

**Titre :** Traitement du signal. Analyse spectrale

**Présentée par :** Raphaël Aeschlimann

**Rapport écrit par :** Theo Le Bret

**Correcteur :** Jeremy Neveu

**Date :** 20/10/2020

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
Fourier Optics	Goodman	
Poly d'électronique	J. Neveu	
Expériences d'optique	Sextant	

## Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : L3

Pré-requis : Fonction de transfert ; optique de Fourier ; analyse de Fourier

Intro : « signal » notion très large (signal optique, acoustique). On cherche à dégager des notions générales sur la composition et le traitement de signaux de différentes natures, optiques, électroniques et numériques.

### I. Composition spectrale d'un signal

Définition d'un signal : Grandeur physique dont les variations codent l'information.

« Traitement » : amplification, conversion, contrôle, compression, analyse, filtrage...

Ici on se focalise sur le filtrage et la conversion analogique-numérique.

#### 1) Signaux périodiques : décomposition en série de Fourier

Signal périodique,  $f(t) = f(t+T)$ ,  $T$  période ; on décompose en série de Fourier: différentes harmoniques, multiples entiers d'un fondamental. Information du signal contenue dans ces harmoniques. (Attention ! Soit on introduit une phase dans le cos, soit on met une amplitude complexe.)

Diapo: série de Fourier pour signal créneau

#### 2) Signal non-périodique : transformée de Fourier

Définition de la TF et de la TF inverse, notion de « fréquence spatiale ».

Diapo : fréquences spatiales et filtrage d'une image : un « passe-bas » rend les contours moins nets : les hautes fréquences spatiales codent donc les variations de contraste sur les faibles distances.

Transition : on a ici un signal optique (image) que l'on veut filtrer par un passe-haut → analogie électronique

## II. Traitement : filtrage analogique

1) Filtre passe-haut électronique Schéma du RC passe-haut, étude de sa réponse harmonique : calcul de fonction de transfert, gain et déphasage, diagramme de Bode. Manip : utilisation du diagramme de Bode pour trouver la fréquence de coupure du filtre : avec qtiplot, on ajuste la courbe de déphasage en fonction de la fréquence.

2) Filtrage optique : montage d'Abbe

Diapo : schéma de l'expérience d'Abbe.

Dans les conditions de diffraction de Fraunhofer, l'image de l'objet diffractant par le dispositif est faite sur un plan appelé plan de Fourier : on y observe la transformée de Fourier spatiale de l'objet diffractant (plus précisément de sa transmittance). On peut donc se servir de ce plan pour effectuer un « filtrage spatial », c'est-à-dire placer un cache au niveau de ce plan afin de supprimer certaines fréquences spatiales de l'image finale. On illustre ce filtrage en plaçant un cache circulaire au centre du plan de Fourier, ce qui effectue un « passe-haut », et se traduit par une image aux bords nets (fréquences élevées) dont la « couleur de fond » (basses fréquences) est retirée.

Diapo : Analyse de Fourier d'une maille cristalline, permettant de trouver les paramètres de la maille et de détecter des défauts dans la structure.

Transition : ici, la transformée de Fourier n'est pas effectuée par un montage optique mais par un ordinateur → Fast Fourier Transform et traitement numérique du signal.

## III. Traitement numérique

1) Avantages et inconvénients

+ Immunité au bruit

+ Mémorisation, robustesse à la copie

- limites de mémoire donc de résolution, « besoin d'une grande bande passante »

- problèmes d'échantillonnage

2) Critère de Shannon-Nyquist

Diapo : analogie entre problème d'échantillonnage et de repliement de spectre et effet stroboscopique.

Lorsqu'on échantillonne un signal analogique à une fréquence inférieure aux fréquences les plus élevées présentes dans son spectre, le spectre du signal numérisé présentera un repliement, c'est-à-dire qu'il présentera des harmoniques non contenues dans le spectre analogique, dues au mauvais choix de fréquence d'échantillonnage : on utilise donc le « critère de Shannon »,  $f_{\text{échantillon}} > 2 f_{\text{max}}$ , avec  $f_{\text{max}}$  fréquence la plus élevée contenue dans le spectre à numériser.

3) Conversion analogique-numérique

- échantillonnage

- quantification

- représentation

4) FFT à l'oscilloscope numérique

On calcule la « transformée de Fourier discrète » du signal en utilisant l'algorithme de Cooley et Tukey permettant un calcul de complexité  $O(N \log N)$

Conclusion : Application de l'analyse spectrale pour la détermination des contraintes sur un cristal, ou encore la reconnaissance faciale.

## Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

La reconnaissance faciale, ça marche comment ?

On effectue un filtrage des basses fréquences pour obtenir les « traits saillants », puis on donne ça à un algorithme de machine learning.

« Anti-aliasing », c'est quoi ?

Filtre passe-bas qui se débarrasse de l'effet de « crénelage » d'une image numérisée

« Compression » d'un signal ? Un format jpeg, c'est quoi ?

Pas répondu

Décomposition de l'image sur une base de fonctions « ondelettes » et on ne garde que les poids les plus forts

C'est quoi le « contrôle du signal » ?

Idem

Comment est faite la TF puis le filtrage dans le cas de l'anti-aliasing ?

FFT puis filtrage numérique

Expliquer l'expérience d'Abbe ?

Dans les conditions de Fraunhofer (objet à l'infini dont on observe l'image à l'infini).

On « observe » la transformée de Fourier de la transmittance de l'objet diffractant au niveau du plan de Fourier, et on effectue le filtrage en plaçant des caches ou diaphragmes sur ce plan.

Pourquoi « gain à 3 db » ?

Valeur pour laquelle la puissance est réduite de 1/2.

« Besoin d'une grande bande passante pour le numérique » C'est vraiment un « inconvénient » ? La mémorisation est plutôt un avantage ? Peu clair, et potentiellement porte à confusion pour des élèves.

On a parlé de problèmes liés à l'échantillonnage : et le bruit de quantification ?

Sait pas... (Voir Poly d'électronique, chapitre numérique)

« Enseigner le numérique » ?

Sujet peu traité lors des cursus de physique « classiques », mais de plus en plus central dans la recherche et les applications, donc une introduction au niveau L3 est utile.

## Commentaires lors de la correction de la leçon

*(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)*

Leçon qui fait trop « conférence », beaucoup de choses présentées mais on n'est pas certain de savoir quel est le contenu qui doit être retenu par l'élève.

Plan ok, mais mieux réfléchir à ce qu'on cherche à enseigner avec cette leçon : par exemple, si on aborde pour la première fois les problèmes de traitement numérique du signal, définir ce qu'est un signal numérique (binaire) et les étapes de son traitement.

Si les filtres et leurs fonctions de transfert ont déjà été vus, alors étrange de passer du temps à refaire le RC passe-haut en détail (voir commentaire précédent), surtout si le filtrage optique spatial est fait aussi rapidement ensuite.

Éviter le jargon (TF au lieu de transformée de Fourier, par exemple).

Passer plus de temps à décrire et expliquer le montage d'Abbe et l'optique de Fourier, les concepts compliqués doivent être expliqués et les manip bien décrites.

## Partie réservée au correcteur

### **Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :**

Ok pour le plan, mais il faut précisément définir ce qui est censé être su avant la leçon, et enseigné pendant celle-ci. C'est bien de faire le passe-haut avant le filtrage optique (qui est aussi passe-haut) mais autant détaillé le calcul comme si les étudiants ne savaient pas le faire alors que Abbe et le numérique sont faits au pas de charge est étrange. Aussi si le cours est une intro au numérique, il faut l'introduire pédagogiquement (codage de l'information en 0 et 1, etc...).

### **Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :**

Sur 40 minutes, il faut aborder au choix : filtrage analogique (filtre électronique, ou optique mais attention c'est haut niveau), numérique (signal numérique, FFT, CAN-CNA, filtre numérique, convolution, corrélation, etc.), filtrage non-linéaire (modulation, démodulation, détection synchrone). Un panachage de ces notions est intéressant, mais il n'est pas possible de tout traiter. Le numérique est à considérer au niveau débutant je pense, ainsi que les filtres non-linéaires.

### **Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :**

Filtres RC, RLC

Radio (démodulation, modulation)

Exploration de la FFT

Abbe

Expériences numériques (plaquettes de la collection (peu sont quantitatives), codes python pour traiter un signal numérique (images, son, vecteur quelconque))

### **Bibliographie conseillée :**

Poly de cours, livres de PSI