

Instrumentation avancée

Partie 1 : Acquisition de données et analyse spectrale

Auteur : Christophe Ayrault

Enseignants : Guqi Yan, Valentin Zornotti

Université du Maine, Licence SPI 2ème année

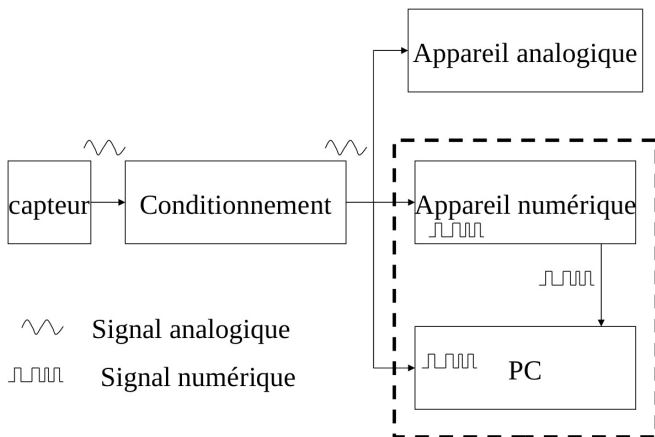
Décembre 2012, MAJ 2015



Généralités

- Contexte :

- L1 SPI : instrumentation (chaîne d'excitation et de mesure),
- L2 SPI : acquisition et traitement des données (après le conditionnement)



Généralités

- 3 parties :
 - Acquisition et traitement des données : Guqi Yan, Valentin Zornotti
 - 4h cours - TD
 - 8h TP : enregistrement de données, caractéristiques d'une carte d'acquisition, analyse spectrale en bandes fines et n-ième d'octave, analyse de système.
 - Interfaçage des appareils numériques et interface virtuelle (LabView) : Emmanuel Malandin
 - Codage des signaux : Florent Carlier

Généralités sur l'acquisition et le traitement des données

- Propos génériques valables pour un analyseur portable ou un système carte d'acquisition et logiciel d'analyse ("analyseur") sur PC :
- Même philosophie ou procédure avec pour éventuels changements :
 - les noms des commandes
 - leur organisation dans les menus ou sur la façade de l'appareil ou de l'écran
- Dénomination commune : **analyseur**
- Techniquement :
 - Boîtiers externes autonomes, cartes d'acquisition externes ou internes au PC et traitement sur PC
 - Différentes gammes fréquentielles d'analyse :
 - analyseurs de réseaux ou de spectre : jusqu'à 100 *MHz* ou *GHz*
 - analyseurs "audio" : jusqu'à 100 *kHz*
 - Nombre de voies d'acquisition variable : 1, 2, 4, 8, 16 ...

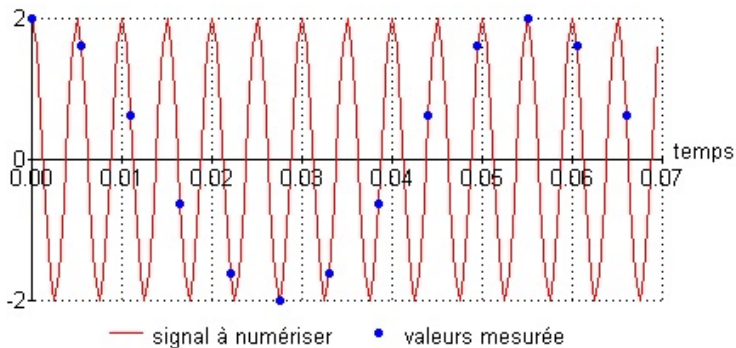
Organisation des menus pour une acquisition

- Réglages des entrées (*input*) : conditionnement du signal
- Type de mesure (*measurement*) : conditionnement du calcul
- Affichage (*display*) : visualisation, outils de mesure
- Postraitement (*maths*) : opérations mathématiques
- Outils système (*system*) : stockage, gestion des données pour impression, export ...

Préalable : numérisation d'un signal

• Echantillonnage

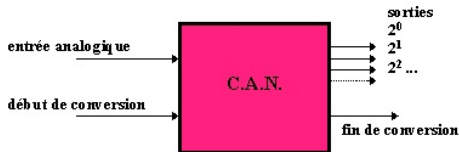
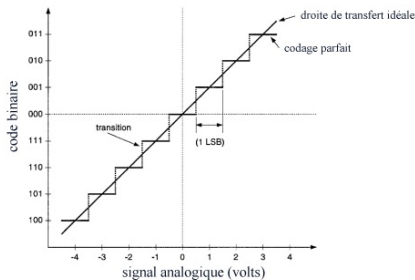
- prise d'échantillons à intervalles de temps réguliers T_e
- fréquence d'échantillonnage $f_e = \frac{1}{T_e}$



Préalable : numérisation d'un signal

● Quantification

- conversion analogique / numérique (CAN) : attribution d'une valeur approchée de la valeur du signal à chaque temps kT_e
- Gamme d'entrée de la carte d'acquisition $\pm \Delta V$
- Nombre de bits : N
- pas de quantification : $\delta V \simeq \frac{2\Delta V}{2^N}$
- dynamique de la carte : $20 \log \left(\frac{2\Delta V}{\delta V} \right) = 6N$



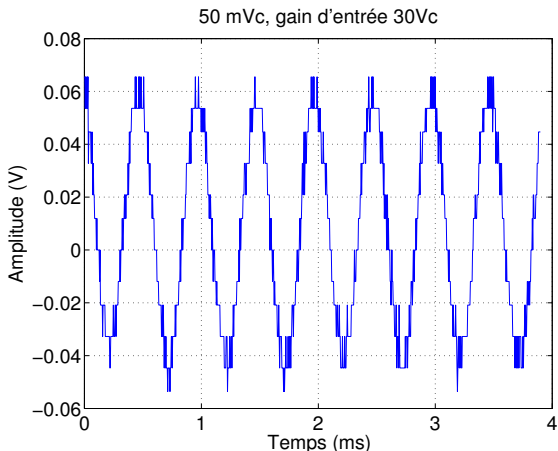
Les entrées

- Dynamique d'entrée
- Synchronisation
- Couplage
- Entrées flottantes
- Repliement
- Sensibilité
- Alimentation des capteurs

Les entrées

• Dynamique d'entrée :

- Objectif : avoir la dynamique la mieux adaptée au signal, soit le meilleur Rapport Signal sur Bruit (RSB) possible
- Exemple de sinus Quid ? Nombre de bits de l'analyseur ?

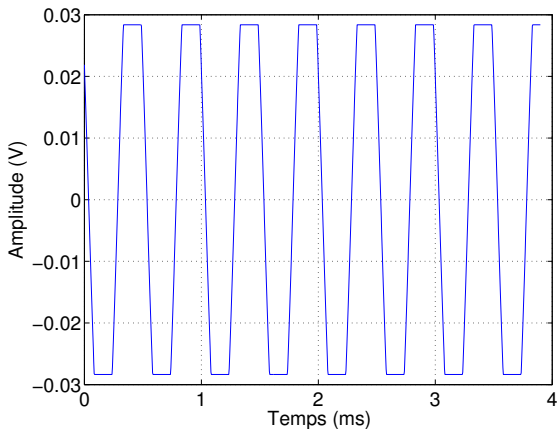


Les entrées

- **Dynamique d'entrée :**

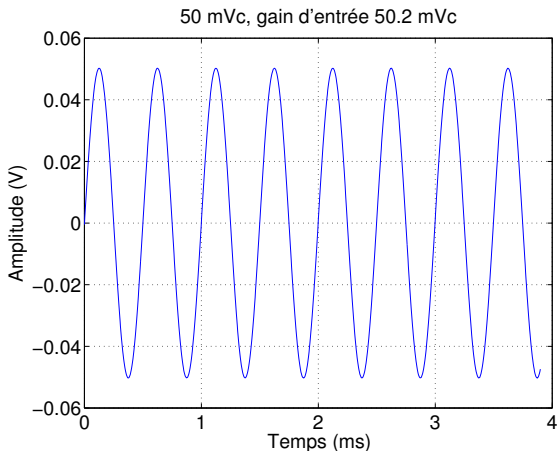
- Autre exemple de sinus

Quid ? (50 mVc, gain d'entrée = 20 mVc)



Les entrées

- **Dynamique d'entrée :**
 - Autre exemple de sinus



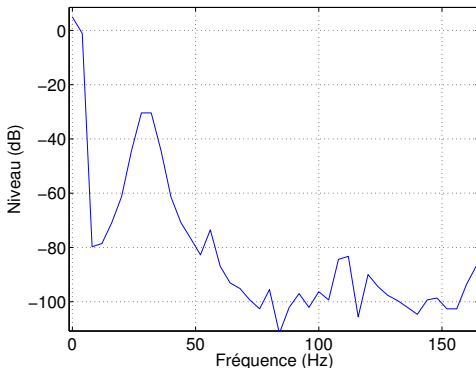
Les entrées

- **Dynamique d'entrée :**
 - réglage de la dynamique (*range*) automatique :
 - *down*: évite d'avoir une quantification trop faible (*underload*)
 - *up* : évite d'avoir une saturation (écrêtage) (*overload*)
 - *up and down* : évite les deux
 - réglage de la dynamique (*range*) manuelle : très utile pour un signal non stationnaire (marteau d'impact (impulsion) dans les études vibratoires ...)

• EXERCICES 1 ET 2

Les entrées

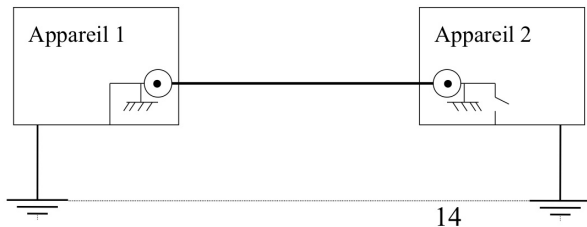
- **Couplage AC/DC** (Alternative / Direct component)
 - AC : retire la composante continue
 - DC : conserve le signal tel quel
- Impact d'un offset sur le spectre : exemple de sinus (30 Hz, 50 mV_{cac}, offset = 500 mV).



Les entrées

- **Entrées flottantes (float)** : permet de déconnecter la masse des entrées du chassis relié à la terre pour supprimer l'impact des boucles de masse.

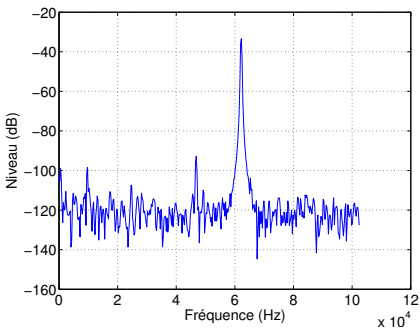
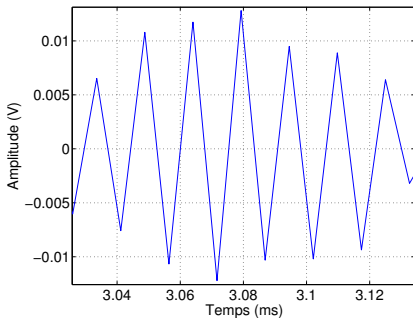
NB : sur un analyseur, chaque entrée flottante est indépendante.



Les entrées

- **Filtre anti-repliement (Anti-aliasing) :**

- Exemple de sinus : $f_e = 262 \text{ kHz}$; sinus à $f_0 = 200 \text{ kHz}$

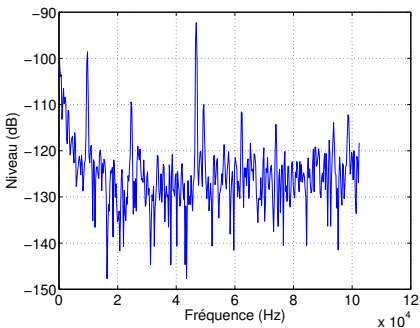
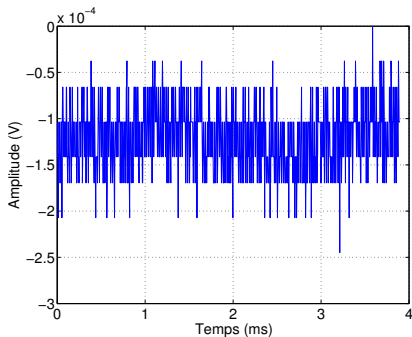


Avec ou sans FAR ? Quelle fréquence mesure-t-on ?

Les entrées

- **Filtre anti-repliement (Anti-aliasing)**

- Exemple de sinus : $f_e = 262 \text{ kHz}$; sinus à $f_0 = 200 \text{ kHz}$

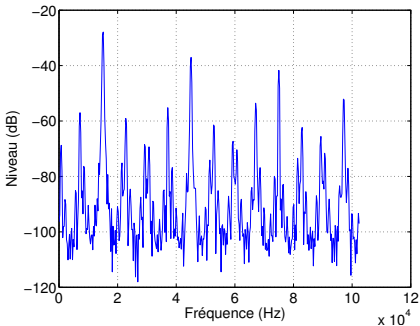
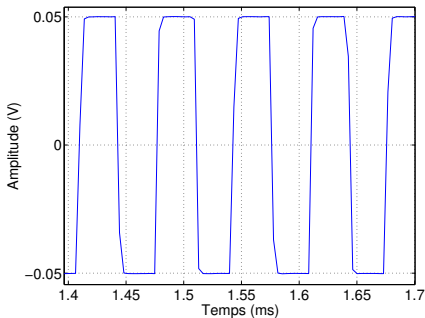


Avec ou sans FAR ? Niveau d'atténuation à f_0 ?

Les entrées

- **Filtre anti-repliement (Anti-aliasing)**

- Exemple de signal carré : $f_e = 262 \text{ kHz}$, $f_0 = 15 \text{ kHz}$,

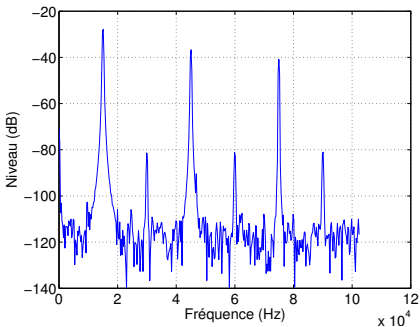
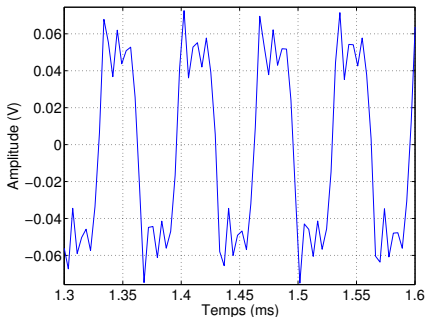


Avec ou sans FAR ?

Les entrées

- **Filtre anti-repliement (Anti-aliasing)**

- Exemple de signal carré : $f_e = 262 \text{ kHz}$, $f_0 = 15 \text{ kHz}$,



Avec ou sans FAR ?

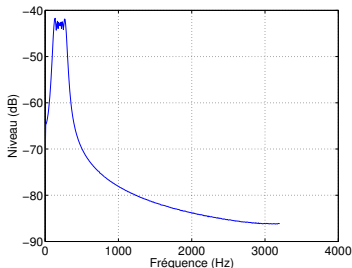
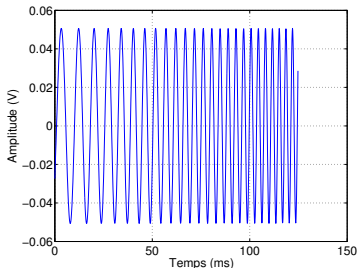
EXERCICE 4

Les entrées

- **Synchronisation (trigger) :**

- libre (bruit blanc ...)
- sur le signal (front montant ou descendant, niveau de seuil de déclenchement) : existence d'un pré-trigger qui affiche ce qui précède le seuil de déclenchement.
- externe (EXT) : sur le signal TTL du générateur.

- Exemple avec un chirp [100 - 920] *Hz* synchronisé. NB : La fenêtre temporelle de l'analyseur ne permet pas ici de visualiser l'ensemble du signal temporel qui a une durée plus longue ici. L'analyseur, synchrone avec le signal, voit donc ici le début du signal et il rate la fin, d'où une analyse spectrale limitée.

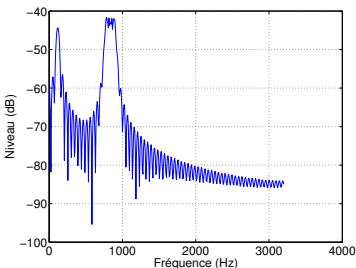
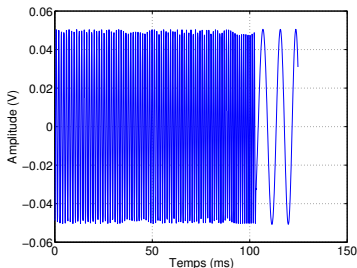


Les entrées

● Synchronisation (trigger) :

- libre (bruit blanc ...)
- sur le signal (front montant ou descendant, niveau de seuil de déclenchement) : Existence d'un pré-trigger qui affiche ce qui précède le seuil de déclenchement.
- externe (EXT) : sur le signal TTL du générateur.

- Exemple avec un chirp [100 - 920] Hz non synchronisé. NB : ici, l'analyseur, non synchrone avec le signal, voit par exemple la fin du signal et le début, il rate le milieu, d'où une analyse spectrale erronée.



Les entrées

- **Sensibilité :**

- sur certains systèmes, il est possible de réaliser une calibration des capteurs. La grandeur affichée est alors directement la grandeur physique mesurée (pression ...)

- **Alimentation des capteurs :**

- les systèmes récents fournissent l'alimentation pour les capteurs ICP qui ne nécessitent pas de pré-amplificateur en plus

Conditionnement du calcul

- Signaux d'excitation
- Fenêtrage
- Gamme fréquentielle d'études
- Précision
- Moyennage

Conditionnement du calcul

• Signaux d'excitation

- Fonction source de l'analyseur ou carte d'acquisition / génération :
 - génération et acquisition synchrones sur une carte
 - synchronisation à choisir sur un analyseur (*source trigger*)

• Grandeurs basiques (rappels)

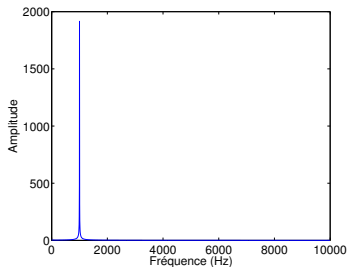
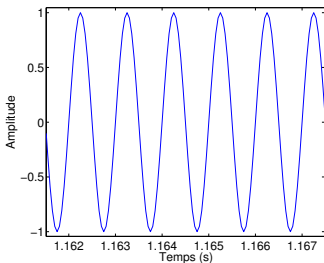
- valeur crête : valeur maximale
- valeur crête-à-crête : différence entre valeurs max et min
- valeur moyenne $\frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$,
- valeur efficace : $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} = \sqrt{P} = \sqrt{\frac{E}{T}}$,
 $E = \int_0^T x(t)^2 dt$ est l'énergie du signal fournie sur une durée donnée,
 $P = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt$ est la puissance du signal,
- facteur de crête (1 / Rapport Signal sur Bruit (RSB)) :
$$F_c = 20 \log \left(\frac{A_{max}}{A_{eff}} \right)$$

Conditionnement du calcul

- **Signaux d'excitation [Meynial2001]**

- **Sinus :**

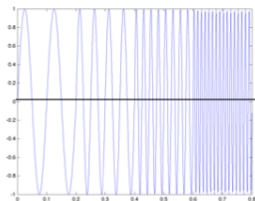
- énergie concentrée à une fréquence, meilleur RSB possible, facteur de crête F_c le plus faible (3 dB)



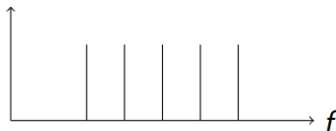
Conditionnement du calcul

- **Signaux d'excitation [Meynial2001]**

- Dérivé du sinus : **sinus glissant** à variation de fréquence discrète
 - + : mêmes caractéristiques que le sinus, utilisé quand on veut une très grande précision sur une largeur de bande donnée
 - - : long



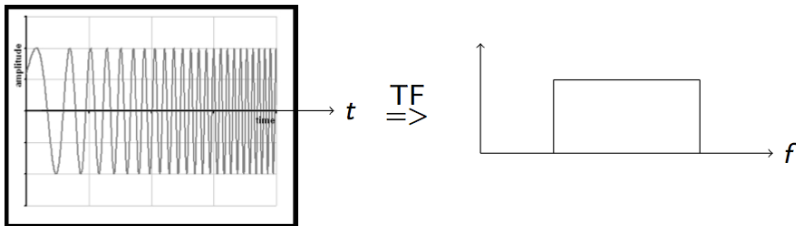
$t \xRightarrow{TF}$



Conditionnement du calcul

- **Signaux d'excitation [Meynial2001]**

- Dérivé du sinus : **chirp** ou sinus glissant à variation de fréquence continue
 - + : mêmes caractéristiques que le sinus, rapide
 - - : ne pas utiliser pour une grande précision

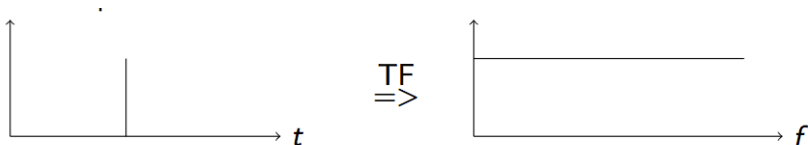


Conditionnement du calcul

- **Signaux d'excitation [Meynial2001]**

- Impulsion en théorie : **Dirac**

- + : simple et rapide, adaptée aux études temporelles (temps de vol ...)
 - - : énergie répartie sur toutes les fréquences, RSB faible, facteur de crête F_c le plus élevé (plusieurs dizaines de dB)

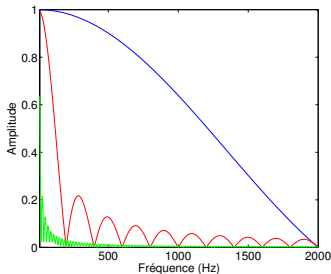
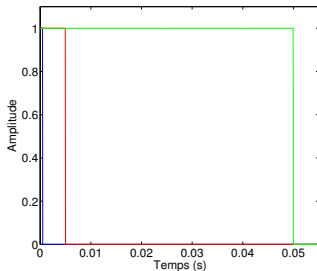


Conditionnement du calcul

- **Signaux d'excitation [Meynial2001]**

- Impulsion en pratique : **fenêtre rectangle**

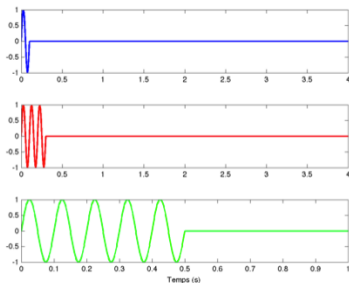
- + : on peut adapter la largeur de bande
 - - : plus elle est large, plus F_c diminue. Attention, le spectre est normalisé ici, mais il décroît en amplitude quand la largeur diminue. Voir transparent suivant.



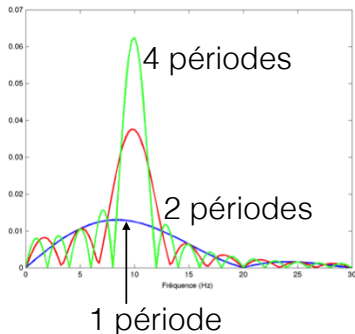
Conditionnement du calcul

• Signaux d'excitation [Meynial2001]

- Impulsion en pratique : centrée autour d'une fréquence, **burst** ou salves de N périodes de sinus
 - + : on peut adapter la largeur de bande,
 - - : plus elle est large, plus F_c diminue.



TF
 \Rightarrow

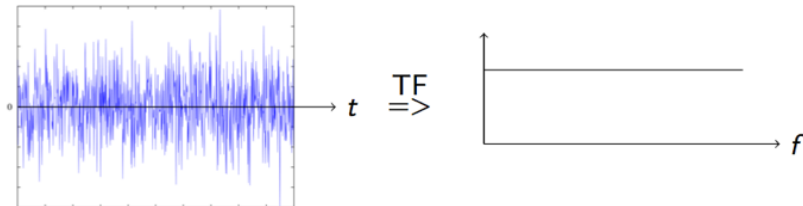


Conditionnement du calcul

- **Signaux d'excitation [Meynial2001]**

- **Bruit** : exemple du bruit blanc

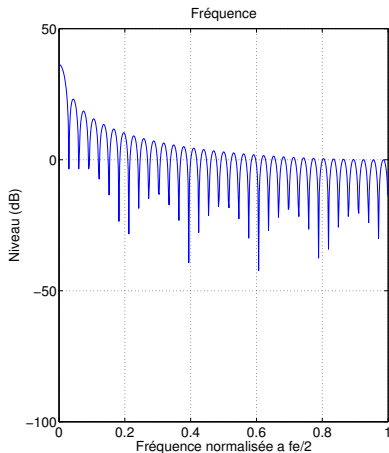
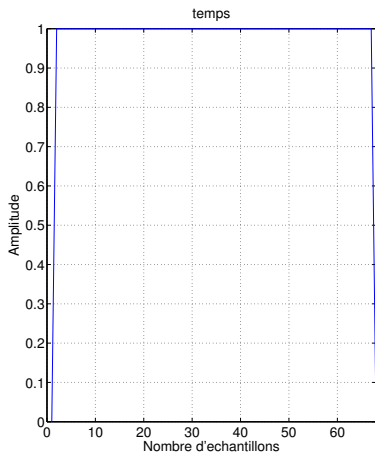
- + : large bande, rapide,
 - - : $F_c \simeq 20dB$ assez élevée



Conditionnement du calcul

• Fenêtrage

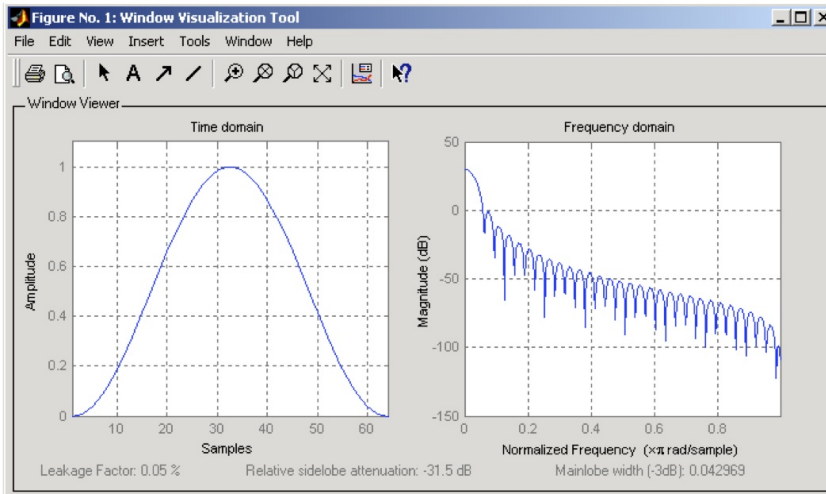
- Fenêtrage par défaut : fenêtre rectangle $f(n) = 1$



Conditionnement du calcul

- Fenêtrage

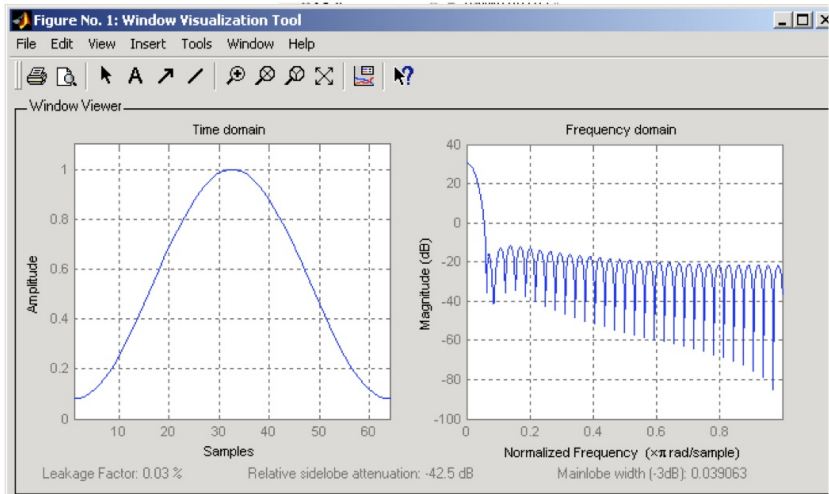
- Fenêtre de hanning $f(n) = 0.5 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right) \right]$



Conditionnement du calcul

- Fenêtrage

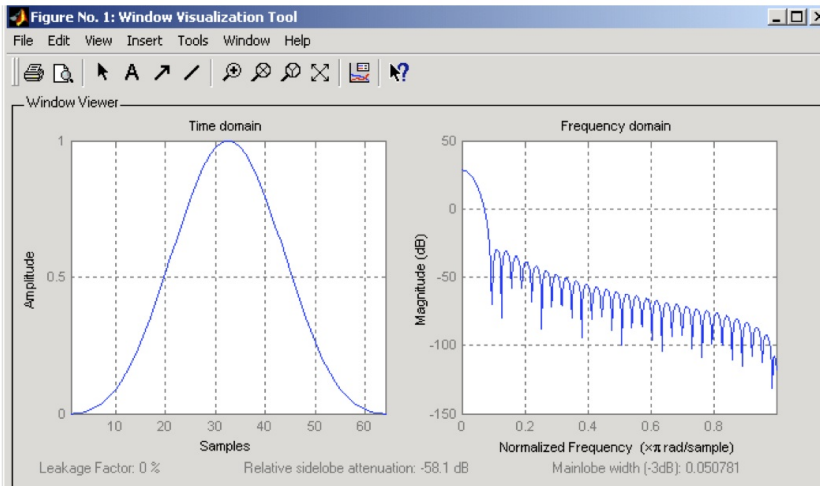
- Fenêtre de hamming $f(n) = 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$



Conditionnement du calcul

- Fenêtrage

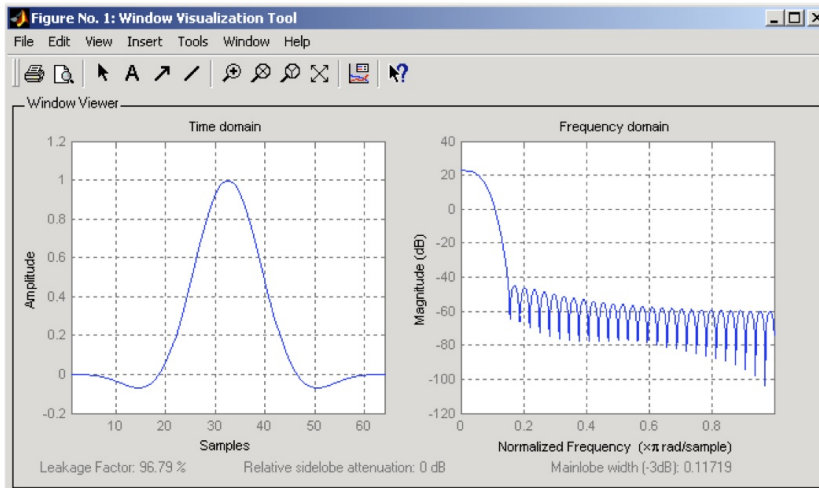
- Fenêtre de blackmann $f(n) = \sum_{k=1,2} a_k \cos\left(\frac{2k\pi n}{N}\right)$



Conditionnement du calcul

- Fenêtrage

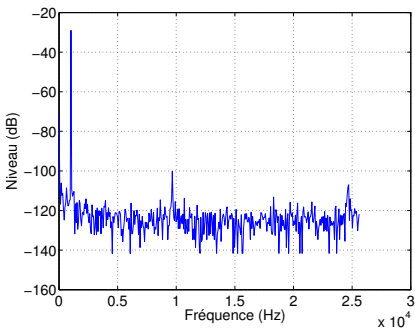
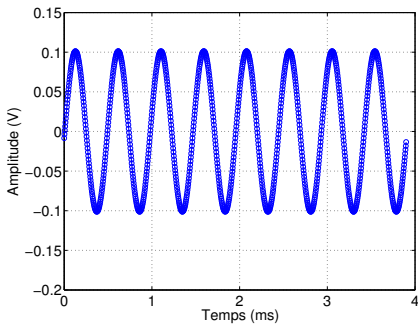
- Fenêtre flattop $f(n) = \sum_{k=1-4} a_k \cos\left(\frac{2k\pi n}{N}\right)$



Conditionnement du calcul

- **Fenêtrage**

- Sinus 1024 Hz, fenêtre rectangle

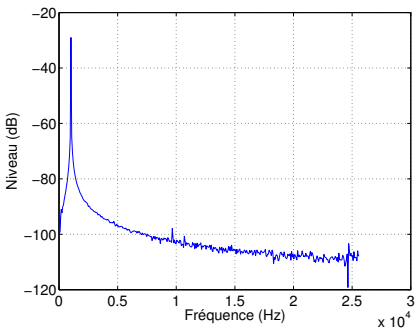
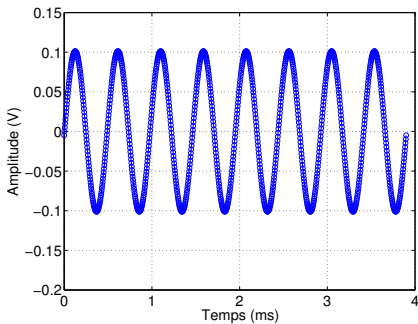


Fenêtre adaptée ou pas ? Pourquoi ?

Conditionnement du calcul

- **Fenêtrage**

- Sinus 1025 Hz, fenêtre rectangle

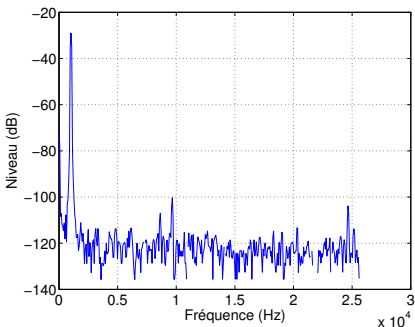
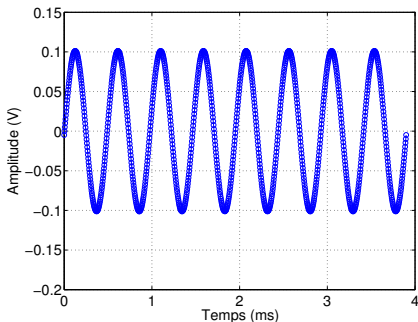


Fenêtre adaptée ou pas ? Pourquoi ?

Conditionnement du calcul

- **Fenêtrage**

- Sinus 1025 Hz, fenêtre hanning

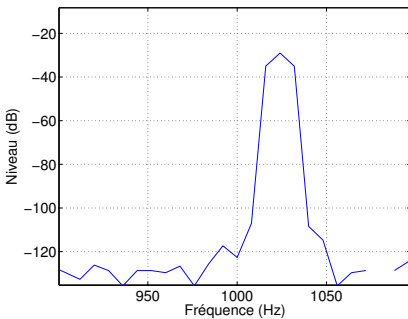
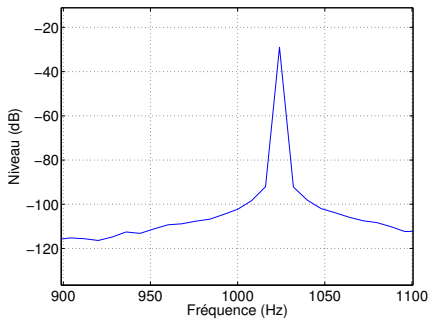


Lobes secondaires beaucoup plus faibles que ceux de la fenêtre rectange :
=> resserrement de l'information autour de la fréquence souhaitée.
Lobe central plus large : + ou - suivant l'objectif

Conditionnement du calcul

• Fenêtrage

- Sinus 1024 Hz, fenêtre rectangle / hanning



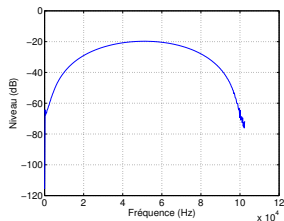
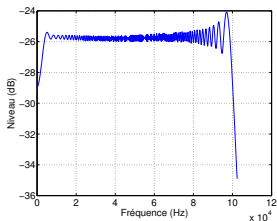
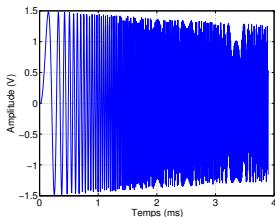
rectangle: meilleure "précision" en fréquence, moins bonne precision en amplitude

hanning : le contraire (flattop idéale pour l'amplitude)

Conditionnement du calcul

- **Fenêtrage**

- chirp fenetre [0 - 102] kHz
- Fenêtres ? :



Pour un signal **fini (non stationnaire)**, la fenêtre rectangle s'impose.

Conditionnement du calcul

- **Fenêtrage : résumé**

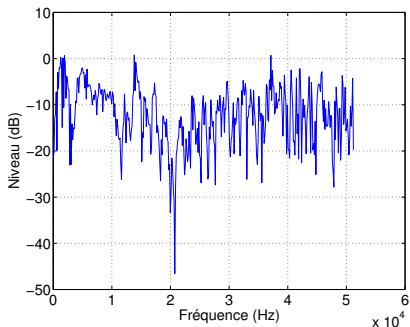
- **Signaux stationnaires** (sinus, sinus glissant à variations de fréquence discrète, bruits) : **fenêtre de type hanning** (hamming, blackman, ...)
- **Signaux non stationnaires** et/ou finis (chirp, impulsions (fenêtre, burst)) : **fenêtre de type rectangle** (force, exponentielle)
- Système résonant :
 - estimation d'une fréquence de résonance : fenêtre de type rectangle (lobe central étroit)
 - estimation de l'amplitude d'une résonance : fenêtre flattop (lobe central large)

Conditionnement du calcul

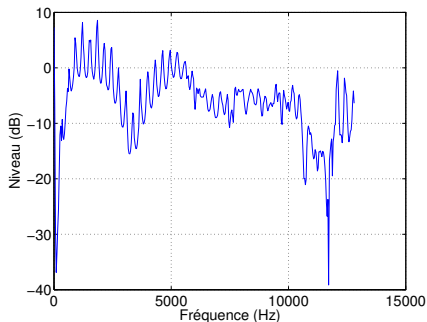
● Gamme fréquentielle d'études

- A adapter au signal d'excitation et au système étudié (dynamique fréquentielle)
- Exemple : système excité par un haut-parleur médium dans la gamme fréquentielle :

50 kHz



12 kHz



Conditionnement du calcul

• Précision

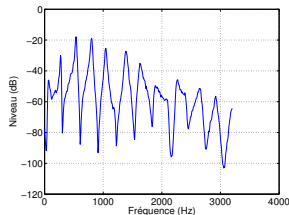
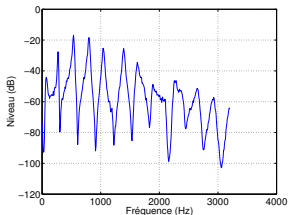
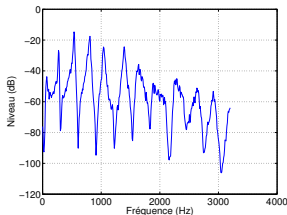
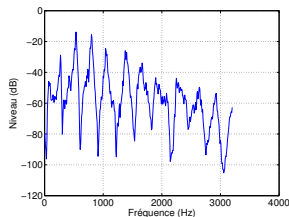
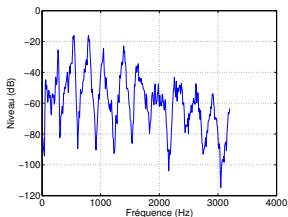
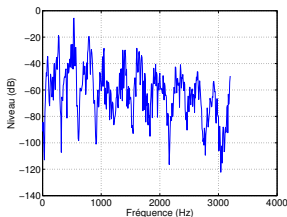
- Nombre de points N :
 - Transformée de Fourier discrète (TFD) sur un signal temporel de durée T avec N points \Rightarrow spectre de N points de 0 à f_{ech}
- Pas fréquentiel Δf :
 - $\Delta f = \frac{f_{ech}}{N} = \frac{1}{T}$
 - Analyseurs :
 - 1 voie : $N=2048$ points pour la TFD \Rightarrow spectre (jusqu'à $f_{ech}/2$) de 800 points en raison de la coupure du FAR
 - 2 voies : valeurs divisées par 2.
 - Carte d'acquisition : N est quelconque ...
- Précision : $\frac{\Delta f}{2}$
 - Pour augmenter la résolution (i.e. diminuer le pas fréquentiel Δf), on peut diminuer f_{ech} ou augmenter N . Pour diminuer Δf , on peut aussi augmenter artificiellement la durée du signal en rajoutant des zéros (zéro-padding). La résolution n'est cependant pas améliorée car l'on ne pourra pas extraire d'informations plus fines que le Δf initial.

• EXERCICE 3

Conditionnement du calcul

• Moyennage

- Essentiellement destiné aux signaux aléatoires
- 1, 5, 10, 20, 50, 100 moyennes



Conditionnement du calcul

• Moyennage

- Quelques dizaines de moyennes seulement sont nécessaires. Au-delà, l'écart-type ne diminue plus (ou trop lentement).
- Un moyennage d'un facteur 2 augmente le RSB de 3 dB.
- $RSB = 10 \log \left(\frac{P_{signal}}{P_{bruit}} \right)$ avec $P_{s,b} = \sigma_{s,b}^2$ la puissance et $\sigma_{s,b}$ l'écart type du signal ou du bruit :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_k [x(k) - \bar{x}]^2$$

Conditionnement du calcul

• Analyse temporelle

- signal $x(t)$,
- autocorrélation :
$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t - \tau)dt = TFD^{-1}(\textit{Densite Spectrale Puissance})$$
- intercorrélation :
$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t - \tau)dt = TFD^{-1}(\textit{Interspectre})$$
- ...

Conditionnement du calcul

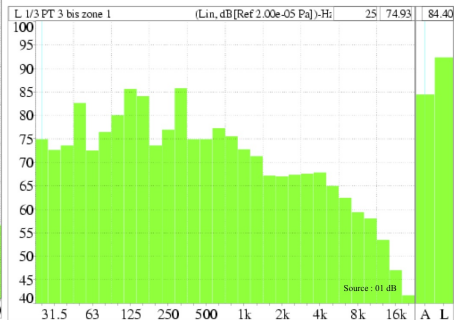
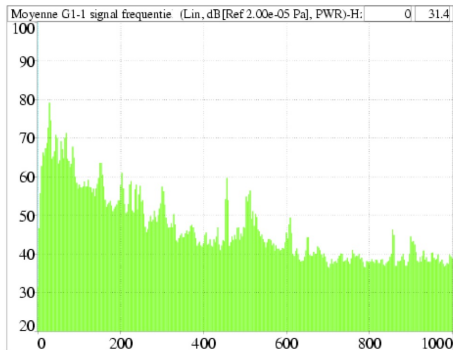
• Analyse fréquentielle

- spectre bandes fines $X = |X|e^{j\phi}$:
complexe, module et phase (sens de la phase ?)
- spectre par bandes $(1/n)$ -ième d'octave :
 - bandes de fréquences $[f_0 * \frac{1}{2^{1/2n}}; f_0 * 2^{1/2n}]$ centrées en $2^{1/n} * f_0$,
 - $n=1$: bande d'octave
 - $n=3$: bande tiers d'octave
 - Energie dans une bande : $X_{bande} = \sqrt{\sum_i X_i^2}$
 - Energie totale : $X_{total} = \sqrt{\sum_{bandes} X_{bandes}^2}$

Conditionnement du calcul

- **Analyse fréquentielle**

- Exemple de spectres bandes fines et tiers d'octave :



EXERCICE 5

Conditionnement du calcul

- **Analyse fréquentielle**

- Densité Spectrale de Puissance (DSP) :

$$G_{XX} = \frac{XX^*}{N} = \frac{|X|^2}{N} \text{ (unité de } X^2 \text{ ou unité de } X^2.s^{-1}\text{), réel}$$

- Interspectre de deux signaux :

$$G_{XY} = \frac{XY^*}{N} = |X||Y|e^{j(\phi_X - \phi_Y)} \text{ complexe (amplitude et phase)}$$

Conditionnement du calcul

• Analyse fréquentielle

• Fonction de Réponse en Fréquence

• Notion de **SYSTEME LINEAIRE INVARIANT** :

entrée : $x(t)$,

sortie : $y(t)$,

effet du système caractérisé par sa réponse impulsionnelle $h(t)$

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau)h(\tau)d\tau$$

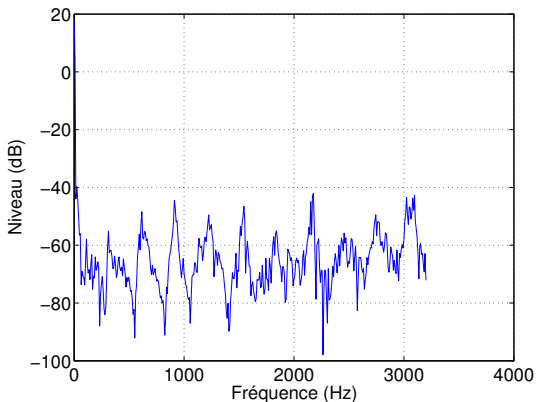
$$Y(f) = X(f)H(f)$$

- La phase d'un spectre seul n'ayant pas de référence, la FRF $H(f)$ est ainsi calculée : $H(f) = \frac{G_{XY}(f)}{G_{XX}(f)}$ (ou $\frac{G_{YY}(f)}{G_{YX}(f)}$)
- Exemple de système :
un haut-parleur émet dans un tuyau. Deux microphones sont placés dans le tuyau.
Entrée du système : un microphone,
Sortie : l'autre microphone

Conditionnement du calcul

- **Analyse fréquentielle**

- Fonction de Réponse en Fréquence
 - Exemple de système : première mesure de FRF



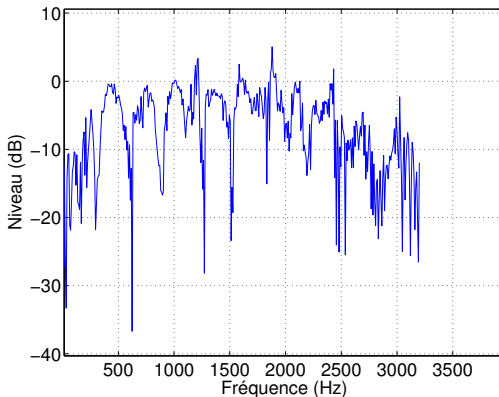
Que doit-on penser de cette FRF ? ...

Conditionnement du calcul

- **Analyse fréquentielle**

- Fonction de Réponse en Fréquence

- Exemple de système : deuxième mesure de FRF



... et de celle-ci ?

Conditionnement du calcul

• Analyse fréquentielle

- Fonction de Réponse en Fréquence

- Seule la **cohérence** peut renseigner sur la validité de la FRF [BK1984]

$$COH = \frac{|G_{XY}|^2}{G_{XX} G_{YY}}$$

- $COH \in [0 - 1]$.

Si $COH = 0$, la FRF n'a pas de sens

Si $COH \simeq 1$, la FRF a du sens

- Si bruit $b(t)$ à la sortie ou à l'entrée : $COH \simeq \frac{1}{1 + \frac{G_{BB}}{G_{YY} \text{ ou } XX}}$.

COH tend vers 0 si les signaux sont noyés dans le bruit par exemple ou s'il n'y a pas linéarité entre entrée et sortie (G_{YY} représente ici la part du signal de sortie linéairement reliée à l'entrée).

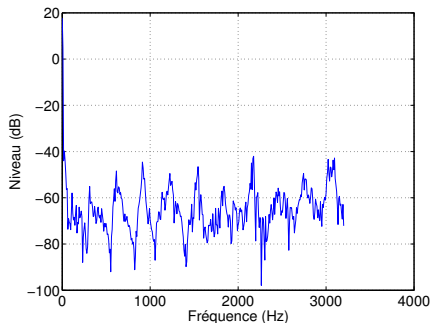
Conditionnement du calcul

• Analyse fréquentielle

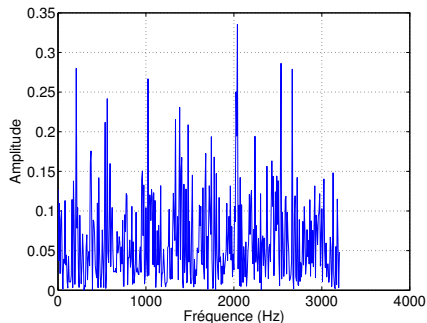
- Fonction de Réponse en Fréquence

- Exemple de système, première mesure de FRF ... microphone débranché ...

FRF



COH



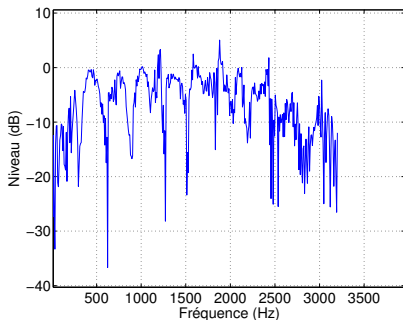
Conditionnement du calcul

- **Analyse fréquentielle**

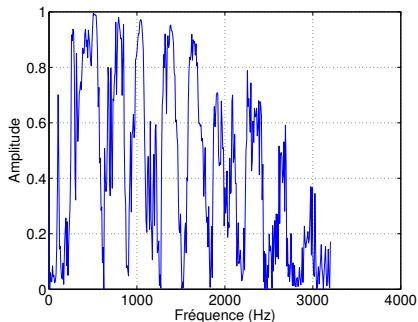
- Fonction de Réponse en Fréquence

- Exemple de système, deuxième mesure de FRF ... niveau d'émission très faible et fenêtre rectangle

FRF



COH



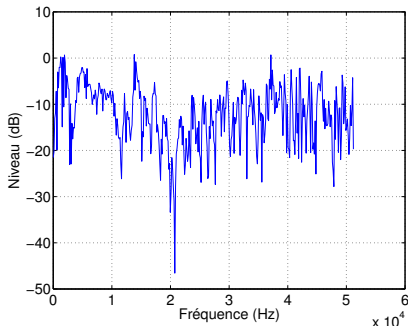
Conditionnement du calcul

• Analyse fréquentielle

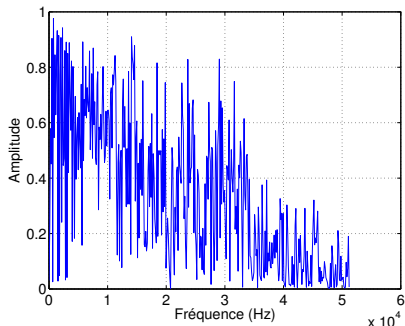
• Fonction de Réponse en Fréquence

- Dans quelle bande analyser le système si on ne le connaît pas ?
- 50 kHz ?

FRF



COH



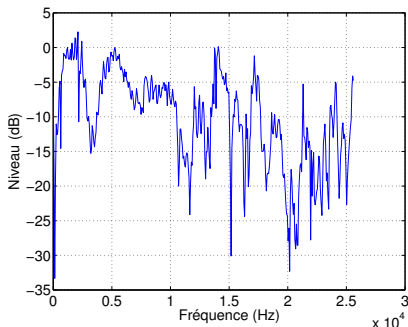
Conditionnement du calcul

• Analyse fréquentielle

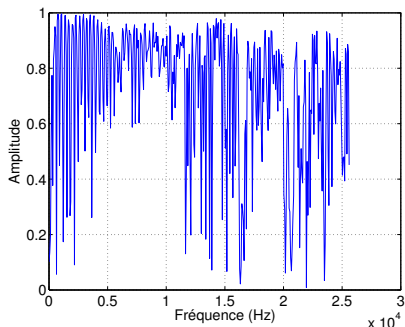
• Fonction de Réponse en Fréquence

- Dans quelle bande analyser le système si on ne le connaît pas ?
- 25 kHz ?

FRF



COH



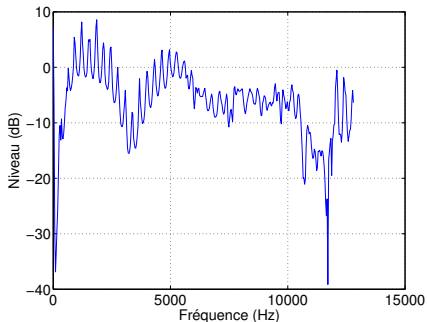
Conditionnement du calcul

• Analyse fréquentielle

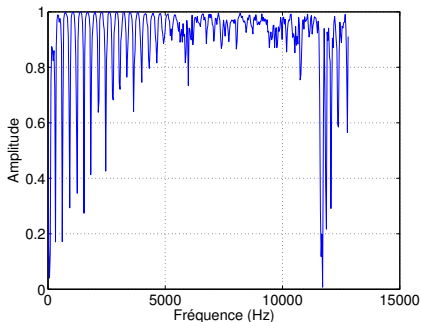
• Fonction de Réponse en Fréquence

- Dans quelle bande analyser le système si on ne le connaît pas ?
- 12 kHz ?

FRF



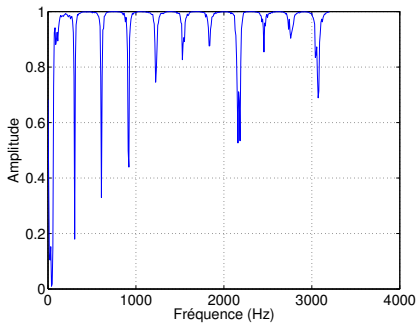
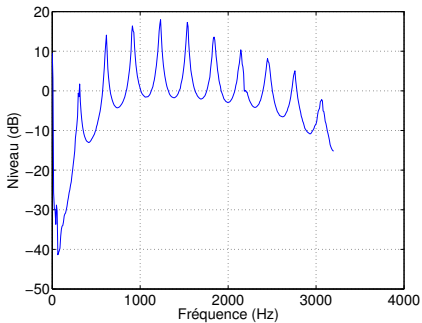
COH



Conditionnement du calcul

- **Analyse fréquentielle**

- Fonction de Réponse en Fréquence
 - Effet de la fenêtre : excitation en bruit blanc, fenêtre de hanning



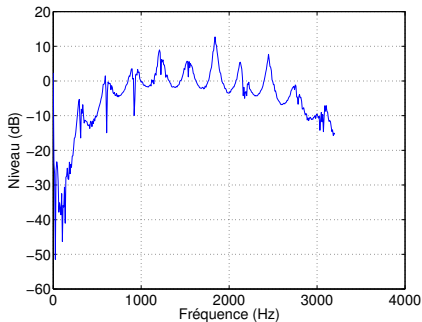
Conditionnement du calcul

- **Analyse fréquentielle**

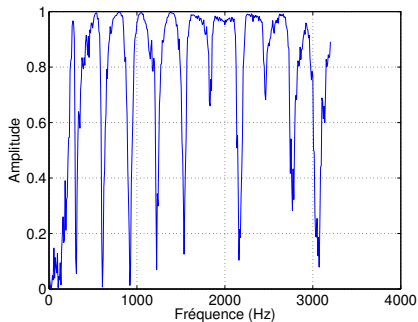
- Fonction de Réponse en Fréquence

- Effet de la fenêtre : excitation en bruit blanc, fenêtre rectangle

FRF



COH



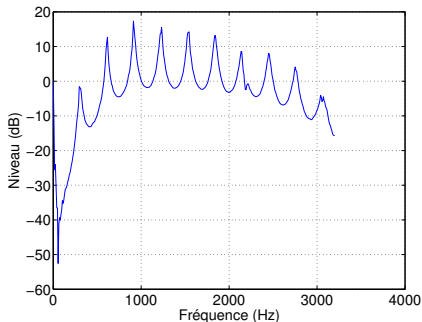
Conditionnement du calcul

• Analyse fréquentielle

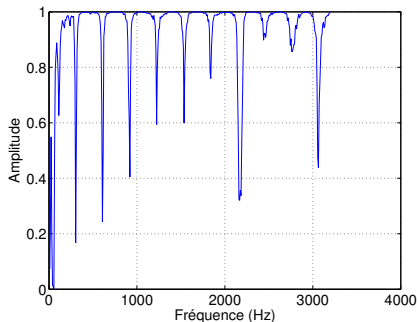
• Fonction de Réponse en Fréquence

- Effet de la saturation d'un signal : excitation en bruit blanc, fenêtre de hanning, saturation des deux microphones

FRF



COH



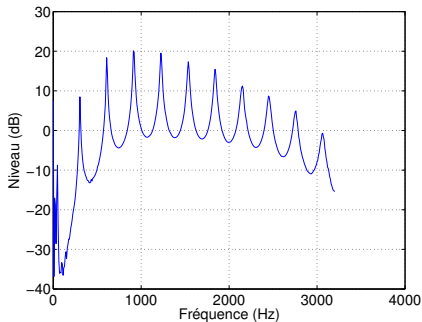
Conditionnement du calcul

● Analyse fréquentielle

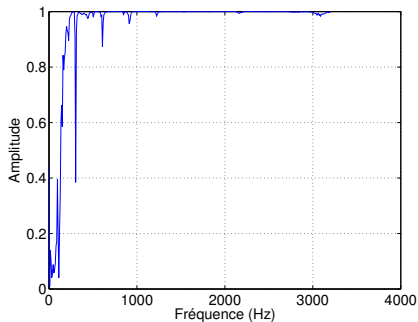
- Fonction de Réponse en Fréquence

- Effet du signal d'excitation : chirp et fenêtre rectange adaptée

FRF



COH



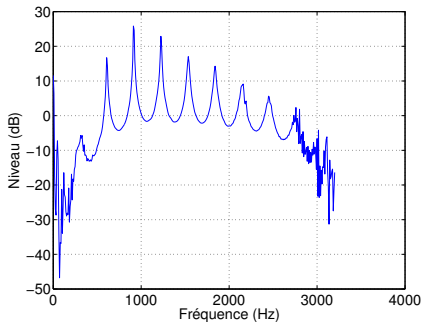
Conditionnement du calcul

• Analyse fréquentielle

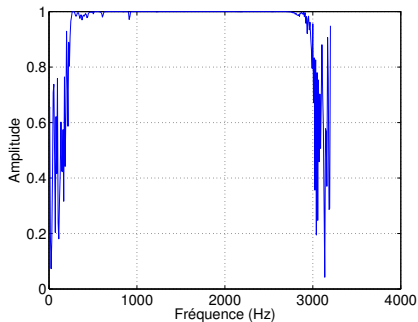
- Fonction de Réponse en Fréquence

- Effet du signal d'excitation : chirp et fenêtre hanning non adaptée

FRF



COH



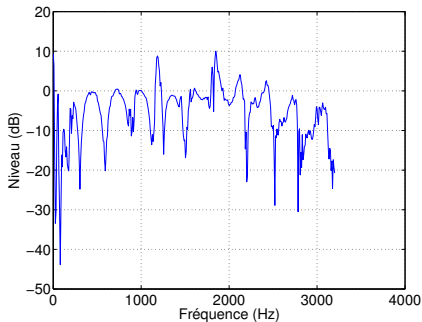
Conditionnement du calcul

• Analyse fréquentielle

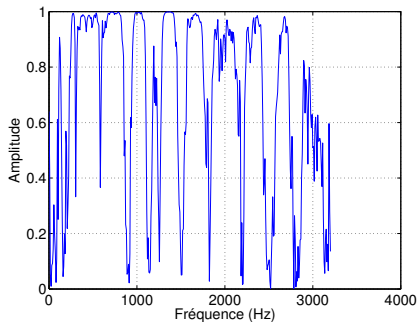
- Fonction de Réponse en Fréquence

- Quelle valeur limite de cohérence accepter ? 0.95 minimum

FRF



COH



Conditionnement du calcul

- **Analyse fréquentielle**

- Fonction de Réponse en Fréquence
 - **"On n'analyse pas une FRF avant d'avoir regardé la cohérence"**
 - **"On analyse une FRF quand la cohérence vaut au moins 0.95"**
 - Les chutes de cohérence aux anti-résonances ou résonances du système sont normales.

Visualisation des données

● Affichage :

- choix de la fonction à visualiser (temporelle ou fréquentielle)
- module et phase, partie réelle et imaginaire,
- dynamique fréquentielle : lin / log (voir ci-dessous)
- dynamique en amplitude : automatique (*scale*) ou manuelle

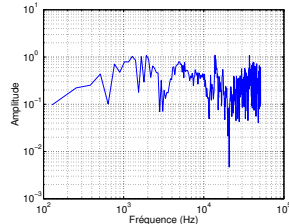
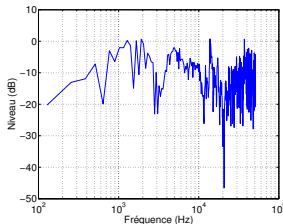
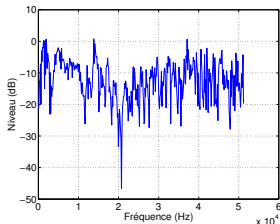
● Mesure : curseurs \Rightarrow précision $\Delta f/2$

● Représentations linéaires ou log en amplitude et fréquence

dB / f

dB / f en log

A linéaire et f en log



Postraitement des données

- opération mathématiques diverses
- sauvegarde en interne, sur support externe (disquette ! clé USB)
- impression
- exportation des données par interfaçage pour les analyseurs portables
 - définir l'analyseur en esclave (*Address only*)
 - pour les ports GPIB, définir l'adresse GPIB pour le logiciel d'interfaçage

Bibliographie

- [BK1984] Bruël & Kjaer , "Dual Channel FFT Analysis (part I)", Technical Review, n°1, Bruël & Kjaer Editions, 1984.
- [Meynia/2001] Informations sur l'analyseur, cours de DEUST VAS 2, 2001.