Échantillonnage Angulaire
et
Méthode « Flapse Time»

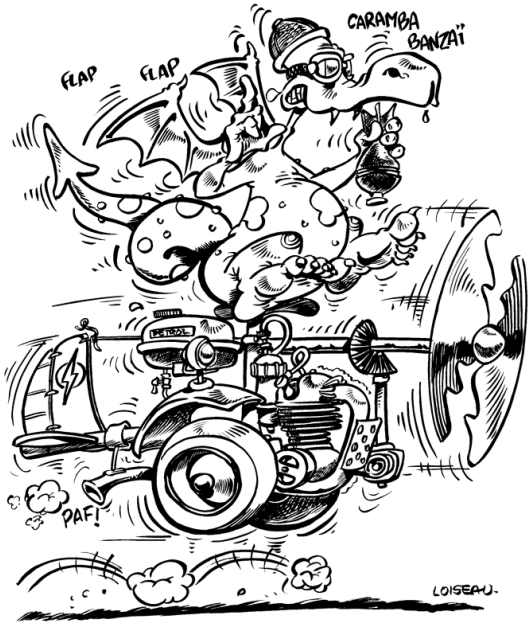
Où la variable « angulaire » apparaît comme une variable « naturelle » pour l'étude des systèmes tournants.

Scénario Adeline Bourdon
Sur une idée originale de Didier Rémond

Contexte M.T.

- Elles tournent,
- Doivent tourner « le mieux possible »,
- Prévenir les défaillances

- La rotation un ddl « privilégié »



http://mloiseau.free.fr/blog/index/post/2011/03/31/1319-machine

>>>> Utiliser la position angulaire comme « référence »,

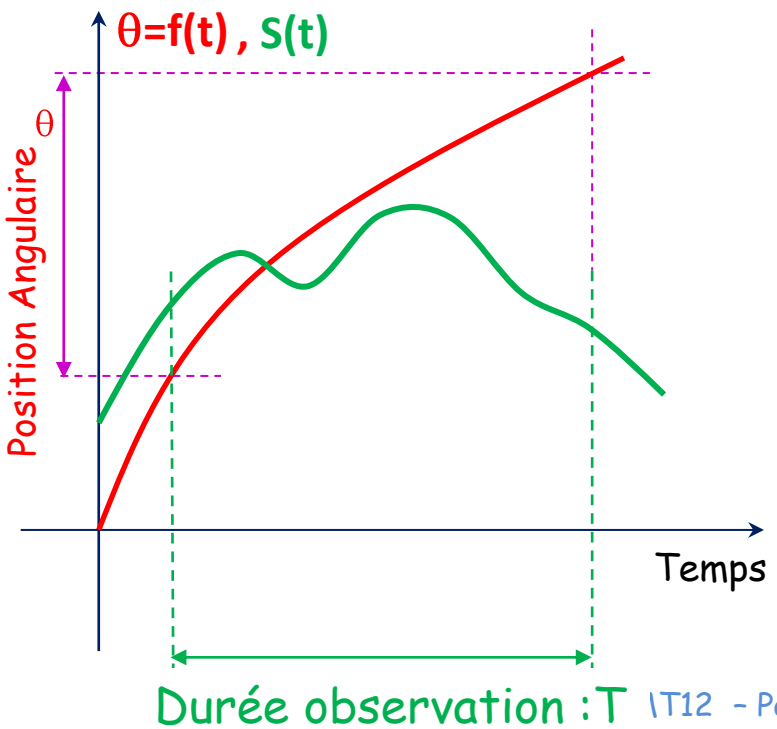
>>>> Etudier le signal position angulaire

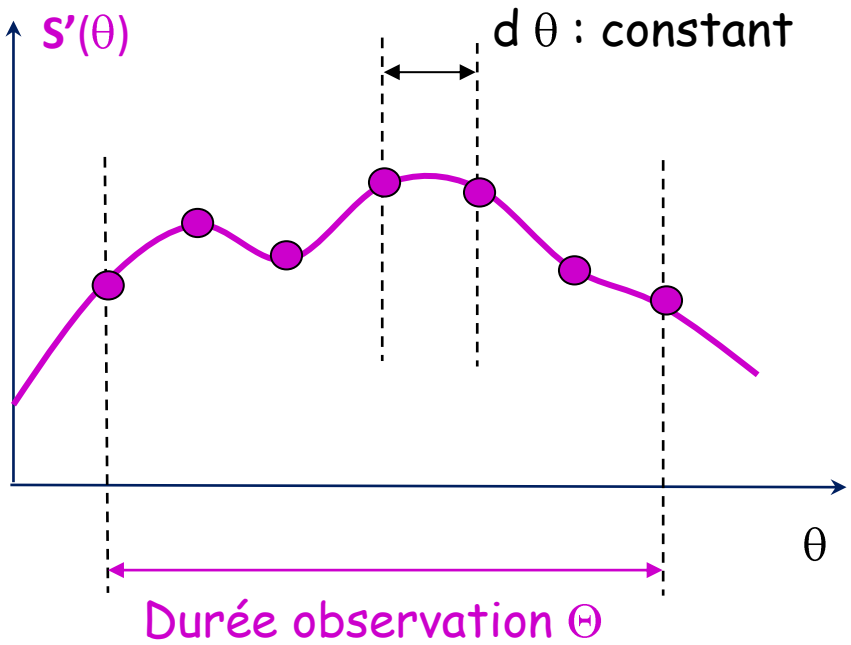
Echantillonnage Angulaire

- Principe,
- Notions de spectres angulaires
- Fréquences « caractéristiques »
- Analyse Angle – Fréquences angulaires
- Extension aux simulations numériques

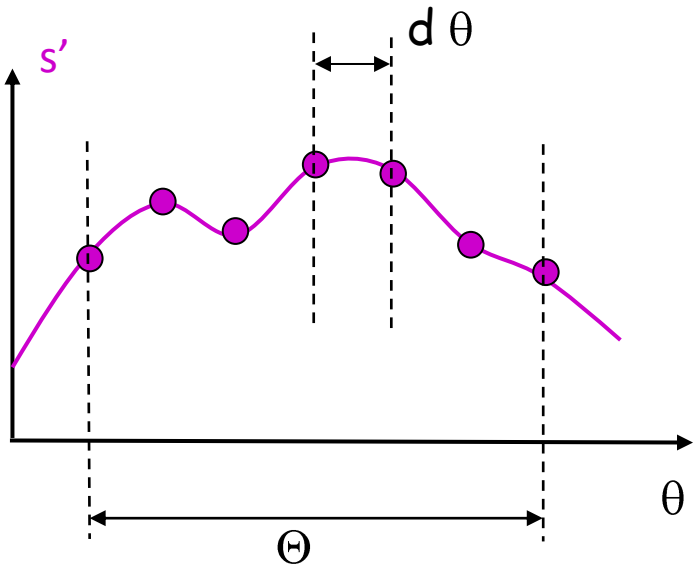
Hypothèses et Principes

- Système en rotation (non oscillant)
- Choix d'une rotation de « référence » = position angulaire θ
- Relation position angulaire - temps connue, monotone



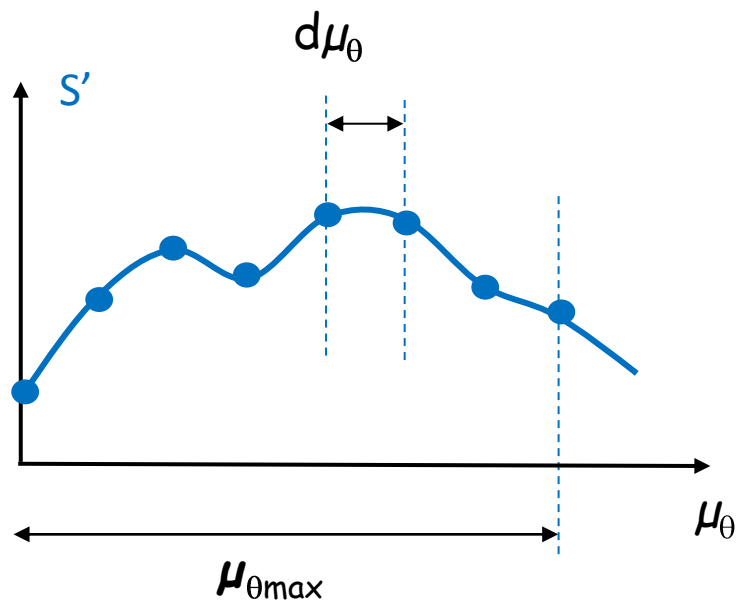


Notions spectres angulaires



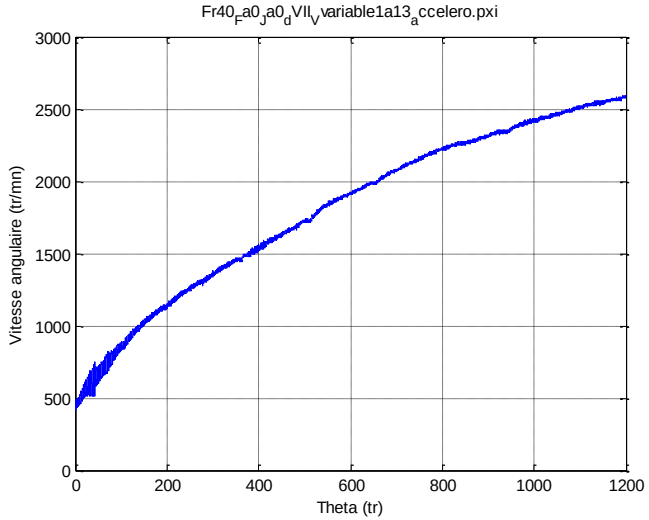
F.F.T

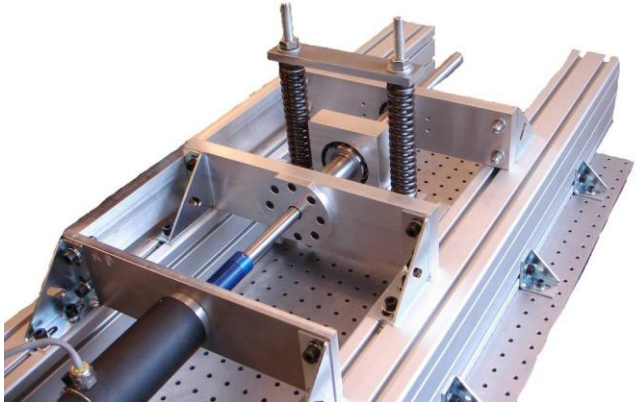
- Domaine des fréquences angulaires,
- Unité : nb évènements / tour

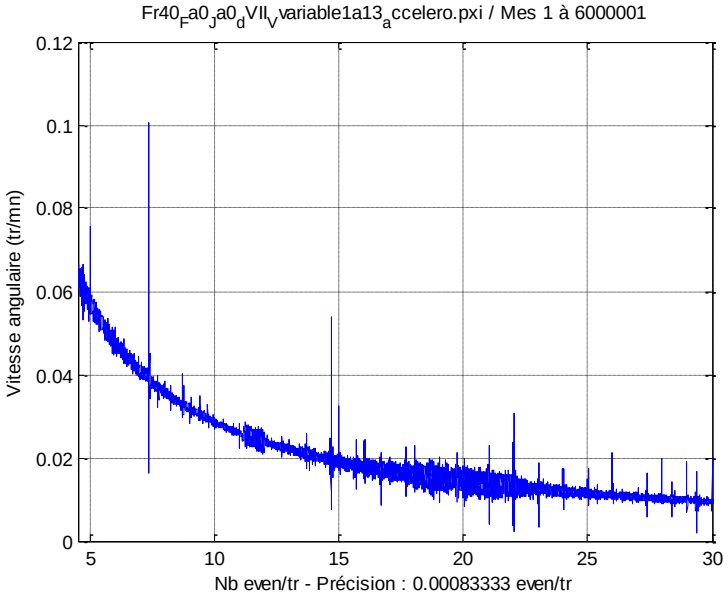


$$d\mu_\theta = \frac{2\pi}{\Theta} \qquad \mu_{\theta max} = \frac{\pi}{d\theta}$$

Fréquences caractéristiques

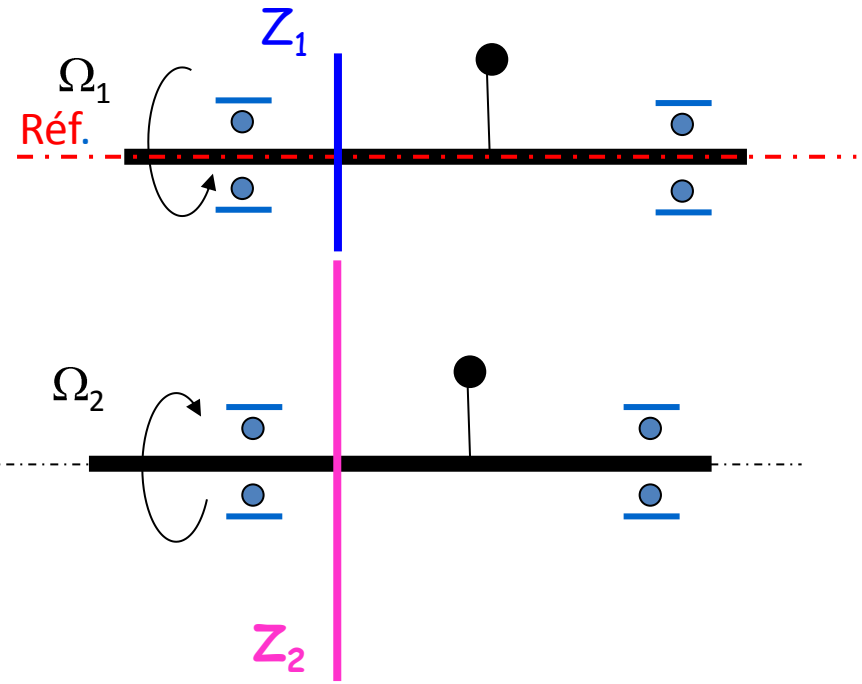






- Les « pics » correspondent à des fréquences « caractéristiques » du système
- Leur localisation est indépendante de la vitesse de rotation

Système tournant



$\Omega_2 = Z_1 / Z_2 . \Omega_1$

- Excentricité
- Balourd
- Défaut dent 1

Fréquence :

$\Omega_1 / 2.\pi$ Hz

Fréquence angulaire :

1 ev/tr

- Excentricité
- Balourd
- Défaut sur une dent 2

Fréquence :

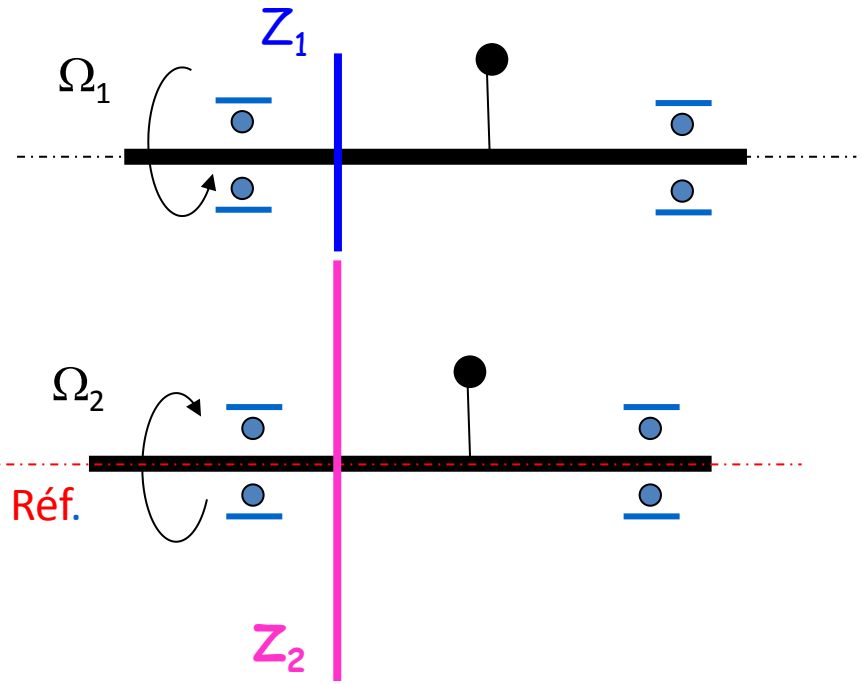
$\Omega_2 / 2.\pi$ Hz

Fréquence angulaire :

Z_1/Z_2 ev/tr

Influence position référence

$\Omega_1 = Z_2 / Z_1 . \Omega_2$



- Excentricité
- Balourd
- Défaut dent 1

Fréquence :

$\Omega_1 / 2.\pi$ Hz

Fréquence angulaire :

Z_2/Z_1 ev/tr

- Excentricité
- Balourd
- Défaut sur une dent 2

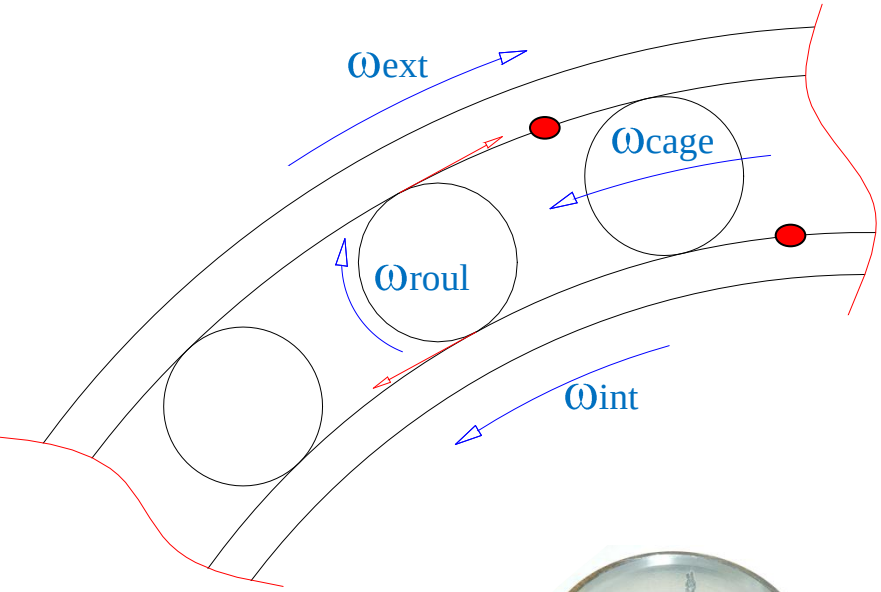
Fréquence :

$\Omega_2 / 2.\pi$ Hz

Fréquence angulaire :

1 ev/tr

Fréquences caractéristiques des roulements

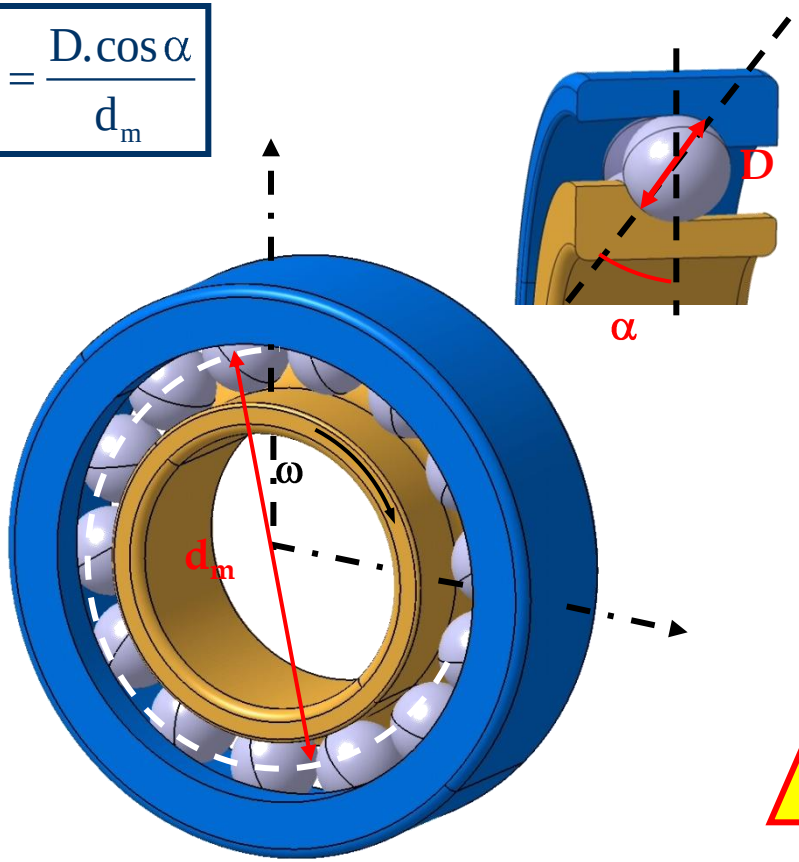


Fréquences de passage d'un corps roulant sur un point d'une bague extérieure ou intérieure,

- Estimables si non glissement, géométrie nominale,
- Dépendent de l'architecture du système
- Exprimées en fonction de la géométrie interne du roulement et des vitesses de ω_{int} et ω_{ext}
- Fournies par les roulementiers

Exemple : roulement à billes contact oblique

$$\gamma = \frac{D.\cos\alpha}{d_m}$$



Fréquences temporelles

$$f_{BI} = \frac{Z}{2}.\ 1+\gamma\ \frac{\omega}{2\pi} \qquad f_{BE} = \frac{Z}{2}.\ 1-\gamma\ \frac{\omega}{2\pi}$$

Fréquences Angulaires

$$f_{BI}^{\theta} = \frac{Z}{2}.\ 1+\gamma\ \frac{1}{2\pi} \qquad f_{BE}^{\theta} = \frac{Z}{2}.\ 1-\gamma\ \frac{1}{2\pi}$$

Variabilité

- d'un roulement à l'autre,
- condition de fonctionnement (α)
- glissement

Bague extérieure fixe

Application : Détection de défauts

Présence d'un défaut sur un élément **mobile**

Génération d'une perturbation associée à une fréquence caractéristique
Détectable sur des signaux mesurables

Accélérations

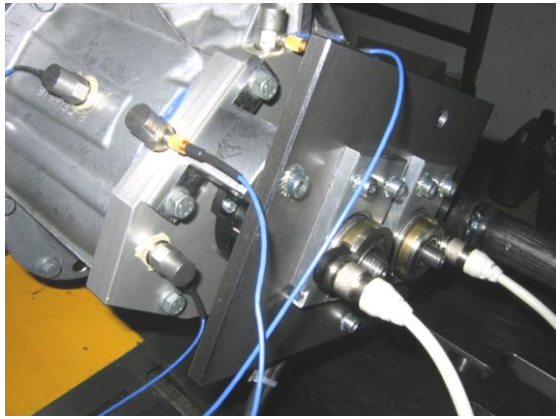
Vitesse de rotation

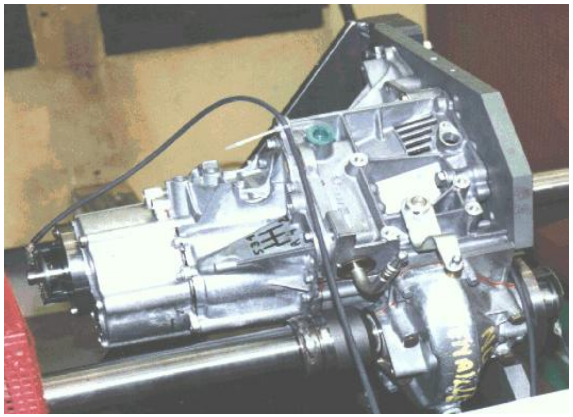
Electrique

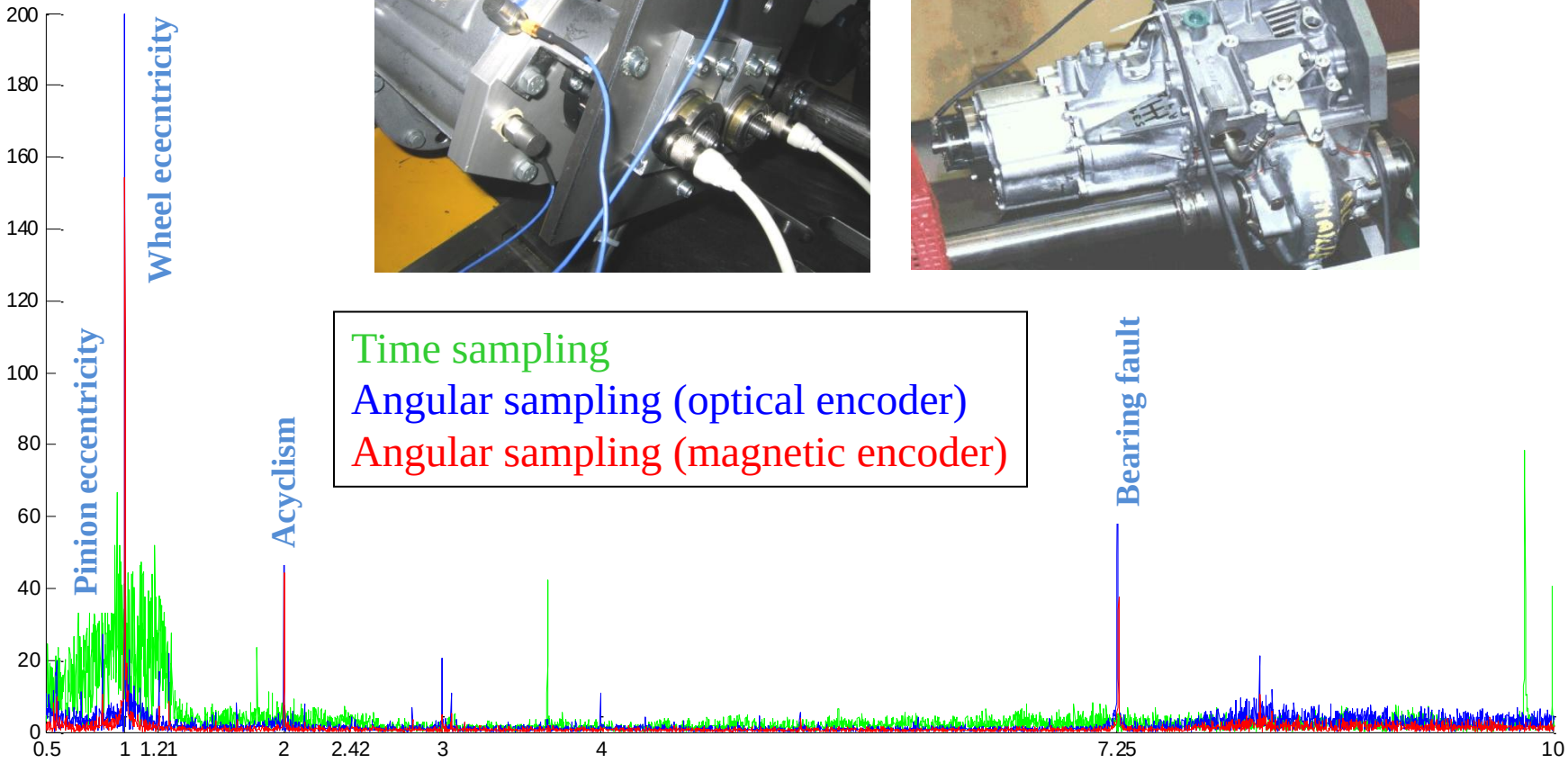
...

Obtenir des informations sur le défaut

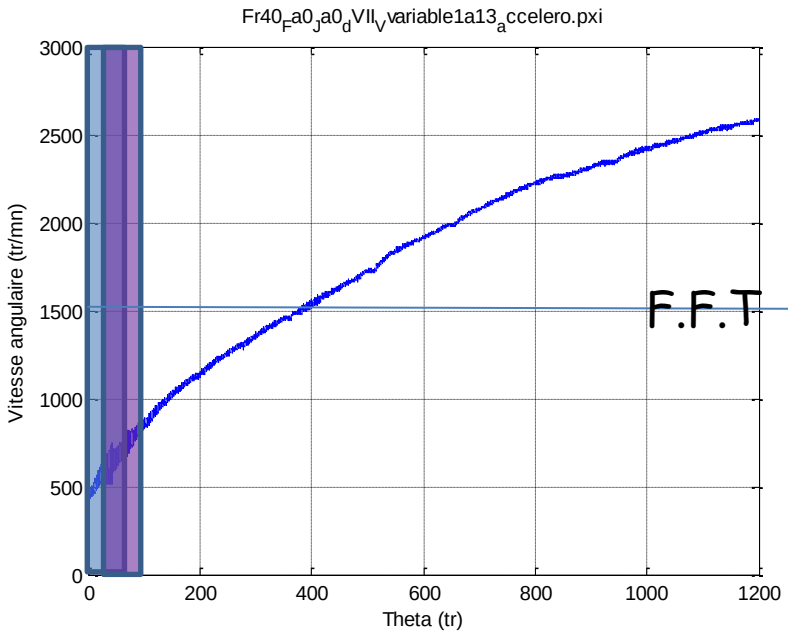
Echantillonnage temporel / Angulaire

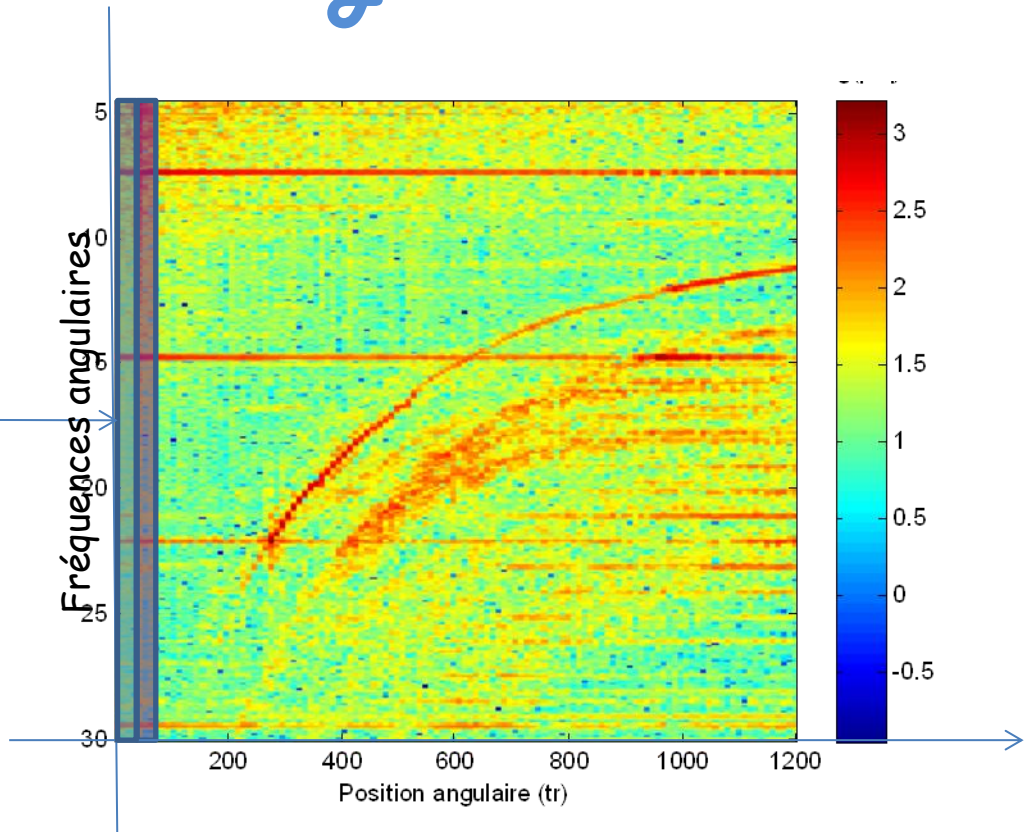






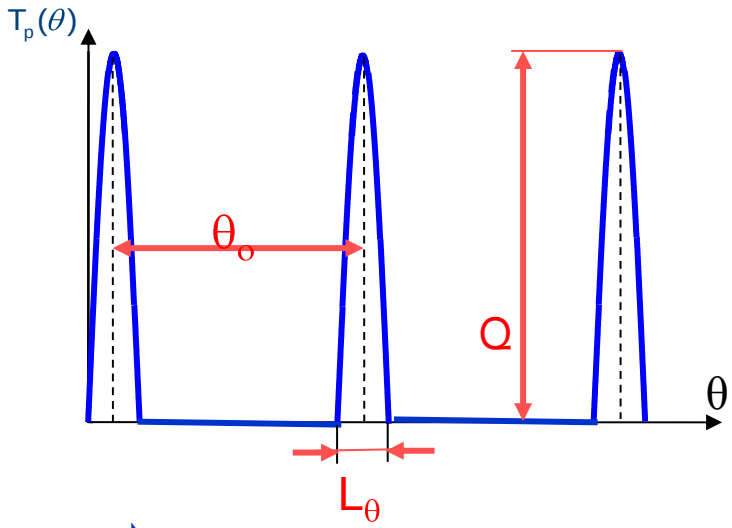
Analyses Angle-Fréquences angulaires





- La largeur de la fenêtre glissante va définir la précision des fréquences angulaires
- Le recouvrement entre 2 fenêtres va définir la précision des positions angulaires

Extension aux Simulations Numériques



Comment introduire une perturbation angulairement périodique et localisée dans un modèle numérique en régime non stationnaire ?

On ne connaît pas a priori les temps d'apparition de la perturbation.

Limites résolutions temporelles

Cas général : mettre en place un algorithme spécifique de résolution itératif (pas simple …)

Cas particulier : vitesse macroscopique constante $\bar{\omega}$

→ la perturbation est alors « périodique » de période $T_0 = \dfrac{\theta_0}{\bar{\omega}}$

Changement variable d'intégration

$$M_{nxn}.\ \ddot{X}_n + C_{s\ nxn}.\ \dot{X}_n + K_{nxn}.\ X_n = F_{ext\ n} + \Delta F(\theta)$$

$$Q_{2n} = \begin{Bmatrix} X_n \\ \dot{X}_n \end{Bmatrix} \Rightarrow \dot{Q} = [A].\{Q(t)\} + [B].\ F_{ext} + \Delta F(\theta)$$

$$\theta = \psi(t)$$

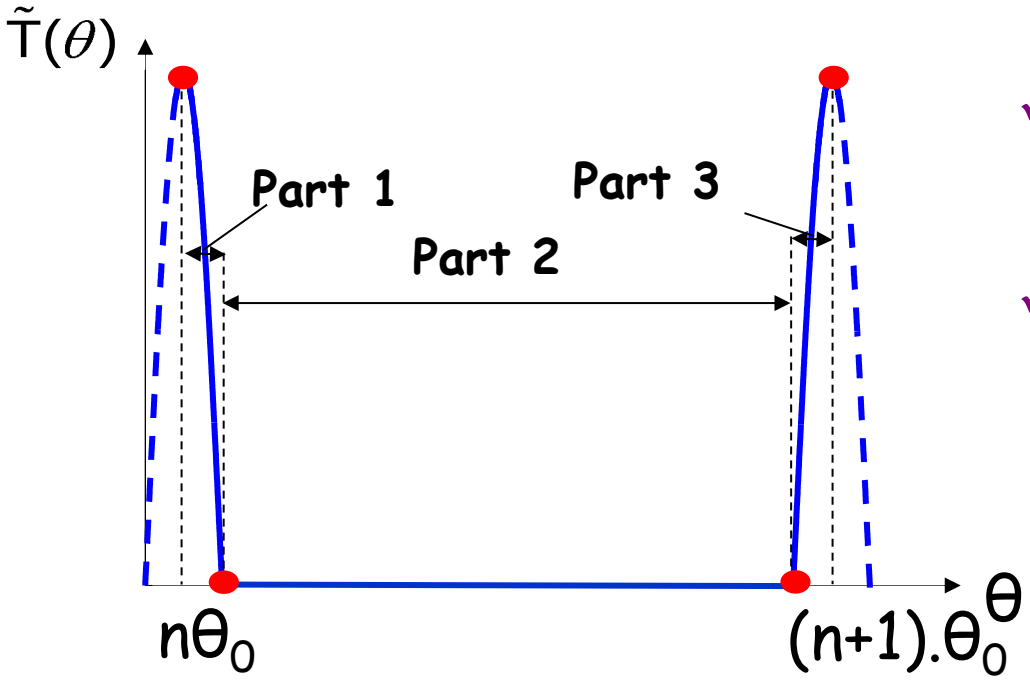
$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \neq 0 \Rightarrow t = \varphi(\theta)$$

...

$$\begin{cases} \left\{\dfrac{d\tilde{Q}(\theta)}{d\theta}\right\} = \dfrac{1}{\tilde{\omega}(\theta)}.\ [A].\ \tilde{Q}(\theta) + B.\ \tilde{F}_{ext}(\theta) + \Delta F(\theta) \\ \dfrac{dt}{d\theta} = \dfrac{1}{\tilde{\omega}(\theta)} \end{cases}$$

Permet la résolution par morceaux

Résolution par morceaux



- ✓ Imposer des points de passage : ●
- ✓ Contrôler le $\Delta\theta$ max dans chaque zone.

Programmation « simple » à l'aide des méthodes implantées dans Matlab.

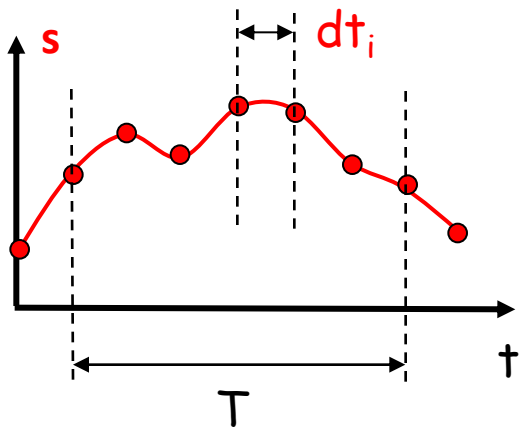
Pas d'hypothèse sur la vitesse macroscopique.

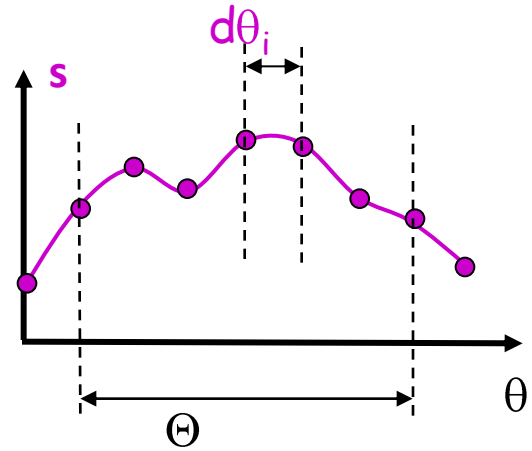
Résultats simulation

$t_i,\ \theta_i,\ s_i \quad i=1,n$

Analyse : temps, fréquences

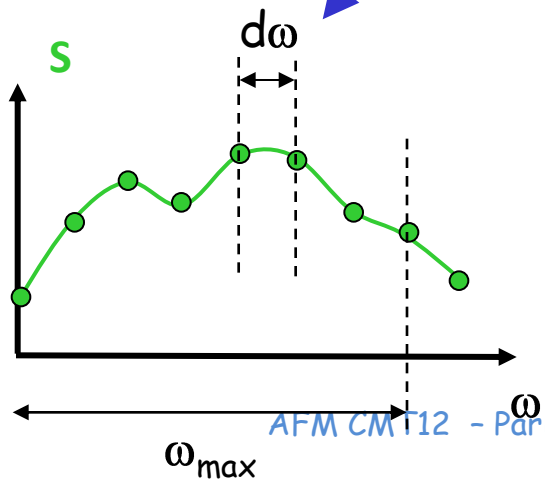
Analyse angles, évènements

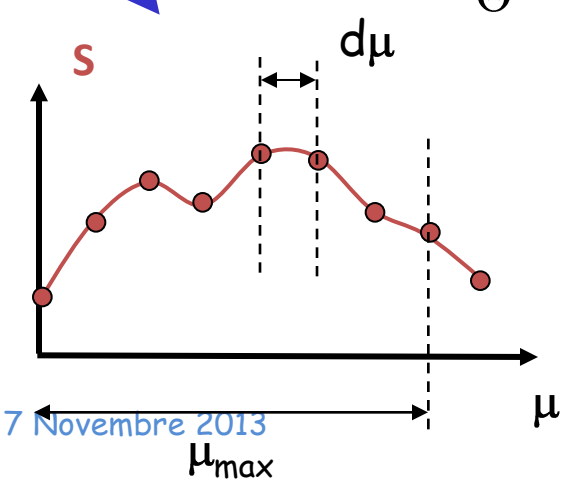




Ré-échantillonnage + FFT

$$d\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad \omega_{max} = \frac{\pi}{dt}$$



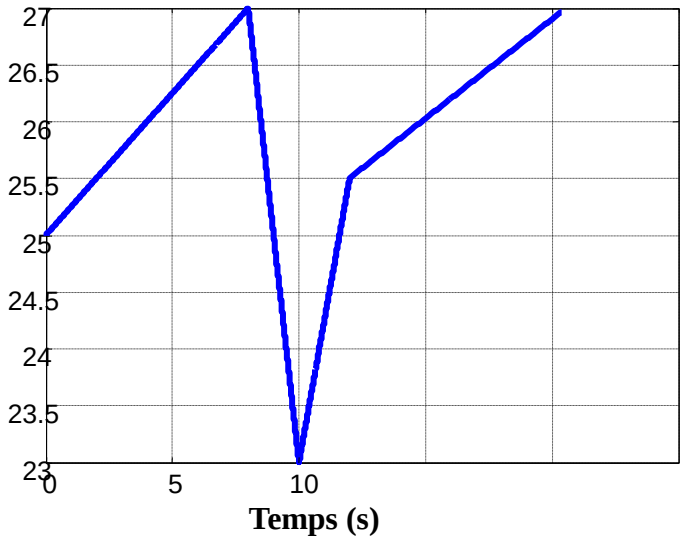


$$d\mu = \frac{2\pi}{\Theta} \qquad \mu_{max} = \frac{\pi}{d\theta}$$

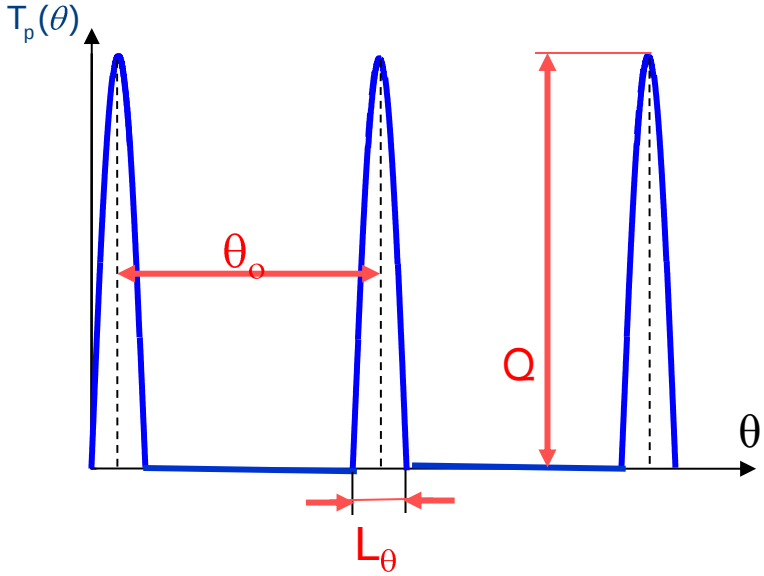
Exemple système 1 ddl

$$I.\frac{d^2\theta}{dt^2} + \alpha\frac{d\theta}{dt} = C_M(t) + T_p(\theta)$$

Couple Moteur



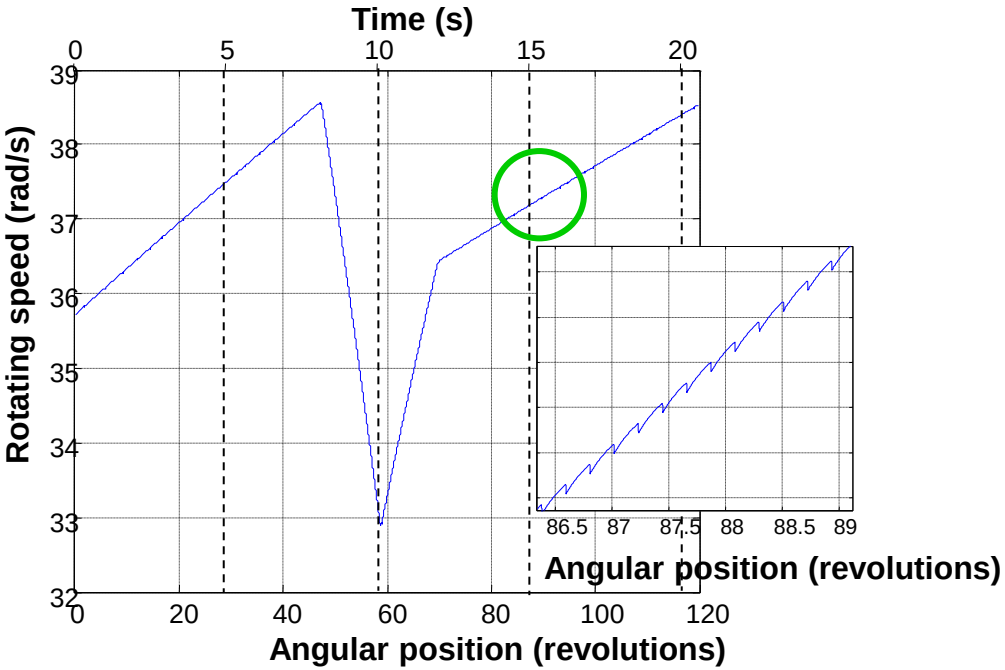
Perturbation



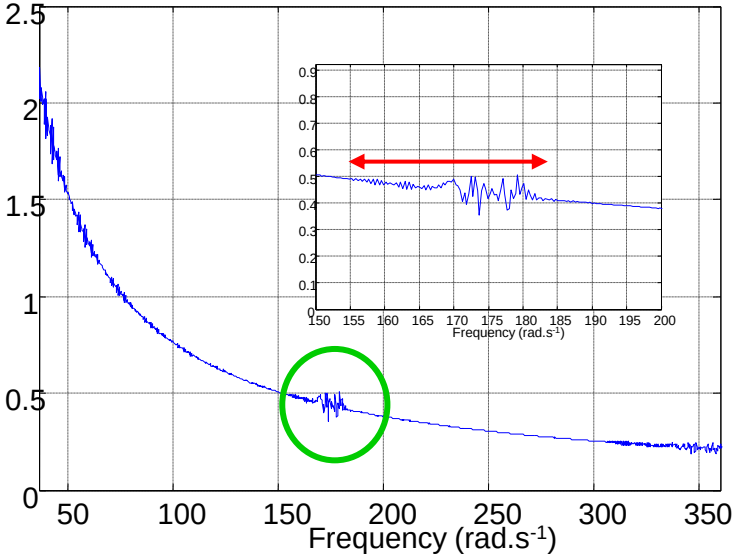
$\mu_0 = 4.7$

$$\theta_0 = \frac{2\pi}{\mu_0}$$

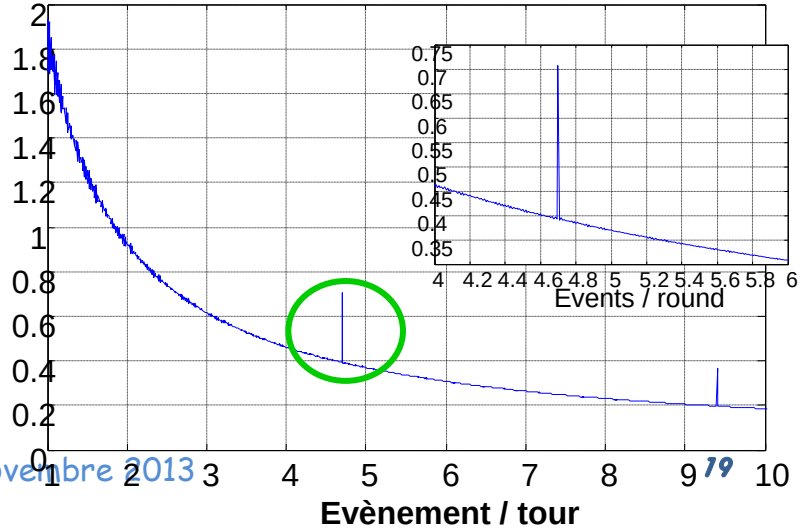
Signal « vitesse »



Spectre fréquentiel



Spectre Angulaire



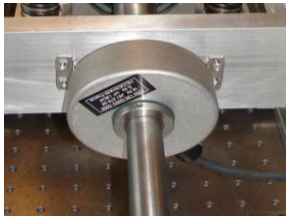
Méthode « Elapse Time »

- Principe,
- Application mesure Vitesse Instantanée
- Application mesure Déphasage Angulaire

Principe

On compte / mémorise le nombre de tops horloge entre 2 tops codeur

→ Signal « Ecarts Temporel » E.T.

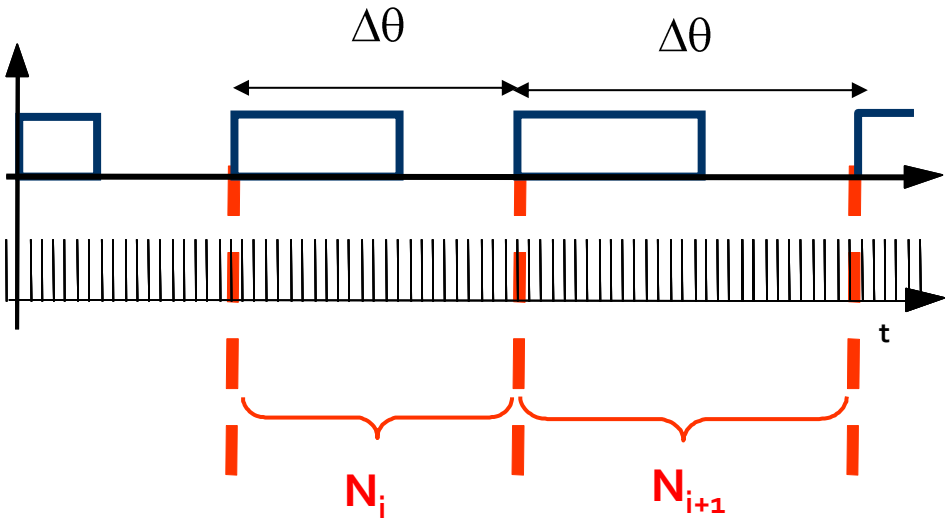


Codeur* Angulaire

Résolution R

Horloge

Fréquence F_h



Avantages

- Possibilité d'utiliser des « codeurs » pré-existants sur la machine
- Place mémoire réduite
  → Possibilité de faire des mesures « longues »

Ce que l'on peut mesurer

1 codeur

2 codeurs

Vitesse Instantanée

Déphase angulaire

1 Arbre 2

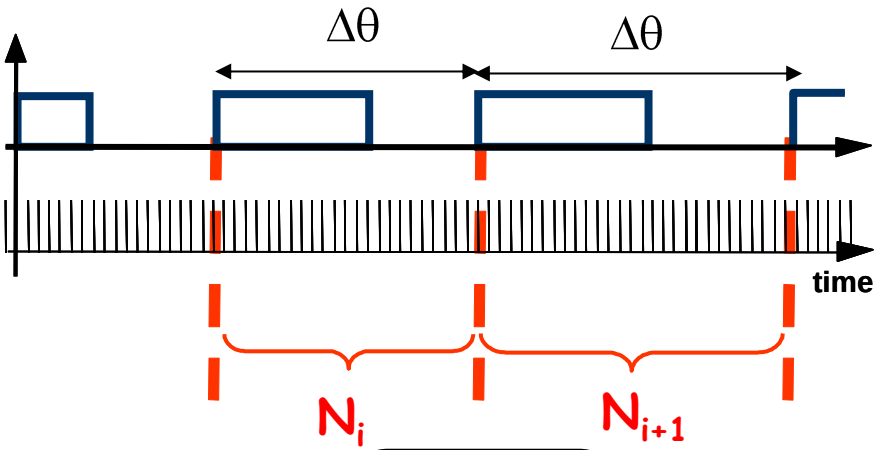
Torsion « instantanée »

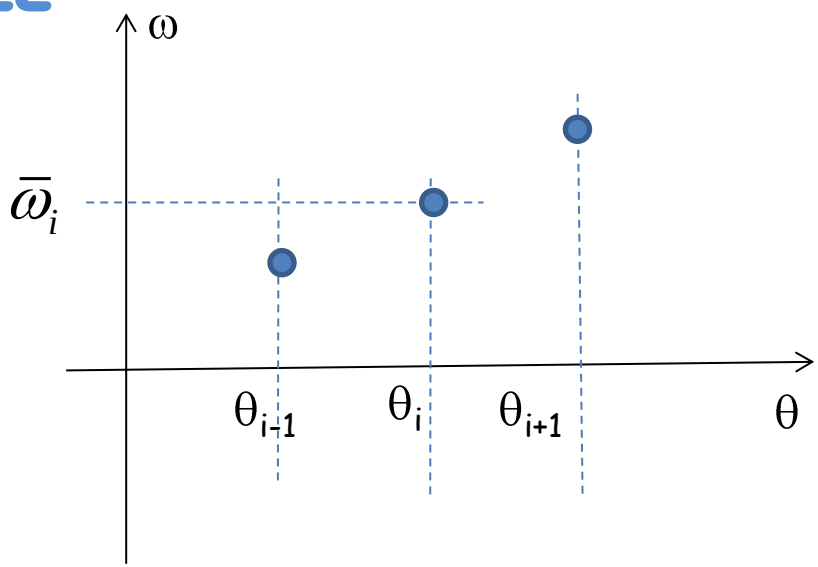
Erreur de Transmission

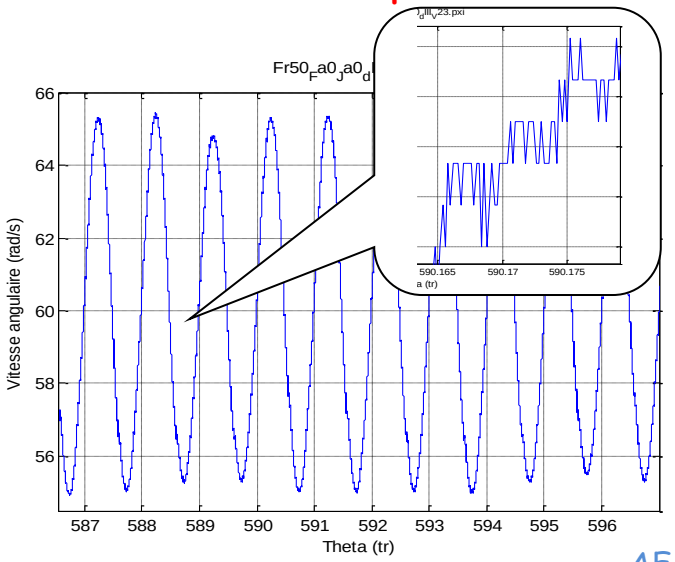
Mesure Vitesse Instantanée

- Principe,
- Détection de défauts de roulements
- Détection fréquence de torsion

Mesure Vitesse Instantanée







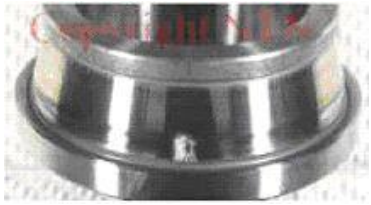
$$\bar{\omega}_i = \frac{\Delta\theta}{\Delta t_i} = \frac{2\pi}{R} \cdot \frac{1}{N_i . \delta t} = \frac{2\pi}{R} \frac{f_H}{N_i}$$

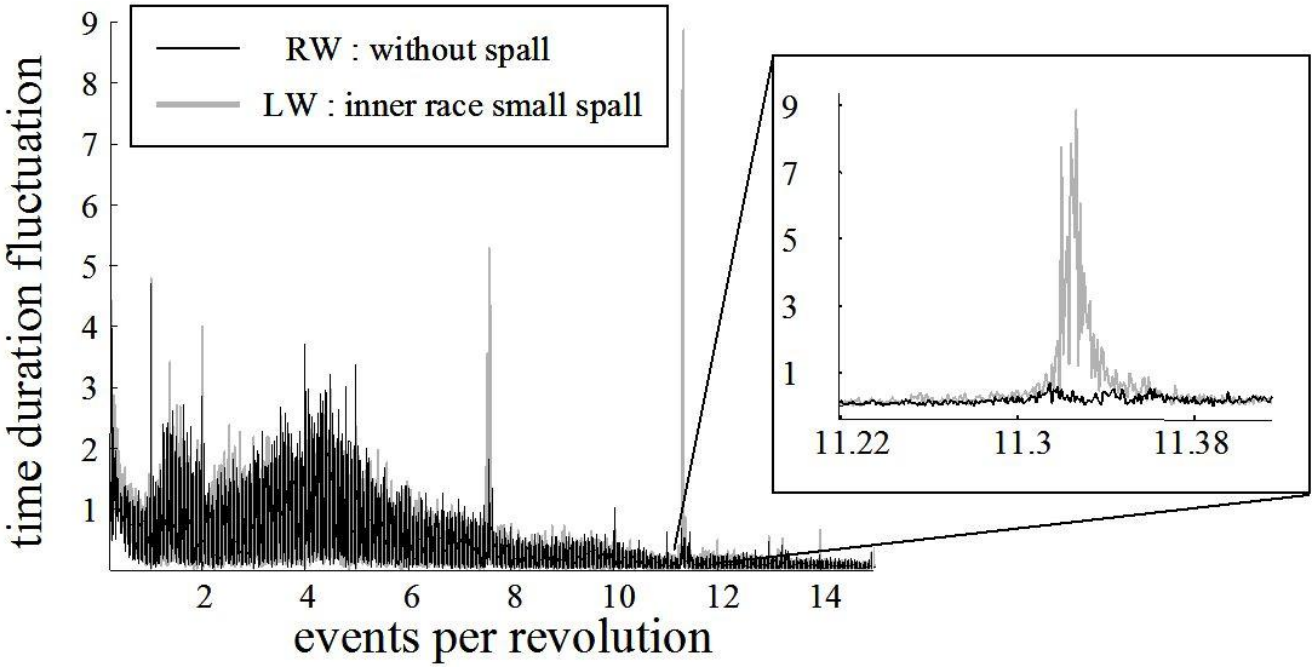
- Naturellement échantillonnée en angle

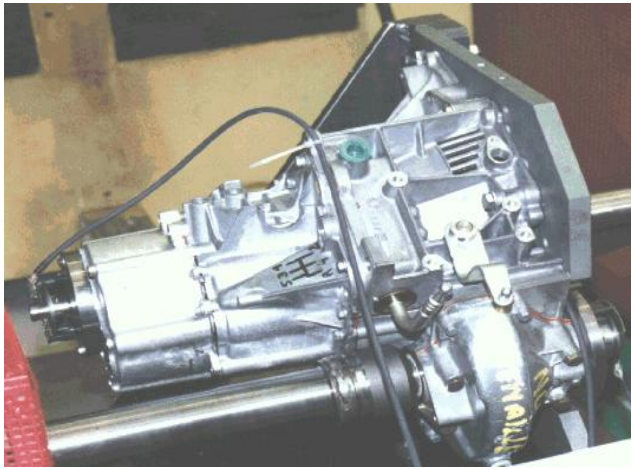
Application détection de défauts roulement

Mesures réalisées à l'aide d'une piste magnétique du système ABS

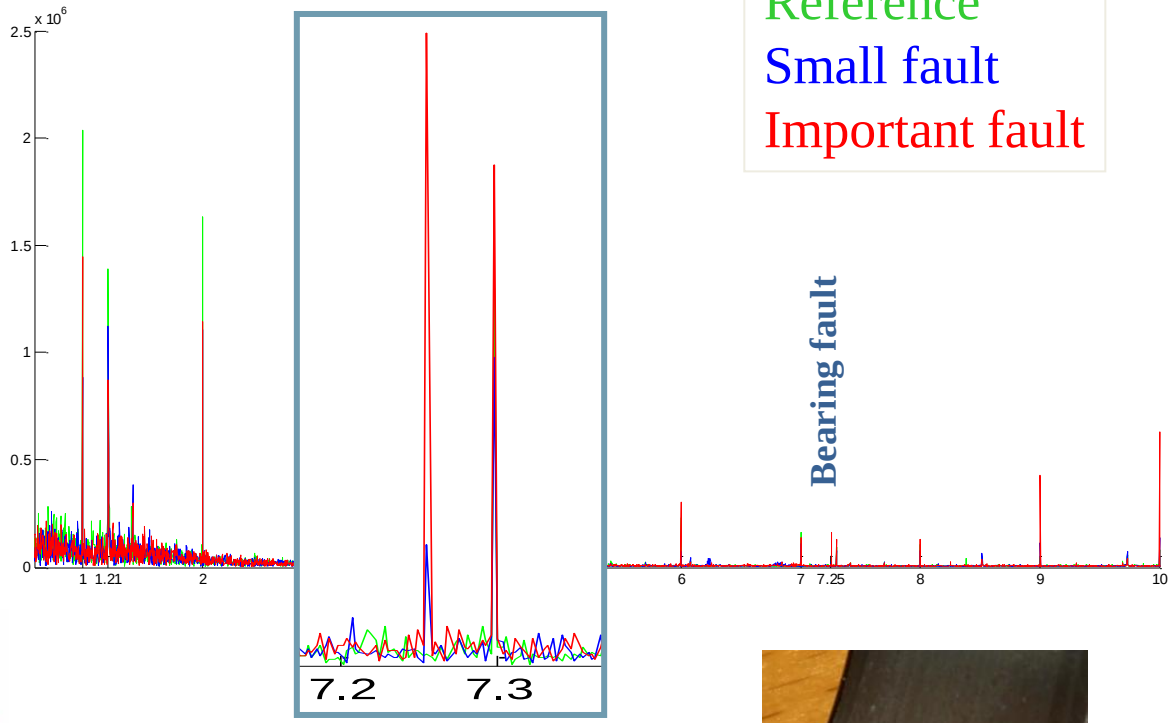
Roue Véhicule



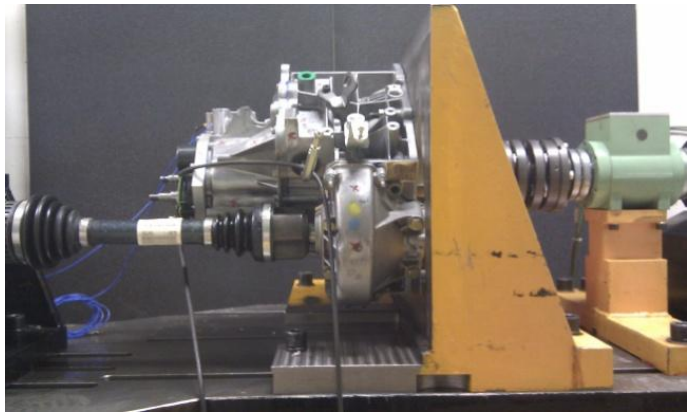


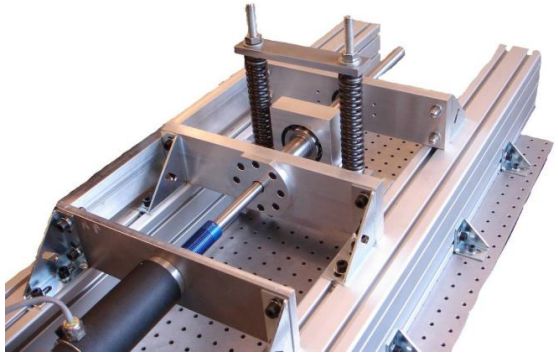


Reference
Small fault
Important fault



Boîte vitesses automobile

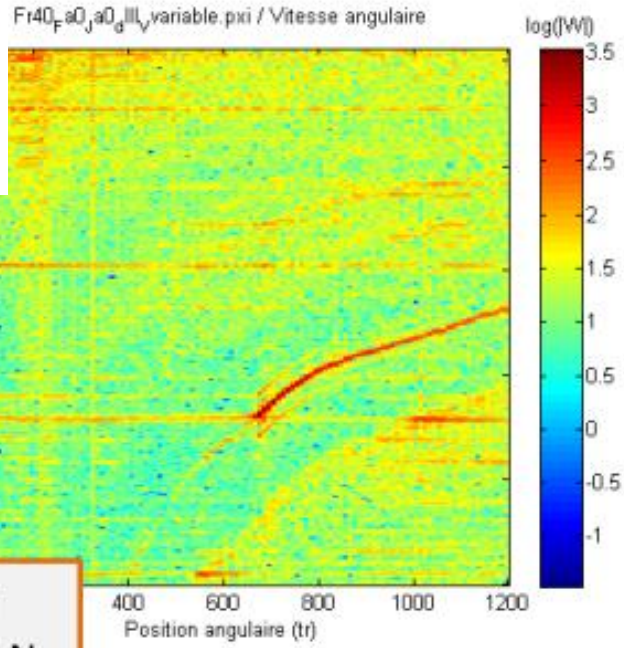




- Introduction de roulement avec et sans défaut sur BE
- Mêmes roulements que banc BV
- Mesure VI codeur optique de résolution 4000 raies

Sensibilité de la mesure

Figure I-10 - Défaut III



Défaut III
F_r = 3094 N

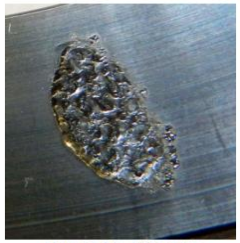
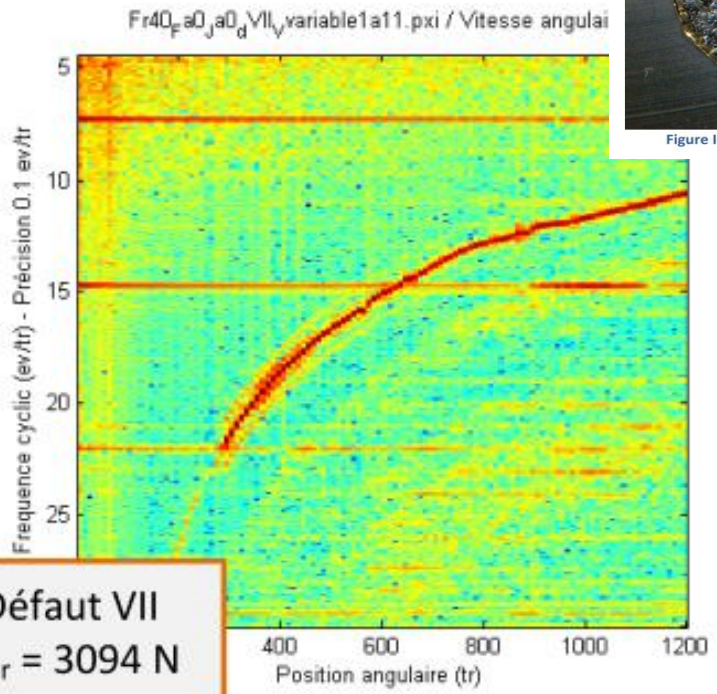


Figure I-14 - Défaut VII

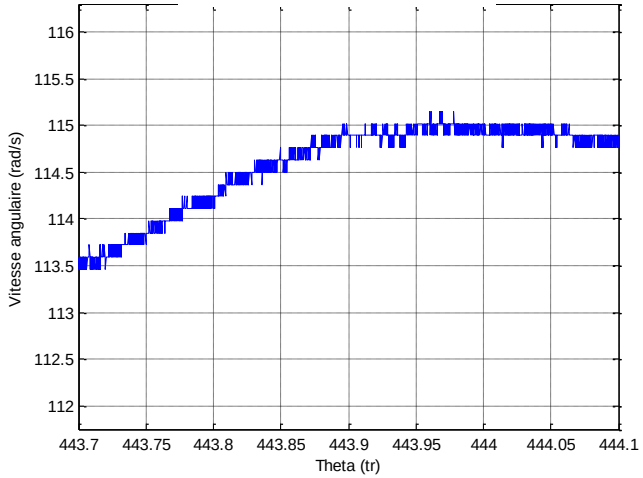


Défaut VII
F_r = 3094 N

Bilan : V.V.I & la détection défaut roulement

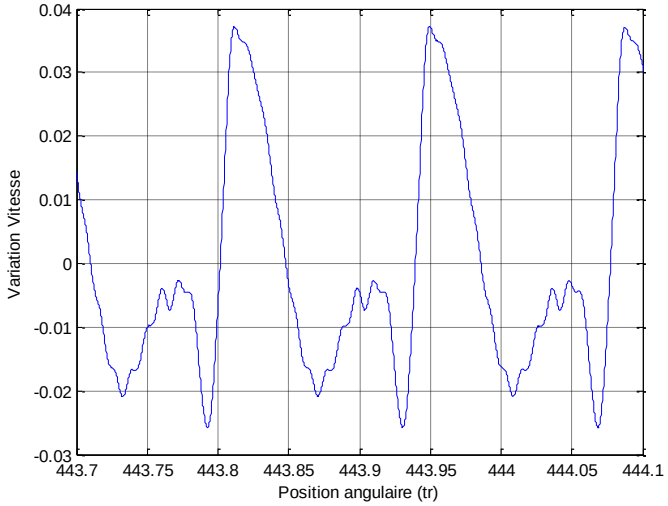
- Originalité de l'approche,
- Mise en place d'outils d'analyse originaux et d'indicateurs de suivi de comportement

Signal « brut



$\omega \approx 115 \text{rad / s}$

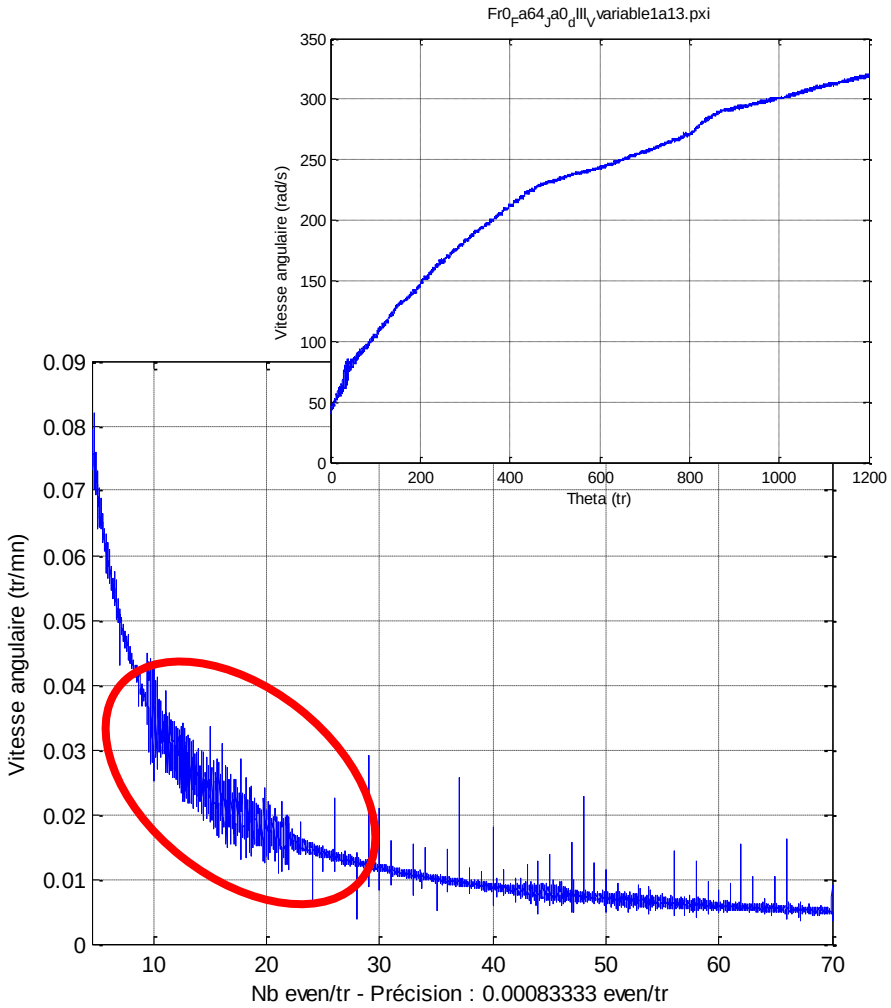
Signal « perturbation »

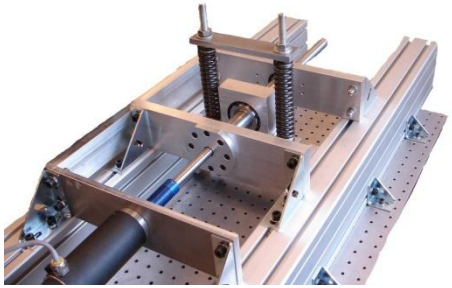


$\Delta\omega \approx 0.06 \text{ rad / s}$

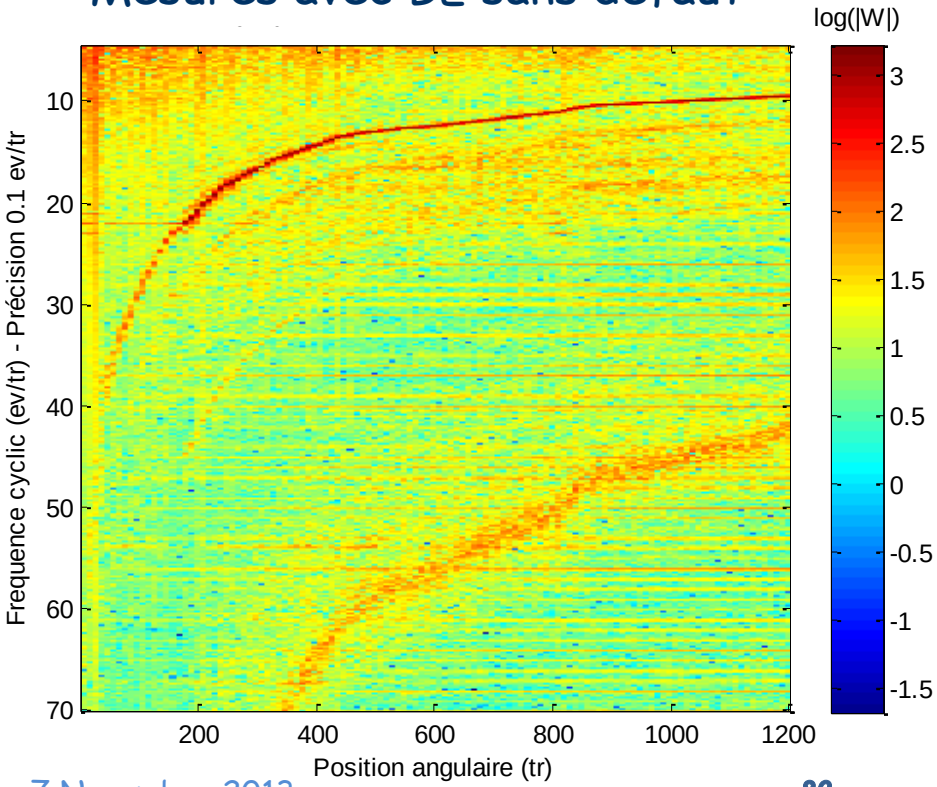
$\approx 0.05\%.\omega$

Détection mode torsion

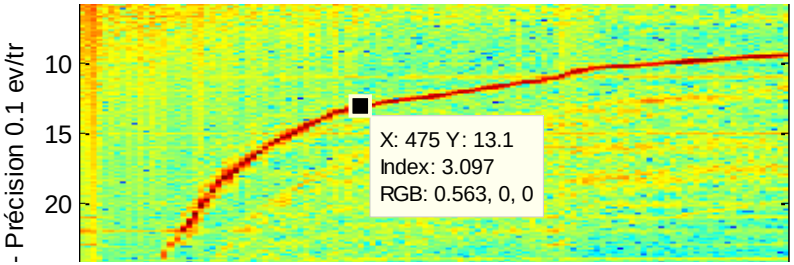




Mesures avec BE sans défaut

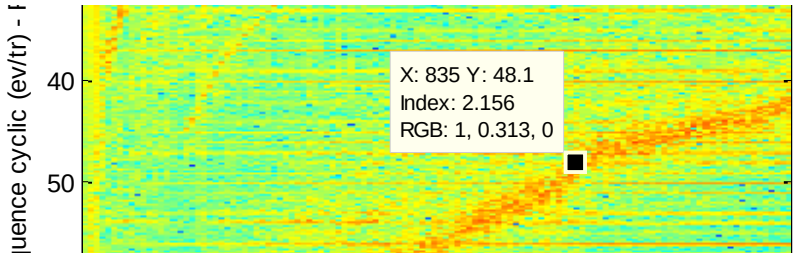


Identification des fréquences propres



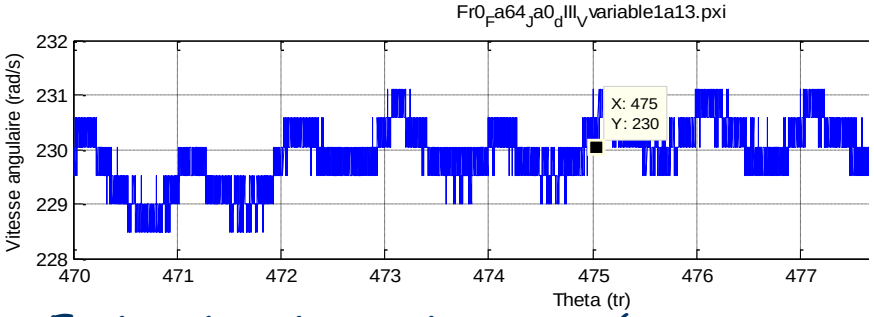
Sélection d'un point de la courbe

Fc = 13.1 - θ = 475 tr



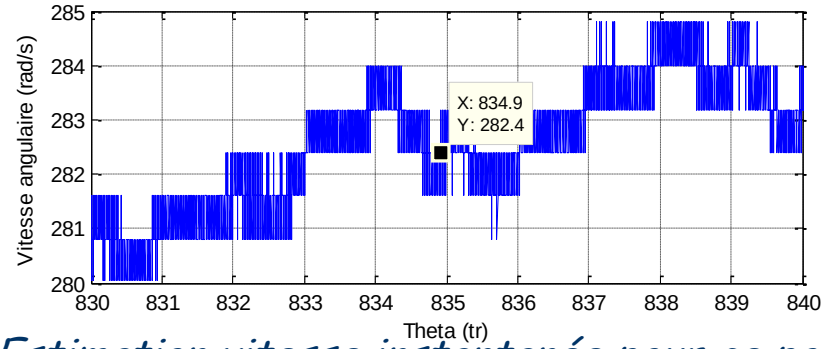
Sélection d'un point de la courbe

Fc = 48.1 - θ = 835 tr



Estimation vitesse instantanée pour ce point

Ω=230 rad/s



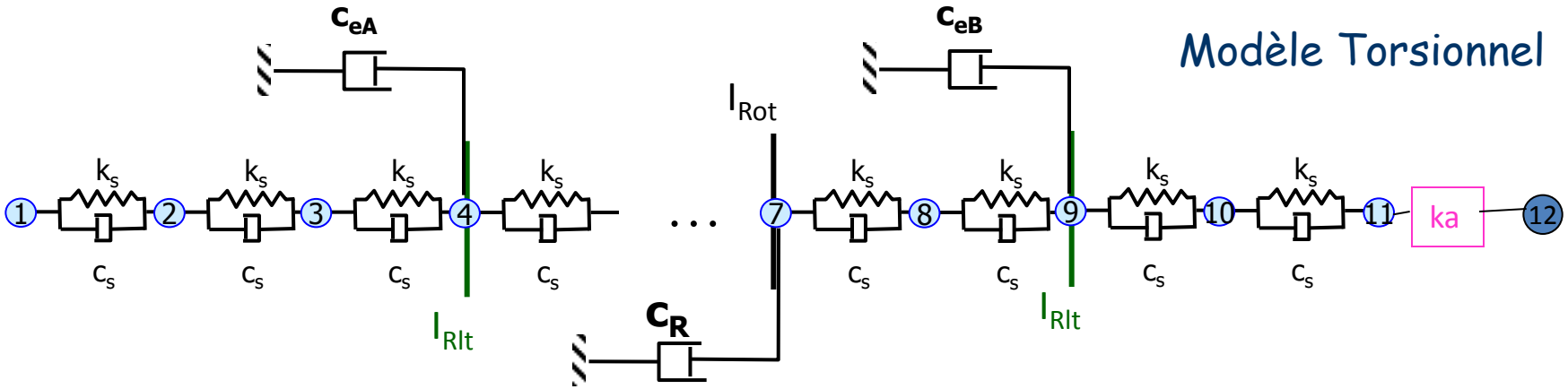
Estimation vitesse instantanée pour ce point

Ω=282 rad/s

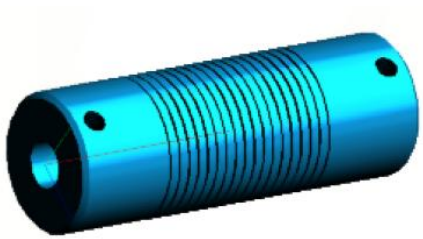
$$f_p = \frac{F_{\theta c}.\Omega}{2\pi} \approx 480\ Hz$$

$$f_p = \frac{F_{\theta c}.\Omega}{2\pi} \approx 2.2\ KHz$$

Fréquences « Numériques »



Fréquences propres calculées : 480 Hz – 2.27 KHz



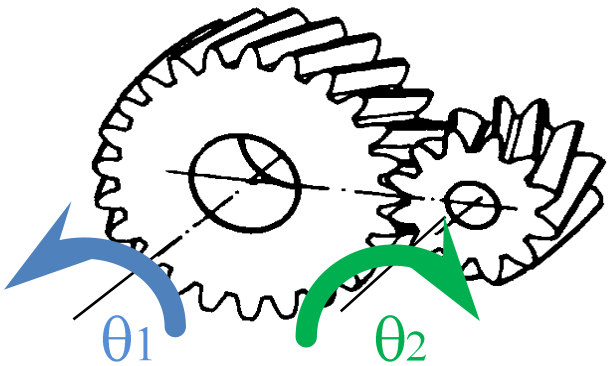
- mode 480 Hz contrôlé par la rigidité de torsion de l'accouplement,
- Rigidité estimée par rapport à une valeur d'un fabricant concurrent

Estimation des fréquences de torsion

Mesure déphasage angulaire

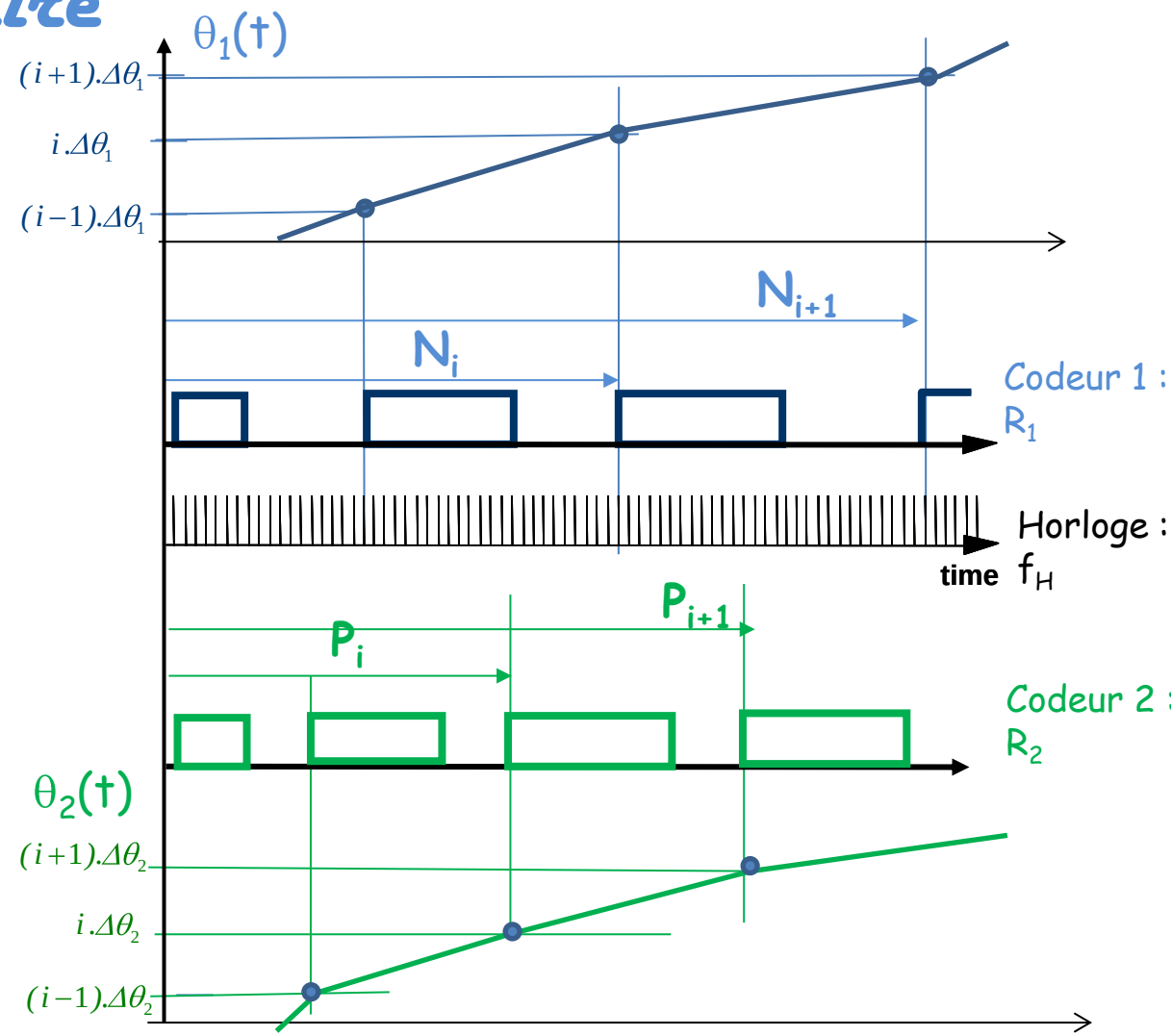
- Principe,
- Détection de défauts de roulements
- Détection fréquence de torsion

Déphasage angulaire



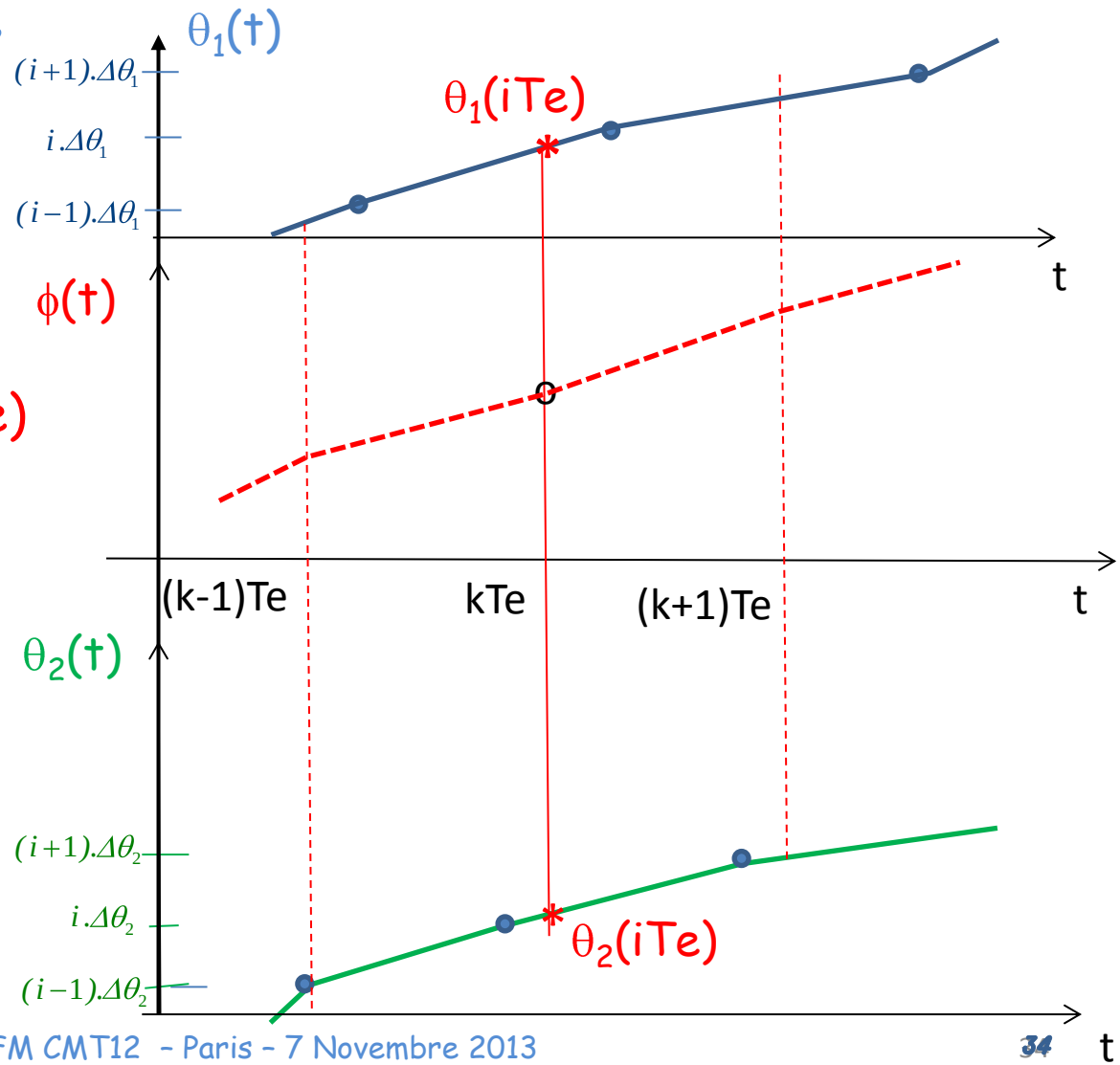
$$\theta_1(t) = k.\theta_2(t) + \phi(t)$$

$$\phi(t) = k.\theta_2(t) - \theta_1(t)$$

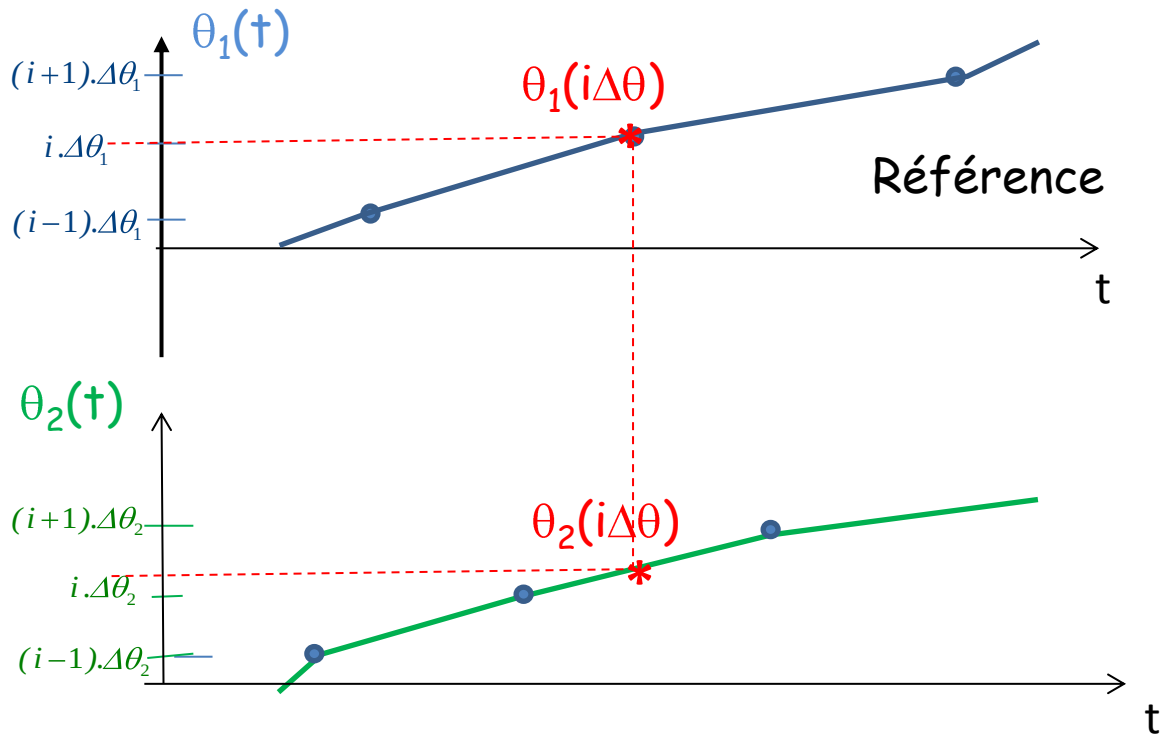


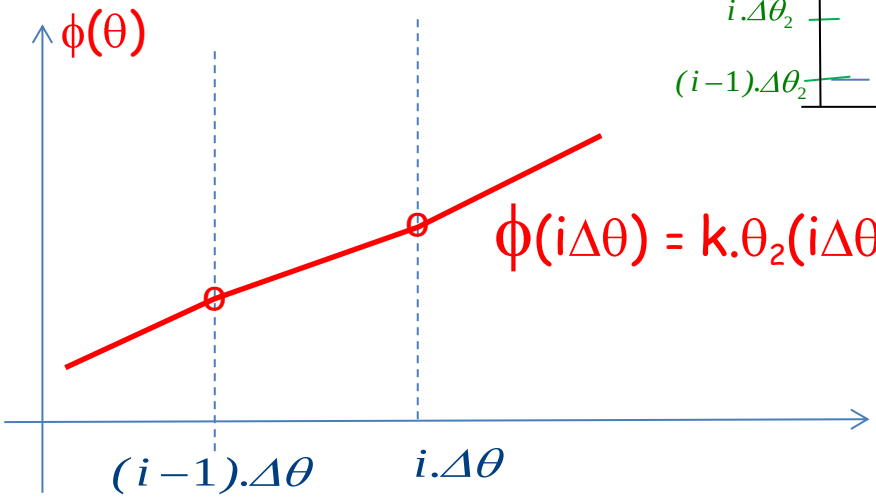
Échantillonnage en temps :

$\phi(iTe) = k.\theta_2(iTe) - \theta_1(iTe)$



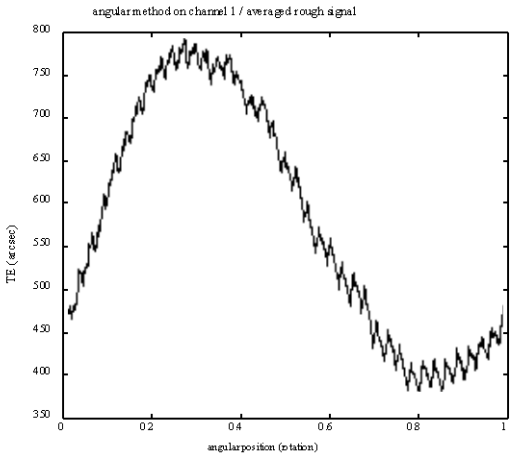
Échantillonnage en angle :



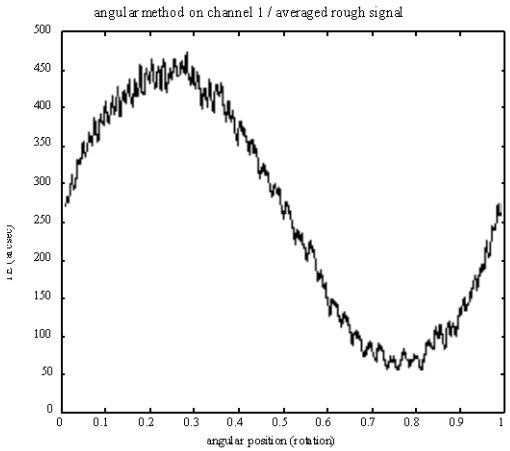


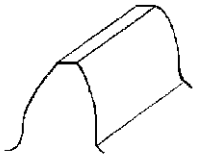
$$\phi(i\Delta\theta) = k.\theta_2(i\Delta\theta) - \theta_1(i\Delta\theta)$$

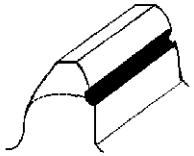
GEAR



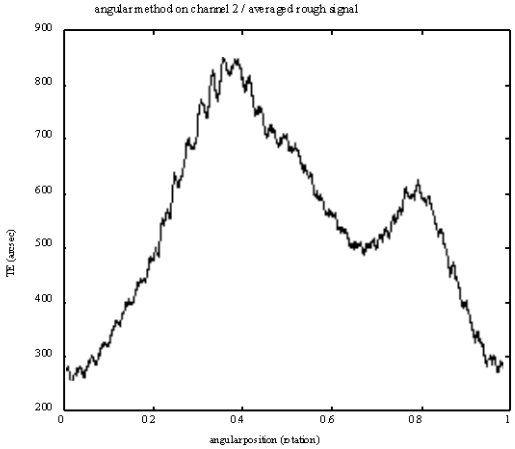
Angular Sampling channel 1



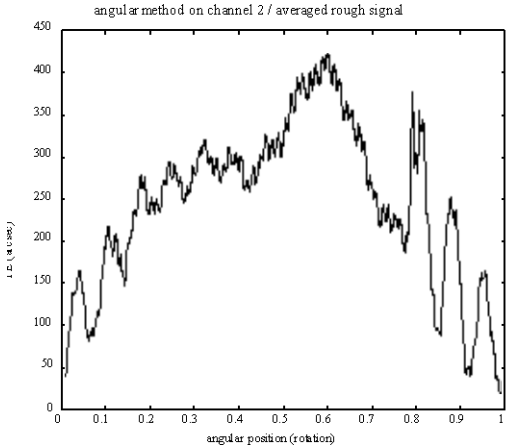




PINION



Angular Sampling channel 2



A retenir …

- Informations apportées par l 'échantillonnage angulaire, complémentaires à celles obtenues par l'échantillonnage temporel.
- Simplicité et intérêts de la méthode « Elapse Time »
- Richesse du signal « Vitesse Instantanée »

Merci de votre attention

Pour poursuivre ....

AFM - GST Vibration & Bruits

Journée

Approches Angulaires en Machines Tournantes

No Spécial MSSP à paraitre