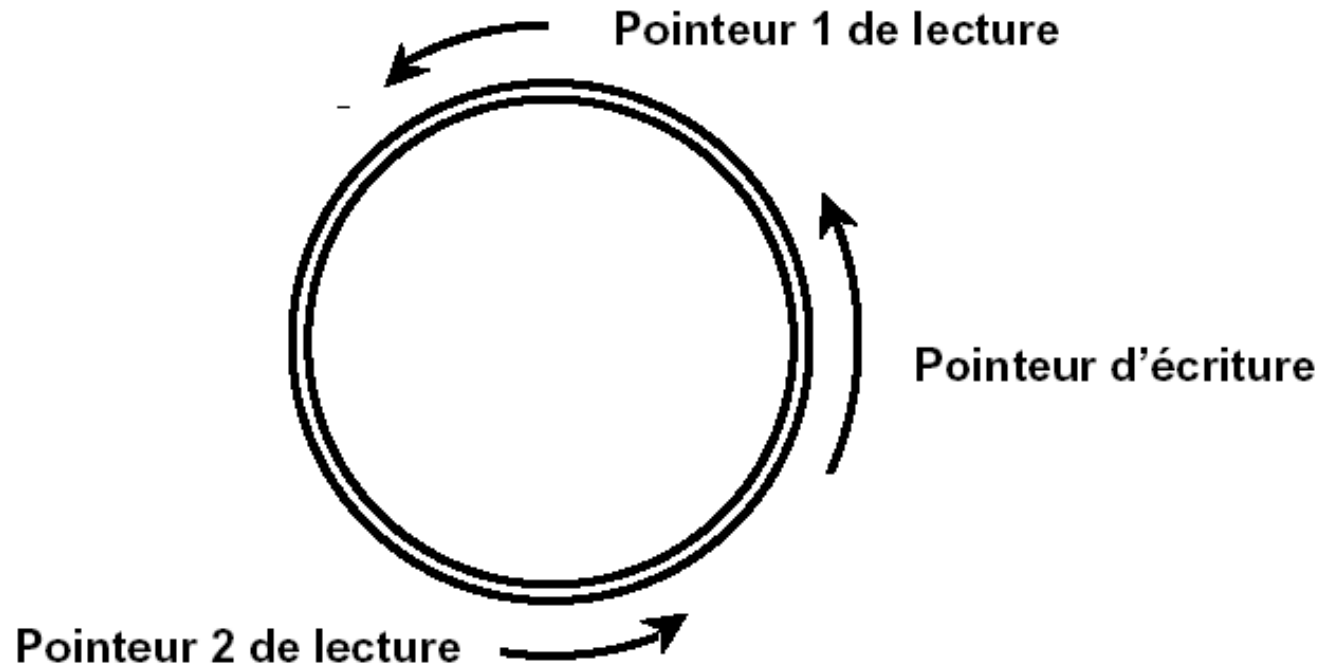


$$\alpha = \frac{V_r}{V_a} = \frac{V_a + R \Omega_{cylindre}}{V_a}$$



Technique de la mémoire circulaire

■ Implémentation numérique



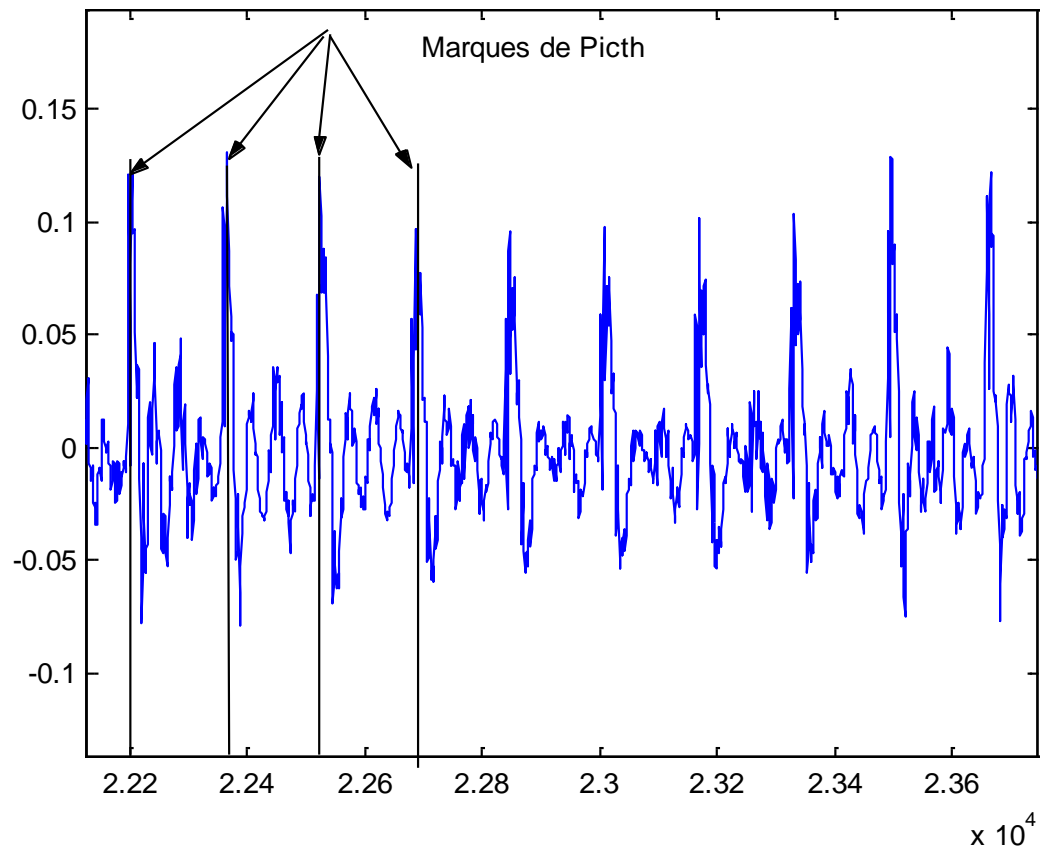
Technique de la mémoire circulaire

■ Modification de la durée

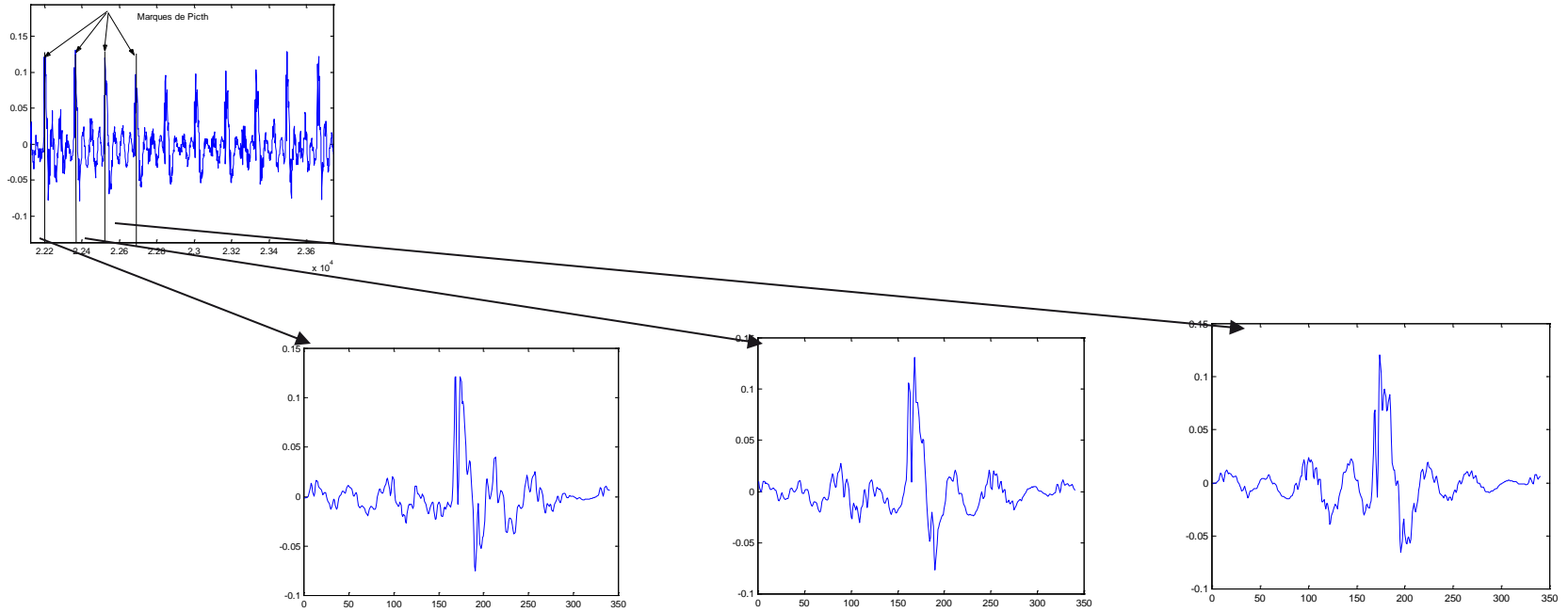
- Changer la fréquence d'échantillonnage d'un facteur α
- Changer la hauteur à l'aide de la technique de la mémoire circulaire
- Les deux opérations peuvent être faites en une seule fois et on se rapproche alors de la technique TD-PSOLA



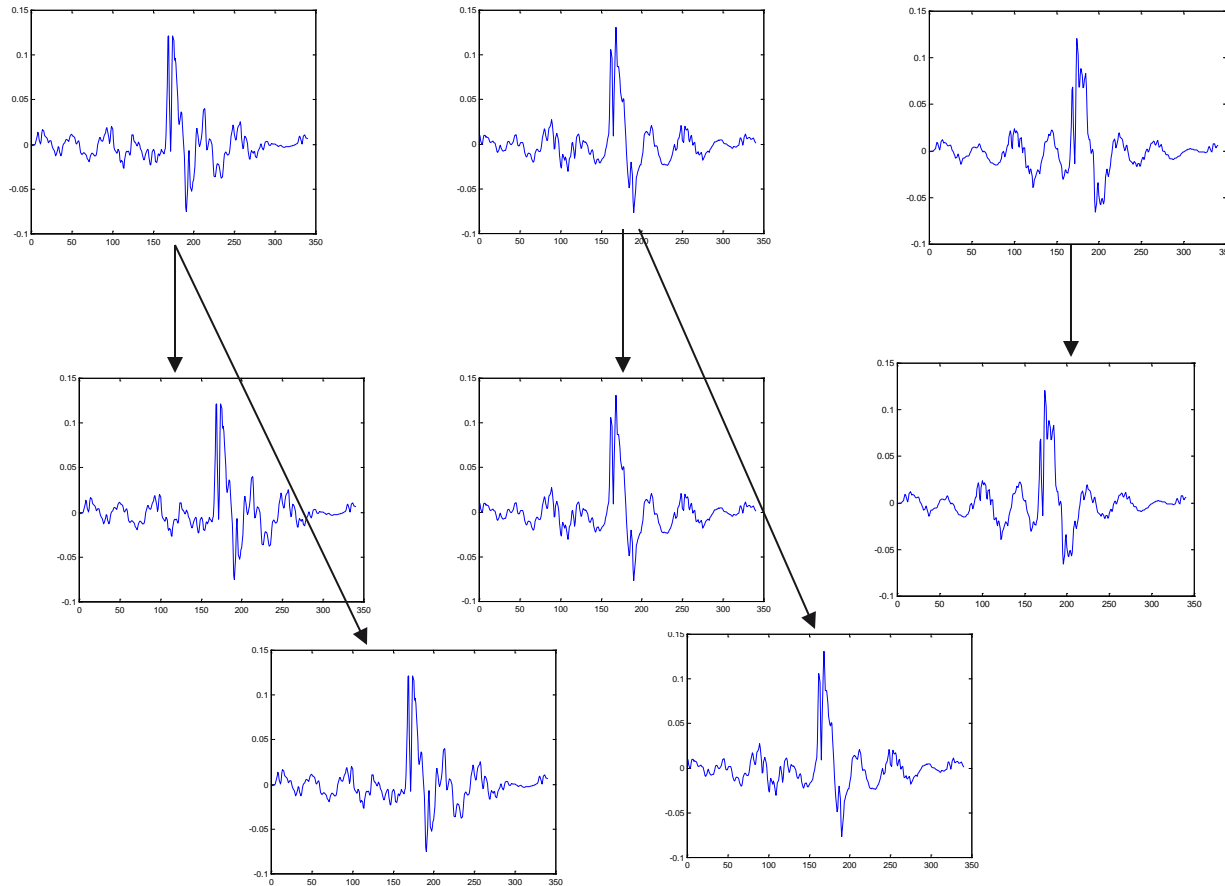
TD-PSOLA: Lissage et modifications



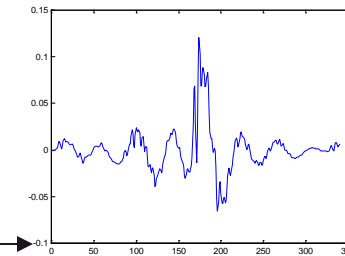
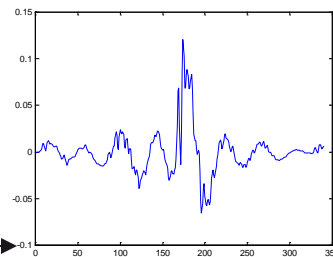
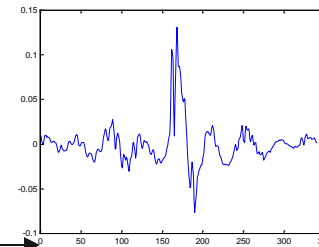
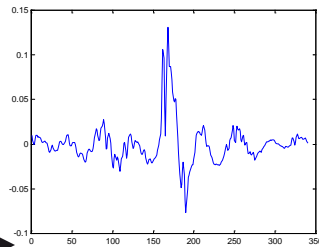
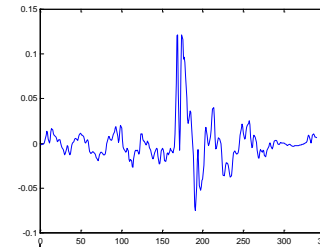
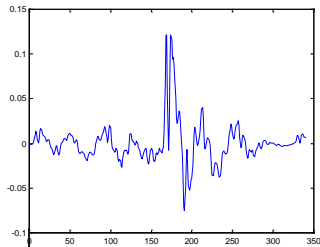
Signaux à court-terme



Modification de durée



Modification de fréquence fondamentale



Synthèse

■ Extraction des formes d'onde synchrones de la fréquence fondamentale

- Fenêtre d'analyse calée sur 2 périodes du signal analysé pour les parties pseudo-périodiques
- Fenêtre d'analyse de longueur fixe (env. 10ms) pour les parties plus complexes (nombreuses notes ou bruit)

■ Synthèse par addition / recouvrement de formes d'onde

- Insertion / Suppression de signaux à court-terme pour modifier la durée
- Modification de l'espacement des signaux à court-terme pour modifier la hauteur tonale

■ Exemple sonore



fautail_haut.wav



La distorsion

- En général, la distorsion est un effet indésirable.....
- Mais peut être aussi un effet recherché (notamment par les guitaristes....)
- Elle est obtenue en faisant circuler le signal à travers une fonction non-linéaire



La distorsion

- On peut montrer que la distorsion fait apparaître dans le spectre des composantes qui n'y figuraient pas originellement:

- Soit le développement de la fonction non-linéaire:

$$f(u) = f(0) + uf'(0) + \frac{u^2 f''(0)}{2!} + \frac{u^3 f'''(0)}{3!} + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{u^i}{i!} \frac{d^i f}{du^i}$$

- Le signal $x_n = \sum_{i=-p}^p e^{j\omega_i n}$ passé à travers la fonction f apparaît comme une somme pondérée de ses puissances entières:

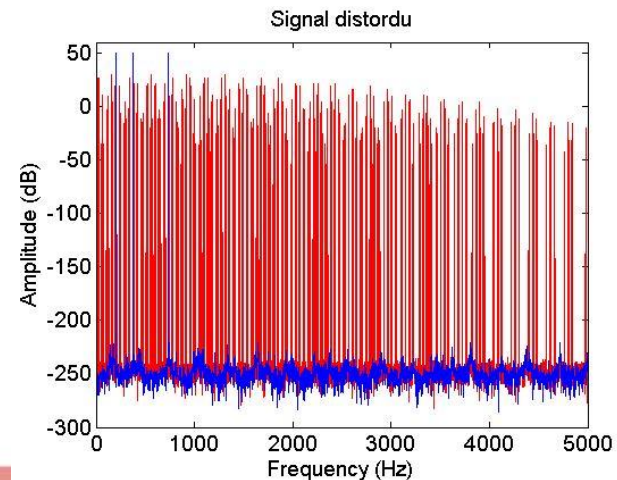
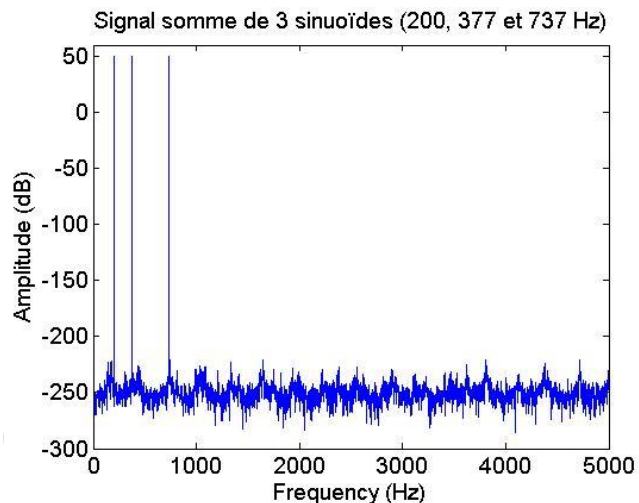
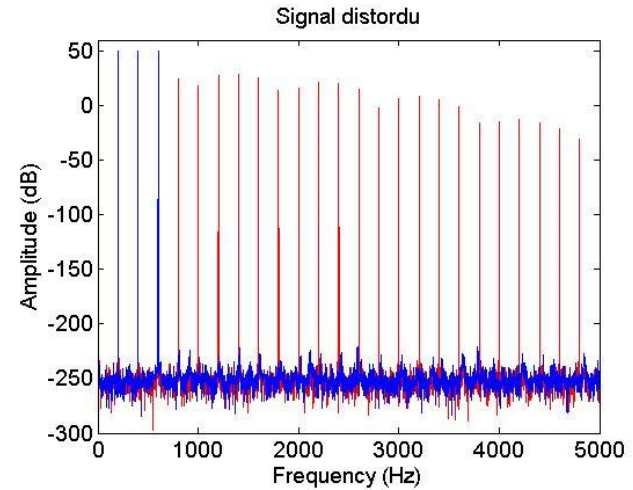
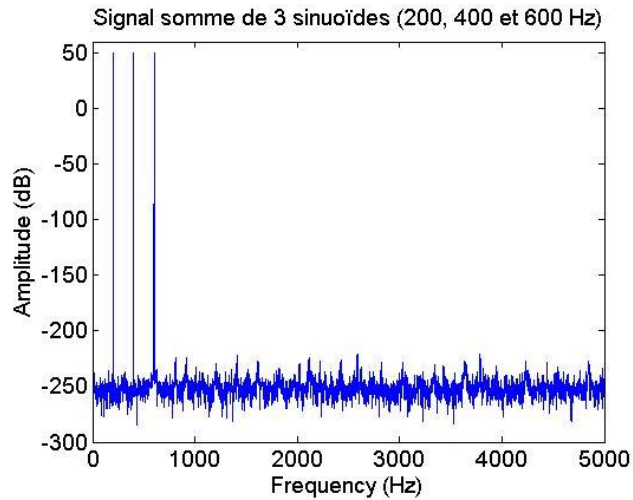
$$y_n = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i (x_n)^i$$

$$(x_n)^i = \sum_{-p \leq j(k) \leq p} e^{j(\omega_{j(0)} + \omega_{j(1)} + \dots + \omega_{j(i-1)})}$$



Exemples

- Fonction non linéaire: $f(x) = x^9$ avec $x = \sum_{i=1}^3 A_i \sin(2\pi f_i t)$





La réverbération artificielle



La réverbération

■ Introduction : Le canal acoustique

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(t - u)h(u)du$$

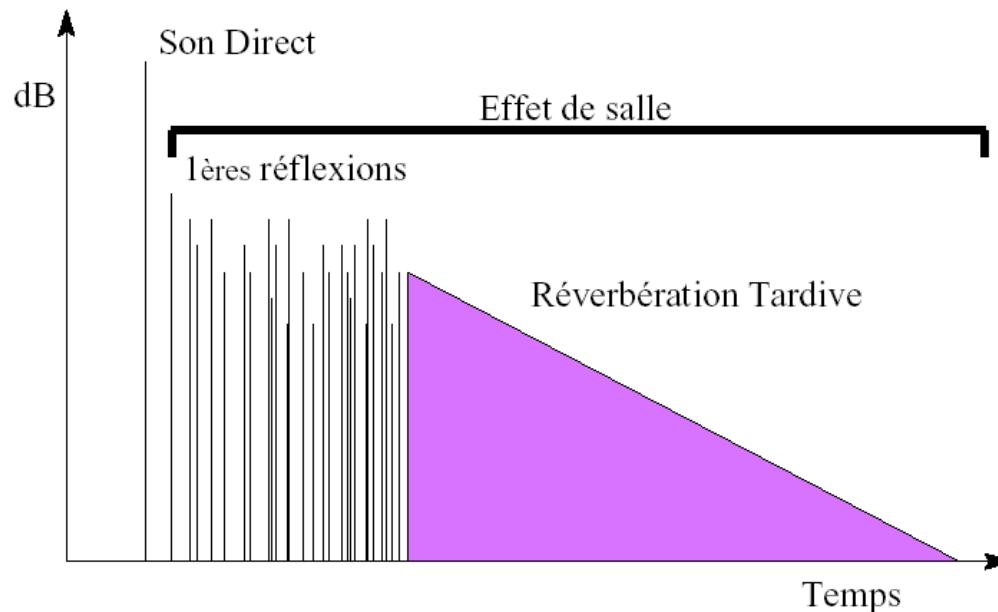
$$y_n = \sum_{i=0}^{\infty} x_{n-i}h_i$$



La réverbération

■ L 'effet de salle peut être décomposé en :

- une contribution due aux **premiers échos** ou réflexions précoces (qui dépendent de la géométrie de la salle et de la position de la source et du récepteur)
- une contribution due à la **réverbération tardive** (principalement fonction du volume et de l 'absorption globale de la salle)



La réverbération

■ Approches pour la réverbération:

• Approche physique

- vise à simuler exactement la propagation du son d'une source vers l'auditeur dans une pièce donnée
- Avantage: relation directe entre la spécification physique de la salle et l'effet de réverbération résultant
- Inconvénient: Approche relativement complexe (longueur des réponses impulsionnelles)

• Approche « perceptive »

- vise à reproduire uniquement les caractéristiques perceptuelles importantes de la réverbération



La réverbération

■ Avantages de l'approche perceptive:

- Algorithme de réverbération peu coûteux (implémentation à l'aide de filtres RII)
- Possibilités de définir des paramètres perceptifs pertinents qui pourront être contrôlés en temps-réel.
- Idéalement, un unique algorithme pourrait simuler tout espace
- Des espaces peuvent être très bien simulés à l'aide des approches perceptives

■ Inconvénients: il n'est pas facile de changer les propriétés physiques d'une pièce simulée....



La réverbération tardive

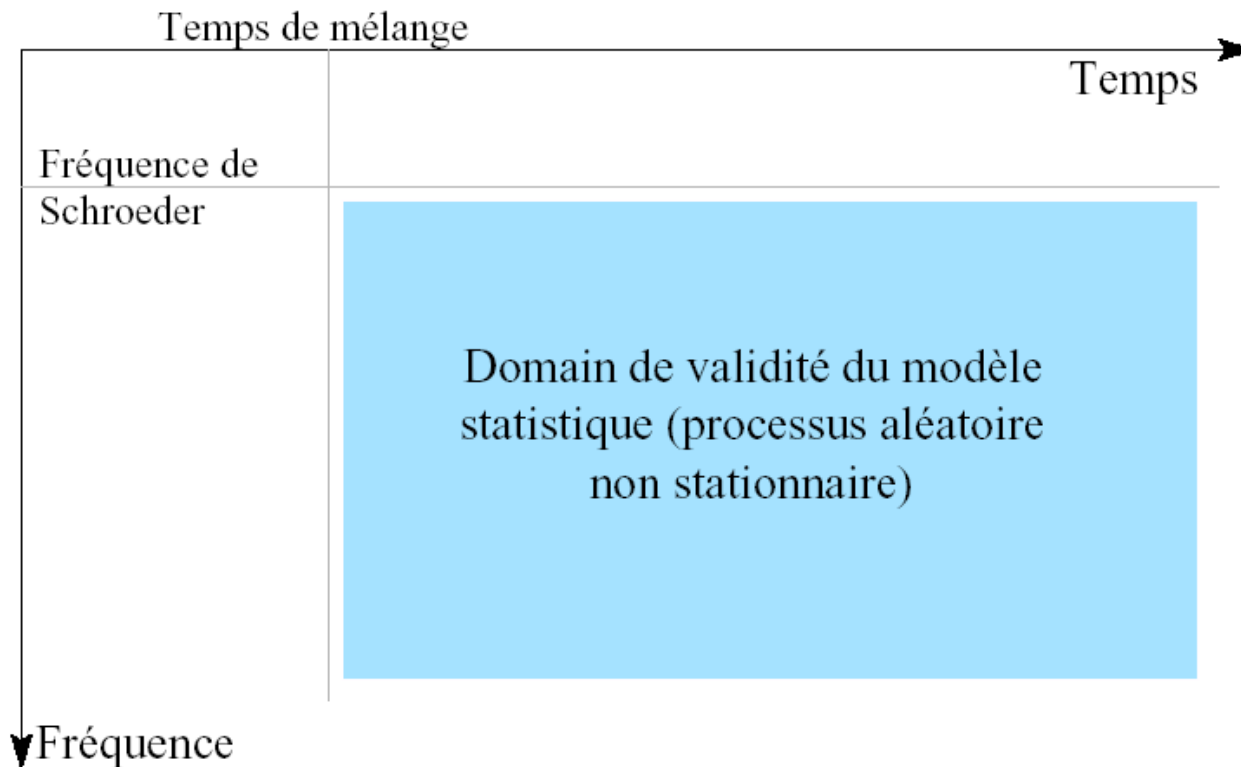
- Caractérisée par une grande densité d'échos par unités de temps (> 1000 par secondes dans une grande salle)
- Peut être modélisée sous la forme d'un processus aléatoire gaussien décroissant exponentiellement
- De même, la réponse en fréquence est caractérisée par une grande densité de modes (du moins au delà d'une certaine fréquence appelée fréquence de Schroeder)

- $$F_s = 2\sqrt{\frac{Tr}{V}}$$
 (Tr in seconds, V in m^3 , F_s in kHz)



La réverbération tardive

- Validité du modèle statistique en fonction du temps de mélange (\sqrt{V}) et de la fréquence de Schroeder



Algorithmes de réverbération artificielle

■ Utilisés soit:

- pour ajouter un effet de salle aux enregistrements effectués en studio
- pour modifier les propriétés acoustiques d'une salle d'écoute

■ Les premiers systèmes utilisaient des procédés analogiques:

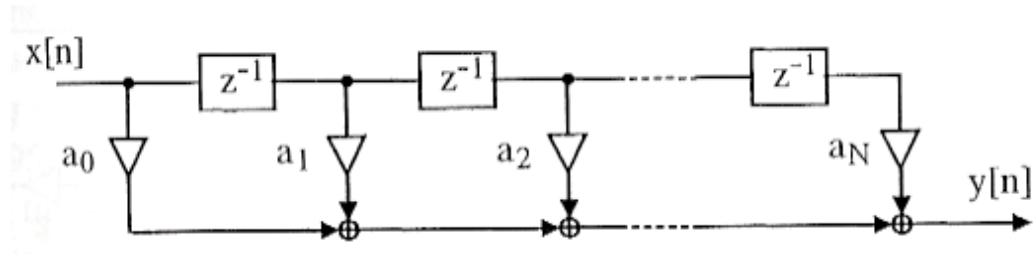
- Réseaux de ressorts, plaques métalliques, ...

■ Premiers systèmes numériques dès les années 60!!

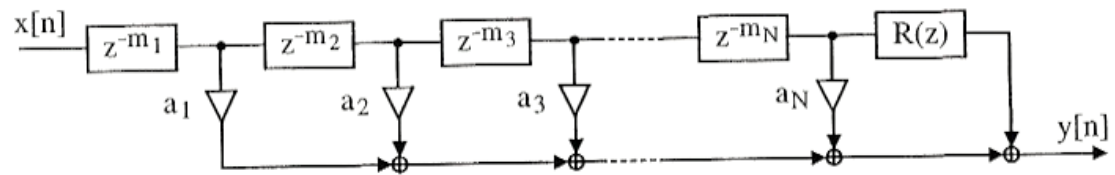


Modélisation des premiers échos

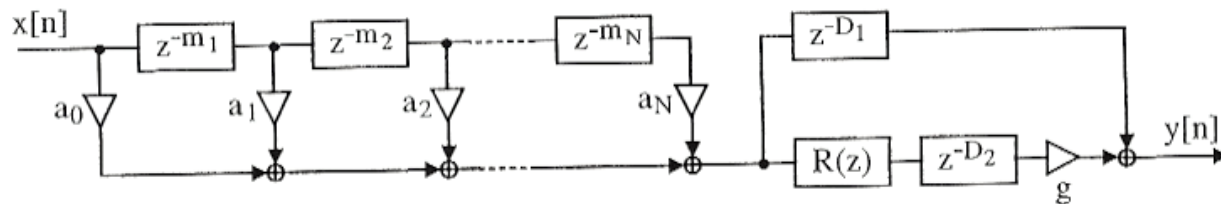
■ Modèle simple



■ Schroeder (1970)

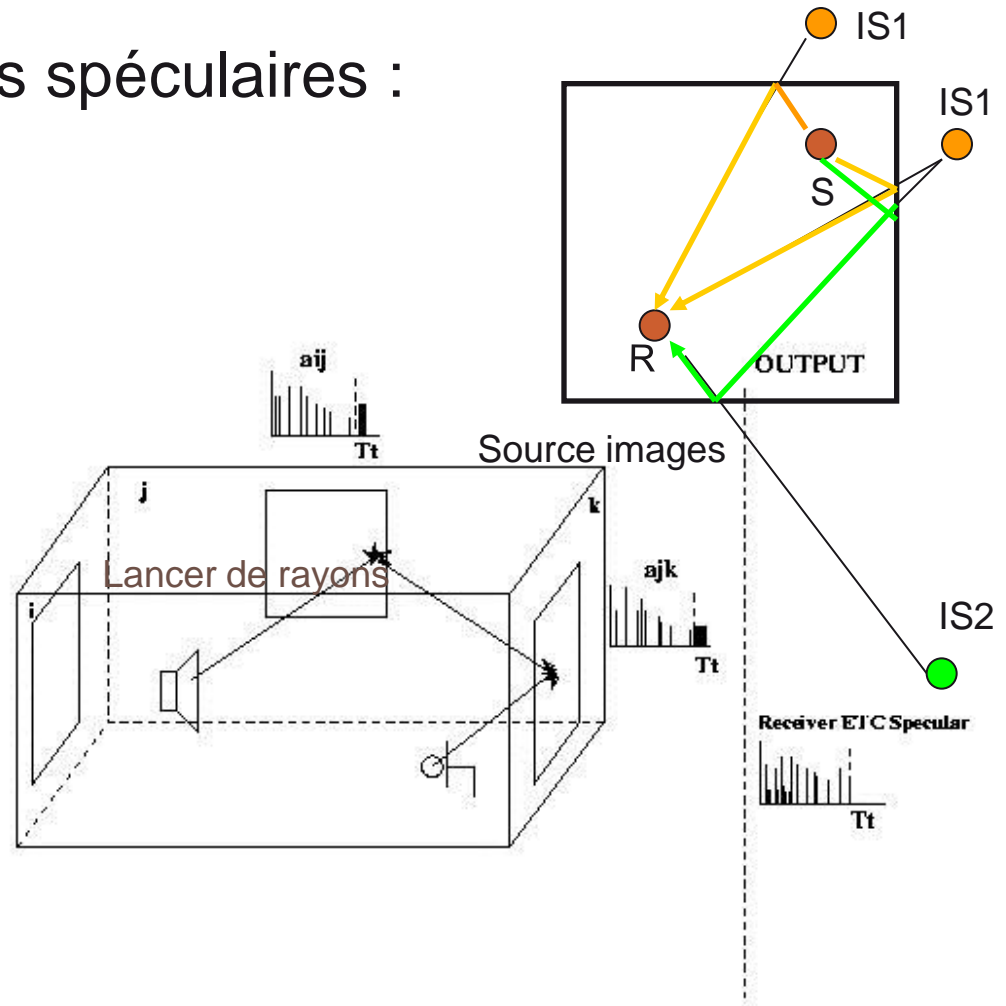


■ Moorer (1979)

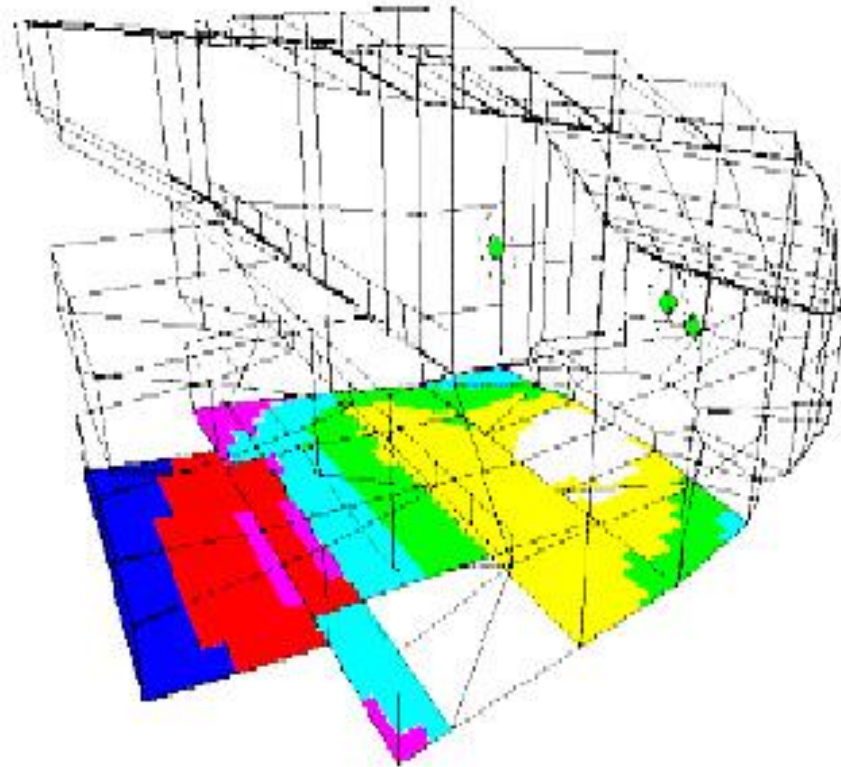


Les premiers échos

- Simulations des réflexions spéculaires :
 - Lancer de rayons
 - Lancer de cônes
 - Source image



Application à des salles de géométrie quelconque



Réverbération tardive

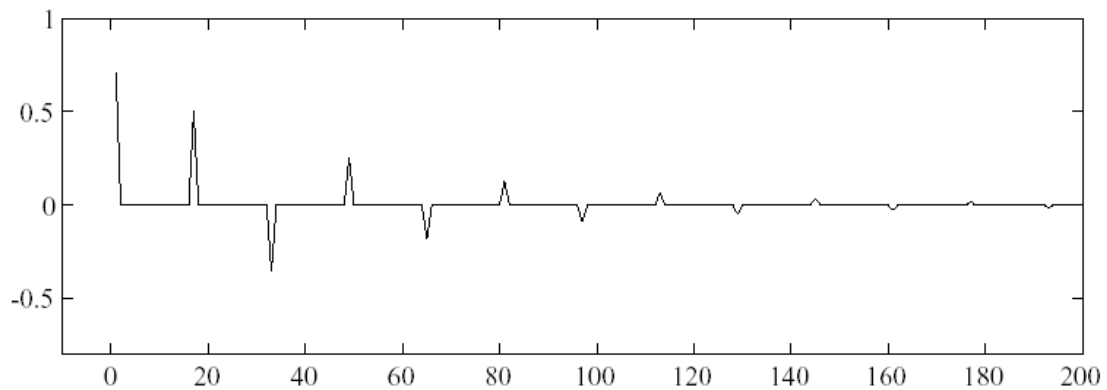
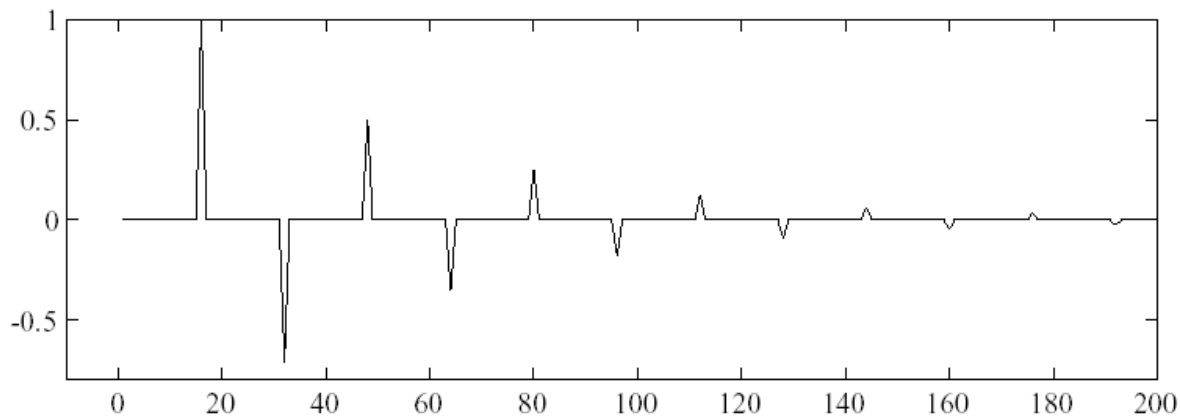
■ Les difficultés pour la réalisation de filtres réverbérants sont de 3 natures:

- Obtenir simultanément une densité modale et une densités d'échos suffisantes
- Eviter l'apparition d'une sonorité peu naturelle dans le signal de sortie (notamment éviter le coté métallique)
- Contrôler indépendamment le temps de réverbération et l'énergie réverbérée en fonction de la fréquence

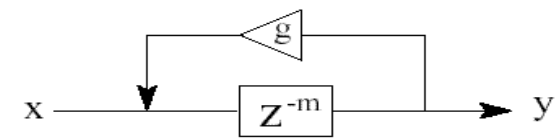


Réverbération

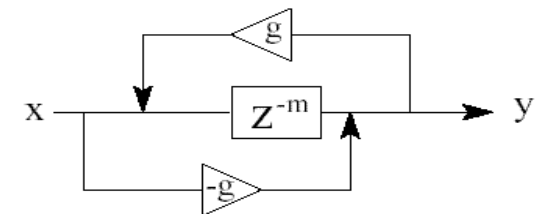
■ Filtrés en peigne ($m=16, g=0.707$)



$$C(z) = \frac{z^{-m}}{1 - gz^{-m}}$$



$$A(z) = \frac{-g + z^{-m}}{1 - gz^{-m}}$$



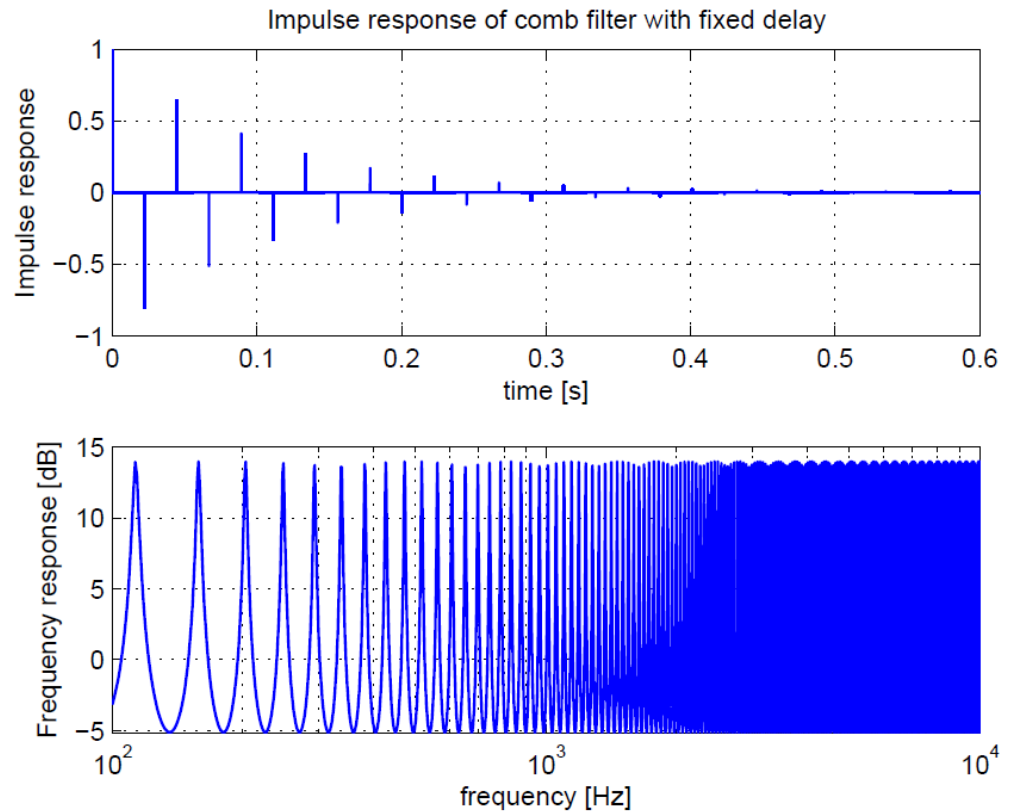
Réverbération

- **Filtre en peigne imprime au signal traité une coloration harmonique**

- résonances aux fréquences :

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{m}$$

- Filtre passe-tout apporte aussi une coloration lorsque le signal n'est pas stationnaire (ce qui est le cas des signaux audio!!)

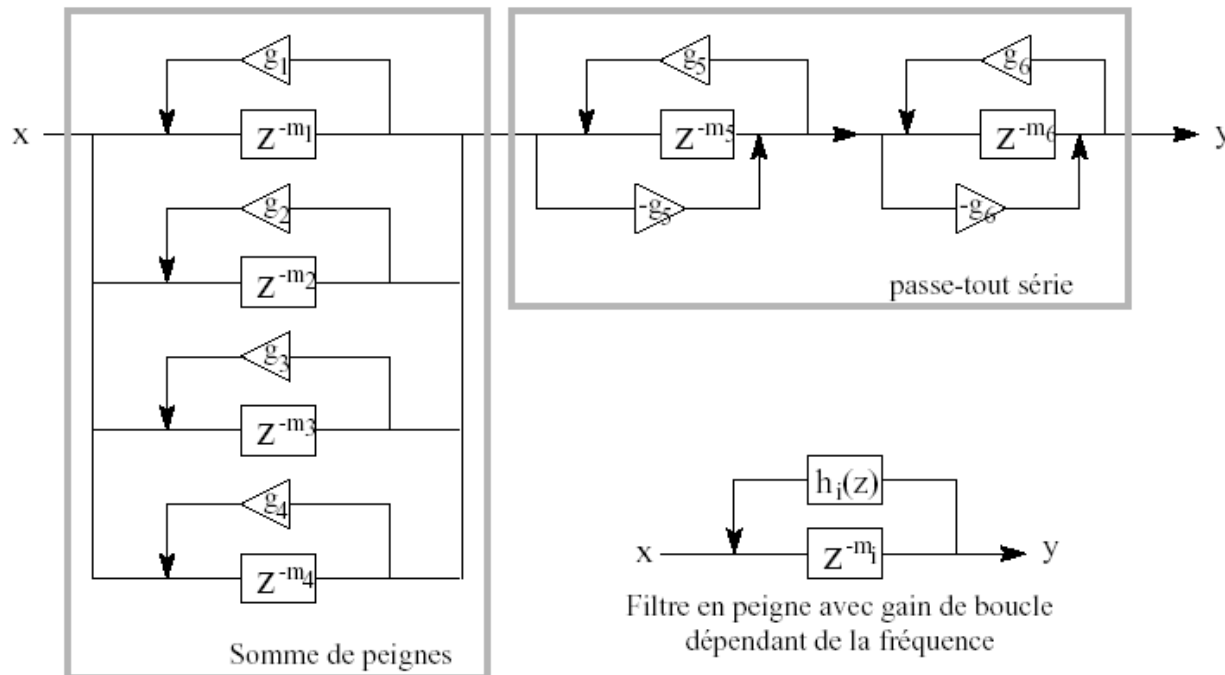


- **Mais l'inconvénient majeur est la faible densité d'échos générés**



Réverbérateur de Schroeder

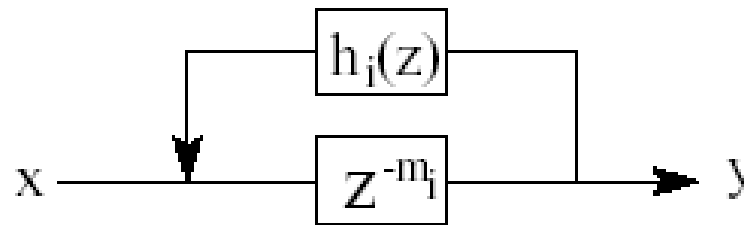
- Pour éliminer la coloration, Schroeder a proposé de combiner les filtres passe-tout et les filtres en peigne:



Réverbérateur de Schroeder

■ Améliorations:

- Simulation d'un temps de réverbération dépendant de la fréquence (absorption dans l'air)



Filtre en peigne avec gain de boucle dépendant de la fréquence



Réverbérateur de Schroeder

■ Exemple



Guitare.wav

- $Tr=0.1$ s (petite salle)



Schroeder_Tr.1.wav

- $Tr=0.5$ s (grande salle)



Schroeder_Tr.5.wav

- $Tr=2$ s (cathédrale)

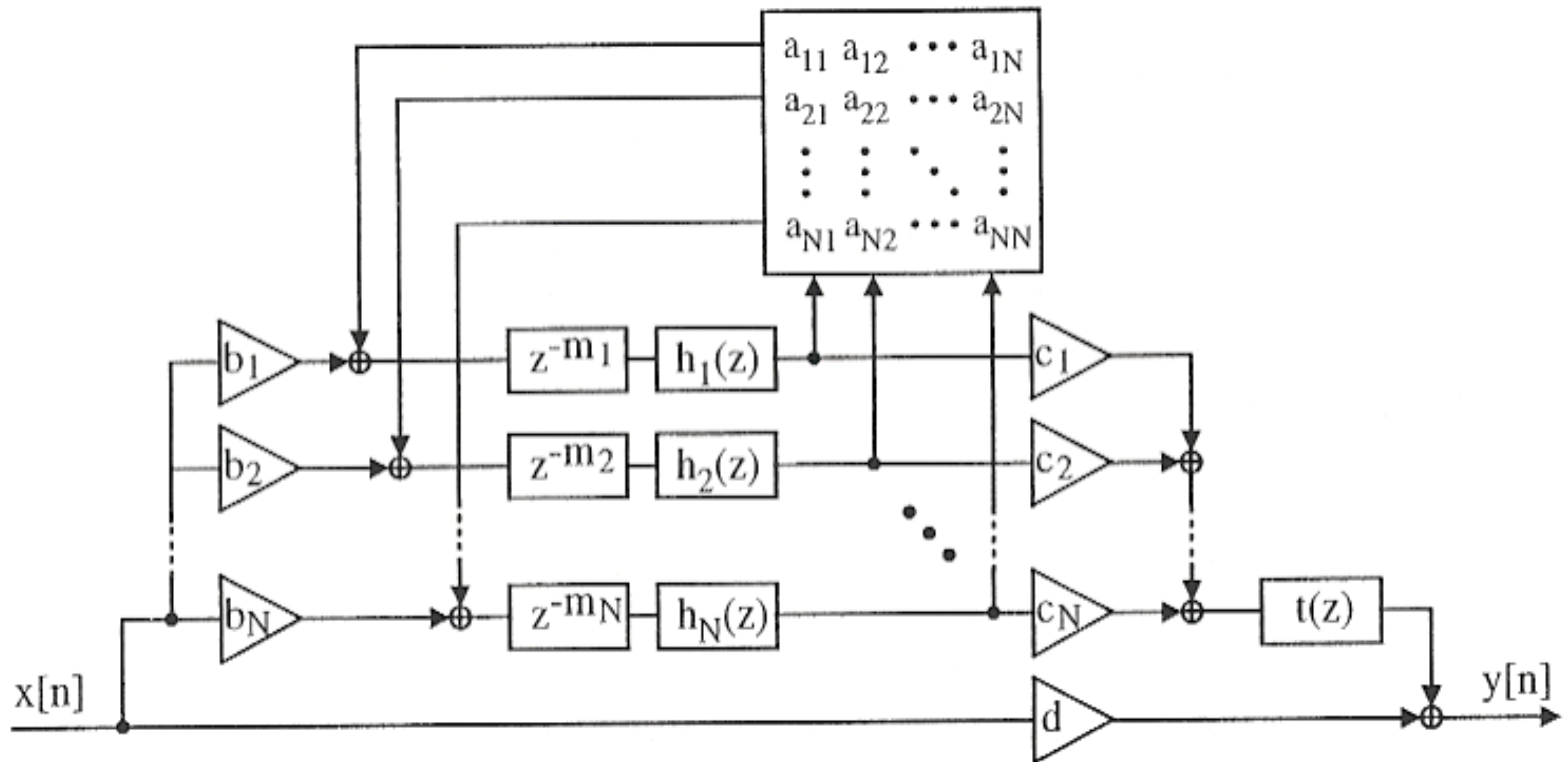


Schroeder_Tr2.wav



Filtres réverbérants à bouclage unitaire

■ Généralisation (*Jot et Chaigne*)



Une approche alternative (physique): Radiance Transfer Method (RTM) *(From H. Bai PhD thesis)*

■ Analytical acoustic radiance transfer model

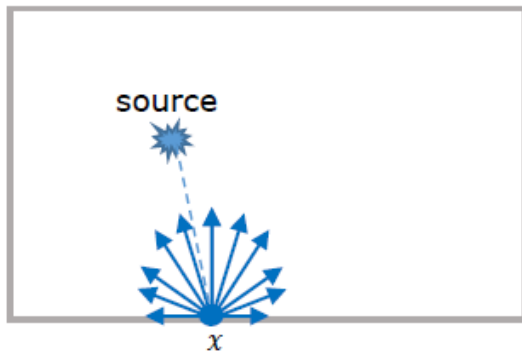
$$I(x, t) = I_0(x, t) + \int_S R(x, x', t) I(x', t - \frac{|x - x'|}{c}) dx'$$



Une approche alternative (physique): Radiance Transfer Method (RTM)

■ Analytical acoustic radiance transfer model

$$I(x, t) = I_0(x, t) + \int_S R(x, x', t) I(x', t - \frac{|x - x'|}{c}) dx'$$



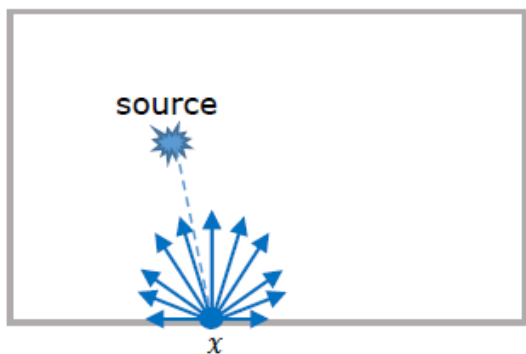
(a) Direct contribution



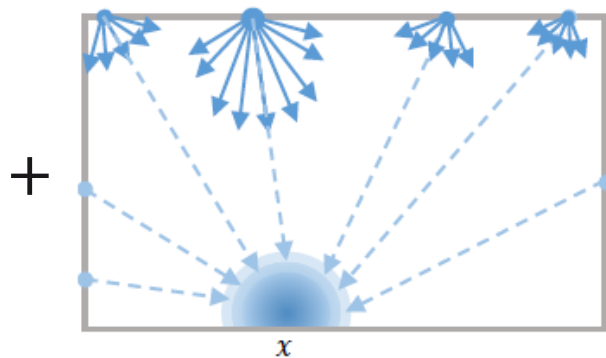
Une approche alternative (physique): Radiance Transfer Method (RTM)

■ Analytical acoustic radiance transfer model

$$I(x, t) = I_0(x, t) + \int_S R(x, x', t) I(x', t - \frac{|x - x'|}{c}) dx'$$



(a) Direct contribution



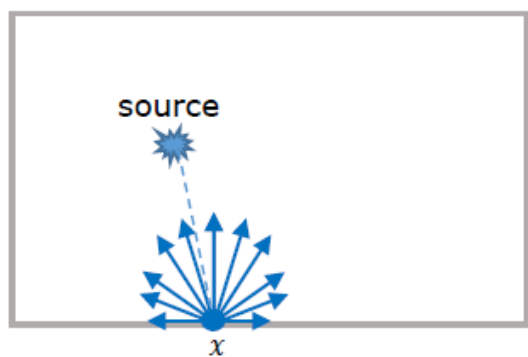
(b) Indirect contribution



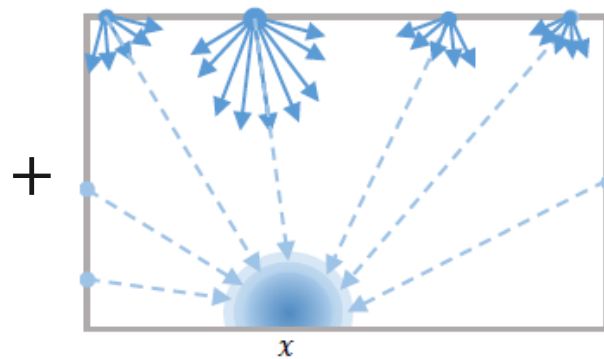
Une approche alternative (physique): Radiance Transfer Method (RTM)

■ Analytical acoustic radiance transfer model

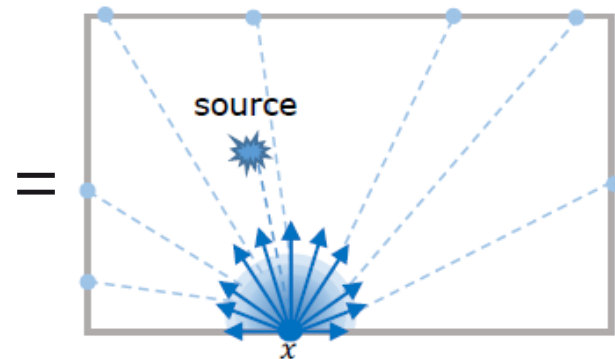
$$I(x, t) = I_0(x, t) + \int_S R(x, x', t) I(x', t - \frac{|x - x'|}{c}) dx'$$



(a) Direct contribution



(b) Indirect contribution



(c) Total radiance

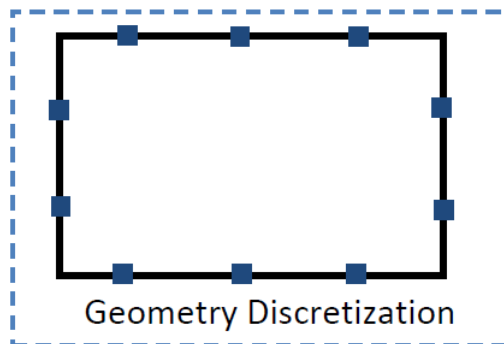
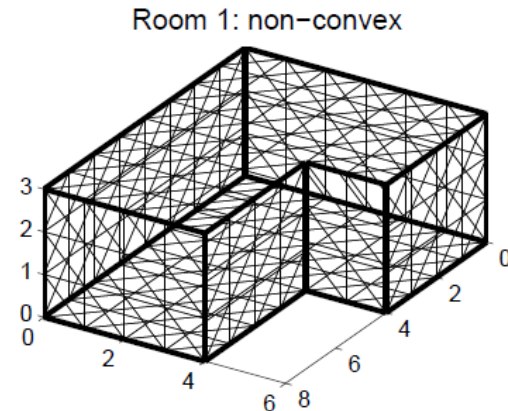


Radiance Transfer Method: Simulation numérique

■ Discrétisation de la salle

- La pièce est divisé en patches
- Expression itérative

$$I_i^{(n)}(t) = I_i^{(n-1)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^M F_{i,j}^{(1)} I_j^{(n-1)}\left(t - \frac{r_{i,j}}{c}\right)$$



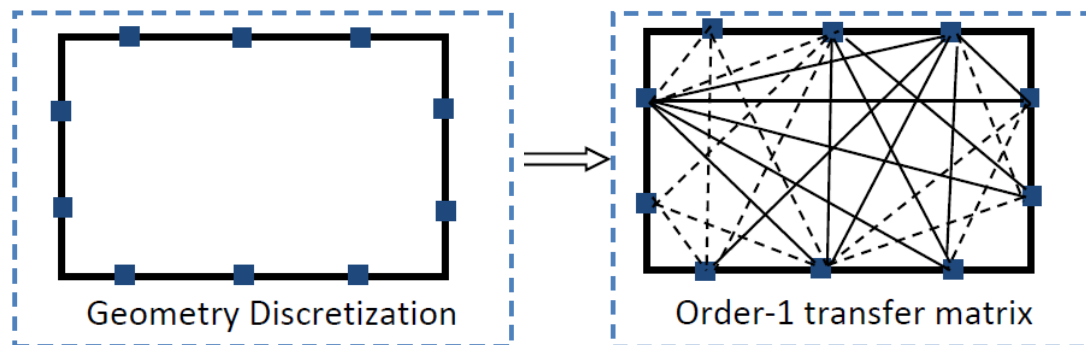
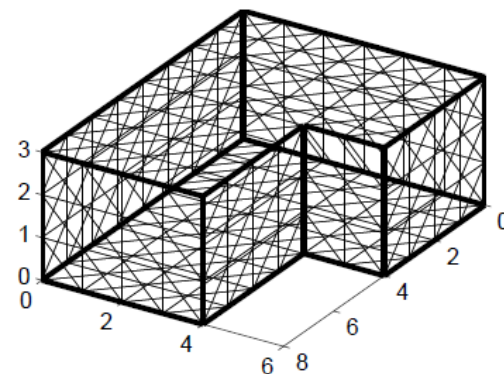
Radiance Transfer Method: Simulation numérique

■ Discrétisation de la salle

- La pièce est divisé en patches
- Expression itérative

$$I_i^{(n)}(t) = I_i^{(n-1)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^M F_{i,j}^{(1)} I_j^{(n-1)}\left(t - \frac{r_{i,j}}{c}\right)$$

Room 1: non-convex



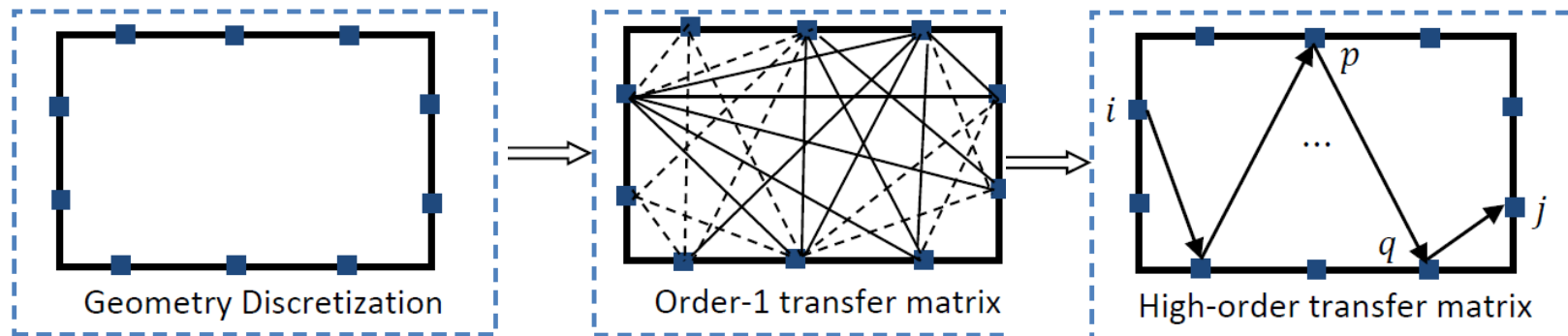
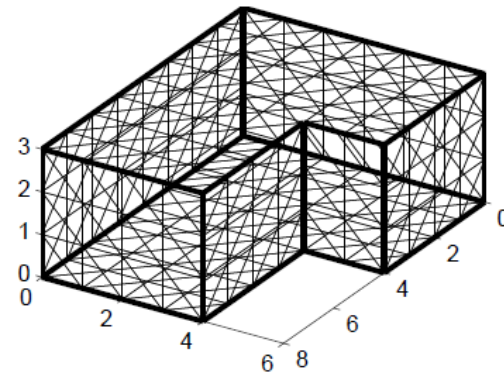
Radiance Transfer Method: Simulation numérique

■ Discrétisation de la salle

- La pièce est divisé en patches
- Expression itérative

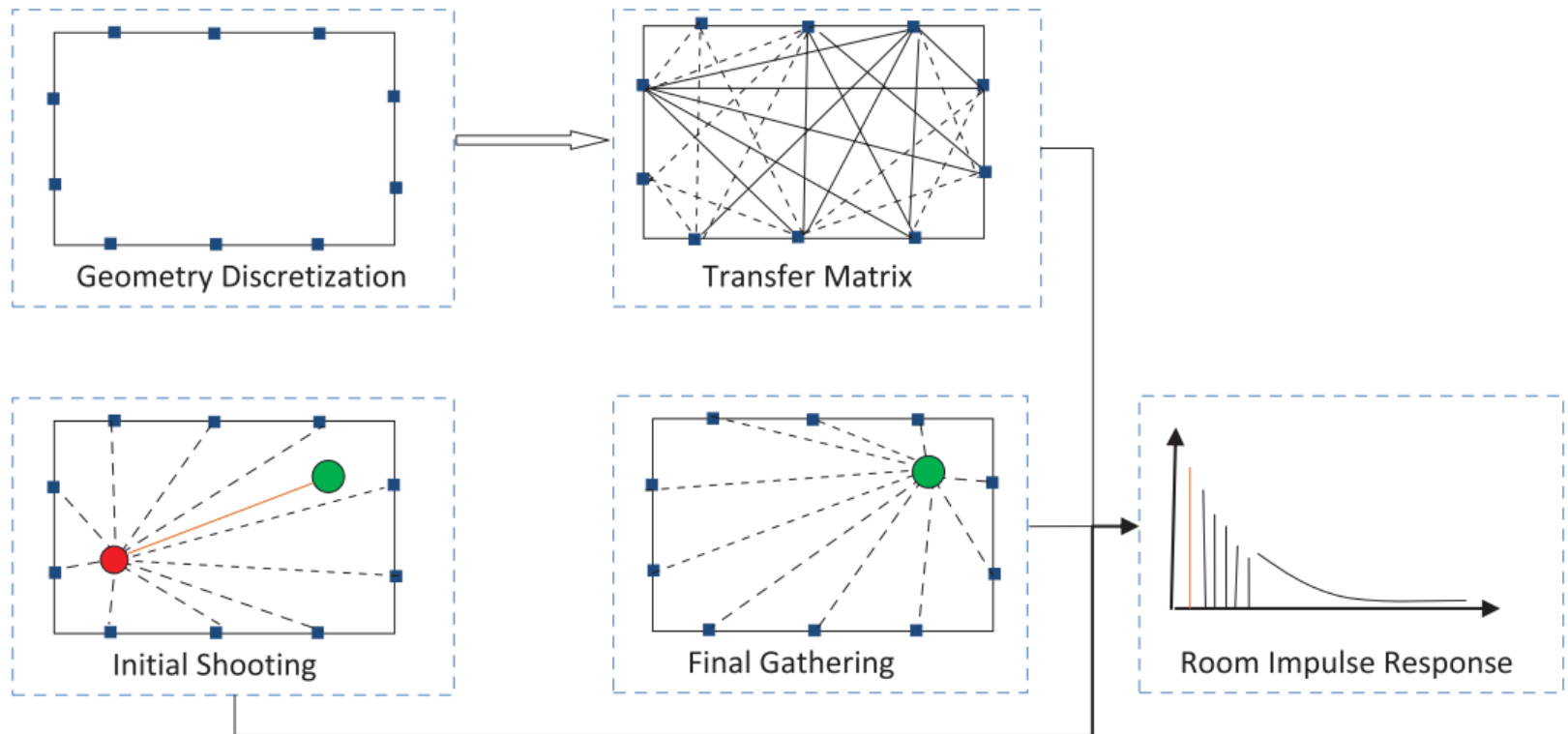
$$I_i^{(n)}(t) = I_i^{(0)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^M F_{i,j}^{(n)} I_j^{(0)}\left(t - \frac{r_{i,j}}{c}\right)$$

Room 1: non-convex

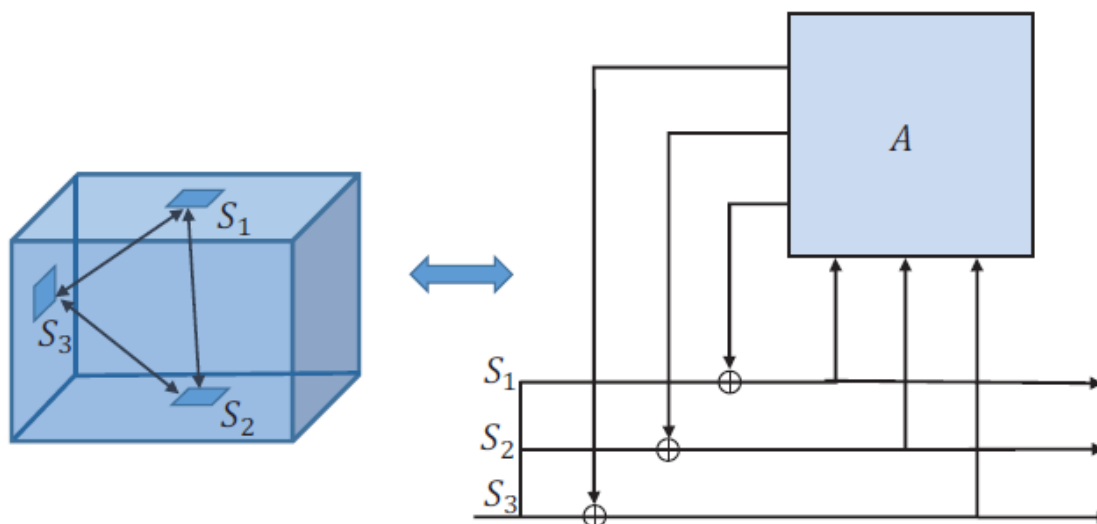


Une approche alternative: Radiance Transfer Method (RTM)

■ En résumé



Relation entre RTM et systèmes à filtres réverbérant



- L'échange d'énergie entre patches de RTM peut être reliée à la structure récurrente des structures réverbérantes (réseaux de filtres)
- L'échange d'énergie d'ordre élevé équivalente aux boucles de retour infinie des réseaux de filtres
- Possibilité pour des implémentations très efficaces des méthodes RTM.



Conclusions

■ Un certain nombre de problèmes existent encore:

- Modéliser exactement un espace réverbérant demande toujours une complexité assez grande même avec les méthodes à rebouclage unitaire
- La plupart des systèmes du commerce utilisent probablement des variations temporelles pour réduire la coloration tonale alors que les algorithmes variant dans le temps sont très peu décrits dans la littérature
- Une théorie générale sur la perception de la coloration tonale de la réverbération est nécessaire pour mieux comprendre pourquoi certains algorithmes sonnent bien et d'autres pas



Quelques éléments de bibliographie

■ Effets sonores

- V. Verfaillie, U. Zölzer and D. Arfib, Adaptive Digital Audio Effects (A-DAFx): A New Class of Sound Transformations, IEEE TRANSACTIONS ON AUDIO, SPEECH, AND LANGUAGE PROCESSING , VOL. 14, NO. 5, SEPTEMBER 2006 1817
- J. Laroche, J.M Jot, G. Richard, Effets et Réverbération artificielle, polycopié de cours Télécom ParisTech, 2005.

■ Réverbération

- H. Kuttruff. Room acoustics. SPON Press, London, UK, 4th edition, 2009.
- E.-M. Nosal, M. Hodgson, and I. Ashdown. Improved algorithms and methods for room sound-field prediction by acoustical radiosity in arbitrary polyhedral rooms. The Journal of the Acoustical Society of America, 116(2):970–980, 2004.
- S. Siltanen, T. Lokki, S. Kiminki, and L. Savioja. The room acoustic rendering equation. The Journal of the Acoustical Society of America, 122(3):1624–1635, 2007.
- V. Valimaki, J. D. Parker, L. Savioja, J. O. Smith, and J. S. Abel. Fifty years of artificial reverberation. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 20(5):1421–1448, 2012.
- J.-M. Jot. Etude et réalisation d'un spatialisateur de sons par modèles physiques et perceptifs. PhD thesis, Telecom ParisTech, 1992b.
- M. R. Schroeder. Natural sounding artificial reverberation. Journal of the Audio Engineering Society, 10(3): 219–223, 1962.
- H. Bai, « Modèles hybrides pour la réverbération tardive », PhD thesis, Telecom ParisTech, 2016.
- H. Bai, G. Richard, and L. Daudet. Late reverberation synthesis: From radiance transfer to feedback delay networks. Audio, Speech, and Language Processing, IEEE/ACM Transactions on, 23(12):2260–2271, 2015b.

