



**Compte rendu de stage : Optimiser l'identification de l'activité physique à partir de position, d'accélération et de fréquence cardiaque**

Par Dimitri PIANETA

Tuteurs : Thibaud LEVRARD  
Marc-Antoine CUSTAUD

Année 2011-2012

MASTER 1 Ingénierie Image et Mathématique

## Remerciements

Je remercie l'ensemble de l'équipe de l'antenne d'**UMR CNRS 6214-INSERM U1083** et plus particulièrement les différents stagiaires pour leur bonne ambiance de travail.

Je remercie Monsieur CUSTAUD et Monsieur LEVRARD pour la confiance qu'ils m'ont donnée concernant le travail à réaliser.

Je remercie aussi les différents auteurs des articles que j'ai lus.

Je remercie mes différents lecteurs : mes parents, madame CAVARO-MENARD, Monsieur CUSTAUD et les différentes personnes qui m'ont conseillé dans la rédaction de ce rapport.

Je remercie mes anciens collègues de l'ESEO, mes collègues de promotion pour leurs soutiens de la Rochelle.

## Introduction

**Dans les pays développés ou en voie de développement, l'inactivité physique est un problème de santé. De nos jours, les nouvelles technologies nous rendent plus en plus sédentaire. L'OMS<sup>1</sup> recommande trente minutes d'Activité physique par jour.**

**De nombreuses publications et études font l'état de l'art de la mesure de cette activité physique. La technologie permet de nos jours de mesurer la distance et la position par GPS et un accéléromètre. L'activité cardiaque est évaluée par ECG.**

**De plus en plus les signaux sont présents dans notre vie de tous les jours. Moi, je m'intéresse dans ce rapport des signaux particulier appliquer au médical. Je vais m'intéresser surtout sur les signaux d'accélérations d'un accéléromètre.**

**J'ai dû mettre en place un algorithme, qui doit avec ces signaux accélérations savoir si la personne fait du vélo, course et marche...**

**Bonne lecture,**

---

<sup>1</sup> Organisation Mondiale de Santé

## Sommaire

Remerciements .....	2
Introduction.....	3
Partie A : Présentation du lieu du stage.....	5
I)  Lieu de stage :.....	6
II)  Les différents logiciels de Télévasc : .....	7
Partie B : Le stage .....	8
I)  Introduction: .....	9
II)  Présentation du projet:.....	9
III)  Accéléromètres:.....	10
IV)  Travaux et algorithmes: .....	23
Partie C Discussions et conclusionDiscutions.....	41
Discutions.....	42
Conclusion.....	43
ANNEXES .....	44
Micro-usinage des MEMS.....	45
DIFFERENT Type De Matrice existant.....	46
CODES.....	47
REFERENCES.....	52

## **Partie A : Présentation du lieu du stage**

## I) Lieu de stage :

J'ai été effectué mon stage dans l'antenne **Laboratoire de Biologie Neurovasculaire Mitochondriale Intégrée (BNMI) UMR CNRS 6214-INSERM U1083** qui se trouve dans la faculté de médecine à Angers.

Ce laboratoire fait partie de CCTISB (figure 1) qui a plusieurs acteurs. J'étais dans l'équipe de TELEVASC.

TELEVASC permet de faire des développements et des valorisations d'un service d'analyse et d'archivages en ligne pour les images et signaux cardiovasculaires (échographiques).

Les clients de TELEVASC sont Médecins, Angiologues, Cardiologues, Centres de recherches cliniques...

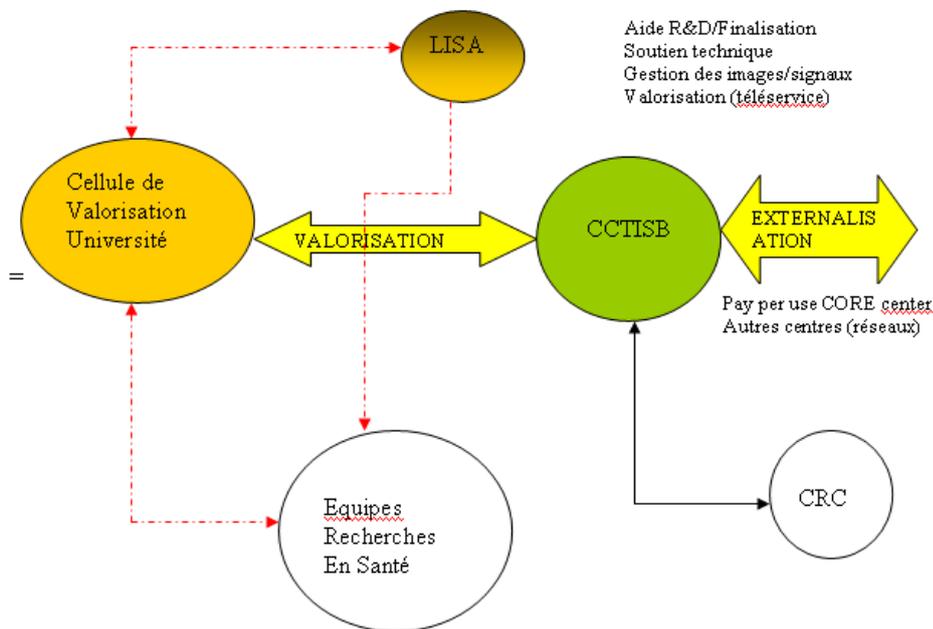


Figure 1 : schéma des acteurs

C'est une marque déposée qui a pour logo suivant :

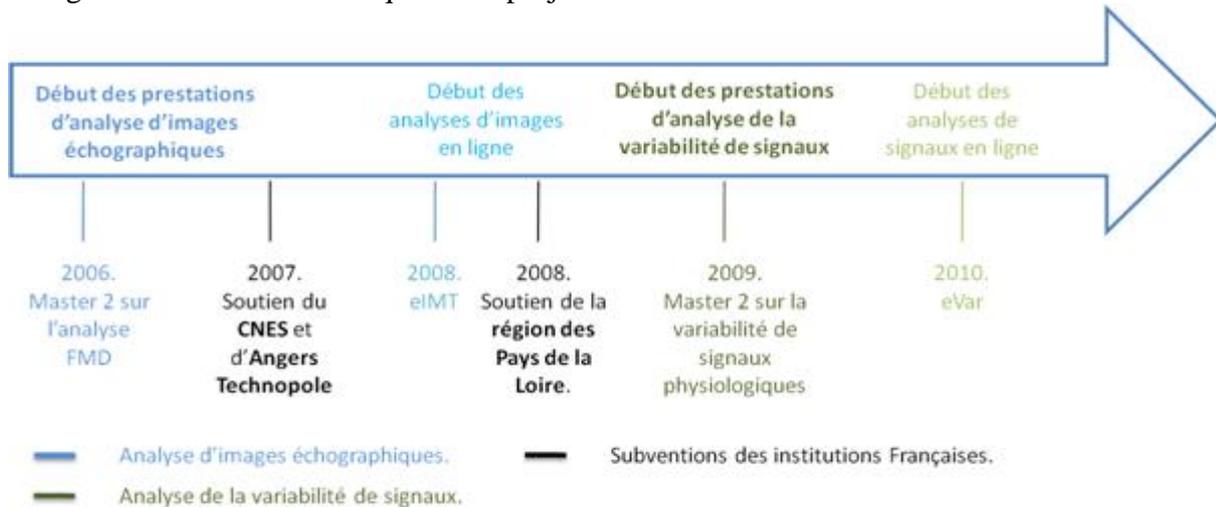


Figure 2 : Logo de Télévasc source : [teleavasc.fr](http://teleavasc.fr)

Télévasc est une plateforme d'outils en ligne et services spécifiques dédiés à l'étude et la gestion de données physiologiques.

Le site internet est [teleavasc.fr](http://teleavasc.fr).

La figure 3 montre un historique de ce projet Télévasc.



**Figure 3 : Historique de télévasc source : televasc.fr**

Le projet initial consistait à mettre en place une méthodologie d'analyse automatisée de vidéo pour mesurer la dilatation aux flux. Il a été initié en 2006 par V. de GERMAIN et H. PHELIPPEAU lors de leurs stages de Master 2.

En 2007, le projet a été lauréat au 6ème à l'appel d'idée innovante et a reçu le prix « spécial » du jury organisé par Angers Technopole. Ce prix a permis aux porteurs du projet de réaliser une première étude de marché sur le prototype de Télévasc.

En 2008, le projet a été subventionné lors de l'appel à projet « Innovation Numérique thématique TIC 2007 » par la région des Pays de la Loire. Cela a permis de développer l'offre de Télévasc grâce à son implication dans divers projets hospitaliers de recherche clinique :

- « 4A » commandité par la Société Française de Médecine Vasculaire qui s'intéresse à la quantification des Anévrismes de l'Aorte Abdominale.

**En 2009**, la réalisation de travaux universitaires sur l'étude des signaux physiologiques et leur gestion en ligne par Internet ont initié de nouveaux axes pour la plateforme : l'analyse de la variabilité et le stockage de données en ligne. Le CNES a de plus, confié à Télévasc l'analyse des données de plusieurs protocoles de recherche :

- étude « Orthorein » menée avec le CHU d'Angers (France),
- étude menée avec le CHU de Rennes (France),
- étude menée avec le CHU de Lyon.

## II) Les différents logiciels de Télévasc :

Ces logiciels sont disponibles en ligne sur televasc.fr.

- eCar : permet d'étudier le baroréflexe et la variabilité des signaux physiologiques.
- eIMT : permet de mesurer l'épaisseur intima Media d'un segment de réseau vasculaire à partir de son image échographique.
- @rterioMed : permet de quantifier la rigidité d'une artère chez l'Homme.

## **Partie B : Le stage**

## I) Introduction:

Mon stage avait pour objectif de trouver un algorithme qui améliore le logiciel Geocardio du laboratoire. Geocardio permet de savoir avec différents signaux (GPS, accéléromètre et ECG) si la personne fait du vélo, de la course...

Mon travail a été dans un premier temps : de lister une bibliographique sur les accéléromètres et sur les algorithmiques présents.

## II) Présentation du projet:

Le capteur géocardiométrique associe trois appareils : un GPS<sup>2</sup>, un actimètre et un Holter ECG.

- **Le GPS :**

*Technologie* : Itrail SleuthGear Track

*Objectifs* : Permettre d'enregistrer les informations sur la distance parcourue, la vitesse de déplacement et l'heure UTC<sup>3</sup> grâce aux données géolocalisation.

- **L'actimètre :**

*Technologie* : MSR 145 WS

*Objectifs* : est composé d'un accéléromètre, d'un capteur de température et d'un capteur de luminosité. On utilise pour ce projet que l'accéléromètre.

L'accéléromètre enregistre les accélérations selon les axes x, y et z

- **Le Holter ECG<sup>4</sup> :**

*Technologie* : SpiderView

*Objectifs* : Mesure l'intervalle R-R (correspond à deux battements cardiaques) grâce à 5 électrodes placées sur le thorax reliées à un boîtier enregistreur portable.

Il est possible de déduire la fréquence cardiaque à partir de temps R-R, selon la relation suivante :

Avec IRR (Intervalle de temps R-R) en seconde et FC (Fréquence cardiaque) en bpm<sup>5</sup>.

Le but de ce projet est de créer un algorithme pour récupérer des signaux accéléromètre pour déterminer l'activité d'un patient.

Ces activités sont les suivantes:

- Véhicule (voiture)
- Station assise/ allongée
- Vélo
- Indéterminée
- Marche
- Marche rapide
- Course lente
- Course
- Véhicule (bus)
- Statique debout

---

<sup>2</sup> Global Positioning System

<sup>3</sup> Universal Time Coordinated

<sup>4</sup> Electrocardiogramme

<sup>5</sup> Battement par minute

### III) Accéléromètres:

#### a) Les bases

L'accéléromètre est un appareil qui mesure la force spécifique non gravitationnelle subie par sa masse sismique. (figure 4) Cette mesure est appelée « lecture accélérométrique ».

$$\vec{A}(\vec{M}) = \frac{d^2\vec{M}}{dt^2} - \vec{\varphi}(\vec{M}) = \vec{\gamma}_a - \vec{\varphi}(\vec{M}) = \frac{\sum \vec{F}_{\neq \varphi}}{\sum m} \quad (1)$$

Où  $\vec{A}(\vec{M})$  représente la mesure d'accélération de la masse d'épreuve M assimilée à un point matériel M de masse m,  $\vec{\gamma}_a$  l'accélération absolue du véhicule et  $\vec{\varphi}(\vec{M})$  le champ de gravitation local. Cette relation exprime ainsi la mesure d'accélération comme le quotient de la résultante des forces non gravitationnelles appliquées à M par sa masse m. Pour s'en persuader il suffit de considérer le cas particulier d'un accéléromètre constitué d'un simple système masse-ressort (figure 4 à gauche). A l'équilibre, la masse est soumise à son propre poids  $\vec{P} = m\vec{\varphi}$  et à la force de rappel du ressort telle que  $\vec{F} = -\vec{P}$ . Ainsi d'après la relation précédente, l'accéléromètre mesure le champ de gravitation local alors que le système global est au repos. De même si le véhicule est en chute libre, la valeur mesurée par l'accéléromètre est nulle. C'est le principe utilisé lors des vols paraboliques effectués par l'airbus "Zéro G" (figure 4 à droite). L'avion effectue une trajectoire parabolique afin de rentrer en phase de chute libre. Ces passagers et le matériel embarqué se retrouvent ainsi en impesanteur pendant une trentaine de secondes.

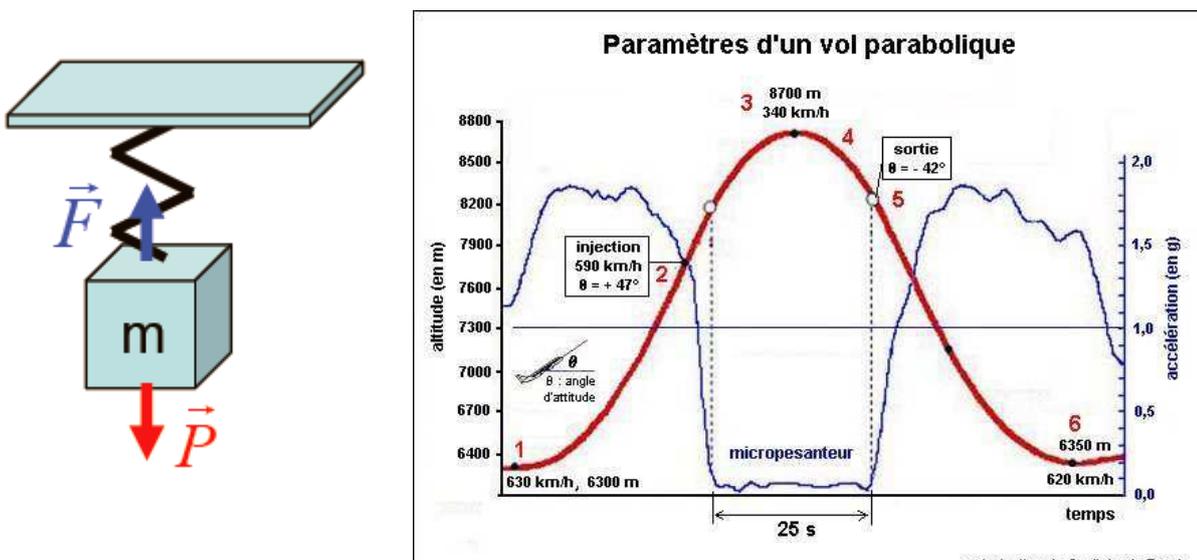


Figure 4 : modèle d'un système masse-ressort à l'équilibre. La masse M est soumise à son propre poids P et à la force de rappel F. A l'équilibre l'accélération vue par le capteur ne sera pas nulle mais correspondra au champ de gravitation. A droite : paramètres d'un vol parabolique effectué par l'airbus "Zéro G". Lors de son entrée en phase de chute libre, ses passagers se retrouvent en impesanteur.

#### Conditions portant sur les accéléromètres :

Tout capteur présente des erreurs de mesure qui sont des écarts entre la valeur mesurée et la valeur réelle de la grandeur d'entrée.

Les erreurs de mesure les plus communes sont représentées sur la figure 5 : il s'agit des erreurs de biais (ou de zéro), de facteur d'échelle et de linéarité. La mesure de l'accéléromètre peut ainsi s'exprimer de la façon suivante :

$$\gamma_{\text{sortie}} = (K_0 + \Delta K_0) + (1 + \Delta K_1)\gamma_{\text{entrée}} + K_2\gamma_{\text{entrée}}^2 \quad (2)$$

où  $\gamma_{\text{sortie}}$  est la donnée en sortie de l'accéléromètre en g.

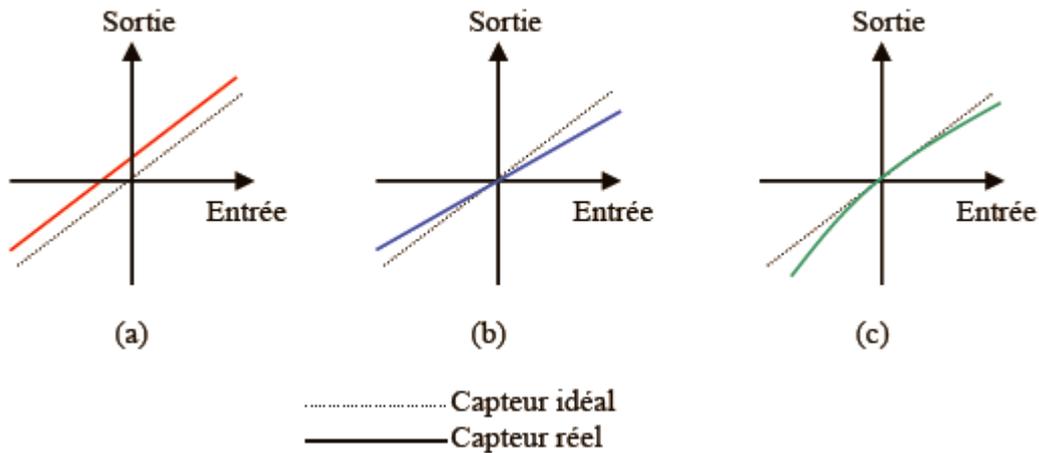


Figure 5 : Erreurs typiques de mesure : (a) erreur de biais ; (b) erreur de facteur d'échelle et (c) erreur de linéarité

– Le biais  $K_0 + \Delta K_0$  est la valeur mesurée en l'absence de grandeur d'entrée. L'instabilité de ce biais représentée par  $\Delta K_0$  au cours du temps et en fonction des éléments extérieurs (température, ...) constitue, du moins en ce qui concerne sa partie non modélisable, une des principales sources d'erreurs de mesure. Cette erreur s'exprime usuellement en mg ou en  $\mu\text{g}$ .

– L'erreur de facteur d'échelle  $\Delta K_1$ , qui s'exprime généralement en ppm, conduit à une erreur de mesure proportionnelle à l'accélération en entrée.

– L'erreur de linéarité modélisée par le facteur  $K_2$  varie quadratiquement avec l'accélération d'entrée. Cette erreur s'exprime en  $\mu\text{g}/\text{g}^2$ .

Il existe d'autres erreurs dans la sortie d'un accéléromètre, mais ces trois erreurs-types sont particulièrement adaptées pour estimer les ordres de grandeur de performance recherchée. Ainsi en référence à l'équation (5) si l'on considère un accéléromètre affecté d'une erreur de mesure  $\Delta\gamma$ , une mesure durant T secondes avec cet appareil peut entraîner une erreur sur la vitesse :

$$(\Delta V) = T (\Delta \gamma) \quad (3)$$

A titre d'exemple, considérons un engin balistique dont la propulsion produit une accélération égale à 5 g, conduisant à la vitesse de 5500 m/s au bout de 110 secondes. Les relations 2 et 3 se traduisent alors par une condition sur l'erreur de mesure d'accélération  $\Delta\gamma$  :

$$(\Delta\gamma) < \frac{\Delta V}{T} = \frac{0.9\text{m/s}}{110\text{s}} \approx 8.1 \cdot 10^{-3} \text{m/s}^2 \quad (4)$$

Comme cela a été expliqué précédemment les causes de l'erreur globale sont multiples et chacune doit être réduite autant que possible, ce qui nous conduit à l'ordre de grandeur :

$$\Delta\gamma = \sum_i \Delta\gamma_i \quad (5)$$

$$\Delta\gamma < 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 10^{-4} \text{m/s}^2 \quad (6)$$

### Principe de la mesure d'accélération :

Les accéléromètres classiques peuvent être généralement assimilés à un système masse-ressort de masse m et de raideur K. Une accélération absolue  $\gamma_a$  en référence à la relation 1 entraîne

un déplacement  $x$  de la masse d'épreuve créant une force de rappel  $\vec{F} \neq \varphi = -Kx.\vec{i}$  exercée par le ressort.

Ainsi le principe fondamental de la dynamique appliqué à cette masse, assimilée à un point M de masse  $m$ , s'écrit (7):

$$m\vec{\gamma}a = \vec{F} \neq \varphi + m\vec{\varphi} \quad (7)$$

La mesure est donc effectuée par la connaissance du déplacement  $x$  !

$$\vec{F} \neq \varphi = -Kx.\vec{i} = m\vec{A}(\vec{M}) \quad (8)$$

Où  $\vec{A}(\vec{M})$  est la « lecture accélérométrique » équation 1 directement liée au déplacement  $x$  de la masse d'épreuve :

$$\vec{A}(\vec{M}) = \frac{\vec{F} \neq \varphi}{m} = \frac{-Kx.\vec{i}}{m} \quad (9)$$

Les techniques de détection mises en œuvre pour mesurer ce déplacement sont multiples, les plus courants sont la détection capacitive, piézorésistive ou piézoélectrique. La grandeur de sortie proportionnelle à l'accélération est dans ce cas analogique (tension ou intensité électrique). La sensibilité d'un accéléromètre en boucle ouverte est d'autant plus grande que la raideur  $K$  du ressort est faible, ce qui malheureusement s'obtient au détriment de sa fréquence propre  $\omega_p$  et donc de sa bande passante. Un compromis doit donc être trouvé entre sensibilité et bande passante. La masse d'épreuve se déplace selon les cas en translation ou en rotation. Dans ce dernier cas, les accéléromètres sont nommés pendulaires.

Une masse d'épreuve en forme de plaque, ou pendule, est fixée à un bâti par l'intermédiaire de charnières. Sous l'action d'une accélération suivant l'axe sensible, le pendule tourne d'un angle  $\alpha$  proportionnel à l'accélération appliquée. Les exemples industriels de ces accéléromètres sont nombreux (Endevco, Sensorex, Sagem, etc) mais leur précision reste trop faible ( $> 0, 1\%$  de la pleine échelle) pour prétendre à la navigation inertielle. Leurs applications restent plutôt orientées vers la mesure de vibrations, de chocs, etc.

Ils existent différents types de capteur:

- Capacitive**: rayon métal ou micro-usiné produits capacité, changer de capacité liée à l'accélération
- Piezoelectric**: quartz piézo-électrique monté sur la masse – la tension de sortie convertie en accélération
- Piezoresistive**: résistance qui change avec l'accélération
- Effet hall**: converti en signal électrique par détection de champs magnétique
- Magnéto-résistive** : Matériel résistive changeant selon le champ magnétique

### b) Accéléromètres asservis

La force inertielle à laquelle est soumise la masse sismique est compensée par une force égale et opposée créée par un système moteur dont la commande constitue la mesure de l'accélération.

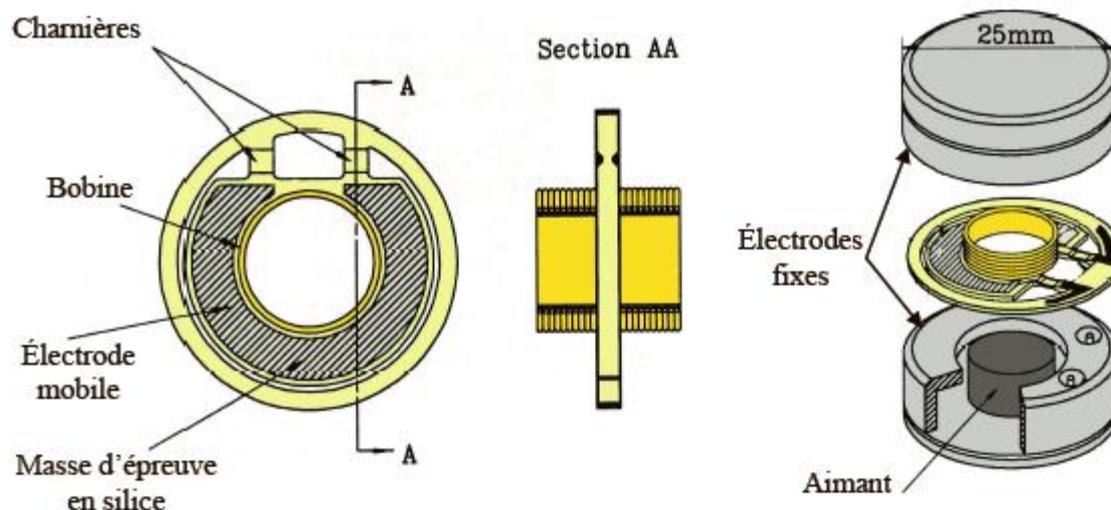


Figure 6 : Schéma de l'accéléromètre pendulaire asservi QA2000 de chez Honeywell source : thèse de Le FOULGOC

En terme de performance, l'accéléromètre pendulaire asservi QA2000 Q-Flex (ou aujourd'hui sa dernière évolution le QA3000) développé par Sunstrand, et aujourd'hui produit par Honeywell est une référence dans le domaine de la navigation inertielle commerciale et militaire. Son excellente stabilité de biais à long terme et sa fiabilité en font probablement le meilleur accéléromètre pendulaire disponible sur le marché actuellement.

La figure 6 présente le schéma de ce dispositif : la structure charnières / pendule est constituée d'une seule pièce en silice, matériau très stable d'un point de vue temporel et thermique ( $\alpha = 0,6 \cdot 10^{-6}$ ). Un soin tout particulier a été porté à la réalisation des charnières qui comporte des cycles successifs d'usinages mécaniques, chimiques et de traitements thermiques. Deux bobines situées de part et d'autre du pendule forment la partie mobile du système moteur. Le courant qui traverse ces bobines, interagit avec le champ magnétique issu de deux aimants placés en vis-à-vis afin de créer une force de Laplace de contre-réaction :

$$F_{Laplace} = \pi B i N d$$

Où  $F_{Laplace}$  est la force de contre réaction générée,  $B$  est le champ magnétique,  $i$  le courant dans la bobine,  $N$  le nombre de spires et  $d$  le diamètre de la bobine.

### c) Accéléromètres à lame vibrante :

Lorsqu'une corde de guitare est plus ou moins tendue, la note produite s'en trouve plus ou moins aiguë. C'est sur cette idée simple que repose le principe des accéléromètres à lame vibrante. Considérons une poutre (ou lame) maintenue en vibration : sa fréquence propre par des circuits électroniques associés et encastrée d'un côté à un support fixe et de l'autre à une masse d'épreuve (figure 7). L'accélération subie par la masse d'épreuve crée alors une force axiale de compression ou d'extension dans le résonateur en vibration, directement convertie en variation de la fréquence de résonance. C'est la fréquence de la lame qui constitue le signal

de sortie de l'accéléromètre vibrant et les variations sont représentatives de l'accélération appliquée.

Les avantages de ces capteurs sont nombreux : ils présentent tout d'abord une très bonne définition du facteur d'échelle (quelques ppm) à condition d'utiliser un matériau d'excellente qualité mécanique (ex : quartz ou silicium). Ceci est dû à la traduction directe de l'accélération en une variation de fréquence qui ne fait intervenir que les dimensions de la poutre et les caractéristiques du matériau constitutif.

De plus, bien que la masse d'épreuve ne soit pas asservie en position, ces déplacements sont limités.

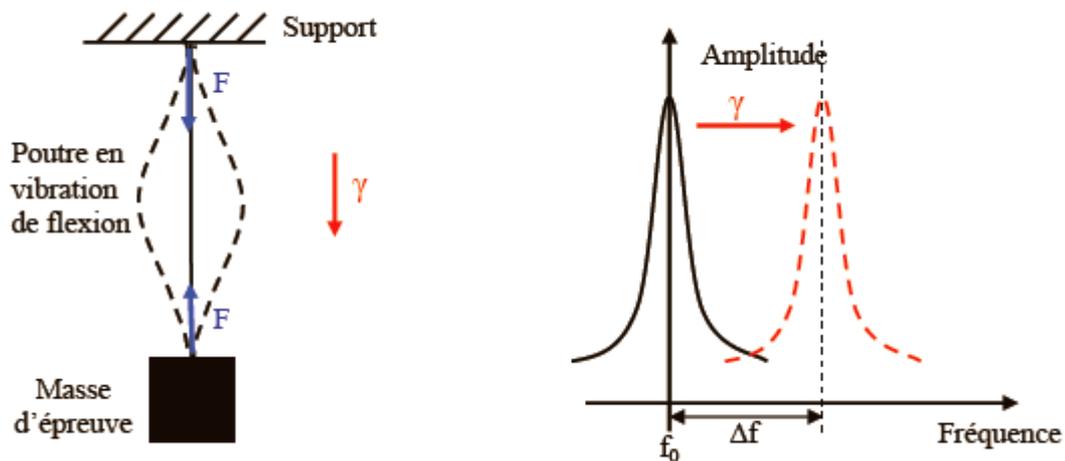


Figure 7 : Schéma du principe de l'accéléromètre à poutre vibrante. source : thèse de Le FOULGOC

#### d) L'accéléromètre à lame vibrante VIA

A la fin des années 1980, l'ONERA décida de réaliser ce type de capteur de manière monolithique, c'est-à-dire obtenir tout le capteur à partir d'un même substrat de quartz afin d'éviter les assemblages limitatifs des performances et de permettre une miniaturisation plus aisée. Ces études ont débouché sur le concept du VIA (Vibrating Inertial Accelerometer) présenté sur la figure 8, breveté en 1995.

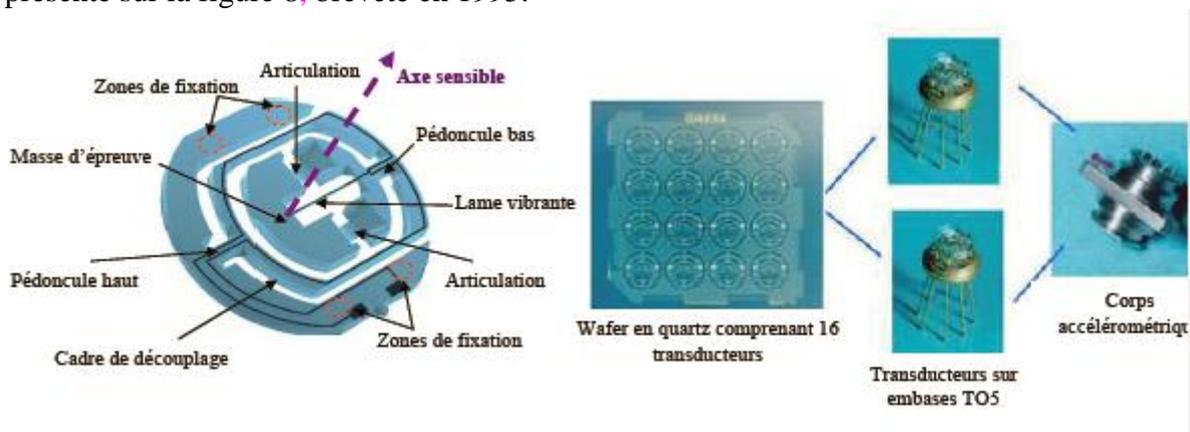


Figure 8 : A gauche : transducteur en quartz. A droite : corps mécanique de l'accéléromètre VIA composé de 2 transducteurs montés en configuration différentielle. source : thèse de Le FOULGOC

La partie active du transducteur d'accélération, constituée de la lame vibrante, de la masse d'épreuve et de ses deux articulations, est reliée aux zones de fixation par l'intermédiaire d'un cadre de découplage.

### e) Accéléromètres optiques :

Il existe de nombreux capteurs accélérométriques utilisant un système optique pour la détection. En particulier les avancées dans le domaine des lasers et fibres optiques ont eu un impact déterminant dans le développement de configurations originales (figure 7). Ces dispositifs reposent sur le principe des accéléromètres non-asservis : le déplacement d'une masse d'épreuve est mesuré par un phénomène physique proportionnel comme une variation d'intensité, de fréquence, de phase, de longueur d'onde ou de polarisation de l'onde lumineuse dans la fibre optique [1]. Au stade actuel, les développements industriels restent principalement limités à la mesure de vibrations mais certaines mises en œuvre semblent potentiellement pouvoir convenir à la classe inertielle (hautes performances). Les développements les plus prometteurs sont :

- *La fibre optique à réseau de Bragg photo-imprimé (FBG)* : Les réseaux de Bragg sont des structures périodiques photo-imprimées directement au cœur de la fibre optique[2]. De telles structures consistent en une variation périodique sur quelques millimètres de l'indice de réfraction au sein de la fibre. Le pas  $\Lambda$  de ce réseau est environ  $0.5 \mu\text{m}$ . Ainsi chaque FBG réfléchit une longueur d'onde  $\lambda_B$  selon l'indice de réfraction effectif  $n_{eff}$  et le pas du réseau  $\Lambda$  tels que :

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

$n_{eff}$  et  $\Lambda$  sont fonction de la déformation de la fibre optique, ainsi lorsque celle-ci subit une déformation exercée par la masse d'épreuve, la longueur d'onde réfléchie change.

- *L'interférométrie optique à cavité Fabry-Perot* : Parmi les configurations interférométriques, la cavité Fabry-Perot à l'avantage de n'être composée que de l'espace formé entre 2 miroirs parallèles. Ces miroirs sont usuellement réalisés à l'aide de fibres à réseau de Bragg<sup>6</sup>. L'un des deux miroirs est fixe tandis que le second est suspendu et peut se déplacer selon l'accélération appliquée. La distance  $d$  entre les miroirs fixe la longueur d'onde de résonance de la cavité. (figure 9)

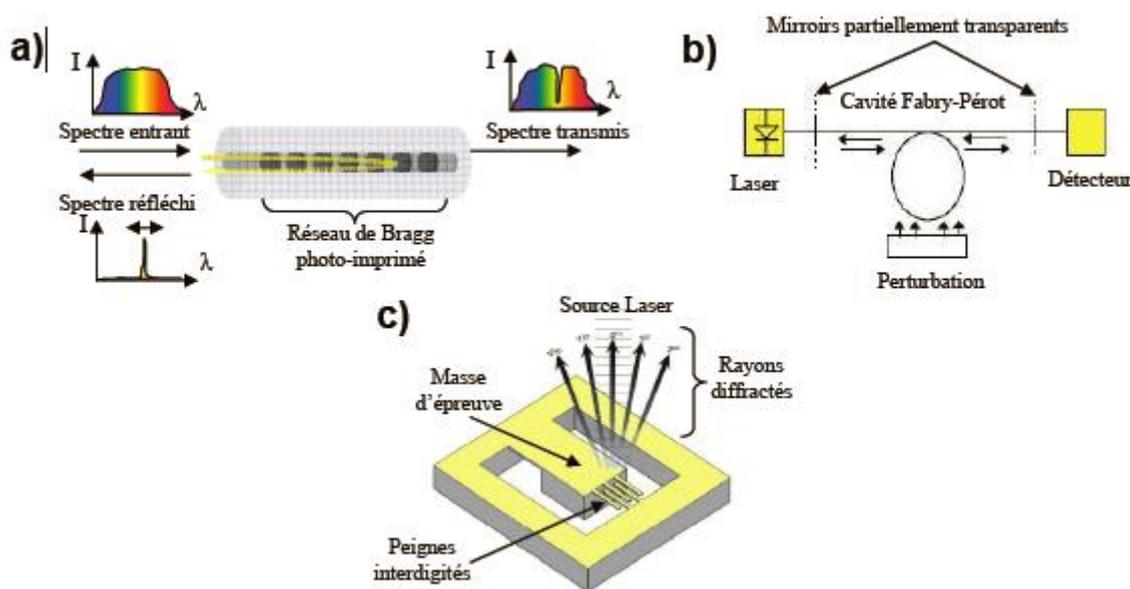


Figure 9 : Principe des accéléromètres optiques : a) à réseau de Bragg ; b) à cavité Fabry-Perot ; c) à diffraction source : thèse de Le FOULGOC

<sup>6</sup> Ou réflecteur de Bragg distribué est un réflecteur de grande qualité utilisé dans des guides d'onde.

#### f) Accéléromètres thermiques :

Il existe deux types d'accéléromètres à détection thermique. Dans le premier cas, une masse sismique est suspendue au-dessus d'une source de chaleur (simple résistance thermique). Le flux dépend de l'accélération, la température proche de la résistance chauffante peut être mesurée à l'aide de thermocouple<sup>7</sup> ou de thermistance<sup>8</sup>.

L'autre type d'accéléromètre à détection thermique est un capteur sans masse d'épreuve. Il est basé sur le principe du transfert de chaleur par convection, d'une résistance chauffante vers des thermistances (ou des thermocouples) placées de part et d'autre de l'élément chauffant.

L'accéléromètre thermique (figure 10) fonctionne en détectant les mouvements d'une masse de gaz chaud sous l'effet de l'accélération. Cette détection est basée sur le principe de sédimentation gazeuse dans un champ de gravité. L'accéléromètre est composé d'une résistance chauffante et de thermistances placées de part et d'autre, l'ensemble se trouvant dans une cavité. Lorsqu'un volume de gaz est chauffé localement par la résistance chauffante, il apparaît un gradient de température dans le volume de gaz considéré. Cette différence de température entraîne une différence de densité du gaz entre les zones chaudes et les zones froides. En l'absence de dissymétrie du système, la température vue par les détecteurs est identique. Lorsqu'une accélération agit selon l'axe sensible du système, la distribution du gradient de température n'est plus symétrique et aboutit à une différence de température  $\Delta T$  mesurée entre les deux détecteurs. Il est alors possible d'en déduire l'intensité de l'accélération appliquée.

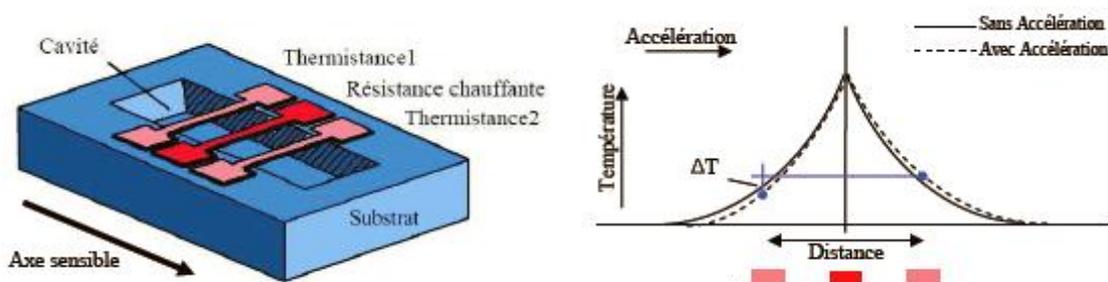


Figure 10: – Schéma de l'accéléromètre thermique : la résistance chauffante crée une distribution symétrique de la température. L'application d'une accélération dissymétrise cette distribution et la différence de température, mesurée par les deux thermistances, est proportionnelle à cette accélération.

#### g) Accéléromètres à ondes de matière :

Les capteurs inertiels à onde de matière font ainsi référence à la nature ondulatoire de la matière, décrit par Louis de Broglie, et observée pour la première fois lors de la diffraction d'électrons par un cristal en 1927.

Cette propriété associée au développement de nombreux composants tels que miroirs, séparatrices, réseaux de diffraction, etc, ont ouvert la possibilité à de nombreuses applications liées à l'interférométrie atomique dont la principale reste encore la réalisation d'horloges atomiques. Un interféromètre atomique similaire à l'interféromètre optique de Mach-Zender est schématisé sur la figure 11 à gauche [6].

Trois interactions électromagnétiques permettent de former l'interféromètre :

- sépare l'onde atomique en créant une superposition de deux états d'impulsions moyennes différentes,

<sup>7</sup> Est un capteur qui mesure la température

<sup>8</sup> Capteur de température

- agit comme un miroir qui dévie les paquets d'onde
- recombine les deux états de la fonction atomique pour les faire interférer

En sortie, le nombre d'atomes détectés sur chaque port dépend du déphasage entre les deux bras de l'interféromètre et donc du champ inertiel auquel ont été soumis les atomes entre les deux séparatrices (appelée zone d'interrogation)

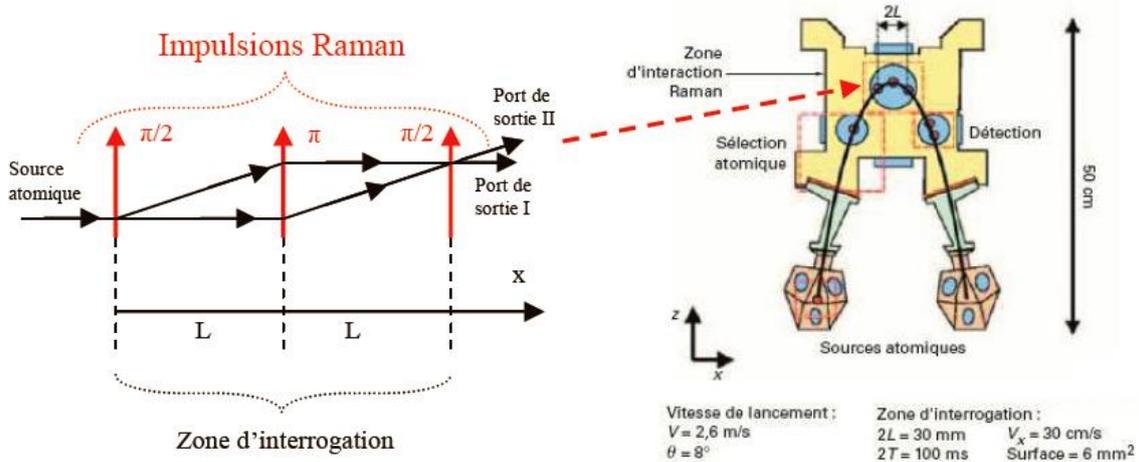


Figure 11 : Schéma d'un gyromètre - accéléromètre à atomes froids développé à l'Observatoire de Paris[7]

### h) Accéléromètres capacitifs :

La détection capacitive (figure 12) est la méthode la plus utilisée à ce jour pour les accéléromètres. Le « Proof Mass » qui est traduit comme la masse sismique. Cette masse est une électrode mobile.

Une capacité est formée entre le corps d'épreuve et une partie fixe du système. La détection consiste à évaluer, lors de l'accélération, les variations de capacité lorsque le corps d'épreuve ou se rapproche de l'élément fixe.

L'accéléromètre fait varier sa capacité selon le changement avec l'accélération.

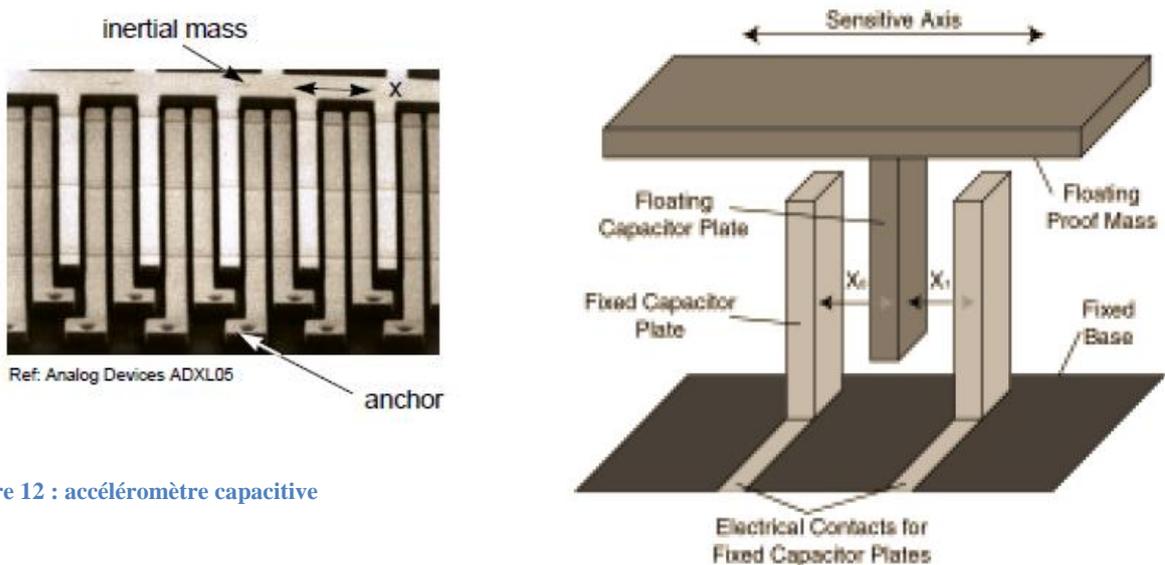


Figure 12 : accéléromètre capacitif

### i) Accéléromètre piézoélectrique :

Un corps piézoélectrique est un corps ayant la propriété de présenter un potentiel à ses bornes lorsqu'il est soumis à une contrainte, et réciproquement. Certains cristaux (quartz, sel de Seignette) et certaines céramiques ont la propriété de se charger électriquement lorsqu'ils sont soumis à une déformation.

Les accéléromètres à détection piézoélectrique utilisent les deux types de gravure bulk-micromachining<sup>9</sup> et surface-micromachining<sup>10</sup>.

### j) Accéléromètre résistive :

Un accéléromètre qui est une résistance qui change avec l'accélération.

Ce type d'accéléromètre vient de Lord Kelvin en 1856. On peut se rappeler que  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

Il est utilisé en biomédical avec une accélération de 0,01g pour une bande passante de 100Hz.

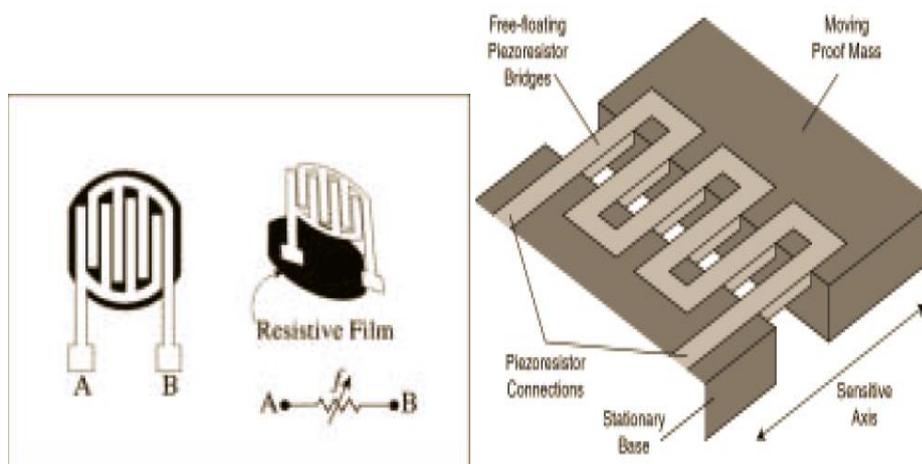


Figure 13 : Piézo-resistive

### h) Technologie MEMs :

MEMS signifie Micro-Electro-Mechanical System qui est un terme de l'américain. Le MEMS est un constituant de différentes technologies micro-capteurs, microstructures, microactuators, et micro-électroniques (figure 14). Une historique complète dans la document de référence [3]. Le MEMS est un ensemble de technologie résumé sur la (figure 15). Le MOEMS est également un sous-ensemble de MST<sup>11</sup> et MEMS qui sont des technologies spécialisées utilisant des combinaisons de l'optique miniaturisée, électronique et la mécanique.

Ce capteur est de forme de puce (chip). Il est fabriqué sur un circuit intégré (IC en anglais). Sa taille est de plusieurs micromètres à quelques millimètres.

Dans de nombreux domaines, on emploie le MEMS (tableau 1).

Je vais décrire quelques applications MEMS :

- *Dans le domaine automobile :*

Cette technologie MEMS a été utilisée en premier pour l'automobile. Elle permet de mesurer la décélération rapide de véhicule avant l'impact d'objet. Ce qui permet par des signaux électronique d'enclencher l'airbag.

<sup>9</sup> Est égale au MEMS

<sup>10</sup> Voir annexe

<sup>11</sup> Microsystems technology

Le capteur automobile « airbag » utilise simplement un capteur accélérométrique capacitive ou piézorésistive. (figure 16)

<b>Automobiles</b>	<b>Electroniques</b>	<b>Médical</b>	<b>Communications</b>	<b>Défense</b>
Capteur interne de navigation	Lecteur de disque dirigé	Capteur de pression du sang	Composant du réseau fibre optique	Guide de munitions
Capteur Air conditioning compressor	Imprimante jet d'encre têtes	Muscle stimulateurs	RF Relays, switches et filtres	Surveillance
Capteur de force de freinage et suspension contrôler accéléromètres	Projection écran téléviseurs	Implanté des capteurs de pression	Voltages controlled oscillators (VCOs)	Système armement
Capteur de niveau de carburant et de pression de vapeur	Capteur de tremblement de terre	Prothèses	Répartiteurs et coupleurs	Capteurs embarqué
Capteur airbag <sup>12</sup>	Capteur de pression avionics	Instruments analyse miniature	Lasers accordables	Le stockage des données
Pneus « intelligent »	Systèmes de stockage de données de masse	Pacemakers		Maitrise de l'avion

Tableau1 : des applications MEMS

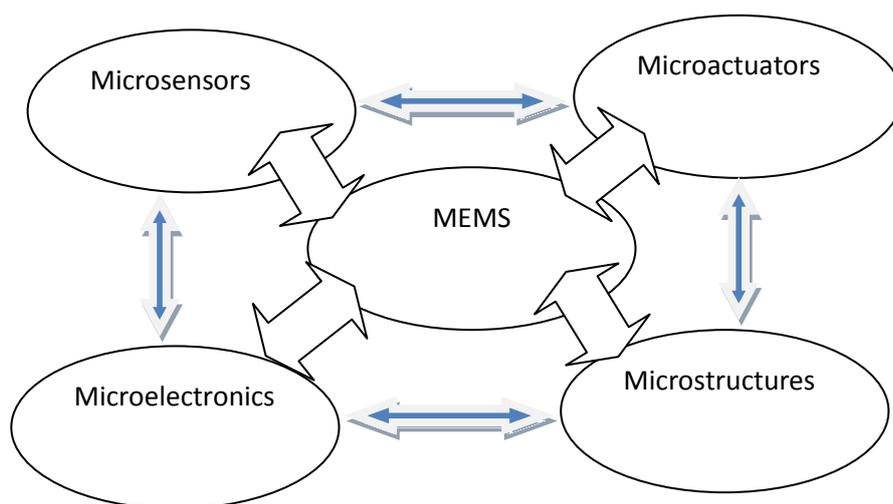


Figure 14 : Schéma illustration de composant MEMS

<sup>12</sup> Sac d'air ou coussin gonflable de sécurité

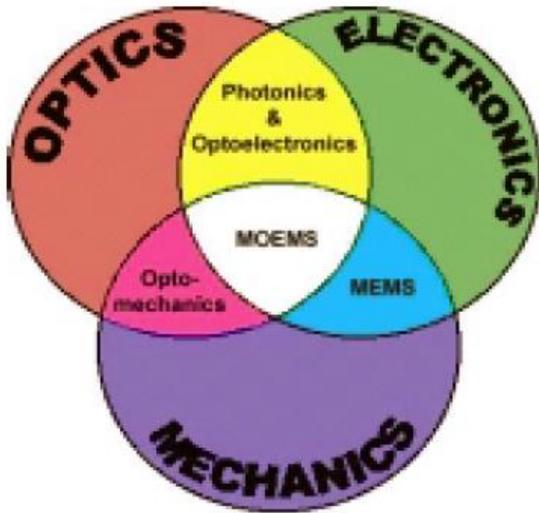


Figure 15 : Classifications de technologie microsystèmes source : [3]

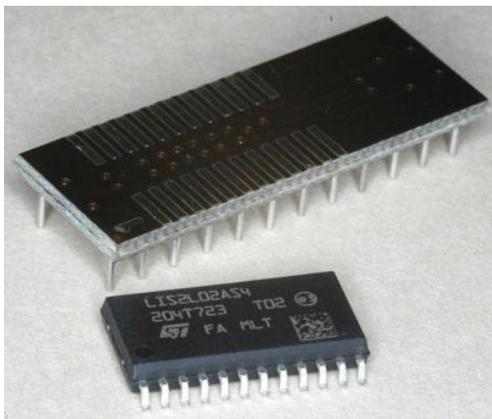


Figure 16 : Technologie MEMS

- *Dans le domaine médical :*

Par exemple pour surveiller la pression sanguine dans les hôpitaux. Ces capteurs sont connectés à un patient par voie intraveineuse et permet de surveiller la pression du sang par la solution IV. (figure 17)

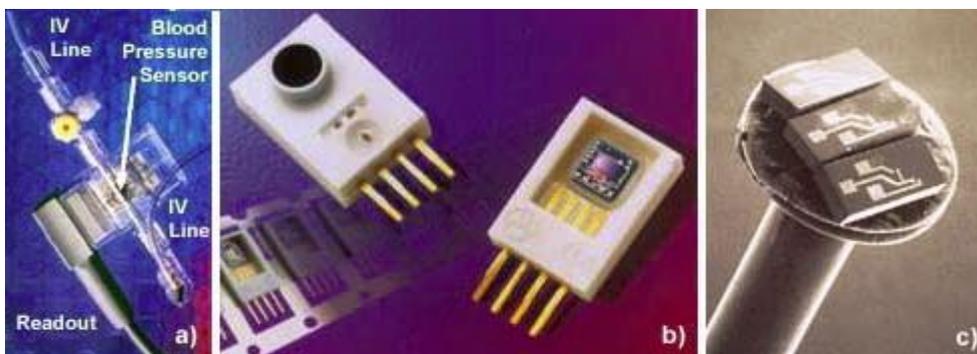


Figure 17 : a) pression du sang connecter IV, b) pression de sang, c) intracardiaque

- *La fabrication d'un MEMs :*

Ce n'est pas un cours d'électronique, je vous conseille pour aller plus loin sur la fabrication MEMs page 17 de [3] (figure 18).

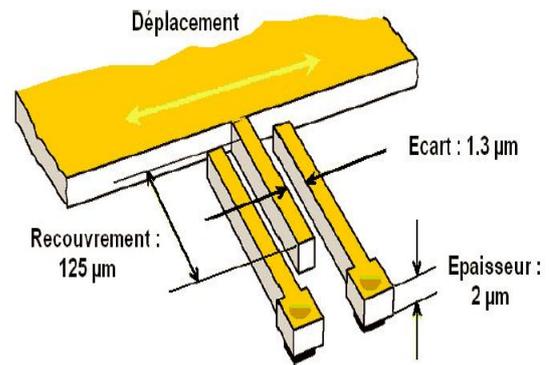
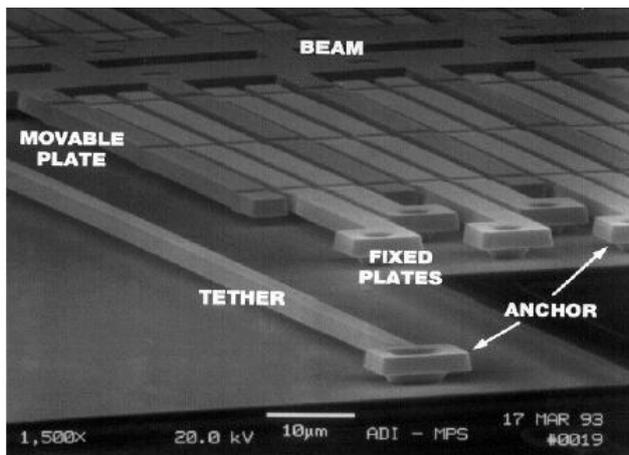


Figure 18 : fabrication MEMs

**h) Domaine d'application:**

L'accéléromètre est utilisé dans différents domaines (figure 17). [2]

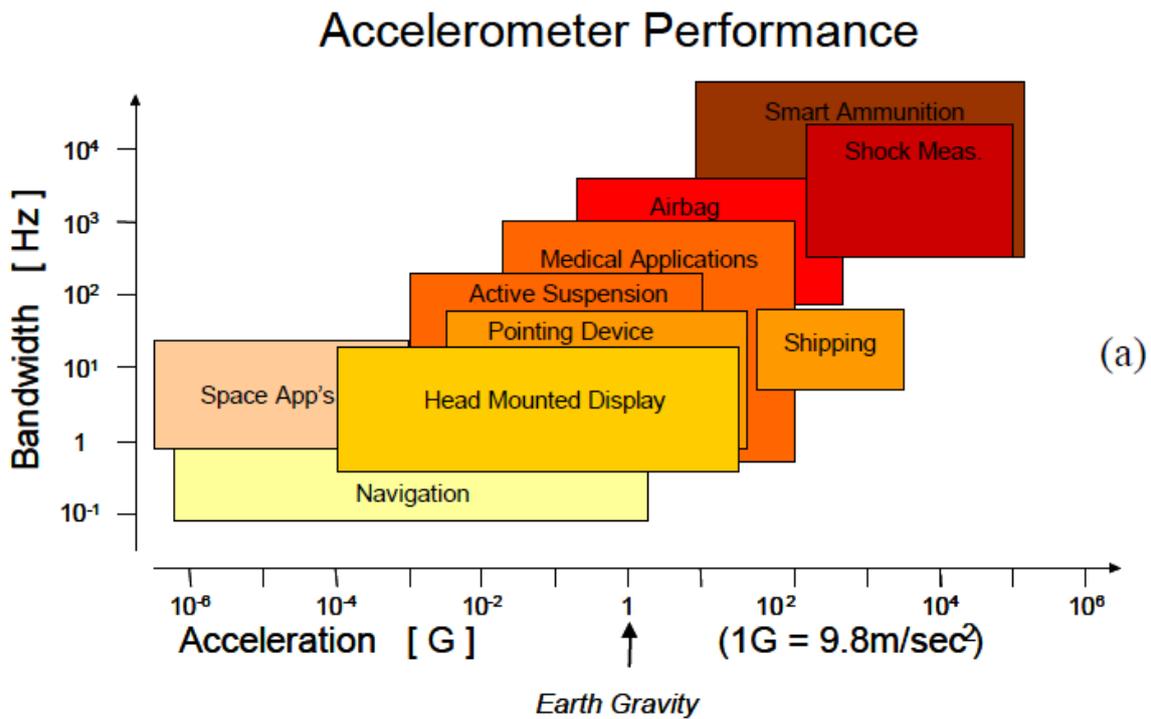


figure 17 : Marché des accéléromètres : Relation entre la gamme de mesure et la bande passante

**k) Notre matériel :**

Dans ce projet, il y a été choisi un actimètre MSR 145W (tableau 2 et figure 20).

Mesure spécifique	Working range	Caractéristiques	Valeurs
Température	-10°C à +58°C	Taille du boîtier (en mm)	20x15x61
Pression	0-2500 mbar	Poids approximative	23 g
Accélération	+/- 10G ou +/- 2G sélectionner		
Avec $G = 9,81\text{m/s}^2$			

Tableau 2 : Caractéristique du capteur MSR145WS



**MSR 145WS**

Figure 20 : Actimètre utilisé

L'orientation est importante car l'accéléromètre de l'actimètre donnent trois signaux sur l'axe x, l'axe y, et l'axe z (figure 21).

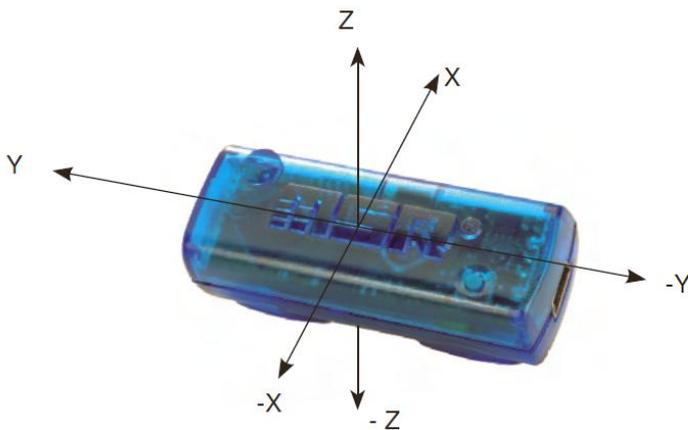


Figure 21 : Orientation du capteur

On place ce capteur sur la jambe comme sur la figure 22.

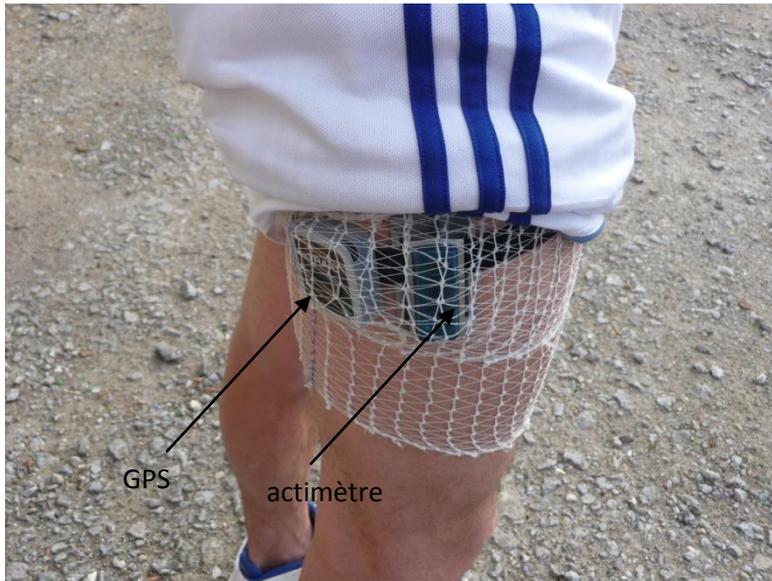


Figure 22 : Position des appareils

Dans la littérature, beaucoup d'auteurs demandent à avoir une fréquence de réglage de l'accéléromètre à 20Hz. Ce choix est justifiée dans les articles [4][5].

#### IV) Travaux et algorithmes:

##### a) Le cahier des charges :

Le travail est de reprendre le travail réalisé dans le logiciel geocardio. Ce logiciel utilise trois phases pour son fonctionnement :

- La synchronisation de donnée : recevoir les informations
- La méthodologie de lecture des fichiers issus des trois appareils : selon le type de format de sortie des appareils
- L'algorithme et la méthodologie de reconnaissance des activités

Le logiciel en question est décomposé en deux modules :

- Premier module de lecture et d'affichage des données brutes → *lues et affichages graphiques*
- Second module de séquençage des données et d'interprétation → *sont découpées en plusieurs séquences d'une certaine durée d'enregistrement.*

Mon travail dans un premier temps est de faire une recherche bibliographique sur les signaux de l'accéléromètre pour pouvoir créer un algorithme. Cet algorithme devra dans un même signal sur les trois axes (donc trois signaux) une activité par exemple de la marche, course, être assis. Cet algorithme doit être fait dans un premier temps en @Matlab puis en java applet.

Les fichiers récupérés sont les suivants GPS et actimètre en .csv<sup>13</sup>(ouverture de tout tableur) et ECG en format .txt.

Je me suis intéressé pour l'instant qu'aux signaux accélérométriques en .csv et le résultat final (figure 23). Ce signaux sont très différents, il y a un plateau que je n'ai pas trouvé la signification. Le protocole de cet exemple est le suivant : assis strict pendant 5 minutes, assis

<sup>13</sup> Comma-separated values

avec des petits mouvements (5 minutes), debout strict (5 minutes), debout avec des piétinements (5 minutes), marche normale (5 minutes).

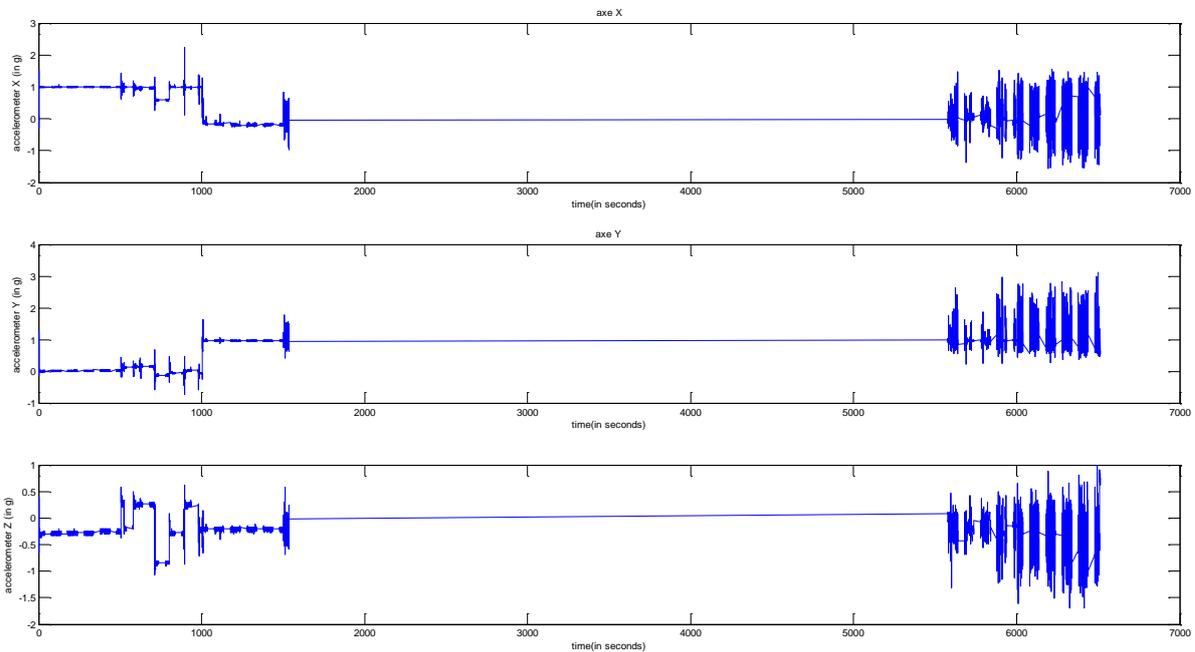


Figure 23 : Signaux accélérométrique

Voici la chaîne de traitement que j'utilise sur la figure 24.

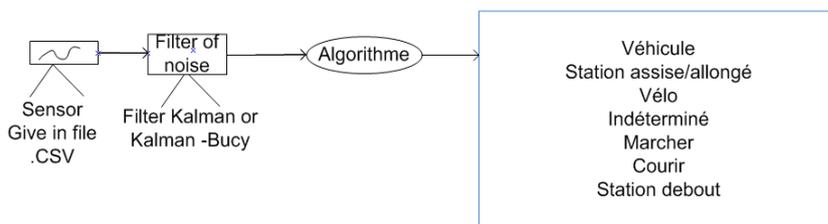


Figure 184 : schéma de principe.

## 2) Le fichier .CSV

L'extension csv signifie comma-separated values. Dans ce format, les données tabulaires sont présentées sous forme de valeur séparées par des virgules.

Ce format n'a jamais vraiment fait l'objet d'une spécification formelle. Toutefois, la RFC 4180 décrit la forme la plus courante et établit son type MIME « text/csv », enregistré auprès de l'IANA<sup>14</sup>.

Voici un fichier :

```
Robert;Dupont;rue du Verger, 12;...
"Michel";"Durand";" av. de la Ferme, 89 ";...
```

<sup>14</sup> Internet Assigned Numbers Authority: est une organisation dont le rôle est la gestion de l'espace d'adressage IP d'internet, et des ressources partagées de numérotation requises soit par les protocoles de communication sur internet, soit pour l'interconnexion de réseau à internet.

"Michel ""Michele"";"Durand";" av. de la Ferme, 89";...  
 "Michel;Michele";"Durand";"av. de la Ferme, 89";...

Ce texte est représenté :

Robert	Dupont	rue du Verger, 12 ...
Michel	Durand	av. de la Ferme, 89...
Michel "Michele"	Durand	av. de la Ferme, 89...
Michel ; Michele	Durand	av. de la Ferme, 89 ...

Quelques recommandations sont demandées pour ce format :

- Avoir une extension en .csv
- Les caractères doivent être en 8 bits dont les encryptions doivent être en 7 bits US-ASCII.

Je vais maintenant expliquer le fichier que nous avons à traiter en .csv. C'est un fichier texte.

```
*CREATOR
msr145b_reader.exe:[V2.0]
msr2csv.exe:[V1.62]

*STARTTIME
23/05/2012;20:44:21;

*MODUL
NAME;MSR306773;MSR306773;MSR306773;MSR306773
*NAME
NAME; ; ;

ID;[C26113 V5.18];[C26113 V5.18];[C26113 V5.18];[C26113 V5.18]

*TIMEDELAY
s;0;0;0;0

*CHANNEL
TIME;ACC x;ACC y;ACC z;BAT

*UNIT
s;G;G;G;V

*LIMITS
ALARM;;;
RECRD;;;
LIMIT1;;;
LIMIT2;;;

*CALIBRATION
INFO;;;
DATE;;;
X0;;;
Y0;;;
X1;;;
Y1;;;

*DATA
23/05/2012 20:44:21,826;0,143;0,844;0,365;3,92
23/05/2012 20:44:21,877;0,175;0,875;0,365;
23/05/2012 20:44:21,928;0,206;0,875;0,302;
23/05/2012 20:44:21,979;0,238;0,906;0,270;
23/05/2012 20:44:22,029;0,365;1,094;0,206;
```

23/05/2012 20:44:22,080;0,270;0,906;0,111;  
 23/05/2012 20:44:22,131;0,270;0,938;0,079;  
 23/05/2012 20:44:22,182;0,270;1,031;0,111;  
 23/05/2012 20:44:22,232;0,270;1,000;0,079;  
 23/05/2012 20:44:22,283;0,206;1,031;0,048;  
 23/05/2012 20:44:22,334;0,111;1,063;0,175;  
 23/05/2012 20:44:22,385;0,111;1,094;0,079;  
 23/05/2012 20:44:22,436;0,111;0,906;0,111;  
 23/05/2012 20:44:22,486;-0,016;1,094;0,016;  
 23/05/2012 20:44:22,537;0,143;0,594;-0,302;  
 23/05/2012 20:44:22,588;0,714;0,875;-0,365;

Les signaux de l'accélération sont donnés à partir du tag<sup>15</sup>DATA. Je dois dans un premier temps récupérer ces signaux dans Matlab.

Sous Matlab les signaux accélérations sont obtenus comme une structure. Puis selon un algorithme que j'ai créé en Matlab pour récupérer le signal dans un tableau. Je vais montrer le principe de mes algorithmes pour la lecture du .csv (figure 25).

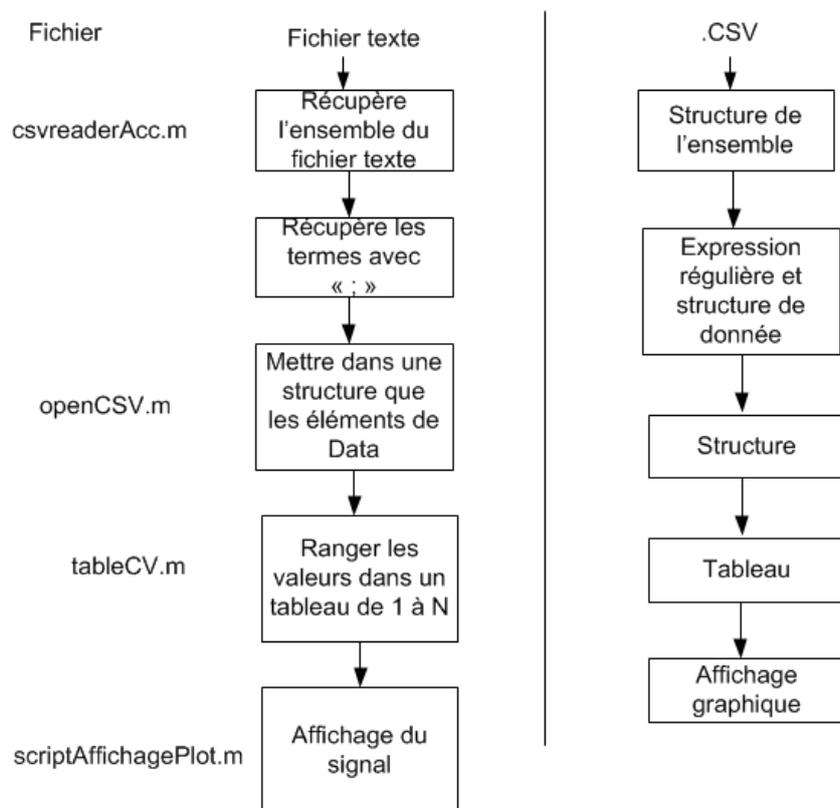


Figure 25 : Algorithme pour ouvrir .csv

- csreader.m :

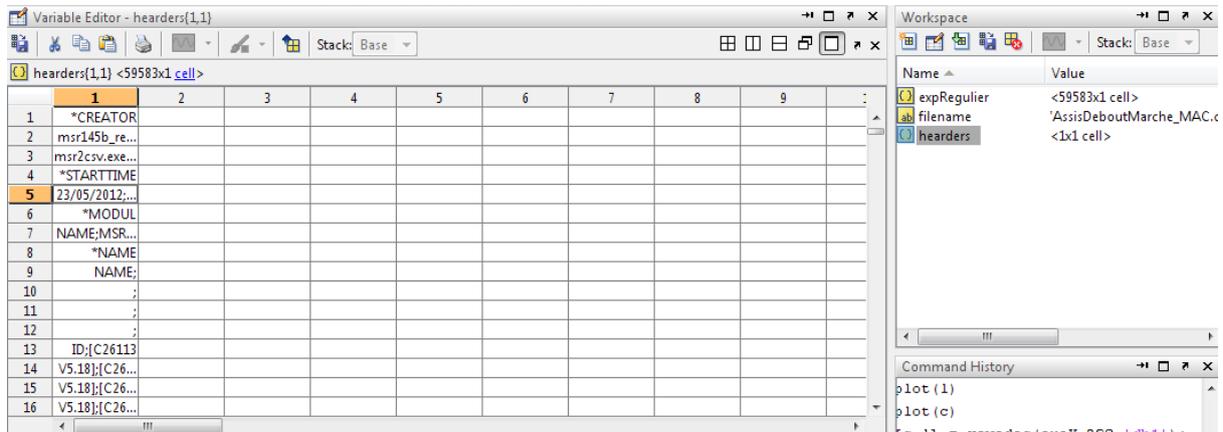
pseudo code :

*ouverture du fichier texte  
 lire l'ensemble des caractères  
 récupérer les éléments avec ;  
 fermer le fichier*

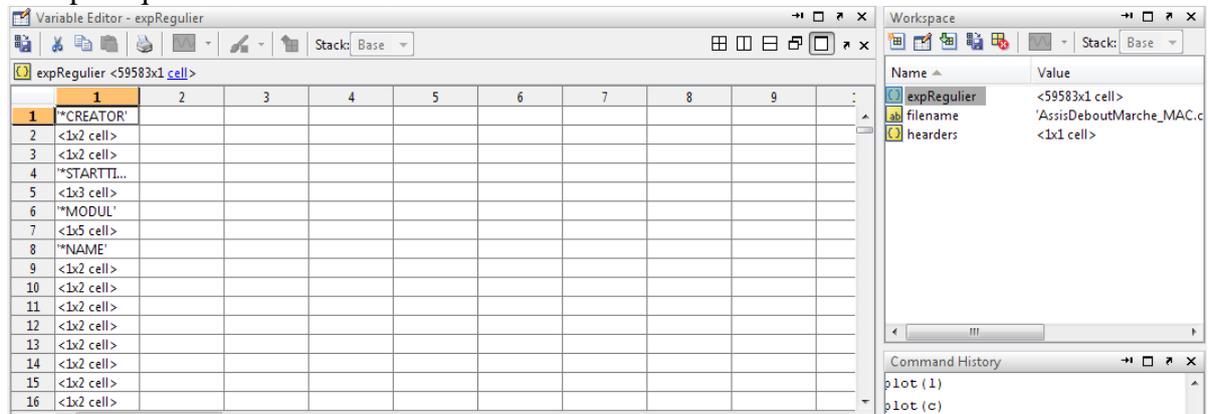
entrée : un fichier texte  
 sortie : une structure

<sup>15</sup> étiquette

captures écran :  
Montre la structure de l'ensemble du fichier .csv



Récupère que les données de data :



- openCSV.m :

pseudo code :

*recupérer la data*

*mettre les valeurs sans les dates dans une structure*

entrée : une structure

sortie : une structure

capture écran :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	<1x5 cell>	[]								

- tableCV.m :

pseudo code :

recupérer le tableau des accélérations pour l'axe des x, y et z

recupérer le tableau des heures

changer les « , » en « . »

recupérer l'écart type de l'heure

entrée : structure

sortie : tableau

captures d'écran :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.1430	0.1750	0.2060	0.2380	0.3650	0.2700	0.2700	0.2700	0.2700	0.2

### 3) Le filtre de kalman :

De nombreux papiers font des schémas en utilisant un accéléromètre avec un filtre de bruit comme [8] [9]. Deux papiers intéressants sont [10] [11] (median, filtre de kalman).

Je vais dans un premier temps voir ce qui donne le filtre médian avec mes données accéléromètres.

J'utilise la commande  $Y = \text{MEDFILT1}(X,N)$  de Matlab ( $X$  : la matrice de donnée et  $N$  : le nombre d'échantillon).

Nous avons comme résultat dans la figure 26 et figure 27.

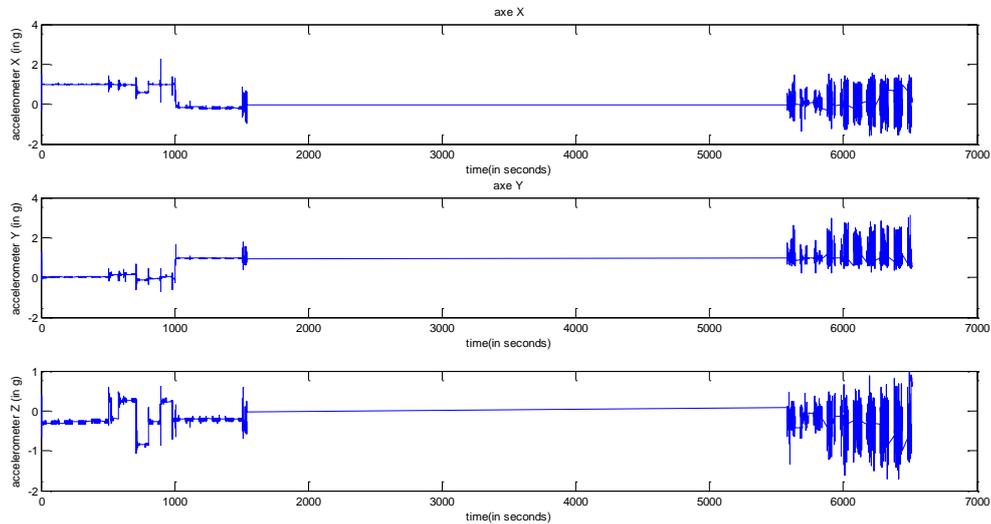


Figure 26 : Signaux originaux

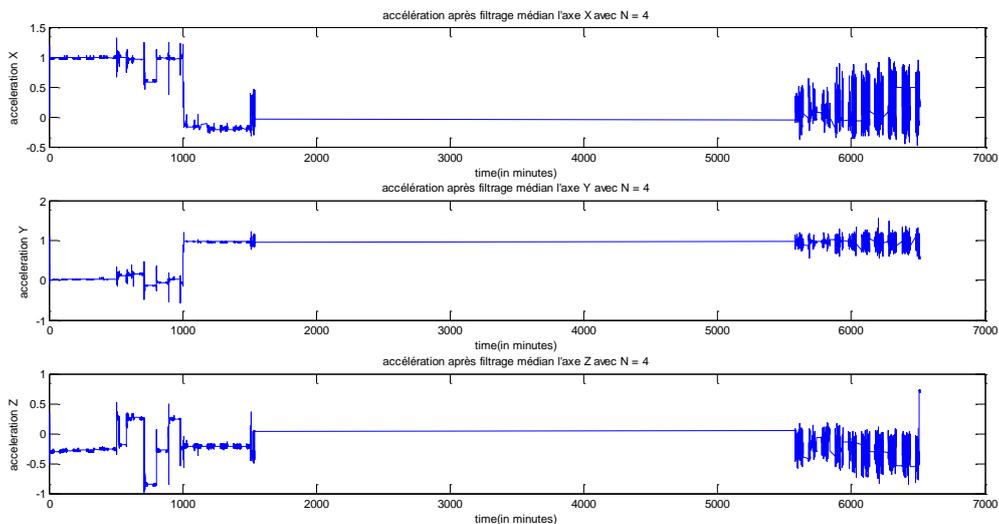


Figure 27 : Signaux après filtrage médian

Je vais faire la différence entre les signaux originaux et ceux après filtre pour voir si le signal a été bien modifié (figure 28).

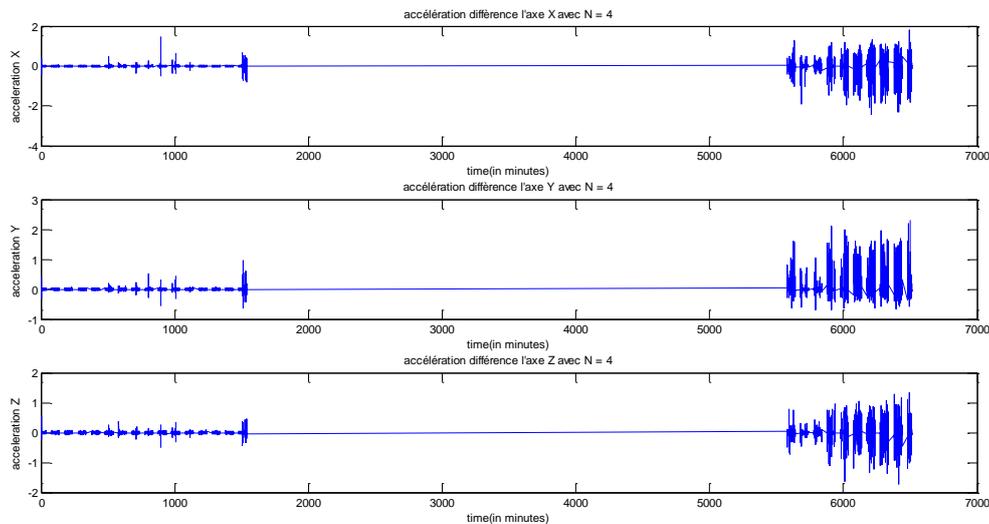


Figure 28 : Différences d'accélération

**Remarques :**

- Modification du signal
- Courbe changeant en amplitude légèrement

1) Base de ce filtre :

Le filtre de Kalman est une méthode visant à estimer des paramètres d'un système évoluant dans le temps à partir de mesures bruitées.

On retrouve ce filtre dans un bon nombre de domaines comme le traitement du signal, radar, traitement d'images...

La force de ce filtre est la capacité de prédiction des paramètres et de rectification des erreurs, non seulement des capteurs, mais aussi du modèle lui-même.

En effet, pour appliquer le filtre de Kalman, il faut dans un premier temps modéliser le système. L'autre point fort de ce filtre est sa capacité à déterminer l'erreur moyenne de son estimation.

Le fonctionnement du filtre de Kalman peut se diviser en deux étapes :

- Une première étape de prédiction de l'estimation selon le modèle du système. Pour ce faire, le filtre de Kalman reprend l'estimation précédente des paramètres et de l'erreur et prédit les nouveaux paramètres et la nouvelle erreur en fonction de la modélisation du système.
- La seconde étape va faire la mise à jour de cette prédiction grâce aux nouvelles mesures. Ces mesures (par définition bruitées) vont permettre d'obtenir une estimation des paramètres et de l'erreur à partir de la prédiction faite. Si jamais le modèle comporte des erreurs, cette étape de mise à jour permettra de les rectifier.

**Les limites :**

Dans le cas où la modélisation est trop approximative, le filtre n'est pas assez performant et l'erreur des estimations ne convergera pas assez rapidement, elle restera grande.

Pour palier à ce problème de modélisation linéaire du système, un filtre de Kalman étendu a été développé et permet de prendre en compte une modélisation non linéaire. Néanmoins,

cette technique à quelques défauts. Le premier défaut est la covariance de l'erreur (la précision des estimations) qui ne converge pas obligatoirement (comme c'était le cas avec une modélisation linéaire). Le deuxième défaut est son coût calculatoire plus important.

En effet, de nouvelles matrices coûteuses rentrent en jeu (les matrices des dérivés partielles des équations d'états et de mesures modélisant le système), ce qui peut être une limite à son utilisation, surtout dans des systèmes embarqués très restreint au niveau de la puissance de calcul.

Le filtre de Kalman [12] est une estimation récursive. Il doit le nom à Rudolf Kalman bien que Thovald Nicolai Thiele et Peter Swerling avaient développé un algorithme similaire avant lui.

Une application typique de Kalman est montrée sur la figure 29.



Figure 29 : schéma de principe d'un filtre de Kalman

Voici un exemple d'utilisation le filtre de Kalman pour les images et de videos[13] :

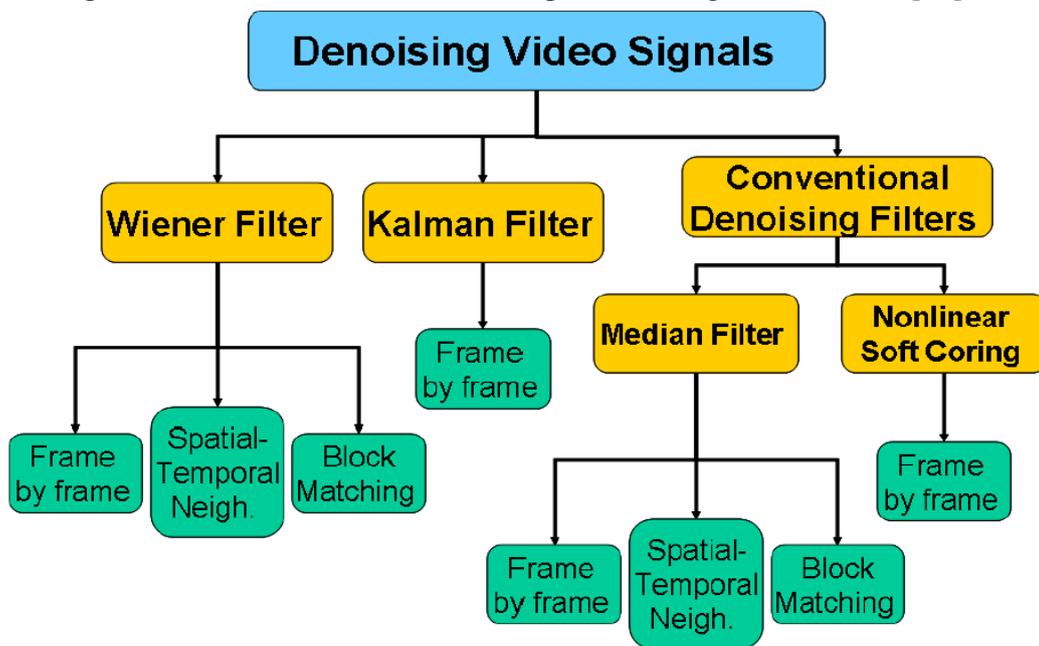


Figure 30 : schéma exemple de filtre pour le bruit

## 2) Algorithme :

Le filtre de Kalman est un ensemble d'équations mathématiques qui permet une meilleure estimation de l'état futur d'un système malgré l'imprécision des mesures et de la modélisation.

Tout commence cet algorithme par un schéma d'explication simple (figure 31).

Nous partons donc de cette équation :

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + B(t)u(t) + G(t)w(t)$$

Avec

$x$  : l'état du système

$u$  : l'entrée de commande du système

$F, G, B$  : des matrices déterministes

Deux étapes permettent donc de calculer  $\hat{x}$  à un instant  $t_i$ .

**Etape de prédiction :**

On estime  $x(t_i)$  à l'aide de l'estimation corrigée de  $x(t_{i-1})$

**Etape de correction :**

à l'aide de  $z(t_i)$ , on corrige l'estimation de  $x(t_i)$  (figure 31)

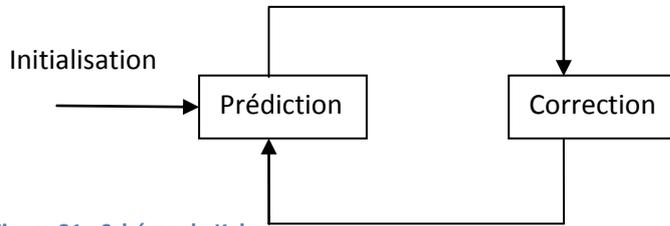


Figure 31 : Schéma de Kalman

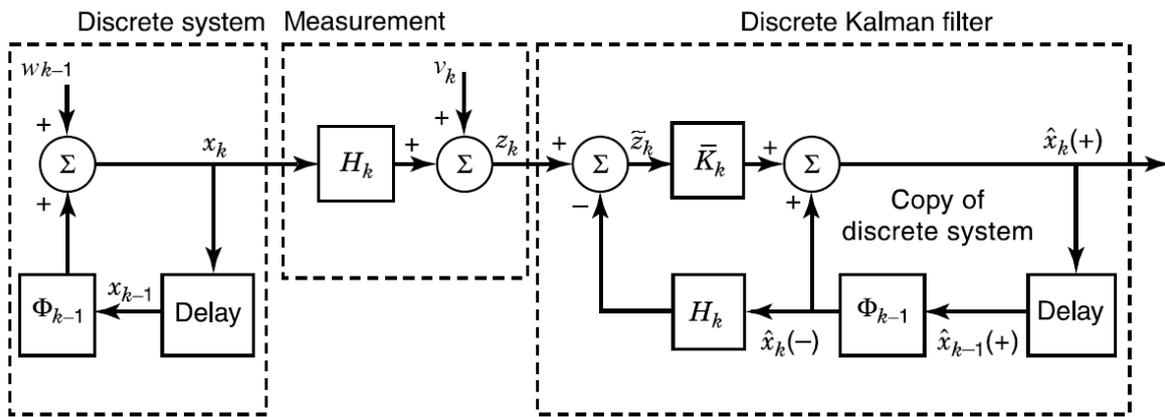


Figure 32 : filtre de Kalman

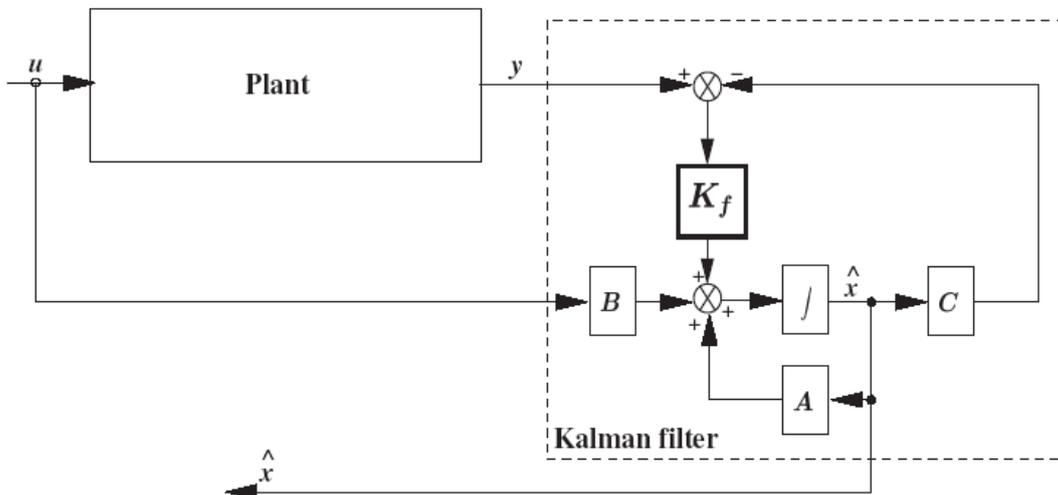


Figure 33 : Schéma complet de Kalman

**Prediction :**

$$\widehat{X}_{\frac{k}{k-1}} = F_k \widehat{X}_{\frac{k-1}{k-1}} + B_k u_{k-1} \text{ (Etat précis)}$$

$$P_{\frac{k}{k-1}} = F_k P_{\frac{k-1}{k-1}} F_k^T + Q_k \text{ (Estimation prédite de la covariance)}$$

Avec

- $F_k$ : matrice qui relie l'état précédent  $k - 1$  à l'état actuel  $k$
- $u_k$ : entrée de commande
- $B_k$ : matrice qui relie l'entrée de commande  $u$  à l'état  $x$
- $P_{\frac{k}{k-1}}$ : matrice d'estimation a priori de la covariance de l'erreur
- $P_{\frac{k}{k}}$ : matrice d'estimation a posteriori de la covariance de l'erreur
- $Q_k$ : matrice de covariance du bruit de process

**Mise à jour :**

- $\tilde{y}_k = z_k - H_k \hat{x}_{\frac{k}{k-1}}$  (Innovation)
- $S_k = H_k P_{\frac{k}{k-1}} H_k^T + R_k$  (Covariance de l'innovation)
- $\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{\frac{k}{k-1}} + K_k \tilde{y}_k$  (Etat mis à jour)
- $K_k = P_{\frac{k}{k-1}} H_k^T S_k^{-1}$  (Gain de Kalman optimal)
- $P_{k/k} = (I - K_k H_k) P_{\frac{k}{k-1}}$  (Covariance mise à jour)

Avec :

- $z_k$ : observation ou mesure du process à l'instant  $k$
- $H_k$ : matrice qui relie l'état  $x_k$  à la mesure  $z_k$
- $R_k$ : matrice covariance du bruit de mesure

$I$ : matrice identité aux dimensions adéquates

**Je fais un résumé de cette algorithme sur la figure 34.**

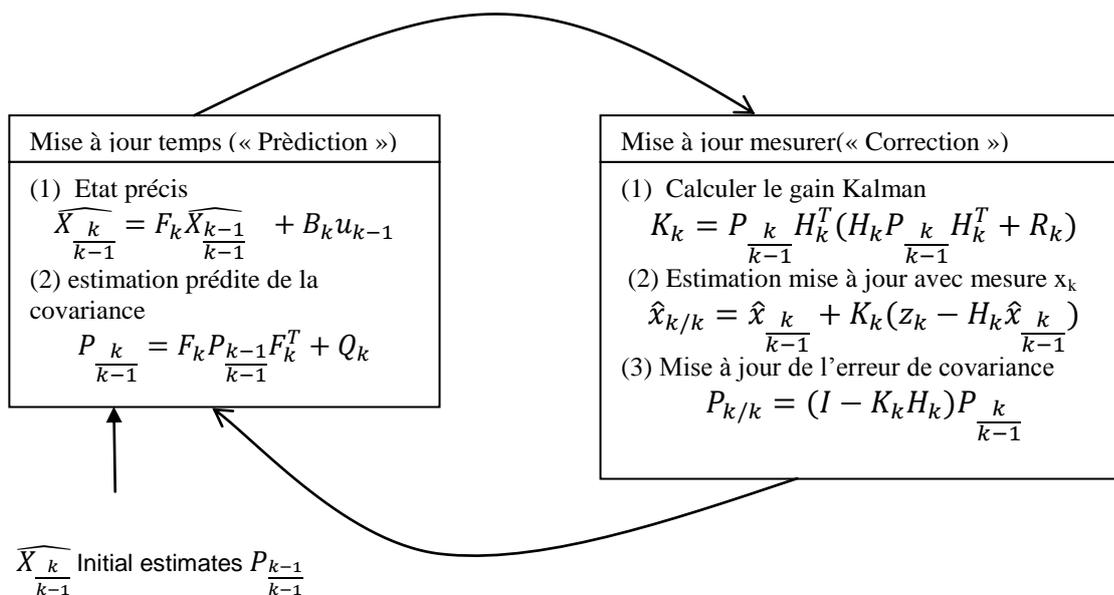


Figure 34 : Résumé de Kalman

### 3) Le filtre de Extend-kalman :

On appelle Extend-kalman aussi FKE. Soit le modèle suivant :

$$\begin{aligned}x_k &= f(x_{k-1}, u_k, w_k) \\z_k &= h(x_k, v_k)\end{aligned}$$

Voici l'algorithme de ce filtre :

#### **Prediction :**

$$\begin{aligned}\hat{x}_{\frac{k}{k-1}} &= f\left(x_{\frac{k-1}{k-1}}, u_k, 0\right) \\P_{\frac{k}{k-1}} &= F_k P_{\frac{k-1}{k-1}} F_k^T + Q_k\end{aligned}$$

Avec  $F_k$  et  $H_k$  qui sont des matrices Jacobienne.

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial x} \Bigg/_{\hat{x}_{\frac{k-1}{k-1}}, u_k}$$

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Bigg/_{\hat{x}_{\frac{k}{k-1}}}$$

#### **Mise à jour :**

Innovation ou mesure résiduel

$$\tilde{y}_k = z_k - h(\hat{x}_{\frac{k}{k-1}})$$

Covariance innovation (ou résiduel)

$$S_k = H_k P_{\frac{k}{k-1}} H_k^T + R_k$$

*Near-Optimal* Kalman gain

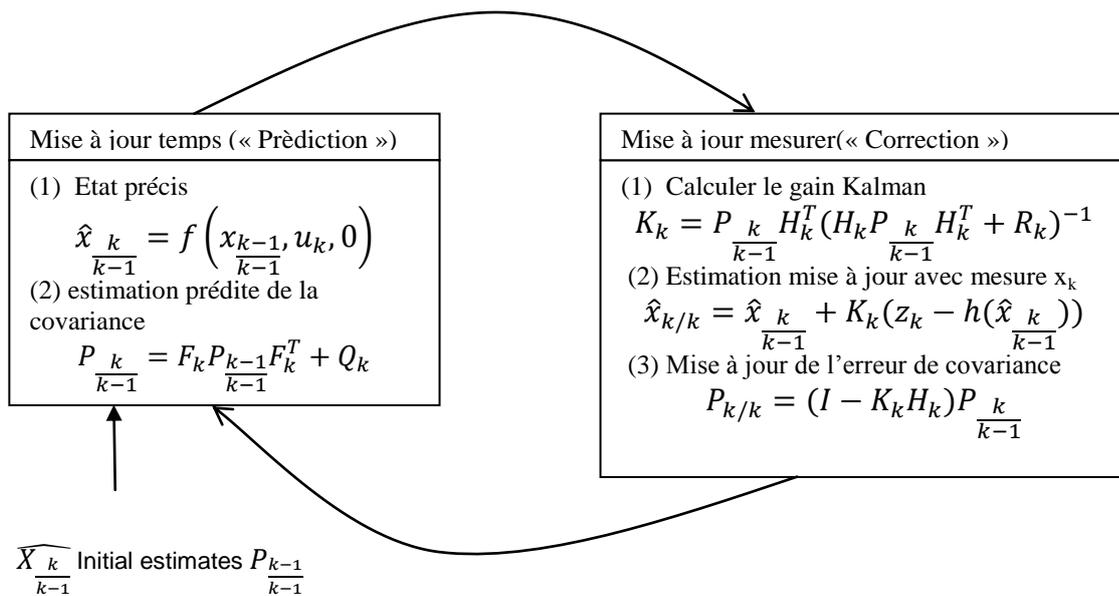
$$K_k = P_{\frac{k}{k-1}} H_k^T S_k^{-1}$$

Mise à jour de l'estimation

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{\frac{k}{k-1}} + K_k \tilde{y}_k$$

Mise à jour de l'estimation de la covariance

$$P_{k/k} = (I - K_k H_k) P_{\frac{k}{k-1}}$$



#### 4) Schmidt-Kalman filtering

Ce filtre est plus complexe. Je ne m'étends pas dessus.

Observational update:

$$C = \{H_{z,k}(P_{zz,k} - H_{z,k}^T P_{zz,k} - P_{oz,k} - H_{z,k}^T) + H_{y,k}(P_{yy,k} - H_{y,k}^T P_{yy,k} + R_k)^{-1}$$

$$K_{SK,K} = \{P_{zz,k} - H_{z,k}^T P_{zz,k} + P_{zy,k} - H_{y,k}^T\} C$$

$$x_{z,k+} = x_{z,k-} + K_{SK,K} \{z_k - H_{z,k} x_{z,k-}\}$$

$$A = I_n - K_{SK,K} H_{z,k}$$

$$B = A P_{yy,k} - H_{y,k}^T K_{SK,K}^T$$

$$P_{zz,k+} = A P_{zz,k} - A^T - B - B^T + K_{SK,K} P_{z,k} K_{SK,K}^T$$

$$P_{zy,k+} = A P_{zy,k} - K_{SK,K} H_{y,k} P_{yy,k-}$$

$$P_{yy,k+} = P_{yy,k}^T$$

$$P_{yy,k+} = P_{yy,k-}$$

Temporal update:

$$x_{z,k+1-} = \Phi_{z,k} x_{z,k+}$$

$$P_{zz,k+1-} = \Phi_{z,k} P_{zz,k+} \Phi_{z,k}^T + Q_{zz}$$

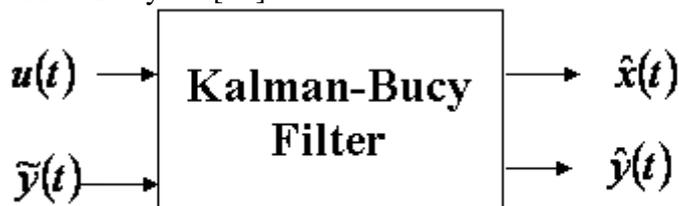
$$P_{zy,k+1-} = \Phi_{z,k} P_{zy,k+} \Phi_{y,k}^T$$

$$P_{yy,k+1-} = P_{yy,k+1-}^T$$

$$P_{yy,k+1-} = \Phi_{y,k} P_{yy,k+} \Phi_{y,k}^T + Q_{yy}$$

#### 5) Kalman-Bucy :

Kalman-Bucy est [15].



Comme formule suivant:

$$K = PC^T R^{-1}$$

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K(\tilde{y} - C\hat{x})$$

$$\dot{P} = AP + PA^T - KRK^T + Q$$

Avec  $P$  est une estimation de la covariance de l'erreur de mesure.

#### 4) Algorithme :

Pour réaliser cet algorithme, j'ai différentes pistes.

J'ai lu différent idée : soit faire une segmentation comme [16], la transformée en ondelette pour décomposée le signal [17]

##### a) Transformée en ondelette :

Une ondelette est une fonction à la base de la décomposition en ondelettes, décomposition similaire à la transformée de Fourier à court terme. La transformée en ondelettes permet l'analyse temps-fréquence d'un signal. Les notions d'ondelettes, de bancs de filtres et de multirésolution sont utilisées dans de nombreux domaine comme le traitement du signal, traitement de l'image, mathématiques...

Il y a quelques limites sur la transformée en ondelette :

- Analyse de Fourier à fenêtre glissante- Short Time Fourier Transform
- Transformée en ondelette continue – Continuous Wavelet Transform (CWT)
- Transformée en ondelette discrète – Discrete Wavelet Transform (DWT)

Nous avons une formule importante de la transformée de Fourier.

La génération d'une base d'ondelette s'obtient alors par décalage  $b \in \mathbf{R}$  et changement d'échelle  $a > 0$  d'ondelettes mère  $\psi(t)$ .

$$\Psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Les ondelettes sont de forme constante mais de taille variable, proportionnelle au paramètre de dilatation « a » (variable d'échelle). La transformation en ondelettes est aussi interprétée comme étant un processus de filtrage du signal analysé par un filtre passe-bande de bande passante variable, c'est le paramètre « a » qui fixe la valeur de cette bande. A. Grossmann et J. Morlet ont démontré que si  $\Psi_{(a,b)}(t)$  est à valeurs réelles, l'ensemble de ces ondelettes peut être considéré comme étant une base orthonormée.

Donc la transformée continue par ondelette est définie donc par le calcul des coefficients :

$$C_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int S(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

Je peux citer quelque ondelette classique :

- Haar Wavelet  $\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot \cos 5t$
- Morelet Wavelet
- Coiflet Wavelet
- Haar Wavelet  $\Psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} \leq t < \frac{1}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
- ...

Il est recommandé dans le papier [17] d'utiliser une ondelette de coiflet (coefficient de coiflet). La transformée en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de décomposition du signal d'approximation A et le signal de détails D comme le schéma de la figure 36.

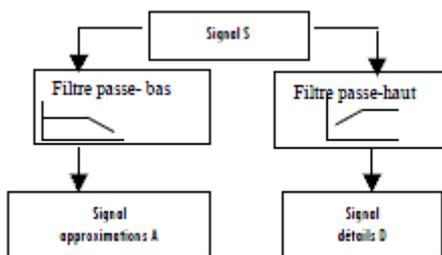


Figure 36 : schéma de principe de l'ondelette

La transformée en ondelettes d'un signal s est la famille C(a,b) coefficients d'ondelettes qui dépend des deux paramètres a et b. Suivant les besoins de l'analyse du signal s les paramètres (a,b) peuvent être utilisés de façon continue (TOC) ou discrète (TOD). La transformée continue d'ondelette exigeant une continuité des valeurs des paramètres (a,b) est plutôt utilisée dans l'analyse de l'allure du signal (approximation) tandis que la transformée discrète d'ondelette basée beaucoup plus sur l'utilisation de la complémentarité des deux filtres, passe-haut et passe-bas, va servir à l'extraction d'informations caractérisant les transitions rapides du signal (détails).

Voici le signal de l'ondelette choisi la coiflet figure 37.

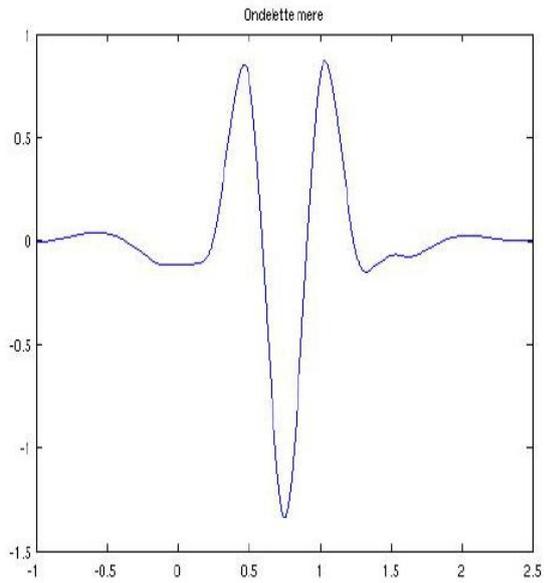


Figure 37 : Ondelette coiflet

Résumer de l'algorithme d'ondelette (DWT) figure 38 :

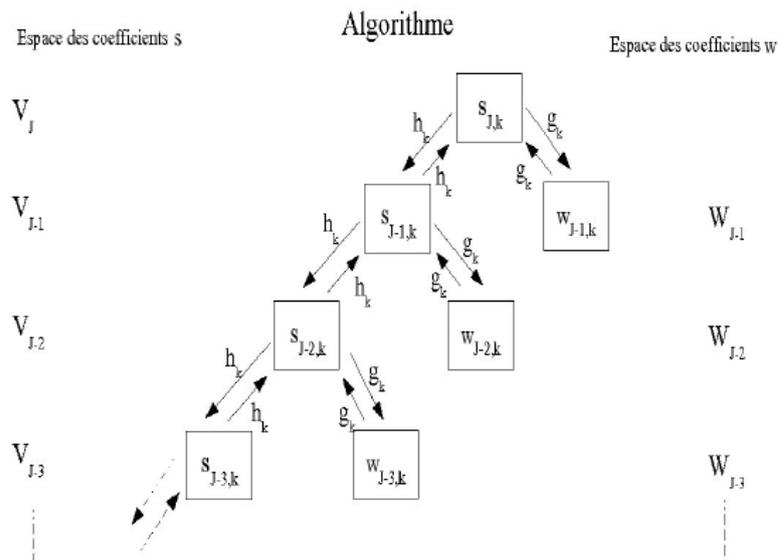


Figure 38 : algorithme DWT

J'ai utilisé la toolbox de Matlab des ondelettes qui utilisent ce schéma :

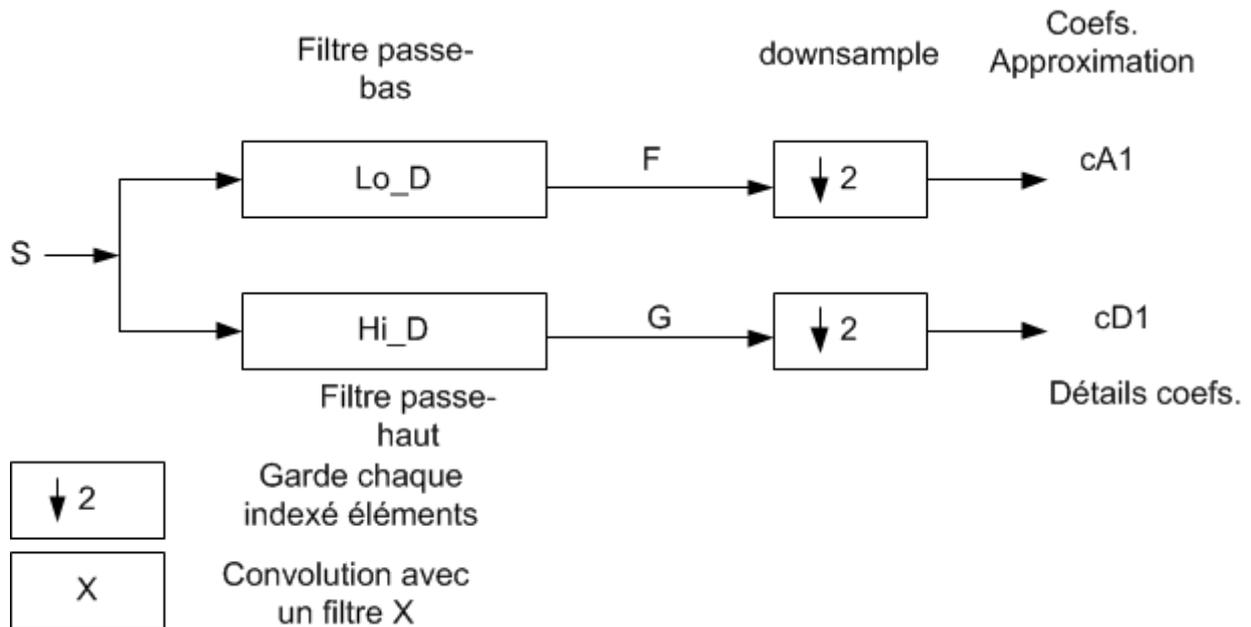


Figure 39 : schéma multi-échelle de l'ondelette

On voit bien la décomposition en différentes bande-passante sur la figure 40.

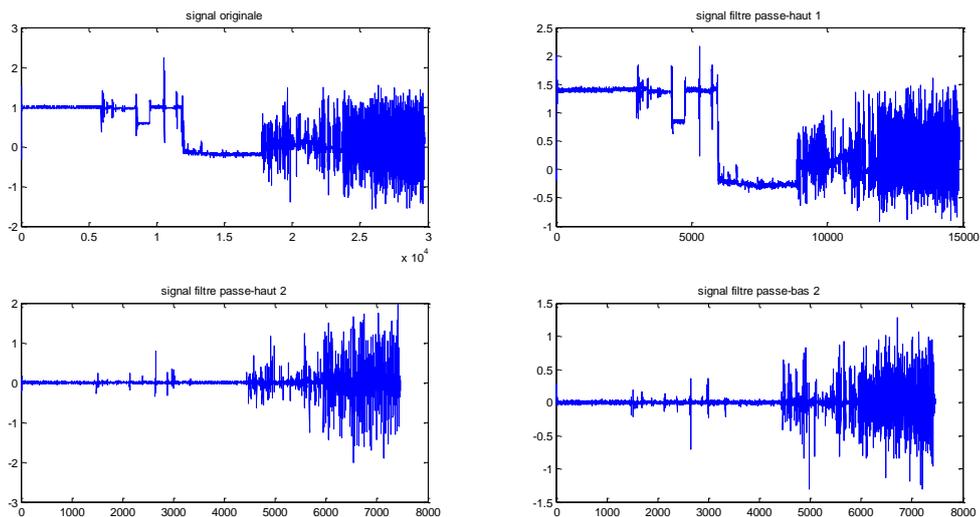


Figure 40 : Le signale de l'axe X de l'accélération décomposé en ondelette

b) Transformée de Fourier :

Je rappelle que la transformée de Fourier s'écrit :

$$F(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i2\pi kn}$$

Nous obtenons les signaux suivants de l'accélération (figure 41):

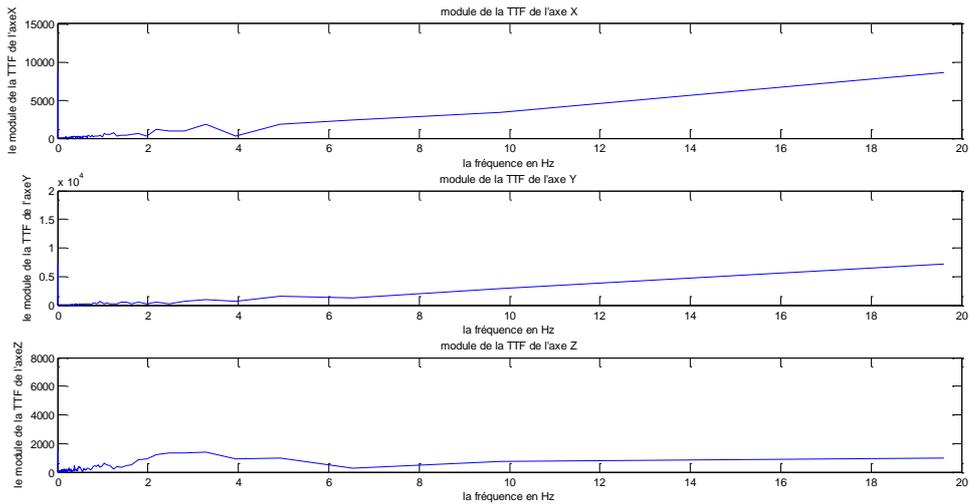


Figure 41 : TTF du signal sur l'axe x, y et z

c) La vitesse :

La vitesse a pour relation  $v = a.t$  avec a : accélération.

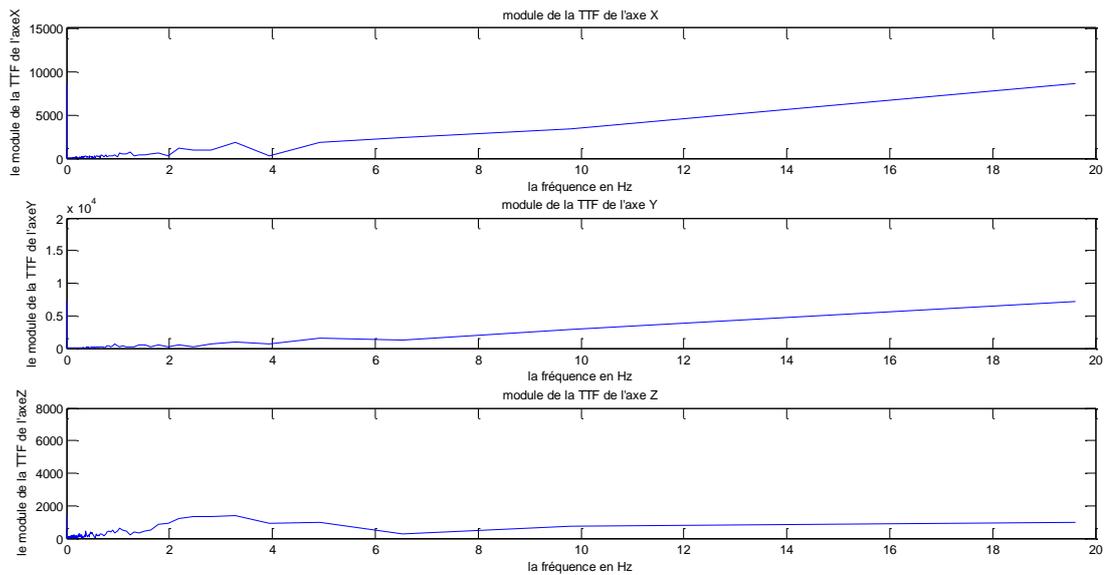


Figure 42 : La vitesse selon les fréquences

d) RMS :

Selon l'article [18], il est intéressant d'étudier ce signal. J'applique la formule suivante :

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N}}$$

J'obtiens comme signaux comme la figure 43.

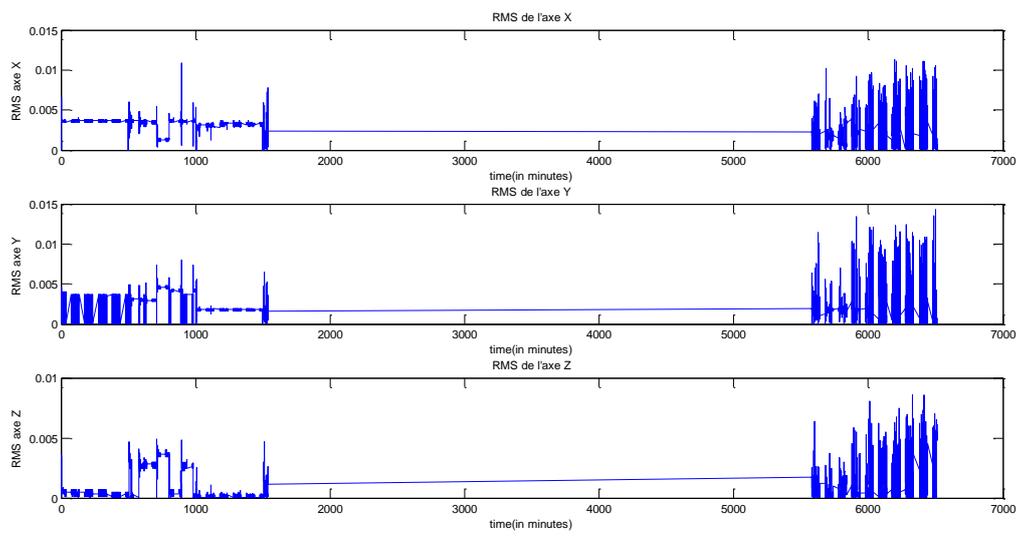


Figure 19 : Signaux RMS

## **Partie C Discussions et conclusion**

## Discutions

J'ai pu exposer dans ce compte-rendu dans un premier temps un état de l'art. Je n'ai pas trouvé vraiment la technologie utilisée dans actimètre mais je pense que c'est la technologie MEMS d'après la taille de l'appareil et de la carte électronique.

De plus, je ne peux pas dire s'ils y ont déjà mis un filtre de Kalman pour enlever le bruit électrique de l'appareil et corriger les champs magnétiques engendré par les composants électroniques.

Dans le futur, il faudra réfléchir s'il y a un intérêt de coder le filtre de kalman et de le comprendre pour cette application. Je l'ai codé mais il me manquait quelque information mathématique sur ce filtre que je n'ai pas trouvé dans ma recherche.

J'ai résolu différents problèmes d'ouverture de ce point csv. Ce qui a été très intéressant pour moi c'est de comprendre la pratique d'expression régulière sous matlab, de sous-structure et de faire un programme qui transforme une structure en un tableau.

J'ai eu un problème de taille pour détecter le pic dans la transformée de Fourier qui pourrait déterminer si une personne court par exemple.

Très récemment une nouvelle idée est venu pourquoi pas utiliser la théorie de la biomécanique. Je pense que la biomécanique est la piste à suivre pour le logiciel geoCardio.

## Conclusion

**Je regrette de ne pas avoir eu le temps de finir l'algorithme et manquer d'idée pour proposer une amélioration pour Geocardio.**

**Ce qui m'a plus dans ce stage est la recherche, la lecture de nombreux articles, de réaliser ce rapport, de travailler en équipe.**

**Ce qui m'a manqué est le temps pour finir. Car le stage est trop court pour ce projet de recherche.**

**La perspective de ce projet est d'élargir le travail sur un signal ECG et GPS pour voir l'impact sur l'algorithme.**

## **ANNEXES**

## Micro-usinage des MEMS

- **Surface micromachining**

Le micro-usinage en surface (Surface micromachining) est la technique de gravure sélective consistant à enlever sélectivement une des couches pré-déposée, cette couche est appelée couche sacrificielle.

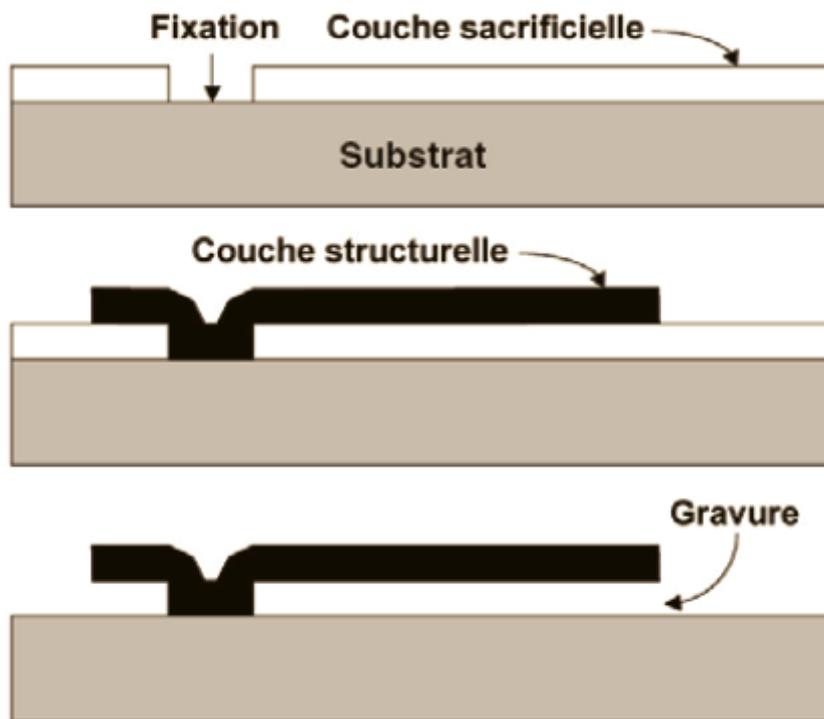


Figure 20 : Gravure en surface source : thèse d' a. Chaehoi

Dans un premier temps, on dépose sur le substrat une couche sacrificielle. Puis une couche de matériau destinée à la réalisation de la partie mécanique, appelée couche structurale, est ensuite déposée sur la couche sacrificielle. Finalement la couche sacrificielle est enlevée par micro-gravure pour laisser la partie mécanique suspendue. La couche sacrificielle est choisie en fonction de la couche qui constituera la structure mécanique. Le facteur important est la disponibilité d'une solution de gravure pouvant supprimer la couche sacrificielle sans attaquer la couche servant à la structure mécanique et/ou le substrat. La combinaison couramment utilisée est une couche sacrificielle en oxyde associée à une couche de polysilicium comme structure mécanique.

Cette technique permet l'utilisation d'une électronique intégrée monolithique.

- **Bulk micromachining**

Le micro-usinage en volume est un procédé permettant de fabriquer des structures suspendues par gravure du substrat d'un circuit intégré. [18]

## DIFFERENT Type De Matrice existant

UPPER TRIANGULAR	UNIT UPPER TRIANGULAR	STRICTLY UPPER TRIANGULAR
$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 0 & 1 & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & 1 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 0 & 0 & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$
LOWER TRIANGULAR	UNIT LOWER TRIANGULAR	STRICTLY LOWER TRIANGULAR
$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & \dots & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & 0 \end{bmatrix}$
DIAGONAL	IDENTITY	ZERO
$\begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & d_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d_n \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$
TOEPLITZ	HANKEL	
$\begin{bmatrix} d_0 & d_{-1} & d_{-2} & \dots & d_{1-n} \\ d_1 & d_0 & d_{-1} & \dots & d_{2-n} \\ d_2 & d_1 & d_0 & \dots & d_{3-n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n-1} & d_{n-2} & d_{n-3} & \dots & d_0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} d_{1-n} & \dots & d_{-2} & d_{-1} & d_0 \\ d_{2-n} & \dots & d_{-1} & d_0 & d_1 \\ d_{3-n} & \dots & d_0 & d_1 & d_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_0 & \dots & d_{n-3} & d_{n-2} & d_{n-1} \end{bmatrix}$	

## CODES

### csvreaderAcc.m

```
%%
% Permet de lire l'ensemble du fichier .CSV
% avec expression régulière ":"
% Récupère le texte avec ; dans le fichier
% @author : dimitri PIANETA

function [headers, expRegulier ]=csvreaderAcc(filename)

headers = {};
[path, fname, extension,version] = fileparts(filename);%open file recupère
l'extension du fichier

args = nargin;

if (args>=1)
    if (extension == '.csv')

        fid = fopen(filename,'r');%open file

        if(fid == -1)
            error('error opening');
        else
            C= textscan(fid,'%s');
            headers = C;
            pattern = ';';
            expRegulier = regexp(C{1},pattern, 'split');%expression
régulière

        end
        fclose(fid);% fin du programme
    end

else
    disp('error: we can give a name file');
end
end
```

### openCSV.m

```
%% Récupère l'ouverture CSV
% Récupér les éléments après le mot data du fichier métadonnée
% @auhhor : Dimitri PIANETA

function result = openCSV()

%initialisation
clc;
clear all;
close all;
[myfilename mypath] = uigetfile('*.csv','CSV Files (*.csv)');% appelle la
fonction ouverture

%open CSV
[U, sansDate] = csvreaderAcc(myfilename);
```

```

[l,c]= size(sansDate);%l: nombre de ligne et c: nombre de colonne
stringValue = U{1};%structure

for i= 41:2:1
    Io = sansDate(i);%prends l'expression régulière
    %   charValues{i} = char(toks{i});
    %   disp(charValues);
    tempon(i-40) = Io;

end

[nbL,nbC] = size(tempon); % Taille de la variable tmpon

for i = 1 :2:nbC
    result1(i) = tempon(i);
    result = result1;
end

tableCV.m
%% fonction qui permet de ranger les valeurs de structure dans une
% structure unifome
% Pour étude à 20Hz
% @author : dimitri PIANETA
% @param : metadata = est la structure des données de l'accéléromètre
%         axeTime = axe du temps en tableau
%         axeTimesStep = tableau des pas de l'axe du temps
%         axeTimesTable = tableau du temps
%         axeX = axe du signal accélérométrique sur les x
%         axeY = axe du signal accélérométrique sur les y
%         axeZ = axe du signal accélérométrique sur les z

function [metadata,axeTimes,axeTimesStep, axeTimesTable,axeX, axeY,axeZ] =
tableCV()
metadata = openCSV();

[nbL, nbR] = size(metadata);
%disp(nbR);
axeTimes = {};
axeX = {};
axeY = {};
axeZ = {};

%Enlever les espaces

%Les impaires
for i = 0: round(nbR/4)-2%14884
    % Les heures
    axeTimes{1} = metadata{1,1}{1,1};%premier element
    axeTimes{2} = metadata{1,3}{1,1};%deuxieme element de la structure
    axeTimes{3+2*i} = metadata{4*(i+1)+1}{1,1};%impair

    % L'axe des X
    axeX{1} = metadata{1,1}{1,2};%premier element
    axeX{2} = metadata{1,3}{1,2};%deuxieme element de la structure
    axeX{3+2*i} = metadata{4*(i+1)+1}{1,2};%impair

    % L'axe des Y

```

```

axeY{1} = metadata{1,1}{1,3};%premier element
axeY{2} = metadata{1,3}{1,3};%deuxieme element de la structure
axeY{3+2*i} = metadata{4*(i+1)+1}{1,3};%impaire

% L'axe des Z
axeZ{1} = metadata{1,1}{1,4};%premier element
axeZ{2} = metadata{1,3}{1,4};%deuxieme element de la structure
axeZ{3+2*i} = metadata{4*(i+1)+1}{1,4};%impaire

end

% Les paires
for i = 4:2:2*round(nbR/4)+1 %29773
    % Les heures
    axeTimes{i} = metadata{2*i-1}{1,1};
    % L'axe X
    axeX{i} = metadata{2*i-1}{1,2};
    % L'axe Y
    axeY{i} = metadata{2*i-1}{1,3};
    % L'axe Z
    axeZ{i} = metadata{2*i-1}{1,4};

end

axeX = strrep(axeX, ',', '.');%convertie les virgules en un point
axeX = str2double(axeX);

axeY = strrep(axeY, ',', '.');%convertie les virgules en un point
axeY = str2double(axeY);

axeZ = strrep(axeZ, ',', '.');%convertie les virgules en un point
axeZ = str2double(axeZ);

%Conversion de l'erreur Nan
axeX(isnan(axeX) | axeX==99)=0;
axeX(axeX==0)=sum(sum(axeX))/nnz(axeX);

axeY(isnan(axeY) | axeY==99)=0;
axeY(axeY==0)=sum(sum(axeY))/nnz(axeY);

axeZ(isnan(axeZ) | axeZ==99)=0;
axeZ(axeZ==0)=sum(sum(axeZ))/nnz(axeZ);

[nbC, nbL] = size(axeTimes);
axeTimes2 = strrep(axeTimes, ':', '');%convertie les virgules en un point
axeTimes3 = strrep(axeTimes2, ',', '.');
axeTimesStep = str2double(axeTimes3);

for i =1:nbL-1
    axeTimesStep(i) = axeTimesStep(i+1)-axeTimesStep(i);
end

%Tableau du temps
for j =2:nbL-1,
    axeTimesTable(1) = 0;
    axeTimesTable(2) = axeTimesStep(1);
    axeTimesTable(j+1) = axeTimesTable(j)+axeTimesStep(j);
end

```

```
% X = input('Value');
end
```

### script d'affichage

```
[metadata,axeTimes,axeTimesStep, axeTimesTable,axeX, axeY,axeZ] = tableCV();
```

```
% Affichage de l'ensemble des signaux
figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(axeTimesTable,axeX);
title('axe X');
xlabel('time(in seconds)');
ylabel('accelerometer X (in g)');
subplot(3,1,2)
plot(axeTimesTable,axeY);
title('axe Y');
xlabel('time(in seconds)');
ylabel('accelerometer Y (in g)');
subplot(3,1,3)
plot(axeTimesTable,axeZ);
xlabel('time(in seconds)');
ylabel('accelerometer Z (in g)');
```

### kalmanProcessig1D.m

```
%% Fonction de kalman
% @author: dimitri pianeta
```

```
function [x,P,K] =kalmanProcessing1D(x)
```

```
% Initialisation
```

```
A = 1;
B = 0;
Q = 2^2;
H = 1;
R = 2^2;
u = 0;
P = 1;
z = 1;
```

```
% Prediction for state vector and covariance:
```

```
x1 = A * x + B * u;
P = A *P*A' + Q;%covariance extrapolation
```

```
% Compute Kalman gain factor:
```

```
K = P*H'*inv(H*P*H'+R);
```

```
% Correction based on observation:
```

```
x = x1 + K*(z-H*x1);% état mis à jour
P = P - K*H*P;%covariance mise à jour
```

```
end
```

### extended\_KF.m → extended Kalman

```
function [Xo,Po] = Extended_KF(f,g,Q,R,Z,X,P,Xstate)
```

```

N_state = length(Xstate);
N_obs = length(Z);

Xp = subs(f,Xstate,X);%1

fy = subs(jacobian(f,Xstate),Xstate,Xp);%2

H = subs(jacobian(g,Xstate),Xstate,Xp);%3

Pp = fy * P * fy.' + Q;%4

K = Pp * H' * inv(H * Pp * H.' + R);%5

Xo = Xp + K * (Z - subs(g,Xstate,Xp));%6

I = eye(N_state,N_state);
Po = [I - K * H] * Pp;%7

```

## REFERENCES

- [1] T.A. Berkoff and A.D. Kersey. "Experimental demonstration of a fiber bragg accelerometer". *IEEE Photonics tech. lett.*, 8(12) :1677–1679, 1996.
- [2] M. Kraft. "Micromachined Inertial Sensors State of the Art and a look into the Future"
- [3] Farady. "An introduction to MEMS"
- [4] Antonsson and al. "Frequency content of gait"
- [5] Wang and al. "Recognizing Human Daily Activities From accelerometer signal"
- [6] D. Holleville. "Conception et réalisation d'un gyromètre à atomes froids fondé sur l'effet Sagnac pour les ondes de matières". PhD thesis, Université paris XI Orsay, 2001.
- [7] F. Yver Leduc. "Caractérisation d'un capteur inertiel a atomes froids". PhD thesis, Université paris XI Orsay, 2004.
- [8] F. Allen and al. "Classification of a known sequence of motions and postures from accelerometry data using adapted Gaussian mixture models". IOP publishing Ltd, 2006.
- [9] H.J. Luinge and al. "Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers". *Med. Biol. Eng. Comput.* 2005
- [10] Little MA and al. "Generalized methods and solvers for removal from preecewise constant signal. I. Background theory".
- [11] Little MA and al. "Generalized methods and solvers for removal from preecewise constant signal. II. New methods".
- [12] [www.cs.unc.edu/~welch/kalman/](http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/)
- [13] Makar and al. "Wiener and Kalman Filters for Denoising Video Signals"
- [14] R. E. Kalman. "A new approach to linear filtering and prediction problems"
- [15] R.E. Kalman. "New results in linear filtering and prediction theory"
- [16] Laurent Oudre and al. "Segmentation of accelerometer signals recorded during continuous treadmill walking"
- [17] Tamara M.E. Nijsen and al. "Short time fourier and wavelet transform for accelerometric detection of myoclonic seizures"
- [18] Gregory and al. " Bulk Micromaching of silicon"

# RESUMÉ

---

Dans ce cours compte-rendu, je vais faire l'analyse de mon travail pendant ces deux mois de stage pour l'université de La Rochelle pour le master Ingénierie Mathématique et Image.

Ce stage s'était déroulé à la faculté de médecine d'Angers en 2012, dans le laboratoire UMR CNRS 6214-INSERM U1083. Dans ce laboratoire, il y a l'équipe de Télévasc.

J'ai fait un algorithme en utilisant des signaux accéléromètres pour terminer l'activité physique de la personne. Si la personne est en voiture, fait de la course à pied, marche, se trouve assis.

Nous allons aborder les notions suivantes dans ce rapport :

- Un état de l'art des technologies accéléromètres
- Les travaux réalisés