

# IMPLÉMENTATION DE CAPTEURS SUR LE ROBOT BIPÈDE BIP



Institut National de Recherche en Informatique et  
en Automatique, Rhône Alpes.

Tuteurs : **Jean-François CUNIBERTO**  
**Sébastien JARDE**

**Julien MELOT GEII 1**

Université Joseph FOURIER, I.U.T 1 de Grenoble.

Tuteur : **Jean-Luc AMALBERTI**



Stage du 14 Avril au 26 juin 2003



**IMPLÉMENTATION DE CAPTEURS  
SUR LE ROBOT BIPEDE BIP**

# REMERCIEMENTS

Le stage ne s'est pas déroulé sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes.

Tout d'abord je tiens à remercier toute l'équipe des Moyens Robotiques dirigée par M. Roger PISSARD-GIBOLLET, pour l'écoute et l'aide qu'ils m'ont apporté, et tout particulièrement mes deux tuteurs M. Jean-François CUNIBERTO et M. Sébastien JARDE qui m'ont soutenu et orienté dans mes choix.

Je remercie ensuite tous les stagiaires pour leur dévouement et leur accueil, ainsi que tout le personnel de l'INRIA Rhône-Alpes qui m'a donné un cadre de travail agréable au sein l'entreprise.

Je tiens finalement à remercier mon tuteur à l'IUT M. Jean-Luc AMALBERTI, pour l'intérêt porté au stage ainsi que les autres professeurs et tout particulièrement Mme. Nicole DEVISME pour son aide et son dévouement.

# SOMMAIRE

## I. L'INRIA

|   |      |
|---|------|
| <b>1. Organigramme</b> .....  | p.6  |
| <b>2. Ressources humaines</b> .....   | p.7  |
| <b>3. Budget</b>  |      |
| <b>4. Localisation des unités de recherches</b>                                       |      |
| <b>5. Domaines de recherche</b> .....   | p.8  |
| <b>6. L'INRIA Rhône-Alpes</b>   |      |
| 6.1 Les moyens humains  |      |
| 6.3 Les projets du quatrième axe de recherche<br>(Modéliser les phénomènes complexes) |      |
| 6.4 Présentation des Moyens Robotiques (MR).....                                      | p.9  |
| 6.4.1 L'équipe  |      |
| 6.4.2 Quelques unes des plateformes de tests  |      |
| 6.4.3 Les projets.....  | p.10 |

## II. PRÉSENTATION

|   |      |
|---|------|
| <b>1. Introduction</b> .....                            | p.11 |
| <b>2. Le robot bipède BIP</b> .....                     | p.12 |
| <b>3. Présentation des capteurs à implémenter</b> ..... | p.13 |

## III. TRAVAIL EFFECTUÉ

|   |      |
|---|------|
| <b>1. Caractérisation des capteurs</b> .....              | p.14 |
| 1.1 Fiabilité des données du capteur <i>Sensorex</i>      |      |
| 1.2 Etalonnage du capteur <i>memsic</i> .....             | p.15 |
| 1.3 Relevés de mesures et premières comparaisons.....     | p.16 |
| <b>2. Fixation des capteurs sur le robot bipède</b> ..... | p.17 |
| 2.1 Détermination des emplacements                        |      |
| 2.2 Fixation du capteur <i>Sensorex</i> .....             | p.18 |
| 2.3 Premiers branchements et résultats                    |      |
| 2.4 Fixation des capteurs <i>memsic</i> .....             | p.19 |

|   |             |
|---|-------------|
| <b>3. Conversion du signal PWM (sortie du capteur memsic) en tension continue variable.....</b> | <b>p.20</b> |
| 3.1 Filtre passe-bas du premier ordre   |             |
| 3.2 Filtre passe-bas actif de BUTTERWORTH du septième ordre .....                               | p.21        |
| 3.3 Solutions utilisant un timer.....   | p.22        |
| <b>4. Partie logicielle.....</b>  | <b>p.24</b> |
| 4.1 Introduction  |             |
| 4.2 Mise en œuvre logicielle des capteurs.....  | p.25        |

## IV. ANNEXES

### ***Annexe 1. Explication de la technologie memsic***

### ***Annexe 2. Relevés de mesures et comparaisons***

- 2.1 Tableau de mesures
- 2.2 Comparaison « mesures / théorie » du capteur *memsic* sur les axes X et Y
- 2.3 Angles donnés par le capteur *memsic* en fonction de l'étalon
- 2.4 Graphique de conversion « accélération / angle »

### ***Annexe 3. Valeurs normalisées pour les composants du filtre de Butterworth du septième ordre.***

### ***Annexe 4. Tableau de comparaisons entre quelques inclinomètres***

### ***Annexe 5. Fiches d'étalonnage du capteur sensorex.***

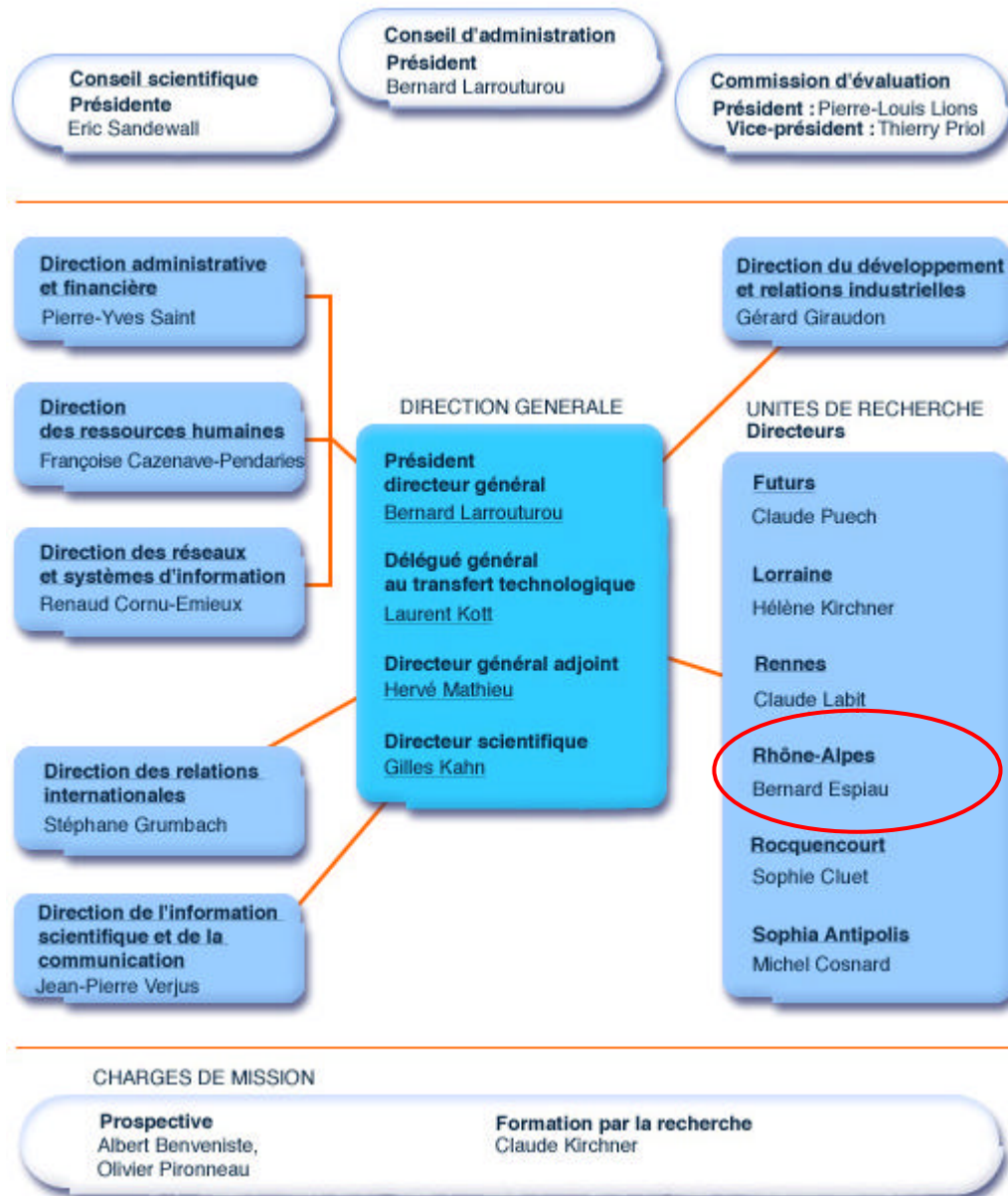
### ***Annexe 6. Documentation constructeur du capteur memsic.***

- AN-00MX-001 Documentation générale des accéléromètres l'inclinaison avec un accéléromètre thermique
- Documentation de l'accéléromètre MXEB002

# I. L'INRIA

Créé en 1967 à Rocquencourt près de Paris, l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique) est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) placé sous la double tutelle du ministère de la recherche et du ministère de l'économie, des finances et de l'industrie.

## 1. Organigramme



## 2. Ressources humaines

Titulaires INRIA : 900 (400 chercheurs, 500 ingénieurs et techniciens)

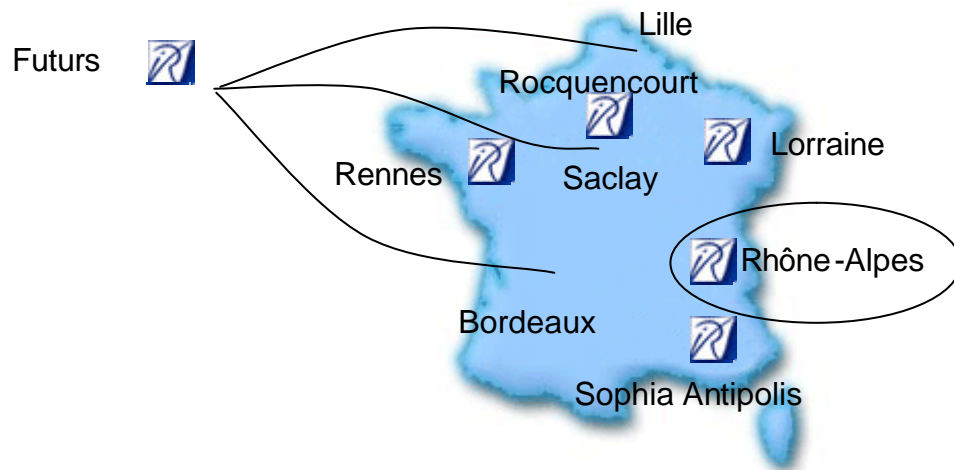
- post-doctorants, stagiaires, invités : 750,
- doctorants : 700,
- chercheurs et enseignants d'autres organismes : 450,
- "ingénieurs experts" (sur contrat de recherche) : 200,
- plus de 200 offres réparties sur 4 ans à partir de 2003,
- 3000 personnes dont 2500 scientifiques, sont issues d'organismes partenaires de l'INRIA (CNRS, universités, grandes écoles).

## 3. Budget

En 2002, le budget de l'institut est passé de 101,2 M€ à 113,5 M€ dont 82,63 M€ de dotation de l'État. Cette croissance, similaire à celle enregistrée entre 2000 et 2001, se poursuivra aussi pour les années à venir (on attend jusqu'à 10% d'augmentation de la part de l'état).

## 4. Localisation des unités de recherches

L'INRIA est divisée en 6 unités de recherche :





## 5. Domaines de recherche

Voici les défis scientifiques majeurs de l'INRIA :

- maîtriser l'infrastructure numérique,
- concevoir les nouvelles applications exploitant le Web et les bases de données multimédias,
- savoir produire des logiciels sûrs,
- concevoir et maîtriser l'automatique des systèmes complexes,
- combiner simulation et réalité virtuelle.

## 6. L'INRIA Rhône Alpes

L'INRIA Rhône-Alpes est réparti en 3 sites:

- un site principal à Montbonnot,
- un site de recherche sur le campus universitaire de Grenoble,
- un site à l'Ecole Normale Supérieure de Lyon.

### 6.1 Les moyens humains

- effectif : 450 personnes,
- 240 chercheurs et 210 titulaires,
- 25 équipes de recherche,
- une vingtaine d'enseignants chercheurs.

### 6.2 Les axes de recherche

- maîtriser les systèmes et réseaux informatiques,
- aider à la conception et à la création,
- percevoir, simuler et agir,
- modéliser les phénomènes complexes.

### 6.3 Les projets du quatrième axe de recherche (Modéliser les phénomènes complexes)

#### **BIPOP**

Modélisation, simulation et commande des systèmes dynamiques non réguliers.

#### **IDOPT\***

Identification et optimisation de systèmes en physique et en environnement.

#### **IS2**

Inférence statistique pour l'industrie et la santé.

#### **NUMOPT**

Optimisation numérique.

#### **OPALE\*\***

Optimisation et contrôle de systèmes complexes.

## 6.4 Présentation des Moyens Robotique (MR)

L'équipe des Moyens Robotiques permet à l'INRIA Rhône-Alpes de disposer de plateformes robotiques de test. Bien entendu, les MR assurent la maintenance et l'évolution de ces plateformes ainsi que l'installation et le suivi de logiciels spécialisés.

### 6.4.1 L'équipe

Elle est composée de neuf personnes :

- **Roger Pissard-Gibollet**, ingénieur de recherche,
- **Claudie Marchand**, assistante de service,
- **Hervé Mathieu**, ingénieur de recherche,
- **Jean-François Cuniberto**, technicien,
- **Soraya Arias**, ingénieur de recherche
- **Gérard Baille**, ingénieur de recherche,
- **Pascal Di Giacomo** Ingénieur de recherche (Ensimag-Inpg) laboratoire GRAVIR,
- **Laurence Boissieux**, ingénieur d'étude,
- **Sébastien Jardé**, ingénieur associé.

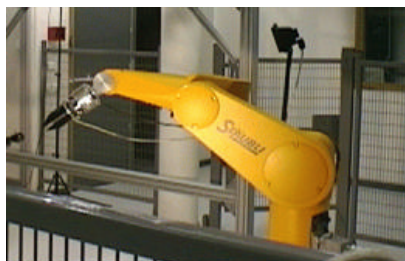
### 6.4.2 Quelques unes des plateformes de tests



Un robot **portique** dédié à la vision



Trois véhicules électriques **Cycab**



**RX90** Un bras manipulateur six axes



Deux robots six roues **KOALA**

Un **robot bipède**, plateforme utilisée pendant ce stage, voir (Cf. p:12 Le robot bipède).

### 6.4.3 Les projets

Présentation des principaux projets dans l'équipe des MR.

**SHARP** : Programmation automatique et systèmes décisionnels en robotique

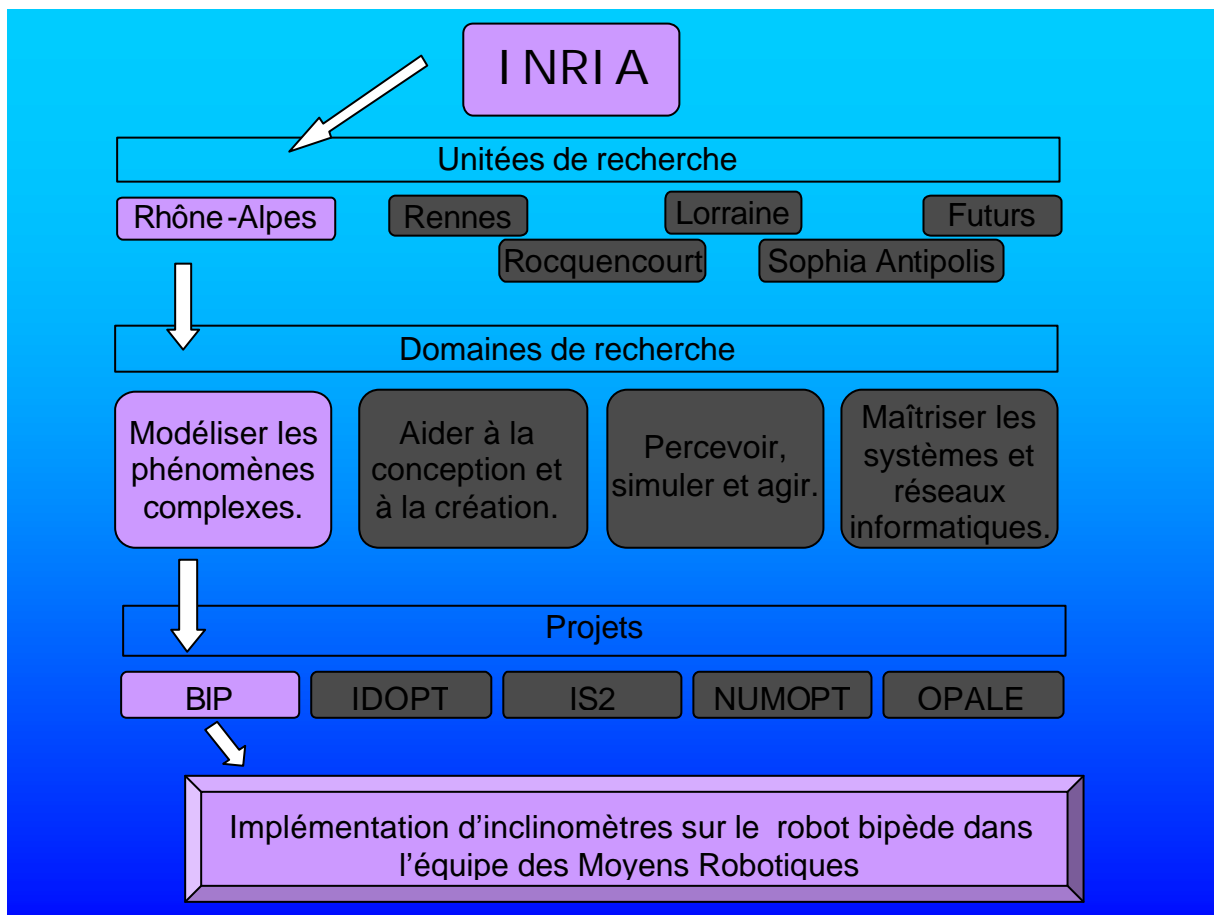
**MOVI** : Modélisation, localisation, reconnaissance et interprétation en vision par ordinateur

**IMAGIS** : Modèles, algorithmes, géométrie pour le graphique et l'image de synthèse

**PRIMA** : Développer des techniques pour l'intégration de la perception et de l'action en robotique

**BIP** : Conception et contrôle de robots marcheurs et applications

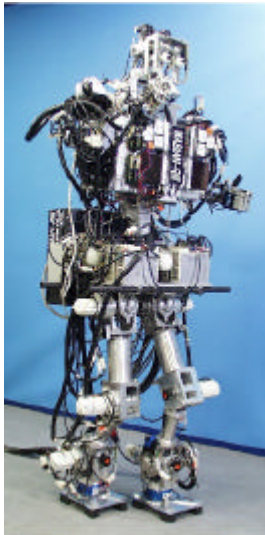
Le stage se déroule sur la plateforme du robot bipède, et s'inscrit dans le projet BIP. Voici une petite présentation simplifiée de la position du stage par rapport à l'INRIA.



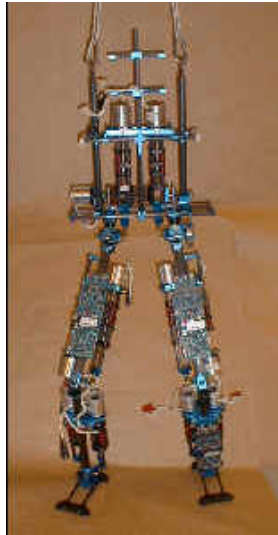
## II. PRÉSENTATION

### 1. Introduction

Aujourd'hui, plusieurs projets de robots bipèdes sont en cours de développement de part le monde, mais seuls quelques uns d'entre eux ont atteint un niveau d'aboutissement satisfaisant comme :



WABIAN  
Waseda University



M2  
MIT



ASIMO  
HONDA



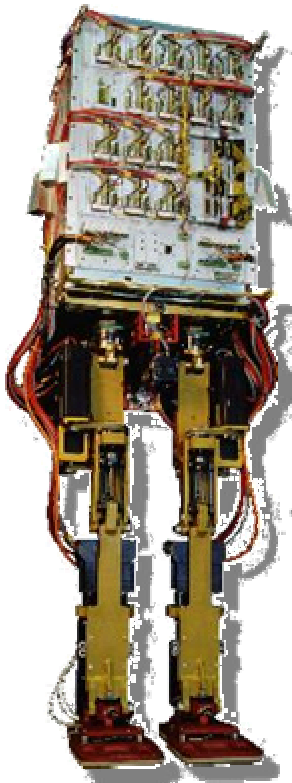
SDR 4X  
SONY

La plateforme BIP de l'INRIA possède une armoire de commande, des actionneurs, et des capteurs. C'est la partie capteurs que l'INRIA Rhône-Alpes a décidé de compléter au travers de ce stage.

Il a été choisi d'implémenter des capteurs de type inclinomètre pour enrichir la plateforme de test et augmenter les performances du robot en complétant les informations déjà disponibles. En outre, il est innovant d'ajouter ces capteurs car ce sont les seuls à pouvoir donner la position d'une partie du robot dans l'espace. Cette particularité se révélera très utile lors de la mise en « position 0 » (position de référence mécanique), car il est important lors de cette étape d'avoir des informations sur l'inclinaison du robot. Ces capteurs peuvent également servir, de façon pratique, lors d'un suivi de trajectoire. En effet, lors de manipulation expérimentale, le robot est amené à être posé parallèlement au sol dans un souci d'équilibre statique. On comprend alors l'utilité d'un inclinomètre dans cette situation.

On dispose de deux types de capteurs, le *sensor*, et le *memsic* (voir présentation des capteurs). Dans un premier temps il est nécessaire de les caractériser (fiabilité, précision, étalonnage, comparaisons, conclusions). Ensuite, après vérification de la fiabilité des données, Il faut déterminer les emplacements pour les différents inclinomètres, et les implanter sur le robot bipède. Enfin, il suffira de compléter la partie logicielle pour que les utilisateurs de la plateforme puissent avoir accès à l'état de ces nouveaux capteurs.

## 2. Le robot bipède BIP



Le projet BIP regroupe deux laboratoires français, l'INRIA Rhône-Alpes pour la partie expérimentation et le Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS) de Poitiers pour la partie mécanique. La construction de deux robots identiques a débuté en 1999 par une première version comportant deux jambes seulement (8 ddl\*). Cette version permettait de réaliser une marche en deux dimensions avec un déambulateur. Puis en janvier 2000, plusieurs éléments ont été rajoutés sur un des deux prototypes un bassin (3 ddl), et 2 ddl à chaque jambe. Enfin, en septembre 2000 la pose du bassin sur l'autre prototype permet d'avoir deux robots avec 15 ddl, un pour chaque laboratoire.

Le robot pèse 105 kilos, pour 180cm, ses proportions mécaniques et ses types de mouvements sont proches du modèle humain.

L'armoire de commande se trouve dans le buste et contient des cartes VME\* dont un ordinateur de type Motorola 68040 et des modules gérant les entrées sorties.




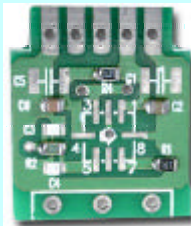

Ces actionneurs sont essentiellement des moteurs à courants continus type Brushless, avec des codeurs incrémentaux intégrés.

Le robot bipède possède déjà de nombreux capteurs :

- des jauges de contraintes sur les chevilles qui permettent de reconstruire les efforts tangentiels du pied sur le sol,
- des capteurs de pression qui mesurent les efforts « normaux » du robot sur le sol,
- des potentiomètres qui donnent l'angle de rotation de chacune de ces articulations,
- des codeurs incrémentaux qui donnent avec précision la rotation des articulations à partir d'un « top 0 » (précision : 4096 points par tour).

\*voir glossaire

### 3. Présentation des capteurs à implémenter

|                    |   |              |  |
|--------------------|--|---|--|
| Référence          | Sensorex 42 745  | MXD 202   |  |
| Dimensions         | 80mm x 50mm x 65mm   | 5mm x 5mm x 2mm   |  |
| Précision          | Moins de 1°  | Moins de 0.1° (signal direct)   |  |
| Signal de sortie   | Tension continue variable $\pm 3V$   | $\pm 20\%$ de duty cycle* (PWM*)  |  |
| Bande passante *   | 10Hz   | 30Hz  |  |
| Prix unitaire      | 821 €  | 12 €  |  |
| Plage de variation | $\pm 30^\circ$   | $\pm 60^\circ$  | 360°   |
| Nombre d'axes      | 2 axes   | 2 axes  | 1 axe  |
| technologie        | Cellule capacitive en silicium micro usinée.                                       | Mesure d'une différence de température.   |  |
| Photo              |  | <br>Support | <br>Capteur |

Le capteur *sensorex* est très précis et très fiable, il est robuste mais imposant. L'équipe des MR possède deux de ces capteurs avec leur fiche d'évaluation fournie par les laboratoires Sensorex.

Le capteur *memsic* est un composant CMS\*. Il est facile de l'implémenter à l'endroit désiré. De plus, il permet de mesurer de grands angles.

En annexe 1, vous trouverez des informations plus précises concernant la technologie mise en jeu pour le capteur *memsic*.

Vous trouverez toutes les informations sur ces capteurs en annexe 5 et 6, mais si vous désirez en savoir un peu plus, les sites suivants sont plus détaillés :

- ✓ [www.memsic.com](http://www.memsic.com),
- ✓ [www.sensorex.fr](http://www.sensorex.fr).



### III. TRAVAIL EFFECTUÉ

#### 1. *Caractérisation des capteurs*

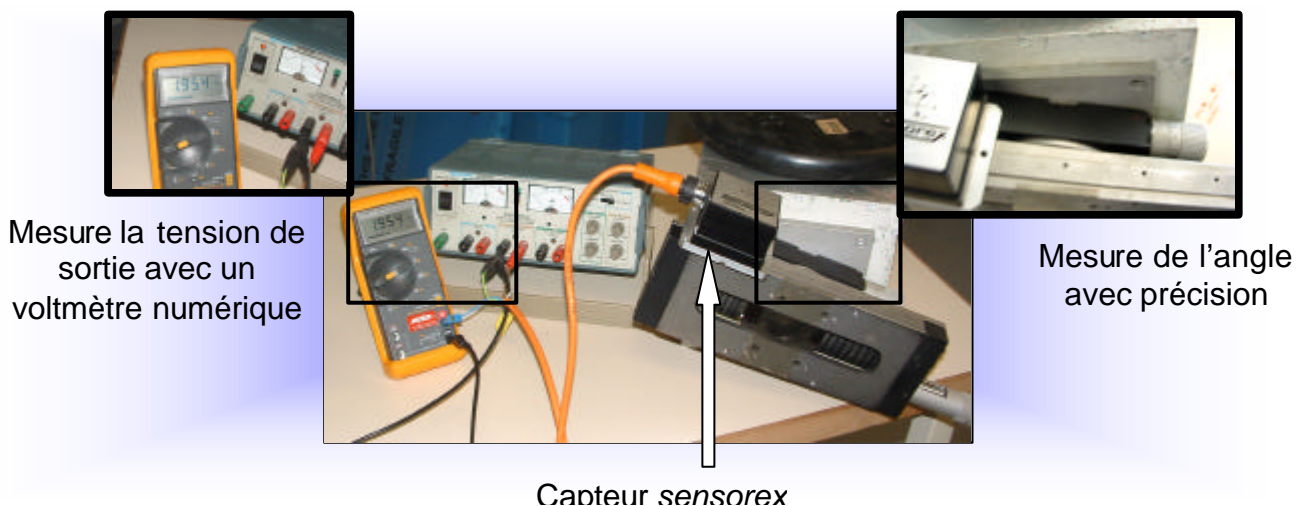
##### 1.1 Fiabilité des données de sensorex

Les laboratoires *sensorex* ont effectué des tests, et ont fourni des fiches d'étalonnage avec le capteur. Ces fiches sont précises à 0.1 mV. Je devais vérifier la fiabilité de ces résultats car ils avaient été effectués en 1999 et ces informations ne sont plus forcément exactes 4 ans après.

Pour ce faire, j'ai fixé le *sensorex* sur une table micrométrique me donnant un angle précis (1/10 de degré), et j'ai mesuré les valeurs de la tension de sortie avec un voltmètre numérique, pour les différents angles donnés dans leurs fiches d'étalonnage.

Le voltmètre de type Fluke est précis au millivolt près. Il n'est pas possible d'avoir des valeurs aussi précises que celles des fiches d'étalonnage. On recherche plutôt dans cette expérience à vérifier que le capteur est toujours fiable.

#### Photos de l'expérience



Les résultats de cette expérience ont été très satisfaisants car les différences constatées sont inférieures à la précision du voltmètre.

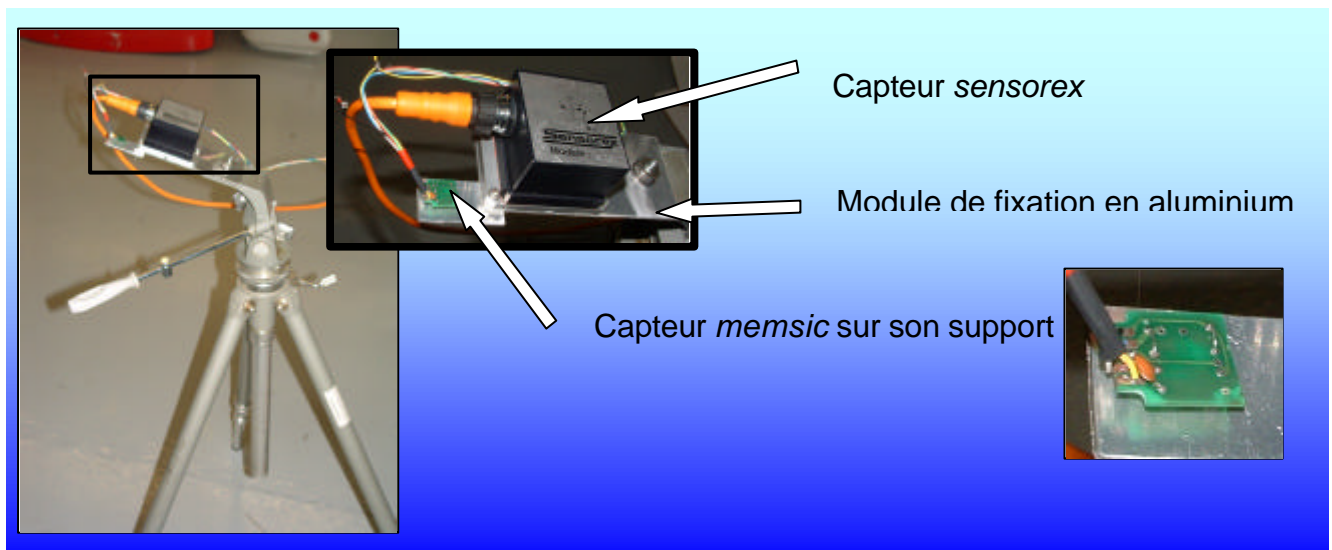
Conclusion : Les tableaux de valeurs donnés par les laboratoires sont fiables et ces résultats exploitables. C'est le capteur *sensorex* qui nous donnera l'angle précis et nous servira d'étalon pour la suite de l'expérimentation.

## 1.2 Etalonnage du capteur memsic

Pour faire l'étalonnage et les mesures du capteur *memsic*, il fallait le mettre sur un même plan que le capteur *sensorex*, et pouvoir incliner le montage pour faire des mesures.

On dispose d'un pied d'appareil photo inclinable. Il suffit donc de concevoir une plaque permettant de fixer les deux capteurs sur ce même pied. Le capteur *memsic* ne peut pas être soudé à l'horizontale sur sa carte de support donc c'est le capteur lui-même qu'il faut aligner. J'ai conçu un support en aluminium qui accueille les deux capteurs et garantit leur alignement sur un même plan.

### Photos du montage



## 1.3 Relevés de mesures et premières comparaisons (Annexe 2)

Toutes les mesures ont été prises à des angles où l'on connaît la tension exacte de sortie du *sensorex*, c'est-à-dire :  $\pm 6^\circ$   $12^\circ$   $18^\circ$   $24^\circ$   $30^\circ$

Le *sensorex* utilisé comme étalon délivre une tension de  $\pm 4V$  pour  $\pm 30^\circ$ . Pour les angles de  $45^\circ$  et  $90^\circ$ , j'ai utilisé un niveau à bulle pour avoir un ordre de grandeur.

L'annexe 2 présente tous les relevés de mesures et les différents graphiques tirés de ces mesures.

Ordre logique des mesures:

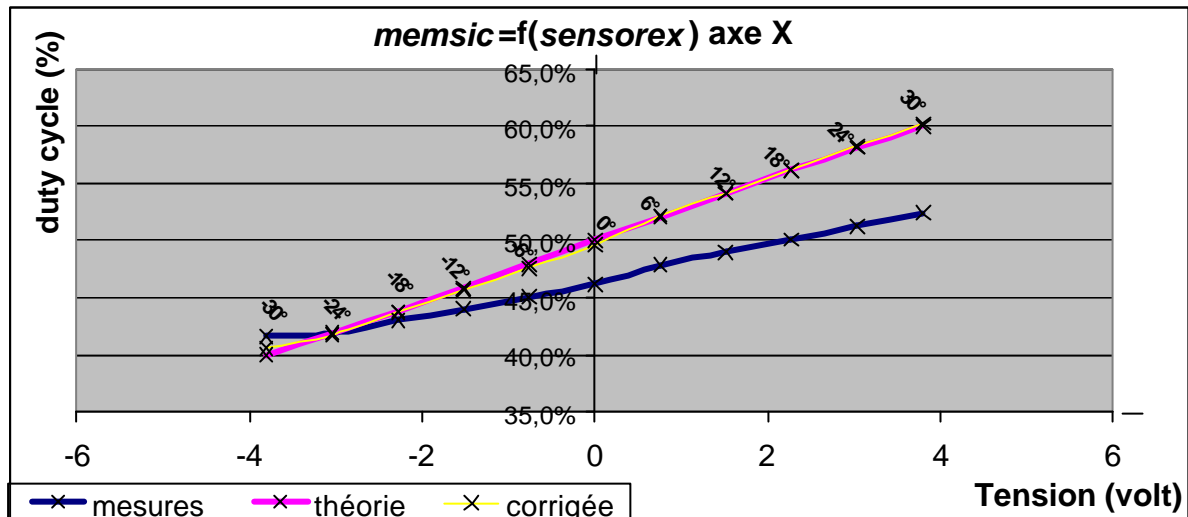
- ✓ La tension du *sensorex* me donne un angle,
- ✓ L'angle me donne une accélération (voir annexe 2.3 conversion « angle / accélération »),
- ✓ L'accélération est mesurée par le *memsic*, par variation du rapport cyclique (signal PWM).



Le relevé ci-dessous montre la différence entre la courbe théorique et les mesures effectuées sur la sortie du capteur *memsic* en fonction de l'angle d'inclinaison.

**Courbes :**

- « théorie » : Valeurs données par la documentation *memsic*.
- « mesures » : Sortie réelle du capteur *memsic*
- « corrigée » : Correction =  $0.0117 * x + 0.0341$ .



Il est représenté sur ce graphique le relevé de l'axe X car c'est celui qui montre le plus d'écart par rapport à la théorie. Les autres relevés, notamment ceux de l'axe Y, sont en annexe 2.2 ; ils sont du même type.

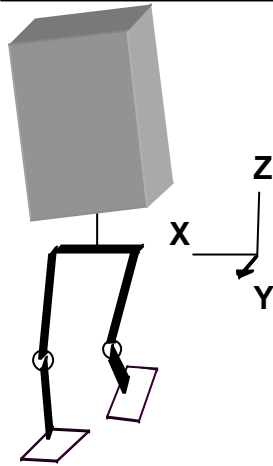
**Observation :** Après correction, on mesure une erreur maximale de  $0.68^\circ$ , et une erreur moyenne de  $0.49^\circ$ . Ces valeurs sont assez satisfaisantes mais elles restent bien en dessous de la précision du module *sensorex*, qui est de  $0.06^\circ$  près.

Il faut vérifier que les valeurs données par le *memsic* ne varient pas avec la température ambiante, car sa technologie est basée sur une mesure de température (Cf : Annexe 1).

## 2. Fixation des capteurs sur le BIP

### 2.1 Détermination des emplacements

Vue du robot bipède



Pour pouvoir connaître l'inclinaison de toutes les parties du robot, il nous faudrait avoir quinze informations, une pour chaque degré de liberté. Avec le matériel que possède l'équipe des MR, il n'est pas possible de connaître les informations sur l'axe Z. Il nous faudrait des gyroscopes ou des inclinomètres trois axes. Il y a trois informations sur cet axe, une pour le pelvis, et une pour chaque jambe. Sans tenir compte de ces trois informations, il nous en reste douze à connaître :

- le pelvis axe X et Y,
- les jambes :
  - un axe sur Y pour chacune,
  - deux axes sur X pour chacune,
- les pieds X et Y pour chacun.

Nous disposons d'inclinomètres deux axes en  $\pm 30^\circ$  et un axe en  $360^\circ$ . Il nous faudrait sept inclinomètres pour avoir le plus d'informations possibles sur les positions des différentes parties du robot.

- un sur chaque **pied** en deux axes,
- un sur chaque **tibia** en un seul axe,
- un sur chaque **fémur** en deux axes,
- un sur le **pelvis**.

Dans un premier temps, nous avons décidé d'implémenter les inclinomètres aux endroits les plus utiles.

Le pelvis constitue le départ de la chaîne cinématique, et représente un point de mesure essentiel pour l'orientation du tronc. Ces informations seront très utiles pour l'équilibre et simplifieront les différents calculs déterminés à partir de la chaîne cinématique.

Aucun capteur du robot ne pouvait nous donner l'inclinaison du sol. Nous avons donc décidé d'implanter des inclinomètres sur les pieds du bipède qui se trouvent à la fin de la chaîne cinématique. Actuellement pour connaître l'inclinaison d'un pied il faut passer par une grande partie de la chaîne cinématique. L'avantage de l'inclinomètre est qu'il nous donnera directement l'angle (sans calculs), et avec plus de précision.

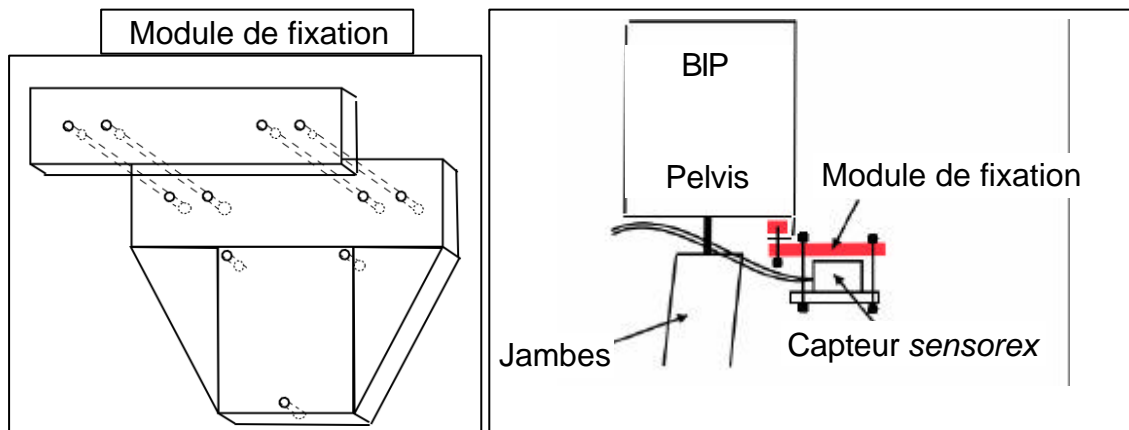
**Conclusions** : Le capteur *sensorex* sera fixé sur le pelvis (besoin de précision), et deux capteurs *memsic* seront fixés sur chaque pied du robot bipède.

## 2.2 Fixation du capteur Sensorex



J'ai conçu un module de fixation en aluminium qui permet de lier perpendiculairement le capteur *sensorex* sur le pelvis du robot.

Ce module est composé de deux parties. La première est une entretoise qui se glisse au bas du pelvis, dans laquelle des filetages ont été réalisés. La deuxième, la pièce principale, permet d'une part de se fixer sur le robot (à l'aide de l'entretoise), et, d'autre part, d'accueillir le capteur *sensorex*. Il est fixé au-dessous de la plaque pour faciliter le passage du câble.



## 2.3 Premiers branchements et résultats

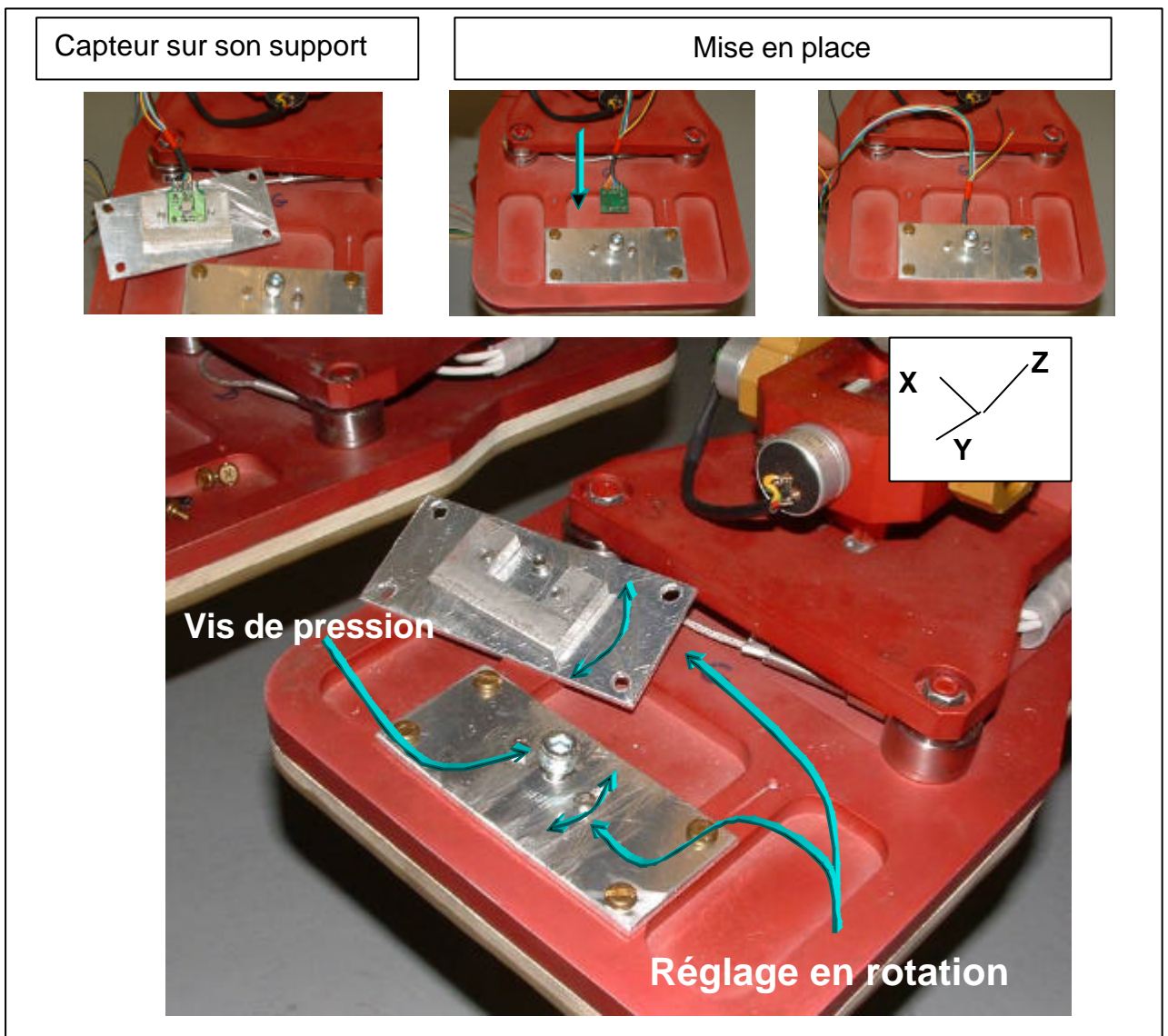
Le robot possède des entrées analogiques libres. Ces entrées sont des convertisseurs « analogique / numérique »  $\pm 10V$ . Le capteur *sensorex* n'est pas très compliqué à connecter car il suffit de l'alimenter en 0-15V (le robot fournit directement du 15V), et de connecter ces deux sorties X et Y sur des convertisseurs « analogique / numérique ». Ensuite, il suffit de faire une acquisition sur le canal concerné.

Le capteur *sensorex* est connecté sur le canal 7 pour l'axe X (rotation frontale) et canal 15 pour l'axe Y (rotation sagittale).

Les premiers résultats sont très satisfaisants : les valeurs données sont correctes.

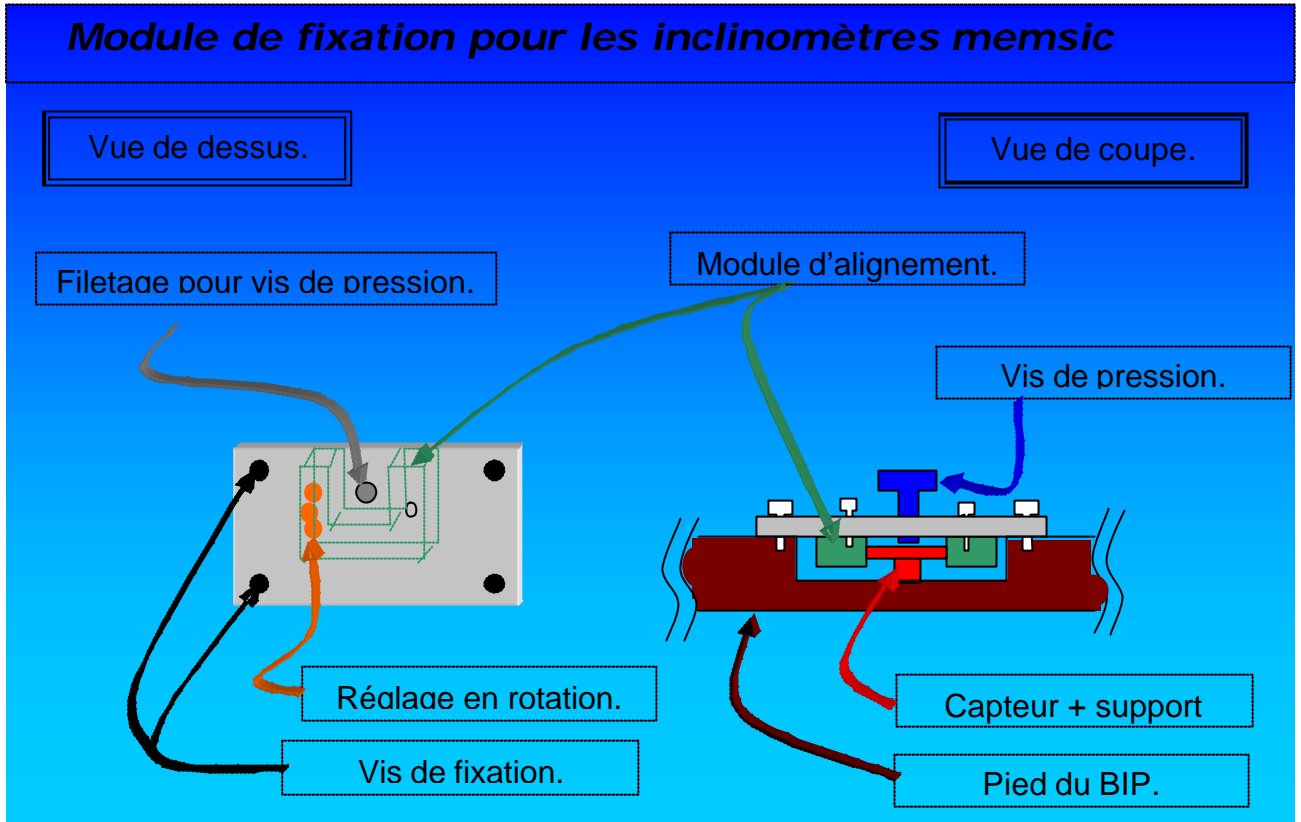
## 2.4 Fixation du capteur *memsic*.

Photo des modules de fixations



Dans la fixation du capteur *memsic*, la difficulté principale est de mettre la surface du capteur sur le même plan que le pied du robot. Pour cela, le module de fixation est équipé d'un **réglage en rotation**, pour aligner le capteur CMS selon l'axe Z, et d'une **vis de pression** pour le plaquer sur la surface plane du pied du robot. Ainsi, même si le capteur n'est pas soudé à plat sur sa plaque, celui-ci est tout de même parallèle au pied.

## Schéma de montage sur le pied

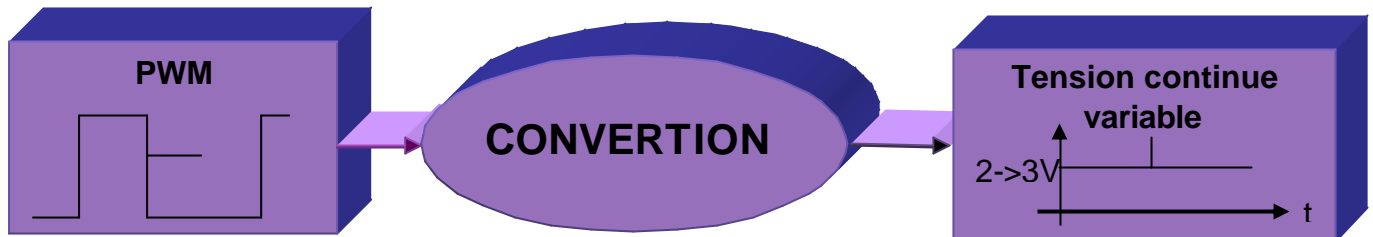


Après la fixation mécanique du capteur, il est nécessaire de le connecter à la partie logicielle. Le capteur ayant une sortie PWM, il faut connecter le capteur sur une entrée numérique du BIP. Si on veut avoir à n'importe quel moment la valeur du capteur, il faut faire une acquisition du signal et calculer l'angle en permanence. Cette opération demande beaucoup de temps au calculateur et celui-ci est déjà saturé.

Il faut donc envisager une conversion du signal PWM, en tension continue variable, que l'on pourrait connecter sur une entrée analogique.

### 3. Conversion du signal PWM en tension continue variable.

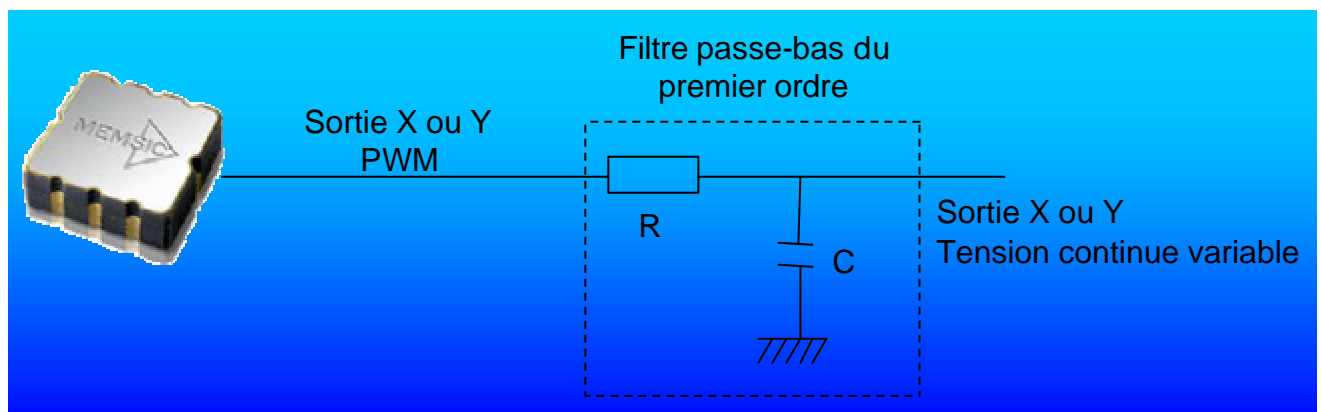
Le robot bipède est équipé de plusieurs entrées analogiques et il serait plus facile par la suite de n'avoir qu'à lire l'état du capteur pour avoir l'inclinaison sans calculs. Il faut donc concevoir une adaptation « digitale / analogique », ou plus précisément PWM en tension continue variable.



Plusieurs solutions sont envisageables :

- faire un filtre passe-bas du premier ordre type RC,
- concevoir un filtre passe-bas actif d'un ordre plus élevé,
- envisager une conversion avec un timer\* (à programmer),
- utiliser un composant dans le commerce qui fait directement la conversion.

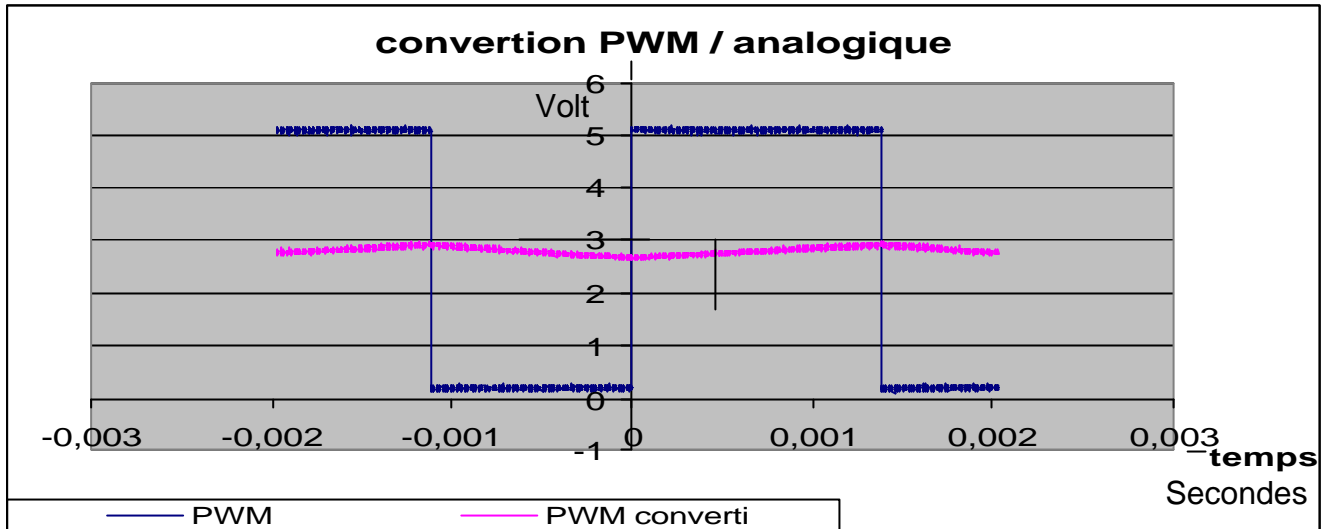
#### 3.1 Filtre passe-bas du premier ordre



C'est le filtre qui est proposé dans la documentation de *memsic* avec les valeurs  $R=10k\Omega$  et  $C=1\mu F$ . Cela donne une bande passante de 15 Hz, ce qui est mieux que le module *sensorex*.



Voici le relevé avec l'oscilloscope de la sortie du filtre :



On voit sur ce relevé que la sortie du filtre est en « dent de scie » au lieu d'être continue. Cette ondulation parasite est de 500mV crête à crête, alors que la variation pleine échelle du signal est de  $\pm 1V$  pour  $\pm 90^\circ$ . Cela induit une erreur de mesure de près de  $30^\circ$ . Cette solution n'est pas utilisable.

Pour limiter la dent de scie, j'ai augmenté les valeurs du filtre  $R=50K\Omega$  et  $C=2\mu F$ . La dent de scie ne fait plus que 50mV d'amplitude, mais la bande passante est de 1.6Hz ce qui n'est pas suffisant, le minimum de bande passante que l'on peut accepter sur le bipède est 10Hz.

J'ai calculé les valeurs des composants pour avoir une bande passante de 10Hz, et j'ai refait le montage. L'amplitude était de 300mV, ce signal n'est donc toujours pas exploitable. Il faut donc envisager une autre solution.

### 3.2 Filtre passe-bas actif de BUTTERWORTH du 7<sup>ème</sup> ordre

Ce filtre est conçu à base de filtres actifs du second et du troisième ordre en cascade, avec des valeurs normalisées (annexe 3).

On attend en sortie de ce filtre une tension continue variable assez lisse car il est atténué à 140dB par décade avec une bande passante de 20Hz. La fréquence de sortie du signal (400Hz) est atténuée de plus de 160dB. Normalement, il ne devrait rester que les fréquences en dessous de 20Hz, c'est-à-dire la composante continue.

Les résultats de cette expérience sont très décevants car la dent de scie est toujours présente, et comme le montage est une suite d'intégrateurs, le signal revient toujours à la même valeur au bout d'un certain temps. Il n'y a que la variation dynamique qui est bien rendue : ce filtre est donc utilisable pour détecter une accélération ou un choc.

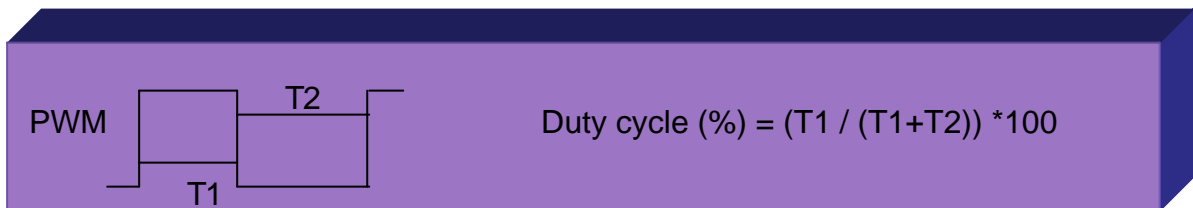
\*voir glossaire

### 3.3 Solutions utilisant un timer

Les modules que j'ai trouvés dans le commerce utilisent bus un timer. La solution avec timer n'est pas utilisable sur le robot car elle demande du temps au calculateur et celui-ci est déjà saturé. De plus, le robot n'a pas d'entrée pouvant faire une acquisition d'un signal PWM. Mais cette solution est précise, rapide, et peu coûteuse. Ainsi, pour remplacer le calculateur, j'ai pensé à utiliser un micro contrôleur.

Cette solution est très simple. Il suffit de connecter le signal PWM sur une entrée numérique et de compter le temps pendant lequel le signal est à l'état haut (**T1**) et le comparer à celui de l'état bas (**T2**). Ensuite, il suffit simplement d'envoyer cette valeur sur une sortie analogique ou numérique selon le système qui suit.

La précision de cette méthode dépend de la précision du timer, et de la vitesse de l'horloge du microcontrôleur. Le signal PWM est à 400Hz si le timer est un 16bits, il faut  $2^{16}$  temps d'horloge en 1/400 secondes pour la précision maximale, donc le quartz doit être de  $2^{16} \times 400 = 26.4$  Mhz. On aura dans ces conditions une précision de 0.0015% du rapport cyclique.



L'autre avantage est le suivant : il est possible d'utiliser ce microcontrôleur pour faire l'adaptation de température, en ajoutant une entrée analogique pour pouvoir rentrer la tension correspondante à la température délivrée avec le capteur.

Mais cette solution demande beaucoup trop de modifications, et elle est compliquée à intégrer sur le robot : on cherche alors une solution plus simple.

#### Solution retenue :

Il existe des inclinomètres délivrant directement une tension analogique variable. Cette solution simplifie beaucoup nos problèmes (Cf. Comparaison des capteurs en annexe 4).

Modèle retenu après étude :

*Memsic* MXR2999GL/ML

Alimentation (2.75V < alim < 5V).

Précision donnée par le constructeur : <1mg ; 1000mV/g ; <0.1° près

C'est le même capteur que le MXD 202, deux fois plus précis, avec une sortie analogique proportionnelle à la tension d'alimentation.

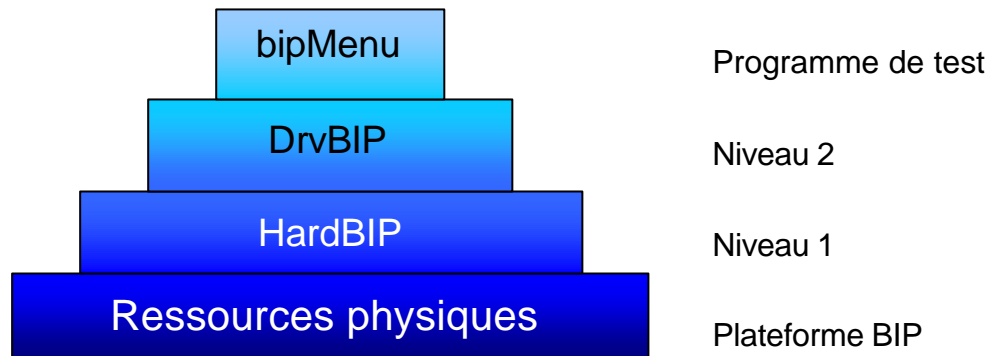
Il faudra l'étalonner à l'aide du capteur *sensorex* et l'implanter sur les pieds du bipède. Il restera, comme présenté ci-dessous pour le *sensorex*, à compléter la partie logicielle. Malheureusement le stage étant de courte durée et les temps de livraison assez longs je n'ai pas eu le temps de finir ce travail.



## 4. Partie logicielle

### 4.1 Introduction

Les programmes écrit en langage C sont séparés en différents niveaux :



Présentation des différents programmes déjà existants :

- HardBIP

Les fonctions du premier niveau exploitent directement les ressources physiques de la plateforme.

Quelques unes de ces fonctions :

- « bipHardInit() » Initialisation du BIP
- « bipHardGetEncodeurs() » Lire la valeur des encodeurs
- « bipHardPutAnalog() » Ecrire une valeur analogique sur un certain canal.
- « bipHardGetDigit() » Lire la valeur numérique d'un certain canal

- DrvBIP

Les fonctions du deuxième niveau utilisent celles du niveau inférieur, et permettent de grouper l'acquisition des valeurs.

Exemple, pour la fonction « bipGetPotars() ».

Pour faire l'acquisition de tous les potentiomètres, on crée une boucle « for () » qui va utiliser la fonction « bipHardGetAnalog() » plusieurs fois sur des canaux différents, et ranger ces résultats dans un tableau.

Quelques fonctions similaires :

- « bipGetEncodeurs() » Lire la valeur des encodeurs
- « bipGetPotars() » Lire la valeur des potentiomètres
- « bipPutCurrent() » Ecrire la valeur de la tension à appliquer aux variateurs des moteurs
- « bipGetFeetForce() » Lire la valeur des capteurs de pression

- bipMenu

Ce programme permet de tester toutes les fonctions quelque soit leur niveau. Il utilise une interface en communiquant directement avec le robot.

## 4.2 Intégration de l'inclinomètre dans la partie soft.

L'inclinomètre *sensorex* fixé sur le pelvis du robot, délivre deux tensions analogiques (une pour chaque axe). La fonction baptisée « `bipGetInclino()` » et que j'ai développée doit faire l'acquisition de ces tensions, et retourner un tableau de valeurs « `inclino[]` ».

Pour faire l'acquisition des tensions, il faudra passer par la fonction du premier niveau « `bipHardGetAnalog()` », fonction qui permet de lire la valeur d'une des voies du convertisseur « analogique / numérique ».

La fonction sera donc rajoutée dans le programme `drvBIP` (deuxième niveau).

- Fonction créée : « `bipGetInclino()` »
- Fonction utilisée : « `bipHardGetAnalog()` »
- Valeurs renvoyées : « `double inclino[NB_AXE_INCLINO]` »

Définition des canaux où sont connectées les sorties, et du nombre de cases du tableau à retourner :

```
#define INCLI_TRUNC_F 7
#define INCLI_TRUNC_S 15

#define NB_AXE_INCLINO 2
```

Explication du code :

- « `INCLI_TRUNC_F 7` » Inclinomètre sur le tronc, mouvement Frontal connecté au canal 7.
- « `NB_AXE_INCLINO 2` » Nombre d'axe d'inclinaison à mesurer = 2.

Fonction « `bipGetInclino()` » :

```
int bipGetInclino(double inclino[NB_AXE_INCLINO])
{
    if (bipHardGetAnalog(INCLI_TRUNC_F, &inclino[0]) == ERROR) {
        fprintf(stderr, "Driver error::bipGetinclino =
bipHardGetAnalog error\n");
        return(ERROR);
    }
    if (bipHardGetAnalog(INCLI_TRUNC_S, &inclino[1]) == ERROR) {
        fprintf(stderr, "Driver error::bipGetinclino =
bipHardGetAnalog error\n");
        return(ERROR);
    }

    return(OK);
}
```

Le programme retourne la valeur « `ERROR` » si l'acquisition ne se déroule pas bien, sinon il retourne la valeur « `OK` » et le tableau de deux cases est mis à jour avec la valeur en Volt des convertisseurs.

Pour que l'on puisse avoir accès aux valeurs des inclinomètres dans le programme de test, il faut rajouter une partie de code dans le programme bipMenu.

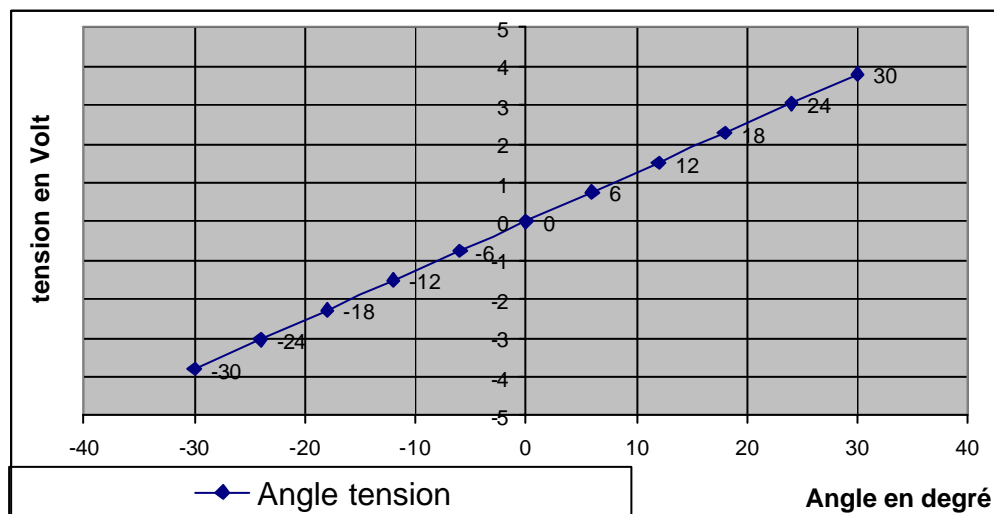
Le programme est basé sur une structure de type switch-case. Il faut taper « I » dans le menu « driver » pour afficher les valeurs du tableau « inclino », celles-ci s'affichent en volt et en degré.

```
printf(" (I) get inclino  \n");

case 'I': /* Get inclino values */
case 'i':

if(bipGetInclino(inclino)!=OK)
{
fprintf(stderr,"Panel error::bipGetinclino\n");
}
else{
printf(" angle frontal (volt) = %g \n",inclino[0]);
printf(" angle sagittal (volt)= %g \n\n",inclino[1]);
printf(" angle frontal (degre) = %g \n",(inclino[0]*7.89));
printf(" angle sagittal (degre)= %g \n",(inclino[1]*7.89));
}
break;
```

Pour transformer la tension en degré, il suffit d'ajouter un simple coefficient proportionnel, car la caractéristique « angle / tension » est parfaitement linéaire.



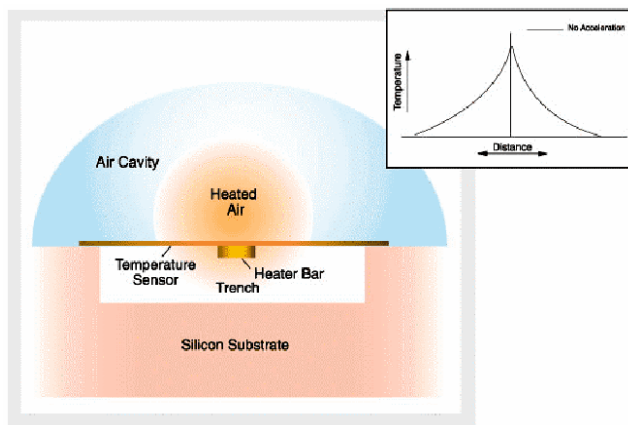
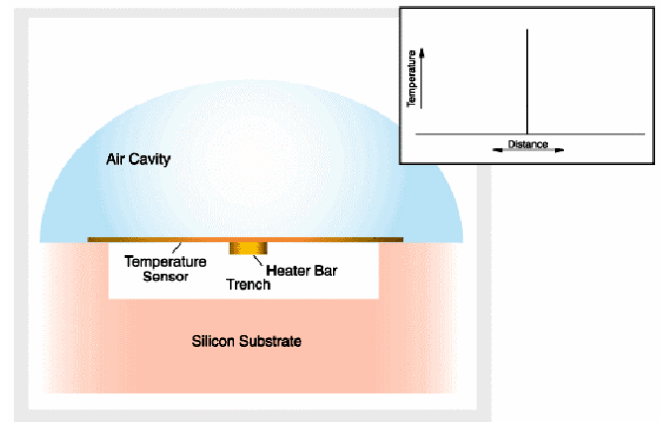
# GLOSSAIRE

- Bande Passante (BP)** La bande passante détermine le temps de réaction en dynamique maximum d'un capteur.  
Exemple: BP=10Hz Temps =  $1/10 = 0.1\text{sec}$  on peut relever la valeur toutes les 0.1 secondes.
- CMS (Composants Montés en Surface)** Ces composants électroniques ont la particularité d'être très petits, et de ne pas être traversants (ils ne se soudent que sur une face d'un circuit imprimé).
- ddl** Degrés de libertés, possibilités de mouvements par rapport à un axe donné.
- Duty cycle** Rapport entre la période du créneau et le temps pour lequel il est à l'état "1".
- Memsic** Marque de l'inclinomètre, c'est le nom utilisé pour le désigner dans le rapport. C'est un capteur miniaturisé à faible coût.
- PWM (Pulse Width Modulation)** Modulation de largeur d'impulsion, c'est un signal en créneau avec un rapport cyclique variable appelé "duty cycle".
- Sensorex** Marque de l'inclinomètre, c'est le nom utilisé pour le désigner dans le rapport. C'est le plus imposant et le plus précis des capteurs utilisés.
- Timer** C'est un compteur dans un microcontrôleur, il permet de donner un temps entre deux états logiques.
- VME** Bus créé par Motorola, où s'adaptent les cartes I/O type VME.

# **IV. ANNEXES**

## Annexe 1. Explication de la technologie memsic

L'inclinomètre *memsic* mesure une accélération pour en déduire une inclinaison. Ce n'est donc pas un réel inclinomètre mais un accéléromètre. Cet accéléromètre mesure les variations internes de température.

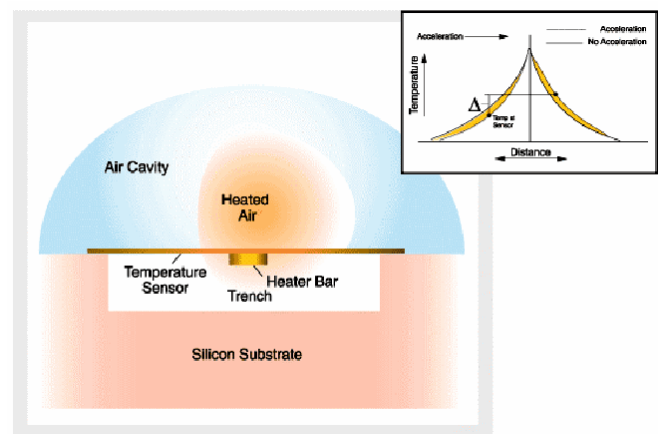


Une cavité d'air en demi-sphère, chauffée en son milieu, crée deux zones de différentes températures. Des capteurs mesurent ces températures et délimitent ces zones.

Lors d'une accélération, la bulle d'air chauffée se déplace, on mesure l'amplitude du mouvement, et on peut en déduire l'accélération produite.

Lorsque l'on incline le capteur, c'est le poids de la bulle d'air chaude qui donnera une accélération.

Voir le graphique de transformation « accélération / angle » (Cf : Annexe 2.3).

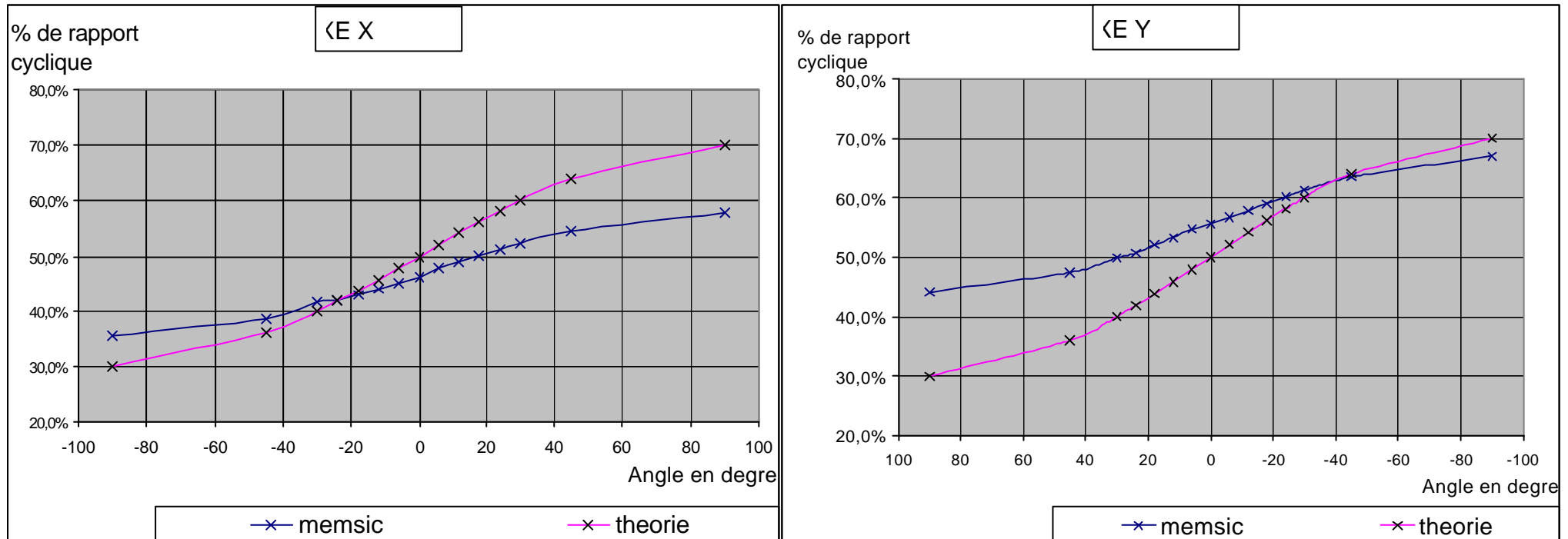


## Annexe 2.1 Tableau de mesures

| Angle<br>(°) | Accélération<br>(g) | Axe X        |                       |         | Axe Y        |                       |         |
|--------------|---------------------|--------------|-----------------------|---------|--------------|-----------------------|---------|
|              |                     | Sensorex (V) | Memsic (% duty cycle) |         | Sensorex (V) | Memsic (% duty cycle) |         |
|              |                     |              | Mesures               | Théorie |              | Mesures               | Théorie |
| 90°          | 1,0000              |              | 58,0%                 | 70%     |              | 44,1%                 | 30%     |
| 45°          | 0,7000              |              | 54,7%                 | 64%     |              | 47,4%                 | 36%     |
| 30°          | 0,5000              | 3,8016       | 52,4%                 | 60%     | -3,799       | 49,9%                 | 40%     |
| 24°          | 0,4067              | 3,0379       | 51,3%                 | 58%     | -3,0402      | 50,7%                 | 42%     |
| 18°          | 0,3090              | 2,2774       | 50,1%                 | 56%     | -2,2925      | 52,1%                 | 44%     |
| 12°          | 0,2079              | 1,5201       | 49,0%                 | 54%     | -1,516       | 53,3%                 | 46%     |
| 6°           | 0,1045              | 0,7592       | 47,9%                 | 52%     | -0,75        | 54,7%                 | 48%     |
| 0°           | 0,0000              | 0,0002       | 46,2%                 | 50%     | 0,0028       | 55,6%                 | 50%     |
| -6°          | -0,1045             | -0,7607      | 45,1%                 | 48%     | 0,7709       | 56,7%                 | 52%     |
| -12°         | -0,2079             | -1,5197      | 44,0%                 | 46%     | 1,5298       | 57,8%                 | 54%     |
| -18°         | -0,3090             | -2,2792      | 43,0%                 | 44%     | 2,2915       | 59,0%                 | 56%     |
| -24°         | -0,4067             | -3,0397      | 41,9%                 | 42%     | 3,05         | 60,2%                 | 58%     |
| -30°         | -0,5000             | -3,8013      | 41,6%                 | 40%     | 3,8098       | 61,3%                 | 60%     |
| -45°         | -0,7000             |              | 38,6%                 | 36%     |              | 63,5%                 | 64%     |
| -90°         | -1,0000             |              | 35,6%                 | 30%     |              | 67,0%                 | 70%     |

## Annexe 2.2

Réponse du capteur memsic par rapport à la théorie donnée dans la documentation.



Il suffit d'appliquer une correction de type  $a \cdot x + b$  pour retrouver les valeurs théoriques, ce qui est normal car les capteurs sont vendus non calibrés.

Après observation de la caractéristique du capteur, on préférera utiliser le capteur dans la zone de linéarité. Pour la déterminer plus précisément, il faudrait avoir plus de points de mesures entre 40° et 80°, mais on sait (à partir de la documentation) que le capteur est linéaire entre  $\pm 60^\circ$  (Cf :Annexe 2.3).

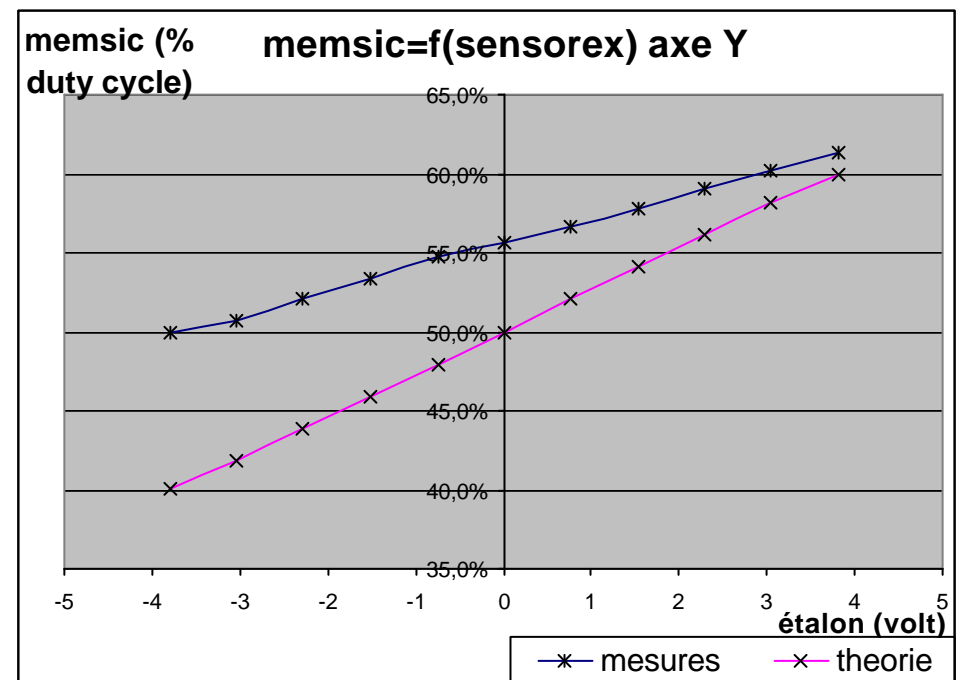
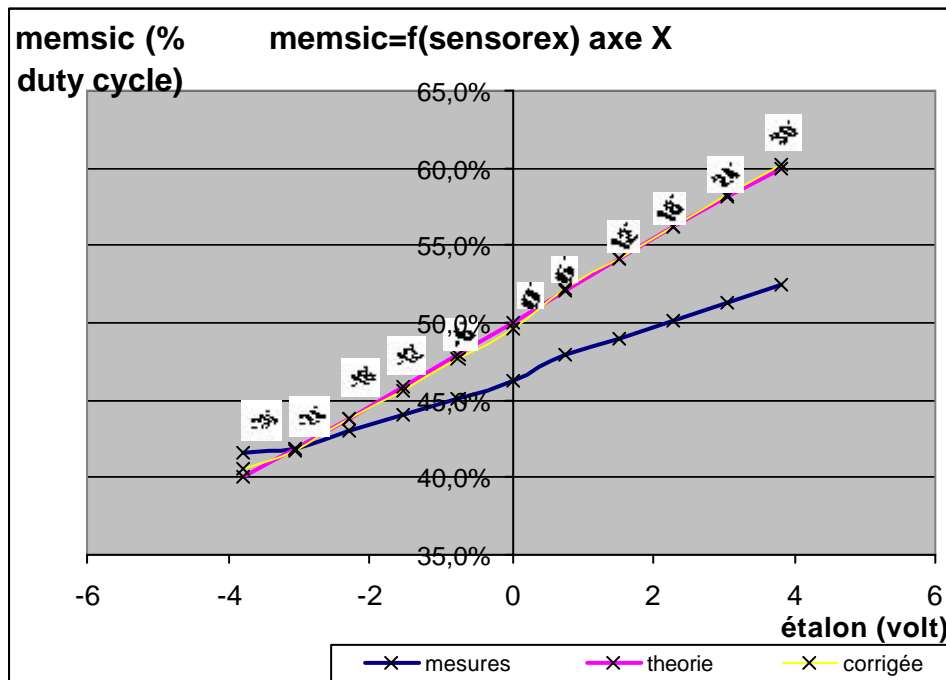


### Annexe 2.3 Angles donnés par le capteur *memsic* en fonction de l'étalon

Le capteur *sensorex* est utilisé comme étalon. Pour plus de précision, les valeurs pour lesquelles je mesure la sortie du capteur *memsic* correspondent aux valeurs des fiches d'étalonnage.

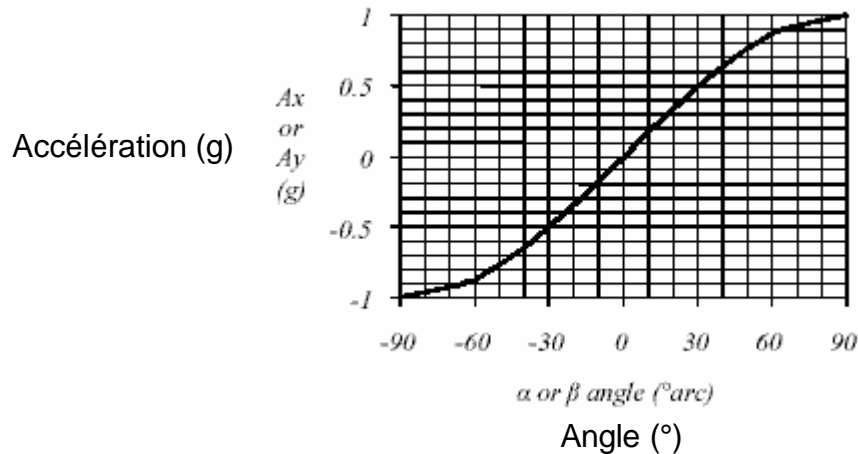
Si le capteur *memsic* était parfait, la courbe serait linéaire et passerait par 50% du duty cycle, comme on peut l'observer ci-dessous.

Pour le relevé de l'axe Y, il n'est pas nécessaire d'afficher la courbe corrigée pour constater qu'avec une correction de type  $a \cdot x + b$  on retrouve les valeurs théoriques.

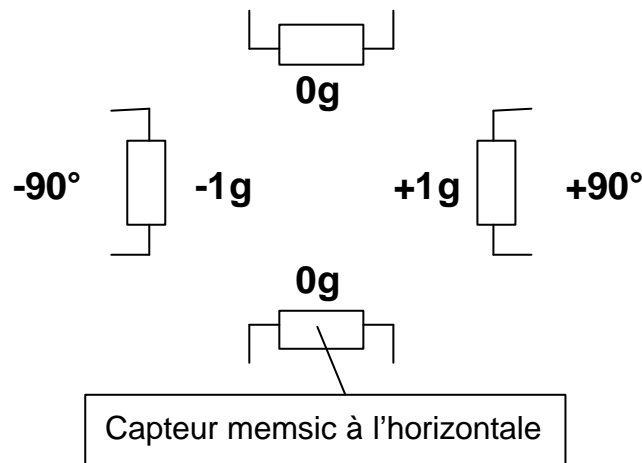


## Annexe 2.4 Graphique de conversion « accélération / angle »

Tirée de la documentation *memsic*, la courbe ci-dessous représente l'angle en fonction de l'accélération.



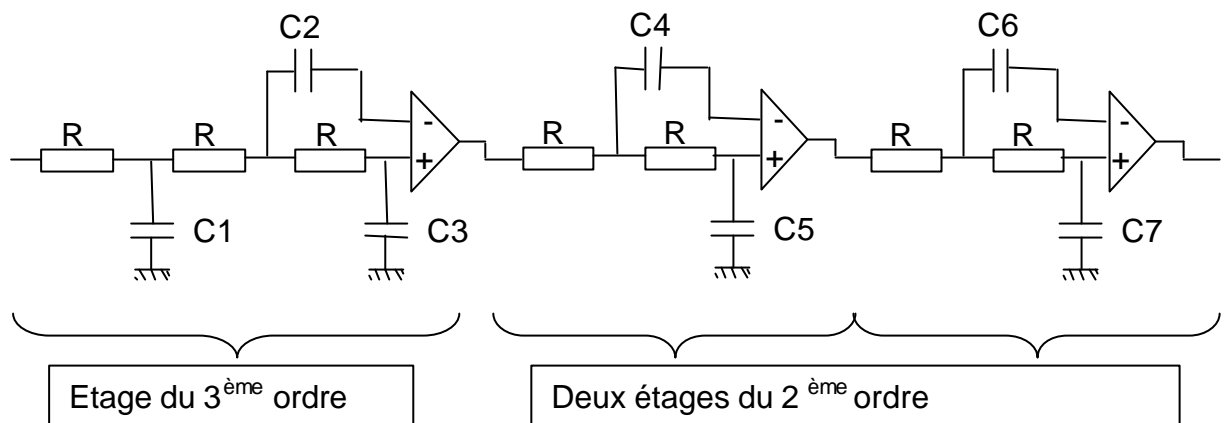
La caractéristique est linéaire entre  $+60^{\circ}$  et  $-60^{\circ}$ , c'est pourquoi on retrouve ces valeurs lors des relevés de la sortie du capteur en fonction de l'inclinaison.



Lorsque le capteur est à l'horizontale, l'accélération théorique est de 0g. A un angle de  $90^{\circ}$ , l'accélération est de 1g, et pour  $-90^{\circ}$ , elle est de -1g.

### Annexe 3. Valeurs normalisées pour les composants du filtre de Butterworth du septième ordre.

Schéma de câblage d'un filtre de Butterworth du 7<sup>ème</sup> ordre. C'est en fait une suite d'intégrateurs, un du troisième ordre suivi de deux du deuxième ordre.



Les valeurs des composants sont normalisées par rapport à la fréquence de coupure du filtre, j'ai choisi 20Hz.

On pose  $R=10K?$   
 $BP=20Hz$   
 $C0=1/(1000*2\pi*20)=796nF$

| Etages                          | Coef normalisés | Valeurs calculées | Valeurs réelles |
|---------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 3 <sup>ème</sup> ordre          | $C1=1.531*C0$   | 1.2 $\mu$ F       | 1.5 $\mu$ F     |
|                                 | $C2=1.336*C0$   | 1.06 $\mu$ F      | 1.2 $\mu$ F     |
|                                 | $C3=0.4885*C0$  | 389nF             | 400nF           |
| Premier 2 <sup>ème</sup> ordre  | $C4=1.604*C0$   | 1.27 $\mu$ F      | 1.5 $\mu$ F     |
|                                 | $C5=0.6235*C0$  | 496nF             | 600nF           |
| Deuxième 2 <sup>ème</sup> ordre | $C6=4.493*C0$   | 3.6 $\mu$ F       | 2.7 $\mu$ F     |
|                                 | $C7=0.2225*C0$  | 177nF             | 220nF           |

Pour les amplificateurs opérationnels, j'ai utilisé un LM 339.

Toutes mes informations sont tirées du site :  
[http://istpc41.cicrp.jussieu.fr/~auvray/CSE011\\_Filtres\\_Actifs.pdf](http://istpc41.cicrp.jussieu.fr/~auvray/CSE011_Filtres_Actifs.pdf)

### Annexe 4. Tableau de comparaisons entre quelques inclinomètres

| Marque                               | Référence    | Caractéristiques   | Précision                   | Particularités                          | Prix unitaire |
|--------------------------------------|--------------|--|-----------------------------|---|---------------|
| Memsic<br>www.memsic.com             | MXEB002      | Carte d'évaluation.  |                             |   | \$ 10.00      |
|                                      | MXA2500AL    | Ces trois produits ont une sortie entre 0 et 5V avec le 0g a 1.25V.      | <2mg 500mV/g<br><0.2° près  | Moins cher.                             | \$ 11.95      |
|                                      | MXA2500EL    |  | <1mg 500mV/g<br><0.1° près  | Moins sensible à la température.        | \$ 12.30      |
|                                      | MXA2500GL/ML |  | <1mg 500mV/g<br><0.1° près  | Moins de bruit.                         | \$ 12.30      |
|                                      | MXR2999GL/ML | Sortie proportionnelle a la tension d'alimentation (2.75V < alim < 5V ). | <1mg 1000mV/g<br><0.1° près | Le plus précis.                         | \$ 12.30      |
| Sensorex<br>www.sensorex.fr          | 46 122       | ± 30°  | 20mV/g<br><0.06° près       | Fiable et robuste,<br>Cher, encombrant. | € 840.0       |
| Analog device<br>www.analog.com      | ADXL 203     | ± 1.7 g. (±90°)<br>Disponible en août 2003.                              | 0.06° près                  | Miniaturisé, précis, et peut coûteux.   | \$ 7.50       |
| TWK<br>www.twk.de                    | EKN 445      | ±45°   | 60mV/°<br>0.001° près       | Robuste.                                | € 179.00      |
| Nordic<br>Transducteur<br>www.ntt.dk | NG2          | ±30°   | ±0.008° d'erreur            | Fixation simple.                        | € 233.00      |
| Motorola<br>www.motorola.fr          | MMA1260D     | ± 1.5 g. (±90°)  | 1200mV/g<br>non normalisée  | Peut s'utiliser pour l'axe Z.           | \$ 7.54       |

---

# **ANNEXE 5.**

## **FICHES D'ÉTALONNAGE DU**

### **CAPTEUR *SENSOREX*.**

---

# **ANNEXE 6.**

## **DOCUMENTATION**

### **CONSTRUCTEUR DU CAPTEUR**

#### ***MEMSIC.***

AN-00MX-001 Documentation générale des accéléromètres  
L'inclinaison avec un accéléromètre thermique  
Documentation de l'accéléromètre MXEB002