

# **Mémoire de fin d'études**

## **Analyse gestuelle inertielle pour batterie augmentée**

**Marco PERON**

ENSL 2014

Directeur interne : Thierry Coduys

Directeur externe : Gregory Beller

Rapporteurs : Alan Blum, Frank Gillardeaux

## Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Résumé.....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>Abstract.....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>Introduction .....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1. Le geste instrumental.....</b>                                     | <b>7</b>  |
| <b>1.1. Relation du geste au son .....</b>                               | <b>7</b>  |
| <b>1.2. Le geste percussif .....</b>                                     | <b>8</b>  |
| <b>1.3. La percussion avec baguette.....</b>                             | <b>9</b>  |
| 1.3.1. Description des types de baguette.....                            | 9         |
| 1.3.2. Modélisation d'une frappe.....                                    | 9         |
| 1.3.3. Classification des frappes .....                                  | 10        |
| 1.3.4. Paramètres physiques.....   | 11        |
| <b>2. Percussions augmentées.....</b>                                    | <b>14</b> |
| <b>2.1. Augmentation d'instrument .....</b>                              | <b>14</b> |
| <b>2.2. Augmentation temps réel.....</b>                                 | <b>15</b> |
| <b>2.3. Exemples d'augmentation temps réel.....</b>                      | <b>16</b> |
| <b>2.4. Percussions électroniques et percussions augmentées.....</b>     | <b>17</b> |
| <b>3. Etat de l'art du suivi gestuel dans la percussion .....</b>        | <b>20</b> |
| <b>3.1. Détection capacitive .....</b>                                   | <b>20</b> |
| <b>3.2. Détection électromagnétique.....</b>                             | <b>21</b> |
| <b>3.3. Détection optique.....</b>                                       | <b>22</b> |
| <b>3.4. Détection inertielle.....</b>                                    | <b>23</b> |
| <b>4. Capteurs inertiels .....</b>                                       | <b>25</b> |
| <b>4.1. Microsystèmes électromécaniques et centrales inertiels .....</b> | <b>25</b> |
| 4.1.1. Magnétomètres .....   | 25        |
| 4.1.2. Accéléromètres .....  | 27        |
| 4.1.3. Gyromètres .....  | 29        |
| <b>4.2. Fusion des données dans une centrale inertielle.....</b>         | <b>32</b> |
| <b>4.3. Paramétrage de l'algorithme .....</b>                            | <b>34</b> |
| 4.3.1. Constantes de correction d'erreur.....                            | 34        |
| 4.3.2. Double intégration de l'accélération linéaire.....                | 35        |
| <b>4.4. Expression d'une rotation .....</b>                              | <b>36</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>5. Partie pratique : réalisation d'un système de suivi gestuel inertiel pour la batterie.....</b> | <b>39</b> |
| <b>5.1. Objectifs et dimensionnement.....</b>  | <b>39</b> |
| 5.1.1. Objectifs.....  | 39        |
| 5.1.2. Architecture et schéma de principe .....  | 39        |
| 5.1.3. Ordres de grandeur .....  | 40        |
| 5.1.4. Modèle physique.....  | 41        |
| <b>5.2. Dispositif expérimental.....</b>   | <b>41</b> |
| 5.2.1. Centrale inertielle .....   | 41        |
| 5.2.2. Spécifications du capteur.....  | 42        |
| 5.2.3. Paramétrage du capteur.....   | 43        |
| 5.2.4. Intégration sur baguette .....  | 44        |
| 5.2.5. Interface capteur machine .....   | 45        |
| 5.2.6. Extendeur de bus I <sup>2</sup> C.....  | 48        |
| <b>5.3. Analyse temps réelle dans Pure Data.....</b>   | <b>50</b> |
| 5.3.1. Calibration des capteurs .....  | 50        |
| 5.3.2. Optimisation de l'algorithme DCM .....  | 51        |
| 5.3.3. Traitement des données.....   | 52        |
| 5.3.4. Visualisation avec la librairie GEM .....   | 55        |
| <b>5.4. Caractérisation du système : performances et défauts .....</b>                               | <b>56</b> |
| 5.4.1. Résolution temporelle.....  | 56        |
| 5.4.2. Ergonomie .....   | 58        |
| 5.4.3. Blocage de l'objet [udpreceive].....  | 58        |
| <b>5.5. Développements futurs.....</b>   | <b>58</b> |
| <b>6. Conclusion.....</b>  | <b>60</b> |
| <b>7. Bibliographie .....</b>  | <b>61</b> |
| <b>Annexe 1 : configuration du Raspberry Pi .....</b>  | <b>65</b> |

## Résumé

Ce mémoire explore le champ des percussions augmentées, technique de création musicale consistant en l'utilisation simultanée d'une percussion acoustique et d'effets contrôlés par un ordinateur. Ce contrôle s'effectue ici par analyse gestuelle.

La première partie étudie la relation du geste au son dans la percussion. De cette analyse de la mécanique instrumentale, en sont déduites les grandeurs physiques pertinentes pour un suivi gestuel. La seconde partie explicite les différents aspects que revêt le terme d'augmentation d'instrument. La troisième partie dresse un historique des différentes technologies utilisées pour le suivi gestuel. La quatrième partie étudie les technologies mises en œuvre dans les capteurs inertiels, capteurs utilisés dans la dernière partie pour la mise en œuvre d'un dispositif de suivi gestuel pour batterie augmentée.

## Abstract

This thesis explores the field of augmented percussions, a musical creation technique consisting of the simultaneous use of an acoustic percussion and digital effects controlled by a computer. This control is done here by gestural analysis.

The first part examines the relationship between gesture and sound in the percussion field. From the analysis of instrumental mechanics arise the physical quantities relevant for gestural monitoring. The second part explains what is meant by augmented instrument. The third part provides a history of the different technologies used in gestural following devices. The fourth section examines the inertial sensors technologies, used in the last part for the implementation of a gesture following device for augmented drums.

## Introduction

Le monde de la production musicale s'essaye ces dernières années à une fusion délicate : le mélange entre une pratique instrumentale classique d'une part, c'est à dire sur des instruments acoustiques inventés pour certains il y a plusieurs siècles et dont la pratique est un art complexe, et d'autre part la pratique musicale électronique ayant connu un essor dans les années 80 et intimement liée à l'évolution et aux progrès de l'informatique. L'enregistrement d'un instrument passe aujourd'hui nécessairement par un traitement informatique. Ce traitement n'est en général jamais dans les mains de l'instrumentiste, mais laissé à un tiers, ou effectué à posteriori. L'augmentation d'instrument consiste à mettre dans les mains du musicien ce contrôle de l'outil informatique, contrôle s'effectuant de façon simultanée avec sa pratique instrumentale.

Comment cependant transmettre une information musicale à un ordinateur ? Comment obtenir le même degré de précision que l'on peut atteindre avec la pratique instrumentale traditionnelle ? La performance d'une interface est en effet souvent tributaire de son expressivité, c'est à dire dans quelle mesure elle est capable de reproduire avec finesse l'intention de son utilisateur. La technique de suivi gestuel semble être une des plus pertinentes puisqu'elle cherche à capter la cause première de la génération du son, c'est à dire le geste instrumental. Si l'ingénierie a une part prépondérante dans la mise en œuvre d'un tel dispositif, il est aussi nécessaire d'en revenir à une étude théorique plus fondamentale de la génération d'un son, et des gestes qui l'accompagnent.

Ce mémoire se propose d'explorer le champ des percussions augmentées, plus précisément celui des percussions jouées avec baguette. Le dispositif mis en œuvre dans la partie expérimentale utilise des capteurs inertiels pour effectuer un suivi gestuel. Ces capteurs, comme les accéléromètres, ont connu un fort développement ces dernières années, notamment dans les téléphones portables ou dans la domotique, des secteurs en innovation constante.

Dans un premier temps l'étude sera portée sur le geste instrumental, en particulier le geste percussif. Il sera nécessaire de bien comprendre la mécanique de la génération du son et de quels paramètres physiques elle dépend.

Après un bref historique des différentes technologies de suivi gestuel, nous étudierons en détail les systèmes à l'œuvre dans les capteurs inertiels.

Enfin, un dispositif de captation gestuel sera réalisé à l'aide de ces capteurs embarqués sur des baguettes. Le traitement de ces données conduira à la mise en œuvre d'une percussion augmentée.

# 1. Le geste instrumental

La pratique instrumentale est une pratique gestuelle par nature, elle nécessite une interaction physique entre un sujet, l'instrumentiste, et un objet, l'instrument. Cette interaction est appelée geste instrumental. Nous essayerons dans cette partie d'en dégager les grandes lignes et d'en analyser ses propriétés dans la pratique des percussions.

## 1.1. Relation du geste au son

On appelle geste un mouvement d'une partie du corps, et geste instrumental un geste lié à une pratique instrumentale. Le geste est le mécanisme premier de la génération de son, c'est grâce au geste que l'instrumentiste communique de l'énergie à son instrument, générant ainsi un son. Claude Cadoz [6] propose une classification des gestes instrumentaux liés à leur fonction :

- Les gestes d'excitation : ce sont les gestes qui effectuent le transfert d'énergie entre le corps et l'instrument (frapper avec son doigt la touche d'un piano)
- Les gestes de modification : ce sont les gestes qui changent les propriétés de l'instrument (appuyer la pédale de sourdine d'un piano)
- Les gestes de sélection : ce sont les gestes qui permettent de sélectionner quel élément de l'instrument exciter (mouvement latéral des mains sur le piano afin de sélectionner la note désirée)

Il existe d'autre part des gestes liés à la pratique instrumentale, mais qui n'ont pas d'influence directe sur le son, ce sont les gestes d'accompagnement. Les gestes de la tête sont souvent des gestes d'accompagnement qui permettent de marquer le tempo ou exprimer une émotion liée à l'interprétation de la musique.

## 1.2. Le geste percussif

Les gestes percussifs abordent une limite de la classification de Claude Cadoz. En effet, si le geste d'excitation est l'action qui effectue le transfert d'énergie à l'instrument, alors ce geste se résume à l'impact de quelques microsecondes sur la surface percutée, évènement que l'on pourra qualifier de ponctuel dans la temporalité sonore. Or, le geste d'un percussionniste est un mouvement complexe et continu dans lequel se mêlent gestes d'excitation, de modification et de sélection. Nous pouvons cependant relier les différentes fonctions de la classification de Cadoz à des grandeurs physiques au sein d'un geste instrumental.

L'excitation percussive dépend de la mécanique du mouvement. La mécanique de l'impact – instant pendant lequel s'effectue le transfert d'énergie – est dépendante de la préparation du bras et de la main et du relâchement de ceux-ci. Le geste d'excitation percussif peut donc être élargi temporellement, en amont de l'impact, c'est à dire la préparation du bras et la mise en accélération de celui-ci ; et en aval de l'impact dans le relâchement du bras et le retour à une position de repos. Les variables physiques influentes sont la vitesse de frappe, le poids de la baguette et les constantes mécaniques des matériaux percussif et percutés (peau tendue, métal, bois).

Les gestes de modification dépendent de la topographie du système objet percutant/surface percutée au moment de l'impact, c'est à dire dans quelle configuration s'effectue cet impact. Les paramètres physiques jouant sur le timbre de l'instrument sont la position de l'impact sur la surface percutée, la surface d'interaction entre la l'objet percutant et la surface percutée et la force de frappe.

Les gestes de sélection sont liés à des variables spatiales et aux mouvements de l'ensemble du corps du percussionniste. En effet, les instruments percussifs sont généralement utilisés par groupes – un set de percussion – ce qui rend leur extension spatiale généralement grande vis à vis des autres instruments. La sélection est donc le choix de l'élément à percuter, et peut se résumer physiquement aux coordonnées spatiales de l'impact.

### 1.3. La percussion avec baguette

#### 1.3.1. Description des types de baguette

La percussion avec baguette utilise un objet, la baguette, comme extension du corps pour effectuer la percussion. Elle est constituée classiquement de bois, mais peut aussi être en plastique ou métal. Son extrémité est variable en fonction du timbre désiré (Figure 1).



**Figure 1 : (haut gauche) mailloches, (haut droite) fagots, (bas gauche) balais, (bas droite) baguettes traditionnelles**

#### 1.3.2. Modélisation d'une frappe

La frappe peut se décomposer en trois phases distinctes (Figure 2). La première phase, appelée par la suite pré-geste, constitue la préparation de la frappe, l'armement du bras et la mise en accélération de la baguette. La seconde phase constitue la frappe à proprement parler, c'est à dire la rencontre avec la surface percutée, et l'annulation de la vitesse de la baguette. La troisième phase, appelée par la suite post-geste constitue le relâchement du bras et le retour en position de repos.



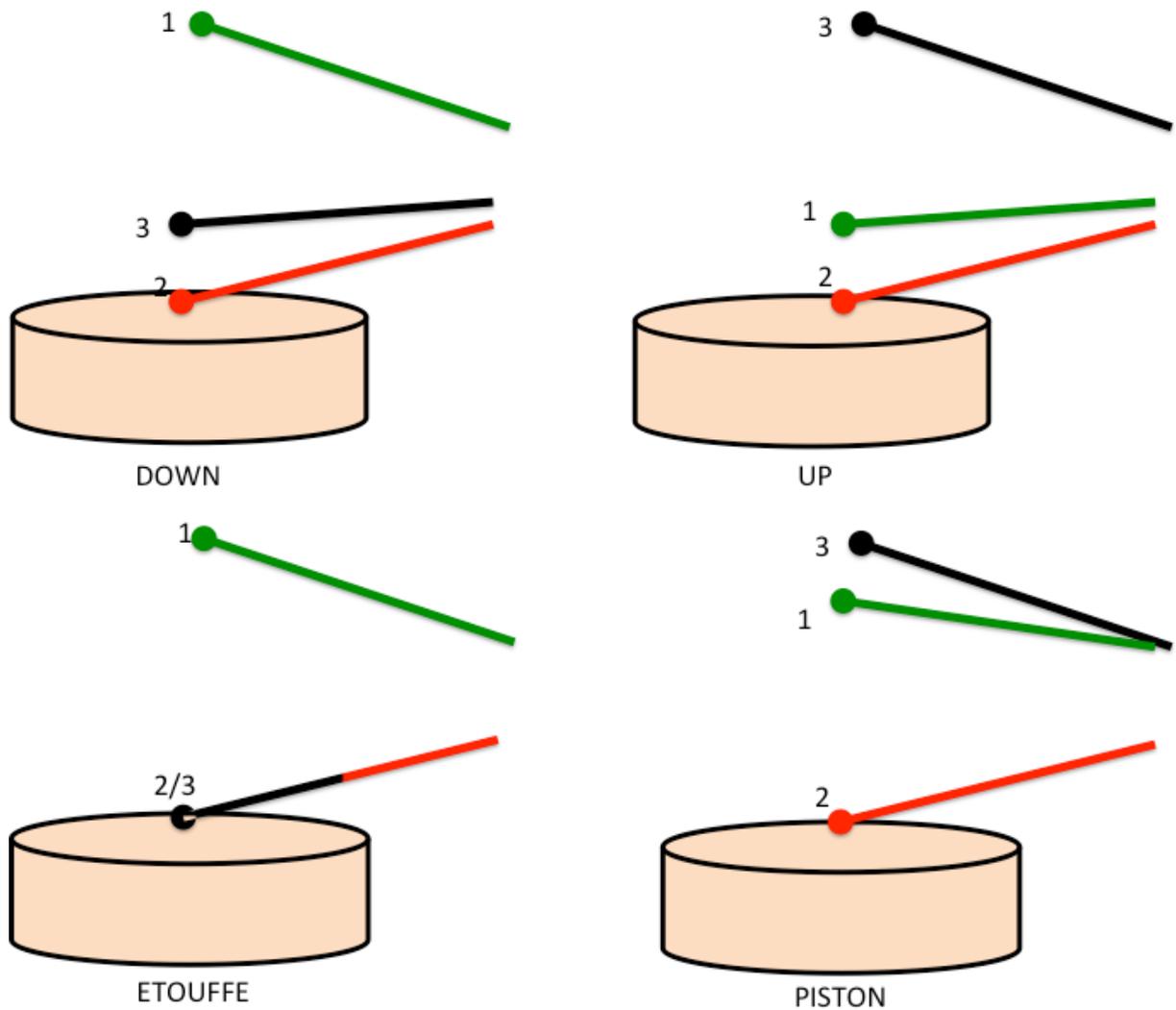
Figure 2 : décomposition d'une frappe de batterie

### 1.3.3. Classification des frappes

Les frappes peuvent être classifiées en fonction du pré geste et du post geste, qui déterminent comment s'effectue le transfert d'énergie entre la baguette et la surface percutée. Pour la percussion classique, François Dupin [19] [3] classe les frappes en quatre catégories (Figure 3) :

- Up : le bras démarre en position basse, effectue la percussion et remonte dans une position haute.
- Down : le bras démarre d'une position haute, effectue la percussion et reste dans une position basse.
- Piston : le bras démarre d'une position haute, effectue la percussion et remonte dans une position haute.
- Etouffé : Le bras démarre d'une position basse ou haute, effectue l'impact et reste collé à la surface percutée.

Ces différents mouvements influent sur la façon dont l'énergie est transmise à la surface percutée, en dosant la quantité d'énergie absorbée par la main du percussionniste au moment du rebond de la baguette sur la surface.



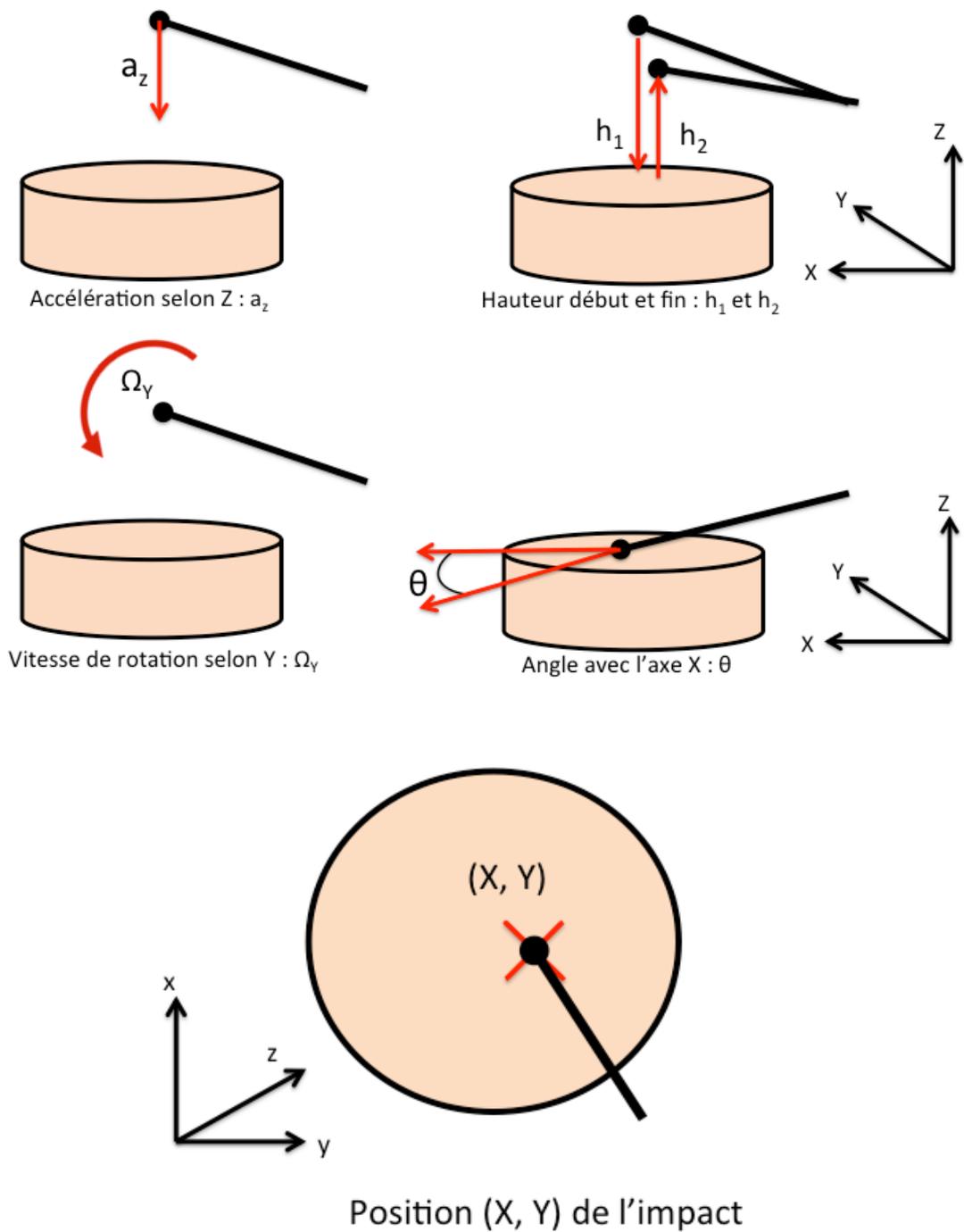
**Figure 3 : classification des différentes frappes :**  
 1 : position initiale - 2 : frappe - 3 : position finale

#### 1.3.4. Paramètres physiques

L'extraction de certains paramètres physiques dans le jeu d'un instrumentiste permet l'identification et la classification des différents gestes effectués. Cette reconnaissance est une première étape nécessaire pour aller vers l'augmentation du jeu du musicien. Nous allons ici essayer de dégager les grandeurs physiques qui caractérisent ces différents gestes. La Figure 4 définit un repère qui sera conservé par la suite : l'axe Z sera aussi appelé l'axe vertical, axe dans lequel s'effectue le mouvement de

la frappe, l'axe Y sera l'axe latéral, c'est l'axe sur lequel s'étalent les différents éléments d'un set de batterie.

- Accélération verticale  $a_z$  : la frappe est un mouvement dans l'axe vertical. L'accélération de la baguette selon cet axe nous donne une information sur l'intensité de la frappe.
- Hauteur de début de frappe  $h_1$  et de fin de frappe  $h_2$ : ces informations permettent d'établir une classification comme détaillé dans la partie précédente 1.3.3 : Up/Down/Piston/Etouffé.
- Vitesse de rotation  $\omega_Y$  selon l'axe Y: le mouvement vertical de la baguette s'accompagne d'une rotation autour de l'axe Y. Ce mouvement de rotation permet d'augmenter la vitesse de l'extrémité de de la baguette, qui effectue la percussion. La vitesse angulaire peut donc être utilisée comme donnée complémentaire sur l'intensité de la frappe.
- L'angle  $\theta$  avec l'axe X: au moment de l'impact, l'angle entre la baguette et la surface percutée permet de modifier le timbre de l'élément percuté. Cette information est donc une donnée d'un geste de modification.
- Position de l'impact (X,Y) : la position de l'impact sur la surface percutée est une donnée de modification de timbre. Dans un repère absolu, cette information nous renseigne sur quel élément du set est percuté, donc une information sur le geste de sélection. La position d'impact est donc une information de modification et de sélection.



**Figure 4 : Représentation des grandeurs physiques caractéristiques d'une frappe**

## 2. Percussions augmentées

Nous essaierons dans cette partie de définir le sens de l'augmentation d'instrument et d'explorer les différentes facettes que ce terme peut revêtir.

### 2.1. Augmentation d'instrument

On appelle augmentation d'instrument la pratique d'un instrument traditionnel à laquelle on ajoute un système d'interaction avec une machine, généralement un ordinateur. Cette interaction homme machine peut-être :

- Complémentaire à l'instrument : si un membre de l'instrumentiste est libre, on peut lui rajouter une interface, actionnée par ce membre libre. Même si cette technique peut-être considérée comme la pratique de deux instruments séparés, l'instrument d'une part, la machine d'autre part, le terme d'augmentation est applicable dès lors qu'il y a interaction entre les deux : un changement d'un paramètre sur la machine va entraîner le changement du son de l'instrument. Ce type d'augmentation est une complexification de la pratique instrumentale, puisqu'il demande des ressources corporelles supplémentaires à l'instrumentiste.
- Intrinsèque à l'instrument : c'est le son capté de l'instrument lui même qui va commander la machine. Le son capté et envoyé dans un logiciel qui va analyser ses paramètres, tel que la hauteur tonale, la dynamique, la quantité d'harmoniques ; et modifier ces mêmes paramètre dans le son original de l'instrument. Il convient donc de distinguer les deux circuits audio qu'engendrent cette technique :
  - o Le circuit traditionnel : captation du son selon une certaine esthétique, restitué via un système de diffusion.
  - o Le circuit de commande de l'augmentation : captation du son contenant les paramètres d'analyse, puis traitement informatique et interaction avec le premier circuit.

Ces deux chaînes nécessitent éventuellement deux systèmes de captation complètement dissociés, le système de captation de l'augmentation pouvant utiliser du matériel spécifique comme des microphones de contact, ou capter des sons de l'instrument qui n'ont pas à la base vocation musicale ou esthétique.

- Supplémentaire à l'instrument : on extrait des paramètres physiques non sonores à partir de la pratique instrumentale. C'est le cas de l'analyse gestuelle ou posturologique. Cette technique fait appel à des capteurs ne faisant pas partie du corpus traditionnel du matériel utilisé par les ingénieurs du son, mais dont les données sont intégrées à la chaîne de traitement audio. Elle permet de traduire des événements physiques non sonores, comme les gestes d'accompagnement, en paramètres sonores.

Un dispositif d'augmentation d'instrument modifie plus ou moins la pratique instrumentale, même si il se veut en général le moins intrusif possible, le but étant d'augmenter l'instrument et pas d'en inventer un nouveau. Les possibilités créatrices de l'instrumentiste dans le cadre de sa pratique traditionnelle s'en trouvent donc enrichies. L'augmentation d'instrument met dans les mains du musicien le contrôle de certains traitements sonores jusqu'à présent réservés à la post-production, ou à un opérateur tiers.

## 2.2. Augmentation temps réel

On appelle temps réel, un système qui fournit une sortie au bout d'un temps déterminé à partir du moment où une entrée se présente. Il convient donc de déterminer les différentes échelles de temps dans un instrument percussif, qui sont au nombre de trois :

- Echelle de temps de l'événement sonore : on parle ici de l'impact avec la surface percutée, du déclenchement du son. La limite admise de perception de délai entre deux sons presque concomitants est d'environ 50 ms. Pour des sons transitoires comme les sons percussifs, cette limite peut même être plus basse, de l'ordre de 30 ms. Les percussionnistes font preuve d'une extrême précision temporelle quant au "groove" qu'ils veulent jouer. On appelle communément "groove" la

localisation temporelle précise d'une frappe, juste avant ou juste après le temps métronomique. Cette précision est de l'ordre de quelques millisecondes [21].

- Echelle de temps acoustique: il s'agit ici du temps pendant lequel on considère que l'instrument émet un son. Pour un fut de batterie, ce temps est de l'ordre de la dizaine, voire centaine de millisecondes pour un élément très résonnant.
- Echelle de temps musicale: la musique est souvent asservie à un tempo, fluctuant ou non, mesuré en pulsations par minute, dont les percussions en sont le coeur. Une modification de ce paramètre nécessite donc une réponse de l'ordre de la seconde.

### 2.3. Exemples d'augmentation temps réel

Selon les échelles de temps citées dans le paragraphe précédant, on peut trouver plusieurs techniques d'augmentation sonore des éléments de batterie :

- Trigger ou déclenchement de son synchrone: c'est la technique utilisée depuis l'invention des batteries électroniques, elle consiste en une superposition de sons. Le moment de l'impact est détecté et un son est déclenché simultanément. Le son résultant obtenu est un mélange du son acoustique et d'un ou plusieurs sons électroniques.
- Modification de la résonance: cette technique consiste à modifier l'acoustique de l'élément en temps réel. C'est le cas du feed drum inventé au CRM de Rome par Michelangelo Lupone : un haut-parleur est placé dans un fût de timbale. Ce haut-parleur vibre en phase ou non avec l'onde présente dans le fut, ce qui entraîne des amplifications, ou des suppressions d'harmoniques. Le son peut être entretenu indéfiniment, ou éteint très rapidement.
- Modulation de l'enveloppe ADSR: le son de l'élément que l'on souhaite augmenter est capté par un microphone dont le son est traité par une enveloppe de volume. La longueur temporelle de cette enveloppe peut par exemple être commandée par l'amplitude du post-geste : plus le percussionniste fera des gestes amples, plus ses sons seront longs dans le temps, inversement plus les gestes seront secs, plus les sons seront courts.

- Changement ou asservissement de tempo : le tempo n'est pas un élément figé de la musique, il peut dans un morceau effectuer des variations très subtiles, quelques pulsations par minutes, ou très brutales, division par deux du tempo. La détection du tempo permet d'asservir ce dernier sur le jeu du percussionniste. Cette information peut servir à piloter des effets dépendant du tempo : boucles, délais, temps de réverbération...

## 2.4. Percussions électroniques et percussions augmentées

Les percussions sont une des classes d'instruments parmi les premières à connaître l'expérience de l'augmentation, avec l'apparition des batteries électroniques dans le milieu des années 80. En effet, la percussion est un mode de jeu se modélisant assez facilement en informatique car proche d'une logique binaire. La norme MIDI (Musical Instrument Digital Interface), inventée pour le jeu de piano, décrit originellement le geste instrumental en quatre paramètres :

- Note : note jouée s'échelonnant sur dix octaves et demie (codée sur 7 bits de 0 à 127).
- Note ON : instant t de déclenchement du son.
- Note OFF : instant t de l'extinction du son.
- Vélocité : intensité du son (codée sur 7 bits de 0 à 127).

Les batteries électroniques sont composées de capteurs qui détectent l'impact de la baguette sur des surfaces, appelés pads, et qui commandent une note MIDI donnée. Ces capteurs ont été adaptés sur des éléments de batterie acoustique, constituant ainsi les premières percussions augmentées, c'est à dire mélangeant son acoustique et son électronique commandé via MIDI.

Il existe plusieurs technologies permettant de détecter un impact sur une surface, la plus communément utilisée étant la technologie piézoélectrique (Figure 5): un matériau piézoélectrique génère une tension à ses bornes quand il est soumis à une déformation. Ces matériaux peuvent donc transformer une onde de déformation mécanique propagée dans un solide en signal électrique, ce qui leur vaut l'appellation de microphone de contact.



**Figure 5 : (gauche) Disque piézoélectrique, (droite) Disque piézoélectrique utilisé pour une détection d'attaque sur un élément de batterie**

La détection d'impact avec des capteurs piézoélectriques est une méthode valable pour détecter la temporalité de l'impact ainsi que la force de l'impact, elle occulte en revanche complètement la topologie de l'impact, c'est à dire la position d'impact, la surface d'impact entre la baguette et la surface percutée, ainsi que l'angle de la baguette par rapport à la surface percutée. Cette technologie souffre donc d'un manque d'expressivité quand elle est appliquée à une augmentation.

Le Wavedrum commercialisé par Korg (Figure 6), est une technologie hybride intégrant microphones de contact et microphones classiques positionnés sur une peau de percussion traditionnelle, permettant ainsi d'analyser son mode de vibration. Si cette technologie permet une étude plus fine de la mécanique de l'impact, elle ne peut pas être considérée comme une percussion augmentée puisque ne produisant aucun son acoustique, les sons générés sont uniquement des sons de synthèse.



**Figure 6 : Korg Wavedrum**

Enfin, le suivi gestuel est une technique qui consiste à analyser le geste instrumental en équipant le musicien de capteurs fournissant des informations en continu sur la position ou l'accélération de certaines parties de son corps. Cela permet d'extraire des informations avant et après l'impact, sur le pré-geste et le post geste, et donc de remonter à l'intention gestuelle de l'instrumentiste. Parmi toutes les techniques d'augmentation, le suivi gestuel est certainement celle qui permet le plus d'expressivité, mais aussi la plus difficile à mettre en œuvre, puisque la gestuelle est différente selon les musiciens. Cela explique pourquoi aucun système commercial n'existe pour une application directe à la musique. C'est cette technique qui sera investiguée par la suite.

### 3. Etat de l'art du suivi gestuel dans la percussion

L'analyse gestuelle du jeu d'un percussionniste équipé de baguettes nécessite le suivi de la position d'un élément de la baguette dans un espace en trois dimensions. Il existe plusieurs technologies permettant ce suivi tridimensionnel, dont chacune a ses avantages et ses inconvénients, nous allons ici essayer d'en tracer un bref historique.

#### 3.1. Détection capacitive

Le "Radiodrum", ou "Radio-baton" est un des premiers systèmes de suivi gestuel, inventé par Bob Boie et Max Mathews (Figure 7) dans le milieu des années 80. Ce dispositif, fonctionnant de façon similaire à un Theremin, utilise le principe de détection capacitive. Le système est constitué d'une part de deux baguettes émettrices de radiofréquences, et d'autre part d'une plaque conductrice utilisée comme antenne. La variation de distance entre la baguette et la plaque entraîne un changement de la capacité du système ce qui permet un suivi gestuel selon une dimension. Ce dispositif a été à la base développé pour l'orchestration virtuelle, c'est à dire le suivi gestuel d'un chef d'orchestre pilotant des synthétiseurs à la place d'un orchestre. C'est Andrew Schloss qui eu la première utilisation du système appliqué aux percussions. Il continua le développement du "Radiodrum" avec Bob Boie jusqu'en 2013 [7].



**Figure 7 : Max Mathews utilisant le Radiodrum**

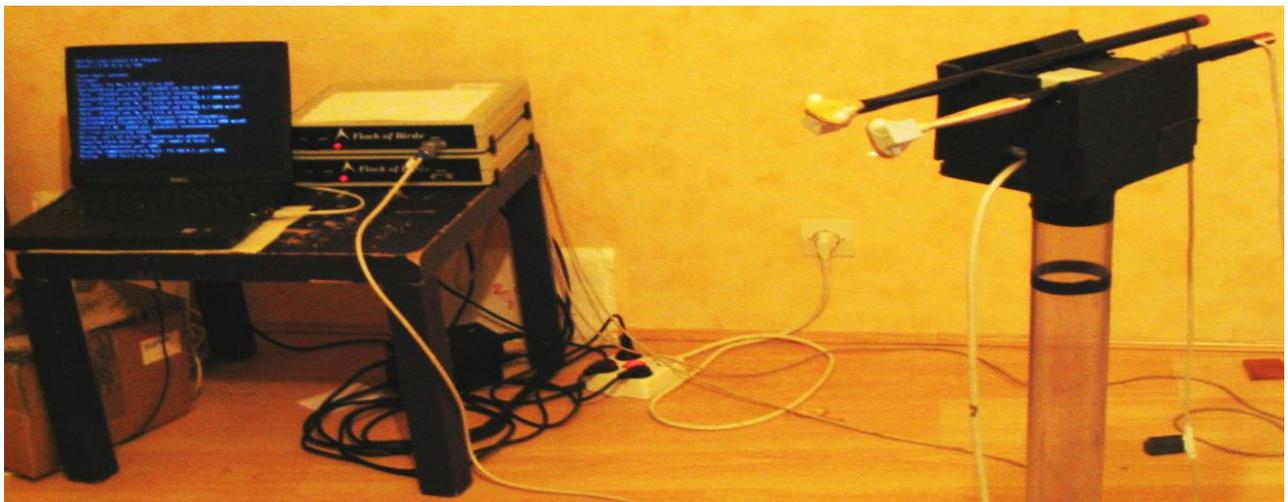
L'inconvénient principal de ce système est la zone de jeu, limitée au volume situé au dessus de la plaque réceptrice, et limité à une seule dimension.

### 3.2. Détection électromagnétique

Le suivi électromagnétique 3D est une technologie développée au début des années 90, essentiellement pour des applications militaires. Le système est constitué d'un boîtier émetteur de trois champs magnétiques, correspondant aux trois dimensions de l'espace, et d'un capteur récepteur capable de calculer sa position relative par rapport au boîtier émetteur. Ce système est utilisé en médecine comme aide aux chirurgiens, dans l'industrie militaire comme système pour faire du "headtracking", ou dans toutes les applications nécessitant un suivi tridimensionnel du corps humain (effets spéciaux, sport, biomécanique).

Les inconvénients de ce système sont : le rayon d'action de quelques mètres du à la difficulté d'émettre un champ magnétique de forte puissance, le taux de rafraichissement assez faible de l'ordre de quelques centaine de Hertz, et enfin sa vulnérabilité aux champs électromagnétiques extérieurs.

Le SCRIME de Bordeaux a développé un système de percussions aériennes au début des années 2000 basé sur des capteurs "Flock of bird" de Ascension technologies (Figure 8, 9), puis en 2010 basés sur des capteurs Liberty de Polhemus [9] [3] (Figure 9). [31].



**Figure 8 : Système de percussion aérienne à base de Flock of Bird, SCRIME de Bordeaux**



**Figure 9 : Extrait de la vidéo de démonstration de la percussion aérienne du SCRIME**

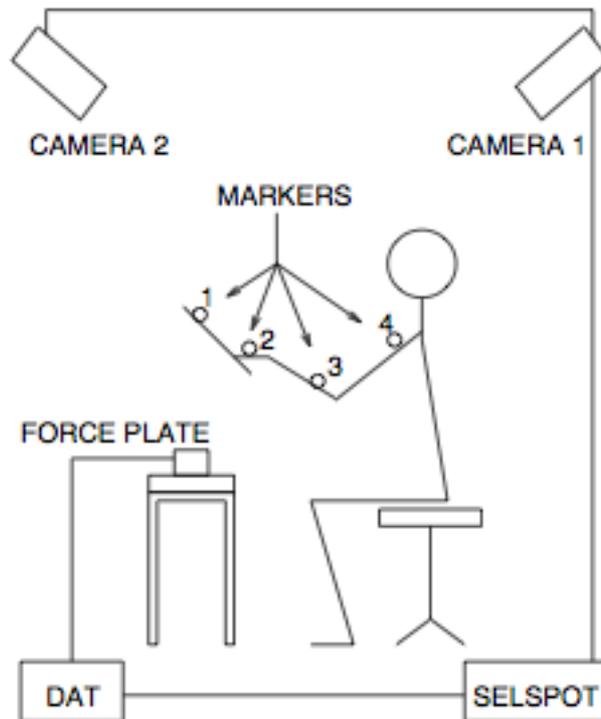
### **3.3. Détection optique**

La stéréoscopie optique est une technique née dans les quelques années qui suivirent l'invention de la photographie. Le suivi tridimensionnel d'un point peut-être réalisé assez simplement à l'aide de deux caméras synchronisées et positionnées précisément dans l'espace. Ce système présente l'avantage de fournir une séquence d'images et donc un support directement exploitable à l'œil nu. Cependant l'automatisation de cette tâche nécessite un traitement informatique lourd, souvent incompatible avec le temps réel. D'autre part, la faible fréquence d'échantillonnage des caméras standards, généralement inférieure à 50 images par seconde, ne permet pas une résolution temporelle suffisante pour la détection d'évènements ponctuels, comme des impacts. La détection optique est cependant intéressante pour d'autres gestes, comme les mouvements latéraux concernant la sélection de l'élément à percuter, ou encore les gestes d'accompagnement comme les mouvements de la tête, qui peuvent être facilement détectables et analysables par un système optique. Ils sont donc intéressants à utiliser en complément d'autres systèmes permettant de résoudre temporellement les impacts.

Enfin, les systèmes optiques sont en grande partie limités par le phénomène d'occlusion : le système doit avoir une ligne de visée dégagée entre le point suivi et la

caméra, ce qui dans une performance musicale mouvementée est souvent très restrictif pour le musicien.

Dans ses travaux de recherche sur la relation entre émotion et geste dans la percussion [5] [15] [21], Sofia Dahl a beaucoup utilisé un système appelé Selspot [11], constitué de deux caméras et de marqueurs à LED positionnés sur les bras et sur les baguettes du batteur (Figure 10).



**Figure 10 : Utilisation du système Selspot par Sofia Dahl**

Le GEMM de Marseille a aussi expérimenté la captation vidéo allié au logiciel VNS [16], processeur d'image qui permet de mesurer et reconnaître les différents mouvements de l'instrumentiste.

### 3.4. Détection inertielle

Le développement ces dernières années des MEMS (MicroElectroMechanical Systems) a permis le développement de capteurs accélérométriques et magnétiques de petite taille, et à bas cout. Ce sont aujourd'hui de composants intégrés dans presque tous

les téléphones portables. Ces capteurs permettent d'accéder de façon précise à la dynamique inertielle des objets sur lesquels on les fixe.

Un nombre important de systèmes de percussions aériennes ont été développés à l'aide de téléphones portables. En 2004, Charles Verron, en collaboration avec La Kitchen, a commencé le développement d'une baguette de batterie équipée d'un tel dispositif, obtenant des résultats très satisfaisant en terme de latence et de dynamique de jeu (Figure 11). Une vidéo de démonstration avec le percussionniste Daniel Champolini est disponible en ligne [32].



**Figure 11 : Capteurs inertiels embarqués sur une baguette, par Charles Verron**

## 4. Capteurs inertiels

### 4.1. Microsystèmes électromécaniques et centrales inertielles

Le développement des smartphones a permis ces dix dernières années le développement et une croissance rapide de capteurs inertiels de très petite taille. Ces capteurs appelés MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems ou Microsystème Electromécaniques), sont des capteurs mettant en œuvre des systèmes mécaniques sur des puces en silicium, technologie utilisée dans la fabrication des microprocesseurs. Ces systèmes permettent l'intégration de capteurs de petite taille, et donc à des positions de plus en plus stratégiques. On peut citer comme exemple les accéléromètres, gyromètres et magnétomètres, utilisés dans les téléphones ou dans les systèmes de navigation embarqués, les matrices de micro miroirs utilisés dans les vidéoprojecteurs, ou encore les matrices piézoélectriques utilisées dans les imprimantes jet d'encre.

La combinaison de ces différents capteurs sur une même puce électronique permet la fusion de leurs données. On appelle fusion de données le fait d'utiliser un capteur pour améliorer ou enrichir les mesures d'un autre capteur. C'est le cas des centrales inertielles (IMU : Inertial Measurement Units). Ces capteurs sont une combinaison de capteurs inertiels et magnétiques permettant l'analyse du mouvement de l'objet sur lequel est installé le capteur. Ils sont constitués de :

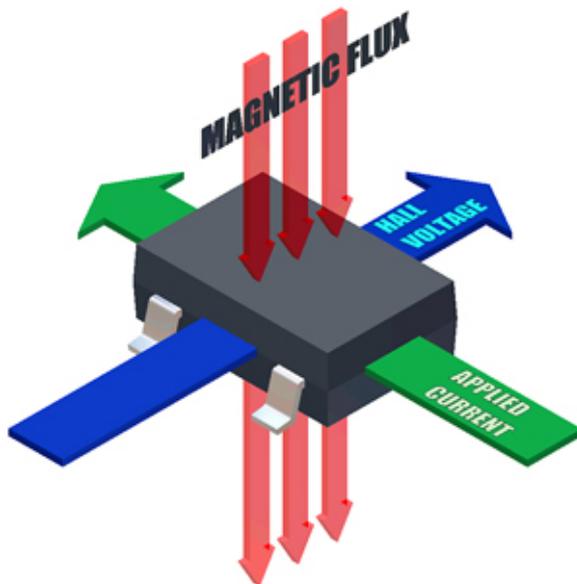
- Magnétomètres : ils mesurent la direction du champ magnétique terrestre, et donc un repérage du nord.
- Accéléromètres : ils mesurent l'accélération linéaire.
- Gyromètre : ils mesurent la vitesse de rotation.

#### 4.1.1. Magnétomètres

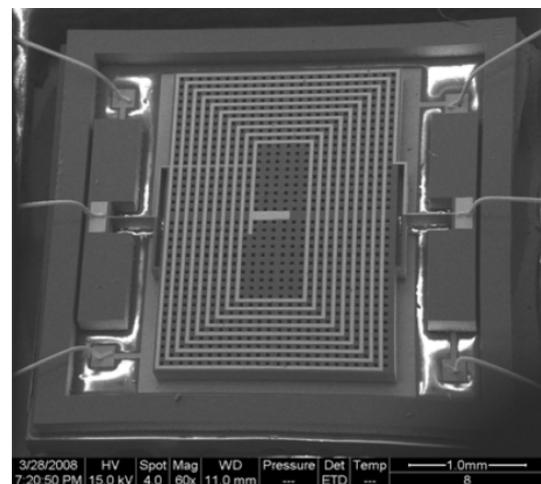
Les magnétomètres mesurent le champ magnétique qui les traverse. Quand ils sont situés loin de toute source de champ magnétique humain, ils mesurent le champ

magnétique terrestre et permettent donc l'identification du nord magnétique. Ils sont au nombre de trois dirigés selon chaque axe X, Y et Z afin de lever toute ambiguïté en cas de rotation du capteur. En effet, prenons comme exemple une boussole classique telle qu'on la connaît, qui est un capteur magnétique selon un seul axe. Elle ne fonctionne que si elle est posée à plat. Si on la tourne vers le haut ou sur le côté, la résultante du champ magnétique sur l'axe de la boussole est nulle, et elle ne fournit aucune information. Il est donc nécessaire d'avoir une boussole pour chaque axe afin d'avoir une mesure robuste, indépendante de l'orientation du capteur.

Ces capteurs se basent sur l'effet Hall : un matériau conducteur parcouru par un courant et un champ magnétique perpendiculaire à la propagation du courant possède une tension induite sur ses faces latérales (Figure 12). Une variation du champ magnétique induit donc une variation de tension. Ces capteurs (Figure 13) sont assez vulnérables aux perturbations électromagnétiques extérieures, qui peuvent être importantes lors d'applications dans l'audio : haut-parleurs, lignes de d'alimentation électriques...



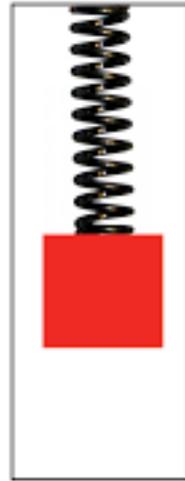
**Figure 12 : Principe de fonctionnement d'un capteur à effet Hall**



**Figure 13 : Photographie au microscope électronique d'un magnétomètre MEMS**

### 4.1.2. Accéléromètres

Les accéléromètres mesurent l'accélération linéaire d'un objet. Leur fonctionnement s'apparente à un système masse ressort microscopique (Figure 14). Un système masse ressort isolé idéal est un système qui n'est soumis qu'à deux forces : la force de rappel du ressort et la gravité. Du principe fondamental de la dynamique (1) projeté sur l'axe x (3), on en déduit que l'accélération selon x est une fonction du déplacement x de la masse par rapport à sa position d'équilibre. k est la constante de raideur du ressort, m la masse et g la gravité. Un déplacement de l'accéléromètre va se traduire par une mise en mouvement de cette masse et donc un déplacement x non nul. C'est ce déplacement qui est mesuré dans un accéléromètre.



**Figure 14 :**  
**Système**  
**masse**  
**ressort**

$$(1) \quad m \vec{a} = \sum \vec{F}$$

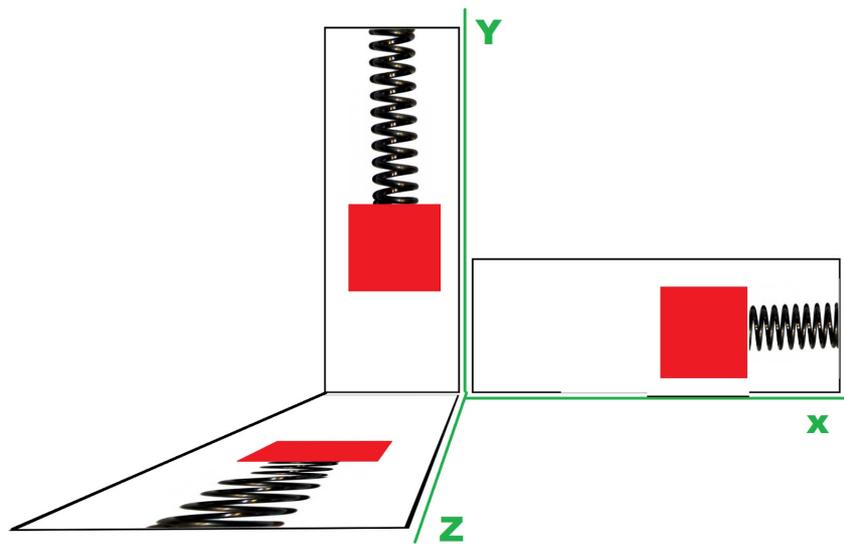
$$(2) \quad m \vec{a} = \vec{F}_R + \vec{g}$$

$$(3) \quad a_x = \frac{dkx + \vec{g} \cdot \vec{x}}{m}$$

On remarque cependant une caractéristique majeure de ce système qui n'est pas mentionnée dans l'appellation accéléromètre, c'est qu'il mesure aussi la gravité. Un accéléromètre immobile dirigé selon un axe pointant vers le sol va donc mesurer une accélération non nulle alors qu'il est immobile. Un accéléromètre mesure donc la somme de la gravité et de l'accélération linéaire. Trois accéléromètres dirigés selon les trois axes (Figure 15) permettent de mesurer :

- La direction et la norme du vecteur gravité quand le capteur est immobile.
- La somme de l'accélération linéaire et de la gravité quand le capteur est en mouvement linéaire.

Si le capteur effectue un mouvement linéaire, c'est à dire sans rotation, la résultante de la gravité sur les trois axes est une constante que l'on peut soustraire, on peut donc reconstruire le vecteur accélération linéaire. En revanche, une rotation pure du capteur va engendrer une variation de la résultante du vecteur gravité sur les trois axes, et donc une variation non nulle alors que l'accélération linéaire est nulle. Dans le cas d'un mouvement complexe comprenant rotation et mouvement linéaire, les données d'un accéléromètre sont donc difficilement interprétables car il est impossible de dissocier les deux informations.



**Figure 15 : Trois accéléromètres selon les trois axes**

Dans la pratique, les accéléromètres micrométriques sont constitués de deux peignes entrelacés dont l'un est mobile par rapport à l'autre. Le déplacement des lamelles du peigne engendre une variation de la capacité du système, et donc du potentiel électrique (Phénomène physique identique aux microphones à condensateurs) (Figure 16, Figure 17).

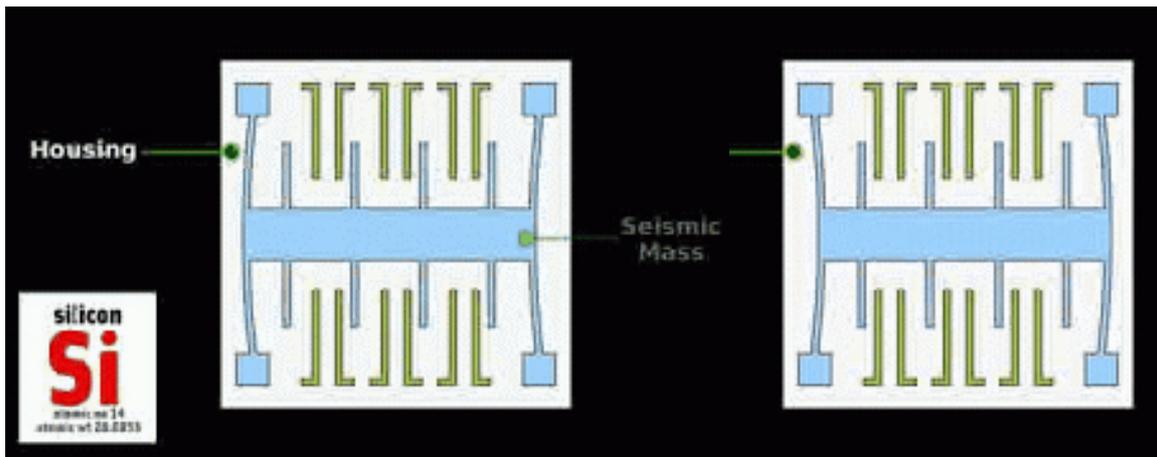


Figure 17 : Schéma de fonctionnement d'un accéléromètre MEMS

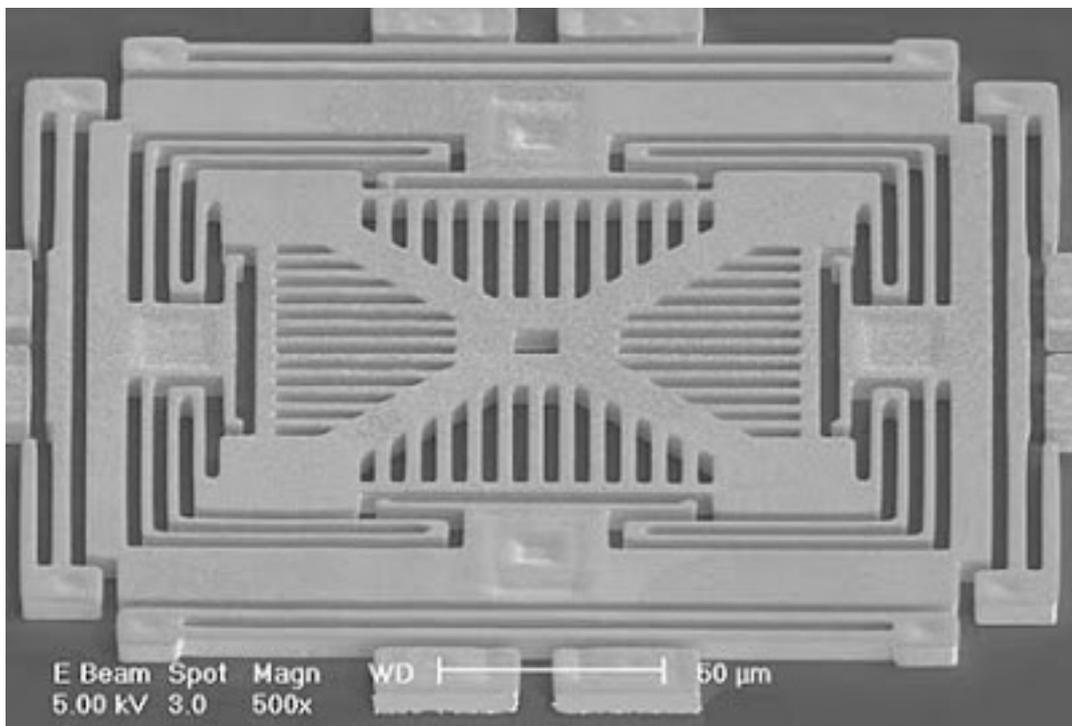


Figure 16 : Photographie au microscope électronique d'un accéléromètre MEMS

#### 4.1.3. Gyromètres

Un gyromètre mesure la vitesse angulaire du capteur selon un axe de rotation en mesurant la force de Coriolis qui lui est appliquée. Lorsque l'on effectue un déplacement dans un référentiel en rotation (Figure 18), on subit une force inertielle, comprenant deux composantes : la force d'inertie d'entraînement et la force d'inertie de Coriolis.

Cette dernière s'exerce dans une direction parallèle au sens de rotation : dans le sens de rotation si l'on se rapproche du centre de rotation, dans le sens inverse de la rotation si l'on s'écarte du centre de rotation (4).

$$\vec{F}_C = -2m\vec{\omega} \wedge \vec{v}_R \tag{4}$$

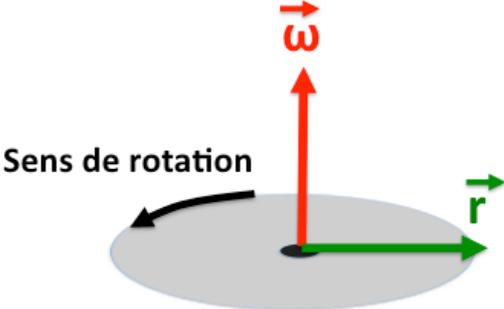


Figure 18 : Référentiel en rotation

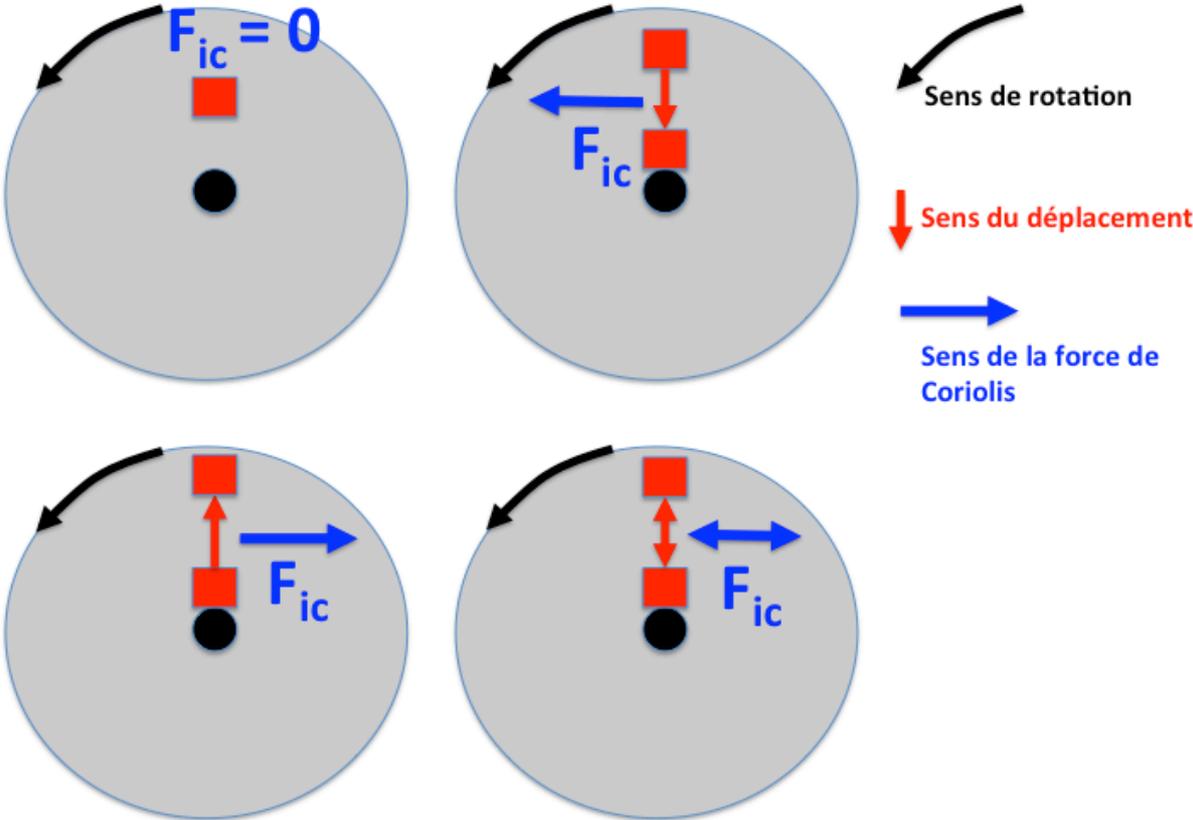
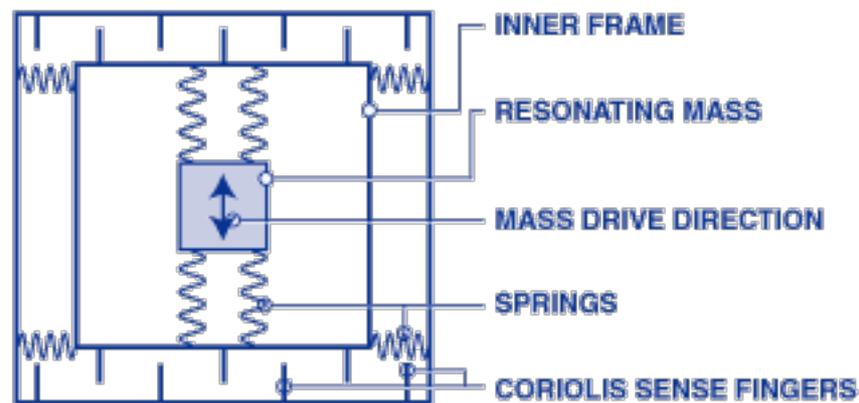


Figure 19 : Variation de la force de Coriolis en fonction du déplacement radial

Si on met une masse en mouvement selon un axe perpendiculaire à l'axe de rotation, on peut observer une variation de cette force (Figure 19). En mettant une masse en oscillation, on peut observer l'écart de cette force entre un point proche du centre et un point éloigné du centre. Cet écart est nul si il n'y a pas de rotation, et est d'autant plus grand que la vitesse de rotation est grande.

En pratique, les gyromètres utilisent un principe de détection proche de celui des accéléromètres. Une masse est mise en oscillation à très haute fréquence, un système en peigne mesure le déplacement quand la masse est en position basse, c'est à dire proche du centre de rotation, et le déplacement quand la masse est en position haute, c'est à dire loin du centre de rotation (Figure 20). La différence de déplacement entre ces deux positions nous donne directement la vitesse angulaire.



**Figure 20 : Schéma de fonctionnement d'un gyromètre MEMS**

Trois gyromètres dirigés selon les trois axes de rotation permettent donc de mesurer la vitesse de rotation d'un objet. L'intégration de cette information à partir d'une position de base fournit donc une position angulaire, c'est à dire orientation dans l'espace. Cette orientation est décrite traditionnellement par les angles de Tait-Bryan, ou angles d'Euler, utilisés en navigation (Figure 21) : lacet, tangage et roulis (yaw, pitch et roll). Cependant, l'intégration de la vitesse angulaire génère une dérive dans la détermination de l'orientation, ce qui rend l'information non fiable sur le long terme (Cf partie 5.3.2).

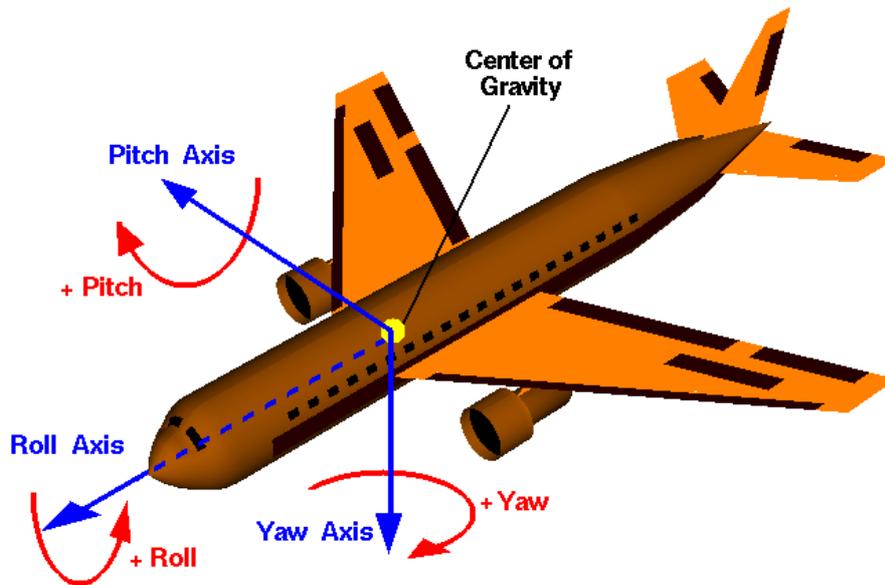


Figure 21 : Définition des angles de Tait-Bryan pour la navigation aéronautique

#### 4.2. Fusion des données dans une centrale inertielle

Une centrale inertielle est donc un capteur constitué de trois accéléromètres, trois gyromètres, et trois magnétomètres. Pris individuellement ces capteurs nous fournissent beaucoup d'informations, qui sont cependant peu fiables : les accéléromètres nous fournissent la somme de la gravité et de l'accélération linéaire, les gyromètres nous fournissent l'orientation mais dérivent avec le temps, les magnétomètres sont sensibles aux perturbations électromagnétiques et ne nous donnent que l'information du nord magnétique. Il est donc nécessaire de combiner ces données si l'on veut avoir une information d'orientation fiable, et absolue dans l'espace. L'algorithme de fusion des données décrit par la suite porte de nom de DCM (Direct Cosine Matrix) et fournit une analyse AHRS (Attitude and Heading Reference System) [23] [25], c'est à dire une orientation absolue par rapport au nord magnétique et à la gravité.

La première opération consiste à corriger les données de l'accéléromètre avec les données du gyromètre. En effet, un accéléromètre mesure la somme de la gravité et de

l'accélération linéaire. Lorsque le capteur effectue une rotation, la composante de la gravité sur les trois axes de l'accéléromètre va changer. Or ces informations de rotation sont aussi contenues dans les données fournies par gyromètre. On peut donc utiliser le gyromètre pour traiter les données brut de l'accéléromètre et séparer : les variations dues à la rotation d'une part - donc au changement de direction de la gravité - et les variations dues à l'accélération linéaire d'autre part - c'est à dire au déplacement linéaire.

Les données de direction de la gravité et du nord magnétique peuvent maintenant fournir une référence dans les données d'orientation du gyromètre afin de corriger ses dérives sur le long terme dues à l'intégration de l'information de vitesse angulaire.

Enfin, l'accélération linéaire peut-être intégrée deux fois afin d'obtenir le déplacement linéaire.

La Figure 22 résume le principe de fonctionnement de cet algorithme.

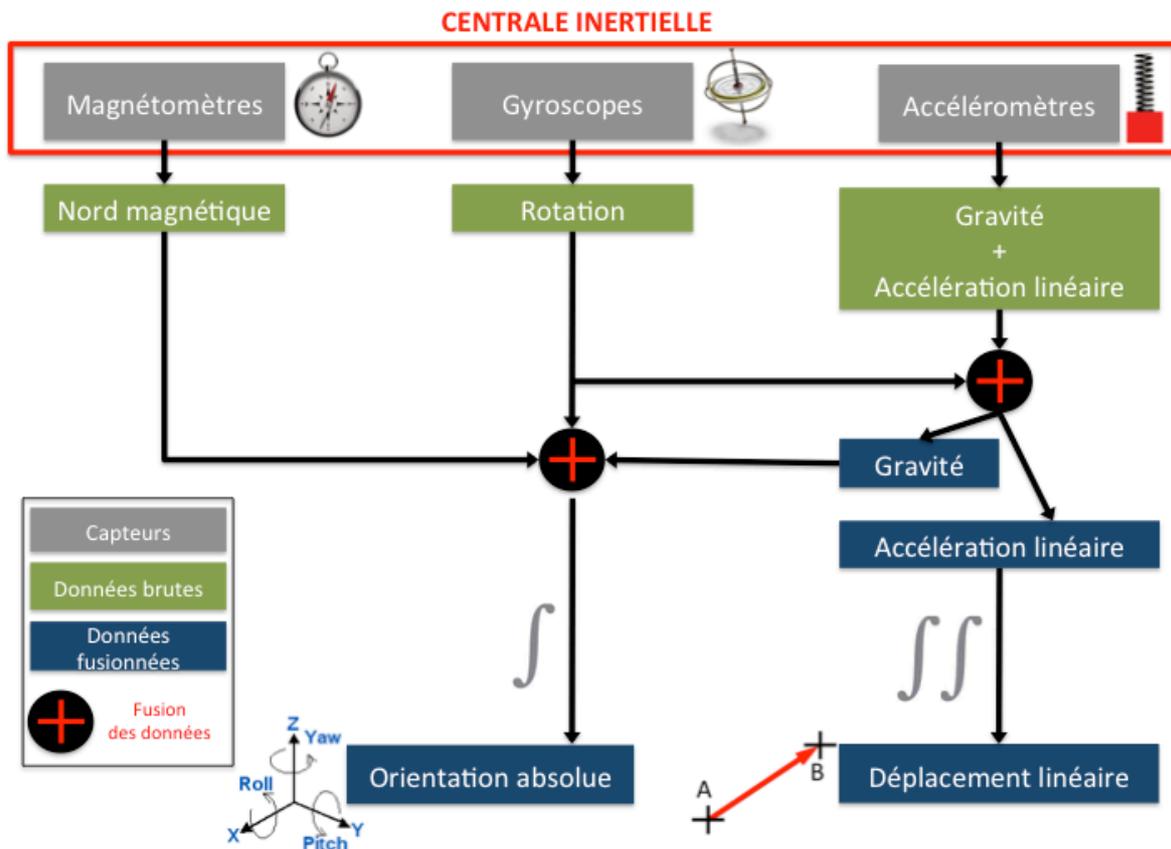


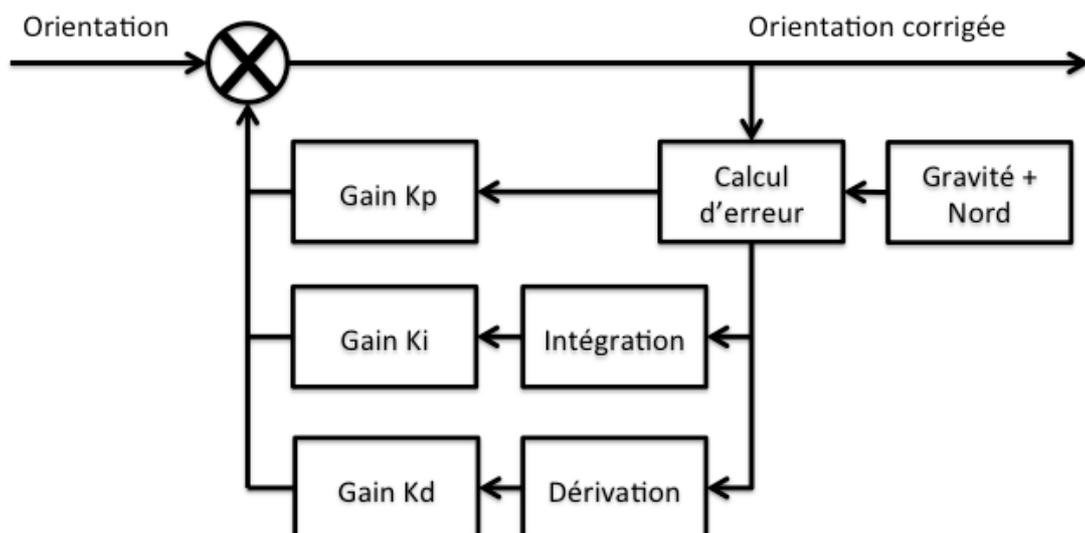
Figure 22 : Schéma de principe d'un algorithme de fusion de données dans une centrale inertielle

## 4.3. Paramétrage de l'algorithme

### 4.3.1. Constantes de correction d'erreur

La principale difficulté de cet algorithme est le paramétrage de la correction d'erreur. Celle-ci est effectuée grâce à un correcteur PID : Proportionnel, Intégral, Dérivé. Un correcteur PID effectue une correction par rétroaction grâce au calcul d'une fonction d'erreur, qui dans notre cas est évaluée par la différence entre l'orientation fournie par le gyromètre et l'orientation fournie par la gravité et le nord. La correction s'effectue en fournissant un terme proportionnel à l'erreur, un terme dérivé et un terme intégré, gérés par trois gains  $K_p$ ,  $K_d$  et  $K_i$  (Figure 23). Ces trois gains permettent de trouver un compromis entre stabilité, rapidité et précision :

- La stabilité est le fait que si le capteur est immobile, on n'obtient pas de variations d'orientation.
- La rapidité est le temps que met l'algorithme à trouver la bonne orientation suite à une variation.
- La précision est l'écart entre l'orientation réelle du capteur et l'orientation que l'algorithme estime bonne (fonction d'erreur nulle).



**Figure 23 : Diagramme en bloc de l'algorithme de fusion des données régulé par un correcteur PID**

Le tableau ci dessous montre l'effet des différentes constantes Kp, Ki et Kd sur ces paramètres :

|   | Précision | Stabilité | Rapidité |
|---|-----------|-----------|----------|
| P |           |           |          |
| I |           |           |          |
| D |           |           |          |

#### 4.3.2. Double intégration de l'accélération linéaire

Dans la pratique, l'obtention du déplacement linéaire par la double intégration de l'accélération linéaire est très problématique. En effet, l'estimation de l'accélération linéaire par injection des données gyroscopiques dans les données de l'accéléromètre introduit nécessairement une erreur. Cette erreur a plusieurs origines :

- L'erreur d'estimation de vitesse angulaire par le gyromètre,
- Le bruit électronique des capteurs,
- La quantification de la conversion analogique numérique,
- La fréquence d'échantillonnage du capteur, fixant la résolution temporelle (On se sait jamais comment a évolué le capteur entre deux échantillons),

Cette erreur d'estimation introduit une constante dans la valeur réelle de l'accélération (5), qui intégrée deux fois génère une dérive quadratique de la position (7).

$$(5) \quad a(t) = a_{réelle}(t) + e$$

$$(6) \quad \int a(t) dt = v(t) + et$$

$$(7) \quad \iint a(t) dt = x(t) + \frac{e}{2}t^2$$

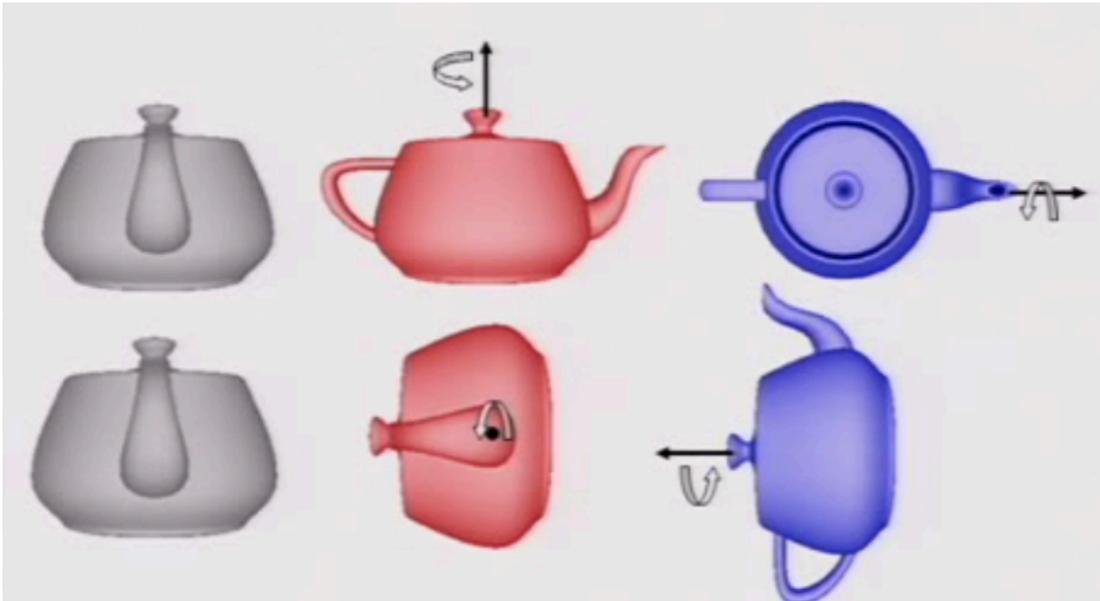
Dans les systèmes de navigation inertielle, un GPS est utilisé pour obtenir un positionnement précis mais basse fréquence, et ainsi corriger les dérives de la double intégration. L'utilisation d'un GPS ne fait cependant pas sens dans une utilisation de suivi gestuel pour percussion puisque l'instrumentiste ne se déplace pas significativement dans l'espace, la résolution au sol communément admise d'un GPS étant de quelques mètres.

Il existe à l'heure d'aujourd'hui plusieurs technologies de géolocalisation en intérieur, se basant sur les différents réseaux sans fils Bluetooth, Wi-Fi, RFID... Ils n'ont cependant qu'une résolution au sol de quelque mètres, donc trop peu pour notre application. Ils sont cependant en plein développement, notamment sur le marché de la domotique, et pourraient être intéressants dans quelques années.

Il existe aussi une méthode de correction numérique de la double intégration, basée sur les filtres de Kalman. Cette méthode est efficace si le mouvement de l'objet est contraint dans l'espace. Par exemple, le mouvement d'une voiture est très contraint : elle ne peut pas par exemple s'élever rapidement en hauteur, ou effectuer des rotations trop importantes. Ces contraintes permettent d'estimer la dérive des capteurs et donc d'obtenir un positionnement plus précis. Ils sont cependant difficiles à mettre en œuvre dans notre application étant donné qu'un mouvement de baguette n'est que très peu contraint.

#### **4.4. Expression d'une rotation**

L'expression d'une orientation ou d'une rotation, c'est à dire un changement d'orientation, dans un espace à trois dimensions est un problème complexe, qui ne connaît pas de solution universelle notamment car l'espace des rotations n'est pas commutatif : la Figure 24 montre le résultat d'une séquence de deux rotations dans un ordre différent.



**Figure 24 : Exemple de non commutativité des rotations**

Il existe classiquement trois méthodes mathématiques pour exprimer une rotation :

- Matrice de rotation : c'est l'expression mathématique la plus classique, elle exprime une rotation par une multiplication matricielle entre un vecteur d'orientation et une matrice de rotation (8). C'est une méthode qui présente l'avantage d'être efficace en terme de calculs. L'algorithme DCM (Direct Cosine Matrix) utilise un calcul matriciel.

$$(8) \quad \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}$$

- Séquence de rotation selon les trois axes de l'objet X, Y Z : une rotation peut s'exprimer sous la forme d'une séquence de rotation autour des trois axes d'un repère fixe par rapport à l'objet qui effectue la rotation. C'est la représentation classique des angles de Tait-Bryan, ou angles d'Euler. La rotation s'exprime alors par une séquence de trois rotations s'effectuant dans un ordre précis : un axe parent X, puis axe intermédiaire Y, enfin un axe terminal Z. L'ordre des rotations peut être quelconque, mais doit toujours être le même. Cette méthode introduit cependant une singularité plus connue sous le nom de blocage de Cardan (Ou Gimbal lock) : lorsque l'on effectue une rotation 90° autour de l'axe

intermédiaire, l'axe parent et l'axe intermédiaire s'alignent, entraînant une indétermination de l'axe qui effectue la rotation, et donc une perte de l'orientation. Dans la Figure 25 l'axe vert est l'axe parent, l'axe bleu est l'axe intermédiaire, et l'axe rouge est l'axe terminal.

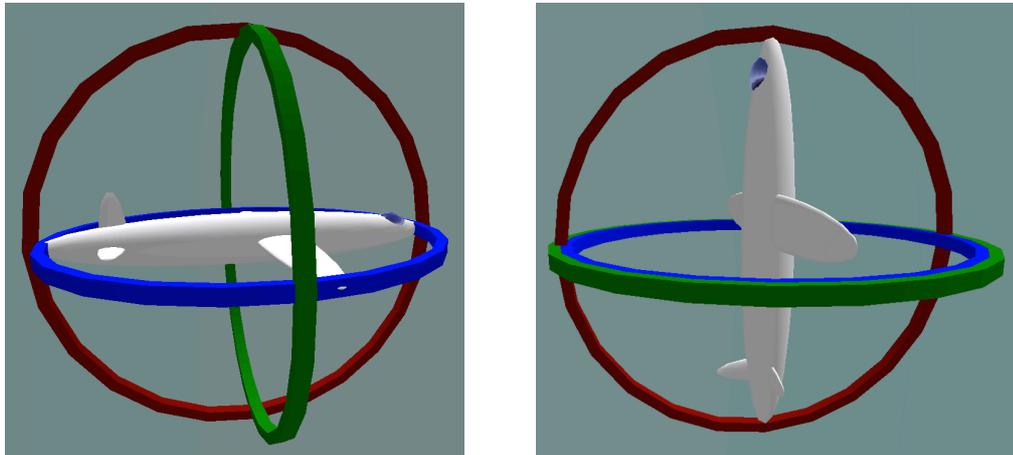


Figure 25 : Illustration du blocage de Cardan

- Quaternions : toute rotation peut s'exprimer sous la forme d'une seule rotation autour d'un axe donné et d'un angle de rotation. Une rotation s'exprime donc par un ensemble de quatre nombres, appelé quaternion. Cette représentation des rotations nécessite donc l'utilisation d'une algèbre dans un espace à quatre dimensions.

Nous verrons plus tard dans la partie pratique, que pour le calcul d'une visualisation graphique, notamment lors de l'utilisation des bibliothèques OpenGL, l'utilisation des quaternions est particulièrement efficace. En revanche pour la détection de la position d'un objet, la représentation en angle d'Euler est plus facilement interprétable. Quelque soit la méthode utilisée, on peut passer de l'une à l'autre par le biais de formules mathématiques [27].

## 5. Partie pratique : réalisation d'un système de suivi gestuel inertiel pour la batterie

### 5.1. Objectifs et dimensionnement

#### 5.1.1. Objectifs

L'objectif est donc de réaliser un système de captation gestuelle du jeu d'un batteur à base de capteurs inertiels. On a vu dans la partie 1 que les informations gestuelles sont multiples : posture du corps, mouvement des bras, des avant bras, du poignet et enfin des doigts. Il semble cependant que la baguette, élément terminal de la chaîne gestuelle, soit l'endroit qui concentre le plus d'informations puisque c'est elle qui effectue la percussion, et que ce sont ses paramètres physiques à elle qui déterminent la mécanique de l'impact. C'est donc la position la plus stratégique pour positionner un capteur. De plus, cette solution a l'avantage de laisser le musicien libre, l'intégration de capteurs sur son propre corps nécessitant un design potentiellement contraignant dans un processus de prototypage. Il faudra cependant porter une grande vigilance sur le fait de ne pas trop modifier l'ergonomie de la baguette, notamment son poids et son équilibre, paramètres qui sont choisis avec précision par les percussionnistes.

Les données de ces capteurs seront traitées en temps réel afin d'augmenter le jeu du musicien selon des exemples cités dans la partie 3.3.

#### 5.1.2. Architecture et schéma de principe

Le système sera composé d'un ou plusieurs capteurs embarqués reliés à une interface permettant l'acquisition des données par un ordinateur. L'ordinateur effectuera le traitement des données ainsi que le mapping. On appelle mapping l'action de relier des valeurs numériques des capteurs à un événement sonore. Enfin une interface audio sera utilisée pour restituer le résultat de l'augmentation sonore. La Figure 26 résume ce principe de fonctionnement.

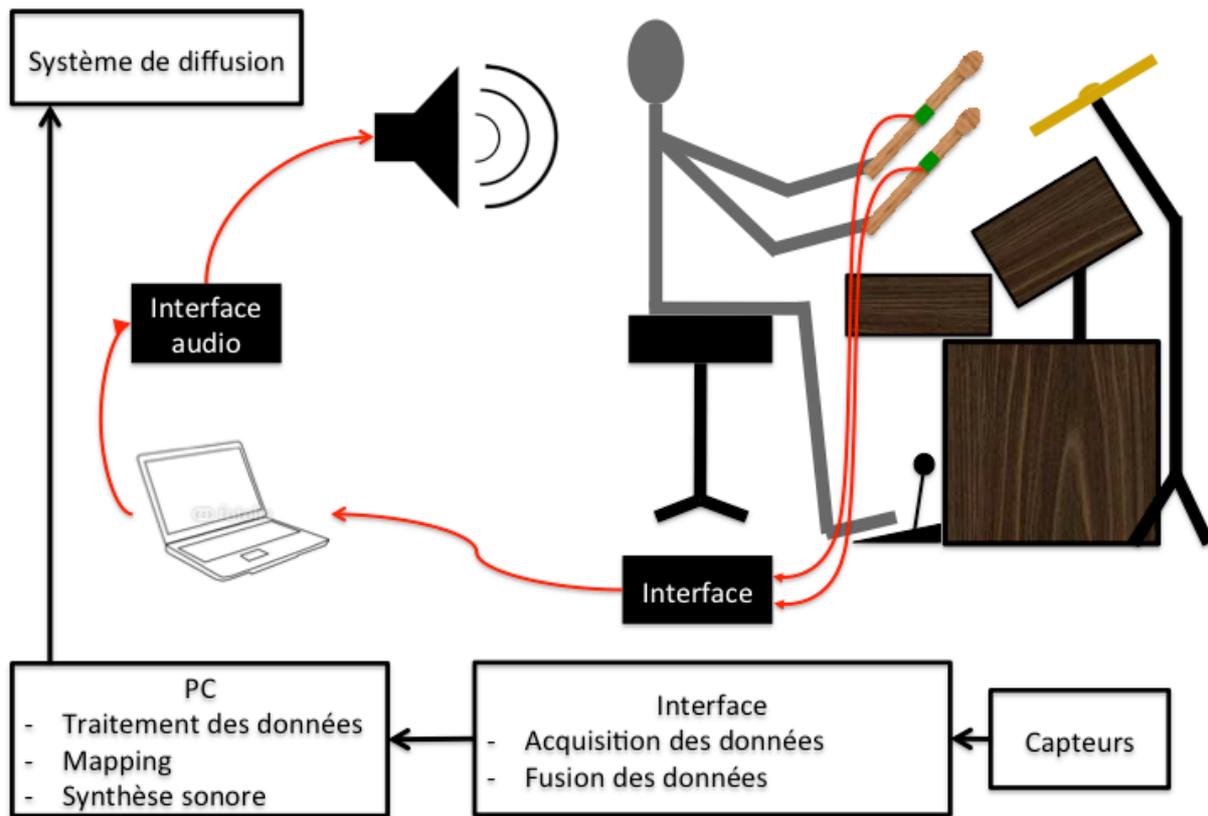


Figure 26 : Schéma de principe du dispositif d'augmentation de batterie

### 5.1.3. Ordres de grandeur

La conception d'un système nécessite une prédétermination des ordres de grandeurs du système afin de ne pas le sous dimensionner, et avoir des mauvaises performances, ou de le sur dimensionner, et avoir des surcoûts matériels :

- La précision temporelle d'une frappe de batteur est de l'ordre de quelques millisecondes, il faudra donc une résolution temporelle inférieure à la milliseconde.
- Un set de batterie peut potentiellement occuper un espace de 180 degrés autour du batteur, il faudra donc pouvoir détecter des événements dans tout cet espace.
- Le mouvement d'une frappe avec baguette dure entre quelques centaines de millisecondes et la seconde, c'est donc cette fenêtre de temps qui sera utilisée pour l'analyse gestuelle.

- Deux éléments d'un même set sont espacés angulairement d'environ 30 degrés, la résolution angulaire de l'orientation de la baguette devra donc être de l'ordre de quelques degrés.

#### 5.1.4. Modèle physique

Le modèle physique utilisé pour l'augmentation sera le suivant :

- La détection d'impact sera déduite des données accélérométriques.
- Les informations de vitesse seront déduites d'un mélange des données gyroscopiques et accélérométriques.
- Les informations de sélection seront déduites de l'orientation de la baguette au moment de l'impact.
- Le calcul de la hauteur d'impact et de rebond sera effectué par double intégration de l'accélération linéaire, elle permettra une classification des gestes comme expliqué dans la partie 2.

## 5.2. Dispositif expérimental

### 5.2.1. Centrale inertielle

Les centrales inertielles sont commercialisées sous deux types : analogiques et numériques. Dans les deux cas le principe de fonctionnement des capteurs reste identique, c'est la chaîne de traitement in situ qui diffère.

Les capteurs analogiques fournissent une tension par capteur. Pour une centrale inertielle comportant neuf capteurs il faudra donc neuf lignes pour les données et deux lignes d'alimentation. La méthode de conversion analogique/numérique est laissée au choix de l'utilisateur. Le mémoire de Charles Verron[1] utilise des capteurs de la sorte, combiné à un convertisseur analogique numérique dérivé de ceux utilisés en audio, la Rimas Box.

Les capteurs numériques intègrent plus de traitements puisqu'ils intègrent d'une part la conversion analogique/numérique, et d'autre part la mise en forme des données

pour un protocole de communication numérique. Certains capteurs intègrent même un processeur de fusion de données. Ces capteurs numériques sont généralement paramétrables, on peut ainsi ajuster des paramètres tels que la fréquence d'échantillonnage, la vitesse de transmission des données, les paramètres de filtres...

Dans le cadre de ce mémoire, je souhaite expérimenter l'implémentation de capteurs numériques. D'une part pour différer du mémoire de Charles Verron qui démontre le principe d'utilisation des capteurs analogiques embarqués sur des baguettes de batterie. D'autre part pour des raisons financières, les capteurs analogiques nécessitent l'acquisition d'une interface de conversion analogique numérique, souvent onéreuse. Les capteurs qui intègrent un algorithme de fusion de données, comme la série InvenSense MPU-9x50, sont ceux qui dans mon optique présentent le plus d'intérêt, ils restent cependant trop chers (environ 450 euros pour 1 capteur). Mon choix s'est donc porté sur une solution médiane, des centrales inertielles fournissant une information numérique, mais sans fusion de données.

### 5.2.2. Spécifications du capteur

Le capteur choisi est le capteur Minimu-9 v3 commercialisé par le site Pololu (Figure 27), spécialisé dans l'électronique pour robotique. Ce circuit imprimé intègre plusieurs composants :

- L3GD20 : gyromètre 3 axes,
- LSM303DLHC : Accéléromètre 3 axes et magnétomètre 3 axes,
- Un microcontrôleur pour bus de transmission I<sup>2</sup>C.

Le choix de ce composant a été déterminé par ses bonnes performances en terme de fréquence d'échantillonnage, qui étaient les meilleures parmi toutes les centrales inertielles numériques investiguées. De plus son prix est relativement abordable : 40\$ l'unité. Quelques caractéristiques :

- Fréquence échantillonnage maximale de l'accéléromètre : 1,6 kHz
- Résolution accéléromètre :  $\pm 2/4/6/8/16$  g paramétrable
- Fréquence échantillonnage maximale du gyromètre : 760 Hz
- Résolution angulaire du gyromètre :  $\pm 245/500/2000$  °/s paramétrable
- Fréquence échantillonnage maximale du magnétomètre : 220 Hz
- Résolution magnétomètre :  $\pm 2/4/8/12$  gauss

- Quantification : 16 bits
- Taille : 21 x 13 x 2,5 mm
- Interface : I<sup>2</sup>C
- Tension d'alimentation : 3V-5V
- Poids : 0,9g (puce seulement, n'incluant pas les connecteurs)

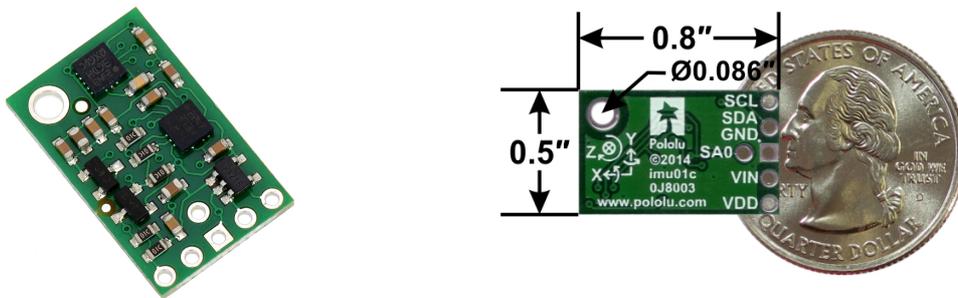


Figure 27 : Centrale inertielle MinIMU v3 commercialisée par le site Pololu

### 5.2.3. Paramétrage du capteur

Le bus I<sup>2</sup>C est un bus bidirectionnel qui permet de recevoir les informations du capteur mais aussi de lui en envoyer. Le capteur est ainsi paramétrable en écrivant dans des registres du circuit imprimé, accessibles par le protocole I<sup>2</sup>C. La table de correspondance entre registres et paramètres est donnée dans la datasheet du capteur. Les paramètres réglables qui nous intéressent sont les suivants :

- Résolution : la résolution permet de choisir la plage mesurée par le capteur, qui est ensuite quantifiée sur 16 bits. Une résolution plus grande implique donc une moins bonne précision de quantification. Le gyromètre sera calibré sur  $\pm 2000^\circ/\text{s}$ , la vitesse angulaire des baguettes pendant une frappe pouvant dépasser les  $1000^\circ/\text{s}$ . L'accéléromètre sera calibré sur  $\pm 16$  g, l'accélération linéaire au moment de la frappe étant très importante. Le magnétomètre sera lui calibré sur  $\pm 2$  gauss, le champ magnétique terrestre étant d'environ 0,5 gauss en France.
- Buffer : les capteurs possèdent une mémoire tampon qui permet de stocker les valeurs du capteur si elles ne sont pas envoyées sur le bus. Ainsi on peut effectuer une lecture simultanée de plusieurs valeurs. Ce mode n'est pas intéressant pour notre utilisation temps réel étant donné que l'on veut avoir les données les plus

récentes du capteur et ne lire qu'une valeur à la fois, le buffer doit donc être désactivé.

- Fréquence d'échantillonnage: cette valeur doit être la plus grande possible pour avoir une résolution temporelle la plus grande possible. L'accéléromètre sera donc réglé sur 1,6 kHz, le magnétomètre sur 220 Hz, le gyromètre sur 760 Hz.
- Filtres: les capteurs possèdent des filtres intégrés. Un filtre anti repliement analogique est présent avant le convertisseur analogique/numérique, qui n'est pas paramétrable. Il existe cependant deux filtres numériques, un filtre passe bas et un filtre passe haut, dont les fréquences de coupure sont ajustables. Ces filtres seront désactivés pour notre application.

#### 5.2.4. Intégration sur baguette

Le capteur est fixé sur la baguette dans l'axe de la baguette, et à mi-distance entre la main du batteur et l'extrémité de la baguette (Figure 28). Ainsi il ne gêne pas la prise en main de la baguette par l'instrumentiste, et ne gêne pas non plus la frappe.

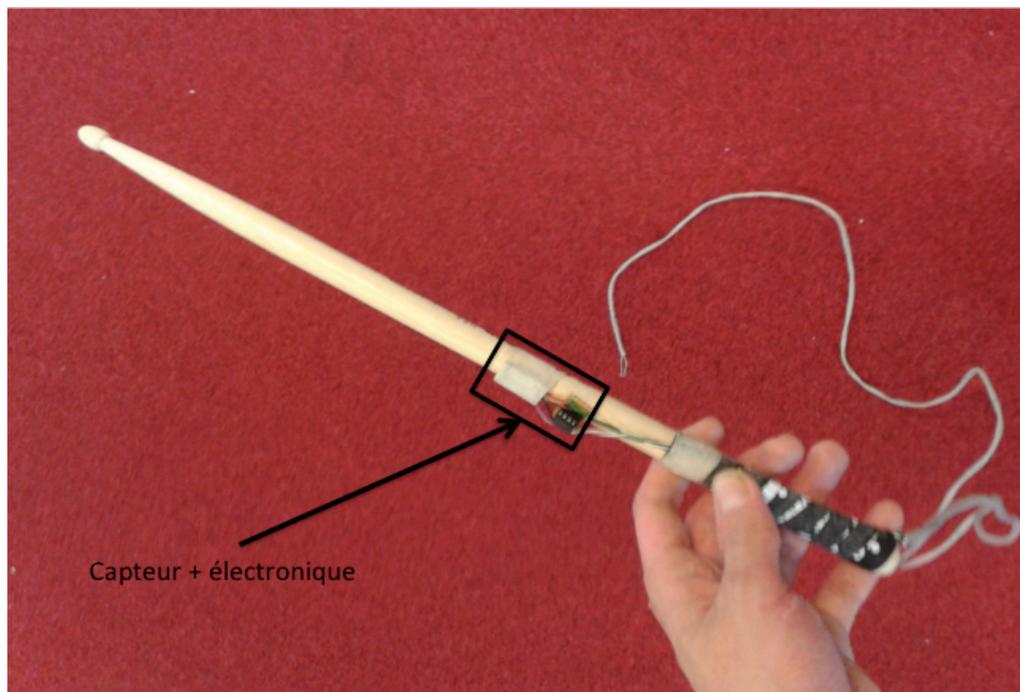


Figure 28 : Positionnement du capteur sur la baguette

### 5.2.5. Interface capteur machine

Le capteur possède une interface I<sup>2</sup>C (Inter Integrated Circuits). Ce bus est une liaison sérielle développée pour la communication entre circuits imprimés. La fréquence du bus n'est pas fixée, mais est spécifiée pour deux modes : Normal mode 100 kHz et Fast Mode 400 kHz. Pour notre application, le débit nécessaire sera de  $3_{\text{capteurs}} * 16_{\text{bits}} * (1600 + 760 + 220)_{\text{fréquence éch}} = 123\ 840\ \text{Hz}$ . Il sera donc nécessaire d'utiliser le circuit en Fast Mode. Il existe de multiples façon d'interfacer un bus I<sup>2</sup>C avec un ordinateur :

- I<sup>2</sup>C to USB : ces interfaces utilisent le protocole HID (Human Interface Device), utilisé par exemple pour les claviers et souris. Le protocole ne possède cependant pas un débit suffisant côté machine pour l'application envisagée.
- I<sup>2</sup>C to Ethernet : ces interfaces convertissent les données I<sup>2</sup>C en paquets TCP ou UDP envoyés via réseau. Elles présentent l'avantage d'avoir un fort débit et une faible latence.
- I<sup>2</sup>C to Bluetooth : ces modules envoient les données sans fil via protocole Bluetooth. Ces interfaces ont l'inconvénient d'introduire une latence significative et d'avoir un débit variable en fonction des perturbations électromagnétiques extérieures.
- Arduino : ces modules sont des circuits imprimés programmables en licence libre. Ils permettent l'intégration d'un programme simple dans une puce électronique, comme un programme de lecture de données d'un capteur. Le tout est programmable via une interface de développement basée sur le langage C++. La liaison avec le PC est effectuée via une liaison sérielle USB. Ils peuvent aussi intégrer un module Ethernet permettant l'envoi des données via réseau.
- Raspberry Pi : ces modules sont en réalité des ordinateurs. Ils permettent l'installation d'un système d'exploitation linux, et donc la réalisation de programmes complexes dans le langage désiré. Ils permettent notamment l'utilisation du logiciel Pure Data. Ils possèdent un port Ethernet ce qui permet de transmettre les données via réseau.

L'Arduino et le Raspberry Pi présentent deux avantages notables que sont un traitement des données au plus près de la source. Ils permettent ainsi de communiquer des données déjà traitées à l'utilisateur, et ainsi de décharger les ressources de la

machine principale effectuant l'analyse des données pour l'augmentation. De plus, le code de l'algorithme DCM est disponible en licence libre pour ces machines. L'utilisation d'un Raspberry Pi est cependant plus compliquée étant donné qu'il faut paramétrer le système d'exploitation Linux pour notre utilisation (Annexe 1).

Ces différentes interfaces possèdent des qualités différentes. L'Arduino utilise un circuit imprimé programmable : chaque calcul nécessite moins de cycles d'horloge que dans un microprocesseur comme celui du Raspberry Pi. Le Raspberry Pi permet quant à lui l'exécution de plusieurs programmes simultanément. Les performances de différentes interfaces ont été testées (Figure 29). Les interfaces choisies sont :

- Arduino UNO : plaquette de base Arduino, son processeur est cadencé à 16 MHz, et permet l'utilisation du bus I<sup>2</sup>C en Fast Mode à 400 kHz.
- Intel Galileo : plaquette haut de gamme Arduino, son processeur est cadencé à 400 MHz, mais ne permet l'utilisation du bus I<sup>2</sup>C qu'en Normal Mode à 100 kHz (Non spécifié dans la documentation).
- Raspberry Pi (révision 2) : le processeur est cadencé à 700 MHz, et permet l'utilisation du bus I<sup>2</sup>C en Fast Mode à 400 kHz.

La chaîne complète de transmission des données a été testée sur plusieurs interfaces. Le test consiste en la lecture d'un échantillon du capteur, le calcul de l'algorithme de fusion des données et la transmission des données via réseau. Ce test détermine la fréquence d'échantillonnage maximale atteignable dans le système final. Le tableau ci-dessous résume les résultats de ce test (Les raisons de ces performances sont explicitées dans la partie 5.4.1) :

|               | Temps d'acquisition (ms) | Temps de calcul + transmission (ms) | Temps total (ms) | Fréquence maximale atteignable (Hz) |
|---------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| Arduino UNO   | 1,0                      | 2,2                                 | 3,2              | 312                                 |
| Intel Galileo | 4,1                      | 0,6                                 | 4,7              | 212                                 |
| Raspberry Pi  | 0,9                      | 0,5                                 | 1,4              | 714                                 |

C'est donc le Raspberry Pi qui a été choisi pour l'utilisation finale car c'est le périphérique qui permet le meilleur taux d'échantillonnage du capteur.

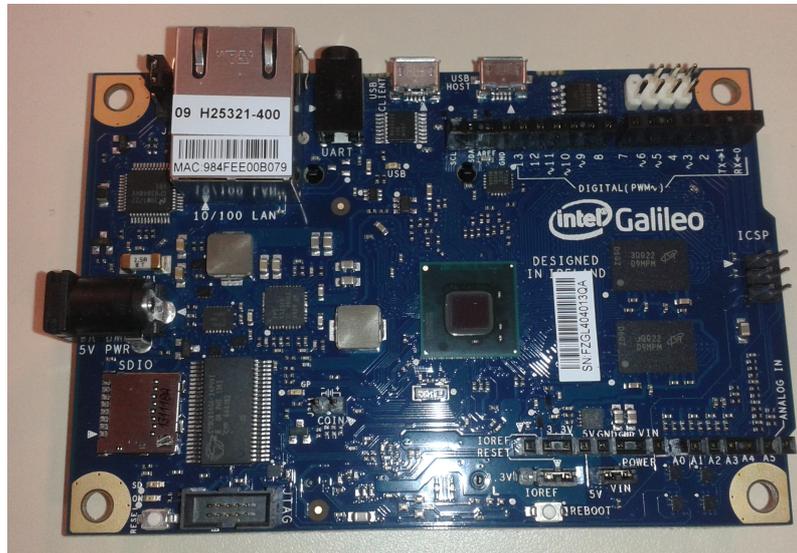
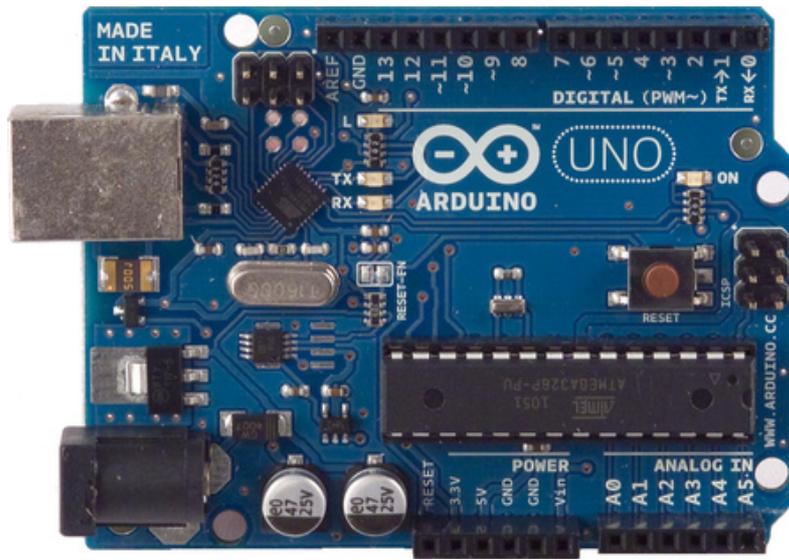


Figure 29 : (haut) Arduino Uno, (milieu) Intel Galileo, (bas) Raspberry Pi

### 5.2.6. Extendeur de bus I<sup>2</sup>C

Le bus I<sup>2</sup>C est une liaison véhiculant des signaux numériques à une vitesse qui ne dépend que de la fréquence de l'horloge maître, ici le Raspberry Pi. La fréquence maximale spécifiée est de 400 kHz, il est cependant possible d'utiliser la liaison à des fréquences supérieures, le fonctionnement de l'électronique n'étant pas garanti.

Comme toutes les liaisons numériques, la qualité de la liaison entre le capteur et l'interface est primordiale car plus la fréquence du bus est élevée, plus les fronts d'horloge se dégradent le long de la ligne. Le bus I<sup>2</sup>C est à la base conçu pour la communication entre circuits imprimés, donc sur des faibles longueurs de liaison. Ceci est problématique pour notre application, le capteur étant embarqué à quelques mètres de l'interface. Dans la pratique, un câble d'un mètre suffit déjà à détériorer complètement les informations, et faire décrocher la liaison. Afin de palier au problème, il est possible de :

- Utiliser un câble à faible résistivité, avec blindage pour éviter toute perturbation électromagnétique extérieure supplémentaire.
- Utiliser un extendeur de bus I<sup>2</sup>C : un extendeur permet d'augmenter la capacité totale du système de 400 pF, valeur spécifiée par la norme I<sup>2</sup>C, à 3000 pF. Il permet ainsi l'utilisation de câbles plus capacitifs, ou plus longs.

L'extendeur P82B715 de NPX Semiconductors s'interpose sur la ligne entre les deux points qui ont besoin d'être séparés par une grande distance (Figure 30). Il utilise la même alimentation que le bus le capteur (5V), opère avec un gain de 1. Il ne modifie donc pas la forme du signal, mais amplifie simplement le courant sur la ligne (30mA à la place de 3mA). Cela permet de moins dégrader les fronts d'horloge sur la ligne (Figure 31).

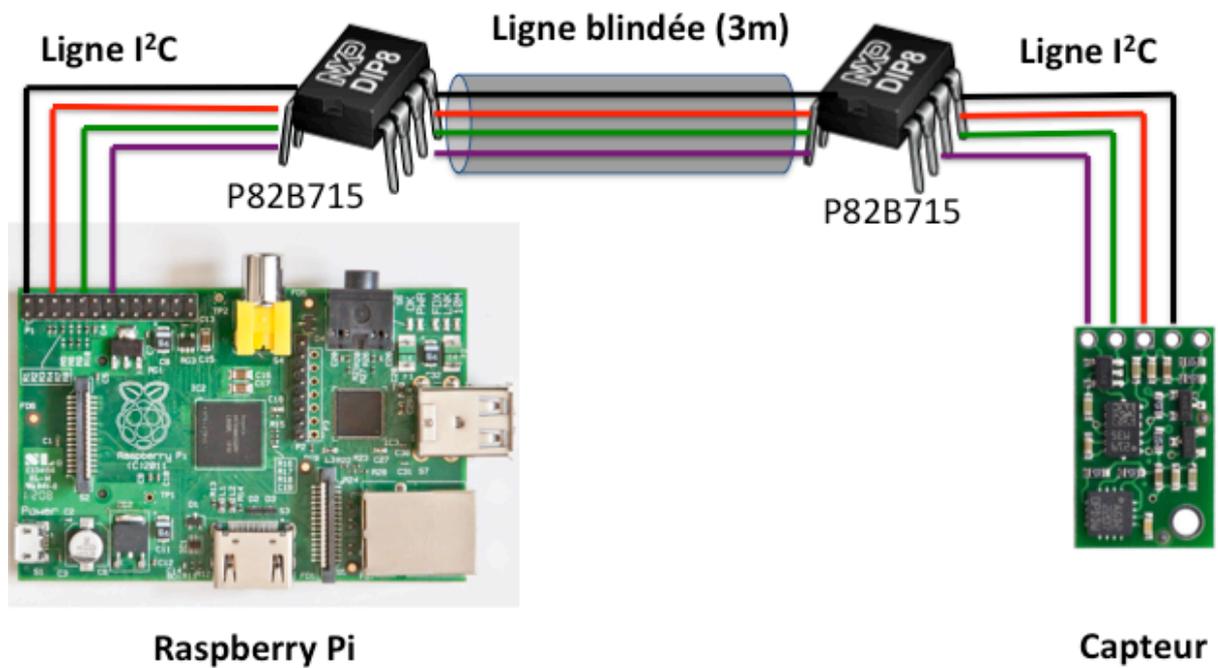


Figure 30 : Schéma de principe d'utilisation d'un extendeur de bus I<sup>2</sup>C

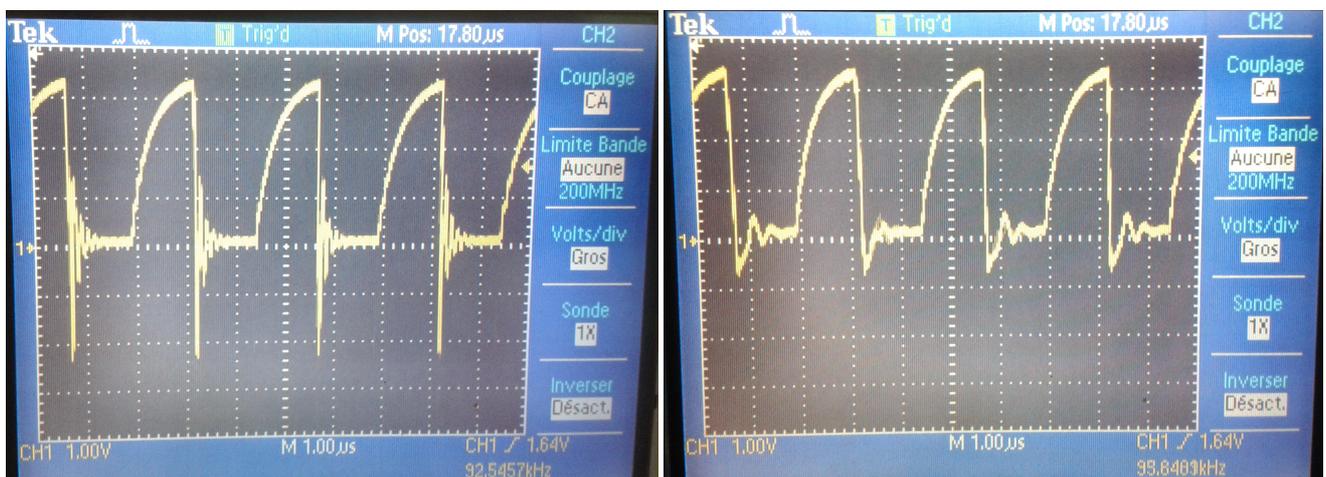


Figure 31 : (gauche) Fronts d'horloge sans extendeur, (droite) Front d'horloge avec extendeur

### 5.3. Analyse temps réelle dans Pure Data

Les données sont récupérées dans le logiciel Pure Data [20]. Pure Data est un logiciel Open Source de programmation graphique pour un traitement temps réel de flux de données. Il est particulièrement adapté pour la visualisation et le traitement de données provenant de capteurs. Il offre un interfaçage rapide avec des liaisons série USB, HID, ou encore Ethernet et permet la gestion de messages OSC (Open Sound Control) ou MIDI pour la communication les logiciels de traitement sonore. De plus, il possède un réservoir important de ressources en ligne.

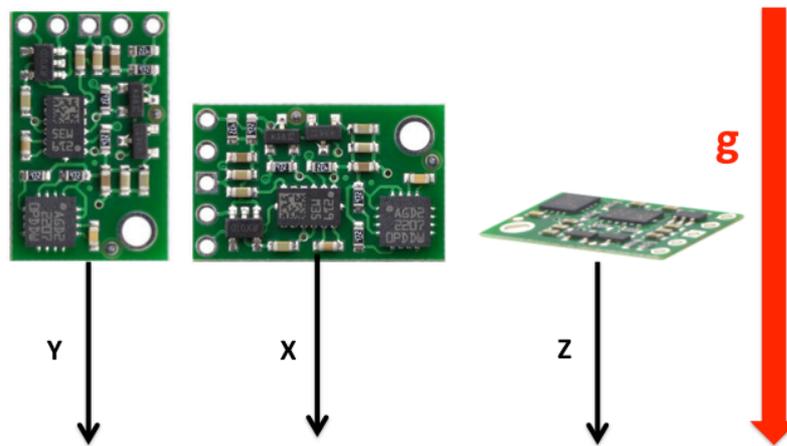
#### 5.3.1. Calibration des capteurs

Comme étudié dans la partie 5.2, l'algorithme DCM est très sensible aux dérives des capteurs. Il est donc nécessaire de les calibrer afin que leurs mesures correspondent le plus précisément aux paramètres physiques mesurés. Les trois capteurs ont leur propre procédure de calibration.

Le gyromètre présente une valeur non nulle quand le capteur est immobile, valeur due au bruit électronique du capteur. Ce bruit doit cependant être centré sur 0 quand le capteur est immobile. Il convient donc de mesurer l'offset au repos du capteur et de corriger les mesures par la valeur mesurée. Cette valeur est mesurée en moyennant pendant une seconde les données du gyromètre lorsque le capteur est immobile. Ce calcul sera effectué à chaque initialisation du capteur.

L'accéléromètre doit-être calibré par rapport à la gravité. On a vu dans la partie 5.1 que le capteur affiche une valeur non nulle lorsqu'il est au repos, qui correspond à la projection du vecteur gravité sur l'axe de l'accéléromètre. Or les trois axes n'ont pas exactement la même sensibilité, il convient donc de mesurer pour chaque axe la valeur maximale affichée (Figure 32), lorsque le capteur est immobile et aligné selon cet axe. Dans la pratique cette mesure est délicate, car il faut aligner le capteur dans l'axe de la gravité et repérer le maximum délivré par le capteur, mais sans effectuer de mouvement qui pourrait induire une accélération dans l'axe que l'on mesure. Cette calibration est en théorie robuste, le champ gravitationnel terrestre ne variant que très peu en fonction de

la localisation géographique (sauf si l'on change radicalement de latitude sur le globe terrestre).



**Figure 32 : Calibration de l'accéléromètre selon les trois axes**

Le magnétomètre doit être calibré par rapport au champ magnétique terrestre. De la même façon que pour l'accéléromètre, il faut mesurer ce champ magnétique pour les trois axes du capteur, qui n'ont pas la même sensibilité. Dans la pratique cette mesure est plus facile que celle de l'accéléromètre car il suffit de tourner le capteur dans tous les sens et repérer le maximum sur chaque axe. Cette valeur est cependant moins robuste que celle de l'accéléromètre et peut varier de façon significative en fonction du lieu où on se situe : la différence de direction du champ magnétique pouvant être sentie par les capteurs en fonction de l'étage du bâtiment dans lequel on se trouve, en fonction de l'utilisation en extérieur ou en intérieur... Cette calibration devra donc être effectuée à chaque nouveau lieu d'utilisation.

Toutes ces calibrations fluctuent en fonction de la température et doivent donc être effectuées après quelques minutes de mise en tension.

### **5.3.2. Optimisation de l'algorithme DCM**

Les performances de l'algorithme DCM peuvent être optimisées avec le choix des trois constantes  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  décrites dans la partie 5.3.1. Dans le cadre de notre utilisation, l'ordre de priorité doit être : rapidité, précision, stabilité. Les mouvements du batteur sont des mouvements rapides, percutant des surfaces donc faisant face à des

changements très brusque de vitesse. La précision est importante car elle permet de gérer la détection de l'élément percuté. La stabilité n'est pas le facteur prioritaire car le capteur n'est que rarement au repos.

C'est donc le terme de correction proportionnel qui doit être prépondérant, le terme dérivé est utilisé pour augmenter la rapidité, le terme intégral est utilisé pour augmenter la précision.

### 5.3.3. Traitement des données

Afin de disposer de toute la puissance de traitement de Pure Data, notamment en terme de filtrage, les signaux en provenance des capteurs, sont transformés en signaux audio échantillonnés à 44,1 kHz grâce à l'élément [sig~]. Cela permet notamment l'utilisation des objets [biquad~], filtres récurrents du second ordre peu consommateurs en ressources. La Figure 33 montre l'implémentation d'un filtre biquad. Ces filtres sont caractérisés par cinq coefficients,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ , qui gèrent les gains des différentes lignes à retard du filtre. L'équation du filtre est la suivante :

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n - 1] + b_2x[n - 2] - a_1x[n] - a_2x[n - 1]$$

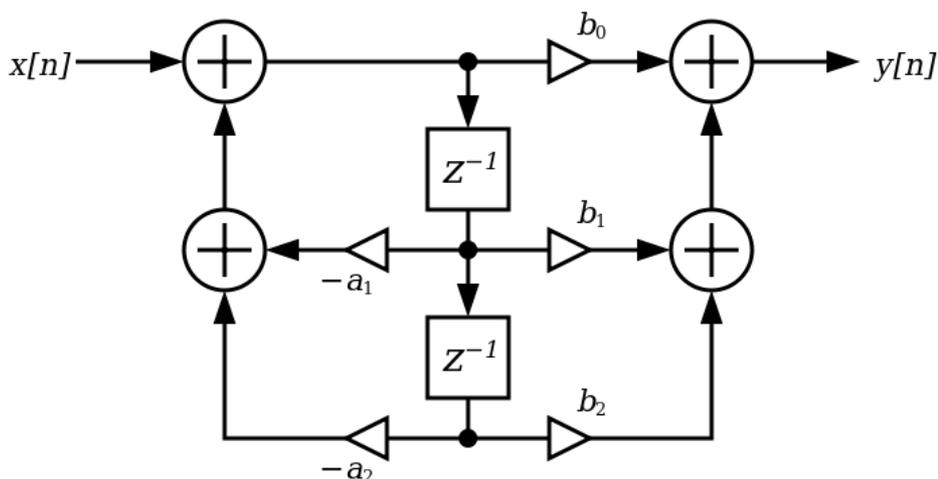


Figure 33 : Implémentation d'un filtre biquad

Un filtre biquad entraîne donc un retard de deux échantillons sur le signal d'entrée. Les coefficients  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  sont déterminés via un calculateur en fonction du filtre désiré : type du filtre, fréquence de coupure, facteur de qualité. Ce calcul ne sera pas détaillé ici.

Les données des capteurs transformés en signaux audio doivent être filtrés à l'aide d'un filtre passe bas anti repliement. La fréquence de ce filtre est réglée à la fréquence de Nyquist pour chaque capteur.

La détection d'attaque provient des données de l'accéléromètre selon la direction verticale, c'est à dire l'axe z. Une attaque correspond à un changement brutal de vitesse de la baguette, et donc à un pic d'accélération. Ces événements comportent des hautes fréquences non présentes en dehors des impacts. La détection d'impact se fera donc par une détection de seuil basée uniquement sur les hautes fréquences de ce signal. Un filtre passe haut de fréquence de coupure 100 Hz est donc appliqué sur les données de l'accéléromètre.

La détection de vitesse s'effectue par deux moyens différents. D'une part l'évaluation de la vitesse angulaire de la baguette juste avant la détection de la frappe : au moment de la frappe la vitesse angulaire redevient nulle, il faut donc délayer ce signal de quelques millisecondes pour avoir une information sur l'intensité du coup. D'autre part en détectant l'intensité du pic généré sur l'accéléromètre par l'impact. Ces deux informations seront dosables dans la détermination de la vitesse, afin de donner plus de poids à l'une ou l'autre détection.

La classification des coups s'effectue par intégration de la vitesse linéaire. Nous avons vu dans la partie 5.3.2 que la double intégration souffrait d'une dérive importante en fonction du temps. Il est donc nécessaire d'effectuer cette intégration sur une fenêtre glissante sur le temps que prend une frappe de batterie, comprenant l'avant geste et l'après geste. Un intégrateur de 400 ms calculera en permanence, et sera lu au moment de la détection de frappe. Cette valeur permettra de connaître si la position initiale de la baguette était haute ou basse, et donc une analyse du pré-geste. La détection d'attaque déclenche un deuxième intégrateur de 400 ms qui analyse le post-geste.

Enfin, l'orientation de la baguette sera lue au moment de la frappe. L'espace sera découpé selon deux directions. L'angle de rotation autour de l'axe Y découpé deux zones, une zone basse pour les angles négatifs et une zone haute pour les angles positifs

(Figure 34). L'angle de rotation autour de l'axe Z sera découpé en autant de zones que nécessaire, et dans la mesure du détectable (Figure 35).

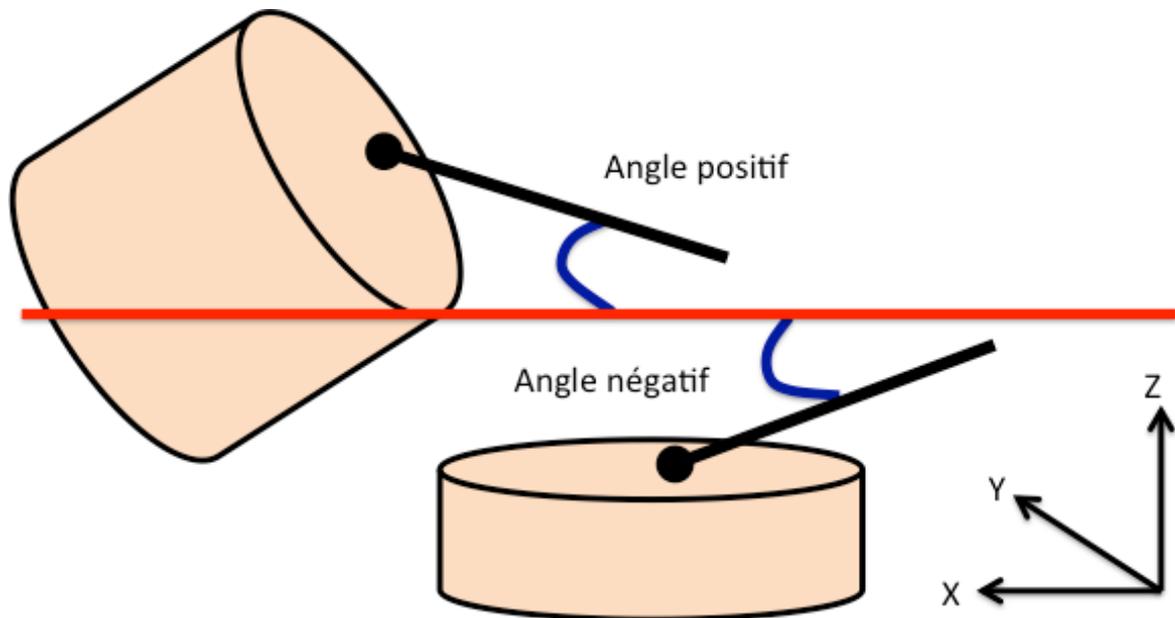


Figure 34 : Division de l'espace vertical en deux zones

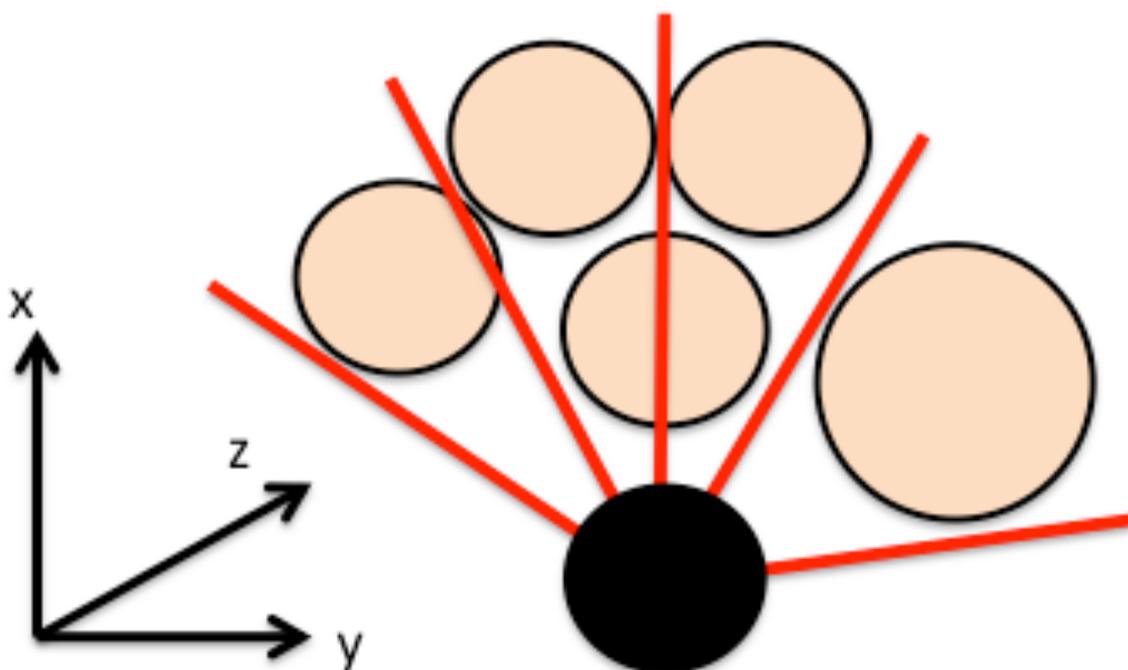


Figure 35 : Division de l'espace horizontal en quatre zones

Le Figure 36 ci-dessous résume l'ensemble des traitements de la chaîne de détection. Les boutons noirs représentent les contrôles réglables par l'utilisateur.

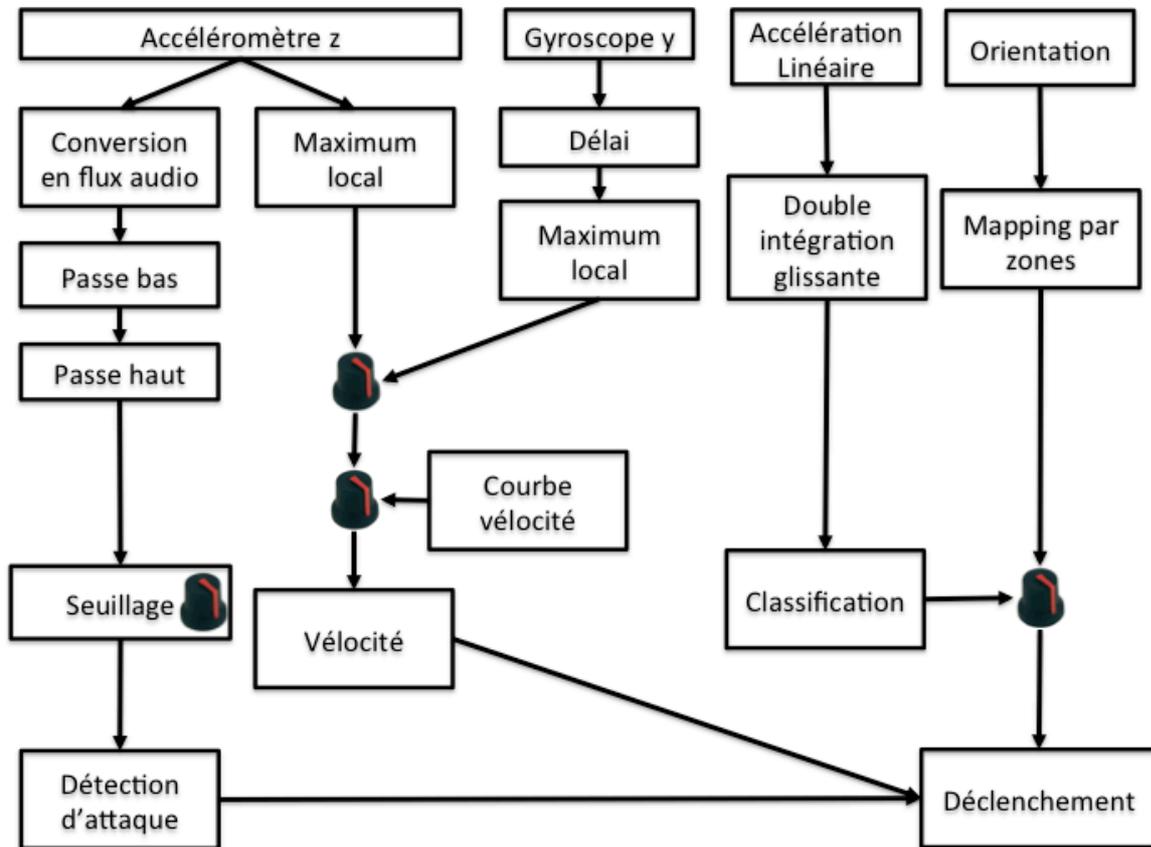
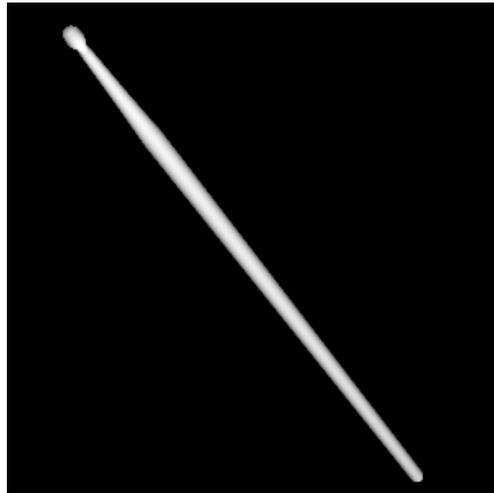


Figure 36 : Schéma de traitement des données du mapping

#### 5.3.4. Visualisation avec la librairie GEM

La bibliothèque graphique GEM, comprise dans Pure Data permet la visualisation en trois dimensions de l'objet que l'on manipule (Figure 37). La visualisation en 3D permet de mieux comprendre les variations des différentes variables et permet de mieux paramétrer l'algorithme notamment son temps de réponse.



**Figure 37 : Baguette 3D  
visualisée à l'aide de la  
bibliothèque GEM de  
PureData**

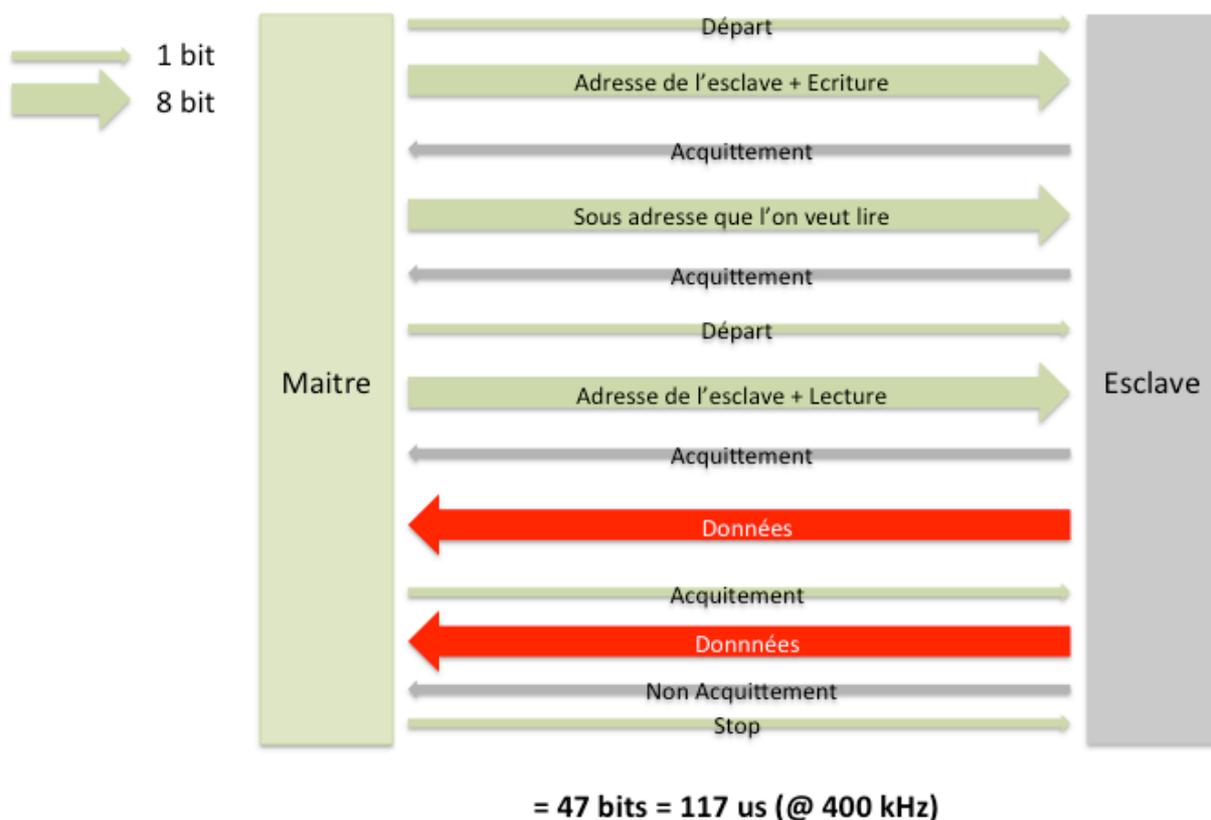
## 5.4. Caractérisation du système : performances et défauts

### 5.4.1. Résolution temporelle

La résolution temporelle du système est déterminée par plusieurs facteurs :

- Vitesse de lecture du capteur : même si la fréquence d'échantillonnage du capteur est réglable, la fréquence d'échantillonnage réelle est déterminée par la vitesse de lecture du capteur par l'interface I<sup>2</sup>C. Le bus I<sup>2</sup>C est un bus bidirectionnel half-duplex, c'est à dire que les informations peuvent transiter alternativement dans les deux sens, mais pas dans les deux sens simultanément. La communication est donc hiérarchisée entre un périphérique maître et un périphérique esclave. La communication s'établit selon un jeu de question réponse suivant une logique précise décrite dans la Figure 38. Ainsi, la transmission de 16 bits de données par le capteur nécessite en réalité 47 bits. Le bus I<sup>2</sup>C a une vitesse de 400 kHz, c'est à dire un front montant d'horloge toutes les 2,5 microsecondes. Il faut donc au moins 117 microsecondes pour acquérir un échantillon d'un capteur selon un axe, donc 351 microsecondes pour un échantillon complet. Les capteurs étant au nombre de trois, la fréquence d'échantillonnage théorique maximale via bus I<sup>2</sup>C à 400 kHz est donc d'environ 1 kHz.

- Vitesse de traitement de l'algorithme DCM : cet algorithme fait appel à des fonctions mathématiques complexes, nécessitant un nombre important de cycles d'horloge. C'est cette vitesse de calcul qui est limitant sur un Arduino Uno. Sur un Raspberry Pi, le temps de calcul est d'environ 100 microsecondes.
- Latence de transmission via réseau: la transmission via réseau implique l'utilisation de mémoires tampon, qui permettent de stocker les informations à envoyer avant de les envoyer, idem pour la réception. Cette latence peut-être évaluée via une commande de ping, communément utilisée dans les services réseaux. Cette latence a été évaluée à 765 microsecondes pour un aller retour, donc 380 microsecondes pour un aller simple.



**Figure 38 : Séquence d'échange entre un maître et un esclave sur bus I<sup>2</sup>C pour 16 bits de données**

La latence totale entre le moment où un échantillon est lu et le moment où il est exploitable pour une prise de décision est donc d'environ 1,5 ms.

### 5.4.2. Ergonomie

L'ergonomie du prototype est en grande partie restreinte par la présence d'un câble relativement épais au bout de la baguette. Si ce câble n'est pas spécialement gênant pour les mouvements dans l'espace, il est en revanche gênant pour l'équilibre de la baguette. En effet, les batteurs choisissent leurs baguettes pour avoir un poids et un équilibre précis lors de la prise en main. Cet équilibre est très légèrement modifié par le poids du capteur et de l'électronique, mais est surtout beaucoup modifié par la tension du câble sur la baguette. Le système est néanmoins utilisable au prix d'une moins bonne précision du musicien, et d'une réadaptation de son jeu.

### 5.4.3. Blocage de l'objet [udpreceive]

L'objet [udpreceive] est utilisé dans Pure Data pour la réception des données envoyées sur le réseau par le Raspberry Pi. Pour une raison à ce jour indéterminée, lorsque la fréquence de réception des données excède environ 500 messages par secondes, l'interface graphique de Pure Data se bloque. Ce bogue semble ne pas être répertorié dans les forums sur internet, et est à ce jour encore irrésolu. Bien que les données soient envoyées à environ 750 Hz, il n'est possible d'obtenir qu'une lecture à 500 Hz dans Pure Data.

## 5.5. Développements futurs

La latence du système reste critique notamment la lecture des données du capteur. Le bus I<sup>2</sup>C possède aussi des vitesses supérieures allant jusqu'à 5 MHz, cependant aucun capteur n'est disponible à cette fréquence. Le bus SPI (Serial Peripheral Interface) est un autre bus utilisé pour la transmission de données entre circuits imprimés. Ce bus est aussi un bus série mais full duplex, c'est à dire qu'il permet une communication dans les deux sens simultanément. Il possède de plus un débit plus important que l'I<sup>2</sup>C. Les composants électroniques utilisés dans ce mémoire (L3GD20 et LSM303D) comportent une sortie SPI, mais aucune puce électronique intégrant ces composants n'est vendue avec les connections pour le bus SPI.

Le mapping statique du système est une des composantes très contraignante. Cela nécessite un réglage précis à chaque nouvelle utilisation dans un nouveau lieu. L'implémentation d'un mapping par réseau de neurones présente l'avantage d'être adaptable et permet l'apprentissage de gestes par la machine (ANN : Artificial Neural Network) [26]. Enfin, l'hybridation avec un autre système tel qu'un système optique pourrait permettre une meilleure interprétation des gestes de sélection.

Un point qui n'est pas abordé dans ce mémoire est la possibilité de créer des partitions gestuelles en enregistrant les paramètres des capteurs dans un séquenceur audio, ce qui permet le travail en post-production des ces informations.

## 6. Conclusion

L'augmentation d'instrument par suivi gestuel est une pratique de plus en plus en vogue dans l'ingénierie instrumentale. Elle permet la fusion entre pratique instrumentale et traitement informatique, ce qui laisse au musicien un plus large contrôle sur la matière sonore qu'il souhaite développer.

Le dispositif mis en œuvre dans la partie pratique reste relativement simple et peu coûteux en terme de matériel. L'acquisition d'un nombre important de données nécessite cependant un traitement informatique conséquent et une compréhension poussée des systèmes utilisés. De plus, la volonté et la recherche d'informations détaillées sur le geste d'un instrumentiste se confronte aux singularités de celui-ci : même si leur formation est la même, deux musiciens développent des gestes suffisamment différents pour que le système ne soit pas assez robuste pour être universel. Le paramétrage du système reste donc une étape critique en terme de temps, le musicien étant obligé de le paramétrer lui même. Le paradigme de l'instrument « plug and play » semble difficilement atteignable, c'est certainement pourquoi ce genre de dispositif est mis en œuvre pour des performances ponctuelles, et qu'il n'existe pas de modèle commercial disponible.

Les gestes du percussionniste, captés en continu, permettent une extension temporelle du principe même de la percussion. Ce système permet au musicien une expression plus large de sa pratique musicale, et surtout l'invention d'un nouveau langage corporel.

## 7. Bibliographie

- [1] Charles Verron, « Captation gestuelle pour une percussion augmentée », *mémoire DEA ATIAM*, 2004.
- [3] Vincent Goudard, « Percussion aérienne : amélioration de la détection des coups dans le jeu d'un percussionniste », *mémoire DEA ATIAM*, 2004.
- [4] Jimmy Beaufiles, « Esthétique et approche de l'instrument augmenté dans la percussion », *mémoire ENSLL*, 2012.
- [5] Sofia Dahl, « Playing the Accent - Comparing Striking Velocity and Timing in an Ostinato Rhythm Performed by Four Drummers », *Acta Acustica united with Acustica* 2004.
- [6] Claude Cadoz, « Instrumental gesture and music composition », *Proceedings of the ICMC*, 1988.
- [7] Ben Nevile, Peter Driessen, W. A. Schloss, « Radio drum gesture detection system using only sticks, antenna and computer with audio interface ».
- [8] Juan Pablo Bello, Laurent Daudet, Samer Abdallah, Chris Duxbury, Mike Davies, and Mark B. Sandler, « A Tutorial on Onset Detection in Music Signals », *IEEE transactions on speech and audio processing*.
- [9] Christophe Havel, Myriam Desainte-Catherine, « Modeling an Air Percussion for Composition and Performance », *Proceedings of the 2004 Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME04)*, Hamamatsu, Japan.
- [10] Thierry Coduys, Cyrille Henry, « Nouveaux matériels de captation haute précision ».

[11] Herman J. Woltring and E. B. Marsolais, « Optoelectric (Selspot) Gait Measurement in Two-and Three-Dimensional Space - A Preliminary Report ».

[12] Roland Auzet, « Gesture-following Devices for Percussionists ».

[13] Sofia Dahl, « Looking at movement gesture Examples from drumming and percussion », *the Ohio State University*.

[14] Bouënard, M. M. Wanderley and S. Gibet, « Gesture Control of Sound Synthesis: Analysis and Classification of Percussion Gestures », *Acta Acustica united with Acustica* 2010.

[15] Dahl, S. and Friberg, A. (2007). « Visual perception of expressiveness in musicians' body movements », *Music Perception*, 24(5):433–454.

[16] Roberto Barbanti, Enrique Lynch, Carmen Pardo, Makis Solomos, « Musiques Arts Technologies ».

[17] Daniel Goehl and David Sachs, « Motion Sensors Gaining Inertia with Popular Consumer Electronics », *InvenSense, Inc.*

[18] T.Cont, A.Coduys and C.Henry, « Real-time gesture mapping in pd environment using neural networks », *New Interfaces for Musical Expression*, 2004.

[19] François Dupin, « Lexique de la percussion », *La revue musicale, numéro spécial 284*.

[20] M. Puckette, « Pure data : another integrated computer music environment ». *International Computer Music Conference*, 1996.

[21] Sofia Dahl, « On the beat : human movement and timing in the production and perception of music », *Doctoral Thesis Stockholm, Sweden*, 2005.

[22] Jaime Oliver and Mathew Jenkins, « The silent drum controller : a new percussive

gestural interface », *University of California, San Diego. Department of Music.*

[23] Harrison, Vaidyanathan and Madgwick, « Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm ».

[24] Sebastian O.H. Madgwick, *An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays*, 2010.

[25] Nguyen Ho Quoc Phuong, Hee-Jun Kang, Young-Soo Suh and Young-Sik Ro, « A DCM Based Orientation Estimation Algorithm with an Inertial Measurement Unit and a Magnetic Compass », *Journal of Universal Computer Science*, vol. 15, no. 4, 2009.

[26] Arshia Cont, Thierry Coduys and Cyrille Henry, « Real-time Gesture Mapping in Pd Environment using Neural Networks », *Proceedings of the 2004 Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME04), Hamamatsu, Japan.*

[27] James Diebel, »Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors », *Stanford University*, 20 October 2006.

[28] Beller, G., « The Synekine Project », *MOCO 2014, IRCAM, Paris*, June 2014

[29] Beller, G., « Gestural Control of Real-Time Speech Synthesis in Luna Park », *SMC, Padova*, 2011

## Vidéographie

[30] Sensor fusion on Android devices: a révolution in motion processing :  
[http://youtu.be/C7\]Q7Rpwn2k](http://youtu.be/C7]Q7Rpwn2k)

[31] Percussion aérienne détection de mouvements percussifs avec vélocité et autres applications : <http://vimeo.com/33960454#at=0>

[32] Captation gestuelle pour une percussion augmentée, Charles Verron :  
<http://youtu.be/KFYWbUDByI>

## Annexe 1 : configuration du Raspberry Pi

L'annexe suivante explique la configuration d'un Raspberry Pi que j'ai eu à effectuer dans le cadre de ce mémoire. Les points détaillés ici concernent :

- Initialisation du système
- Activation du protocole SSH pour contrôle à distance
- Attribution d'une IP fixe
- Activation et installation des bibliothèques I<sup>2</sup>C
- Installation des utilitaires de bureau à distance VNC, et de partage de fichiers
- Compilation et exécution de programmes en C++

**Systeme d'exploitation** : Raspian (Debian Wheezy), version Janvier 2014-05-16

**Configuration du réseau et du contrôle par SSH** : l'utilisation la plus pratique d'un Raspberry Pi est de le connecter à un réseau et d'en prendre le contrôle via protocole SSH. Le SSH permet d'exécuter des lignes de code à distance et d'accéder au bureau sans avoir à connecter d'écran ou de clavier au Raspberry Pi. Il est néanmoins nécessaire lors de la première utilisation de configurer ce protocole pour qu'il se mette en route à chaque redémarrage.

Lors du premier démarrage du Raspberry Pi, un écran de configuration apparaît (BIOS), qui est aussi accessible à tout instant avec la commande suivante :

```
sudo raspi-config
```

En ligne de commande linux, le mot `sudo` désigne le fait de lancer une ligne de commande avec les droits d'administrateur, ce qui est très souvent nécessaire pour effectuer une tâche.

Aller dans le menu SSH et sélectionner Enable.

Il faut ensuite activer l'interface réseau afin de se connecter à internet, mettre à jour le système et télécharger les paquets nécessaires pour la suite. Taper la commande suivante (nano est un éditeur de texte basique) :

```
sudo nano /etc/network/interfaces
```

Il faut changer le texte du fichier par le suivant (à la fin de l'édition, faire CTRL-O, puis ENTER pour sauvegarder, puis CTRL-X pour quitter) :

```
auto lo
iface lo inet loopback

auto eth0
iface eth0 inet dhcp
```

Cela permet à l'interface réseau de se voir attribuer une adresse IP par le serveur DHCP afin de pouvoir accéder à internet à partir de n'importe quel réseau. L'interface nécessite un redémarrage via la commande suivante :

```
sudo service networking restart
```

Afin d'accéder aux propriétés réseau, adresse MAC et adresse IP, il suffit de taper :

```
ifconfig
```

A partir de maintenant, on peut se connecter au Raspberry Pi via réseau à partir d'un autre terminal linux connecté au réseau, il suffit de taper la ligne de commande :

```
ssh pi@192.168.0.2
```

(Où 192.168.0.2 est l'adresse IP du Raspberry Pi, que l'on a lu précédemment avec la commande ifconfig)

Un système MacOS est un système linux, il suffit donc d'ouvrir le terminal et de taper la ligne de commande précédente. Sous Windows, il faut installer un client SSH comme PuTTY. Le terminal exécute maintenant des lignes de commande sur le Raspberry Pi, il n'est plus nécessaire d'avoir un écran et un clavier connectés.

**Attribution d'une IP fixe** : l'attribution des adresses IP sur un réseau classique se fait par DHCP, c'est un serveur qui attribue une adresse IP automatiquement dès que l'ordinateur se connecte au réseau. Cela est pratique pour éviter les conflits d'adresse IP,

ça ne l'est pas pour un Raspberry Pi que l'on souhaite contrôler en SSH, car il n'existe pas de moyen facile de connaître son adresse IP sans écran connecté, son adresse IP pouvant changer à chaque redémarrage. Il est donc pratique de forcer le Raspberry Pi à s'attribuer une IP fixe. Pour cela il faut rouvrir le fichier de configuration des interfaces réseau :

```
sudo nano /etc/network/interfaces
```

Puis changer le texte et le remplacer par :

```
auto lo
iface lo inet loopback

auto eth0

#iface eth0 inet dhcp

iface eth0 inet static
address 193.168.0.2
netmask 255.255.0.0
gateway 193.168.0.1
```

Dans les fichiers de configuration linux, les lignes commençant par un # sont des commentaires. Quand on modifie un fichier il est toujours préférable de commenter plutôt que de supprimer, cela permet de revenir sur ses pas en cas de fausse manipulation. La ligne commençant par # est l'ancienne configuration en DHCP. La ligne address désigne l'IP fixe du Raspberry Pi, la ligne netmask désigne le masque de sous réseau, qui doit être le même que celle du PC duquel on se connecte, et la ligne gateway désigne l'adresse IP fournissant la connexion internet, c'est à dire l'adresse du PC. Les adresse de la forme 192.168.0.X, sont généralement utilisées dans les routeurs internet domestiques, et induisent des conflits d'adresse IP, il est donc préférable lorsque l'on travaille en IP fixe d'un attribuer une au hasard.

**Activation de l'interface I<sup>2</sup>C**: cela se fait en rajoutant deux lignes dans un fichier texte accessible via la commande :

```
sudo nano /etc/modules
```

Les deux lignes à rajouter sont les suivantes :

```
i2c-bcm2708
```

i2c-dev

Il existe un fichier nommé `raspi-blacklist.conf`, qui permet de désactiver automatiquement le bus I<sup>2</sup>C au démarrage, étant donné qu'il est peu utilisé par le commun des mortels. Pour cela, il faut ouvrir le fichier avec la ligne de commande suivante :

```
sudo nano /etc/modprobe.d/raspi-blacklist.conf
```

Il faut changer la ligne :

```
blacklist i2c-bcm2708
```

En :

```
#blacklist i2c-bcm2708
```

Pour changer la fréquence du bus I<sup>2</sup>C, et par la même force le bus à démarrer à cette vitesse à chaque redémarrage, il faut créer le fichier texte suivant :

```
sudo nano /etc/modprobe.d/i2c.conf
```

Et rajouter la ligne suivante

```
options i2c_bcm2708 baudrate=400000
```

Il faut ensuite mettre à jour le système et installer les bibliothèques I<sup>2</sup>C. La mise à jour du système est nécessaire pour installer n'importe quel paquet supplémentaire, l'installateur retourne sinon un erreur 404 :

```
sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get install i2c-tools
```

```
sudo apt-get install libi2c-dev
```

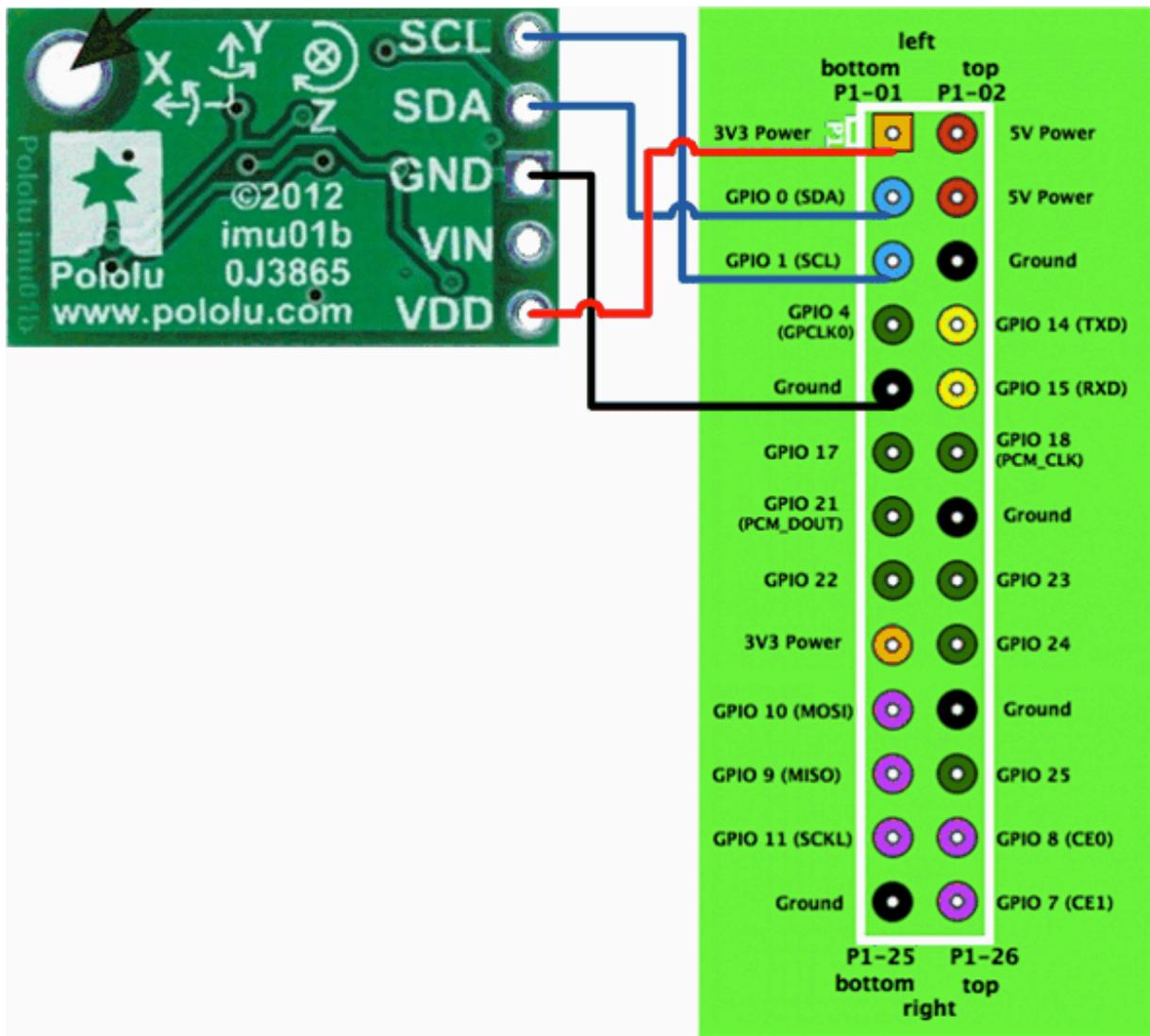
Un redémarrage est maintenant nécessaire :

```
sudo reboot
```

Ou :

```
sudo shutdown -r now
```

Il faut ensuite connecter le capteur au Raspberry Pi, le schéma suivant indique les connexions à faire. Il est à noter que la plupart des capteurs I<sup>2</sup>C peuvent s'alimenter en 3,3V ou en 5V indifféremment.



Pour détecter les périphériques I<sup>2</sup>C, taper la commande suivante :

```
sudo i2cdetect -y 1
```

Le texte suivant apparaît :

```

    0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f
00:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
10:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  1d  --  --
20:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
30:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
40:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
50:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
60:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  6b  --  --  --  --
70:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --

```

Les chiffres 1d et 6b représentent les adresses des capteurs connectés. Dans ce cas 6b représente le gyromètre, et 1d le magnétomètre et l'accéléromètre, qui sont dans ce cas à la même adresse (la puce LSM303D met les deux capteurs sur la même adresse, la puce LSL303DLHC sur deux adresses différentes).

**Partage de fichiers avec un mac**: quand la machine de laquelle on contrôle le Raspberry Pi est un mac, il suffit d'installer le paquet netatalk via la commande :

```
sudo apt-get install natatalk
```

Le Raspberry Pi s'affiche ainsi sur le réseau, à partir du finder taper CMD+SHIFT+K.

**Partage de bureau par VNC**: Une connexion VNC permet d'avoir accès à l'interface graphique du Raspberry Pi depuis son poste de travail. Il faut installer tightvncserver :

```
sudo apt-get install tightvncserver
```

Il suffit maintenant de taper dans la console :

```
tightvncserver
```

Un bureau est créé accessible à distance. Ce protocole utilise par défaut le port 5901.

Il faut maintenant installer sur le mac un client VNC, j'ai utilisé pour ma part Chicken of the VNC, logiciel gratuit, mais manifestement pas le meilleur☺.