

US332S Conception sonore

Audio numérique

Cours 3 Réverbération et modulation

Matthias Puech

`matthias.puech@lecnam.net`

Master 1 JMIN — Cnam ENJMIN, Angoulême

19 mars 2019

Audio Numérique

Délais et réverbération

- Retard simple

- Retard “multi-tap”

- Réverbération par convolution

- Réverbération algorithmique

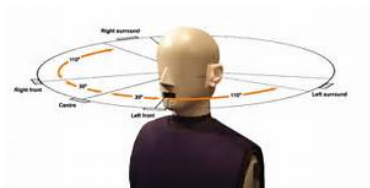
Modulation

- Modulation en anneau

- Rééchantillonnage

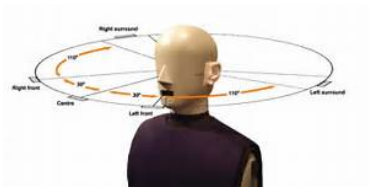
- Retard modulé

La spatialisation



Ensemble d'algorithmes visant à recréer artificiellement la réverbération naturelle du son dans l'espace, et la perception de la localisation de sources sonores.

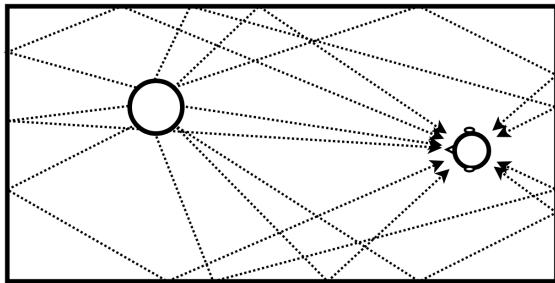
La spatialisation



Ensemble d'algorithmes visant à recréer artificiellement la réverbération naturelle du son dans l'espace, et la perception de la localisation de sources sonores.

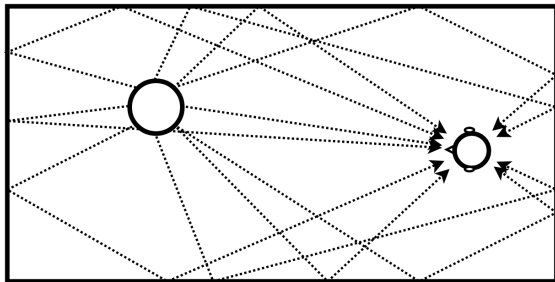
- effet d'écho ou de réverbération
- absorption du son dans l'air et dans les matériaux
- différence d'amplitude et de délai inter-aural
- multi-diffusion, techniques binaural
- ...

Le modèle physique (corpusculaire)



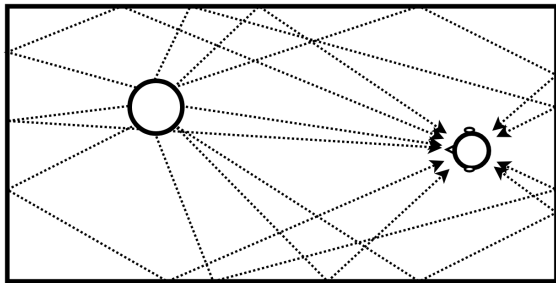
- le son se propage en ligne droite dans toutes les directions (comme la lumière, mais à 340m/s)

Le modèle physique (corpusculaire)



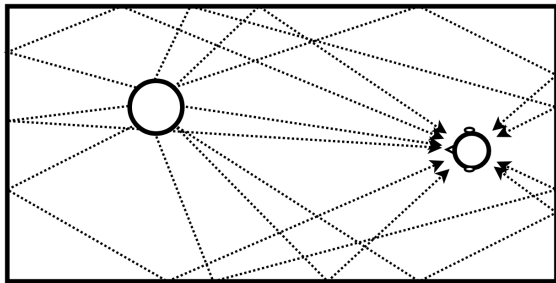
- le son se propage en ligne droite dans toutes les directions (comme la lumière, mais à 340m/s)
- l'air absorbe une partie de la vibration

Le modèle physique (corpusculaire)



- le son se propage en ligne droite dans toutes les directions (comme la lumière, mais à 340m/s)
- l'air absorbe une partie de la vibration
- lorsqu'il rencontre une surface il est absorbé *et* réfracté (la proportion d'absorption/réfraction dépend du matériau)

Le modèle physique (corpusculaire)



- le son se propage en ligne droite dans toutes les directions (comme la lumière, mais à 340m/s)
- l'air absorbe une partie de la vibration
- lorsqu'il rencontre une surface il est absorbé *et* réfracté (la proportion d'absorption/réfraction dépend du matériau)
- l'absorption dépend de la fréquence (les hautes fréquences sont plus atténuées que les basses)

Le modèle physique (corpusculaire)

Ray tracing

Chaque “rayon de son” source → oreille a :

- une amplitude
(son atténué par l'air et les rebonds)
- une atténuation des hautes fréquences
- un retard par rapport à la source
(proportionnel à sa longueur)

Le modèle physique (corpusculaire)

Ray tracing

Chaque “rayon de son” source → oreille a :

- une amplitude
(son atténué par l'air et les rebonds)
- une atténuation des hautes fréquences
- un retard par rapport à la source
(proportionnel à sa longueur)

L'oreille entend donc :

- le son direct
- puis les réflexions
(plus retardées et atténuées avec la distance)

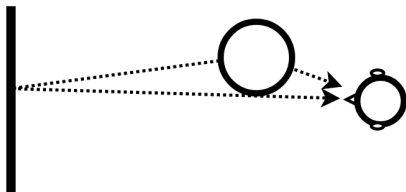
Perception et localisation dans l'espace

Le cerveau localise une source sonore selon plusieurs indices :

- amplitude du son direct p/r au son réverbéré
(*dry/wet*)
- différence d'amplitude d'une oreille à l'autre
(la tête absorbe une partie des vibrations)
- retard inter-aural
(le son met du temps pour aller d'une oreille à l'autre)

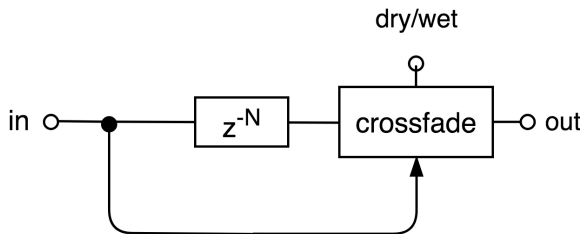
Retard simple [12.delay.pd]

Un premier modèle simple : une source, une oreille et un mur



Retard simple [12.delay.pd]

Graphe de flot de signal



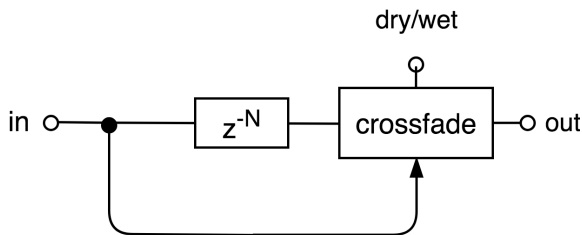
dry/wet règle la proportion signal direct/réverbéré

N règle le temps de délai en sample

(si d distance en mètres, $N = 340 \times d \times f_s$)

Retard simple [12.delay.pd]

Graphe de flot de signal



dry/wet règle la proportion signal direct/réverbéré

N règle le temps de délai en sample

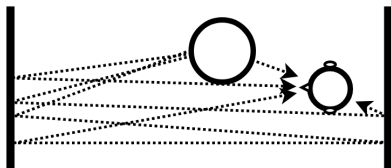
(si d distance en mètres, $N = 340 \times d \times f_s$)

Quiz

Quelle réponse impulsionnelle ?

Retard simple avec rétroaction [13.delay-feedback.pd]

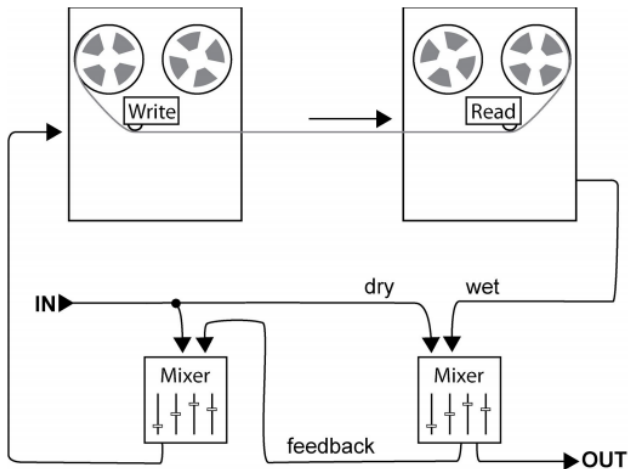
Si l'on rajoute un mur, le rayon sonore rebondit infiniment :



Il est atténué à chaque rebond
(et éventuellement filtré)

Retard simple avec rétroaction

[13.delay-feedback.pd]

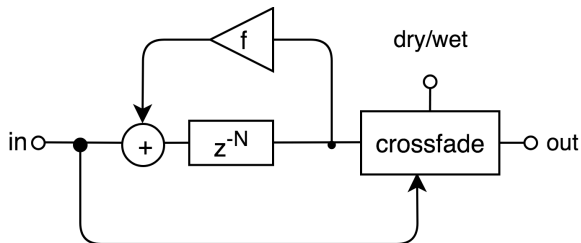


cf. Robert Fripp, *Frippertronics*

<https://www.youtube.com/watch?v=kaKgJ9DqxhE>

Retard simple avec rétroaction [13.delay-feedback.pd]

Graphe de flot de signal



dry/wet règle la proportion signal direct/réverbéré

N règle le temps de délai en sample

f règle l'atténuation à chaque rebond

($f = 0$ atténuation maximum ; $f = 1$ pas d'atténuation \rightsquigarrow répétition infinie)

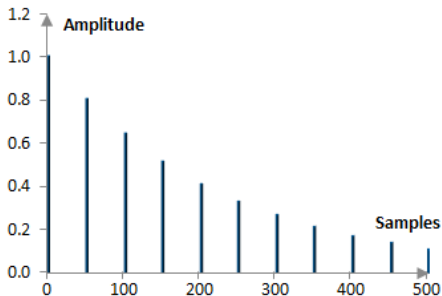
Quiz

Quelle réponse impulsionnelle ?

Quiz

Quelle réponse impulsionnelle ?

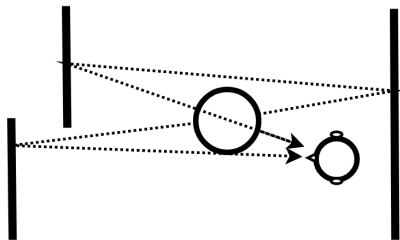
Réponse



La même que le filtre en peigne mais avec un retard plus long !

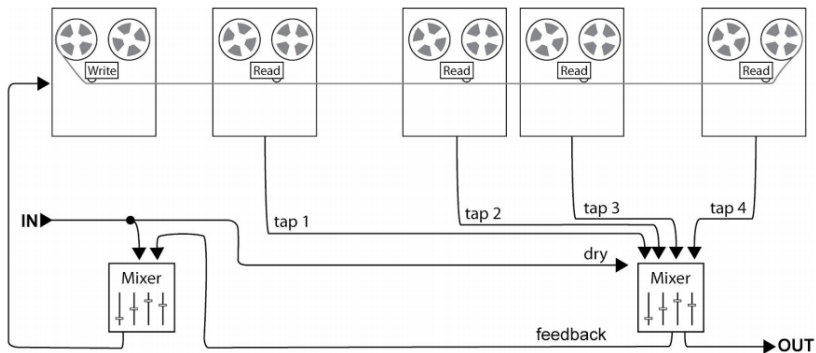
Retard “multi-tap” [13.delay-multitap.pd]

Le retard simple répète l'entrée à intervalle régulier (echo)
En rajoutant un mur virtuel on peut “densifier” la réponse
impulsionnelle pour s'approcher d'une queue de réverbération



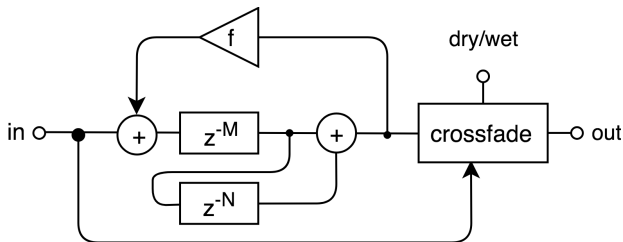
On peut pour cela chaîner et sommer les retards

Retard “multi-tap” [13.delay-multitap.pd]



Retard “multi-tap” [13.delay-multitap.pd]

Graphe de flot de signal



dry/wet règle la proportion signal direct/réverbéré

M, N règle les temps de délai en sample

f règle l'atténuation à chaque rebond

($f = 0$ atténuation maximum ; $f = 1$ pas d'atténuation \rightsquigarrow répétition infinie)

Retard “multi-tap” [13.delay-multitap.pd]

Quiz

Quelle réponse impulsionnelle ?

(astuce : fixer $M = 10$, $N = 2$ et $f = 0.5$)

Retard “multi-tap” [13.delay-multitap.pd]

Quiz

Quelle réponse impulsionnelle ?

(astuce : fixer $M = 10$, $N = 2$ et $f = 0.5$)

Exemple

$M = 10, N = 2$ impulsions aux samples 0 (son direct) 10, 12, 14, 16, 18, 20, ...

$M = 10, N = 3$ impulsions aux samples 0 (son direct) 10, 13, 16, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 27 ...

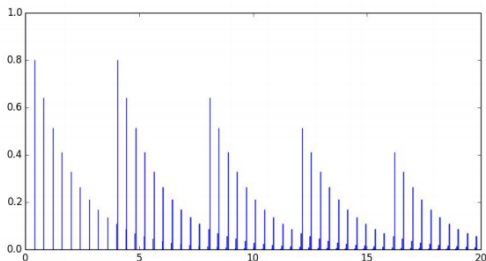
Réponse impulsionnelle du retard “multi-tap”

En variant le nombre de délais chaînés (“*taps*”) et le rapport de leur temps, on crée des réponses impulsionnelles plus ou moins denses

Réponse impulsionnelle du retard “multi-tap”

En variant le nombre de délais chaînés (“*taps*”) et le rapport de leur temps, on crée des réponses impulsionnelles plus ou moins denses

Exemples

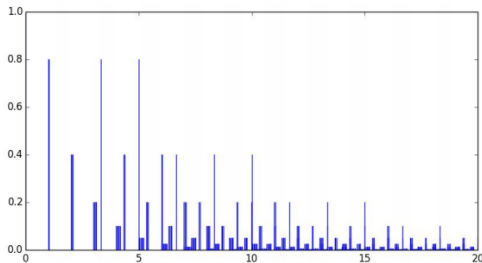


deux *taps*, un petit et un grand

Réponse impulsionnelle du retard “multi-tap”

En variant le nombre de délais chaînés (“*taps*”) et le rapport de leur temps, on crée des réponses impulsionnelles plus ou moins denses

Exemples

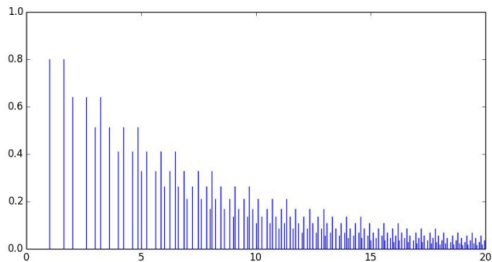


deux *taps* de temps proches (mais pas égaux)

Réponse impulsionnelle du retard “multi-tap”

En variant le nombre de délais chaînés (“*taps*”) et le rapport de leur temps, on crée des réponses impulsionnelles plus ou moins denses

Exemples

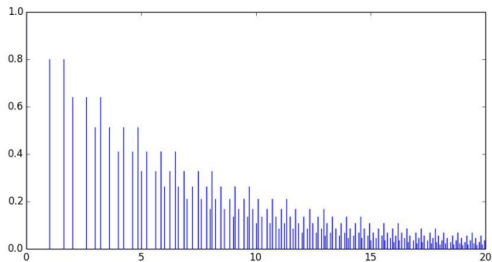


deux *taps* aux temps premier entre eux

Réponse impulsionnelle du retard “multi-tap”

En variant le nombre de délais chaînés (“*taps*”) et le rapport de leur temps, on crée des réponses impulsionnelles plus ou moins denses

Exemples



deux *taps* aux temps premier entre eux

Problème ouvert

Comment choisir M et N pour obtenir une RI qui se densifie vite ?
(comme la réverbération dans une pièce)

Réponse impulsionnelle de salle réelle

La réverbération dans une salle est un filtre
(aucun élément non-linéaire).

Réponse impulsionnelle de salle réelle

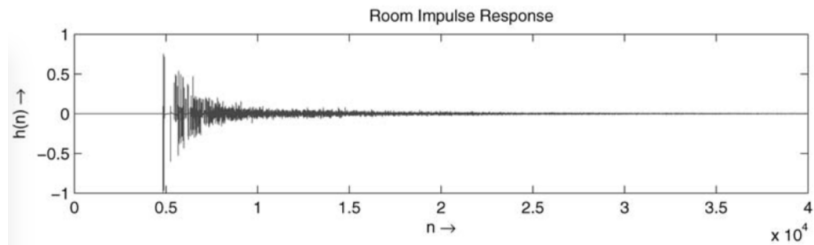
La réverbération dans une salle est un filtre
(aucun élément non-linéaire).

Elle est facilement mesurable :

- on y envoie une impulsion puissante et soudaine
(tir de pistolet, ballon qui explose)
- on enregistre les echos
(auxquels on retire le son direct)

Réponse impulsionnelle de salle réelle

Exemple



Réverbération par convolution [14.convolution-reverb]

Rappel

La convolution permet d'appliquer un filtre :

signal d'entrée * RI du filtre = signal filtré

Réverbération par convolution [14.convolution-reverb]

Rappel

La convolution permet d'appliquer un filtre :

signal d'entrée * RI du filtre = signal filtré

On peut donc appliquer la réverbération d'une salle réelle à un signal $x[n]$ en calculant la convolution $x[n] * h[n]$ de ce signal avec la réponse impulsionnelle

↪ réverb à convolution

Rappel

La convolution permet d'appliquer un filtre :

$$\text{signal d'entrée} * \text{RI du filtre} = \text{signal filtré}$$

On peut donc appliquer la réverbération d'une salle réelle à un signal $x[n]$ en calculant la convolution $x[n] * h[n]$ de ce signal avec la réponse impulsionnelle

↪ réverb à convolution

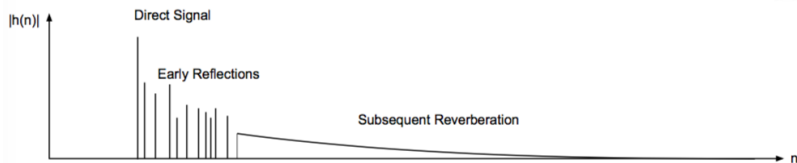
- + effet très réaliste
- + expérimentations possibles avec des sons quelconques
- la convolution est chère en temps de calcul
(utilisation intensive du CPU)
- peu de paramètres pour régler l'effet

Réverbérations algorithmiques

L'ensemble des traitements qui simulent la réverbération uniquement avec les briques de base vues précédemment (pas d'enregistrement de salle réel)

Réverbérations algorithmiques

L'ensemble des traitements qui simulent la réverbération uniquement avec les briques de base vues précédemment (pas d'enregistrement de salle réel)



On cherche à concevoir un filtre qui a une RI similaire à une pièce :

- signal direct
- premières réflexions éparses
- densification de l'IR en une queue de reverb homogène

bonus deux sorties (stéréo) décorellées

Conception de réverbération algorithmique

Un art plutôt qu'une science : de nombreux choix de design et paramètres à régler.

Ingrédients

- retards *multi-tap*
(simulation des premières réflexions)
- filtres passe-tout
(diffuseurs de signal)
- filtres en peigne
- retards modulés
(voir plus loin)

Conception de réverbération algorithmique

Il y a peu de documentation et beaucoup de mystère autour de l'implémentation de réverbs commerciaux (Eventide, Lexicon etc.)

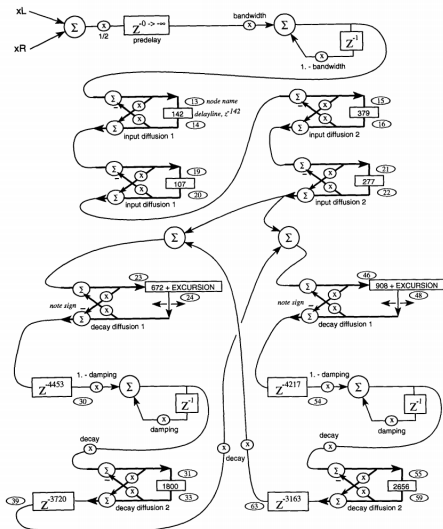


Fig. 1. Simplified plate-class reverberation topology in the style of Griesinger. For output tap structure (y_L, y_R) see Table 2. Delay-line taps at nodes 24 and 48 are modulating.

Audio Numérique

Délais et réverbération

Retard simple

Retard “multi-tap”

Réverbération par convolution

Réverbération algorithmique

Modulation

Modulation en anneau

Rééchantillonnage

Retard modulé

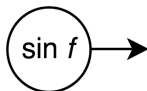
Modulations

Ensemble de traitement comprenant la variation d'un paramètre au cours du temps par un *oscillateur*

Modulations

Ensemble de traitement comprenant la variation d'un paramètre au cours du temps par un *oscillateur*

Nouvelle brique de base



Émet un signal sinusoïdal de fréquence f (en Hz)

- si $f > 20\text{Hz}$, la sinusoïde est audible
- si $f < 50\text{Hz}$, on parle d'oscillateur basse fréquence (*Low Frequency Oscillator*, LFO)

Modulation en anneau [15-ringmod.pd]

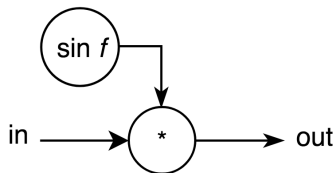
Traitement utilisé en radio pour (dé-)multiplexer un signal audio
("modulation d'amplitude" ou *AM*)

Modulation en anneau [15-ringmod.pd]

Traitement utilisé en radio pour (dé-)multiplexer un signal audio (“modulation d’amplitude” ou *AM*)

Principe

Le signal d’entrée est multiplié par une sinusoïde de fréquence f



- si $f < 50\text{Hz}$ on entend un tremolo
- si $f > 20\text{Hz}$ on a un effet “dalek”

Modulation en anneau [15-ringmod.pd]

Exemple d'utilisation créative

Utilisation d'un modulateur de Bode par Karlheinz Stockhausen —
Mantra (1970) <https://www.youtube.com/watch?v=vQ4jQyTHU-4>

Modulation en anneau [15-ringmod.pdf]

Exemple d'utilisation créative

Utilisation d'un modulateur de Bode par Karlheinz Stockhausen —
Mantra (1970) <https://www.youtube.com/watch?v=vQ4jQyTHU-4>

Effet sur le spectre

On obtient 2 copies du spectre du signal modulé
(*bandes latérales*) :

- une décalée de la fréquence porteuse ($1000\text{Hz} + y$)
- une décalée et retournée ($1000\text{Hz} - y$)

Rééchantillonnage

Lectur d'un enregistrement à une vitesse différente de celle à laquelle il a été enregistré.

Exemples

- 44.1 kHz \rightarrow 48 kHz
- modification en temps réel du temps d'un retard

Rééchantillonnage

Lectur d'un enregistrement à une vitesse différente de celle à laquelle il a été enregistré.

Exemples

- 44.1 kHz → 48 kHz
- modification en temps réel du temps d'un retard

Interpolation

Quand on rééchantillonne un signal, il faut “inventer” des valeurs de samples qui sont entre les samples originaux

Rééchantillonnage

Lectur d'un enregistrement à une vitesse différente de celle à laquelle il a été enregistré.

Exemples

- 44.1 kHz \rightarrow 48 kHz
- modification en temps réel du temps d'un retard

Interpolation

Quand on rééchantillonne un signal, il faut “inventer” des valeurs de samples qui sont entre les samples originaux

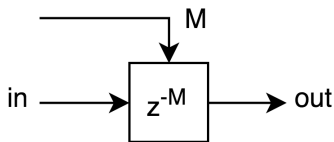
\rightsquigarrow *interpolation*

Plusieurs algorithmes, tous imparfaits (comme les filtres) :

- linéaire, (bon marché, passe-bas)
- spline,
- sinc ...

Retard variable

Nouvelle brique de base



Prend en entrée le temps de retard voulu
(qui peut varier dans le temps)

Chorus & flanger [16-flanger.pd]

- flanger** lecture du même enregistrement par deux lecteurs de bandes magnétique ; comme leurs vitesses varient on a déphasage progressif
(cf. Steve Reich, *It's Gonna Rain*)
- chorus** mixage du signal original et d'une version retardée, dont le temps de retard est modulé, avec rétroaction
(pédale de guitare, effet stéréo)

Chorus & flanger [16-flanger.pd]

flanger lecture du même enregistrement par deux lecteurs de bandes magnétique ; comme leurs vitesses varient on a déphasage progressif

(cf. Steve Reich, *It's Gonna Rain*)

chorus mixage du signal original et d'une version retardée, dont le temps de retard est modulé, avec rétroaction (pédale de guitare, effet stéréo)

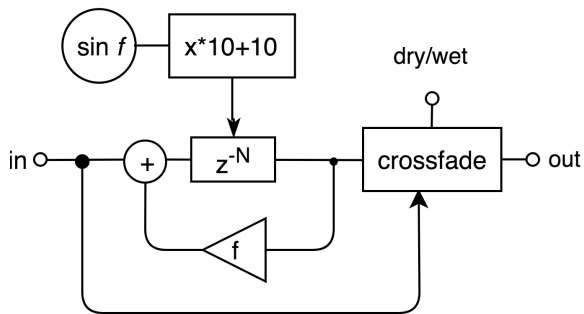
↔ deux effets similaires ; ne varient que par leur temps de retard et leur intensité :

flanger grande amplitude de modulation (± 100 ms), fréquence faible (≈ 0.1 Hz)

chorus petite amplitude de modulation (± 10 ms), fréquence plus élevée (≈ 1 Hz)

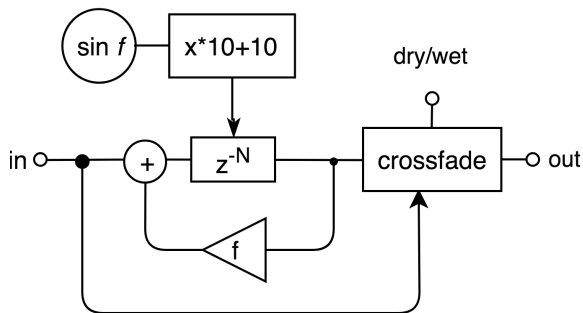
Chorus & flanger [16-flanger.pd]

Grphe de flot



Chorus & flanger [16-flanger.pd]

Grappe de flot



- temps de délai entre 0 et 20 samples
(très faible ; on n'entendra presque rien !)
- que se passe-t-il si $f=1$?