



INSTITUT  
NATIONAL  
des SCIENCES  
APPLIQUÉES



Projet de Physique P6-3  
STPI/P6-3/2008 – n°25



Nom des étudiants

Jonathan BAUDOIN

Jean-Marc BESNARD

Matthieu LE GARS

Sébastien MARRET

Laura VASSIL

Enseignant(s)-responsable(s) du projet

Benoit VIEILLE



***Etude du comportement d'une  
pédale dynamométrique de vélo***



À TAILLE  
HUMAINE  
À L'ECHELLE  
DU MONDE



Date de remise du rapport : **24/06/08**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2008 – n°25**

Intitulé du projet : ***Etude du comportement d'une pédale dynamométrique de vélo***

Type de projet : ***étude de cas, simulation***

Objectifs du projet :

- Comprendre l'intérêt du sujet
- Recherche bibliographique sur les systèmes mécaniques embarqués permettant de mesurer les efforts en temps réel
- Etude d'une solution imposée : équilibre pédale, bilan des torseurs aux liaisons
- Capteur à jauges : utilité, exemples d'applications (notions de base sur la résistance des matériaux, application aux différents capteurs)
- Détermination des efforts exercés par le cycliste sur la pédale
- Comment optimiser la puissance développée ? (identifier les paramètres pertinents)

# Table des matières

Introduction.....	4
Travail réalisé et résultats.....	5
<b>1. Systèmes de mesure d'effort.....</b>	<b>5</b>
1.1. Les différents types de capteurs.....	5
1.2. Les capteurs de pression.....	9
1.3. La jauge de contrainte.....	14
1.4. Le pont de Wheatstone.....	17
1.5. Les systèmes électroniques embarqués.....	19
<b>2. Présentation de la pédale dynamométrique.....</b>	<b>21</b>
<b>3. Calculs et résultats.....</b>	<b>23</b>
3.1. Etude statique de la pédale.....	23
3.2. Comportement des capteurs.....	27
3.3. Conclusion de l'étude.....	30
<b>4. Simulation SolidWorks.....</b>	<b>32</b>
4.1. Dessin des pièces.....	32
4.2. Assemblage.....	33
4.3. Simulation.....	33
Conclusion et perspectives.....	36
Bibliographie.....	37
Annexes.....	38

# Introduction

## *Contexte du travail, description de l'organisation adoptée pour le déroulement du travail*

Ce travail s'inscrit dans le cadre de notre 4<sup>ème</sup> semestre à l'INSA de Rouen. Nous nous sommes réunis toutes les semaines le jeudi de 14h45 à 16h15, autour de notre professeur Benoit Vieille, réunions auxquelles se sont ajoutées d'autres réunions à caractère exceptionnel (travail à la maison, préparation du dossier, de l'oral...).

## *Objectifs à atteindre pour le projet*

Pour plus de détails sur les objectifs du projet se référer à la page 3. Synthétiquement, la démarche du projet consiste en « l'étude du comportement d'une pédale dynamométrique de vélo ». Bien vu, il s'agit du sujet lui-même (!), mais pour pouvoir le développer encore faut-il savoir ce qu'est une pédale dynamométrique. Il s'agit donc d'une pédale équipée de capteurs, destinée à mesurer les efforts s'appliquant sur la pédale. « L'étude du comportement d'une pédale dynamométrique de vélo », c'est donc l'étude des efforts qui y sont exercés, et comment les mesurer.

Pour nous aider dans cette tâche, notre professeur nous a fourni un extrait de la thèse de Cyril Beaulieu, qui a travaillé sur le sujet. Nous étudierons la pédale imaginée par ce dernier et essaierons de comprendre sa démarche.

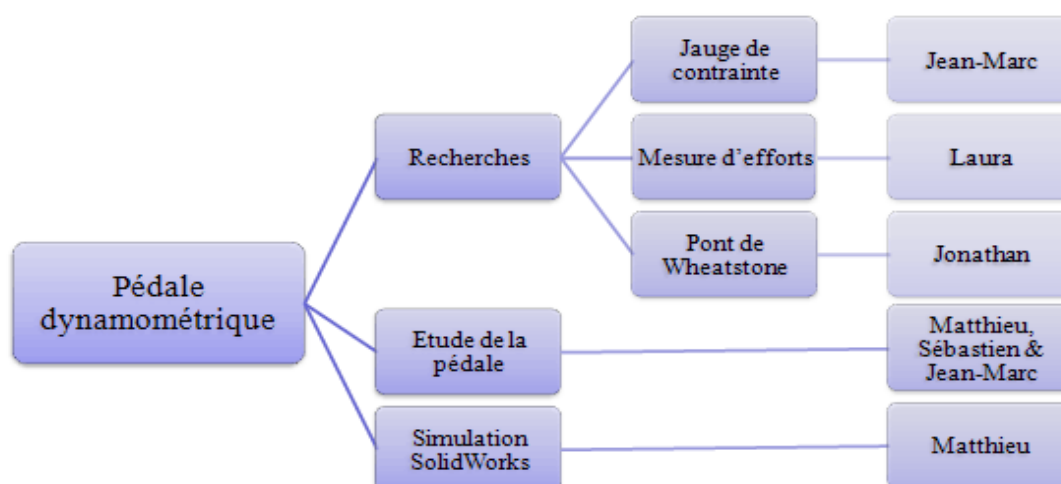
## *Tâches réalisées et étudiants concernés*

Notre premier travail fût une prise de contact avec le sujet, à laquelle tout le monde a participé, avec notamment la lecture de l'extrait de la thèse de Cyril Beaulieu que notre professeur avait sélectionné. Mais celle-ci n'était pas très facile d'accès (de compréhension, j'entend), et il nous a été dans un premier temps difficile de cerner l'essence du sujet.

Certains ce sont donc chargés de collecter des informations sur le sujet : systèmes de mesures de force, recherche d'autres systèmes de pédales dynamométrique, etc. Pendant que d'autres, plus calés en mécanique, se sont attelés aux calculs avec l'aide de notre enseignant.

Il était en effet difficile pour nous autres ne faisant pas la thématique mécanique (le rédacteur de ces lignes étant dans ce cas !) de comprendre les calculs en question, qui faisaient appel à certaines notions complexes que nous n'avions pas vues. Nous avons bien sûr suivi quelques séances de rattrapages sur les moments (abordés de manière laconique en 1<sup>ère</sup> année) et autres torseurs, mais avons vraiment eu du mal à rester accroché au wagon des calculs.

Nous passâmes ensuite à la rédaction du rapport. Matthieu, passionné par le sujet entreprit la rédaction des parties 3 et 4, Sébastien de la partie 2, et Jean-Marc et Laura de la partie 1. Jonathan chapota le tout et se chargea de l'introduction, de la conclusion et de la partie sur le pont de Wheatstone.



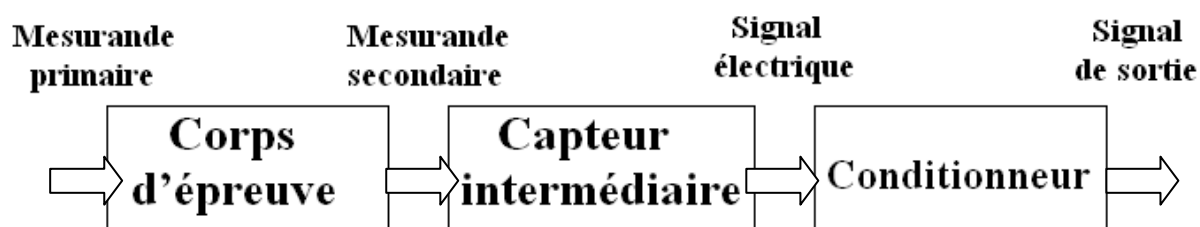
# Travail réalisé et résultats

## 1. Systèmes de mesure d'efforts

### 1.1. Les différents types de capteurs

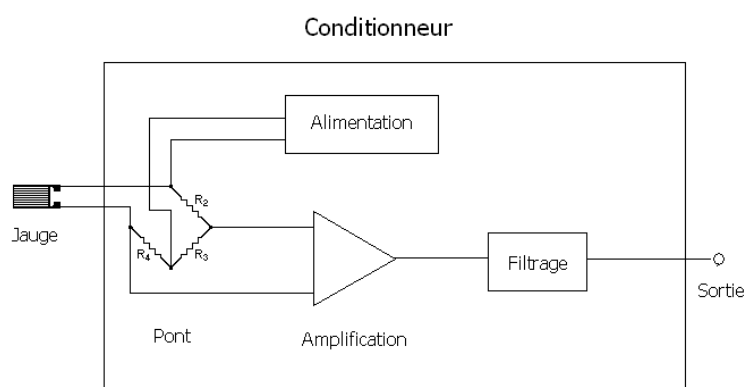
#### 1.1.a. Généralités

Un capteur est une simple interface entre un processus physique et une information manipulable qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable. Il va permettre, sous l'effet du mesurande, de délivrer une grandeur électrique exploitable qui peut être une charge, une tension, un courant ou une impédance (R, L ou C). L'ensemble de ces étapes constitue la chaîne de mesure suivante



(Une mesurande est une grandeur physique : P, T, ...)

Pour amplifier le signal délivré par le capteur, on utilise un conditionneur. Il permet de donner au signal un niveau compatible avec l'unité de visualisation ou d'utilisation. Le conditionneur intègre l'alimentation du capteur et un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.



### 1.1.b. Classification

\* Par apport énergétique : capteurs actifs et passifs

#### - Capteurs actifs :

Ils sont constitués de transducteur et n'ont généralement pas besoin d'alimentation. Ce sont des capteurs que l'on modélise par des générateurs. Ainsi ils génèrent soit un courant, soit une tension, soit une charge électrique en fonction de l'intensité du phénomène physique mesuré.

Exemples de capteurs actifs :

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	thermoélectricité	Tension
Flux électromagnétique (optique)	Photo émission	Courant
	Pyroélectricité	Charge
Déformation, force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

#### - Capteurs passifs :

Ils ont besoin dans la plupart des cas d'apport d'énergie extérieur pour fonctionner. Ce sont des capteurs modélisables par une impédance. Une variation du phénomène physique mesuré engendre une variation de l'impédance. Il faut leur appliquer une tension pour obtenir un signal de sortie.

Exemples de capteurs passifs :

Mesurande	Effet utilisé	matériau
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre
Très basse température	Constante diélectrique	semi-conducteurs

Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité	Alliages nickel
	Perméabilité	Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

\* Par type de sortie : capteurs analogiques et numériques

- Capteurs analogiques :

Ils servent à transformer une grandeur physique en une autre de type variation d'impédance, de capacité ou d'inductance. La sortie est une grandeur physique dont la valeur est proportionnelle à la grandeur physique mesurée par le capteur. Le signal de cette sortie est dit analogique si l'amplitude de la grandeur physique qu'il représente peut prendre une infinité de valeurs continues dans un intervalle donné.

Le signal des capteurs analogiques peut être du type sortie tension, sortie courant, règle graduée, cadran, jauge...

Quelques capteurs analogiques typiques :

- capteur à jauge de contrainte
- LVDT (capteur de déplacement)
- thermocouple (capteur de température)

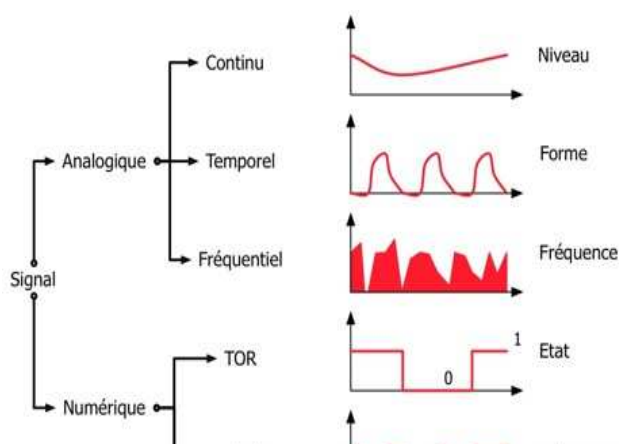
- Capteurs numériques :

La sortie est une séquence d'états logiques qui en se suivant, forment un nombre. La sortie, représentant la grandeur physique, peut prendre une infinité de valeurs discrètes.

Le signal des capteurs numériques peut être du type train d'impulsion (nombre précis d'impulsions ou fréquence précise), code numérique binaire, bus de terrain...

Quelques capteurs numériques typiques :

- capteurs incrémentaux
- codeurs absolus



Signal continu : il varie « lentement » dans le temps et on le retrouve en sortie d'une sonde de température, de pression ou encore d'une photo résistance.

Signal temporel : c'est la forme de ce signal au cours du temps. C'est aussi la trace du signal sur l'écran d'un oscilloscope.

Signal fréquentiel : c'est le spectre qui transporte l'information désirée : analyse vocale, sonar, spectrographie.



### 1.1.c. Caractéristiques

Pour utiliser un capteur dans les meilleures conditions, il est souvent utile de pratiquer un étalonnage et de connaître les incertitudes de mesures relatives à celui-ci.

On caractérise un capteur selon plusieurs critères dont les plus courants sont :

- la grandeur physique observée
- son étendue de mesure
- sa sensibilité
- sa précision
- sa linéarité
- son temps de réponse
- sa bande passante
- sa résolution
- son hystérésis

Les principes physiques courants exploités par les capteurs sont :

- la variation de capacité, d'inductance, de résistance
- l'effet Hall, l'effet Doppler, l'effet photoélectrique
- la dilatation et la déformation
- la piézo-électricité
- le principe de la corde vibrante

### 1.1.d. Exemples de capteurs

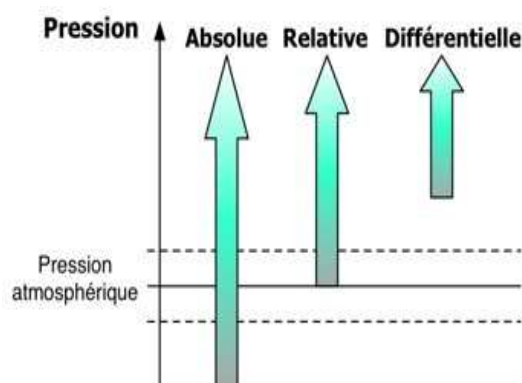
Les capteurs sont des instruments de mesures qui interviennent dans beaucoup de domaines de mesure :

- distance : capteur capacitif, optique, à ultrason...
- lumière : photodiode, capteur photographique, cellule photoélectrique...
- sons : microphone, hydrophone...
- température : thermomètre, thermocouple, pyromètre...
- pression : baromètre, corde vibrante...
- débit : débitmètre (à turbine, ionique, massique...)
- courant : capteur de courant à effet Hall, shunt
- niveau : capteur à flotteur, à sonde capacitive, à rayon gamma...
- déplacement : capteur de position, codeur, corde vibrante...
- contrainte : capteur piézo-électrique, jauge de contrainte...
- inertiels : accéléromètre, inclinomètre...

## 1.2. Les capteurs de pression

### 1.2.a. Généralités

Les capteurs de pression sont basés sur le principe de la transformation en grandeur électrique de la déformation mécanique d'une membrane élastique. Il existe plusieurs types de pression : la pression absolue, relative et différentielle, qui se définissent toutes les trois par rapport à la pression atmosphérique. Cette dernière peut varier avec la pluie ou le beau temps est elle est fonction de l'altitude, car la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer est, à 15°C, de 1013mbar.



Pression absolue : C'est la différence de pression par rapport au vide. C'est la pression réelle, dont on tient compte dans les calculs sur les gaz. Pour mesurer une pression absolue, il faut faire un vide poussé dans une chambre dite de référence.

Pression relative : C'est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique. Elle est le plus souvent utilisée, car la plupart des capteurs sont soumis à la pression atmosphérique.

Pression différentielle : C'est une différence entre deux pressions, dont l'une peut servir de référence. Une pression différentielle peut prendre une valeur négative.

Le vide correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni dépassé.

Il existe plusieurs types de capteurs de pression :

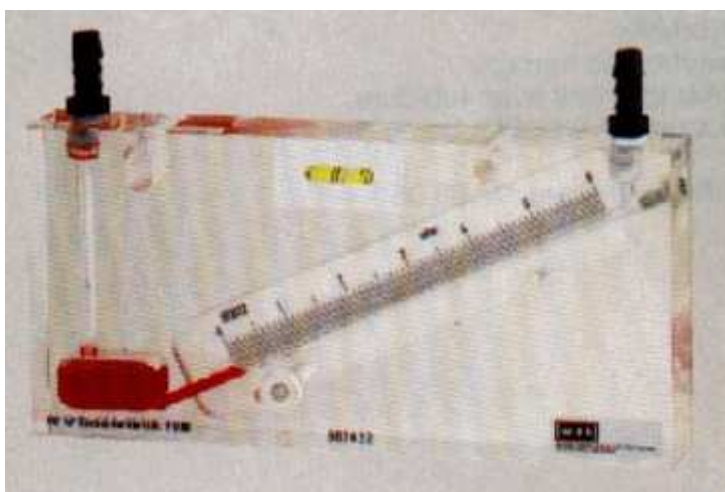
- piézo-électrique : la contrainte mécanique que la pression exerce sur un matériau piézoélectrique génère des charges que l'on peut mesurer électroniquement.
- baromètre à mercure : la pression atmosphérique est équilibrée par une colonne de mercure surmontée d'un espace clos et vide.
- baromètre à gaz : il utilise la variation de volume de gaz sous l'effet des variations de la pression atmosphérique.
- baromètre anéroïde : la pression atmosphérique s'exerce sur une enceinte métallique, hermétiquement close et partiellement vide d'air. Celle-ci se déforme de façon élastique et un système mécanique permet d'amplifier les mouvements qui résultent des variations de pression pour les rendre visibles sur un cadran ou les enregistrer sur une bande de papier millimétré.
- vacuomètre : mesure la valeur de la pression des gaz résiduels dans un tube à vide.
- manomètre : il en existe de plusieurs sortes (manomètre à déformation de solide, manomètre hydrostatique), que nous allons développer ci-dessous.

Un capteur de pression est constitué de plusieurs éléments :

- le transducteur : la mise à l'air libre par un conduit est indispensable car les variations de pression mesurées sont relatives à la pression atmosphérique.
- le module d'alimentation : varie suivant les capteurs de 220 VA à 5 VC par batterie et panneau solaire.
- l'ensemble préamplificateur/amplificateur : traite les signaux issus du transducteur.

La sensibilité peut varier de 0.5 mm à 1 cm suivant la gamme de mesure. La précision est excellente dans les écoulements non chargés.

### 1.2.b. Le manomètre hydrostatique

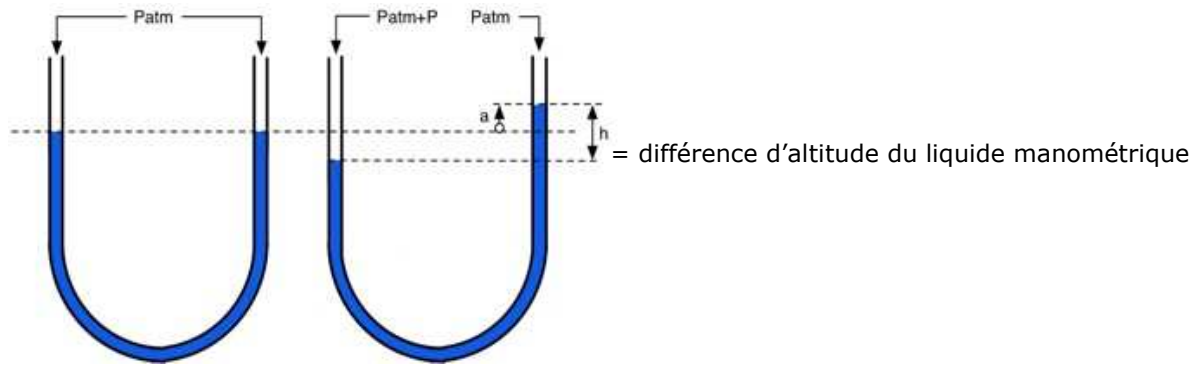


Nous avons l'égalité suivante :

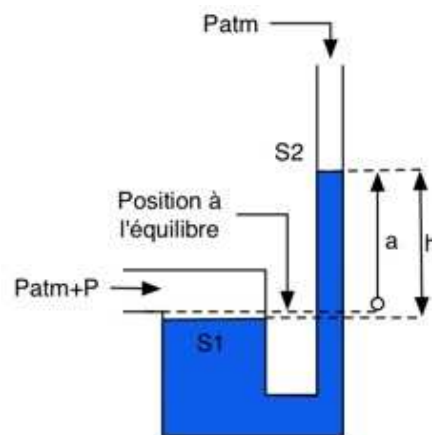
$$h_m = \frac{P_{Pa}}{\rho_{Kg/m^3} \times g_{m/s^2}}$$

La hauteur du liquide fournit une mesure de la pression. Plus la masse volumique du liquide sera faible, plus le résultat sera précis.

Le manomètre hydrostatique simple à une forme en U, comme nous le montre le schéma ci-dessous :



$h$  nous donne une mesure de la différence pression  $P$  entre les deux extrémités du tube. Ce manomètre offre une sensibilité sur sa partie droite. Pour augmenter cette sensibilité, on peut utiliser un tube en U de sections inégales :



Les manomètres à colonne de liquide couvrent un domaine de 0 à  $5 \cdot 10^5$  Pa pour la mesure de pression de gaz uniquement.

#### Avantages :

- bonne précision
- bonne stabilité
- construction simple et peu coûteuse

#### Inconvénients :

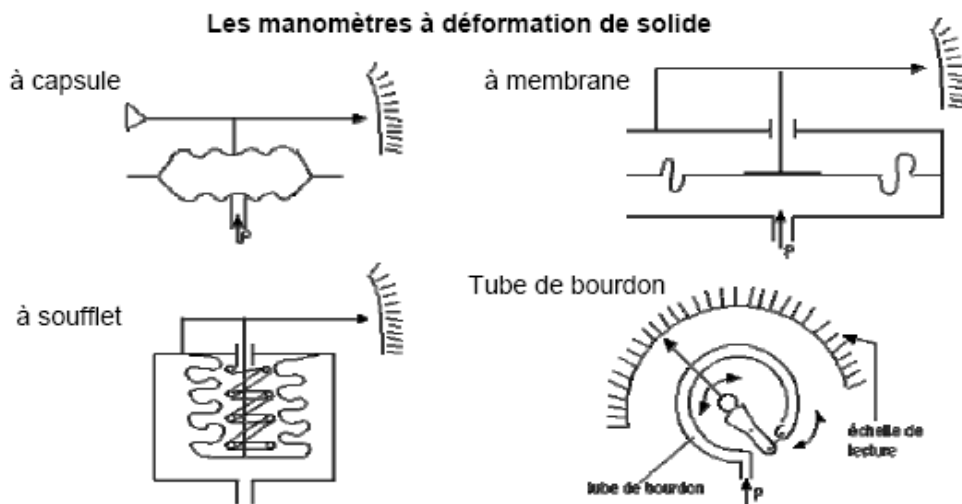
- encombrant et fragile.
- sensible à la température et aux vibrations
- les tubes doivent être parfaitement calibrés
- causes d'erreur multiples : liquides visqueux, malpropres, tubes gras
- ne traduit pas la pression mesurée en un signal analogique exploitable en régulation industrielle

#### Domaine d'emploi :

- mesure des pressions absolues, relatives ou différentielles jusqu'à 2 bars

- la colonne de liquide ne peut dépasser deux mètres
- réservé pour des usages en laboratoire ou comme appareils étalons

### 1.2.c. Le manomètre à déformation de solide

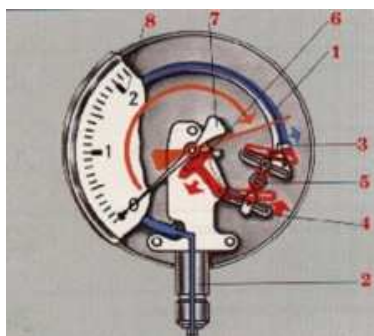


Comme nous pouvons le voir ci-dessus, il existe plusieurs manomètres à déformation de solide. Nous allons étudier uniquement le manomètre à tube de bourdon pour voir son fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients.



Le tube de bourdon est la base de beaucoup de types d'indicateur de pression. Sous sa forme plus simple il se compose d'un tube simple et souple de section ovale formant un arc circulaire. Une extrémité est scellée et libre de ses déplacements, l'autre extrémité est fixée et ouverte à la pression à mesurer. Le tube emploie un indicateur pour indiquer la pression appliquée.

Par l'intermédiaire d'un trou dans le raccord, le fluide à mesurer passe à l'intérieur du tube. La partie mobile finale du tube se déplace lors de changement de pression (effet Bourdon). Ce déplacement qui est proportionnel à la pression à mesurer, est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression.



1. Organe moteur (=tube de Bourdon)
  2. Support de tube
  3. Capuchon du tube
  4. Secteur denté
  5. Bielle
  6. Engrenage
  7. Aiguille
  8. Cadran
- Brassé, soudé et vissé ensemble
- systeme de mesure (ils sont montés dans un boîtier)

Avantages : précision, domaine d'emploi

Inconvénients : prix, complexité

Domaine d'emploi :

- mesure de pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides (ni visqueux ni cristallisant) de 0,6 à 4 kbar
- il faut les protéger des surpressions : il ne permet pas de mesurer les phénomènes rapides et évolutifs de pression
- incertitude de mesure : de 0,02 à 0,2 pour le domaine de mesure de 0 à 3 kbar

Les capteurs de pression équipent actuellement la majorité des stations de mesure du réseau limnométrique français. Ils présentent le meilleur rapport qualité/prix, et les constructeurs proposent des matériels de plus en plus performants.

### 1.3. La jauge de contrainte

Même s'il existe plusieurs méthodes différentes pour mesurer la déformation, la plus courante est le recours à la jauge de contrainte, matériel dont la résistance électrique varie en fonction de la charge exercée sur le matériau, grâce à sa taille compacte et sa haute précision. Cette jauge est également compatible pour des mesures dynamiques.

Pour commencer, une contrainte, comme nous le verrons plus tard, est un état de pression dans lequel se trouve un matériau lorsqu'on lui applique une force. En fait, il s'agit d'une réaction dans laquelle les atomes se déplacent et se réorganisent pour compenser les forces extérieures.

Une jauge de contrainte, appelée aussi jauge de déformation, va donc mesurer les déformations produites sur le corps sous l'effet de contraintes mécaniques. Il s'agit d'un dispositif conducteur dont la résistance va varier suivant cette déformation. La mesure va alors s'effectuer à partir d'une variation de résistance. Mais nous pouvons nous demander comment, à partir d'une déformation, on assiste à une variation de résistance. En effet, sous l'effet d'une contrainte, la longueur de la jauge va augmenter et sa section diminuer. Ainsi la relation suivante permet d'expliquer la variation de résistance :

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{4 \cdot l}{D^2 \cdot \pi}$$

$\rho$  : résistivité du conducteur

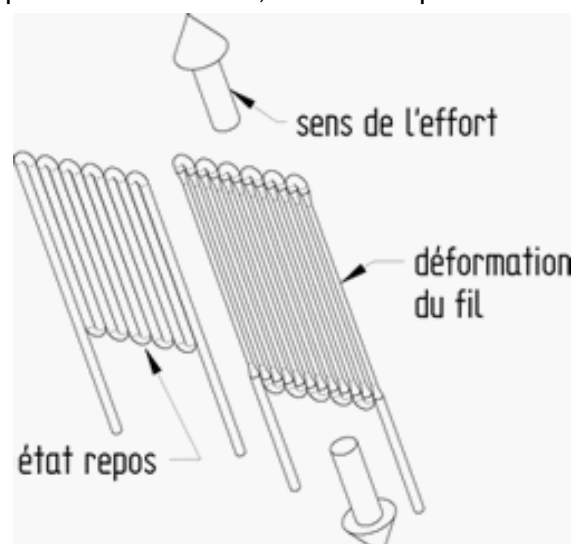
$l$  : longueur du conducteur

$A$  : aire de la section du conducteur

$D$  : Diamètre de la section du conducteur

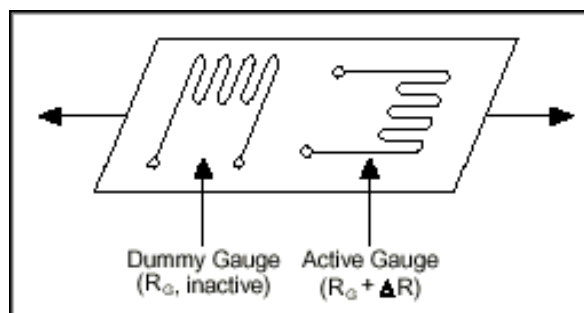
Ainsi, pour une résistance de départ de 120  $\Omega$ , une contrainte de 1000  $\mu\text{m/m}$  causera une variation de résistance de 0,24  $\Omega$ . Néanmoins, en pratique, les mesures de déformation impliquent rarement des quantités supérieures à quelques microdéformations ( $\epsilon \times 10^{-6}$ ). Par conséquent, le fait de mesurer une déformation nécessite la mesure précise de très petites variations de la résistance. Pour mesurer des variations si petites de la résistance, les jauges de contrainte sont presque toujours utilisées dans une configuration en pont avec une source d'excitation de tension. Nous verrons par la suite comment fonctionne ce pont, appelé pont de Wheatstone.

La jauge de contrainte la plus courante est la jauge métallique. Comme on peut le voir sur le schéma, il est composé d'un fil très fin, monté en spirale.



Le fil est monté en spirale pour réduire au minimum les déformations dans la direction horizontale sur le schéma. Ainsi, la variation de résistance n'est relative qu'aux déformations causées dans le sens de l'effort. Mais il y a un autre avantage à ce montage sinusoïdal du fil. En effet, la variation de résistance d'un seul fil étant trop faible, le fait de le monter ainsi va permettre à la contrainte de concerner plusieurs tronçons du fil et ainsi accentuer la variation de résistance du montage. La grille est attachée directement au spécimen sous test. Par conséquent, la déformation est directement transmise à la jauge de contrainte, qui réagit par un changement de sa résistance électrique.

Cependant, le matériau de la jauge de contrainte et du spécimen sous test a quelques effets parasites. Pour commencer, il réagit aux variations de température, ce qui fait varier la résistance et ainsi cette variation ne dépend plus seulement de la déformation. On utilise alors 2 jauges dans des sens opposés, comme le montre le schéma :



En utilisant deux jauges de contrainte, il est possible de minimiser davantage l'effet de température. Par exemple, ce schéma illustre la configuration d'une jauge de contrainte où une jauge est active et une seconde jauge est placée transversalement à la contrainte appliquée. Par conséquent, la contrainte a peu d'effet sur la seconde jauge, qualifiée de "factice". En revanche, toute variation de température affecte les deux jauges de la même manière. Comme les variations de température sont identiques dans les deux jauges, le rapport de leur résistance ne change pas, la tension non plus, et les effets de la variation de température sont réduits au strict minimum.

La majorité des jauges de contrainte ne supportent pas la déformation elle-même. Elles sont collées à des pièces support qui font également office d'amplificateur. C'est la déformation de la pièce support qui va engendrer la déformation de la jauge de contrainte. Il faut donc noter que plus le support est massif, plus la déformation de la jauge sera faible. De même, il est préférable que le support doit être conçu avec un matériau facilement déformable afin d'obtenir un signal de forte amplitude encore une fois. On appelle alors ce montage jauge-support, un capteur à jauge de contrainte.

La jauge de contrainte est donc composée d'un corps d'épreuve, défini plus tôt, qui supportera les déformations, d'un support qui fait le lien entre le corps d'épreuve et la pièce déformée. Il doit donc répondre à des caractéristiques bien définies : déformation facile, bonne aptitude au collage, et un coefficient de variation relativement faible. De plus, la colle réalise la liaison entre le support de la jauge et le corps d'épreuve. Elle a également le rôle d'isolant. Enfin, le dernier composant est bien sûr la jauge en elle-même.

Le matériau utilisé apparaît donc très important pour l'efficacité de la jauge de contrainte. Depuis quelques années, de nouveaux types de jauges apparaissent, comme par exemple la jauge en silicone. Nous allons donc comparer ici les caractéristiques d'une jauge de contrainte métallique et une jauge de contrainte en silicone. Tout d'abord, comme la



contrainte est plus faible pour une jauge en silicone, la durée de vie de celle-ci sera beaucoup plus longue, c'est-à-dire quasi infinie. Concernant le signal de sortie, les jauges en silicone produisent un signal qui est 30 fois supérieur à celui des jauges en métal. Cependant, la température influe plus sur les capteurs en silicone. Nous pouvons donc déduire de cette comparaison que les jauges en silicone sont plus avantageuses et les capteurs utilisant cette technologie se développent donc au détriment de ceux qui utilisent le métal. En effet, pour la même précision, les jauges en silicone sont plus résistantes et durables.

Nous allons maintenant voir un exemple d'applications des capteurs d'effort : les systèmes électroniques embarqués. En effet, beaucoup de ces systèmes qu'on retrouve par exemple dans les transports (voitures, vélos, ...), l'aéronautique (fusées, sondes, ...), la médecine (équipements médicaux), ... utilisent des capteurs d'effort.

## 1.4. Pont de Wheatstone

Même s'il ne s'agit pas à proprement parler d'un système de mesure d'efforts, chose promise chose due, penchons nous un peu sur le pont de Wheatstone, et introduisons le de manière à en percer l'utilité :

Imaginons que nous ayons voulu construire un prototype semblable à celui de Cyril Beaulieu (voir suite du dossier). Passons outre les contraintes financières que cela aurait causé à l'INSA pour passer directement aux contraintes physiques ! D'après tout le travail réalisé en amont, nous aurions pu, à partir des déformations des capteurs, remonter aux efforts fournis par le cycliste. Mais ce serait alors posée l'inévitable question : comment donc accéder à la déformation des capteurs ?!

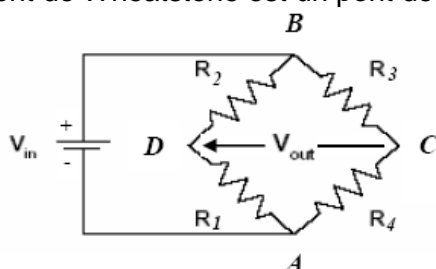
"Well, that's exactly what I'm going to tell you about." Comme expliqué précédemment, le fonctionnement des capteurs à jauges de contraintes se base sur la variation de la résistance électrique de la jauge, celle-ci étant proportionnelle à sa déformation selon la relation :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L}$$

Où  $k$  est une constante qui dépend des matériaux utilisés et de la température, caractérisant la sensibilité de la jauge. A titre d'exemples,  $k$  est proche de 2 pour les jauges métalliques, et comprise entre 100 et 200 pour les jauges semi-conductrices.

Se pose alors une dernière question, à savoir comment mesurer la variation de résistance de la jauge ? C'est ici que va intervenir notre dernier et néanmoins meilleur ami, le pont de Wheatstone. Il faut en effet savoir que la variation de résistance des jauges de contrainte, même si elle est bien réelle, est très faible, et que pour qu'elle soit efficacement mesurable, celle-ci doit être mesurée à l'aide d'un pont de Wheatstone.

Un pont de Wheatstone est un pont de 4 résistances disposées comme suit :



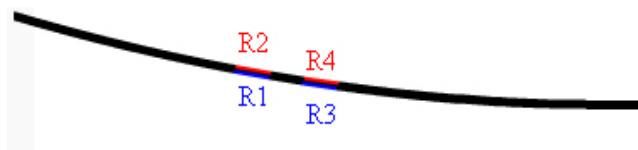
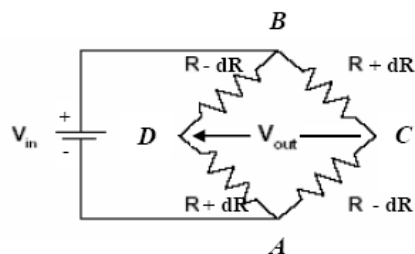
En appliquant le théorème de Millman aux points C et D on obtient ce qu'on appelle « l'équation de base » :

$$V_{out} = \frac{V_{in} (R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_2 + R_1)(R_3 + R_4)}$$

*Equation de base du pont*

Concrètement, un capteur de force contient donc le plus souvent 4 jauges de déformation, avec R1 et R3 travaillant en compression et R2 et R4 en traction, ou vice versa. Elles subissent la même déformation en valeur absolue  $|dR|$ .

Si par exemple R1 et R3 varient de  $dR$  et R2 et R4 de  $-dR$  :



Dans ce cas, l'équation de base devient :  $dV_{out} = \frac{V_{in} (2.4 dR R^3 - (-2.4 dR R^3))}{(4 dR R^2)(4 dR R^2)} = V_{in} \frac{dR}{R}$

D'où :  $V_{out} = \frac{V_{in} \cdot \Delta R}{R}$

On connaît  $V_{in}$ , et  $V_{out}$  est mesurée par un voltmètre ; par conséquent on obtient la formule exploitable (pour cet exemple) suivante :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{k \cdot V_{out}}{V_{in}}$$

La boucle est bouclée, dommage que le projet ne comporte pas de partie expérimentale !

## 1.5. Les systèmes électroniques embarqués

Tout d'abord un système embarqué peut être défini comme un système électronique et informatique autonome, dédié à une tâche bien précise. Le premier système électronique embarqué a servi de guidage à la mission lunaire Apollo. Un tel système doit faire face à certaines contraintes de taille (espace limité de quelques Mo), de puissance de calcul (il ne doit calculer que le strict minimum demandé), d'énergie (il utilise des batteries), temporelles (le calcul doit être rapide) et enfin il doit être sûr, car il peut mettre la vie d'humains en danger, comme sur les voitures ou pour la mission lunaire Apollo. Un système embarqué peut avoir différents objectifs : Certains doivent répondre à des contraintes réelles pour des raisons de sécurité et de rentabilité, d'autres n'ont pas de contraintes de performances, mais permettent juste de simplifier un système ou de réduire les coûts de fabrication.



Les jauges de déformation sont donc utilisées sous d'autres formes, et notamment dans le cyclisme. En effet, ils peuvent servir à quantifier l'intensité du cycliste. L'intensité du cycliste ne peut pas être mesurée grâce à sa vitesse, à cause de la pente ou du vent qui rentrent évidemment en compte. De même, la fréquence cardiaque ne peut servir à quantifier cette intensité, car elle est influencée par la température, l'hydratation du cycliste, l'altitude, la position sur le vélo, ... Pourtant, la quantification de l'intensité du coureur peut apparaître importante car elle permet d'évaluer les efforts et de déterminer précisément la charge d'entraînement afin d'éviter le surentraînement. Pour cela, on utilise la puissance, qui apparaît comme le meilleur indicateur de l'effort fourni. Différents systèmes embarqués ont alors été utilisés à partir de la mesure de puissance :

- Le SRM, système allemand, mesure la déformation du plateau du pédalier grâce à des jauges de contraintes. Cependant, ce système présente un prix très élevé, et les jauges sont sensibles aux variations de température.



- L'Ergomo, autre système allemand, mesure la déformation de l'axe du pédalier grâce à deux capteurs optiques. Il est utilisable sur tous les vélos et avec tout matériel. Mais elle présente également des désavantages importants puisqu'elle ne mesure que la puissance développée par la jambe gauche.



- Le Polar S710, un système finlandais, mesure la vibration de la chaîne par l'intermédiaire de deux capteurs optiques. Il est également utilisable sur tous les vélos et peu cher mais les vibrations de la route peuvent influencer sur la capacité du système

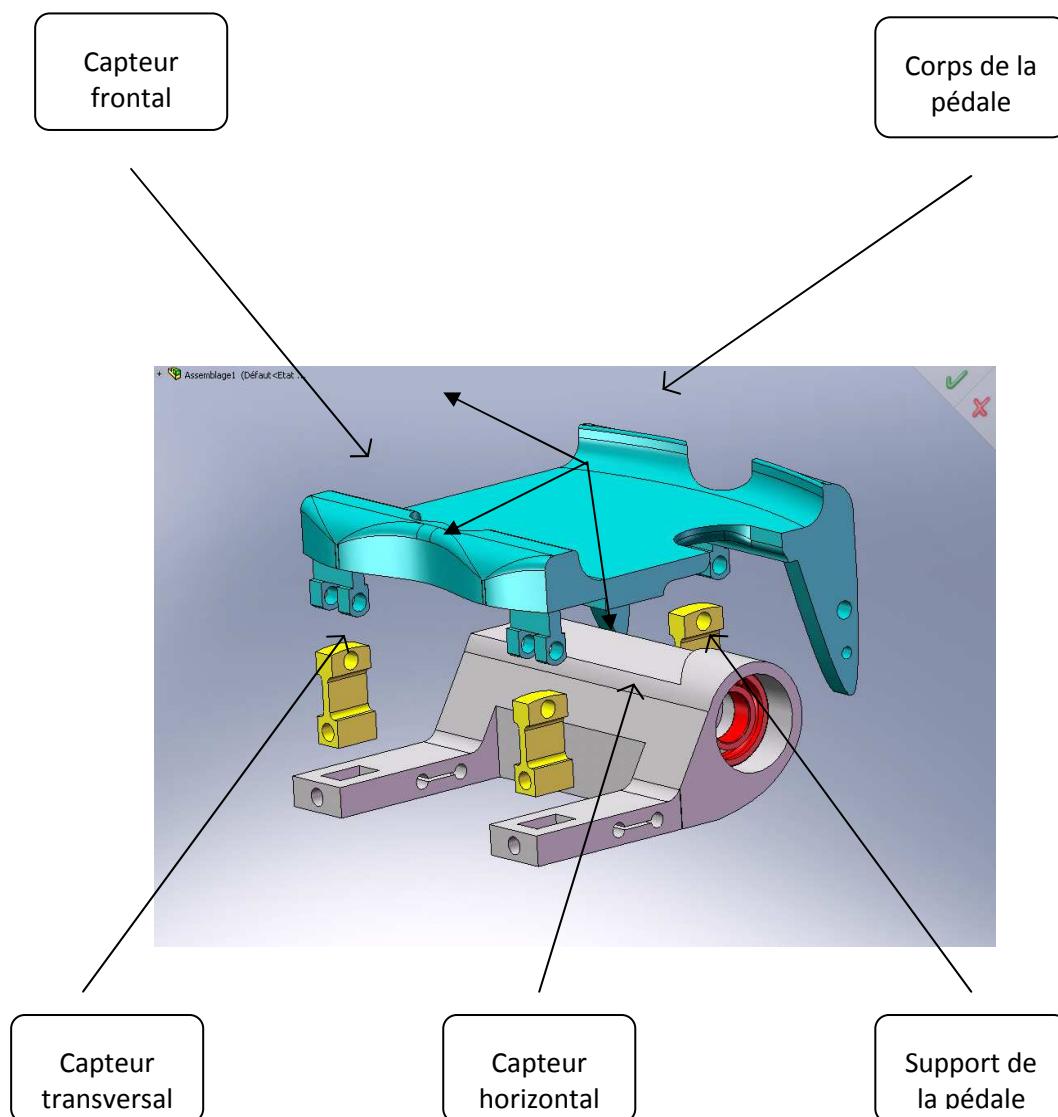


- Egalement, le système américain Ibike utilise des capteurs tels qu'un accéléromètre, pour mesurer la résistance et ainsi, comme la jauge de déformation, calculer la puissance. Il est léger, facile à installer, pas cher et une nouvelle fois utilisable sur tous les vélos.
- Enfin, il existe un autre système américain appelé PowerTap, dont nous allons expliquer l'intérêt. Cet appareil mesure la puissance développée grâce à une mesure de déformation du moyeu à l'aide de 4 jauges de contrainte. Son prix est accessible, et il est facile à transférer. Cependant, il nécessite l'utilisation d'une roue PowerTap incluse dans le système, il est moins précis lors des sprints, ne peut être utilisable avec des freins à disque, et sur piste.

## 2. Présentation de la pédale dynamométrique

L'objectif principal d'une pédale dynamométrique est de mesurer précisément les efforts appliqués par le cycliste sur la pédale. Ce système ne constitue pas un moyen pour le cycliste d'améliorer ses performances en terme de puissance mais permet surtout de connaître les différentes sollicitations appliquées sur le vélo et ainsi d'optimiser les structures, en l'occurrence le cadre et les pédales. De plus, les problèmes liés au pédalage tels que les blessures au genou peuvent être étudiés grâce à cette pédale. Intéressons nous maintenant aux différents éléments de la pédale.

Vue éclatée de la pédale :



La pédale dynamométrique est constituée de 3 parties principales :

- Le corps de la pédale : Il s'agit de la partie où l'effort est appliqué, c'est-à-dire de l'endroit où le cycliste pose son pied et appuie. Il est important de savoir que cette pédale est automatique, ce qui signifie que le pied du cycliste est calé et ne bouge pas pendant l'effort. Le corps de la pédale est par ailleurs muni de 3 capteurs frontaux dont le but de mesurer la déformation selon l'axe z.
  
- Les capteurs transversaux : Tout comme les capteurs frontaux, les capteurs transversaux permettent de connaître les déformations de la pédale. En revanche, de part leur position sur la pédale, ce sont les déformations selon l'axe y qui sont observées.
  
- Le support de la pédale : Cette partie est en réalité la base de la pédale, celle sur laquelle le corps repose et dans laquelle les capteurs transversaux viennent s'emboîter. Le support de la pédale contient lui aussi des capteurs, les capteurs horizontaux, au nombre de 2, qui quant à eux se déforment selon l'axe x.

Enfin, même si cela n'apparaît pas sur le schéma puisque cela n'est soumis à aucun effort, le boîtier contenant les composants électroniques est une pièce à part entière de la pédale dynamométrique. Cet élément, placé sous le support de la pédale, permet d'acquérir les données pour ensuite pouvoir les étudier.

Concernant les différents capteurs présents sur la pédale, il faut savoir qu'ils sont placés à des endroits bien précis, afin de subir au mieux les déformations causées par l'effort appliqué. On remarque en effet que les endroits les plus soumis coïncident avec les positions des capteurs. Mais cette partie sera détaillée plus loin dans le dossier.

## 3. Calculs et résultats

### 3.1. Etude statique de la pédale

#### 3.1.a. La statique

##### 3.1.a.i. Notion de Torseur

Le torseur n'a pas de signification physique. C'est un outil utilisé pour simplifier les calculs de statique avec des efforts et des moments. Le torseur se compose de deux éléments de réduction :

- La résultante  $R$  qui est un vecteur somme des actions appliqué au solide
- Un moment  $M_A$  qui désigne une force par un bras de levier. Le moment s'exprime toujours en un point.

Le torseur exprimé au point A, point d'application du moment s'écrit alors :

$$\{T(\bar{S}/S)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{R} \\ \overline{MA} \end{array} \right\}_A$$

##### 3.1.a.ii. Notion de Statique

Pour étudier l'équilibre de la pédale nous avons eu recours à une partie de la mécanique générale nommée la statique. La statique désigne l'étude d'un solide ou d'un ensemble de solide à l'état d'équilibre. C'est-à-dire immobile ou en mouvement uniforme dans un référentiel galiléen.

La méthode de résolution est la suivante :

1. Isoler la pièce que l'on désire étudier
  - On isolera d'abord les pièces soumise à deux forces pour simplifier le système. Dans le cas d'un solide soumis à deux forces, celle-ci sont portées par la même droite, de même norme mais de sens opposé.
  - Ensuite on isole le solide soumis à trois forces ou plus.
2. On effectue le bilan des actions mécaniques extérieures appliquées au solide.
3. On applique le PFS : Principe Fondamental de la Statique
  - Enoncé du PFS : Un solide ou un système est en équilibre par rapport à un référentiel au cours du temps si chaque point de ce solide conserve une position fixe par rapport à ce référentiel. C'est-à-dire si la somme des forces et la somme des moments appliqués au solide est nul au cours du temps.

$$\{T(\bar{S}/S)\} = \{0|0\}_{Ct}$$



- Pour exprimer le PFS, tous les torseurs doivent être ramenés au même point grâce à la formule de transport

$$\overline{Ma} = \overline{Mb} + \overline{AB} \wedge \overline{R} \quad \text{Où R désigne la résultante appliquée au solide}$$

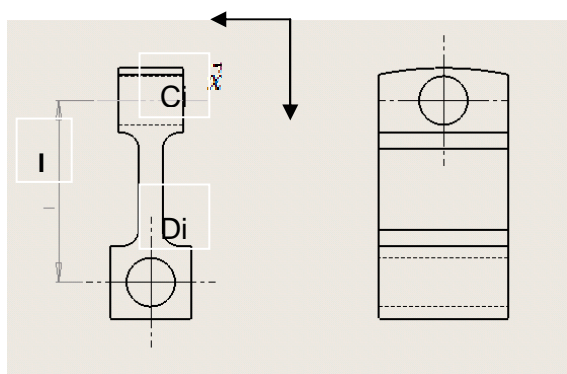
4. Le PFS nous donne un système d'équation que l'on résout pour déterminer la résultante et le moment.

### 3.1.b. Equilibre de la pédale

#### 3.1.b.i. Equilibre du capteur Ti

Les capteurs transversaux Ti ne sont soumis qu'à deux forces. On traitera donc cette pièce en premier. Soit l la hauteur entre les deux axes d'alésage.

**On isole le capteur Ti.**



**Bilan des actions mécaniques extérieures :**

- La force du corps Fi au point Ci
- La force du support au point Hi

$$\{T(Hi/Ti)\} = \begin{Bmatrix} Xi & 0 \\ Yi & Mi \\ Zi & Ni \end{Bmatrix}_{Di}$$

**PFS :** Le PFS nous permet de dire que c'est deux forces sont selon la même direction et se compense. On l'exprime en Ci ce qui nous permet d'obtenir le torseur de Fi/Ti suivant :

$$\{T(Hi/Ti)\} = \begin{Bmatrix} -Xi & +lYi \\ -Yi & -Mi + lXi \\ -Zi & -Ni \end{Bmatrix}_{Ci} \quad \text{Or une liaison pivot portée par } \vec{y} \text{ relie Fi et Ti donc}$$

la composante du moment selon  $\vec{y}$  est nulle. Ainsi on a :  $Mi + l Xi = 0$

$$Mi = -l Xi$$

Et le torseur devient

$$\{T(Ti/Fi)\} = \begin{Bmatrix} Xi & -lYi \\ Yi & 0 \\ Zi & Ni \end{Bmatrix}_{Ci}$$

3.1.b.ii. Equilibre du corps

1. On isole le corps F de la pédale

Soit F la force du cycliste appliqué en A(x,y,0)

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix}$$

C1, C2, C3 les point d'ancrage des capteurs Ti  
 C1(-a,b,h)  
 C2(-a,-b,h)  
 C3(c,0,h)

2. Bilan des actions mécaniques

- Action des trois capteurs transversaux Ti sur le corps F

$$\{T(Ti/Fi)\} = \left\{ \begin{array}{l|l} X_i & L_i \\ Y_i & M_i = 0 \\ Z_i & N_i \end{array} \right\}_{C_i}$$

Ici  $M_i=0$  les capteurs Ti possèdent une liaison pivot selon  $\vec{y}$  qui laisse libre le mouvement et donc annule le moment.

On transporte le torseur en O :

$$\{T(Ti/Fi)\} = \left\{ \begin{array}{l|l} X_i & L_i \\ Y_i & 0 \\ Z_i & N_i \end{array} \right\}_O + \left\{ \begin{array}{l|l} X_i & Y_i \wedge \overline{C_i O} \\ Z_i & \end{array} \right\}_O$$

- Action du cycliste (pied) sur la pédale

$$\{T(P/Fi)\} = \begin{Bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{Bmatrix} \Big|_A \mathbf{0} \quad \text{Le point } A(x,y,0) \text{ est le point d'application de la force}$$

$\vec{F}$  donc le moment en A de  $\vec{F}$  est nul

On transporte le torseur en O :

$$\{T(P/Fi)\} = \begin{Bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{Bmatrix} \Big|_O \mathbf{0} + \begin{Bmatrix} Fx \\ Fy \wedge \overrightarrow{AO} \\ Fz \end{Bmatrix} \Big|_O$$

$$\{T(P/Fi)\} = \begin{Bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{Bmatrix} \Big|_O \mathbf{0} + \begin{Bmatrix} Fx \\ Fy \wedge \begin{matrix} -x \\ -y \\ 0 \end{matrix} \\ Fz \end{Bmatrix} \Big|_O$$

### 3. On écrit le Principe Fondamental de la Statique :

- Somme des forces = 0
- Somme des moments = 0

$$\begin{Bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{Bmatrix} \Big|_O \mathbf{0} + \begin{Bmatrix} Fx \\ Fy \wedge \begin{matrix} -x \\ -y \\ 0 \end{matrix} \\ Fz \end{Bmatrix} \Big|_O + \begin{Bmatrix} X1 \\ Y1 \\ Z1 \end{Bmatrix} \Big|_{N1} \begin{Bmatrix} L1 \\ 0 \\ N1 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X1 \\ Y1 \wedge \begin{matrix} -b \\ -a \\ h \end{matrix} \\ Z1 \end{Bmatrix} \Big|_O + \begin{Bmatrix} X2 \\ Y2 \\ Z2 \end{Bmatrix} \Big|_{N2} \begin{Bmatrix} L2 \\ 0 \\ N2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X2 \\ Y2 \wedge \begin{matrix} -b \\ a \\ h \end{matrix} \\ Z2 \end{Bmatrix} \Big|_O + \begin{Bmatrix} X3 \\ Y3 \\ Z3 \end{Bmatrix} \Big|_{N3} \begin{Bmatrix} L3 \\ 0 \\ N3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X3 \\ Y3 \wedge \begin{matrix} c \\ 0 \\ h \end{matrix} \\ Z3 \end{Bmatrix} \Big|_O = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

On obtient le système d'équation suivant en prenant la somme des résultantes nulles :

$$\begin{cases} Fx = X1 + X2 + X3 \\ Fy = Y1 + Y2 + Y3 \\ Fz = Z1 + Z2 + Z3 \end{cases}$$

La somme des moments nous donne :

$$\begin{cases} xFy - yFx = -[N1 + N2 + N3 + a(X1 - X2) + b(-Y1 - Y2) + cY3] \\ y = \frac{a(Z1 + Z2) - L1 - L3 + h(Y1 + Y2 + Y3)}{Fz} \\ x = \frac{cZ3 - b(Z1 + Z2) - h(X1 + X2 + X3)}{Fz} \end{cases}$$

Ces équations lient le point d'application de la force A(x,y,0) et les composantes de la force (Fx,Fy,Fz). Nous devons, maintenant nous intéresser au comportement des capteurs pour connaître la contrainte lié à cet effort. Cela nécessite de s'intéresser à la résistance des matériaux.

## 3.2. Comportement des capteurs

### 3.2.a. Notion de résistance des matériaux

Après avoir effectué l'étude statique de la pédale on connaît les relations entre la force et la position du point d'application de celle-ci. Mais, le but de la pédale dynamométrique est de donner l'effort appliqué par le cycliste via une acquisition informatique. Ainsi comme expliqué précédemment pour connaître l'effort on utilise des capteurs à jauge qui sont collé via le corps d'épreuve. En effet ce capteurs nous permet de connaître la déformation appliqué sur la pédale et ainsi de remonter jusqu'à l'effort grâce à un calcul de résistance des matériaux.

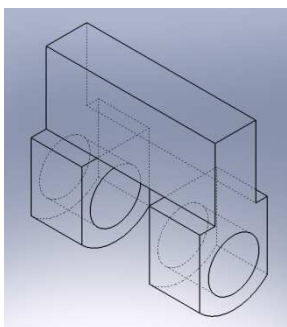
C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à la résistance des matériaux. Après quelques recherches nous nous sommes rapidement aperçut que les jauges de déformation travaillaient en flexion. Or, la flexion d'un matériau est la composée d'une traction et d'une compression selon le côté de la poutre auquel on s'intéresse.

On s'est ainsi intéressé à deux paramètres essentiels de la résistance des matériaux :

- La **contrainte**  $\sigma$  exprimé MPa qui désigne une force répartie sur une surface.  
 $\sigma = F/S$  F : force appliquée au solide  
S : section du corps d'épreuve
- La **déformation**  $\varepsilon$  qui est sans dimension.

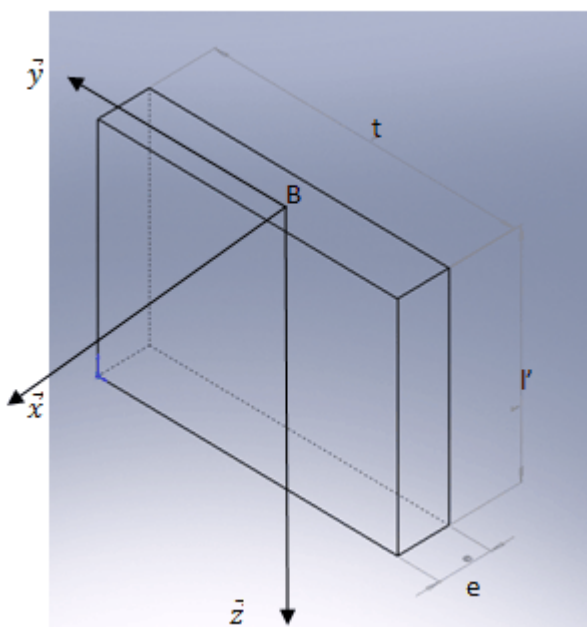
Ces deux paramètres sont liés par la loi de Hook :  $\sigma = E\varepsilon$   
 E : module de Young caractéristique du matériau

### 3.2.b. Application aux capteurs frontaux Fi



On isole les capteurs frontaux du reste du corps. On remarque que la jauge sera collée sur la partie supérieure plane du capteur. Intéressons nous donc de plus près à cette partie. Ce corps d'épreuve a pour dimension  $e\vec{x}$ ,  $t\vec{y}$ ,  $l\vec{z}$ . Ce capteur  $F_i$  est soumis à une contrainte exprimé par le tenseur  $\{T\}_{c_i}$  vu

$$\text{précédemment : } \{T(T_i/F_i)\} = \begin{Bmatrix} X_i & -lY_i \\ Y_i & 0 \\ Z_i & Ni \end{Bmatrix}_{c_i}$$



Prenons une section  $S_{xy}(z)$ , de normale  $\vec{z}$ , de ce solide

Un point  $H(x, y, z)$  et un point  $J_i(0, 0, z)$  appartenant à  $S_{xy}$

On transporte le torseur  $\{T\}_{Ci}$  en  $J_i$  :

$$\{T(Ti/Fi)\} = \left\{ \begin{array}{c|c} Xi & -lYi \\ Yi & 0 \\ Zi & Ni \end{array} + \left\{ \begin{array}{c} Xi \\ Yi \wedge \vec{Cij} \\ Zi \end{array} \right\} \right\}_{Ji}$$

$$\{T(Ti/Fi)\} = \left\{ \begin{array}{c|c} Xi & -lYi \\ Yi & 0 \\ Zi & Ni \end{array} + \left\{ \begin{array}{c} Xi \\ Yi \\ Zi \end{array} \right\}_{l'-z} \right\}_{Ji} = \left\{ \begin{array}{c|c} Xi & -lYi \\ Yi & 0 \\ Zi & Ni \end{array} + \left\{ \begin{array}{c} Xi \\ Yi \\ Zi \end{array} \right\}_{l'-z} \right\}_{Ji}$$

$$\{T(Ti/Fi)\} = \left\{ \begin{array}{c|c} Xi & z - (l' + l)Yi \\ Yi & -(z - l')Xi \\ Zi & Ni \end{array} \right\}_{Ji}$$

En outre, on peut écrire le vecteur contrainte en tout point  $H(x,y,z)$  de la section  $S_{xy}$

$$\overrightarrow{T\sigma(H)} = \begin{pmatrix} \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

Or la résistance des matériaux nous indique que la résultante du torseur mécanique est égale à l'intégrale du vecteur contrainte sur la surface du corps d'épreuve.  $\circ$

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} Xi \\ Yi \\ Zi \end{pmatrix} = \begin{cases} \iint_S \sigma_{xz} dS \\ \iint_S \sigma_{yz} dS \\ \iint_S \sigma_{zz} dS \end{cases}$$

$$\text{Et le moment } \overrightarrow{M_{J_i}} = \iint_S \overrightarrow{T\sigma(H)} \wedge \overrightarrow{HJ_i} dS = \iint_S \begin{vmatrix} \sigma_{xz} & -x \\ \sigma_{yz} & -y \\ \sigma_{zz} & 0 \end{vmatrix} dS$$

Ainsi le moment devient :

$$\overrightarrow{M_{J_i}} = \iint_S \begin{vmatrix} y\sigma_{zz} & z - (l' + l)Yi \\ -x\sigma_{zz} & -(z - l')Xi \\ -y\sigma_{xz} + x\sigma_{yz} & Ni \end{vmatrix} dS$$

$$\text{On obtient l'égalité suivante : } \begin{cases} \iint_S y\sigma_{zz} dS = z - (l' + l)Yi \\ \iint_S -x\sigma_{zz} dS = -(z - l')Xi \\ \iint_S -y\sigma_{xz} + x\sigma_{yz} dS = Ni \end{cases}$$

C'est deux systèmes d'équation nous permettent de définir le vecteur contrainte en  $J_i$  comme suit :

$$\overrightarrow{T\sigma(H)} = \begin{pmatrix} \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Xi}{S_{xy}(z)} \\ \frac{Yi}{S_{xy}(z)} \\ \frac{(y - yi)(z - (l' + l))Yi}{Ix} + \frac{-(x - xi)(l' - z)Xi}{ly} + \frac{Zi}{S_{xy}(z)} \end{pmatrix}$$

Ou  $I_x$  et  $I_y$  représentent les moments quadratiques. Le moment quadratique est directement dépendant de la forme géométrique de la surface. En effet il vaut par exemple selon  $x$  :

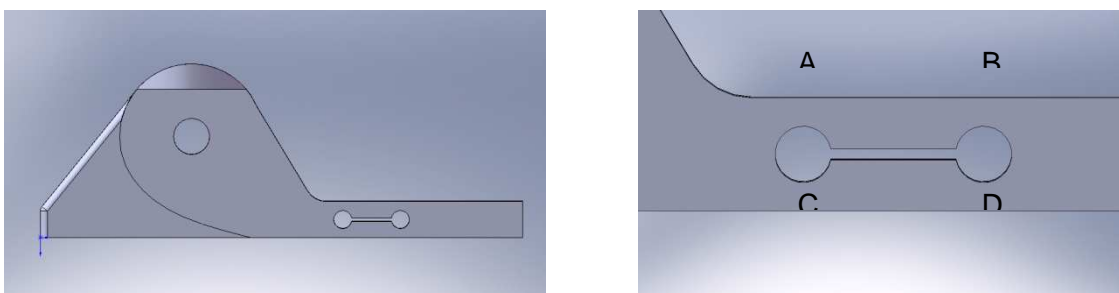
$$I_x = \int_S y^2 dS = e \int y^2 dy = \frac{et^3}{12}$$

Ce vecteur contrainte nous permet donc de connaître la répartition de la contrainte appliqué sur le corps d'épreuve. Or, comme expliqué précédemment, la loi de Hook nous permet de relier contrainte et déformation. Ainsi, on peut connaître la déformation subie par notre capteur. Or cette déformation est mesurée grâce à la jauge et le pont de Wheastone comme décrit précédemment via une acquisition électronique.

Pour résumer, la jauge collée sur le corps d'épreuve mesure la déformation subie par celui-ci. Grâce à cette déformation, on en déduit la répartition des contraintes appliquées au capteur. De la contrainte on en déduit l'effort et par conséquent le point d'application de la force.

En effectuant la même étude pour chaque capteur frontal et transversal on peut connaître chacune des composantes de la déformation et de la contrainte selon  $\vec{y}$  et  $\vec{z}$ .

### 3.2.c. Etude des capteurs horizontaux Hi

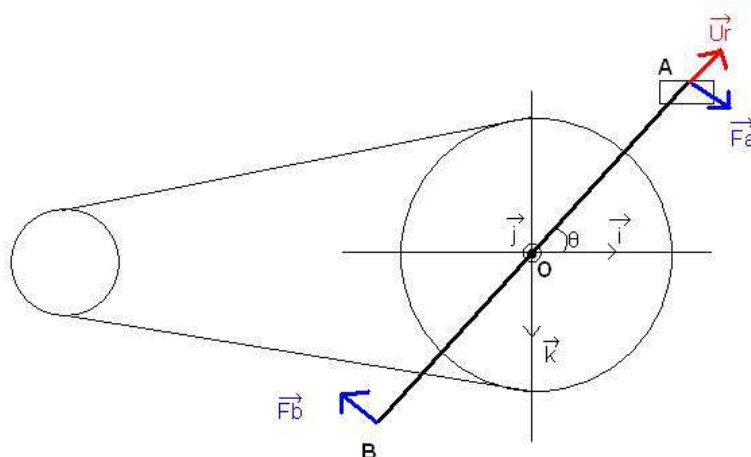


Les capteurs Hi présentent une particularité. Ils ont, en effet, une forme binoculaire qui permet de coller quatre jauges en chaque point A, B, C et D. On assimile ainsi ce capteur à un modèle de poutre à deux lames. L'avantage de ce dispositif est de mesurer à la fois la traction et la compression subie par le capteur. En effet, le capteur subit de la traction en A et D ; et de la compression en B et C. En outre, ce dispositif provoque un déplacement rectiligne du point d'application de la force.

Etant donné la complexité des calculs appliqués à ce capteur nous ne rentrerons pas dans le détail. Toutefois, le raisonnement est proche de celui expliqué précédemment pour les capteurs Fi et Ti. Ainsi les capteurs Hi permettent de connaître la déformation selon  $\vec{x}$ .

### 3.3. Conclusion de l'étude

Après avoir mené une étude complète de la pédale dynamométrique on est désormais capable de calculer la force développée par le cycliste sur la pédale. Ainsi comme dit précédemment l'objectif de cette étude est de développer des technologies permettant d'optimiser l'effort du cycliste. Or cet effort est transmis à la roue arrière via le pédalier. Nous allons donc considérer le pédalier dans son ensemble pour déterminer la puissance développée par le cycliste.



- Ce schéma représente le pédalier, constitué de son plateau périphérique, ses manivelles OA et OB ainsi que les deux pédales en A et B
- $\vec{F}_a$  et  $\vec{F}_b$  représentent les forces exercées par le cycliste.

Notre objectif est de connaître la puissance transmise à la roue arrière via le pédalier. Pour cela, nous allons effectuer l'étude au centre du pédalier en O. Or on connaît la formule de la puissance suivante :  $P=C\omega$

( P : puissance (W) ; C : couple (n.m) ;  $\omega$  : vitesse de rotation (rad/s) )

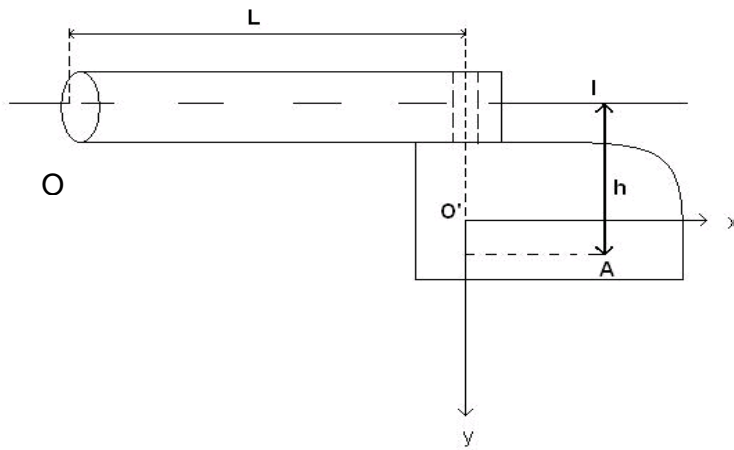
$\omega$  étant imposé par le rythme du cycliste, on s'intéressera à C. Le couple est un moment mécanique s'exprimant le long d'un axe de rotation. Ici l'axe  $(O\vec{j})$ . Intéressons nous donc de plus près à l'ensemble manivelle, pédale en A.

Soit A(x,y) le point d'application de la force mesurée par la pédale.

L la longueur de la manivelle. On prendra une longueur couramment utilisé en cyclisme soit L= 170mm.

O' le centre du nouveau repère  $R'(O', \vec{x}, \vec{y})$  lié à la pédale.

Et  $h\vec{y}$  la hauteur entre l'axe de la manivelle et le point A.



Notre but est donc, de calculer le moment en O de la force  $\vec{F}_a$ .

$$\overline{Mo(Fa)} = \vec{Fa} \wedge \vec{AO} = \begin{vmatrix} Fx & -L\cos\theta - x \\ Fy & -h \\ Fz & L\sin\theta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} FxL\sin\theta + Fz(h+y) \\ -Fz(L\cos\theta + x) - FxL\sin\theta \\ -Fx(h+y) + Fy(L\cos\theta + x) \end{vmatrix}$$

Or, nous avons un couple disponible en O si et seulement si :

$$\vec{Fa} = \vec{Fb} \Leftrightarrow \overline{Mo(Fa)} = \overline{Mo(Fb)}$$

Ainsi, le couple est égal à :  $C = \overline{2Mo(F)} \vec{j} = 2x(Fz(L\cos\theta + x) + FxL\sin\theta)$

Notre objectif étant d'optimiser la puissance, et  $P = C\omega$ , donc on doit optimiser le couple.

Hypothèse : l'essentiel de la force du cycliste est dirigé selon l'axe  $\vec{z}$ . Nous ferons donc l'approximation suivante :  $F_x \ll F_y$

Ainsi  $P = 2x F_z (L\cos\theta + x)$  or, L et  $\theta$  étant fixés on ne peut agir que sur le x qui est le rappelle la position du point d'application de la force.

On constate donc, que pour optimiser la puissance il faut que le point d'application de la force sur la pédale soit le plus en avant possible. En effet, plus x est grand plus la puissance est importante, pour une force et une vitesse de rotation donnée.

On aboutit donc à une nouvelle problématique, quelle forme doit-on donner à la pédale pour augmenter le x ?

La réponse à cette interrogation est bien sûr loin d'être évidente et pourrait faire l'objet d'une nouvelle étude.

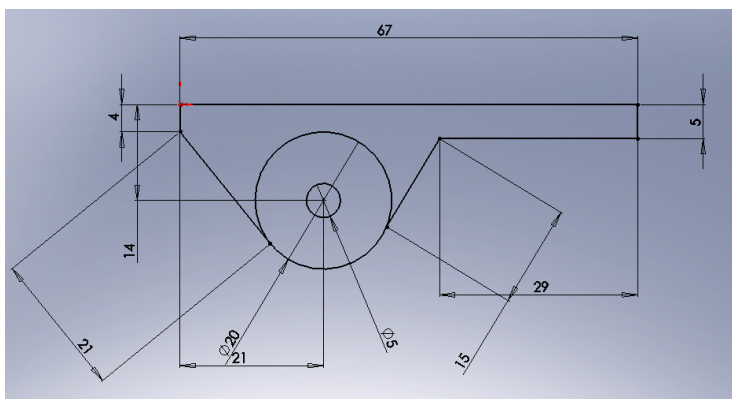


## 4. Modèle SolidWorks

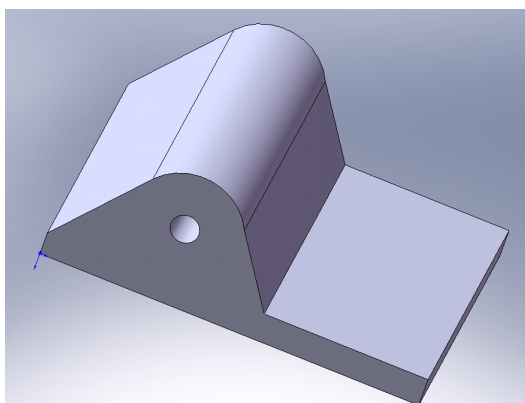
### 4.1. Dessin des pièces :

Pour permettre une meilleure appréhension de la forme géométrique de la pédale, il a été nécessaire de réaliser un dessin de la pédale dans l'espace (0,x,y,z) grâce au logiciel de DAO SolidWorks.

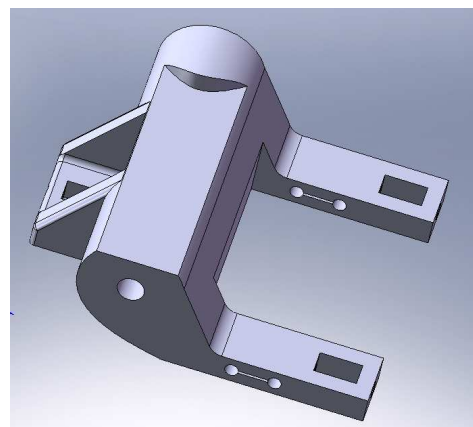
Il a fallu dessiner chaque pièce séparément, c'est-à-dire le support (comportant également les capteurs horizontaux Hi), les capteurs transversaux Ti et le corps de la pédale (comportant les capteurs frontaux Fi). Le dessin d'une pièce se décompose en de nombreuses étapes. Il y a tout d'abord l'esquisse en deux dimensions que l'on va coter avant d'extruder pour donner du volume et ainsi obtenir la forme générale. Une fois la forme générale obtenue, on opère par extrusion (ajout de matière) ou par enlèvement de matière pour obtenir la forme finale.



Esquisse coté  
du support de  
la pédale



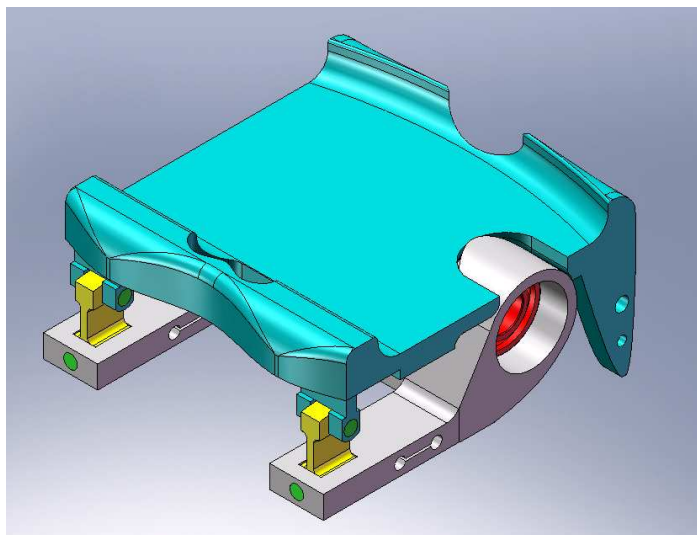
Forme après extrusion



Forme finale du Support de  
la pédale comportant  
également les capteurs

## 4.2. Assemblage :

Une fois chaque pièce dessinée séparément, vient l'étape de l'assemblage qui consiste à fixer des contraintes entre les différentes pièces pour qu'elles se positionnent les unes par rapport aux autres. Nous avons par exemple des contraintes concentriques entre les axes respectifs des capteurs Ti et Fi pour aligner les pièces, ainsi que des contraintes coïncidentes entre les surfaces pour les placer. La principale difficulté de cette étape réside dans les petits décalages de cotation entre les pièces qui gênent le placement.



Assemblage final de la pédale dynamométrique avec :

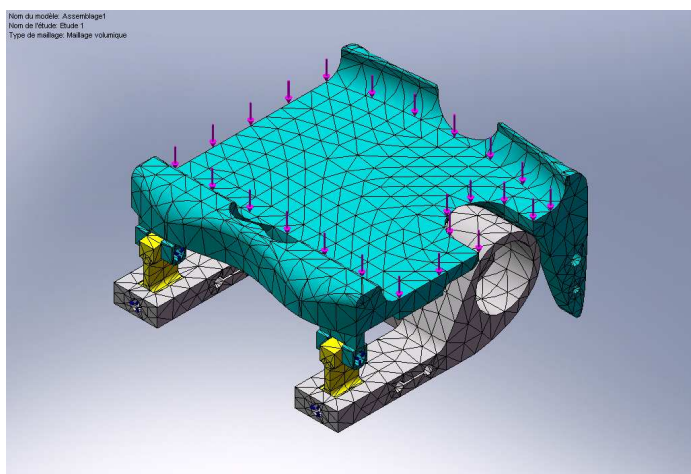
- En bleu le corps/capteurs Fi
- En jaune les capteurs Ti
- En gris le support/capteurs Hi
- En vert les axes de liaison
- En rouge un roulement à bille standard

## 4.3. Simulation :

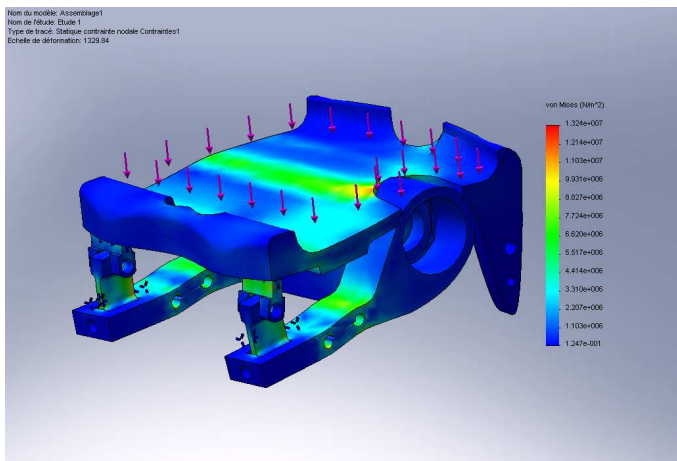
Après avoir dessiné l'ensemble de la pédale dynamométrique, on sait dit qu'il pourrait être intéressant de faire une simulation d'effort et de voir les déformations subies par la pédale. Pour ce faire, il faut utiliser le module intégré à SolidWorks nommé CosmosWorks.

La simulation d'effort à partir d'une pièce en trois dimensions réside en quelques étapes simples. Tout d'abord, imposer les actions extérieures subit par le corps, ici c'est bien entendu la force exercée par le cycliste sur la pédale. Ensuite, il faut nommer le point fixe sur lequel s'appuie la pédale, c'est-à-dire l'axe de rotation de la pédale.

Ensuite il faut créer ce qu'on appelle le maillage. Cette étape consiste à diviser l'ensemble de la pédale en petites sections triangulaire reliées par des nœuds. Ceci permet d'analyser les contraintes et déformations en chaque nœud de la pédale et donner la déformation totale.

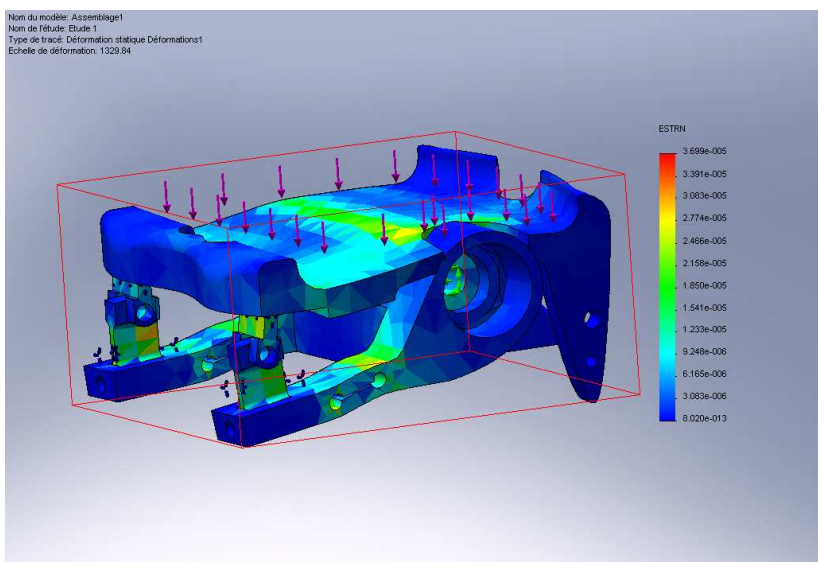


Voici la pédale avec le maillage de crée, les flèches violettes représentent la force appliquée sur la pédale.

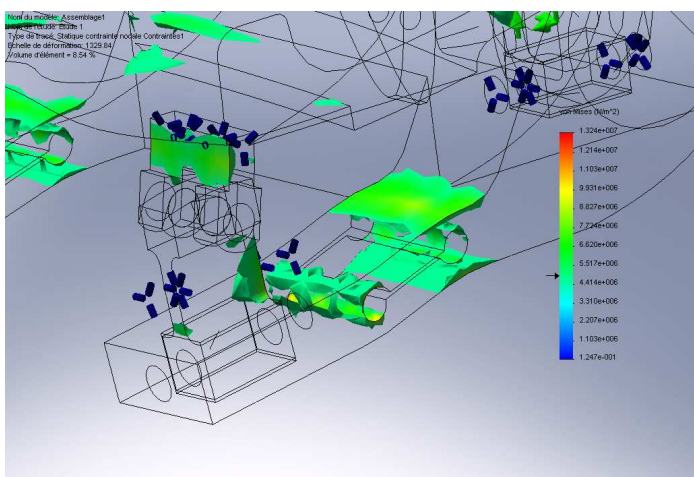


Répartition des contraintes pour un effort normal de 1000N.

Une fois le maillage réalisé, on lance la simulation. Après l'analyse, le logiciel permet de montrer les contraintes et déformations appliquées sur la pédale.

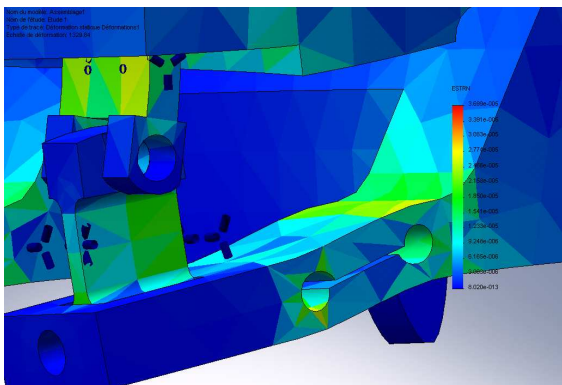


Affichage des déformations équivalentes pour un effort normal de 1000N

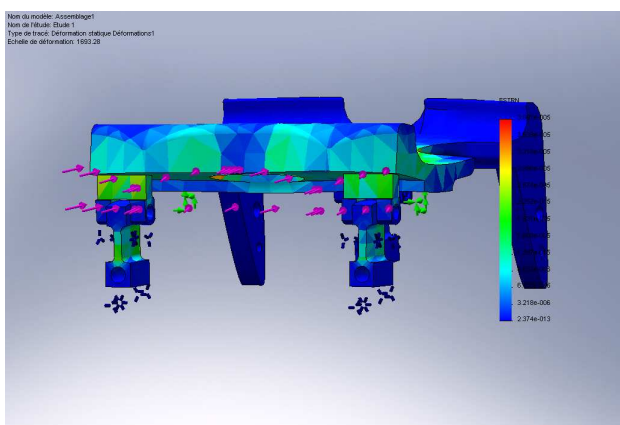


En modifiant l'ISO le logiciel nous permet de n'afficher que les zones où la contrainte est maximale.

On constate que la contrainte est plus élevée au niveau des capteurs Fi Ti et Hi (couleur rouge/vert). Or là où la contrainte est plus élevée, il y aura d'avantage de déformations. En effet, la loi de Hook nous donne  $\sigma = E\varepsilon$  ou  $\sigma$  désigne la contrainte,  $\varepsilon$  la déformation et E le module de Young caractéristique du matériau. Cela, recoupe bien avec l'affichage de la déformation équivalente ci-dessus. Ce résultat nous indique que la forme de la pédale est plutôt bien optimisée pour mesurer les déformations au niveau des capteurs puisque c'est précisément à cet endroit que la déformation est maximale.



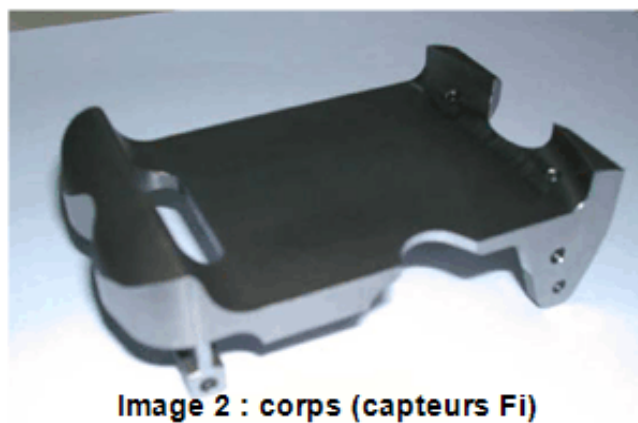
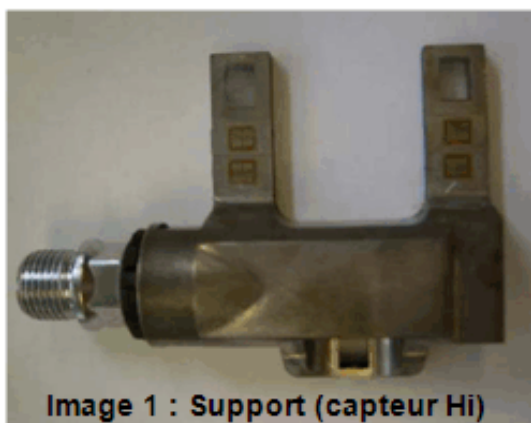
- Zoom sur les capteurs F2,T2 et H2
- On peut constater que la déformation est importante au niveau du capteur binoculaire et le long des capteurs frontal et transversal



- Déformation des capteurs frontaux et transversaux pour un effort frontal de 200N

On remarque que pour toutes les sollicitations maximales, qu'elles soient frontales ou normales au corps. La déformation maximale des capteurs ne dépassent pas la limite élastique. Cela signifie que notre corps d'épreuve résistera aux sollicitations imposées par le cycliste. Cette simulation, confirme les résultats précédemment établis puisque les corps d'épreuves se déforment bien selon la direction et la norme désirée pour renvoyer les bonnes informations. En outre, on remarque que chaque capteur répond bien aux différentes sollicitations. En effet, les liaisons pivots qui les lient permettent de les découpler pour obtenir des résultats indépendants sur chaque jauge de déformation.

Cette simulation pourrait nous permettre de créer un éventuel prototype pour des expérimentations comme l'avait fait Cyril Beaulieu pour sa thèse.





# CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

## *Conclusions sur le travail réalisé et perspectives*

Présenté par notre professeur comme le plus difficile de ceux qu'il avait proposé, ce sujet a tenu toutes ses promesses au niveau de la difficulté ! Il faisait en effet appel à de nombreuses notions de mécanique pas toujours faciles d'accès, alors que seulement 2 d'entre nous avaient choisi la thématique MECA.

Nous sommes cependant satisfaits d'avoir réussi à mener à bien ce que notre professeur avait envisagé en début de semestre. Nous avons réussi à retracer le chemin débroussaillé au préalable par Cyril Beaulieu, menant des efforts effectués sur la pédale jusqu'aux déformations effectivement ressenties par les capteurs.

La simulation SolidWorks réalisée par Matthieu a permis d'ajouter une touche de concret à ce sujet basé sur la compréhension d'une démarche scientifique (et des calculs !). Sans cela nous aurions trouvé le sujet plutôt abstrait, ou du moins ne correspondant pas à l'image que nous nous en étions faite a priori. Nous pourrions donc préconiser, si l'UV P6-3 venait à être renouvelée l'an prochain, d'explicitier un peu plus les sujets, même s'il est vrai que nous aurions dû demander plus d'explications sur le sujet avant de le sélectionner.

## *Conclusions sur l'apport personnel de cette U.V. projet*

Le but de cette conclusion étant il me semble, l'honnêteté, force est de constater que le sujet, trop calculatoire, ne nous a pour la plupart pas passionné. Ce n'est pas que nous ayons trouvé le sujet inintéressant, mais il faisait la part trop belle au calcul et manquait cruellement de dimension pratique. Loin de nous bien sûr l'idée de critiquer gratuitement, mais comme expliqué plus haut, l'organisation de l'UV serait peut-être à revoir.

Nous espérons cependant que l'UV sera reconduite l'an prochain, car elle permet tout de même de développer certaines qualités, à savoir bien sûr l'aptitude au travail de groupe, mais aussi à gérer l'avancement d'un projet dans le temps : il nous semble qu'il s'agit là d'une bonne introduction à ce qui peut se pratiquer lors du cycle ingénieur. Ajoutons enfin que plus jamais nous ne regarderons une pédale de vélo de la même façon !

## BIBLIOGRAPHIE

Les différents types de capteur, les capteurs de pression :

<http://www.gel.usherbrooke.ca/mab/gei437/notes/capteurs.pdf>  
<http://specialty.bfiophtilas.fr/Capteur+a+Jauge+de+Contrainte-76.htm>  
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur>  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Instrument\\_de\\_mesure](http://fr.wikipedia.org/wiki/Instrument_de_mesure)  
[http://www.bepita.net/materiels/audit\\_nrij\\_indust/mesures\\_flux\\_energetiques.pdf](http://www.bepita.net/materiels/audit_nrij_indust/mesures_flux_energetiques.pdf)

La jauge de contrainte :

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Jauge\\_de\\_d%C3%A9formation](http://fr.wikipedia.org/wiki/Jauge_de_d%C3%A9formation)  
<http://www.volta-electricite.info/articles.php?lng=fr&pg=602>  
<http://www.gel.usherbrooke.ca/mab/gei437/notes/capteurs.pdf>  
<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7272>  
[http://helix.gatech.edu/Students/SiouxWill/II2\)21\)211\)a\)f.htm](http://helix.gatech.edu/Students/SiouxWill/II2)21)211)a)f.htm)  
<http://specialty.bfiophtilas.fr/Capteur+a+Jauge+de+Contrainte-76.htm>

Le pont de Wheatstone :

[http://agregb1.dgm.ens-cachan.fr/Documents/TheorieTP/files/Pont\\_de\\_Wheatstone.pdf](http://agregb1.dgm.ens-cachan.fr/Documents/TheorieTP/files/Pont_de_Wheatstone.pdf)  
<http://www.rdpe.com/fr/hiw-sglc.htm>

Systèmes électroniques embarqués :

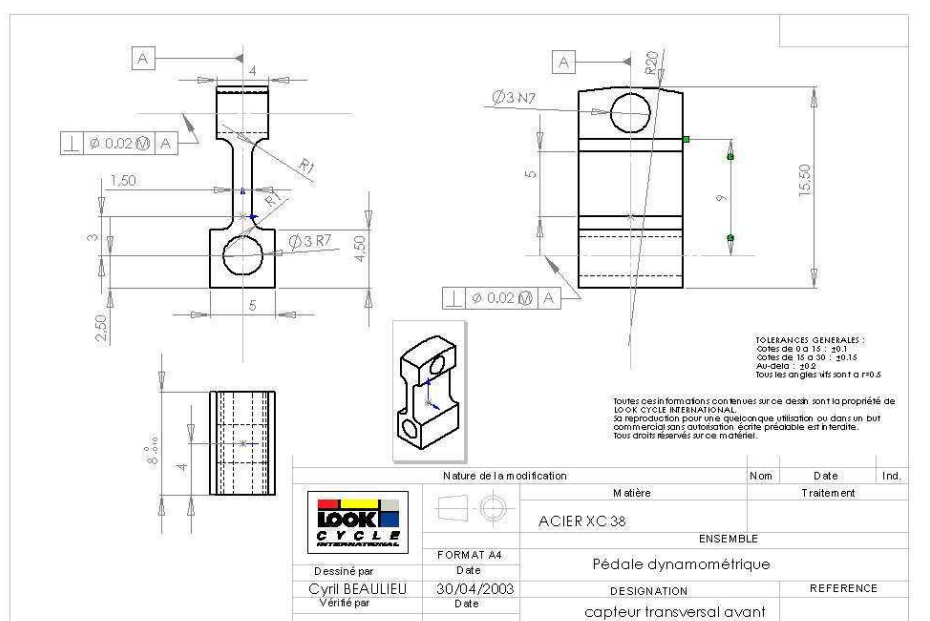
<http://pagesperso-orange.fr/thierrygault.ctr/capteurpuissanceentrainementvillieriusnov07.pdf>  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_embarqu%C3%A9](http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_embarqu%C3%A9)  
<http://powertap.fr/>  
[http://www.velo2max.com/Entrainement/dossier\\_puissance.htm](http://www.velo2max.com/Entrainement/dossier_puissance.htm)

## Annexe :

# Dessin technique de la pédale dynamométrique LOOK

Ces dessins ont servit de base à la création du modèle en trois dimension sous SolidWorks.

Capteurs Ti :



Support et capteurs Hi :

