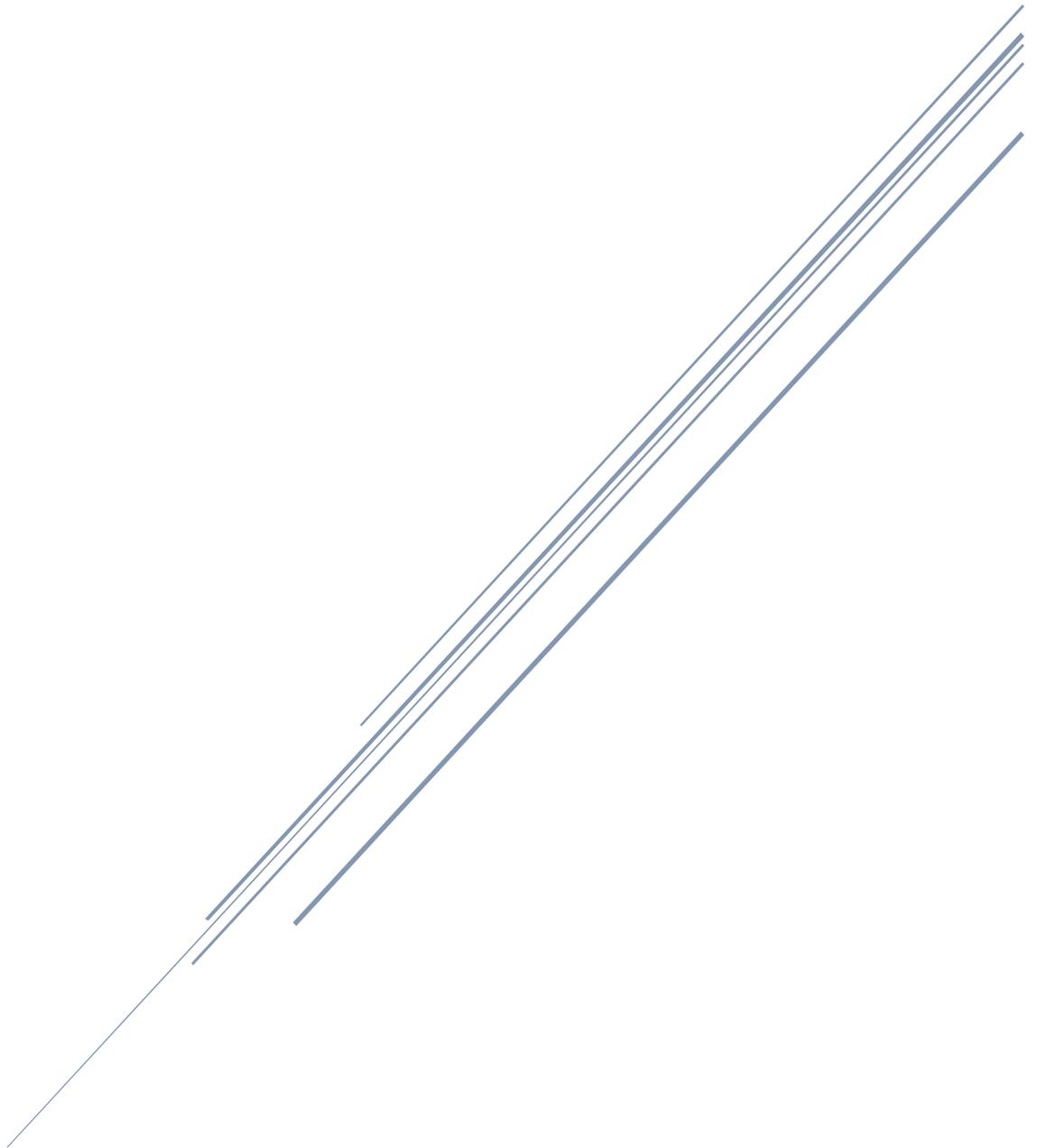


# ETUDE DE LA PROPULSION A EAU

Partie 1 : Fusée à propulsion à eau – projet tuteuré 2015-2016



Université d'Auvergne  
DUT Mesures Physiques – Clermont Ferrand

Ait Aqqa Imane, Boutaud Axel, Cazaux Siriane, Chandelon Kilian, Donadieu Emeric, Lefevre Charlotte, Morget Adrien

# TABLE DES MATIERES

---

1	Principe .....	2
2	Théorie .....	3
2.1	Théorème de l'énergie cinétique .....	3
2.1.1	Avant le lancement .....	3
2.1.2	Pendant la phase propulsée.....	3
2.1.3	Après la phase propulsée .....	4
2.2	Calcul des vitesses.....	4
2.2.1	Vitesse d'éjection de l'eau .....	4
2.2.2	Vitesse de la fusée.....	5
2.3	Etude de la poussée .....	6
2.4	Calculs d'altitude.....	6
2.4.1	Calcul de l'apogée. ....	7
2.5	La portée .....	7
3	Simulation .....	8
3.1	Caractéristiques de la fusée .....	8
3.2	Caractéristiques du lancement .....	8
3.3	Résultats de la simulation .....	8
4	Modélisation .....	10
5	Faisabilité .....	12
5.1	Contraintes de réalisation.....	12
5.1.1	Contraintes liées à la durée et au budget disponible pour réaliser le projet .....	12
5.1.2	Contraintes liées à la sécurité du projet .....	12
5.1.3	Contraintes liées à la réalisation du module d'instrumentation embarqué.....	12
5.2	Cout estimé pour réaliser le projet au maximum.....	13
5.2.1	Le compartiment principal.....	13
5.2.2	Le compartiment de stockage du parachute .....	13
5.2.3	Le compartiment de stockage du module d'instrumentation .....	13
6	Réalisation.....	14
6.1	Les matériaux.....	14
6.1.1	Le compartiment principal.....	14
6.1.2	Le compartiment de stockage du parachute .....	14
6.1.3	Le compartiment de stockage du module d'instrumentation .....	14
6.2	Les étapes de fabrications.....	15
6.2.1	Le compartiment principal.....	15
6.2.2	Le compartiment de stockage du parachute .....	16
6.2.3	Le compartiment de stockage du module d'instrumentation .....	18

7	Instrumentation de la fusée à eau .....	19
7.1	Grandeurs physiques mesurables .....	19
7.2	Mise en place de l'instrumentation .....	20
7.2.1	Centrale inertielle.....	23
7.2.2	Capteur de pression .....	25
7.2.3	Capteur de niveau.....	25
7.2.4	Transmission capteurs / microcontrôleur.....	26
7.2.5	Transmission microcontrôleur / ordinateur .....	27
7.2.6	Stockage .....	30
7.2.7	Traitement des données .....	30
7.2.8	Module de mesure .....	31
8	Bibliographie .....	33
8.1	Principe .....	33
8.2	Théorie .....	33
8.3	Simulation .....	33
8.4	Modélisation .....	33
8.5	Faisabilité .....	33
8.6	Réalisation.....	33
8.7	Instrumentation de la fusée à eau .....	33

# 1 PRINCIPE

---

Le principe de base utilisé par la fusée est celui de la troisième loi de Newton ou le principe des actions réciproques à savoir celui de la propulsion par réaction. Elle indique que tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'intensité égale, mais de sens opposé, exercée par le corps B.

Avant que la fusée ne soit propulsée, elle est remplie d'une certaine quantité d'eau. L'air contenu dans la bouteille est alors mis sous pression à l'aide d'un compresseur. Lorsque la fusée est libérée de la base de lancement, cet air chasse l'eau de la bouteille par la tuyère. C'est cette projection à grande vitesse de l'eau par la tuyère qui entraîne la fusée par « réaction » dans les airs.

## 2 THEORIE

---

Le but de cette partie est de calculer les différents paramètres liés à la fusée à eau tels que la vitesse de la fusée, la portée et l'altitude atteinte par la fusée.

### 2.1 THEOREME DE L'ENERGIE CINETIQUE

D'après le théorème de l'énergie cinétique, dans le référentiel terrestre supposé galiléen :

$$\Delta E_c = \sum W(\vec{F}) \quad (1)$$

Avec :  $E_c$  l'énergie cinétique (en Joule).

$W(F)$  sont les divers travaux des forces exercées sur la fusée (en Joule).

#### 2.1.1 Avant le lancement

Les forces de poids et de réaction du sol ne travaillent pas ( $AB=0$ ). Elles ont la même intensité, leurs droites d'actions sont verticales, leurs points d'applications sont à la verticale l'un de l'autre et leurs sens sont opposés donc :

$$\sum(\vec{F}) = \vec{0}$$

Et d'après la première loi de Newton (le principe d'inertie), l'objet persiste dans son état de repos.

#### 2.1.2 Pendant la phase propulsée

La force de poussée provient de l'éjection de l'eau et ensuite de l'air sous pression qui est dans le réservoir de la fusée. Cette force est définie par :

$$F = 2 \times P \times S$$

Avec :  $F$  la poussée (en Newton).

$P$  la pression interne (en Pascal).

$S$  la surface d'éjection (en mètre carré).

De (1) on a :

$$\Delta E_c = W(\vec{P}) + W(\vec{F})$$

$$\Delta E_c = mg(-h) + Fh \cos(0)$$

Avec :  $F$  la force de la poussée (en Newton).

$h = Z$  à l'instant  $t$   $- Z$  à l'instant initial (en mètre).

Puisque  $F > P$  :

$$W(\vec{P}) + W(\vec{F}) > 0$$

Ainsi la fusée accélère.

### 2.1.3 Après la phase propulsée

Durant cette phase, seul le poids rentre en jeu :

$$E_c = W(\vec{P}) = mgh$$

Avec :  $W(P)$  le travail du poids (en Joule).

$m$  la masse de la fusée (en kilogramme).

$g$  l'accélération de la pesanteur (en Newton par kilogramme).

Lors de la phase ascendante,  $h < 0$  donc le travail du poids est négatif donc la fusée décélère.

Lors de la phase descendante,  $h > 0$  donc le travail du poids est positif donc la fusée accélère.

De plus :

$$E_c = \frac{1}{2} m \times v^2$$

Avec :  $v$  la vitesse de la fusée (en mètre par seconde).

De ce fait :

$$\frac{1}{2} m \times v^2 = m \times g \times h$$

$$\frac{1}{2} v^2 = g \times h$$

## 2.2 CALCUL DES VITESSES

### 2.2.1 Vitesse d'éjection de l'eau

L'énoncé du théorème de Bernoulli est le suivant : « La somme des pressions et des énergies mécaniques par unité de volume est constante tout le long du tube de courant. »

D'où l'équation :

$$\frac{v^2}{2} \times g + z + \frac{P}{\rho \times g} = \text{constante}$$

Avec :  $v$  la vitesse d'éjection du fluide (en mètre par seconde).

$P$  la pression en un point ( $\text{N.m}^{-2}$ ).

$\rho$  la masse volumique du fluide ( $\text{kg.m}^{-3}$ ).

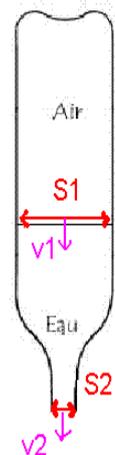
$z$  l'altitude (en mètre).

Si on applique l'équation de Bernoulli pour l'eau qui s'écoule entre le point 1 et 2 alors :

$$\frac{v_1^2}{2} \times g + z_1 + \frac{P_1}{\rho \times g} = \frac{v_2^2}{2} \times g + z_2 + \frac{P_2}{\rho \times g}$$

Donc :

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2 \times (P_1 - P_2)}{\rho} + 2 \times g \times (z_1 - z_2)$$



(2)

Le débit d'un liquide  $Q_v$  à travers une section  $S$  est le volume de ce liquide qui traverse la section en une seconde.

On le calcule avec la formule :

$$Q_v = S \times v$$

Avec :  $Q_v$  le débit du liquide ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

$v$  la vitesse d'éjection du fluide (en mètre par seconde).

Le débit du fluide est constant donc :

$$S_1 \times v_1 = S_2 \times v_2$$

Ainsi :

$$v_1 = \frac{S_2 \times v_2}{S_1}$$

- *Remarque*

Puisque le débit est constant, la vitesse d'éjection de l'eau augmente quand la section diminue : c'est l'effet venturi.

Si on reprend l'équation (2), on obtient :

$$v_2^2 \times \left(1 - \frac{S_1^2}{S_2^2}\right) = \frac{2 \times (P_1 - P_2)}{\rho} + 2 \times g \times (z_1 - z_2)$$

Donc :

$$v_2 = \sqrt{\frac{\frac{2 \times (P_1 - P_2)}{\rho} + 2 \times g \times (z_1 - z_2)}{1 - \frac{S_1^2}{S_2^2}}}$$

### 2.2.2 Vitesse de la fusée

La vitesse de la fusée à un instant  $t$  varie en permanence.

On peut néanmoins aisément calculer la vitesse moyenne avec la formule :

$$v = \frac{d}{t}$$

Avec :  $v$  la vitesse moyenne de la fusée (en mètre par seconde).

$d$  la distance parcourue (en mètre).

$t$  la durée du vol (en seconde).

Cette méthode est peu représentative de la vitesse de la fusée.

### 2.3 ETUDE DE LA POUSSEE

La force de poussée provient de l'éjection de l'eau, puis de l'air sous pression contenue dans le réservoir de la fusée. Elle intervient dans les phases « Propulsion aqueuse » et « Propulsion gazeuse ». La phase « tube de lancement » ne fait pas intervenir la poussée car on suppose qu'aucune matière n'est éjectée.

Cette fusée, comme toutes les fusées, dépend du principe dit « d'action/réaction » : L'éjection de matière engendre une force opposée à celle générée par cette éjection, donc la fusée s'élève.

La poussée est obtenue par la formule :

$$F = Q_m \times v$$

Avec :  $Q_m$  le débit massique ( $\text{kg.s}^{-1}$ ).

$v$  la vitesse du fluide (en mètre par seconde).

Or,

$$Q_m = Q_v \times \rho = \rho \times S \times v$$

D'où :

$$F = \rho \times S \times v^2$$

### 2.4 CALCUL D'ALTITUDE

L'altitude atteinte par la fusée à tout moment est définie par la relation :

$$z = z_1 + v_i \times t - g \times \frac{t^2}{2}$$

Avec :  $z$  l'altitude à l'instant  $t$  (en mètre).

$z_1$  l'altitude à la fin de la phase propulsée (en mètre).

$v_i$  la vitesse à la fin de la phase propulsée (en mètre par seconde).

### 2.4.1 Calcul de l'apogée.

Nous allons utiliser des formules de parabole, pour un angle de tir  $\alpha$  perpendiculaire au sol.

- Equation pour calculer la durée du lancer

$$t = \frac{2 \times v_i \times \sin \alpha}{2}$$

Donc :

$$v_i = \frac{t \times g}{2 \times \sin \alpha}$$

- Equation pour calculer l'apogée  $z_{max}$

$$z_{max} = \frac{v_i^2 \times \sin^2 \alpha}{2 \times g}$$

Donc :

$$z_{max} = \frac{t^2 \times g^2}{4 \times \sin^2 \alpha} \times \frac{1}{2 \times g} = \frac{t^2 \times g}{8}$$

Ainsi :

$$z_{max} = \frac{1}{8 \times t^2 \times g}$$

Ce résultat n'est valable que pour un tir vertical. Pour l'apogée d'une parabole, il faut utiliser la formule développée.

- D'après le théorème de l'énergie cinétique

$$v^2 = 2 \times g \times h$$

Donc :

$$h = \frac{v^2}{2 \times g}$$

### 2.5 LA PORTEE

La trajectoire d'une fusée à eau peut être modélisée par une parabole.

Pour calculer la portée d'un tir, on utilise donc, de même que pour l'altitude, des formules de paraboles.

- Equation pour calculer la portée horizontale

La portée horizontale est la distance du point de lancement au point de chute (C).

$$x_c = \frac{v_i^2 \times \sin 2\alpha}{g}$$

La portée est optimale pour un angle  $\alpha$  de  $45^\circ$ .

### 3 SIMULATION

La simulation va être effectuée pour une fusée avec un seul compartiment, sans surcharge : ni parachute, ni module d'instrumentation.

#### 3.1 CARACTERISTIQUES DE LA FUSEE

Ici sont détaillées les caractéristiques propres à la fusée type avant le décollage.

Caractéristiques de la fusée	
Volume total de la bouteille	1.50 L
Diamètre de la tuyère	0.90 cm
Diamètre de la fusée	8.80 cm
Masse à vide de la fusée	60 g
Cx de la fusée	0.3

Tableau 1 : Grandeurs caractéristiques de la fusée

#### 3.2 CARACTERISTIQUES DU LANCEMENT

Ce sont les caractéristiques qui peuvent varier d'un lancer à l'autre. Dans le cas présent, ce sont les paramètres optimaux pour obtenir l'altitude la plus élevée et la vitesse la maximale pour une fusée type.

Caractéristiques du lancement	
Volume d'eau dans la bouteille (% total)	26 %
Pression dans la bouteille	9.0 bar
Longueur du tube de lancement	0 cm
Volume total du réservoir	1.50 L
Masse en surcharge	0 g

Tableau 2 : Grandeurs caractéristiques du lancement de la fusée

#### 3.3 RESULTATS DE LA SIMULATION

Les différents paramètres calculables sont repris selon la phase de vol de la fusée dans le tableau suivant.

Résultats de la simulation				
Phases	Date t s	Altitude m	Vitesse	
			m/s	km/h
Sortie du tube	0.000	0.00	0.0	0
Sortie phase d'eau	0.164	4.18	64.3	231
Sortie phase d'air	0.315	16.98	83.4	300
Apogée	3.38	89.0	0	0
Retour au sol	8.84	0	-22.7	-82

Tableau 3 : Résultats de la simulation

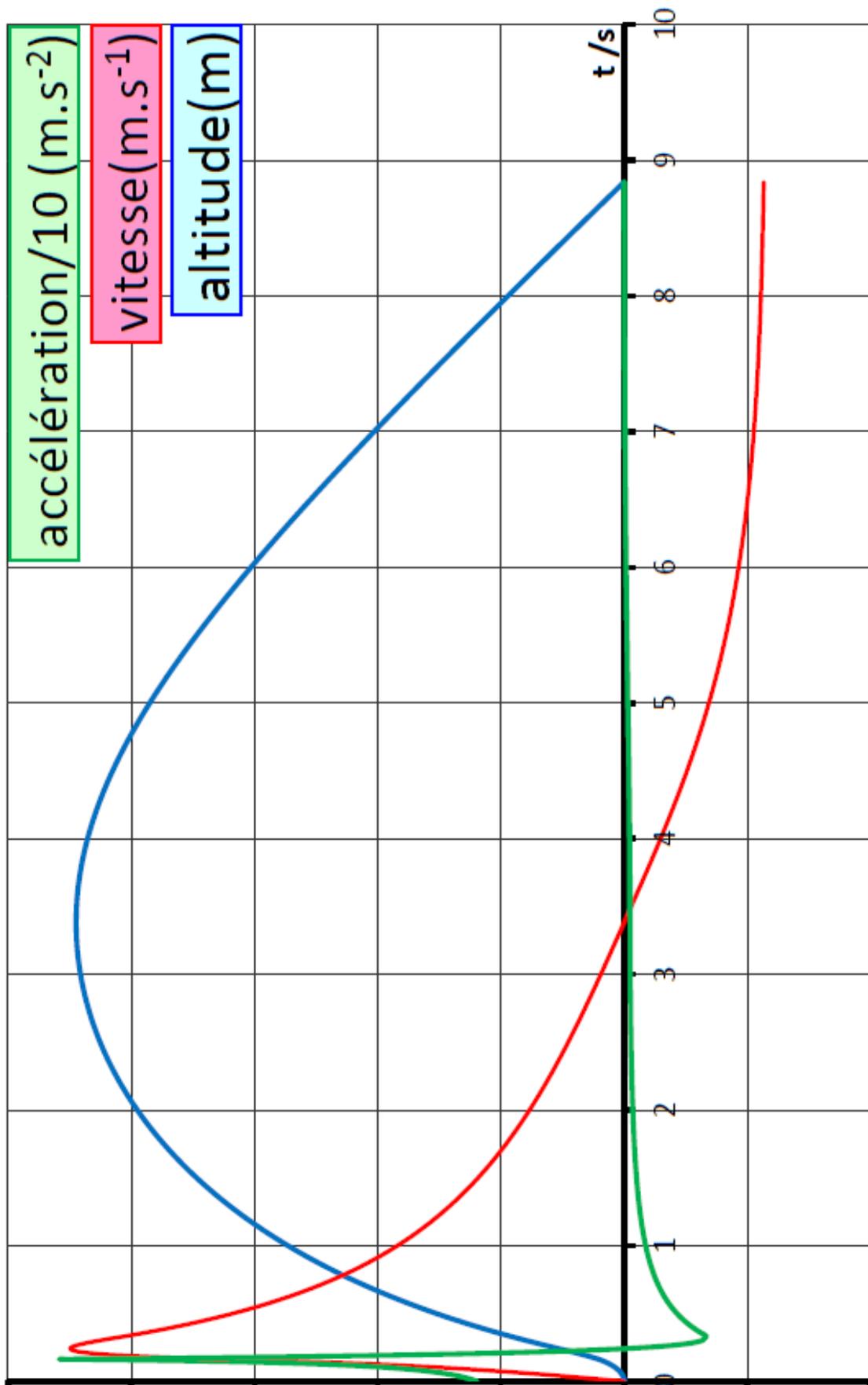


Figure 1 : Graphique des résultats de la simulation (altitude en fonction du temps)

## 4 MODELISATION

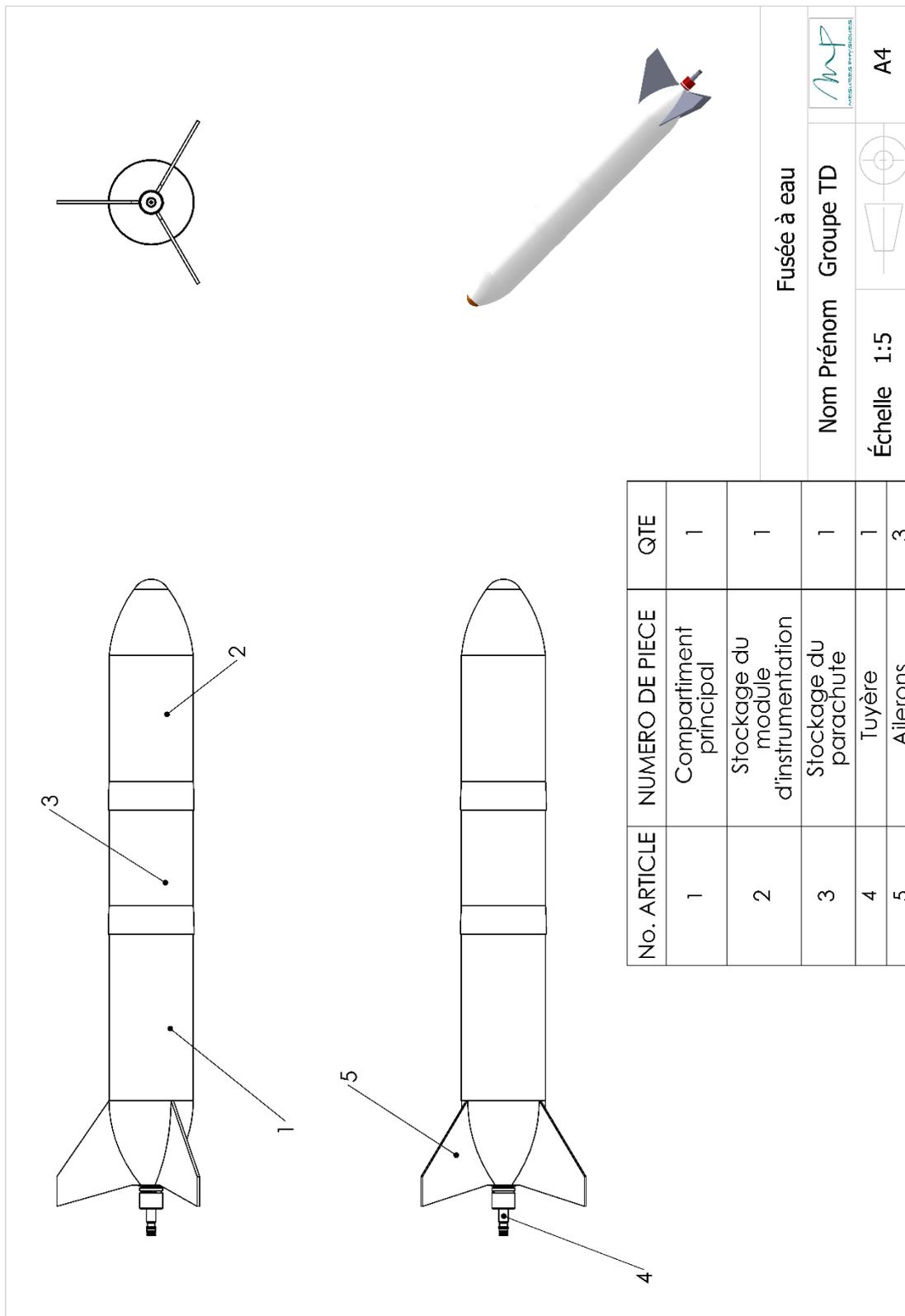


Figure 2 : Mise en plan de la fusée à propulsion à eau



*Figure 3 : Rendu de la fusée à eau*

## 5 FAISABILITE

---

### 5.1 CONTRAINTES DE REALISATION

Les contraintes sont des conditions à satisfaire pour mener à bien un projet.

#### 5.1.1 Contraintes liées à la durée et au budget disponible pour réaliser le projet

- *La main d'œuvre*
  - Répartir le travail entre les 7 étudiants participants au projet.
  - Faire appel à des personnes extérieures au projet de manière bénévole.
- *Procédé de réalisation*
  - Possibilité de sous-traiter certaines pièces non usinables à l'IUT par des entreprises extérieures.
  - Utiliser les outils à disposition dans l'atelier.
- *Matériaux utilisés*
  - Pour les commandes de matériaux, préférer les entreprises aux délais courts de livraison.
  - Elaborer le prototype en fonction des arrivages des matériaux.
  - Utiliser les matériaux à disposition dans l'atelier.
  - Utiliser des matériaux peu chers.
  - Utiliser des matériaux de récupérations ou apportés par les étudiants du groupe.

#### 5.1.2 Contraintes liées à la sécurité du projet

- Savoir utiliser ou demander de l'aide pour utiliser les outils à disposition dans l'IUT.
- Demande d'autorisation.
- Effectuer les tirs de la fusée sur des terrains dégagés (loin des aérodromes/aéroports, des câbles électriques, des habitations, d'arbres ...).
- Effectuer les tirs quand le ciel est dégagé.
- Etre organisé lors des tirs de la fusée, pas d'agitation.
- Ne pas se trouver à côté de la fusée lors de sa mise sous pression, elle risque d'éclater.
- Ne pas se trouver en dessous de la fusée lors de son atterrissage.

#### 5.1.3 Contraintes liées à la réalisation du module d'instrumentation embarqué

- Doit fonctionner avec une tension de 5 volts maximum.
- Doit déterminer la hauteur, la vitesse, la position.
- Pouvoir stocker les données mesurées.
- La fusée doit contenir un système d'ouverture du parachute.
- Résister à des vibrations et à des chocs lors du décollage et de l'atterrissage.
- Avoir une taille et un poids adapté pour être embarqué dans la fusée.

## 5.2 COUT ESTIME POUR REALISER LE PROJET AU MAXIMUM

Le coût estimé de la réalisation de la fusée à eau est détaillé ci-dessous :

### 5.2.1 Le compartiment principal

- *Le corps de la fusée*
  - Une bouteille de soda : récupération, apport personnel.
- *Les ailerons*
  - Une plaque polypropylène alvéolaire de 90 x 120 cm : 3€
- *La tuyère*
  - Un joint plat de 24 x 15 x 2 mm : récupération, apport personnel.
  - Un nez de robinet à visser de type Gardena® : récupération, apport personnel.

### 5.2.2 Le compartiment de stockage du parachute

- *Le compartiment de stockage du parachute*
  - Deux bouteilles de soda : récupération, apport personnel.
  - Des élastiques : récupération, apport personnel.
  - Cerveau moteur SG90 : 8€
- *Le parachute*
  - Toile de cerf-volant/parachute/parapente de 1 m<sup>2</sup> : 4€
  - Une bobine de Ficelle : récupération, apport personnel.
  - Un émerillon : récupération, apport personnel.

### 5.2.3 Le compartiment de stockage du module d'instrumentation

- *Le compartiment de stockage du module d'instrumentation*
  - Une bouteille de soda : récupération, apport personnel.
  - Une balle de ping-pong : récupération, apport personnel.
- *Le support du module d'instrumentation*
  - Une plaque polypropylène alvéolaire de 90 x 120 cm : 3€
- *Quelques matériaux en plus*
  - Colle PL Premium : récupération, apport personnel.
  - Scotch tissé : récupération, apport personnel.

Le prix total maximal de la fusée à eau est estimé à 15 euros.

## 6 REALISATION

---

Comme vu précédemment, la fusée se compose de trois grandes parties : le corps, les ailerons et la tuyère.

### 6.1 LES MATERIAUX

Les matériaux pour réaliser la fusée à eau sont les suivants :

#### 6.1.1 Le compartiment principal

- *Le corps de la fusée*
  - Une bouteille de soda (1,5 ou 2 litres) avec des contours droits parallèles car elle est plus aérodynamique que celle avec des formes.
- *Les ailerons*
  - Une plaque polypropylène alvéolaire de 1m<sup>2</sup>.
- *La tuyère*
  - Le bouchon de la bouteille de soda citée précédemment.
  - Un joint plat de diamètre 24x27x2 mm
  - Un nez de robinet à visser de type Gardena®.
  -

#### 6.1.2 Le compartiment de stockage du parachute

- *Le compartiment de stockage du parachute*
  - Deux bouteilles de soda (1,5 ou 2 litres) avec des contours droits parallèles.
  - Des élastiques.
- *Le parachute*
  - Toile de cerf-volant de 1 m<sup>2</sup>.
  - Une bobine de Ficelle tissée.
  - Scotch tissé.
  - Un émerillon.

#### 6.1.3 Le compartiment de stockage du module d'instrumentation

- *Le compartiment de stockage du module d'instrumentation*
  - Une bouteille de soda (1,5 ou 2 litres) avec des contours droits parallèles.
  - Une balle de ping-pong.
- *Le support du module d'instrumentation*
  - Une plaque polypropylène alvéolaire de 1m<sup>2</sup>.

## 6.2 LES ETAPES DE FABRICATIONS

Pour fabriquer une fusée simple, il est conseillé de s'appuyer sur le protocole suivant.

### 6.2.1 Le compartiment principal

- *Le corps de la fusée*
  - Vider le contenu de la bouteille. Enlever l'étiquette, le bouchon et l'anneau du goulot.
  - Nettoyer la bouteille à l'aide de dissolvant pour enlever les résidus de colle laissés par l'étiquette.
  - Vérifier que la bouteille ne soit ni rayée ni abîmée car elle risque d'éclater à ces endroits lors de sa mise sous pression.
  - La mettre sous pression jusqu'à 8 bar pour être sûre qu'elle n'éclatera pas lors du lancement.
  
- *Les ailerons*
  - Faire un patron sur du carton et s'assurer que la forme de l'aileron choisi épouse celle de la bouteille.
  - Reporter ce patron à 3 reprises sur la plaque polypropylène et les découper.
  - Faire des trous (de 2 mm de diamètre) à intervalle régulier (tous les ... mm) sur le côté qui va épouser la bouteille pour faciliter le collage.
  - Ou
  - Couper 2 rectangles que l'on plie en 2 puis les riveter à l'aileron.
  - Les coller avec de la colle polyuréthane à la bouteille.
  
- *La tuyère*
  - Ajuster le diamètre du nez de robinet pour faire en sorte que son diamètre soit légèrement inférieur à celui interne du bouchon de la bouteille.
  - Percer le bouchon de manière circulaire afin que le nez de robinet redimensionné puisse rentrer dedans.
  - Assembler le bouchon, le nez de robinet et le joint puis le visser sur le goulot de la bouteille.



Figure 4 : ailerons percés



Figure 5 : Nez de robinet redimensionné



Figure 6 : Assemblage de la tuyère



Figure 7 : Assemblage de la tuyère au corps de la fusée

## 6.2.2 Le compartiment de stockage du parachute

- *Le compartiment de stockage du parachute*
  - Découper les deux extrémités de la bouteille.
  - Découper au milieu de la partie centrale un rectangle de 8 cm de long par 9 cm de large, sans découper la partie gauche.
  - Découper 2 disques de polypropylène d'un diamètre très légèrement inférieur à celui du diamètre interne de la bouteille. Les coller de part et d'autre de la porte.
  - Dans une seconde bouteille, découper les deux extrémités pour obtenir un cylindre de 9 cm de hauteur et le découper dans sa hauteur pour obtenir une bande.
  - Cette bande doit être fixée d'une part au côté extérieur de la porte et d'autre part à l'arête où a été découpée la porte, de manière à donner sur l'extérieur. L'ensemble du système doit pouvoir entrer et sortir librement du compartiment. Ce système permettra d'éjecter le parachute.
  - Comme précédemment, découper une bande de hauteur supérieure (1 à 2 cm) à celle de la porte.
  - Fixer un élastique à l'une des deux extrémités.
  - Scotcher la bande à la bouteille principale.



Figure 8 : Bouteille découpée



Figure 9 : Porte découpée avec l'éjecteur



Figure 10 : Image précédente vue de dessus



Figure 11 : Bouteille avec grande porte et élastique

- *Le parachute*

		masse en g											
V (m/s)	V(km/h)	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
2,80	10,1	62	69	76	82	87	92	97	102	107	111	115	119
3,13	11,3	55	62	68	73	78	83	87	91	96	99	103	107
3,43	12,4	50	56	62	67	71	76	80	83	87	91	94	97
3,71	13,3	47	52	57	62	66	70	74	77	81	84	87	90
3,96	14,3	44	49	53	58	62	65	69	72	76	79	82	84
4,43	15,9	39	44	48	52	55	58	62	65	68	70	73	76

Tableau 4 : Choix du diamètre externe du parachute

- En fonction de la masse de la fusée à vide et de la vitesse de chute voulue, tracer et découper le parachute.

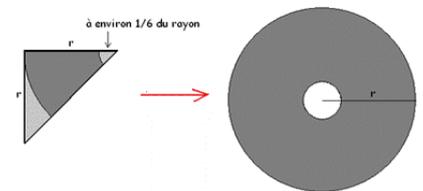


Figure 12 : Patron de découpage du parachute

- Plier la toile en 8 pour tracer 8 traits équidistants, percer à 5 mm du bord externe de la voile des trous de 2mm.
- Découper 8 brins de ficelle de 90 cm.
- Attacher une extrémité des brins à un des trous percés précédemment.
- Relier les autres extrémités des brins à un émerillon.

### 6.2.3 Le compartiment de stockage du module d'instrumentation

- *Le compartiment de stockage du module d'instrumentation*

- Couper les 2 extrémités de la bouteille.



Figure 13 : Bouteille découpée

- Couper et coller la balle de ping-pong dans la bouteille.



Figure 14 : Collage de la balle de ping-pong

- *Le support du module d'instrumentation*

- Découper 2 disques de polypropylène d'un diamètre très légèrement inférieur à celui du diamètre interne de la bouteille.
- Découper un rectangle de polypropylène de largeur inférieur au diamètre inférieur à celui du diamètre interne de la bouteille et de hauteur supérieur à celle du module d'instrumentation.
- Assembler les 3 éléments comme sur la figure.
- Insérer le support dans le compartiment du module d'instrumentation.
- Emboîter l'assemblage sur le compartiment de stockage du parachute.

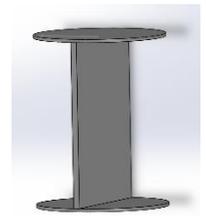


Figure 15 : Support du module d'instrumentation

## 7 INSTRUMENTATION DE LA FUSEE A EAU

### 7.1 GRANDEURS PHYSIQUES MESURABLES

Grandeurs physiques influentes sur la phase de vol		
Grandeur physique à mesurer	Unité de la grandeur mesurée	Outils utilisables pour mesurer
Masse de la fusée à vide	Kg	Balance – Capacité 0-5kg
Masse de la fusée pleine	Kg	
Volume de la bouteille	L	Eprouvette graduée – capacité 2L
Volume d'eau initial	L	
Diamètre de la bouteille	mm	Micromètre d'intérieur à 3 touches – capacité 87-100 mm
Diamètre interne de la tuyère	mm	Micromètre d'intérieur à 3 touches – capacité 8-10 mm

Tableau 5 : Grandeurs physiques influentes sur la phase de vol

Grandeurs physiques concernant la phase de vol		
Grandeur physique à mesurer	Unité de la grandeur mesurée	Capteurs utilisables pour mesurer
Accélération de la fusée	$m.s^{-2}$	Capteur actif piézoélectrique – type accéléromètre (accélération, vitesse, position)
Vitesse de la fusée	$m.s^{-1}$	
Durée de la phase de vol	s	
Altitude atteinte par la fusée	m	Altimètre

Tableau 6 : Grandeurs physiques concernant la phase de vol

## 7.2 MISE EN PLACE DE L'INSTRUMENTATION

Afin d'acquérir et de traiter les diverses grandeurs physiques mesurables tel que la pression, la vitesse, ... il est nécessaire d'utiliser un microcontrôleur. Ce composant électronique intègre de multiples fonctions au sein d'un même boîtier. Il se compose typiquement des éléments suivants :

- Une unité de calcul.
- Mémoire ROM (Read Only Memory).
- Mémoire RAM (Random Access Memory).
- Un contrôleur d'interruption.
- Un compteur/temporisateur (timer).
- Des entrées/sorties parallèles (ports).
- Un UART (port série).

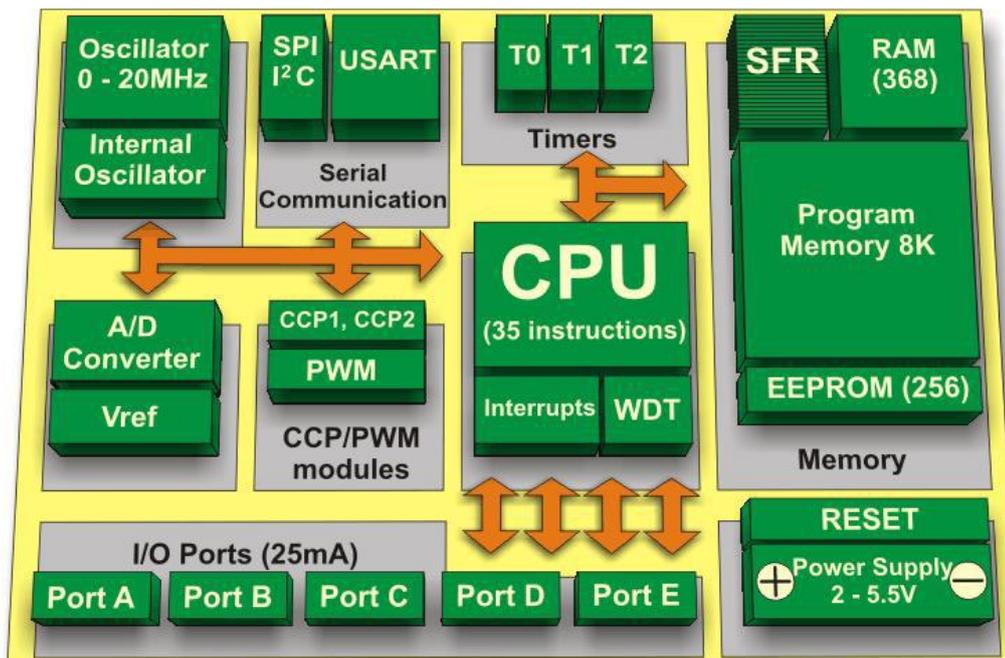


Figure 16 : Microcontrôleur PIC 16F877

Dans notre cas, le module de mesures doit être embarqué dans un compartiment de la fusée. Pour cela il doit respecter plusieurs contraintes d'encombrement, de poids et d'autonomie.

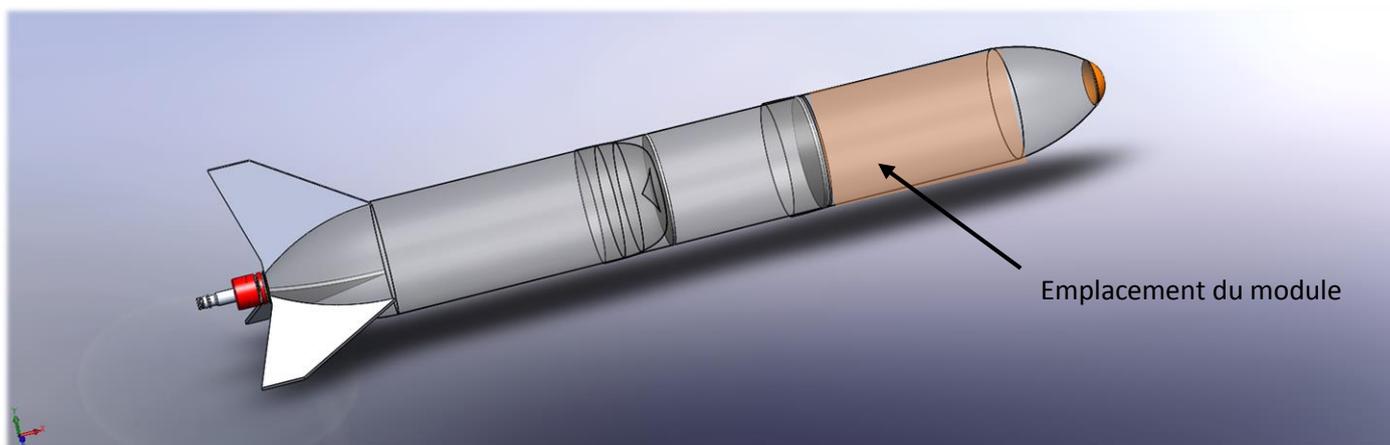


Figure 17 : emplacement du module de mesure

Afin de faciliter la mise en place (intégration et programmation), des microcontrôleurs plusieurs plateformes ont été développées : Arduino, Raspberry pi, ...

Notre choix s'est porté sur le module Arduino. Ce modèle de carte électronique sous licence libre permet à la fois le prototypage et l'intégration définitive. Ce type de plateforme est composé d'un microcontrôleur d'architecture Atmel, programmable en langage C. La plupart des cartes Arduino sont programmables par l'intermédiaire d'un port USB et via une interface sur l'ordinateur (Logiciel Arduino).

Les cartes Arduino permettent d'analyser et de créer des signaux électriques (lecture de capteurs et commande de moteurs).

Plusieurs modèles de cartes sont commercialisés. L'une des plus connue est la carte Arduino Uno. Cette dernière est équipée d'un microcontrôleur ATMEGA 328P gérant 14 Input/Output pins.



Figure 18 : carte Arduino UNO

Cette carte électronique peut être alimentée par le port USB (5 V) ou bien par une tension comprise entre 7 et 12 volts (jack ou pin vin). Vu les dimensions de la carte cette dernière peut parfaitement s'intégrer dans l'espace alloué.

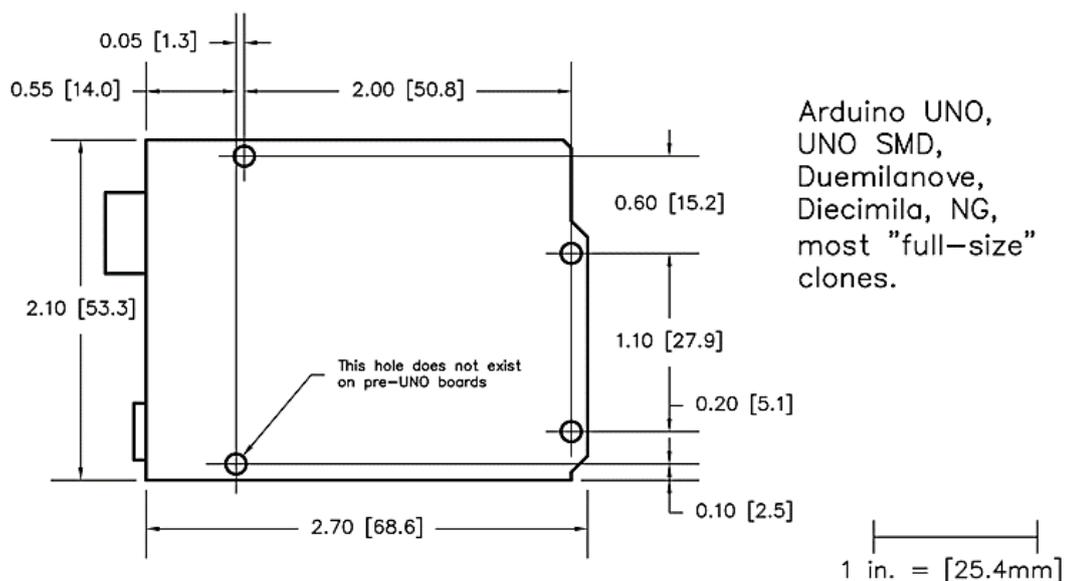


Figure 19 : dimensions d'une carte Arduino U

# UNO PINOUT

7-12V Depending on current draw

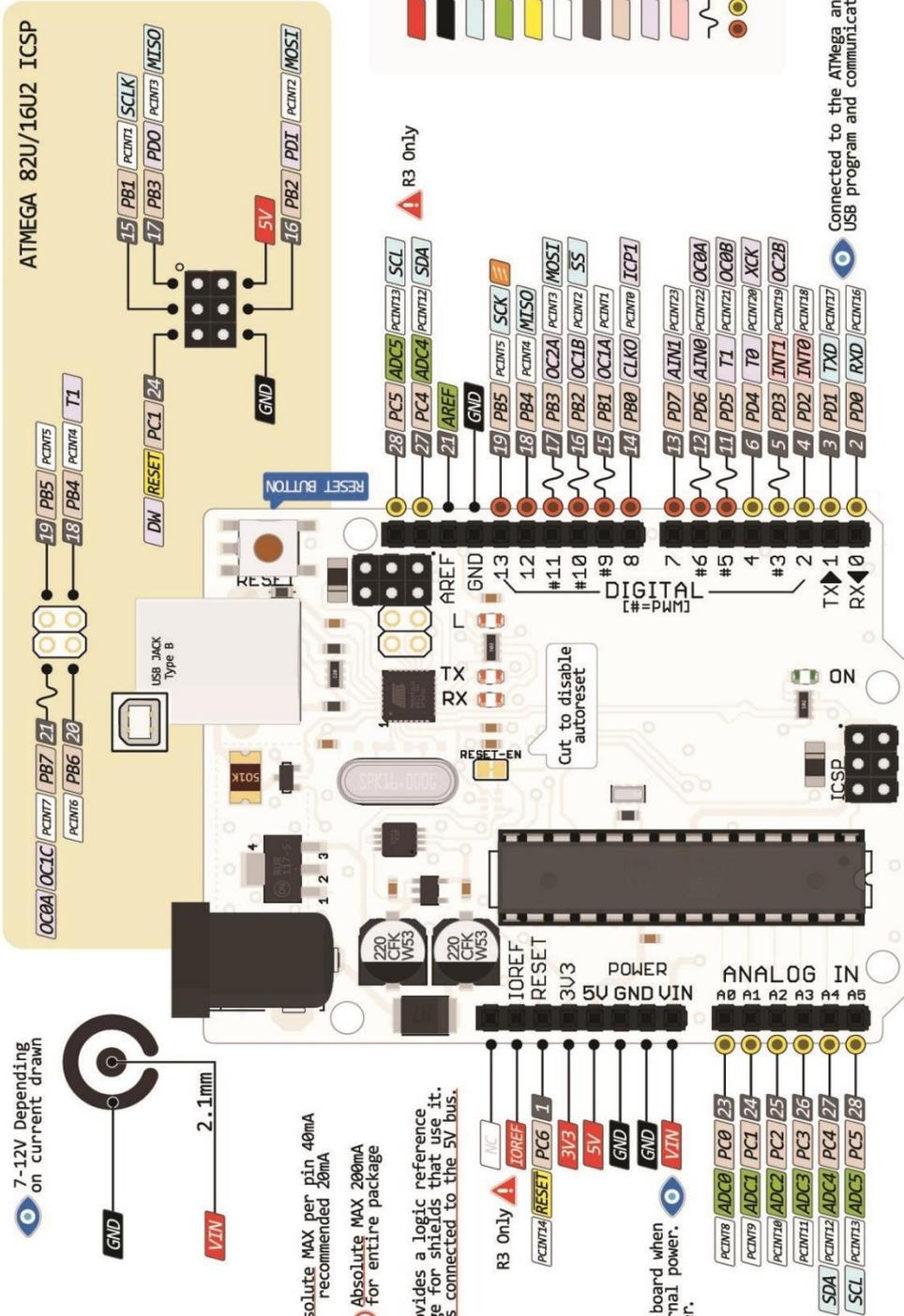


**!** Absolute MAX per pin 40mA recommended 20mA

**⊘** Absolute MAX 200mA for entire package

**!** **IOREF** provides a logic reference voltage for shields that use it. It is connected to the 5V bus.

The input voltage to the board when it is running from external power. Not USB bus power.



**Power** (Red)

**GND** (Black)

**Serial Pin** (Light Blue)

**Analog Pin** (Green)

**Control** (Yellow)

**INT** (White)

**Physical Pin** (Grey)

**Port Pin** (Orange)

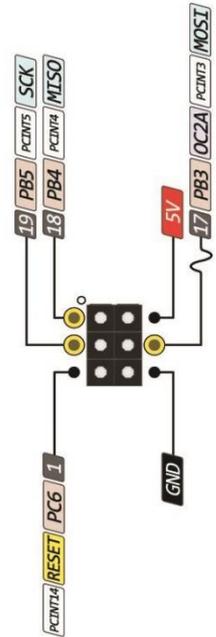
**Pin function** (Purple)

**Interrupt Pin** (Pink)

**PWM Pin** (Brown)

**Port Power** (Red circle with lightning bolt)

Connected to the ATmega and used for USB program and communicating with it



**!** The power sum for each pin's group should not exceed 100mA

Figure 20 : Descriptif des broches

- Carte Arduino Uno officielle - > 20€
  - Microcontrôleur : ATmega328.
  - Tension de fonctionnement : 5 V.
  - Tension en entrée (recommandée) : de 7 à 12 V.
  - Tension en entrée (limites) : de 6 à 20 V.
  - Broches E/S numériques : 14 (dont 6 alimentent la sortie MLI).
  - Broches d'entrées analogiques : 6.
  - Courant CC par broche d'E/S : 40 mA.
  - Courant CC pour la broche de 3,3 V : 50 mA.
  - Mémoire Flash : 32 Ko (ATmega328) dont 0,5 Ko utilisé par le chargeur initial de programme.
  - Mémoire SRAM : 2 Ko (ATmega328).
  - Mémoire EEPROM : 1 Ko (ATmega328) Vitesse d'horloge : 16 MHz.

Afin d'acquérir les diverses grandeurs physiques, des capteurs utilisant de multiples technologies doivent être employés.

### 7.2.1 Centrale inertielle

Une centrale inertielle est un instrument capable d'intégrer les mouvements d'un mobile afin d'estimer son orientation, sa vitesse linéaire et sa position. Cet instrument fonctionne sans aucune interaction avec l'extérieur (ce qui n'est pas le cas du GPS par exemple).

Une centrale inertielle se compose d'un ensemble de capteurs :

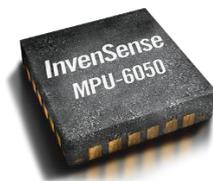
- 3 accéléromètres : acquisition du vecteur force
- 3 gyroscopes : acquisition du vecteur vitesse angulaire.

A cela s'ajoute un calculateur effectuant les diverses opérations mathématiques. Cet instrument est aujourd'hui utilisé dans de nombreux domaines tels que l'aviation, la défense, ...

Dans notre cas, ce système complexe peut être simplifié en utilisant que deux capteurs : un gyroscope 3 axes et un accéléromètre 3 axes. Le calculateur est quant à lui remplacé par le microcontrôleur. Ce nouvel ensemble peut être désigné par l'acronyme IMU pour Inertial Measurement Unit.

Il existe plusieurs projets Open Source de centrale inertielle spécialement conçues pour des applications liées à Arduino. L'un des plus connus se nomme x-IMU.

Ce type de système doit être miniature afin d'être embarqué dans une fusée à eau. C'est pour cela que différentes cartes électroniques ont été développées embarquant des puces électroniques semblables à celles proposées par InvenSense nommé MPU 6050.



*Figure 21 : Puce électronique de la centrale inertielle*

Ce module combine deux capteurs un gyroscope 3 axes et un accéléromètre 3 axes. Il dispose également d'un système digital de traitement du mouvement (DMP). Le capteur communique les informations via un bus I<sup>2</sup>C. Ce dernier peut également acquérir des informations d'autres capteurs (magnétomètre) afin d'améliorer la précision des relevés.

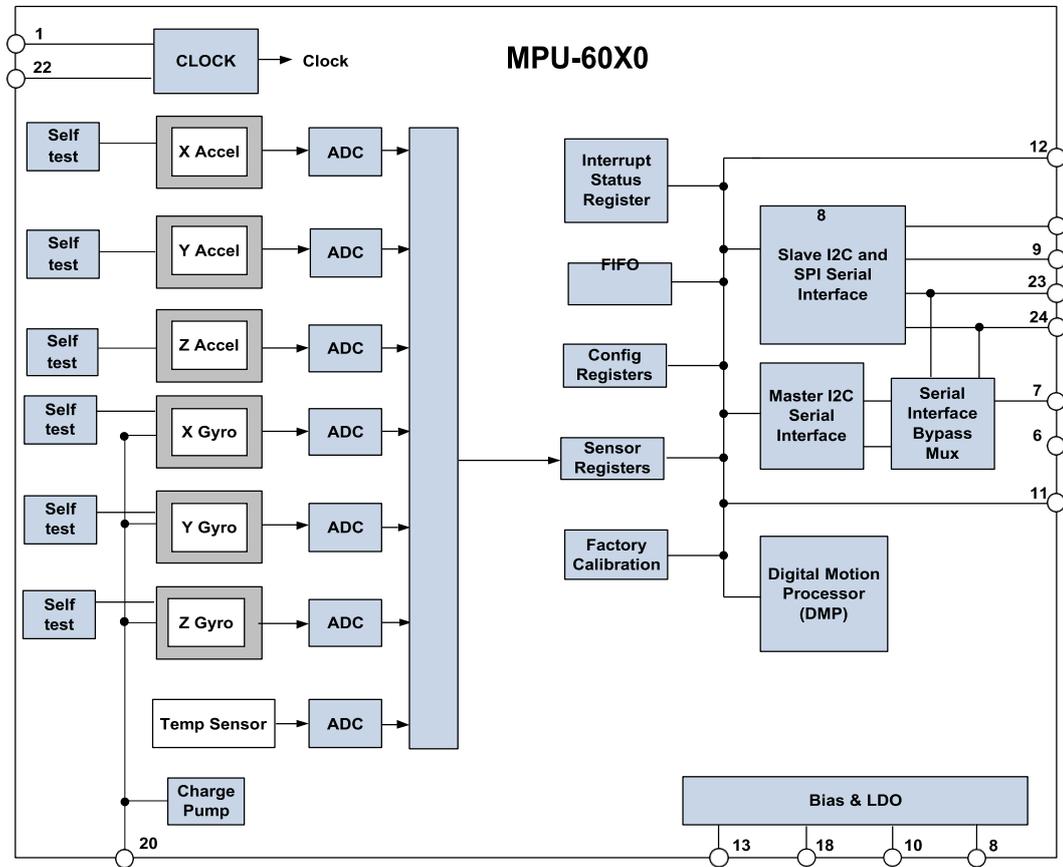


Figure 22 : Composants de la puce

Comme vu précédemment, la puce doit être intégrée à une carte électronique s'occupant de gérer l'alimentation et portant le brochage.

- Module MPU 6050 -> de 7€ à 40€
  - Puce InvenSense.
  - Gamme de gyroscope :  $\pm 250$   $500$   $1000$   $2000$  / s.
  - Plage d'accélération :  $\pm 8$   $\pm 2$   $\pm 4$   $16g$ .



Figure 23 : Module MPU 6050

### 7.2.2 Capteur de pression

Afin d'acquérir la pression au sein du réservoir, il est possible d'utiliser un capteur de pression miniature. Le BMP 180 peut correspondre à nos contraintes. En effet ce dernier a une étendue de mesure de 300 hPa à 1100 hPa. Sa résolution est de l'ordre de 0.02 hPa.

Ce capteur communique également via un bus I<sup>2</sup>C.

- Module BMP 180 - > 10€
  - Offre une échelle de mesure de pression de 300 à 1 100 hPa.
  - Plage de tension d'alimentation adaptable (1,8 à 3,6 V)
  - Mesure de bruits faibles.
  - Interface numérique à deux fils (I<sup>2</sup>C, TWI, « filaire »).
  - Large échelle de pression barométrique.
  - Consommation d'énergie ultra-faible.
  - Étalonné en usine.
  - Comprend un capteur de température.



Figure 24 : Module BMP 180

### 7.2.3 Capteur de niveau

L'acquisition du niveau du réservoir de la fusée peut être effectuée en utilisant la différence de potentiel entre un réservoir contenant de l'eau et un réservoir n'en contenant pas.

Ce capteur peut être fabriqué par nos soins.

### 7.2.4 Transmission capteurs / microcontrôleur

Cet échange de données se fera par l'intermédiaire d'un bus I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit). La carte Arduino est considérée comme le maître et les capteurs sont les esclaves.

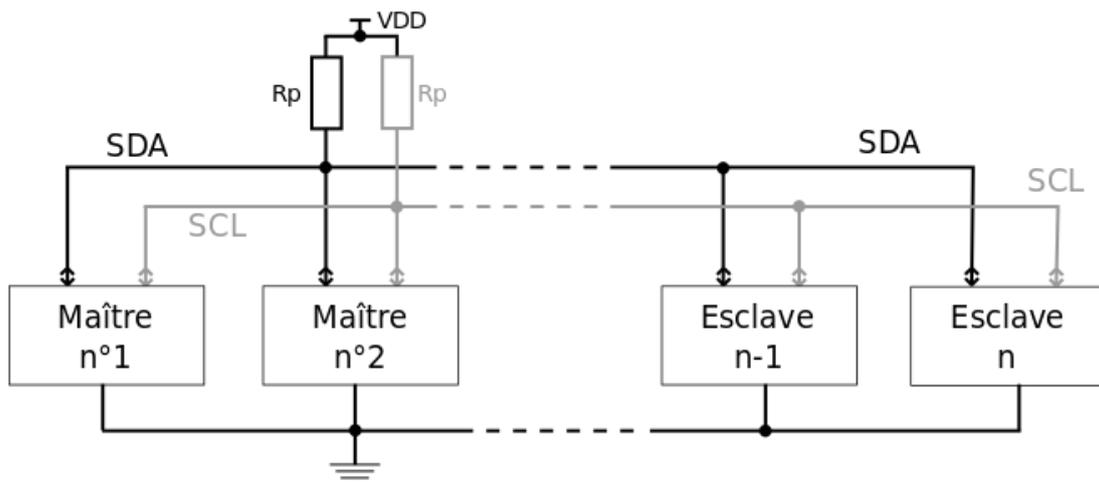


Figure 25 : Montage d'éléments communiquant en I2C

La connexion est réalisée par l'intermédiaire de deux lignes :

- SDA (Serial Data Line) : ligne de données bidirectionnelle
- SCL (Serial Clock Line) : ligne d'horloge de synchronisation bidirectionnelle

Protocole de communication :



Figure 26 : protocole de communication I<sup>2</sup>C

## 7.2.5 Transmission microcontrôleur / ordinateur

Deux solutions sont envisageables : le transfert ou le stockage.

- *Transmission dite en temps réel* : La transmission des données d'un microcontrôleur à un ordinateur peut s'effectuer en utilisant les protocoles Wifi, ZigBee ou Bluetooth. Ces derniers offrent divers avantages et inconvénients.

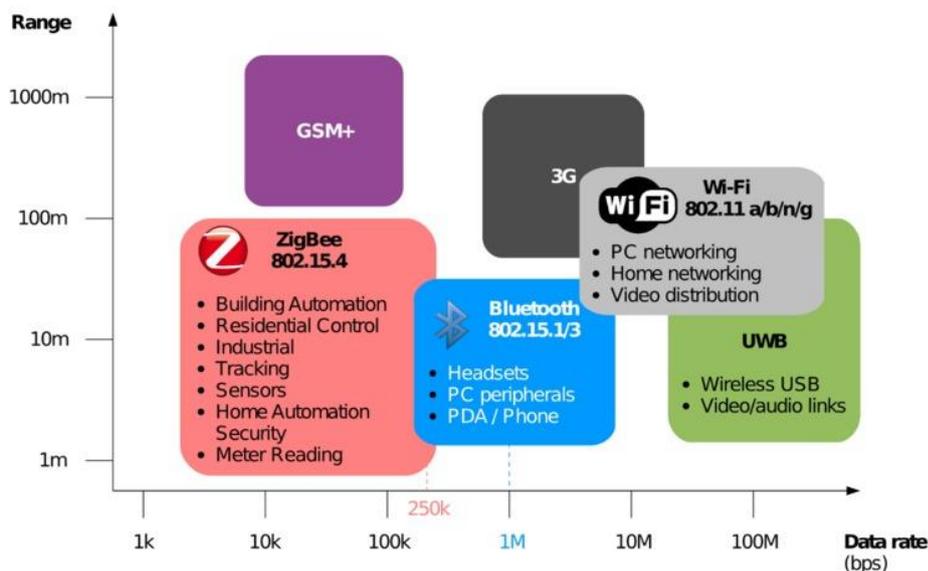


Figure 27 : diagramme exposant les différents moyens de communication sans fil.

Dans notre cas le ZigBee, qui est un protocole de haut niveau permettant la communication à courte distance, offre de nombreux avantages. Comparons-le au Wifi et au Bluetooth.

Caractéristiques	Zigbee	Bluetooth	Wi-Fi
Norme IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11a/b/g/n/ac
Besoins mémoire	4-32 ko	250 ko +	1 Mo +
Autonomie avec pile	Années	Mois	Jours
Vitesse de transfert	20-250 kb/s	1-3 Mb/s	11-54-108-320-1000 Mb/s
Portée (environ)	100 m	10 m	300 m

Tableau 7 : Comparatif des différents moyens de communication sans fil

Comme le montre le tableau ci-dessus, le Zigbee semble être adapté à nos besoins, tant sur le plan autonomie que sur le plan distance d'émission. De plus ce dernier est assez simple à mettre en place.

Pour réaliser une communication Zigbee entre deux appareils il est nécessaire de posséder un émetteur et un récepteur.

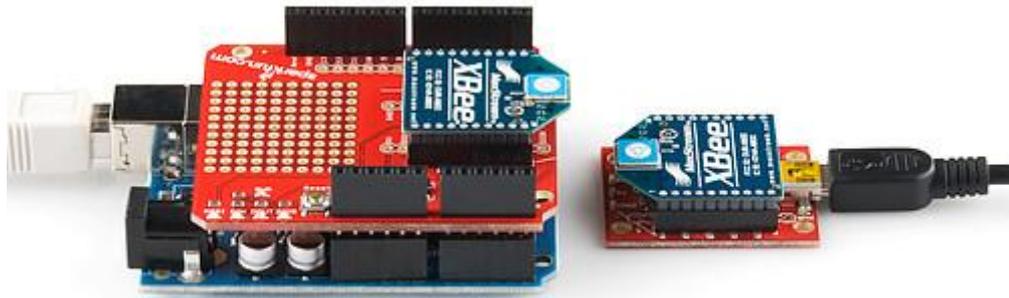


Figure 28 : Montage émetteur / récepteur Xbee

Protocole de communication :

### 802.15.4 General Frame Format

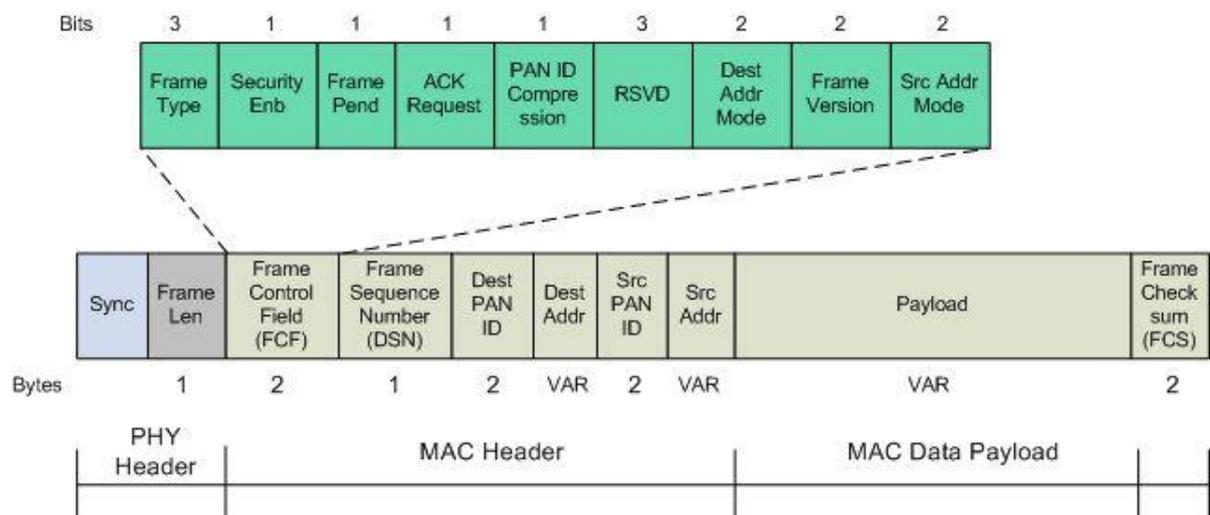


Figure 29 : Trame générale

Il existe de nombreux modules Xbee possédant chacun leurs particularités.

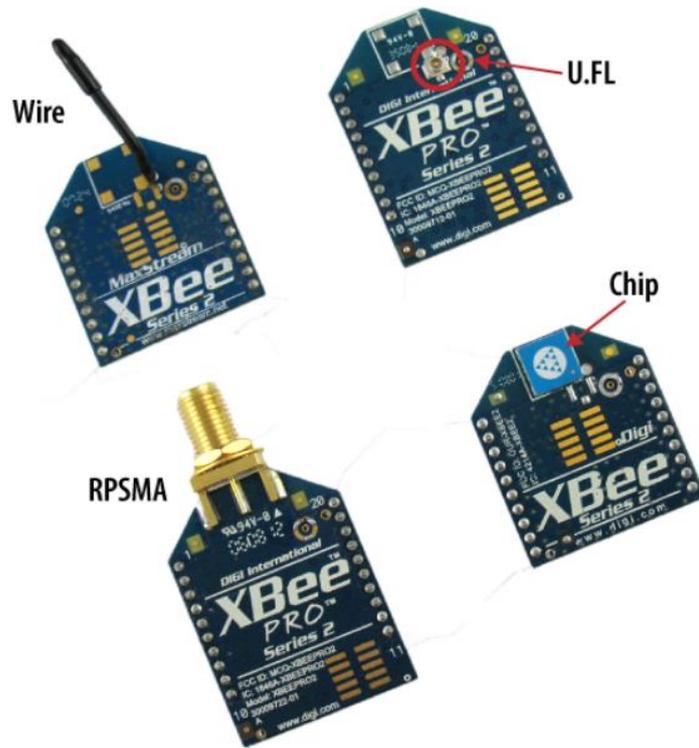


Figure 30 : différents modules Xbee

Matériel nécessaire :

- 2 Modules Xbee série 2 avec antenne intégrée -> 2 x 22€
  - 40 mA @ 3,3 V.
  - Débit maximum de données de 250 kbps.
  - Sortie à 2 mW (+ 3 dBm).
  - Portée de 120 m (400 pieds).
  - Antenne intégrée.
  - Certifiée totalement FCC.
  - 6 broches d'entrée CAN à 10 bits.
  - 8 broches E/S numériques.
  - Encryptage à 128 bits.
  - Configuration en local ou sans fil.
  - Jeu de commande AT ou API.



Figure 31 : Module Xbee

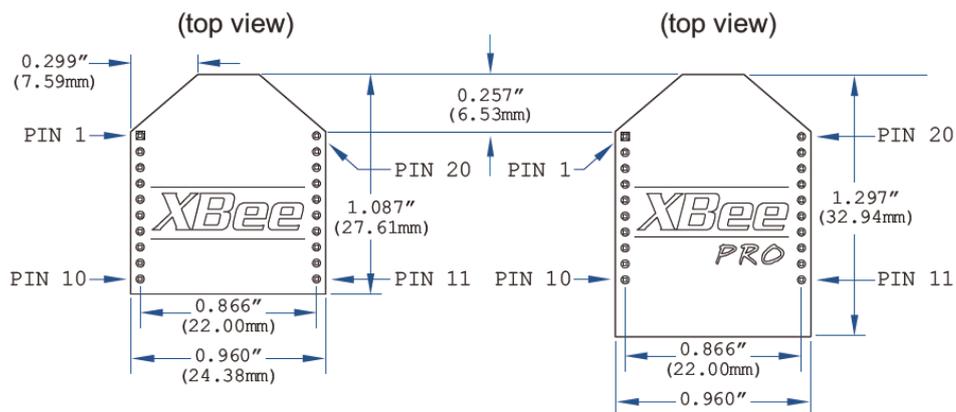


Figure 32 : dimensions des modules

- Un shield Arduino - > 7€
  - Interfaces de blindage doubles, compatibles Arduino, pour une mise en cascade simplifiée.
  - Fournit un maximum de 500 mA à 3,3 V.
  - Répartition complète à pas de 2,54 mm pour XBee.
  - DEL à 3 positions (ON/SLEEP, RSSI, ASS) pour Xbee.
  - Dimensions de la carte : 55 x 59mm.
  - Poids : 35 g.



Figure 33 : Shield Arduino

- Un adaptateur Xbee USB - > 24€
  - Unité basique USB/série de la gamme XBee.
  - Fonctionne avec tous les modules XBee incluant les séries 1 et 2,5, standard et Pro.
  - Convertisseur USB/série FT231X intégré.
  - RX, TX, RSSI (indicateur d'intensité du signal) et indicateur d'alimentation.



Figure 34 : Adaptateur Xbee USB

### 7.2.6 Stockage

Le stockage des données peut s'effectuer sur une carte SD, micro SD. Cette méthode permet de s'affranchir des contraintes de transmission (problème de portée du signal). Un shield comme celui présenté ci-dessous est nécessaire.

Matériel nécessaire :

- Lecteur de carte SD - > 2€



Figure 35 : Lecteur de carte SD

### 7.2.7 Traitement des données

Le traitement des données peut s'effectuer grâce à un tableur ou grâce à un logiciel du type Matlab, processing. Le module de mesure est complété par un déclencheur, ce dernier lance l'acquisition des données.

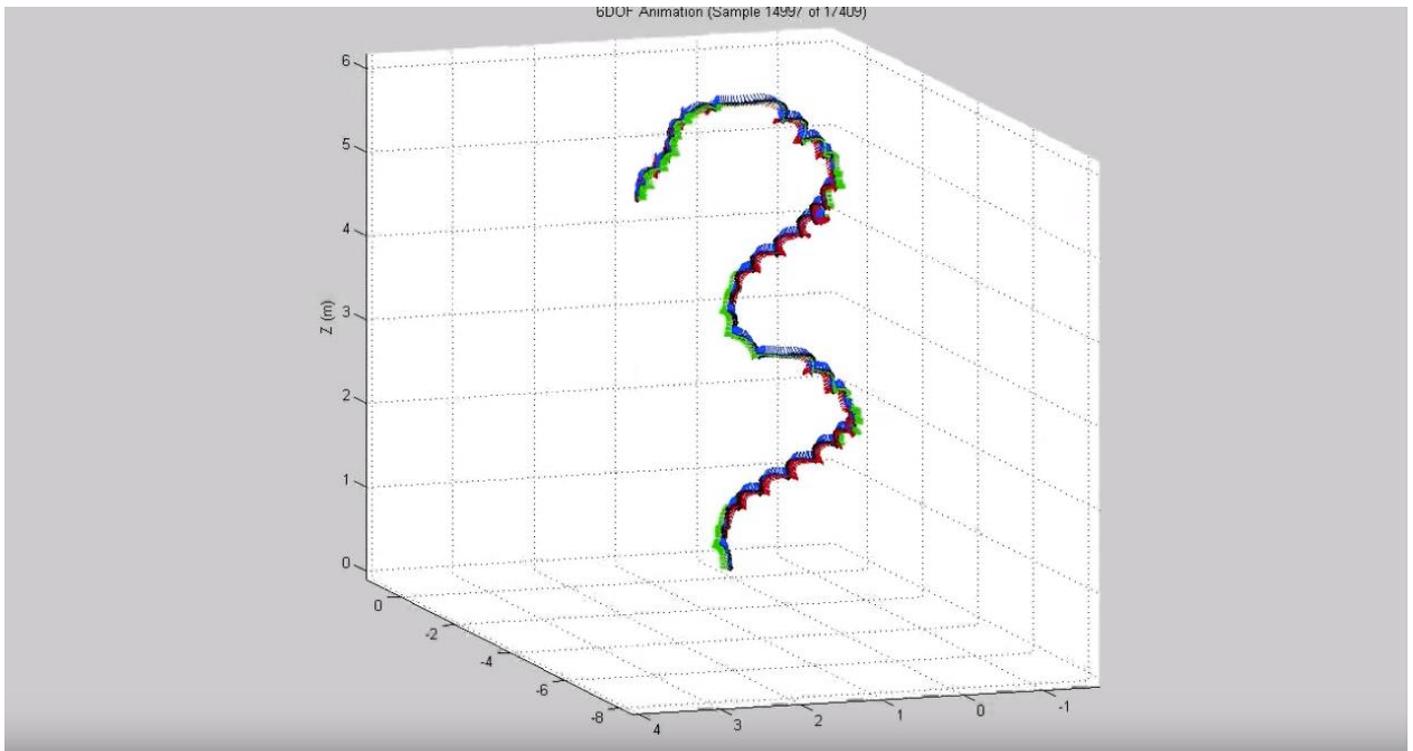
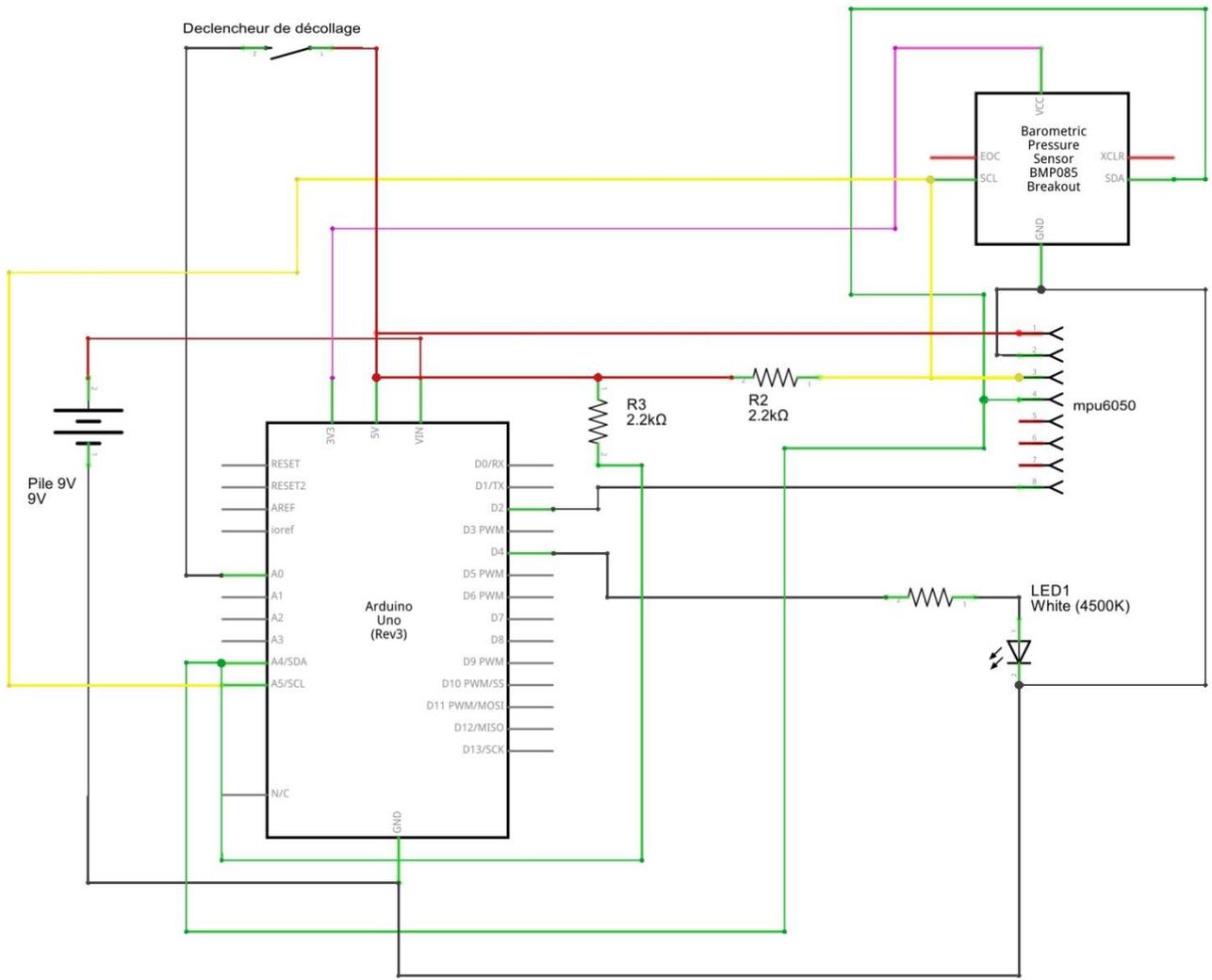


Figure 36 : Exemple de traitement des données

Différents algorithmes permettent de traiter les données des centrales inertielles. Exemple : L'algorithme AHRS (Attitude and Heading Reference System).

### 7.2.8 Module de mesure

En résumé, afin d'acquérir les diverses grandeurs, il est nécessaire de réaliser un module de mesure. Il est alors composé d'une carte Arduino UNO, une centrale inertielle, un capteur de pression, un module Xbee d'un poids d'environ 120g. Pour un prix estimé à 120 €. L'ensemble de l'électronique embarqué sera fixé sur une plaque en plastique et protégé par du coton.



fritzing

Figure 37 : schéma électrique du module

## 8 BIBLIOGRAPHIE

---

### 8.1 PRINCIPE

- H. COITOUX. Cours de mécanique. pp. 20 (3.6 Principe d'action et de réaction).

### 8.2 THEORIE

- Lycée NAVAL, T.P.E fusées à eau [en ligne]. <http://tpe-fusee-a-eau.webnode.fr/> (consultation le 21/05/2016)
- Alain JUGE, Principe – Contribution sur les fusées à eau [en ligne]. <http://alain.juge.pagesperso-orange.fr/Francais/CadreFR.htm> (consultation le 21/05/2016).
- Rapport d'un projet similaire effectué par des étudiants de Polytech Clermont-Ferrand.

### 8.3 SIMULATION

- Papyjo, SIMULATION - LES FUSEES à EAU avec PAPYJO [en ligne]. <http://fusees.free.fr/spip.php?article61> (consultation le 11/04/2016).

### 8.4 MODELISATION

### 8.5 FAISABILITE

### 8.6 REALISATION

- Katz George, WATER ROCKET BASIC CONSTRUCTION [en ligne]. <http://www.aircommandrockets.com/construction.htm> (consultation le 18/04/2016)
- U.S Water Rockets, Construction & Tutorials Menu [en ligne]. <http://www.uswaterrockets.com/index.htm> (consultation le 18/04/2016).
- Papyjo, SIMULATION - LES FUSEES à EAU avec PAPYJO [en ligne]. <http://fusees.free.fr/spip.php?article61> (consultation le 11/04/2016)

<http://www.fuzeao.org/index.php>

### 8.7 INSTRUMENTATION DE LA FUSEE A EAU

- Bildr, PROXIMITY SENSORS [en ligne]. <http://bildr.org/2011/03/various-proximity-sensors-arduino/> (consultation le 27/02/2016)
- TXRobotic, ARDUINO MICRO [en ligne]. <http://www.txrobotic.fr/cartearduinomicro.html> (consultation le 23/01/2016)
- Arduino, ARDUINO UNO [en ligne]. <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno#> (consultation le 22/10/2015)
- DIY Hacking, ARDUINO MPU 6050 – BEST IMU SENSOR TUTORIAL [en ligne]. <http://diyhacking.com/arduino-mpu-6050-imu-sensor-tutorial/> (consultation le 22/01/2016)
- Arduino, MPU-6050 Accelerometer + Gyro [en ligne]. <http://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050> (consultation le 22/01/2016)

- InvenSense, MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking™ Devices [en ligne]. <http://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/> (consultation le 22/01/2016)
- Sparkfun, SparkFun Triple Axis Accelerometer and Gyro Breakout - MPU-6050 [en ligne]. <https://www.sparkfun.com/products/11028> (consultation le 22/01/2016)
- Adafruit, BMP180 Barometric Pressure/Temperature/Altitude Sensor- 5V ready [en ligne]. <https://www.adafruit.com/product/1603> (consultation le 22/01/2016)
- Sparkfun, SparkFun Barometric Pressure Sensor Breakout - BMP180 [en ligne]. <https://www.sparkfun.com/products/11824> (consultation le 22/01/2016)
- IO Technologies, x-IMU [en ligne]. <http://www.x-io.co.uk/products/x-imu/> (consultation le 22/01/2016)
- Arduino, Xbee Shield [en ligne]. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoXbeeShield> (consultation le 22/01/2016)
- ~JérômeAbel, XBee & Arduino [en ligne].14/11/2014. <http://jeromeabel.net/ressources/xbee-arduino> (consultation le 22/01/2016)
- Wikipedia, Capteur [en ligne].30/12/2014 <https://fr.wikiversity.org/wiki/Capteur> (consultation le 22/01/2016)
- BERGER Philippe, Les Capteurs [en ligne]. [http://philippe.berger2.free.fr/automatique/cours/cpt/les\\_capteurs.htm](http://philippe.berger2.free.fr/automatique/cours/cpt/les_capteurs.htm)
- Christian BISSIERES. Cours ACQUISITION D'UNE GRANDEUR PHYSIQUE.
- Fabrice DESCHAMPS. Cours ACQUERIR L'INFORMATION CAPTEURS ET DETECTEURS.
- MESURES 746 Guide d'achat, Pages 90 à 98, Juin 2012
- DEUS EX SILICIUM. EPISODE 14 : Anatomie d'un accéléromètre numérique [vidéo en ligne]. Youtube, 12/06/2015 [consulté le 13/12/2015]. 1 vidéo, 13 : 45 min. [https://youtu.be/V\\_zRvc1tNBM](https://youtu.be/V_zRvc1tNBM)
- SebMadgwickResearch. 3D Tracking with IMU (Cyclic Motion) [vidéo en ligne]. Youtube, 26/09/2013 [consulté le 22/01/2016]. 1 vidéo, 1 : 08 min. <https://youtu.be/SI1w9uaBw6Q>
- SebMadgwickResearch. 3D Tracking with IMU [vidéo en ligne]. Youtube, 08/03/2011 [consulté le 22/01/2016]. 1 vidéo, 3 : 27 min. <https://youtu.be/6ijArKE8vKU>
- SebMadgwickResearch. Open Source IMU and AHRS Algorithm with x-IMU [vidéo en ligne]. Youtube, 27/09/2011 [consulté le 22/01/2016]. 1 vidéo, 1 : 32 min. <https://youtu.be/BXsGWOmTmU>
- U=RI. Arduino Ep.19 - La centrale inertielle MPU-6050 [vidéo en ligne]. Youtube, 04/07/2015 [consulté le 22/01/2016]. 1 vidéo, 4 min. <https://youtu.be/8texpFduVqA>