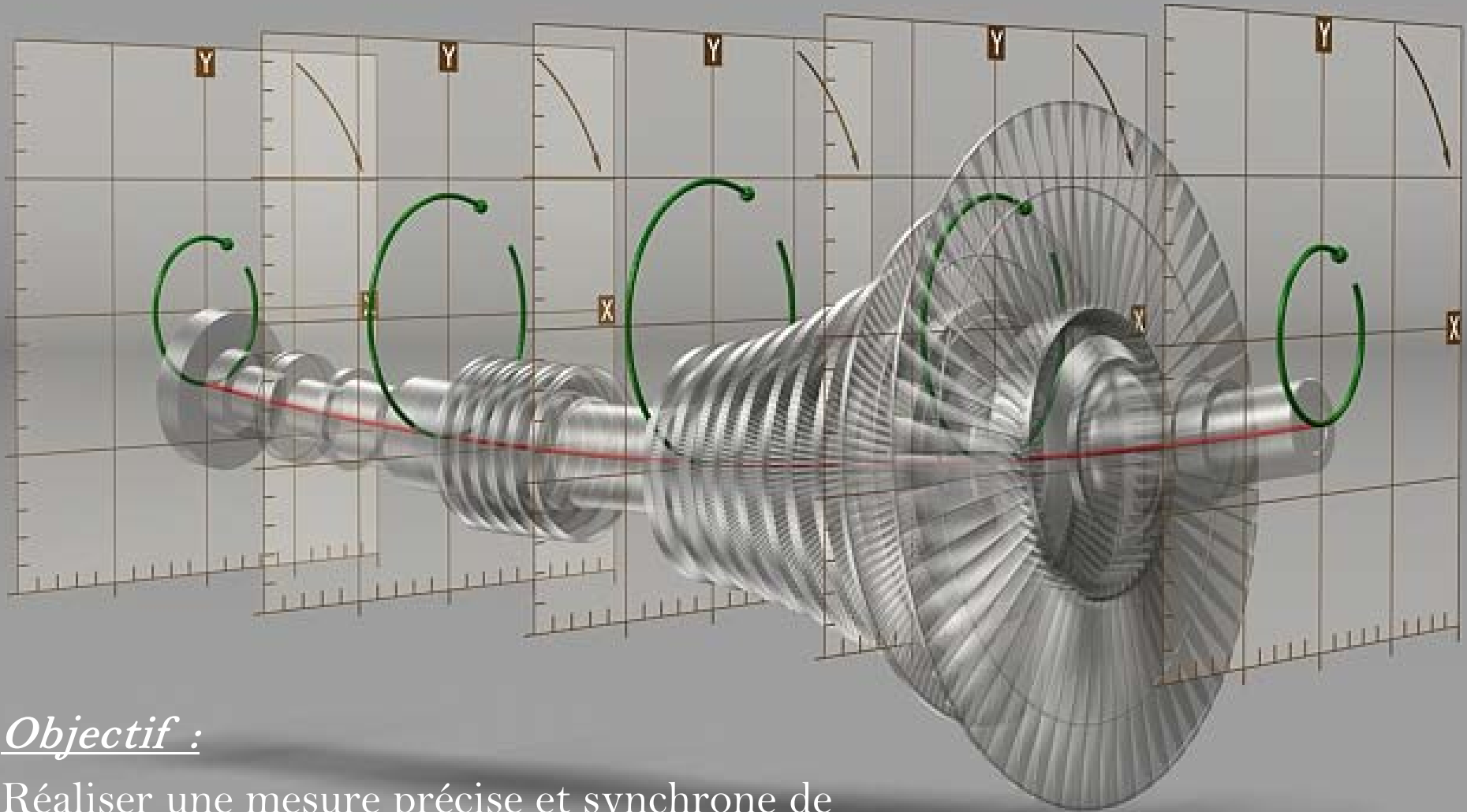


TIPE 2017 :

Numéro d'inscription : 26223

Mesures synchrones et intelligence embarquée,
Application à l'équilibrage dynamique



Objectif :

Réaliser une mesure précise et synchrone de
l'accélération pour réaliser un équilibrage dynamique.

Sommaire



Introduction à l'analyse vibratoire et problématique

Mise en équation à partir de l'équilibrage d'un pneu de voiture

Réalisation de mesures synchrones et précises

Résultats de l'expérience

Réalisation finale

Une problématique aux enjeux personnels

En aéromodélisme comme en réel, les hélices et turbines sont équilibrées. Le soucis est qu'en modèles réduits on se limite à un équilibrage statique...



Exemple d'équilibrage statique en modélisme



Pour mes besoins personnels, j'ai décidé de me lancer dans la réalisation d'une boîte permettant l'équilibrage dynamique.

Introduction à la théorie vibratoire

La théorie des machines tournantes forme une branche de la mécanique du solide (dynamique). Elle traite du comportement des masses en rotation.

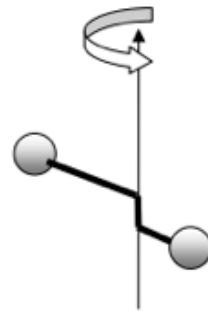


Elle permet de réaliser deux types d'études :

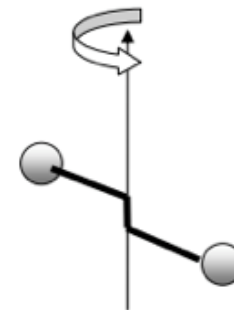
- Equilibrage lors de la fabrication
- Maintenance préventive et corrective

Dans notre cas on se limitera à un défaut d'équilibrage simple où une compensation du balourd suffit à rétablir l'équilibre.

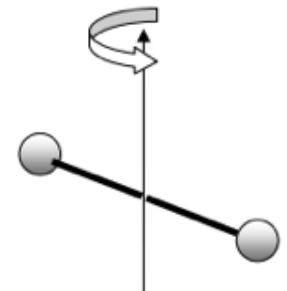
Cycle d'équilibrage d'une hélice réelle :



Non équilibrée



Statiquement



Dynamiquement

Mise en place de la théorie

Pour simplifier l'étude théorique de l'équilibrage dynamique on s'intéresse non pas à une hélice mais une roue.

Objectif :

Mettre en équations la résolution de l'obtention des valeurs des masselottes d'équilibrage m_4 et m_5 ainsi que leurs positions sur la roue notée θ_4 et θ_5 en fonction des résultantes mesurées par les capteurs.

Hypothèses :

- Les frottements sont **négligés**.
- Les liaisons sont considérées **parfaites**.
- Le moteur électrique et l'axe sont **équilibrés**.
- L'arbre est entraîné en rotation à **vitesse constante**.
- Les mesures sont **instantanées** et **synchronisées** avec la rotation de la roue.

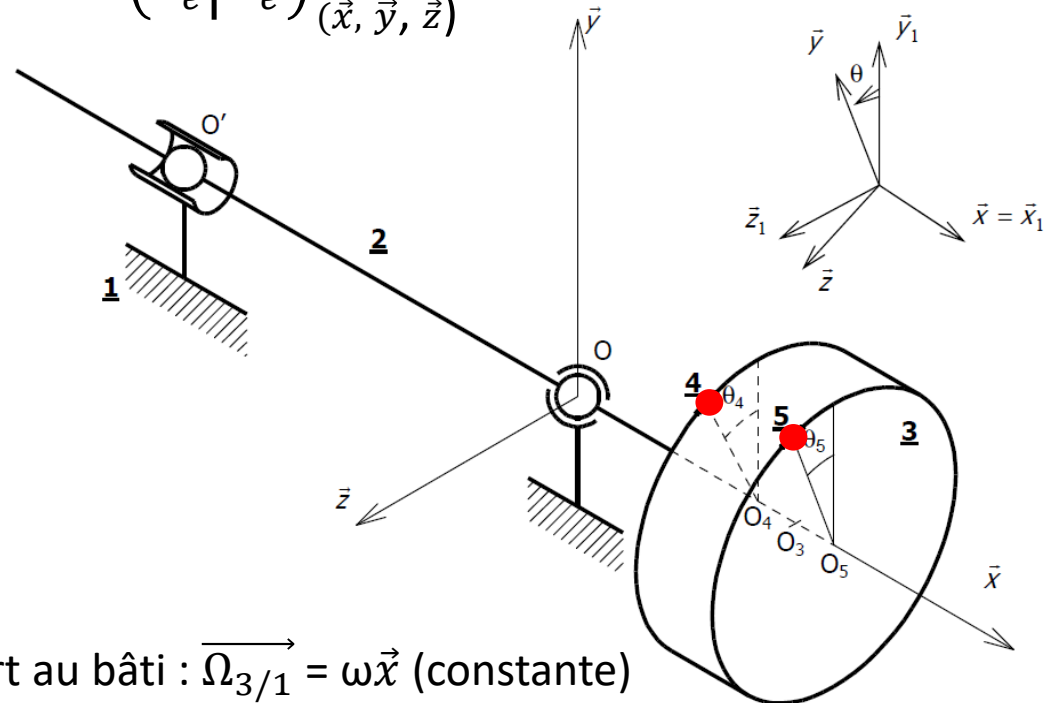


Machine à équilibrer les roues de voiture

- A l'instant t_1 , lorsque $\vec{z} = \vec{z}_1$, les capteurs mesurent les composantes Y_1 et Z_1
- A l'instant t_2 , lorsque $\vec{y} = \vec{z}_1$, les capteurs mesurent les composantes Y_2 et Z_2
- La matrice d'inertie de la roue en O dans R est : $\mathbf{I}_{(O,3)} = \begin{bmatrix} A & -F & -E \\ -F & B & -D \\ -E & -D & C \end{bmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$
- On note : $\mathcal{F}_{b\hat{a}ti \rightarrow S} = \left\{ \begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 0 \\ M \\ N \end{matrix} \right\}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$ $\mathcal{F}_{ext \rightarrow S} = \left\{ \begin{matrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{matrix} \middle| \begin{matrix} L_e \\ M_e \\ N_e \end{matrix} \right\}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$

Notations :

- Repère bâti **1** : $R_1(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$
- Repère roue **3** : $R(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$
- Centre inertie roue G(a,b,c) dans R
- Masse de la roue : m
- $OO' = d$ $O_4O_5 = 2e$ $OO_3 = f$
- Vitesse angulaire de la roue par rapport au bâti : $\vec{\Omega}_{3/1} = \omega \vec{x}$ (constante)



Calculs Préliminaires

➤ Limitier les vibrations = rendre l'action mécanique de 3 sur le bâti indépendante du mouvement de 3

On écrit le principe fondamental de la dynamique : $\mathcal{F}_{bâti \rightarrow 3} + \mathcal{F}_{ext \rightarrow 3} = \mathcal{D}_{3/Rg}$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ M \\ N \end{vmatrix}_R = \begin{pmatrix} -X_e & A\ddot{\theta} - L_e \\ m(\ddot{c}\theta + b\dot{\theta}^2) - Y_e & -F\ddot{\theta} + E\dot{\theta}^2 - M_e \\ (b\ddot{\theta} - c\dot{\theta}^2) - Z_e & -E\ddot{\theta} - F\dot{\theta}^2 - N_e \end{vmatrix}_R$$

Il faut donc que :

- 1) $b = c = 0$: le centre d'inertie G est sur l'axe de rotation
- 2) $F = E = 0$: l'axe de rotation (O, \vec{x}) est principal d'inertie

Détermination des masselottes

On calcul la matrice d'inertie de $\Sigma = \{\text{arbre 2} + \text{roue 3}\}$ et des masselottes puis on applique le principe fondamental de la dynamique

➤ Mise en place des conditions d'équilibrage :

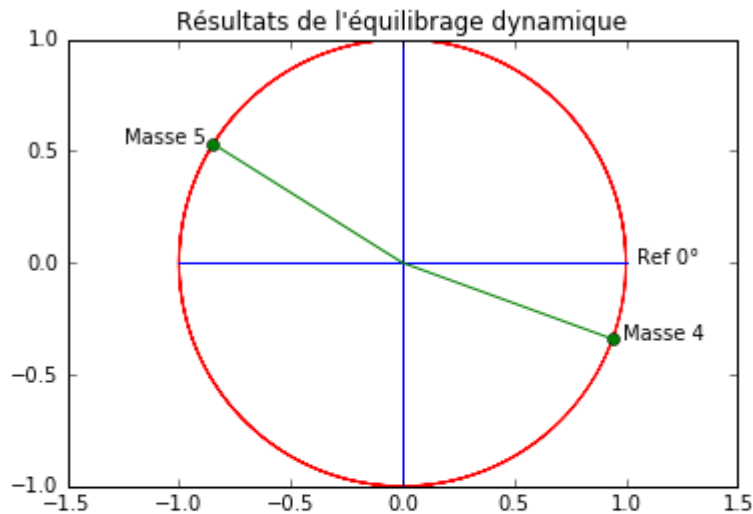
$$\begin{cases} y_{G(3+4+5)} = 0 \\ z_{G(3+4+5)} = 0 \\ E_{(3+4+5)} = 0 \\ F_{(3+4+5)} = 0 \end{cases}$$

donc

$$\begin{cases} m_5 \cos \theta_5 + m_4 \cos \theta_4 = -\frac{mb}{r} & (1) \\ m_5 \sin \theta_5 + m_4 \sin \theta_4 = -\frac{mc}{r} & (2) \\ m_5 \sin \theta_5 - m_4 \sin \theta_4 = -\frac{E_3}{r} & (3) \\ m_5 \cos \theta_5 - m_4 \cos \theta_4 = -\frac{F_3}{r} & (4) \end{cases}$$

Programme d'équilibrage

On a réalisé un programme auquel on a juste à donner les accélérations mesurées par les capteurs pour qu'il fournisse l'équilibrage dynamique calculé à partir des équations théoriques.



Masse 4 = 11.07g
Angle 4 = -20.0°

Masse 5 = 9.87g
Angle 5 = 147.9°

Exemple d'équilibrage pour des valeurs quelconques

Résolution du système précédent en fonction des données des capteurs :

$$m_4 = \frac{1}{2e\omega^2} \sqrt{((e+f)Y_1 + (d+e+f)Y_2)^2 + ((e+f)Z_1 + (d+e+f)Z_2)^2}$$

$$\cos\theta_4 = \frac{(e+f)Y_1 + (d+e+f)Y_2}{2m_4e\omega^2} \quad \text{ET} \quad \sin\theta_4 = \frac{(e+f)Z_1 + (d+e+f)Z_2}{2m_4e\omega^2}$$

$$m_5 = \frac{1}{2e\omega^2} \sqrt{((f-e)Y_1 + (d-e+f)Y_2)^2 + ((f-e)Z_1 + (d-e+f)Z_2)^2}$$

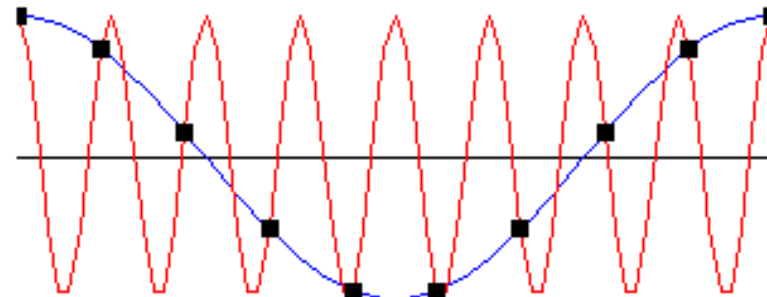
$$\cos\theta_5 = \frac{(e-f)Y_1 - (d-e+f)Y_2}{2m_5e\omega^2} \quad \text{ET} \quad \sin\theta_5 = \frac{(e-f)Z_1 - (d-e+f)Z_2}{2m_5e\omega^2}$$

Réalisation de mesures synchrones

Système physique en évolution permanente

Une représentation simplifiée de l'équilibrage dynamique

Avant de traiter et d'exploiter ces données il est important qu'elles aient un sens physique :



Ex : critère de Shannon
 $f_{ech} > 2f$

Signal réel ■ Echantillonnage Signal échantillonné

capteur
transducteur

parasites
grandeurs d'influence

pré-traitement
transmission

Amplification.
Mise en forme pour
transmission.

traitement du
signal

Décodage, filtrage
amplification, conversion numérique
traitement informatique

visualisation
du résultat

Voyant, alarme, afficheur
écran d'ordinateur
imprimante

Pour un équilibrage dynamique précis, les mesures doivent être réalisées de façon synchrones et précises avec le moteur

Objectifs :

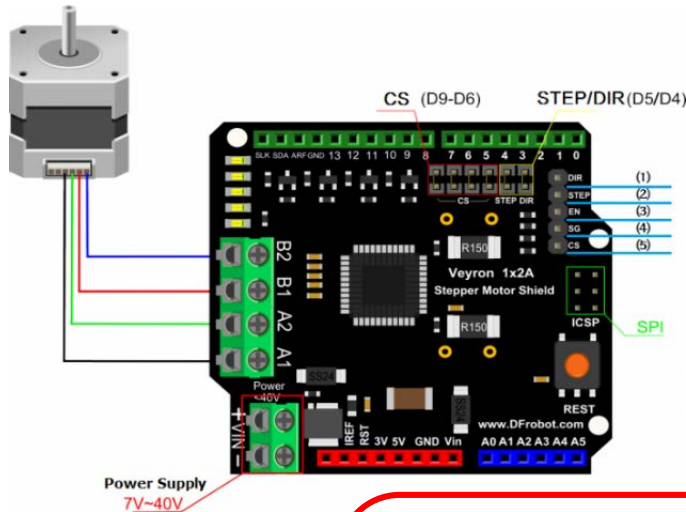
- Synchronisme parfait
- Valeurs précises (1g = 2V minimum)
- Rapport signal/bruit supérieur à 1000

Synchronisme parfait

Pilotage

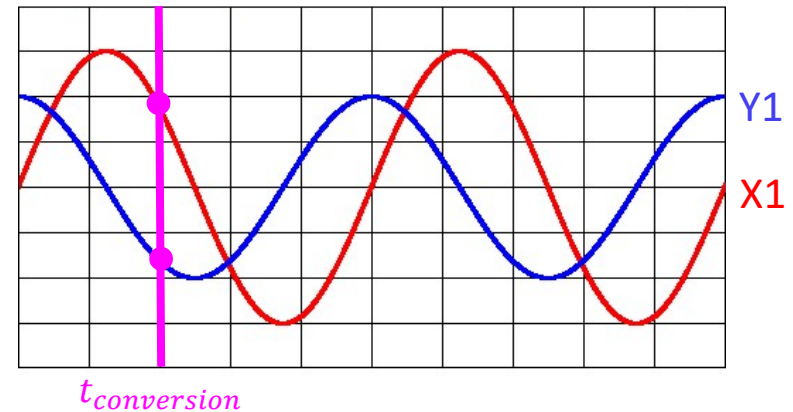
Pour que les mesures soient synchrones avec le moteur, différentes méthodes existent:

- Organes d'observation (codeur, top tour)
- Pilotage direct (moteur P.A.P.)



Conversion

Pour que la conversion soit synchrone sur les différentes voies il faut utiliser un CAN parallèle.



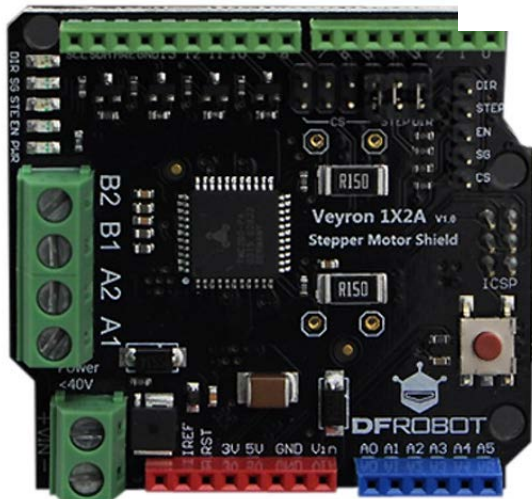
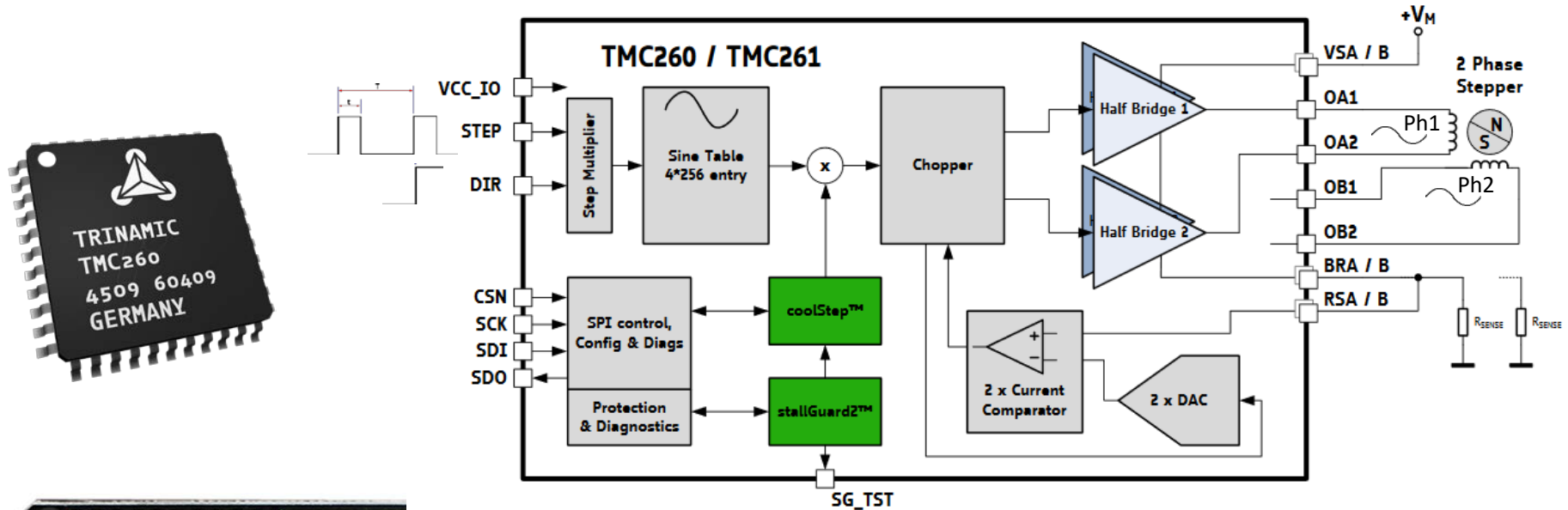
On a donc choisit d'utiliser le matériel suivant :

- ✓ Arduino Mega (pilotage de l'ensemble)
- ✓ Shield TrinamicTMC260 (pilotage moteur P.A.P.)
- ✓ Moteur P.A.P. 200pas/tour (précision de 1,8°)
- ✓ CAN AD7656 (16bits, synchrone, 6 voies parallèles)
- ✓ Alimentation 220V/40V (Alimenter le moteur)



Le Shield de pilotage du moteur P.A.P.

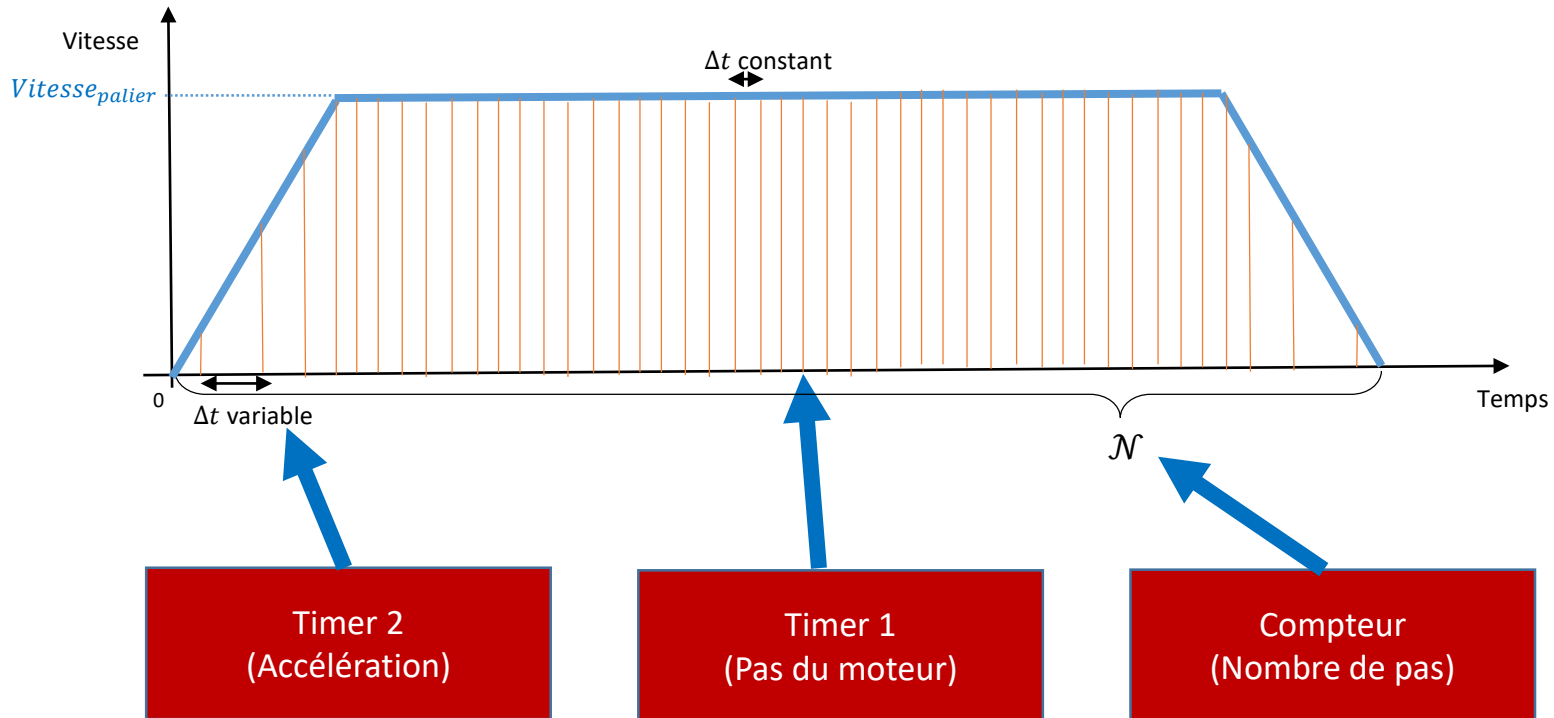
Les intérêts du Trinamic sur le synchronisme et la précision des mesures



- Pilotage facile d'un moteur P.A.P.
- Retour d'information (décrochage, couple résistant trop important)
- Adaptation facile à la carte Arduino Mega
- Paramétrage rapide à l'aide des registres
- Alimentation découplée de la commande
- Prix peu élevé (30 euros)
- Forme des courants dans les bobinages proche du sinusoïdale

Le programme arduino de pilotage

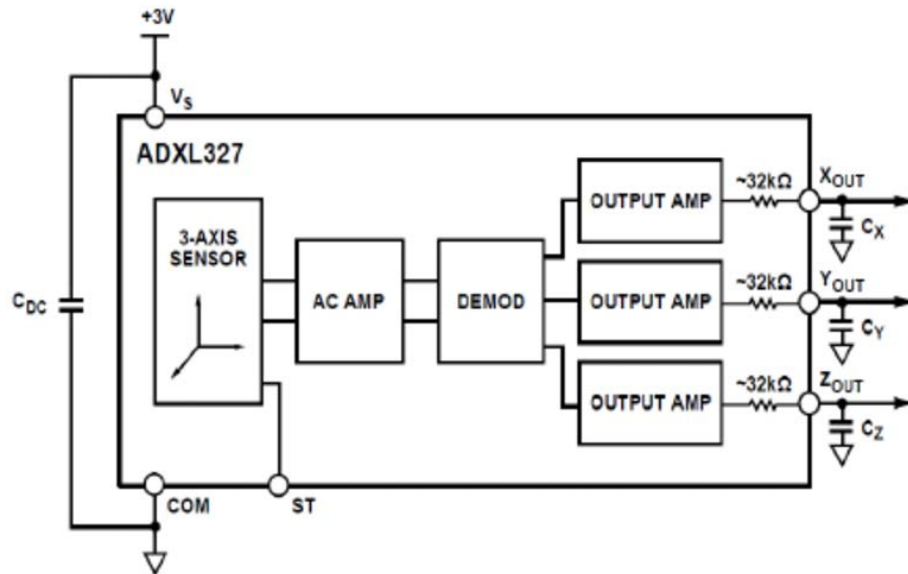
On utilise des Timers/Compteurs pour assurer la bonne fréquence de pilotage



On utilise cette méthode car le logiciel n'est pas précis temporellement or j'ai besoin de cette précision pour le synchronisme et la minimisation des vibrations moteur.

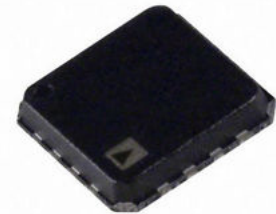
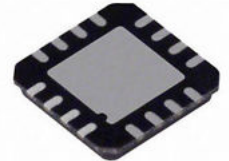
Précision à la mesure

On utilise un moteur P.A.P. qui tourne lentement, on doit donc utiliser un accéléromètre précis



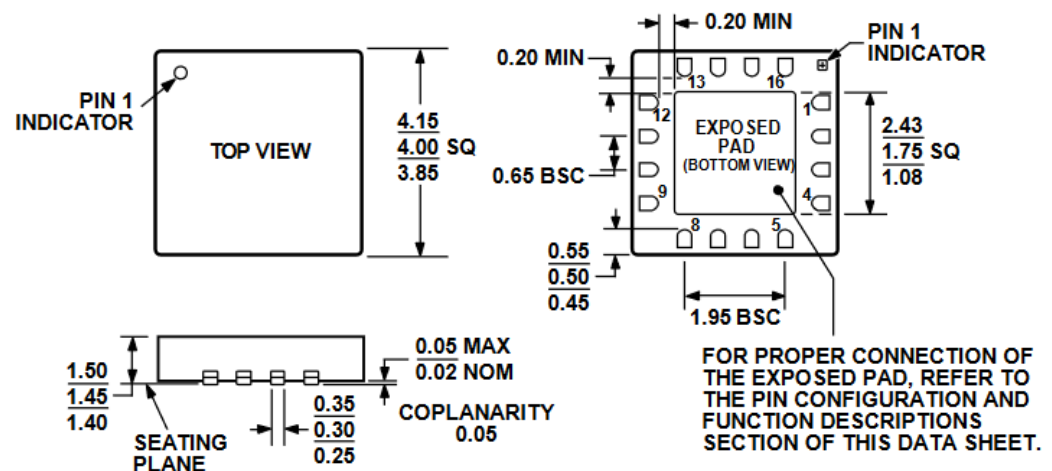
Caractéristiques :

- 3 axes simultanément
- Alimentation en 3V
- Un Self-Test
- Zone de travail : $\pm 2g$
- Petite taille (4mm X 4mm X 1.5mm)
- Prix abordable (8 euros)



INCONVENIENT :

Sa petite taille nous oblige à utiliser un circuit imprimé pour l'exploiter.



Extrait de la datasheet, section empreinte du composant

Précision dans le transport

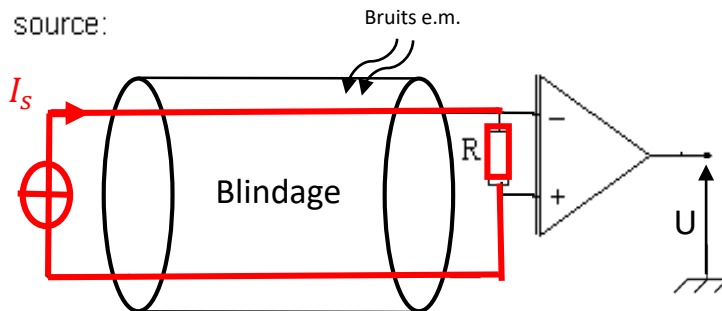
Mode Courant

■ Concept :

Convertir les mesures exprimées sous forme de tension en un courant qu'on transmet dans les câbles.

■ Schéma:

Circuit de source:



- Avantage pour la précision:
Les mesures sont indépendantes de la longueur du câble

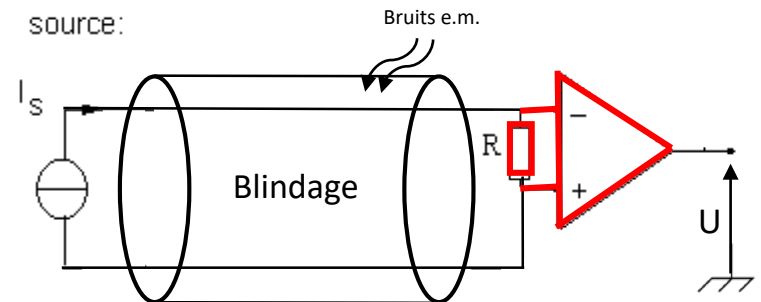
Mode Différentiel

■ Concept :

La tension mesurée est « filtrée » par un A.L.I. monté en mode différentiel pour atténuer les bruits

■ Schéma:

Circuit de source:

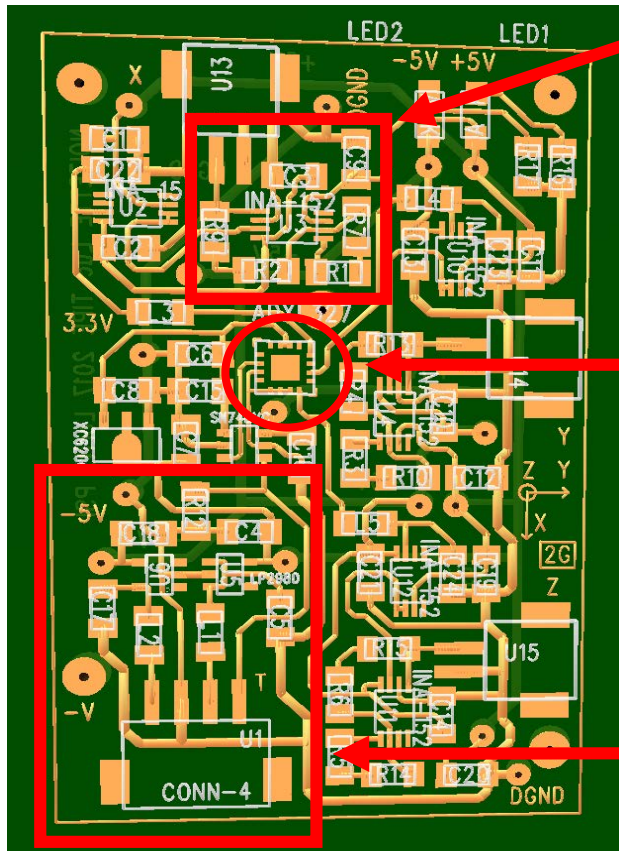


- Avantage pour la précision:
Les mesures sont peu sensibles à l'environnement

Précision intégrée au circuit imprimé

On souhaite mettre en place les méthodes précédentes, ce qui m'oblige à créer un circuit imprimé

Conception

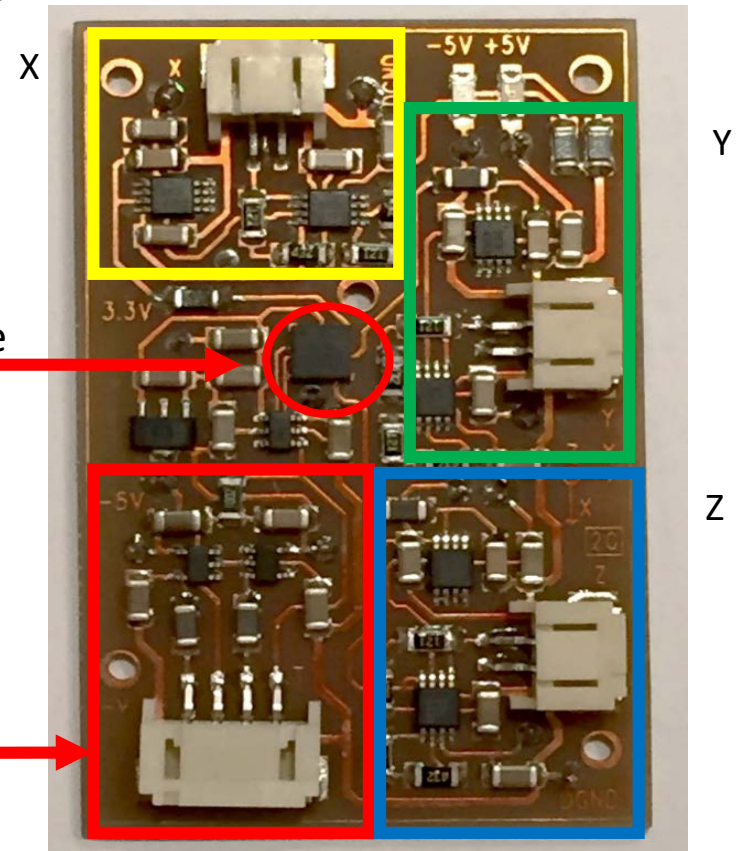


Convertisseur U/I

Accéléromètre

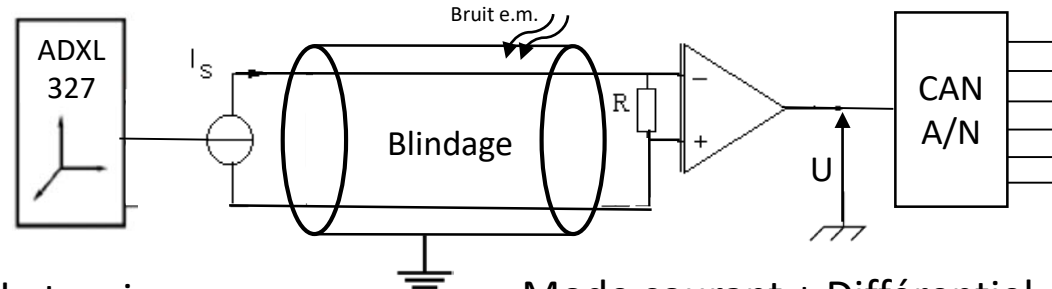
Alimentations

Réalisation



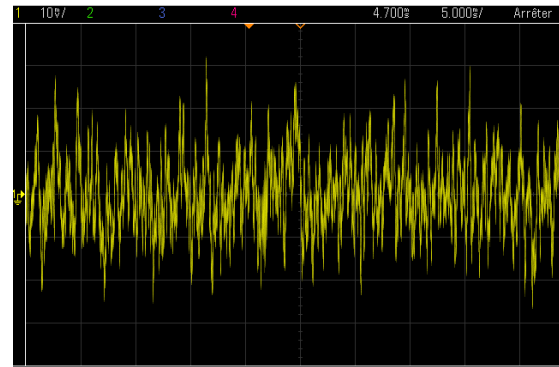
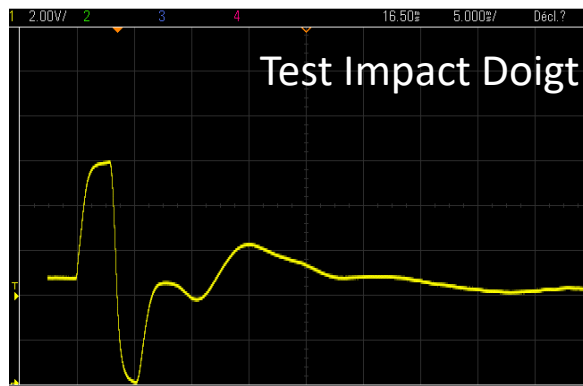
Mesure de la précision obtenue

On effectue les mesures à l'aide de la plaquette accéléromètre puis on transfère le signal à l'aide du montage précédent :

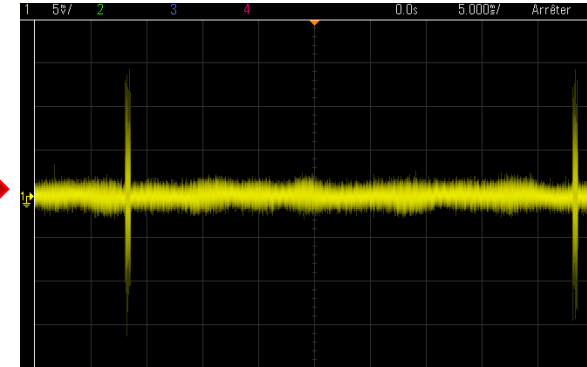


Mode tension

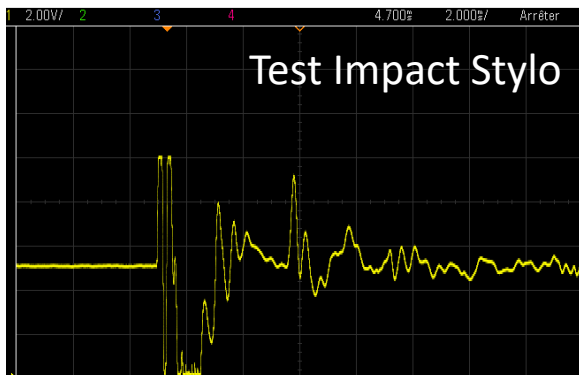
Mode courant + Différentiel



(10mV/carreau)
Bruit : 40mV, R = 250



(5mV/carreau)
Bruit : 5mV, R = 2000



- ✓ Le rapport $R = \frac{Acc_{signal}}{Acc_{bruit}}$, a été multiplié par 8
- ✓ Les mesures sont réactives (dynamique en 200μs)
- ✓ Les mesures sont précises (1g = 2,5V donc 5mV = 2mg)

La plaquette ainsi réalisée correspond aux critères de précision

Expérimental : Observation d'un déséquilibre

Conditions expérience : 800tr/min

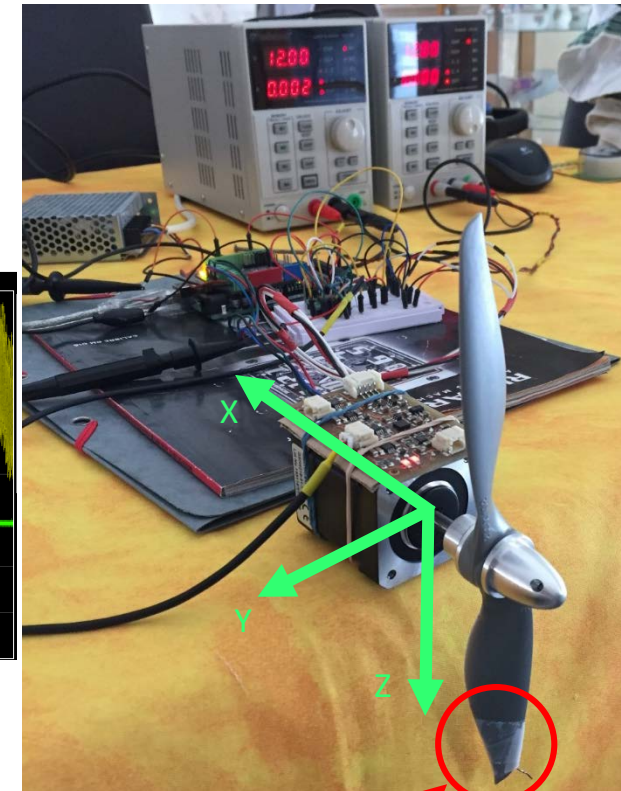
Accélération observée
selon l'axe X

Accélération observée
selon l'axe Y

Déphasage de 90°
des mesures (X,Y)

Les mesures sont
périodiques et stationnaires
(preuve du synchronisme)

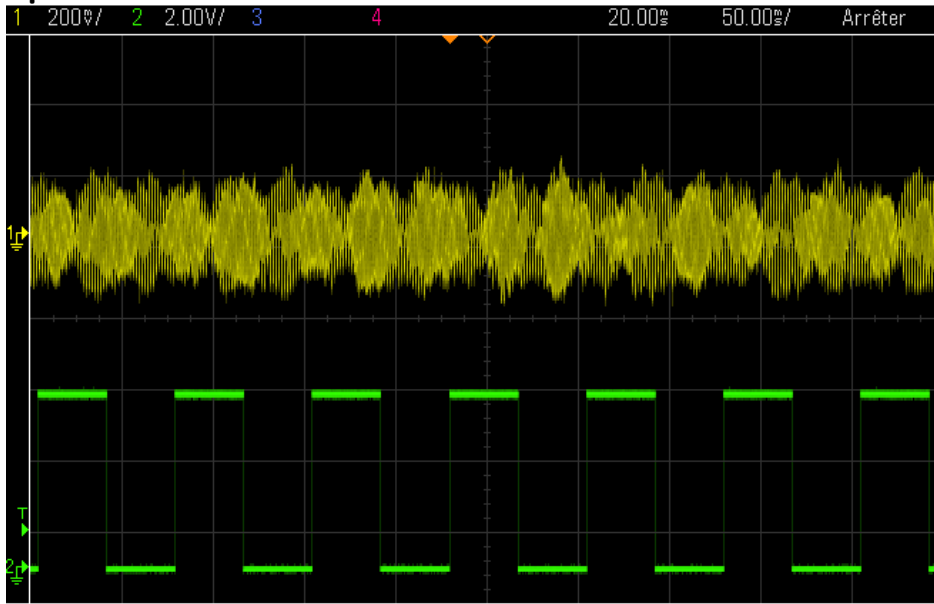
Mesures propres et précises
(Pas du moteur observables)
 $800\text{tr/min} = 1 \text{ pas toutes les } 375\mu\text{s}$



Masselotte de déséquilibre (2g)

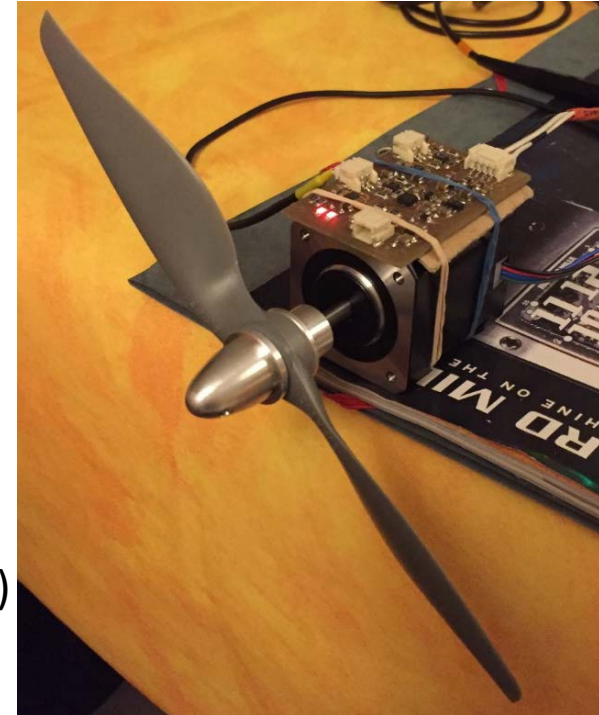
Expérimental : Retour à l'équilibre

En l'absence de masse additionnelle on obtient la courbe suivante



Accélération
observée
selon l'axe
moteur

Motorisation
peu vibrante
(200mV = 80mg)

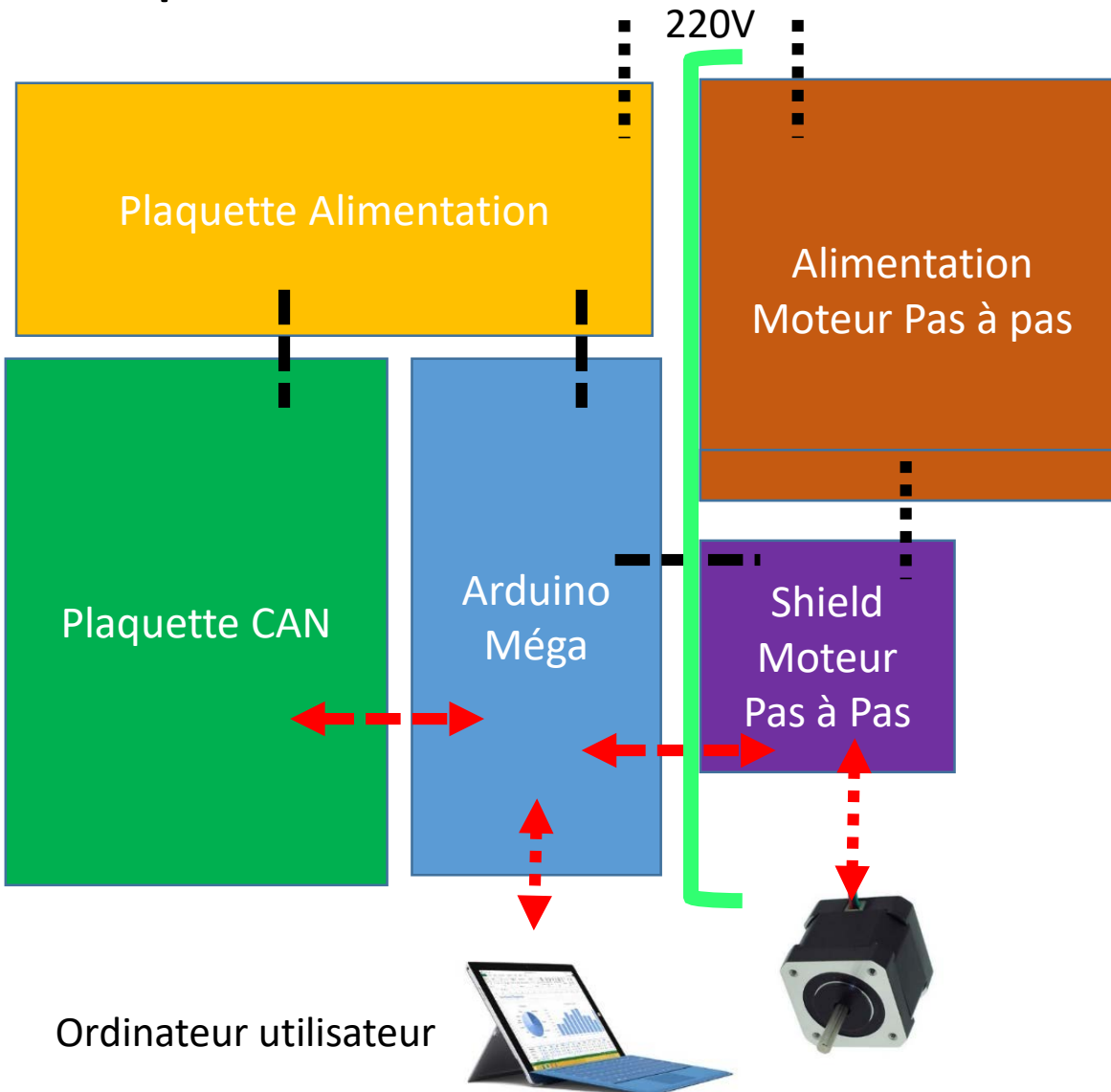


On constate une évolution notable de la courbe d'accélération. Ainsi notre système permet de mesurer les effets d'un déséquilibre dynamique.

Les points faibles :

- Absence de bâti (perte de sensibilité)
- Absence de valeur moyenne à l'aide d'exportation des mesures sur Excel par exemple

Le plan de création



Cahier des charges :

- Une unique alimentation 220V
- Grande précision dans les mesures
- Possibilité de travailler avec deux accéléromètres
- Communication filaire/H.F.
- Conversion synchrone
- Isolation Galvanique
- Le tout dans une boîte
- Un bâti intégré
- Possibilité d'observer les mesures via un oscilloscope
- Taille raisonnable : (20cm x 30cm x 8cm)

Notations :

- — — Alimentation Electronique
- Alimentation Puissance
- ↔ Communication Interne
- ↔ Communication Externe
- ⌈ Isolation Galvanique

Notations :

Alimentation réservée au digital (présence transitoires)

Ordinateur utilisateur

