

# MASTER - Année 2

## *Traitement du Son et de la Musique Avancé*

Pierre Hanna

hanna@labri.fr



- Méthodes d'analyse
  - représentation temporelle
  - représentation spectrale (FFT)
- Paramètres (amplitude, fréquence, timbre)
- Méthodes de synthèse
- Effets, Transformations



## Année 2

---

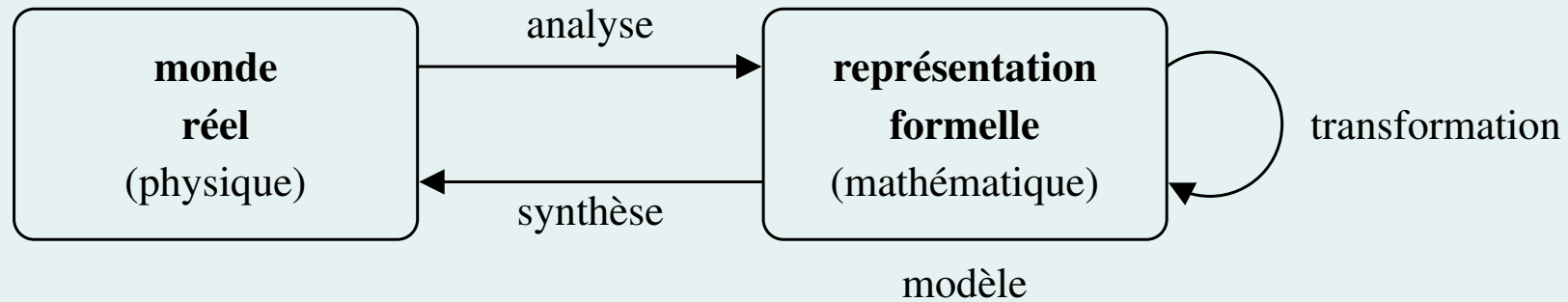
- Modèles analyse/synthèse
  - partie sinus
  - partie bruit
- Classification
  - Exemples
  - Projet Kaggle
- Synthèse (M. Robine)
- Traitement de la parole (J.L. Rouas)

A réfléchir:

- Stages (recherche, entreprise, ...)
- Projet de Dév 2nd semestre

# Modélisation du son

# Modèles



- Analyse : peu de contrainte de temps
- Synthèse : **temps-réel**



# Modèles Physiques

---

Origine : physique des ondes sonores (Rayleigh fin 19ème)

- basés sur les modèles mathématiques d'acoustique
- simulation d'un instrument

Par rapport aux autres types de modélisations:

- avantages : qualité (défauts d'un instrument), contrôles réalistes, possibilité de définir des instruments non réels, ...
- inconvénients : limites des instruments, temps de calcul (pas en temps réel), ...

- Excitation/résonance
- Paradigme masse-ressort
  - ressort représente l'élasticité (corde, peau, ...)
  - déplacement longitudinal
  - déplacement transversal

$$y(x,t) = f_1\left(t + \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)$$

- Equations différentielles

$$Ky'' = \varepsilon$$

- K : tension de la corde,  $\varepsilon$  densité massique linéaire, y déplacement
- Etat initial
- Conditions aux limites (extrémités fixes/libres)

Cordes vibrantes, mais aussi membranes, ...

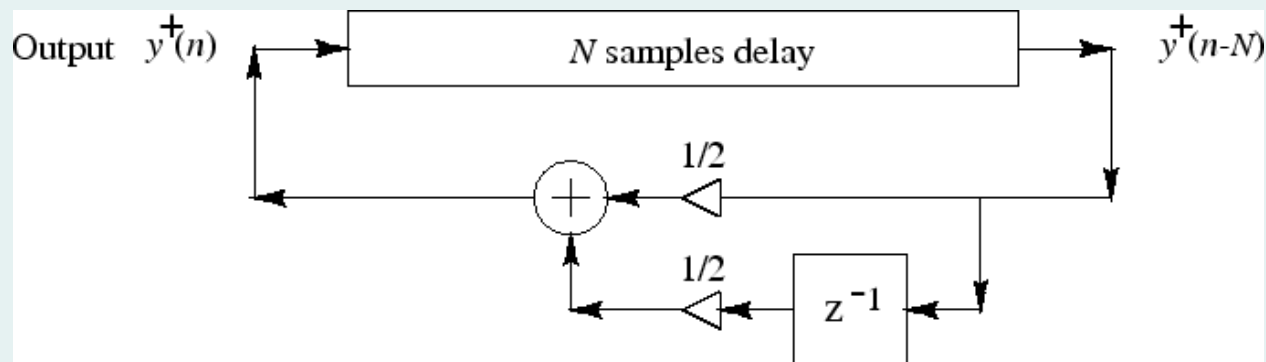
# Cordes : Karplus-Strong

## Algorithme de Karplus-Strong (CMJ 1983)

- très efficace

$$H(z) = 0.5 + 0.5z^{-1}$$

- Basé sur la table d'onde, remplie au départ par des valeurs aléatoires
- Répétition de la table d'onde : hauteur perçue
- avec le temps, la table d'onde passe d'une onde aléatoire (bruit) à une onde quasi-périodique



- Son de corde original
- Son de corde 1
- Son de corde 2
- Son de corde 3
- Son de corde 4



# Karplus-Strong pour les batteries

- Légère modification: ajout d'une probabilité  $p$
- probabilité  $p$  d'avoir

$$y(n) = \frac{1}{2}(y(n-N) + y(n-N-1))$$

- probabilité  $1-p$  d'avoir

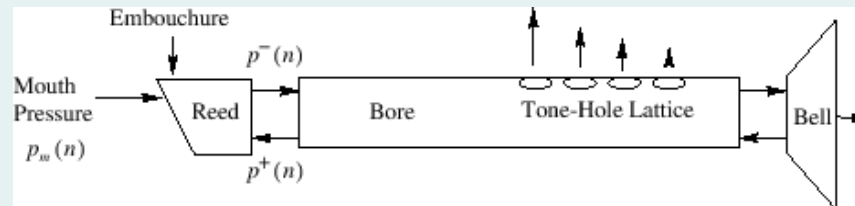
$$y(n) = -\frac{1}{2}(y(n-N) + y(n-N-1))$$

Résultats différents selon les valeurs de  $p$

- Si  $p = 1$  : corde
- Si  $p = 0.5$  : perte de la périodicité et génère un son de percussion
- Si  $p = 0$  : coupe en partie les périodicités et génère un son de type harpe

Autres exemples:

- *Waveguide Synthesis* (89, Yamaha)



- Trajet de l'onde sonore le long d'un tuyau ou d'une corde
- Instruments à cordes et à vent
- Synthétiseurs commerciaux (Clavia Nord, Yamaha VL1, ...)
- Synthèse de la voix
  - Modèle source/filtre
  - Résonances : forme de l'enveloppe spectrale, notamment les **formants**

Exemples de sons issus de la modélisation physique :

- Violoncelles
- Clarinettes/hautbois
- Cuivres
- Orgue



# Modèles abstraits

---

Modèles abstraits : modèles de synthèse **uniquement**

- Paramètres mathématiques
- synthèse de sons complexes à partir d'*entités* simples
  - généralement des oscillateurs

Deux exemples les plus connus : **synthèse FM** et **synthèse AM**



# Modèles spectraux

---

Son est représenté par une somme d'oscillateurs

Historique:

- Dès années 1903 pour films russes...
- Années 30: vocoder (*voice coder*) développé par Dudley (Bell Telephone Laboratories)
- Années 60: phase vocoder (Flanagan/Golden)  
Utilisation pour la musique (Risset, années 60)

Exemples de modélisations de voix:

- 1939
- 1951
- ...
- Avec expressivité

# Phase Vocoder par FFT

Vocoder : modification de la transformée de Fourier à court-terme

- Calculer la FFT (trames, chevauchement, fenêtrage)
- Pour chaque bin  $k$ 
  - calcul de l'amplitude
  - calcul de la phase
- Calcul de la fréquence instantanée  $F_m(k)$  au temps  $m$  (trames de  $N$  échantillons) :

$$F = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}$$

$$F_m(k) = \frac{\theta_m(k) - \theta_{m-1}(k) + 2p\pi}{2\pi(t_m - t_{m-1})}$$

$$F_m(k) = \frac{\theta_m(k) - \theta_{m-1}(k)}{2\pi \frac{N}{F_e}}$$



# *Phase Vocoder par FFT*

---

## Utilisation:

- Compression
- Traitement parole
- Supression réverbération
- Réduction de bruit

## Limites

- Bruit
- Attaques
- Modulations fréquence/amplitude (vibrato/tremolo)

# Modèles sinusoïdaux

[McAulay, Quatieri (IEEE TASSP, 1986)]

applications [Smith, Serra 1986]

Le signal audio  $s$  est donné dans le domaine temporel par:

$$s(t) = \sum_{p=1}^P a_p(t) \cos(\phi_p(t))$$

$$s(t) = \sum_{p=1}^P a_p(t) \cos(2\pi f_p(t)t + \phi_p(0))$$

où  $P$  est le nombre de partiels et

$$\phi_p(t) = \phi_p(0) + 2\pi \int_0^t f_p(u) du \quad (1)$$

Les fonctions  $f_p(t)$ ,  $a_p(t)$  et  $\phi_p(t)$  sont, respectivement, la fréquence, l'amplitude et la phase du  $p$ -ième partiel.

Ces paramètres varient lentement dans le temps.



## TP : partie sinus, spectre amplitude

A partir du code `analyse_amp.c`,

- Localiser/visualiser les pics du spectre d'amplitude correspondant à la partie sinus d'un son (par exemple `piano_original.wav`)
  - Pic (maximum local présent sur plusieurs trames consécutives)
  - Seuil sur amplitude
  - Différence aux voisins
  - Pic mais aussi les 2 voisins
  - Différence avec interpolation parabolique
- Tester sur plusieurs sons (mélanges sinus + bruit à synthétiser)
- Tester plusieurs approches

## TP : partie sinus, spectre de phase

---

Localiser/visualiser les pics en utilisant le **spectre de phase**

- Observer le spectre de phase du son sinus440+bruit.wav
  - autour du pic de la sinusoïde
  - sur une région correspondant au bruit
- influence du zero-phase
- Proposer une méthode pour détecter les pics correspondant aux sinus
- Implémenter cette méthode et tester.

## TP : partie sinus, analyse/synthèse

---

A partir du code `modele.c`,

- ReSynthétiser la partie sinus d'un son (par exemple `piano_original.wav`)
  - Ajouter un test pour décider si un bin est une sinus ou pas
  - mettre à 0 les parties du spectre non sinus
- Tester sur plusieurs sons
- Tester plusieurs approches

Limites des modèles sinusoïdaux pour les sons complexes :

- Séparation du son en plusieurs composantes
  - Partiels
  - Transitoires
  - Bruit (résidu)
- Traitement indépendant de chaque composante
- Fusion des composantes pour la synthèse



## *Définition du bruit (1)*

---

Langage courant:

- sons perturbateurs
- sons non désirés
- sons désagréables

Sinusoïde de 1000Hz très désagréable, pourtant ce n'est pas un bruit.





## *Définition du bruit (2)*

---

Acoustique, sciences:

- Spectre dense
- Signal défini statistiquement (2 signaux différents mais perception équivalente)

**transitoires:** traitement différent



## Définition du bruit (3)

---

Modèles analyse/synthèse de sons:

- Tout ce qui n'est représenté par des sinusoïdes évoluant **lentement** dans le temps.
- Tout ce qui n'a pas été retenu par le vocodeur de phase.

Frontière son harmonique ou inharmonique complexe/bruit ?

Critère pour décider si un spectre est dense ?

Instrument seul/Multitude d'instruments

# Intérêt du bruit (1)

---

Présent dans les sons d'instruments de musique:

- Sons denses (cymbales)
- Souffle pour les instruments à vent ou pour la parole
- Courtes impulsions : coups de marteau (piano), cordes pincées (guitare, violon, ...)
- Bandes de fréquences élargies (tampons du piano qui stoppent les vibrations de la corde)
- Multiples impulsions (chocs) comme pour les maracas.

⇒ Importance dans la synthèse de sons: un son reste *artificiel* si l'on ajoute pas de bruit





## *Intérêt du bruit (2)*

---

### Traitement de la parole

- Consonnes non voisées (s,ch,f,...)
- Voix chuchotées

### Importance dans les expériences psychoacoustiques

- expériences de masquage: mélange de bruit avec des sons harmoniques





# Modèles pour le bruit

---

Deux approches possibles:

- Approche temporelle: synthèse de bruits *classiques*/filtrés
- Approche spectrale: modèles de synthèse complétant les modèles de sons harmoniques





# Approche temporelle

---

## Etude de la distribution des échantillons

- Tendence à tendre vers une distribution gaussienne
- Deux sons bruités peuvent être très proches, tout en ayant des propriétés statistiques différentes
- Deux sons bruités peuvent être très différents, même si leurs propriétés sont ressemblantes

## Seule approche envisageable :

- filtrer du bruit blanc
- pas vraiment de modèle...

# Synthèse de Bruit : temporel



# Synthèse temporelle

---

Description et algorithme de synthèse de bruits :

- Bruit blanc
- Bruit rose
- Bruit brownien
- Bruit ondulant





## Bruit blanc (1)

---

*white noise*

Analogie avec lumière blanche (mélange de toutes les couleurs): contient **toutes** les fréquences.

- Spectre de fréquence continue
- Spectre d'amplitude moyenne égale

Modèle (n'existe pas naturellement) restreint à 20 – 20000Hz



## *Bruit blanc (2)*

---

Propriétés auditives:

- Pas de hauteur perçue
- Pas de rythme perçu





# Synthèse de bruit blanc

---

Méthodes reposent sur la définition: indépendance et même loi.

Différences selon la loi choisie : perception (intensité), efficacité

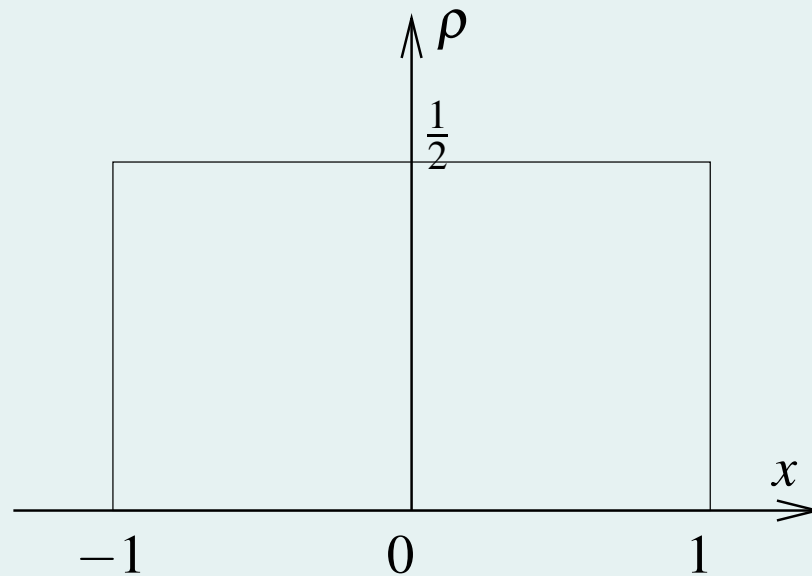
- Uniforme (rectangulaire)
- Gauss (normale)



## Bruit blanc: uniforme

$$\forall (x_1, x_2) \in ]-1; 1]^2, p(x = x_1) = p(x = x_2)$$

Densité de probabilité  $\rho$  :  $\rho(x) = \frac{1}{2}$





## *Bruit blanc: uniforme*

---

Algorithme:

- Utilisation de la fonction de tirage aléatoire (`rand` du C)



## Bruit blanc: gauss (1)

---

Appelée parfois normale (*normal* or *gaussian*)

Tendance naturelle des bruits à être gaussiens (théorème central limite)

$$Y = \sum_{k=1}^N X_k$$

Y suit une loi gaussienne si  $N$  est grand, quelle que soit la distribution des  $X_k$ .



## Bruit blanc: gauss (2)

---

Suit une loi de Gauss:

$$\rho_N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-x^2}{(2\sigma^2)} \quad (2)$$

où  $x \in \mathbb{R}$  et  $\sigma$  représente l'écart-type (largeur de la fonction de distribution).

## Bruit blanc: gauss (5)

Amplitude RMS:

$$A_{RMS} = \sqrt{\langle x^2 \rangle} = \sigma$$

Amplitude max: dépend de  $\sigma$

Compromis:

- $\sigma$  grand : probabilités de saturation
- $\sigma$  petit : intensité perçue faible

$\Rightarrow$  normalisation



## Bruit blanc: gauss- Algorithme (1)

---

Principe:

- addition d'un certain nombre de variables aléatoires  $x_i$  uniformément distribuées

Littérature indique  $N = 12$  bonne approximation



## *Bruit coloré*

---

Même analogie avec la couleur.

Forme du spectre permet d'associer une couleur

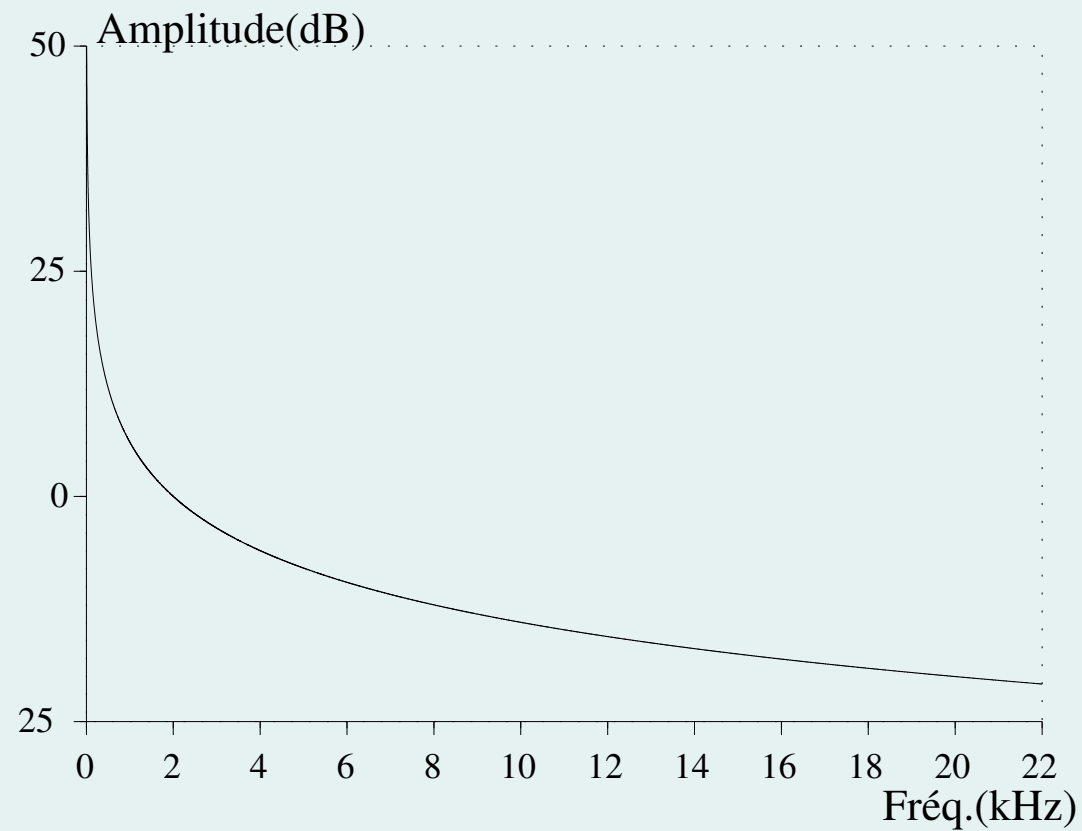
- Bruit rose
- Bruit brownien (rouge)

Autres ...

# Bruit coloré

Bruits roses:

distribution de puissance moyenne suit échelle logarithmique





## Bruit rose: applications (2)

---

- Application en Musique: distribution des mélodies des morceaux de musique. La plupart (classique ou moderne) suivent une distribution *rose*.
- Composition aléatoire (Xenakis)

Bibliographie sur  $\frac{1}{f}$  et sur  $\frac{1}{f^2}$ :

<http://linkage.rockefeller.edu/wli/1fnoise/>



## Bruit rose: algorithme de Voss (1)

---

Principe:

- Chaque échantillon est la somme de  $n$  variables aléatoires.
- Pour avoir l'échantillon, on ne retire qu'un certain nombre de ces variables.

Comme les hautes fréquences sont atténuées, deux valeurs successives vont être proches: peu de variables retirées.

## Bruit rose: algorithme de Voss (2)

**Data** :  $N$

**Result** : tableau samples de taille  $2^N$

**début**

```

    pour  $i = 0$  à  $N - 1$  faire
        | oldbit[i] = 1;
    fin
    pour  $K = 0$  à  $2^N - 1$  faire
        | K = bit[0], bit[1], ..., bit[N-1];
        | sum = 0;
        | pour  $i = 0$  à  $N - 1$  faire
            | si  $bit[i] \neq oldbit[i]$  alors
                | d[i] = rand(0.1);
            fin
            | sum = sum + d[i];
            | oldbit[i] = bit[i];
            | samples[i] = sum;
        fin
    fin
fin
```

## Bruit rose: algorithme de Voss (3)

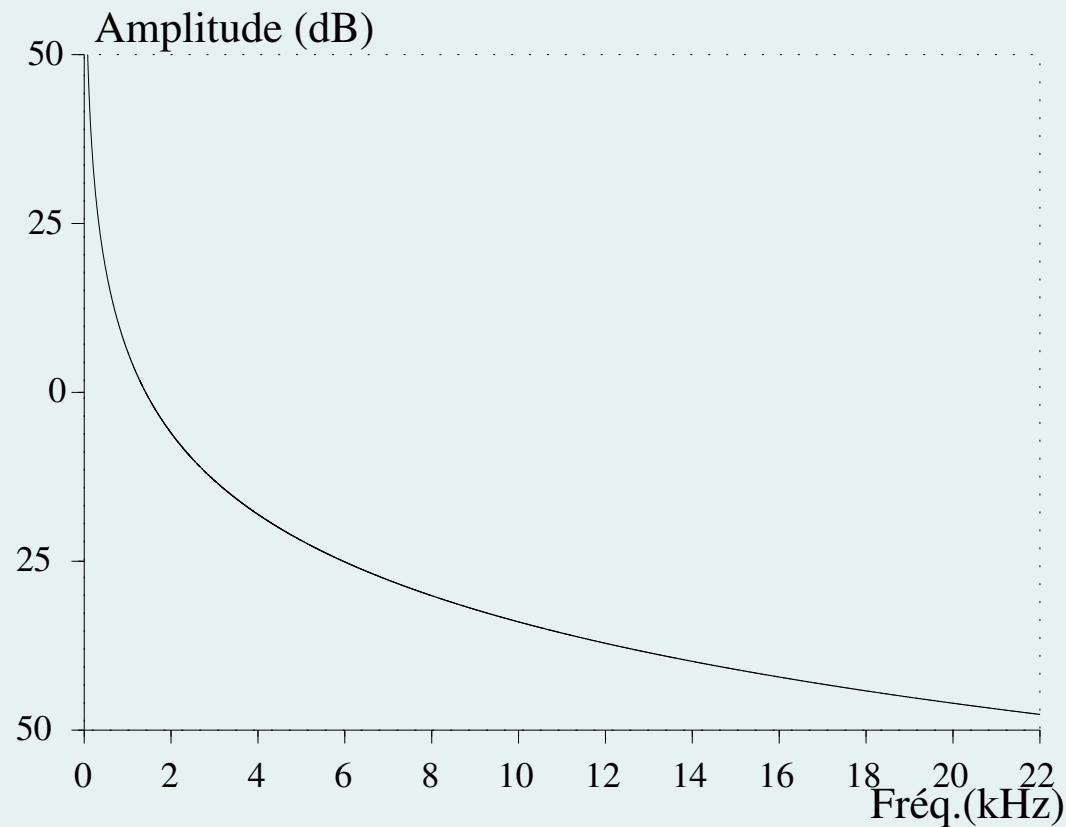
Exemple sur 3 bits:

K	0	1	2	3	4	5	6	7
bits	000	001	010	011	100	101	110	111
retirages	3	1	2	1	3	1	2	1

## Bruit Brownien (1)

Aucun lien avec couleur marron, analogie avec mouvements browniens des molécules dans un fluide.

Autre nom: *random walk* ou l'homme saoul



## Bruit Brownien (2)

---

$$S(f) = \frac{A}{f^2}$$

avec  $f \geq f_{min}$

$$S(2f) = \frac{A}{4f^2} = \frac{1}{4}S(f)$$

ce qui signifie que, dès que  $f$  double de valeur,  $S(f)$  est divisé par 4.

# Bruit Brownien: algorithme

Différences entre échantillons successifs = variables aléatoires uniformément distribuées.

**Data** :  $N$

**Result** : tableau samples de taille  $N$

**début**

```
    sum = rand(-1,1);  
    pour  $i = 0$  à  $N - 1$  faire  
        oldsum = sum;  
        tant que  $sum > 1.0$  OU  $sum < -1.0$  faire  
            sum = oldsum + rand(-0.1,0.1);  
        fin  
        samples[ $i$ ] = sum;  
        oldsum = sum;  
    fin  
fin
```



## Coloration d'un bruit (1)

---

Modification de la couleur d'un bruit

⇒ modification de l'enveloppe spectrale

Les modèles temporels sont basés sur les filtres

⇒ les bruits sont considérés comme des bruits blancs filtrés.

- Linear Predictive Coding (analyse/synthèse de la parole).



## Coloration d'un bruit (2)



Excitation : bruit blanc

Résonateur : filtres



## Coloration d'un bruit (2)

---

### Avantage:

- efficacité
- modélisation physique

### Inconvénients:

- Lissage de l'enveloppe : compromis précision/complexité
- Intuitivité du modèle : suite de réels





## TP : synthèse de bruit

---

A partir du code `bruit.c`,

- Synthétiser un bruit blanc
  - Distribution uniforme
  - Distribution normale
- Analyser le spectre d'amplitude obtenu
- Comparer
- Synthétiser un bruit brownien
- Comparer son spectre à celui du bruit blanc



## *Synthèse temporelle: conclusions*

---

- Facilité et efficacité de synthétiser des bruits colorés de base.
- Plus complexe et moins intuitif pour couleurs moins simples.

Avantage: lien avec la physique

Problème: lien avec la perception



## Synthèse de Bruit : spectral

## Modèle bruit thermique (1)

---

$$x(t) = \sum_{n=0}^N [A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t)]$$

où  $n$  est un entier et

- les pulsations  $\omega_n$  sont également espacées
- les coefficients  $A_n$  et  $B_n$  sont des variables aléatoires.

## Modèle bruit thermique (2)

Autre possibilité d'écriture:

$$x(t) = \sum_{n=0}^N C_n \cos(\omega_n t + \Phi_n)$$

où

- $\Phi_n = \arctan(\frac{B_n}{A_n})$  distribuées uniformément entre 0 et  $2\pi$
- $C_n = \sqrt{B_n^2 + A_n^2}$  distribués selon la loi de Rayleigh, valeur plus probable  $\sigma$

Plusieurs méthodes existantes, selon les applications

- Estimation directe depuis le signal
  - beaucoup de méthodes qui estiment les sinusoides
  - beaucoup de méthodes qui estiment le niveau de bruit
  - mais peu qui cherchent à estimer le bruit...
- Estimation à partir d'une estimation de la partie déterministe (sinusoïdale)

Erreur inévitable...





# Analyse du bruit

---

Décision binaire pour chaque pic du spectre

- Sinusoïde
- Bruit

Pic peut être un mélange sinus/bruit

Autres approches basées sur l'analyse à long terme du spectre





# Analyse du bruit

---

Spectre des parties bruitées évolue rapidement au cours du temps

Idée: Diminuer ces variations (ou la variance)

- Moyenne (Méthode de Welsh)
- Minimum
- Maximum

Etude théorique nécessaire



## Distribution des amplitudes

---

Amplitude des composants bruités **seuls** suivent une loi de Rayleigh:

$$p(M) = \frac{M}{\sigma^2} e^{\frac{-M^2}{2\sigma^2}}$$

où  $\sigma$  la valeur la plus probable

Remarque : probabilité non nulle d'avoir une amplitude très forte ou nulle.



# Distribution des amplitudes

Amplitude des composants sinusoïdaux bruités suivent une loi de Gauss:

$$\rho_N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-x^2}{(2\sigma^2)}$$

où  $x \in \mathbb{R}$  et  $\sigma$  représente l'écart-type (largeur de la fonction de distribution).

Loi pour les deux cas ?

# Distribution des amplitudes

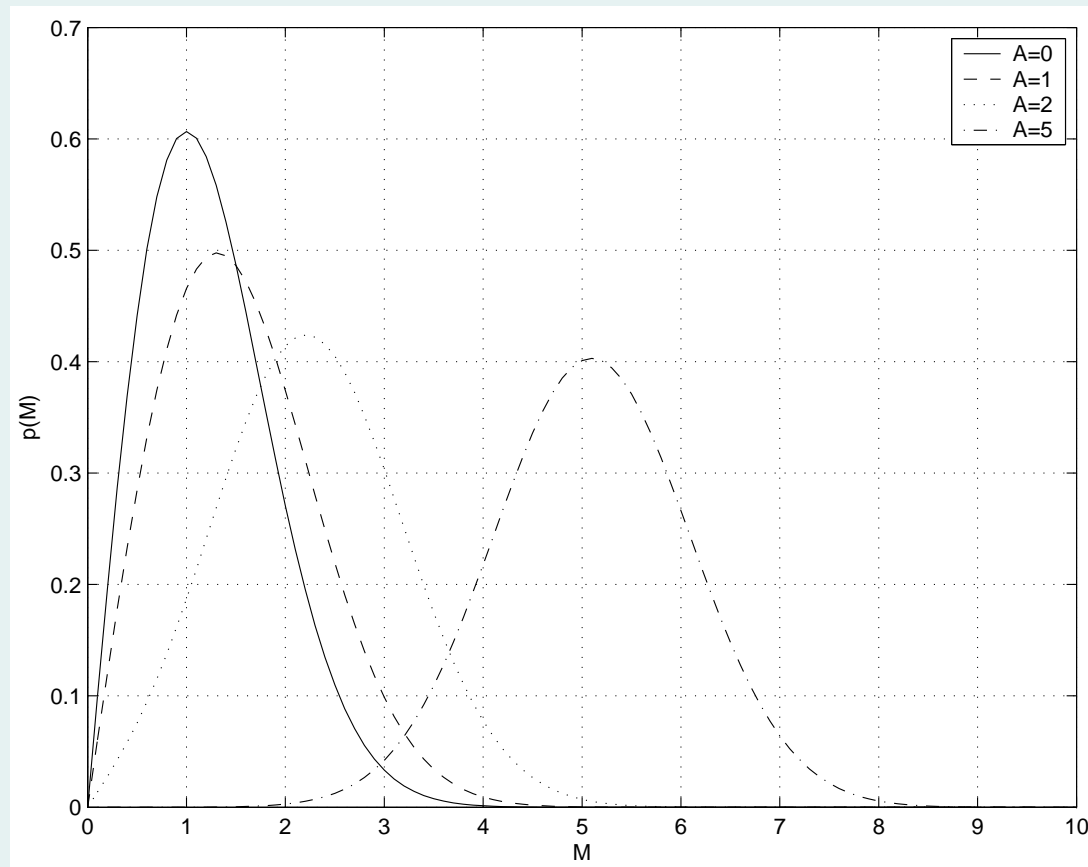
Loi de Rice

$$p_{A,\sigma}(M) = \frac{M}{\sigma^2} e^{-\frac{(M^2+A^2)}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{AM}{\sigma^2}\right)$$

où  $I_0$  est la fonction de Bessel modifiée de la première espèce d'ordre 0:

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{x \cos(\phi)} d\phi$$

# Distribution des amplitudes



- $A$  tend vers 0 : Rayleigh
- $A$  plus grand que  $\sigma$  : Gauss (moyenne  $A$  et écart-type  $\sigma$ )

## Modèle bruit thermique (3)

---

Théorie:

- Vérification de  $E(x[n]x[n+p]) = 0$
- Répartition de l'énergie dans le spectre

Deux possibilités:

1. Amplitudes distribuées selon Rayleigh, phases uniformément choisies
2. Amplitudes fixes, phases uniformément choisies

La deuxième méthode est la plus *utilisée*.

# Méthodes de synthèse spectrale (1)

- Détermination aléatoire des valeurs d'amplitude  $C_n$

Distribution Rayleigh:

$$\rho(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp - \frac{y^2}{2\sigma^2}$$

- Phases déterminées aléatoirement (loi uniforme) entre 0 et  $2\pi$

Quel que soit le nombre de composants sinusoidaux du bruit (même 1), la distribution des échantillons suit une loi de Gauss.



## Algorithme: distribution de Rayleigh

---

Algorithme à partir de valeurs aléatoires  $0 \leq x < 1$  uniformément distribuées et l'inverse de la fonction cumulative  $\int_0^x \rho(z)dz$ :

$$y_n = \sigma_n \sqrt{-2 \ln(1 - x)}$$

où  $\sigma_n^2$  est la puissance moyenne du composant  $n$ .

## Méthodes de synthèse spectrale (2)

---

- Valeurs d'amplitude  $C_n$  fixées
- Phases déterminées aléatoirement (loi uniforme) entre 0 et  $2\pi$

Avantage: chaque signal synthétisé a **exactement** le même spectre de puissance.

## Méthodes de synthèse spectrale (3)

Les coefficients  $A_n$  et  $B_n$  ne sont plus distribués selon Gauss, et ne sont plus indépendants:

$$A_n = C_n \cos \Phi_n$$

$$B_n = C_n \sin \Phi_n$$

où  $C_n$  est une valeur fixe.

Phases uniformément distribuées  $\implies A_n$  et  $B_n$  suivent une loi décrite par la fonction de densité de probabilité d'une sinusoïde.

Théorème central limite:  $N > 5 \implies$  la distribution des échantillons est gaussienne.



# Stationnarité (1)

---

Limites:

- Efficacité (nombre de sinusoides)
- Hypothèse de stationnarité (analyse)
- Transitions entre fenêtres successives (clics)

Pour résoudre ce problème: technique de recouvrement et addition.

Avantage: réduction du nombre d'oscillateurs.



# Analyse du bruit

---

- Etude de la distribution des amplitudes pour un bruit blanc sur plusieurs frames
- Distribution de Rice (Rayleigh/Gauss)
- Si Rayleigh : Bruit
- Si Gauss : Bruit + Sinus

La valeur de  $\sigma$  indique le niveau de bruit.



## TP : synthèse de bruit

---

A partir du code `bruit.c`,

- Synthétiser un bruit blanc
  - Amplitudes uniformes, phases aléatoires
  - Amplitudes Rayleigh, phases aléatoires
- Comparer
- Visualiser et analyser les spectres d'amplitude obtenus



## *TP : analyse des distributions*

---

A partir du code `analyse_amp.c` et du son `sinus440+bruit.wav`

- Analyser et afficher la distribution des amplitudes pour une sinus
- et pour du bruit
- Comparer
- Tester pour d'autres sons avec différents niveaux de bruit



# Retour aux modèles hybrides



# Modèles Sinus+Bruit

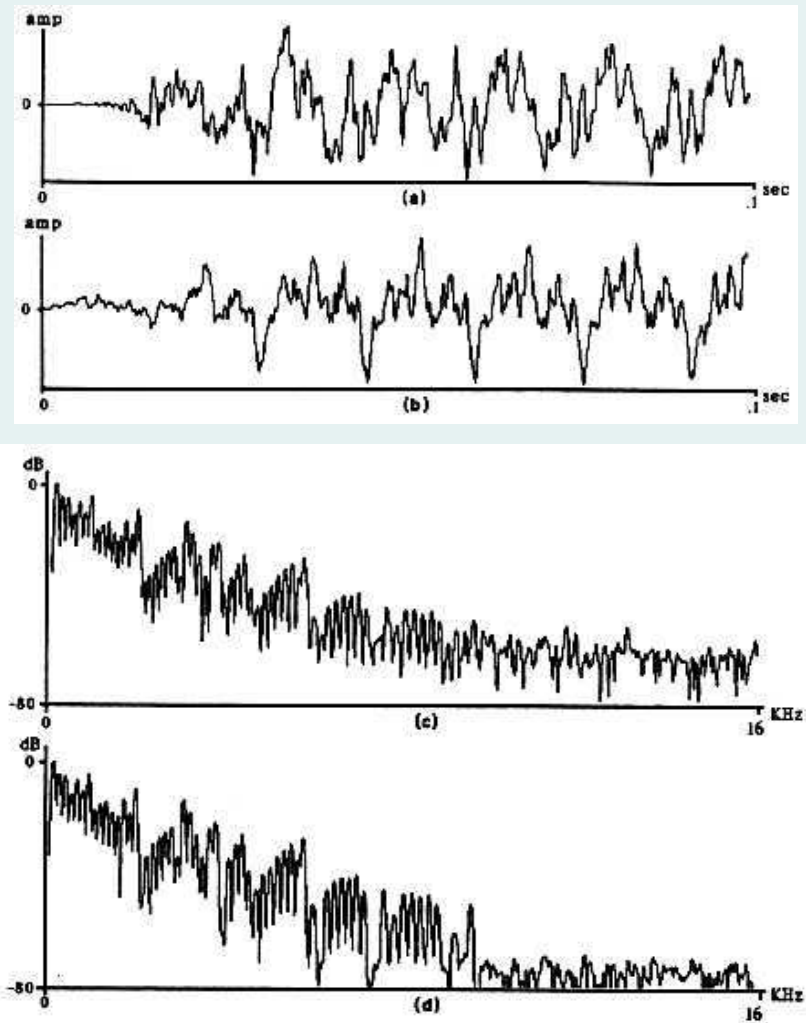
SMS Serra/Smith 1989

$$s(t) = \sum_{p=1}^P a_p(t) \cos(\phi_p(t)) + e(t)$$

- $e(t)$  : composant résiduel (ou bruit)
- Bruit blanc filtré
- Obtenu par soustraction spectrale:

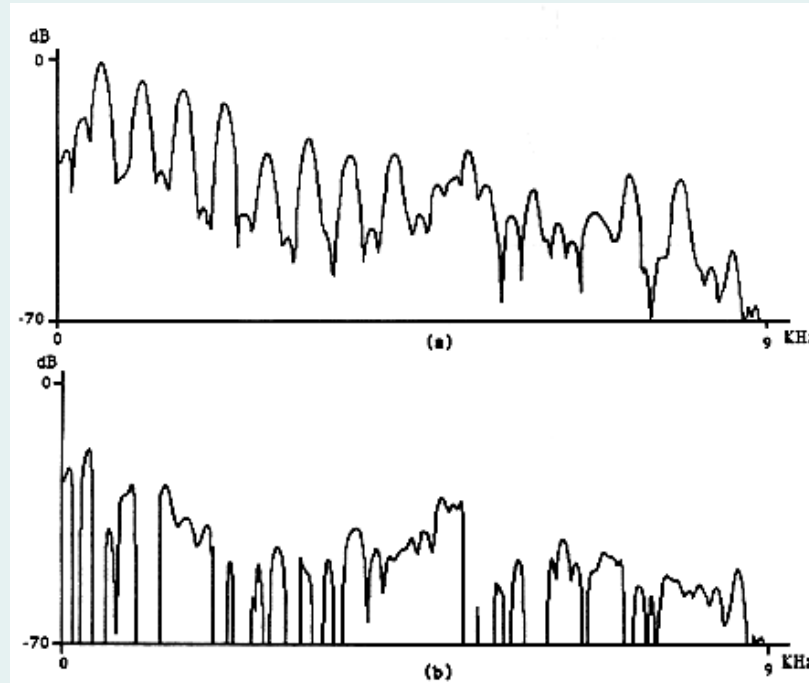
$$e(t) = s(t) - \sum_{p=1}^P a_p(t) \cos(\phi_p(t))$$

# Soustraction



- Besoin d'interpoler la phase...

# Soustraction spectrale



$$|E_r(k)| = ||X_r(k)| - |D_r(k)||$$

- Soustraction des spectres d'amplitude
- Pas besoin d'avoir les informations de phase de la partie sinsuoïdale
  - inutile pour la soustraction spectrale
  - inutile pour la partie résiduelle

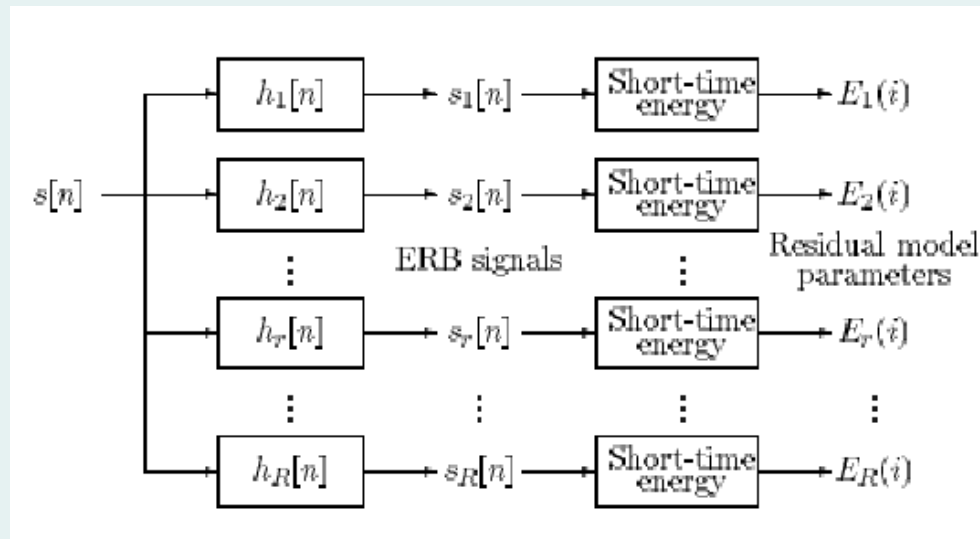
# Modèles Sinus+Bruit

Partie bruit:

- Uniquement représentée par le densité spectrale de puissance (*enveloppe spectrale*)
- Phases considérées comme aléatoires

Autres modèles:

- Energies dans des bandes ERB (Goodwin 96)



- Somme de sinus de courtes durées (Moi 03)



# *Modèles Sinus+Bruit*

---

Exemples:

- Piano
- Guitare
- Conga



## TP : Partie Bruit

---

A partir du code `modele.c`,

- ReSynthétiser la partie sinus d'un son (par exemple `piano_original.wav`)
- ReSynthétiser la partie bruit du même son
- Mélanger les deux et comparer au son original
- Tester sur plusieurs sons
- Tester en approximant l'enveloppe spectrale (segments)

# Modèles Sinus+Bruit

SMS Serra/Smith 1989

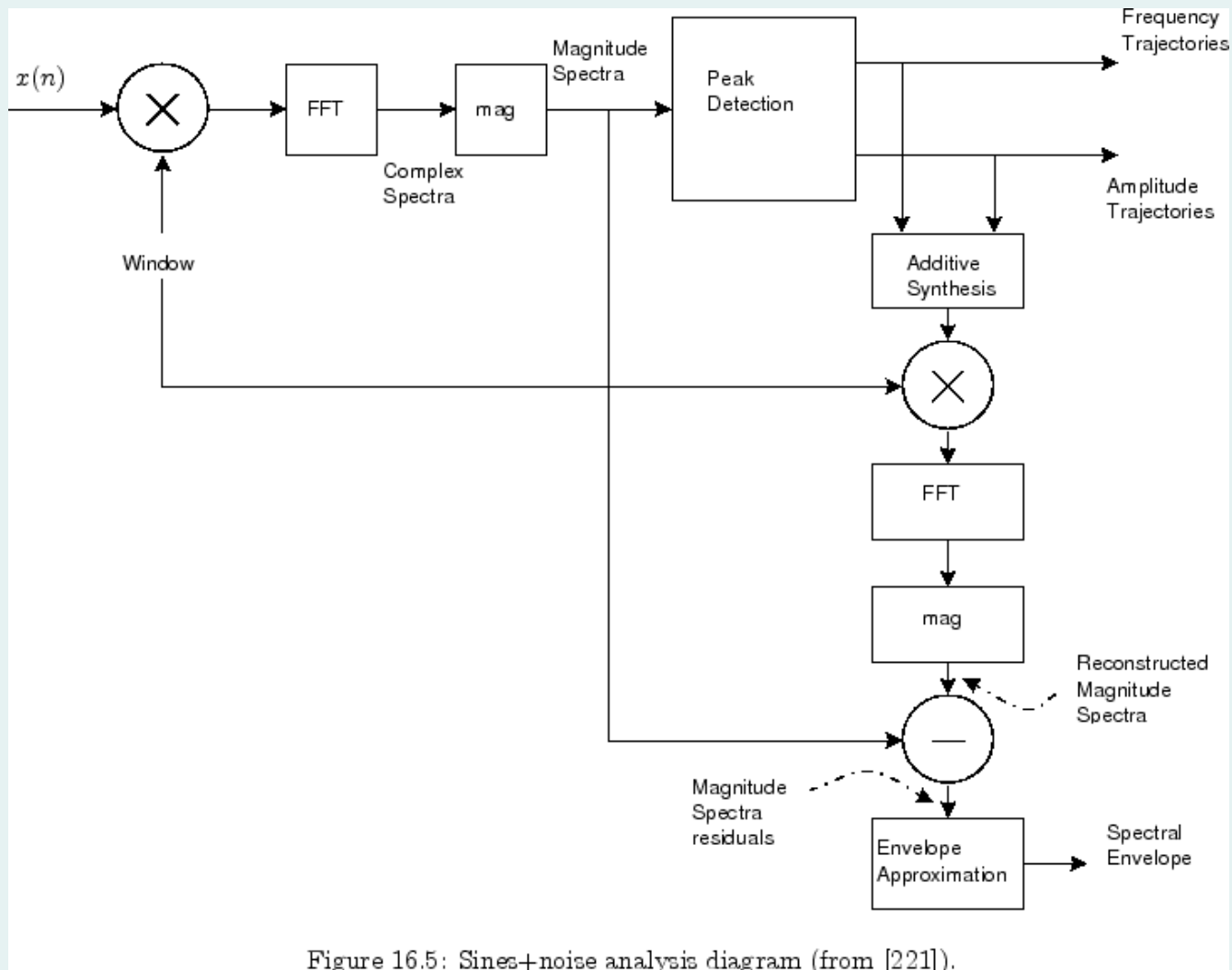


Figure 16.5: Sines+noise analysis diagram (from [221]).

# Modèles non hybrides

Fitz 1998

Son : somme de sinusoides bruitée

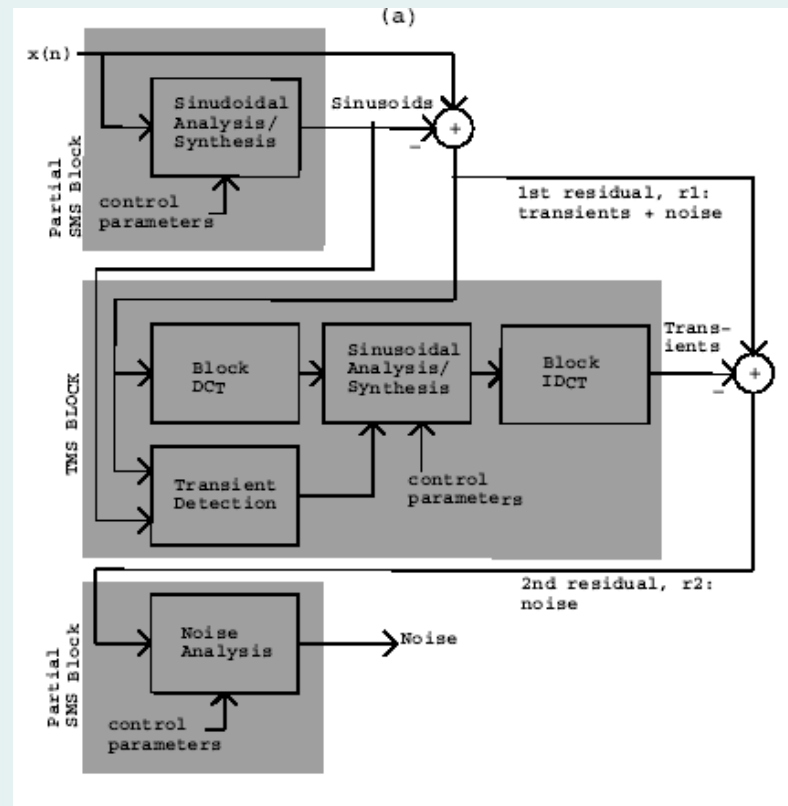
$$y_n = A(\sqrt{1-K} + \sqrt{2K}[\delta_n * h_n]).\exp(j\omega_c n)$$

- Partiel centré en  $\omega_c$
- $K$  proportion de bruit
- $\delta_n$  bruit blanc
- $h_n$  réponse impulsionnelle (enveloppe du bruit)



# Modèles Sinus+Attaques+Bruit

STN Verma/Smith

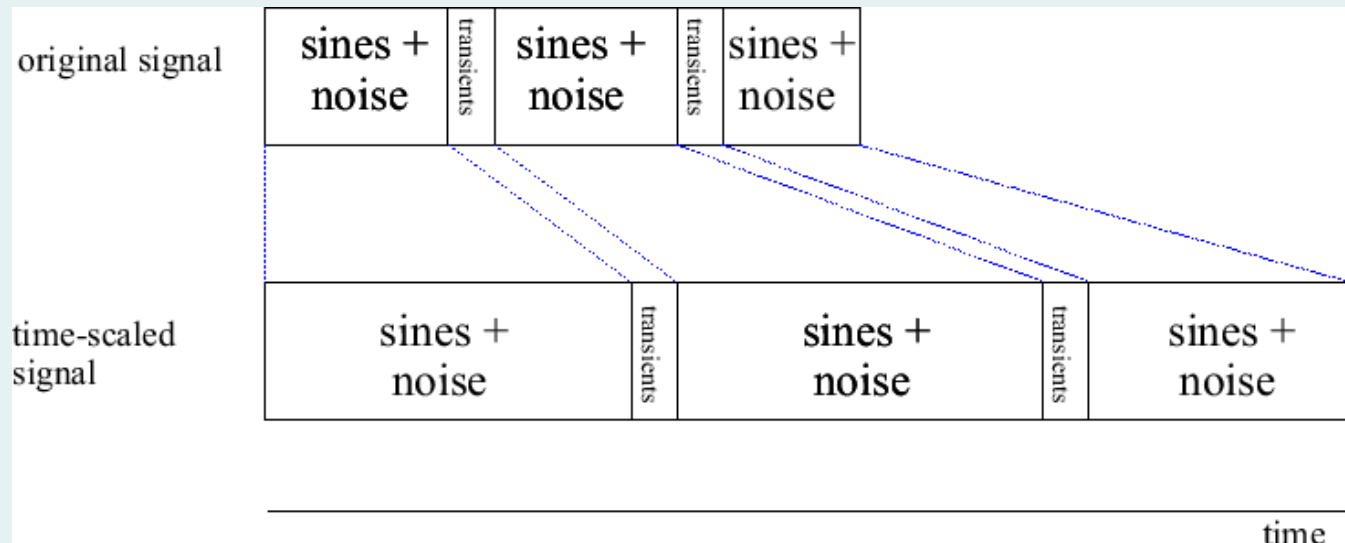


# Modèles Sinus+Attaques+Bruit

Autre approche (Nsabimana/Zölzer 2008)

- Détection précise des transitoires
- Supression
- Extrapolation du signal pour combler les *trous*

Applications :





# *Modèles Sinus+Attaques+Bruit*

---

## Exemples

- Analyse
- Etirement temporel

