

# 2011

Gymnase Auguste Piccard

Christian Cardinaux 3M8

Avec comme professeur

Monsieur Laurent de Schoulepnikoff

## [CONSTRUCTION D'UN FUSIL À AIR COMPRIMÉ ET CALCULS DE TRAJECTOIRES]

Ce travail de maturité consiste à construire un fusil à air comprimé, puis de calculer des trajectoires pratiques et de les comparer avec des données théoriques

## Résumé

Ce travail de maturité a pour buts de construire un fusil à air comprimé, puis de calculer des trajectoires pratiques et de les comparer avec des données théoriques. Afin d'atteindre ces buts, j'ai dû franchir plusieurs étapes.

La première a été celle de la construction d'un fusil ayant plusieurs variables de tirs. Plusieurs décisions ont été nécessaires pour parvenir à un résultat satisfaisant. Il m'a également fallu des accessoires pour mesurer les différents paramètres.

Une fois que le fusil a été fonctionnel, j'ai dû trouver une formule permettant de calculer la vitesse de sortie de la balle du canon et une formule calculant la portée d'un tir selon l'angle de tir, la vitesse de sortie de la balle et la masse de la balle. J'ai également créé un programme fortran calculant la portée de tir selon la vitesse et l'angle de tir.

Dès lors, j'ai vérifié les résultats théoriques de vitesse à la sortie du canon en les comparant avec des données pratiques obtenues lors de trois expériences. Après quelques constatations, j'ai pu déterminer les vitesses de sortie de la balle selon la pression du gaz dans le réservoir.

Ayant désormais des vitesses de sortie de la balle, je pouvais calculer des résultats de portées théoriques. Mais comme mon programme en fortran ne prend pas en compte les frottements de l'air, donnée non-négligeable, j'ai collaboré avec mon collègue Kevin Mury 3M8. Son travail de maturité consiste en effet à créer un programme informatique capable de calculer des portées de tirs en prenant en compte les frottements de l'air. Il m'a donc donné son programme et je lui ai fourni des données pratiques à comparer avec ses données théoriques. Nous avons donc pu vérifier la fiabilité de son programme et par conséquent les lois de balistique.

Voici quelle a été ma démarche. Je vous invite à la découvrir plus précisément en lisant de travail.

## Table des matières

### 1. Introduction

### 2 .Méthode

#### 2.1 Formules

##### 2.1.1 Formule pour la vitesse

##### 2.1.2 Formule pour la portée selon vitesse et angle

#### 2.2 Programme Fortran sans frottements de l'air

#### 2.3 Méthode construction fusil

##### 2.3.1 Composants Fusil

###### 2.3.1.1 Le moyen de compression de l'air

###### 2.3.1.2 Le réservoir

###### 2.3.1.3 Le moyen de libération de l'air

###### 2.3.1.4 Le projectile

###### 2.3.1.5 Le canon

##### 2.3.2 Raccords

###### 2.3.2.1 Raccord 1

###### 2.3.2.2 Raccord 2

###### 2.3.2.3 Raccord 3

###### 2.3.2.4 Les fuites

##### 2.3.3 Fusil et accessoires

##### 2.3.4 Proposition d'amélioration de la construction de fusil

#### 2.4 Mesure de la vitesse de la balle à la sortie du canon

##### 2.4.1 Méthode des disques tournants

##### 2.4.2 Méthode des cellules photovoltaïques

##### 2.4.3 Méthode du pendule balistique

## 2.5 Mesures de la portée lors de tirs balistiques

### 3. Résultats

#### 3.1 Résultats mesures vitesse

##### 3.1.1 Résultats mesures vitesse par la méthode des disques

###### 3.1.1.2 Mesures vitesse par la méthode des disques

###### 3.1.1.2 Commentaires mesures vitesse par la méthode des disques

##### 3.1.2 Résultats vitesse par la méthode des cellules photovoltaïques

###### 3.1.2.1 Mesures vitesse par la méthode des cellules

###### 3.1.2.2 Commentaires mesures vitesse par la méthode des cellules

##### 3.1.3 Résultats vitesse par la méthode du pendule

###### 3.1.3.1 Mesures vitesse par la méthode du pendule

###### 3.1.3.2 Commentaires mesures vitesse par la méthode du pendule

##### 3.1.4 Conclusion détermination vitesse

#### 3.2 Résultats de mesure de portée

##### 3.2.1 Mesures portée de tir

##### 3.2.2 Commentaires mesures de portée de tir

##### 3.2.3 Sources d'erreurs et propositions d'amélioration

### 4. Conclusion

### 5. Annexes

#### 5.1 Sources

#### 5.2 Remerciements

## 1. Introduction

Ce travail de maturité consiste à construire un fusil à air comprimé et à simuler la trajectoire du projectile à l'aide d'un programme variant selon plusieurs paramètres.

Grâce à ses deux outils, je vais pouvoir vérifier les formules de balistiques et les appliquer dans un contexte expérimental.

Afin de tirer le meilleur résultat de ce travail, je vais vous expliquer ma démarche en 4 points ; la méthode utilisée, les résultats obtenus, les analyses, et pour finir la conclusion.

J'ai choisi ce sujet car ce travail m'a permis de réunir mon intérêt pour la physique, l'informatique et les travaux manuels. J'ai toujours apprécié concilier l'aspect théorique et la réalité pratique. De plus la balistique est un sujet que j'ai aimé travailler en première année gymnasiale dans les cours de physique. Avec ce travail j'ai donc pu développer ma créativité en innovant des solutions face à des problèmes, qu'ils soient pratiques ou théoriques. C'est pour ces principales raisons que j'ai pris beaucoup de plaisir durant tout ce travail de maturité.

## 2. Méthode

### 2.1 Formules

#### 2.1.1 Formule pour la vitesse

La première étape a été de trouver une formule permettant de déterminer la vitesse du projectile à la sortie du canon. Sans cette donnée, j'aurais été obligé d'effectuer des essais en mesurant le temps nécessaire à la balle pour parcourir une certaine distance.

Ce chapitre va détailler le cheminement utilisé pour arriver à la formule :

$$v = \sqrt{\frac{2 P_0 V_0}{m (\gamma - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{V_0}{V_0 + SL} \right)^{\gamma-1} \right] - \frac{2 F_f L}{m}}$$

Symboles utilisés dans ce chapitre :

$V_0 =$	volume du réservoir
$V =$	volume du canon jusqu'à la balle
$D =$	diamètre du canon (et donc aussi de la balle)
$L =$	longueur du canon
$S = \pi (D/2)^2 =$	section (aire) du canon

$S_B = 2\pi (D/2)^2 = 2S$  = surface de la balle en contact avec le gaz (= moitié surface totale balle)

$P$  : pression de l'air dans le réservoir

$m$  : masse de la balle

$v$  : vitesse de la balle en sortie du canon

$d\vec{F}$  : force exercée par le gaz sur un petit élément de surface  $dS$

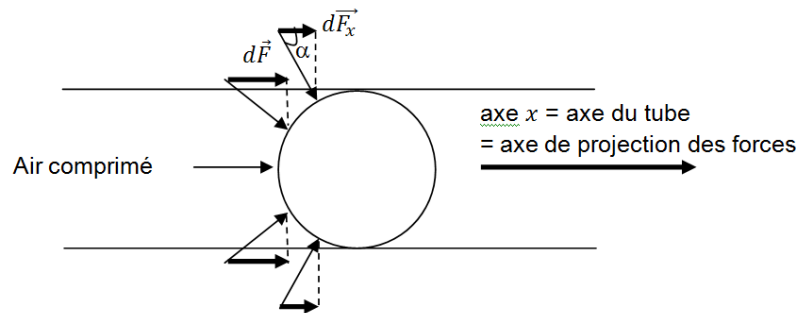
$P_0$  : pression initiale de l'air dans le réservoir

$P(x)$  : pression quand la balle est à la distance  $x$  du début du canon

ATTENTION : Pour  $P(x)$  et  $P_0$  il s'agit de la différence de pression avec la pression atmosphérique.

$F_f$  : Force de frottement entre le canon et la balle (mesurée en poussant la balle dans le canon avec un dynamomètre)

On voit que la force exercée par l'air comprimé sur la balle est répartie sur sa demi-surface. On voit que la force de pression sur la surface  $S_B$  est l'ensemble des petites forces de pression  $d\vec{F}$  sur les petites surfaces  $dS$ , puisque l'ensemble des petites surfaces  $dS$  est la surface  $S_B$ . Mais comme la balle est tirée selon l'axe du canon, soit l'axe  $x$ , il faut projeter les forces  $d\vec{F}$  sur cet axe.



$$F_x = \iint_{S_B} dF_x$$

La force de pression  $F_x$  est égale à l'intégrale des petites forces  $d\vec{F}$  projetées sur l'axe  $x$  soit l'intégrale des forces  $dF_x$  appliquées à  $S_B$ .

$$F_x = \iint_{S_B} dF \cos \alpha$$

On peut remplacer  $dF_x$  par  $dF \cdot \cos \alpha$ , puisqu'on projette sur l'axe.

$$F_x = \iint_{S_B} \frac{dF}{dS_B} dS_B \cos \alpha$$

On multiplie l'intérieur de l'intégrale par  $\frac{dS_B}{dS_B}$ , ce qui nous aide à résoudre l'équation et ne change rien puisqu'en multipliant par  $\frac{dS_B}{dS_B}$ , on multiplie par 1.

$$F_x = \iint_{S_B} P \cos \alpha dS_B$$

On sait que la pression équivaut à la force appliquée sur une surface divisée par cette surface. On peut donc écrire  $P = \frac{dF}{dS_B}$  puisque justement  $dF$  est la force appliquée sur la surface  $dS_B$ .

$$F_x = P \iint_{S_B} \cos \alpha dS_B$$

On peut sortir  $P$  de l'intégrale puisque c'est une constante sur  $S_B$ .

$$F_x = P \iint_{S_B} dS = PS$$

On sait que  $\cos \alpha dS_B = dS$ , puisqu'en projetant l'aire d'une demi sphère sur l'axe  $x$  on obtient l'aire d'un cercle.. On sait également que  $\iint_{S_B} dS = S$ , puisque l'intégrale des parties de la balle est égale à la surface de la balle. Ce qui nous donne  $F_x = PS$ .

Maintenant que l'on a une formule permettant de déterminer la force, il faut maintenant trouver une formule permettant de transformer cette force en vitesse.

Pour cela, j'ai suivi l'hypothèse que la détente du gaz dans le canon est adiabatique, à savoir que le gaz sortait assez rapidement pour ne pas échanger de la chaleur avec les parois du canon. Cette hypothèse semble juste car lors des expansions adiabatiques une condensation de l'air apparaît, ce qui est le cas lors de mes tirs.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \int_0^L F_x(x)dx$$

Avec la conservation d'énergie, on sait que l'énergie cinétique, soit  $\frac{1}{2}mv^2$  est égale au travail, soit la distance l'intégrale de la force de pression sur l'axe x exercée sur la balle durant la distance du canon.

$$\frac{1}{2}mv^2 = S \int_0^L P(x) dx$$

On peut remplacer  $F_x$  par  $PS$  et sortir le  $S$  de l'intégrale puisque c'est une constante. La pression est selon x car la pression diminue au fur et à mesure que la balle avance dans le canon, puisque le volume de gaz augmente. Il nous faut maintenant trouver  $P(x)$ .

$$P_0 V_0^\gamma = P(x) [V(x)]^\gamma$$

On peut utiliser la formule pour détente adiabatique selon Hecht page 614 (Eugene Hecht, Physique, Editions De Boeck Université, 1999).

$$\gamma \approx 1.4$$

C'est la constante pour les gaz diatomiques (comme  $O_2$  et  $N_2$ )

$$V(x) = V_0 + Sx$$

Le volume selon x est égal au volume initial du réservoir plus le volume compris dans le canon selon la position de la balle, le volume compris dans le canon est égal à la section du canon multiplié par la distance parcouru par la balle dans le canon

$$P_0 V_0^\gamma = P(x) (V_0 + Sx)^\gamma$$

Avec la formule ci-dessus on peut remplacer  $V(x)$  dans la formule de Hecht

$$P(x) = \frac{P_0 V_0^\gamma}{(V_0 + Sx)^\gamma}$$

On isole  $P(x)$  en divisant par  $(V_0 + Sx)^\gamma$

$$\frac{1}{2}mv^2 = S P_0 V_0^\gamma \int_0^L \frac{1}{(V_0 + Sx)^\gamma} dx - F_f L$$

On remplace  $P(x)$  dans la formule de conservation d'énergie, et on sort  $P_0 V_0^\gamma$  de l'intégrale puisqu'il s'agit de constante. On soustrait également une force de frottement présente sur toute la longueur du canon exercée sur la balle.



$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{S P_0 V_0^\gamma}{s} \left[ \frac{-1}{(\gamma-1)(V_0+Sx)^{\gamma-1}} \right]_0^L - F_f L$$

On sait que  $\int_0^L \frac{1}{(V_0+Sx)^\gamma} dx$  est égal à  $\int_0^L (V_0 + Sx - \gamma dx)$ . L'intégrale est donc égale à  $\int_0^L (V_0 + Sx - \gamma dx)$  soit  $-1s(\gamma-1)V_0 + Sx\gamma - 10L$  en passant le  $s(V_0+Sx)$  sous la barre de fraction puisqu'il est à une puissance négative et en mettant le  $-$  de  $-(\gamma-1)$  au numérateur. On peut sortir le  $\frac{1}{s}$  de l'intégrale car c'est une constante.

$$\frac{1}{2}mv^2 = P_0 V_0^\gamma \left[ \frac{-1}{(\gamma-1)(V_0+SL)^{\gamma-1}} - \frac{-1}{(\gamma-1)V_0^{\gamma-1}} \right] - F_f L$$

On utilise la formule du calcul intégral

$[nx]_b^a = na - nb$ , à savoir la valeur de la formule avec comme x la borne supérieure moins la valeur de la formule avec comme x la borne inférieure.

$$v = \sqrt{\frac{2 P_0 V_0^\gamma}{m} \left[ \frac{1}{(\gamma-1)V_0^{\gamma-1}} - \frac{1}{(\gamma-1)(V_0+SL)^{\gamma-1}} \right] - \frac{2 F_f L}{m}}$$

Afin d'isoler la vitesse, on divise par  $m$ , multiplie par 2 et on met sous la racine.

$$v = \sqrt{\frac{2 P_0 V_0}{m (\gamma-1)} \left[ 1 - \left( \frac{V_0}{V_0+SL} \right)^{\gamma-1} \right] - \frac{2 F_f L}{m}}$$

On peut sortir le  $(\gamma-1)$  de l'intégrale car c'est une constante. On met le dénominateur de la fraction  $\frac{1}{V_0^{\gamma-1}}$  comme numérateur de la fraction  $\frac{1}{((V_0+SL)^{\gamma-1})}$ , ce qui nous donne  $1 - \left( \frac{V_0}{V_0+SL} \right)^{\gamma-1}$

On a maintenant une formule permettant de déterminer la vitesse de sortie de la balle selon des variables connues, ce qui était la première étape pour calculer les résultats balistiques théoriques.

### 2.1.2 Formule pour la portée selon vitesse et angle

Maintenant que la vitesse peut être déterminée, il reste à avoir une formule indiquant la portée selon la vitesse et l'angle de tir.

Dans ce chapitre l'axe  $x$  est l'axe horizontal (c'est-à-dire perpendiculaire à la gravité terrestre), et l'axe  $y$  est l'axe vertical

$$v_x = \frac{d}{\Delta t}$$

La vitesse sur l'axe  $x$  vaut la distance soit la portée

$$v_y = 0 \quad \text{Au maximum, soit } \frac{1}{2} \Delta t$$

Pour le moment précis où la vitesse verticale est nulle, on est au maximum de la courbe. On sait également que ce maximum est atteint à la moitié du temps de tir, et à la moitié de la portée.

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\frac{\Delta t}{2}}$$

En prenant la formule  $a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$  on remplace  $\Delta t$  par  $\frac{1}{2} \Delta t$  puisque l'on prend le maximum de la courbe.

$$-9.81 = \frac{0 - v_y}{\frac{\Delta t}{2}}$$

On sait que  $a = -9.81$ , et que  $v_2 = 0$ , puisque que l'on prend le temps de tir de  $t_0$  à  $\frac{\Delta t}{2}$  sur  $y$ .

$$-9.81 \cdot \frac{\Delta t}{2} = -v_y$$

On multiplie par  $\frac{\Delta t}{2}$ .

$$4.905 \cdot \Delta t = v_y$$

On divise 9.81 par 2, et on multiplie par -1.

$$\Delta t = \frac{v_y}{4.905}$$

Il ne reste plus qu'à isoler  $\Delta t$  en divisant par 4.905

$$v_x = \frac{d}{\frac{v_y}{4.905}}$$

On remplace  $\Delta t$  dans l'équation  $v_x = \frac{d}{\Delta t}$  par l'équation obtenue ci-dessus.

$$d = \frac{v_x v_y}{4.905}$$

On isole donc  $d$  en multipliant par  $\frac{v_y}{4.905}$ .

$$d = \frac{v^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{4.905}$$

On sait que  $v_x = v \cos \alpha$  et que  $v_y = v \sin \alpha$ , en remplaçant, on trouve que  $v_x v_y = v^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$

En résumé on a pour déterminer la portée la formule suivante :

$$\frac{\frac{2 P_0 V_0}{m (\gamma - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{V_0}{V_0 + SL} \right)^{\gamma - 1} \right] - \frac{2 F_f L}{m} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{4.905}$$

## 2.2 Programme Fortran sans frottements de l'air

Afin pouvoir calculer la portée théorique sans frottements de l'air j'ai créé ce programme en Fortran. Bien qu'au final je ne m'en suis pas beaucoup servi, préférant Excel car plus rapide, ce programme m'a quand même permis d'apprendre les bases du langage Fortran.

!Programme pour déterminer la portée selon la vitesse et l'angle sans

!prendre en considération les frottements de l'air

```
DOUBLE PRECISION angle
```

```
DOUBLE PRECISION vitesse
```

```
DOUBLE PRECISION distance
```

```
Print *, 'Tapez l'angle de tir en Degré'
```

```
Read *, angle
```

```
Print *
```

```
angle=angle/57.29577951
```

```
Print *, 'Tapez la vitesse de sortie de la balle en (m/s)'
```

```
Read *, vitesse
```

```
Print *
```

```
distance=((vitesse**2)*sin(angle)*cos(angle))/4.905
```

```
Print *, 'Le point de chute de votre projectile est à'
```

```
Print *, distance
```

```
Print *, 'mètres'
```

```
End
```

Ce qui donne dans l'IDE plato :

```
!Programme pour determiner la portée selon la vitesse et l'angle sans
!prendre en considération les frottements de l'air

DOUBLE PRECISION angle
DOUBLE PRECISION vitesse
DOUBLE PRECISION distance

Print *, 'Tapez l''angle de tir en Degré'
Read *, angle
Print *
angle=angle/57.29577951

Print *, 'Tapez la vitesse de sortie de la balle en (m/s) '
Read *, vitesse
Print *

distance=((vitesse**2)*sin(angle)*cos(angle))/4.905

Print *, 'Le point de chute de votre projectile est à'
Print *, distance
Print *, 'mètres'

End
```

### 2.3 Méthode construction fusil

En parallèle des calculs théoriques il a fallu construire le fusil à air comprimé. Cela a été la principale difficulté de ce travail. Voici quelle a été ma démarche :

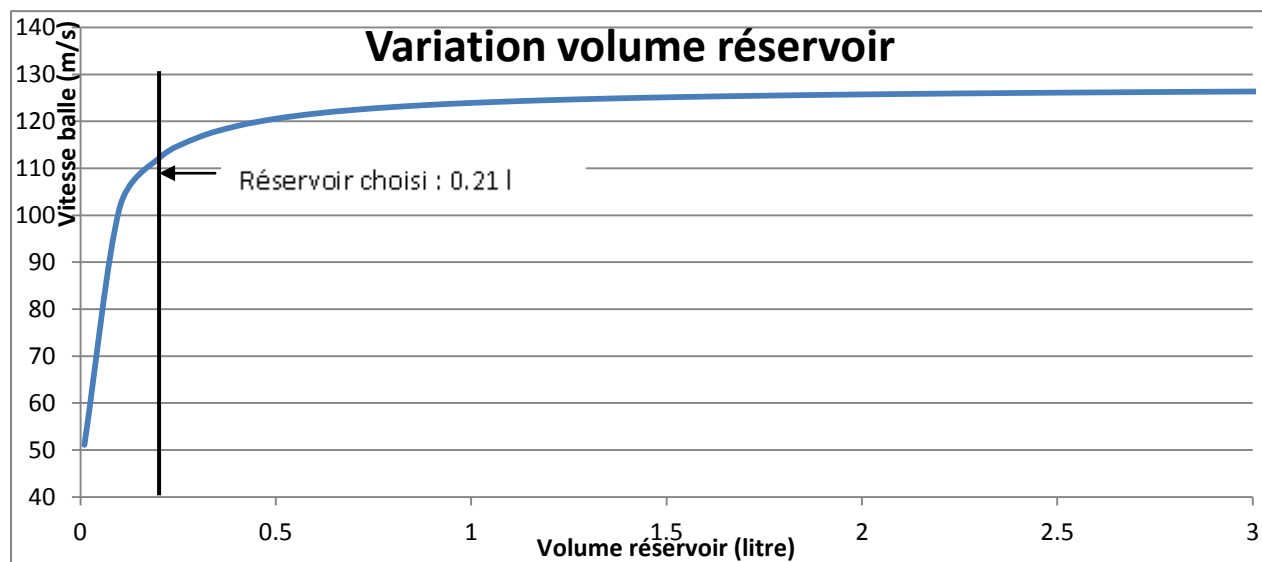
Avant toute construction, j'ai créé plusieurs tableaux Excel pour savoir comment chaque variable faisait changer la portée afin de pouvoir avoir un fusil optimisé à mon but, à savoir pouvoir tirer idéalement à environ 100 mètres. Je les ai obtenus en bloquant les autres variables et en isolant celle désirée. Ces tableaux m'ont aidé à avoir une idée plus claire des caractéristiques du fusil, puisque je l'ai construit sans plans déjà fait ou autre base de ce type.

Voici donc les différents tableaux et leurs conclusions :

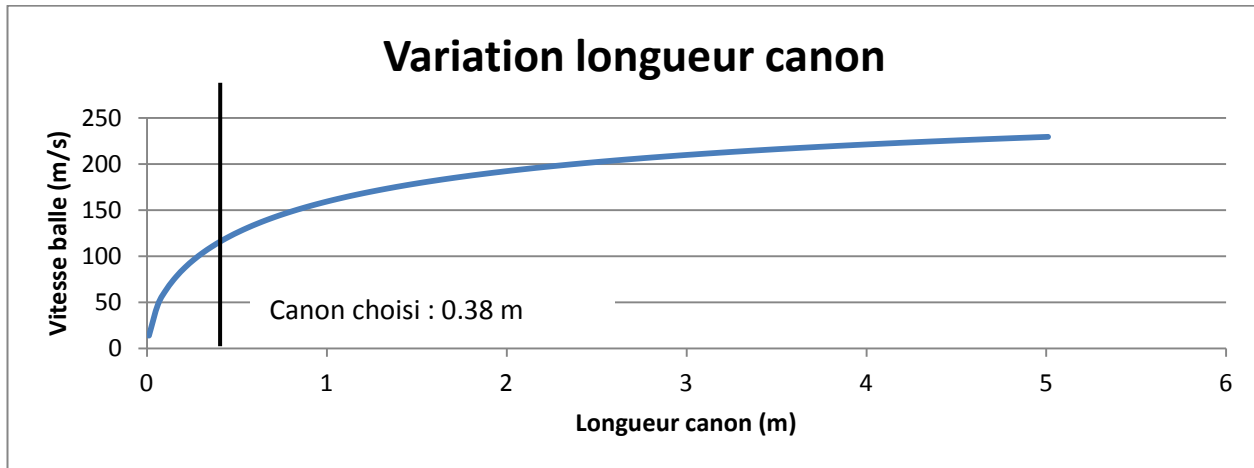
Pour tous ces graphiques l'axe vertical représente la vitesse de la balle à la sortie du canon.

Les paramètres utilisés sont les suivants :

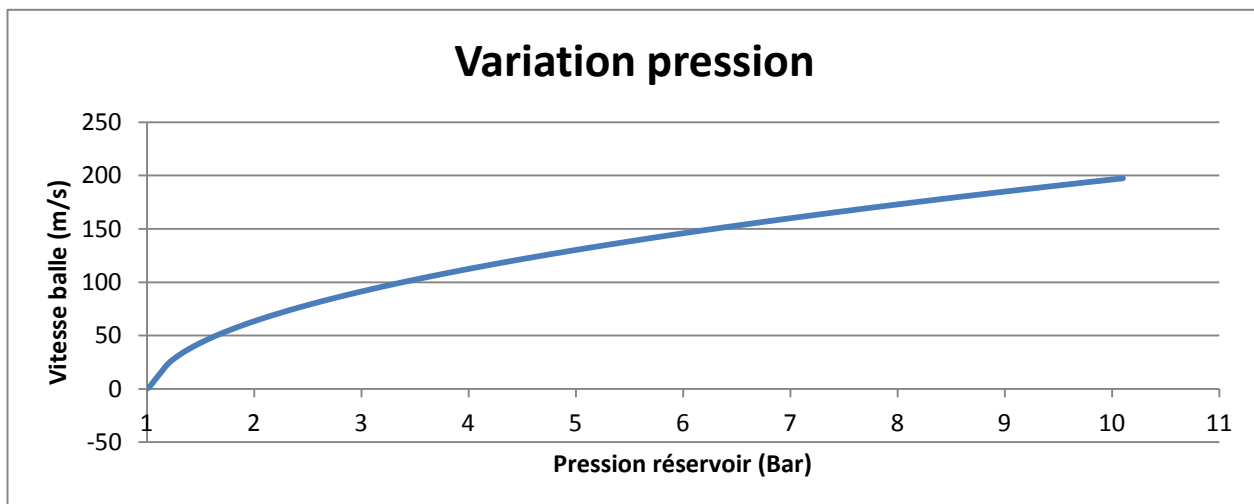
Longueur canon (m):	0.38
Diamètre canon (m):	0.017
Pression réservoir (Pa):	3
Masse balle (kg):	0.00313
S (m <sup>2</sup> ):	0.00045396
So (m <sup>2</sup> ):	0.00022698
Volume (m <sup>3</sup> )	0.00021



La conclusion tirée de ce graphique est que la vitesse atteint une limite à partir de 1-1,5 litre de réservoir, donc il n'est pas utile d'avoir un réservoir plus grand. Cette limite est atteinte lorsque le volume du canon (égal à 0.088 litre) devient négligeable par rapport au volume du réservoir.



Mon but étant de tirer avec une vitesse d'environ 100 m/s, on voit que cette vitesse est obtenue avec un canon d'environ 50cm. On voit que plus le canon est long, et plus la boule sort rapidement, car la pression du gaz a plus de temps pour accélérer la boule ; la détente du gaz est telle que la progression de la vitesse en fonction de la pression est moins rapide qu'une progression linéaire. Cela explique pourquoi les carabines et fusils ont un canon qui est long (de 80 [cm] à 2 [m]) afin d'obtenir une grande vitesse de balle (ce qui est important pour un tir tendu, qui est plus facile à rendre précis qu'un tir balistique).



Toujours dans l'idée de tirer à 100 m/s, on observe qu'une pression de 3,5 bars dans le réservoir est nécessaire à ce résultat. La vitesse de la balle est égale à 0 jusqu'à 1 [Bar], car c'est la différence de pression avec la pression atmosphérique qui fait accélérer la balle. Elle varie ensuite selon une fonction  $\sqrt{x}$  : la pente de la courbe devient plus faible à mesure que la pression augmente.

### 2.3.1 Composants Fusil

Après avoir faits cette étude des variables, j'ai réfléchi aux différents composants du fusil.

Cinq éléments étaient nécessaires :

- un moyen de compression de l'air
- un réservoir
- un moyen de libération de l'air (vanne)
- un projectile
- un canon

Voici les différentes conclusions observées à partir de la vingtaine de prototypes que j'ai construits dans le cadre de ce TM, et les choix résultants de ces conclusions.

#### 2.3.1.1 Le moyen de compression de l'air

Pour le choix de cet élément j'ai été confronté à différents problèmes :

- Capacité de compression trop faible : J'ai tout d'abord pensé à un moyen de compression
  - Relativement simple, à savoir des pompes à vélo. Malheureusement rares sont celles qui atteignent aisément les 3,5 bars, la plupart s'arrêtant à 3 bars. Cette première constatation a fortement remis en cause les pompes à vélo pour le choix final.
- Temps de compression trop lent : Sur les rares pompes à vélo que j'ai essayé atteignant les 3.5 bars, le temps nécessaire pour arriver à cette pression était trop grand, ou demandait trop d'effort. Ce problème a définitivement écarté les pompes à vélo.
- Matériel trop encombrant : Les pompes à vélo écartées, il ne me restait plus qu'une solution, les compresseurs. Mais ceux-ci sont la plupart grand, lourd et cher.

J'ai trouvé une solution à tous ces problèmes, soit un petit compresseur à main Compresseur auto V2 sur accu 12/230 pour pneu de voiture acheté sur conrad ([http://www1.chf.conrad.ch/scripts/wgate/zcop\\_chf/~fiNlc3Npb249UDkwX0NIRjpDX0FHQVRFMDQ6MDAwMC4wMTAxLmFINDUxMDJiJn5odHRwX2NvbnRlbnRfY2hhcnNldD1pc28tODg1OS0xJn5TdGF0ZT0yNTc3MTc0MjY4====?~template=PCAT\\_AREA\\_S\\_BROWSE&glb\\_user\\_js=Y&shop=CHF&p\\_init\\_ipc=X&zhmmh\\_area\\_kz=&direkt\\_aufriss\\_area=0330016&~cookies=&gclid=&scrwidth=1366](http://www1.chf.conrad.ch/scripts/wgate/zcop_chf/~fiNlc3Npb249UDkwX0NIRjpDX0FHQVRFMDQ6MDAwMC4wMTAxLmFINDUxMDJiJn5odHRwX2NvbnRlbnRfY2hhcnNldD1pc28tODg1OS0xJn5TdGF0ZT0yNTc3MTc0MjY4====?~template=PCAT_AREA_S_BROWSE&glb_user_js=Y&shop=CHF&p_init_ipc=X&zhmmh_area_kz=&direkt_aufriss_area=0330016&~cookies=&gclid=&scrwidth=1366)) .

En effet celui-ci monte jusqu'à 8 bars. Il atteint 3,5 bars dans les 15 secondes pour un réservoir de 1 litre. Utilisant une batterie, il peut être utilisé n'importe où. Il est également équipé d'un manomètre indiquant la pression à sa sortie, soit la pression du réservoir. Sa forme analogue à celle d'un pistolet m'a permis de l'incorporer facilement dans le fusil.



[2.2.1.1 a](#) Compresseur pour pneu auto utilisé pour le fusil

### 2.3.1.2 Le réservoir

Voici les deux principaux problèmes face auxquels j'ai été confronté avec le choix du réservoir :

- Réservoir explosant avant 3.5 bars      La quasi-totalité des réservoirs testés n'ont jamais atteint les 3.5 bars, la plupart explosant à 3 bars. Puisque tous ces réservoirs étaient en plastique, j'en ai conclu qu'il me faudrait un réservoir métallique.
- Réservoir encombrant                      Les réservoirs de 1 litre sur le marché sont lourd et grand, préjudiciant l'utilisation simple du fusil. J'ai donc commencé à chercher des réservoirs métalliques plus petits.

La solution aux problèmes concernant le réservoir a été trouvée en démontant une vieille pompe à pied pour matelas pneumatique, sur laquelle j'ai prélevé un des deux cylindres utilisé pour compresser l'air. J'ai ensuite scié le cylindre à son extrémité pour enlever une pièce qui encombrait, puis je l'ai refermé avec de la soudure. Ce réservoir a une capacité de 0.21 litre, ce qui est plus petit que ce je souhaitais, mais qui s'avère tout de même convenir.



### 2.3.1.3 Le moyen de libération de l'air

Voici les deux problèmes rencontrés :

-Air libéré trop lentement

Sur certains moyens de libération de l'air (gâchette, valve avec ressort etc..) l'air est libéré trop lentement, ce qui diminue la portée et complique beaucoup les calculs.

-Orifice de sortie plus petit que le projectile

Bien que l'air puisse être relâché quasiment instantanément, un autre problème peut se poser. Si l'air doit passer par un endroit plus petit que la section du canon, il sera ralenti, puis à nouveau relâché. Ce qui a comme conséquence de diminuer la portée et également de compliquer les calculs.

Afin de contrer ces problèmes, j'ai utilisé un robinet  $\frac{3}{4}$  pouce. Il relâche l'air le temps d'un vif coup de poignet, et sa section est toujours plus grande que la section du canon.



[2.2.1.3 a](#) Vanne utilisée  $\frac{3}{4}$  de pouces

### 2.3.1.4 Le projectile

Le choix du projectile s'est assez vite imposé par lui-même, puisqu'il devait répondre à une seule condition. Afin de pouvoir voir la position de l'impact et par conséquent pouvoir faire des mesures de portée, le projectile devait impérativement exploser ou laisser une marque à son point de chute. Les billes de Paintball, à savoir des billes remplies de peinture biodégradable avec une coque de gélatine solidifiée, sont faites dans le but précis d'exploser à l'impact puisqu'elles ont été créées pour marquer le bétail depuis un hélicoptère. Cela a donc été mon choix pour le projectile. Toutefois une difficulté s'est quand même présentée à moi. Le Paintball n'étant pas un sport très répandu en Suisse, aucun magasin de la région lausannoise que j'ai trouvé n'en vendait. J'ai donc dû les commander sur le seul site suisse romand existant. Ces billes sont assez grandes pour être vues en l'air pendant le tir et elles sont suffisamment lourdes pour ne pas être influencée par un petit courant d'air.



[2.2.1.4 a](#) Billes de Paintball



[2.2.1.4 b](#) Bille de Paintball écrasée



[2.2.1.4 c](#) Impacts de billes de Paintball lors de l'un de mes essai de tirs

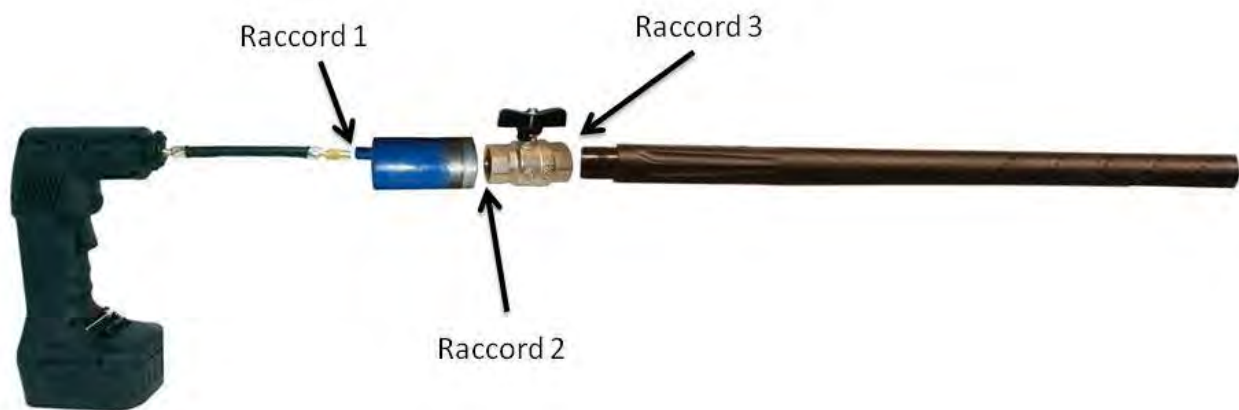
### 2.3.1.5 Le canon

Le choix du canon s'est forcément fait d'après le choix du projectile. Ayant choisi les billes de Paintball, j'ai logiquement acheté un canon de Paintball. Le seul que j'ai trouvé dans un magasin mesure 38 cm, ce qui est plus petit que les 50 cm recommandés par le graphique de variation de longueur, mais cela s'est révélé suffisant, et de toute façon je n'ai pas trouvé de canon de 50 cm. Le seul problème que j'ai remarqué est que la paroi du canon était percée de trous selon une ligne spiralée, sur les dix derniers centimètres. Ces trous ont été faits afin de faire tourner la bille sur elle-même pour lui donner une trajectoire plus droite (les canons peuvent aussi avoir une rainure spiralée pour obtenir le même effet de rotation de la balle). Ceci est utile pour le Paintball, mais dans ce cas cela complique les calculs de portée, et fait perdre de la portée au tir. Je les ai donc bouchés en les entourant de bande à masquer.

### 2.3.2 Raccords

Bien qu'ayant à ce stade le principal matériel nécessaire, le plus dur restait à faire, à savoir assembler les éléments avec une étanchéité maximale.

Pour cela j'ai dû effectuer trois raccords avec différentes pièces :



[2.2.2 a](#) Raccords nécessaires à la construction du fusil

#### 2.3.2.1 Raccord 1

C'est le raccord entre le compresseur et le réservoir. Je me suis aperçu que l'embout du compresseur était de même diamètre que l'embout du réservoir. Comme les deux embouts étaient femelles, j'ai dû trouver un embout mâle-mâle du bon diamètre. J'ai donc scié une aiguille de gonflage et gardé cette pièce :



[2.2.2.1 a](#) Raccord 1

Je l'ai visée dans l'embout du compresseur et dans l'embout du réservoir, après l'avoir enroulée avec du ruban de téflon pour une meilleure étanchéité.

### 2.3.2.2 Raccord 2

Ce raccord a été le plus compliqué à réaliser. D'un côté j'avais un tube de l'autre une embouchure femelle de  $\frac{3}{4}$  de pouce. J'ai donc décidé de souder un couvercle sur le réservoir, puis de le percer afin d'y visser un raccord mâle-mâle  $\frac{3}{4}$  pouce.



[2.2.2.2 a](#) Couvercle avec la soudure vu de haut

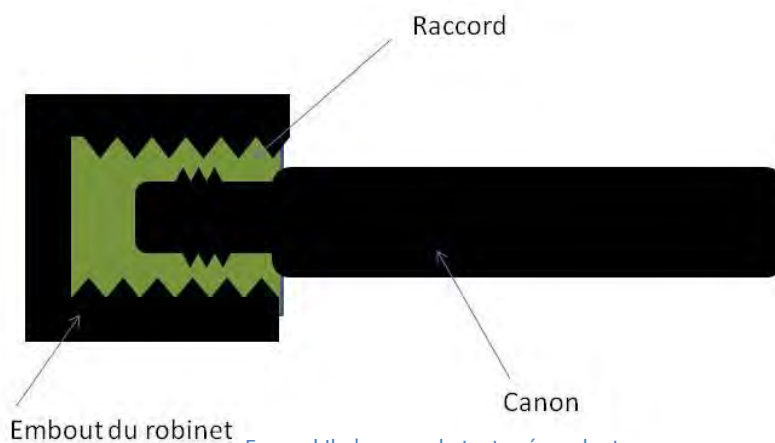


[2.2.2.2 b](#) Raccord mâle  $\frac{3}{4}$  pouce

Ayant soudé le raccord, j'ai pu visser le réservoir au robinet. Bien que le raccord soit fait, le principal problème a été de le rendre étanche. Pour y arriver j'ai du souder, puis coller et enfin entourer dans le mastic ce raccord (voir plus en détails sur le chapitre « étanchéité »). Rendre cet endroit étanche m'a pris tout l'été.

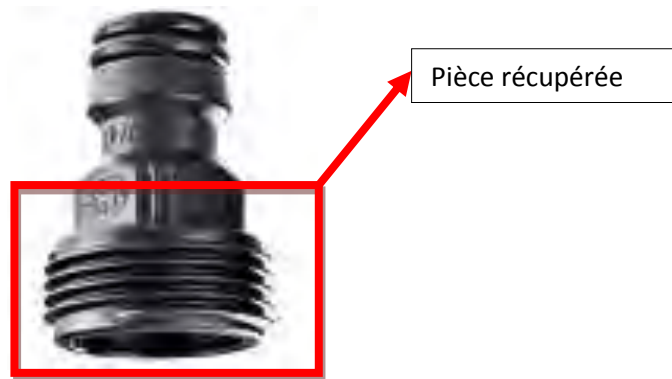
### 2.3.2.3 Raccord 3

Ce raccord devait pouvoir tenir le poids canon, ce qui avec la loi des moments de force, nécessite tout de même une pièce solide. J'avais besoin d'un raccord mâle  $\frac{3}{4}$  pouce dans lequel je pourrais visser la canon dedans.



Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

J'ai fabriqué cette pièce en sciant un embout pour tuyaux de jardin, et en la fondant pour qu'elle prenne la forme du canon.



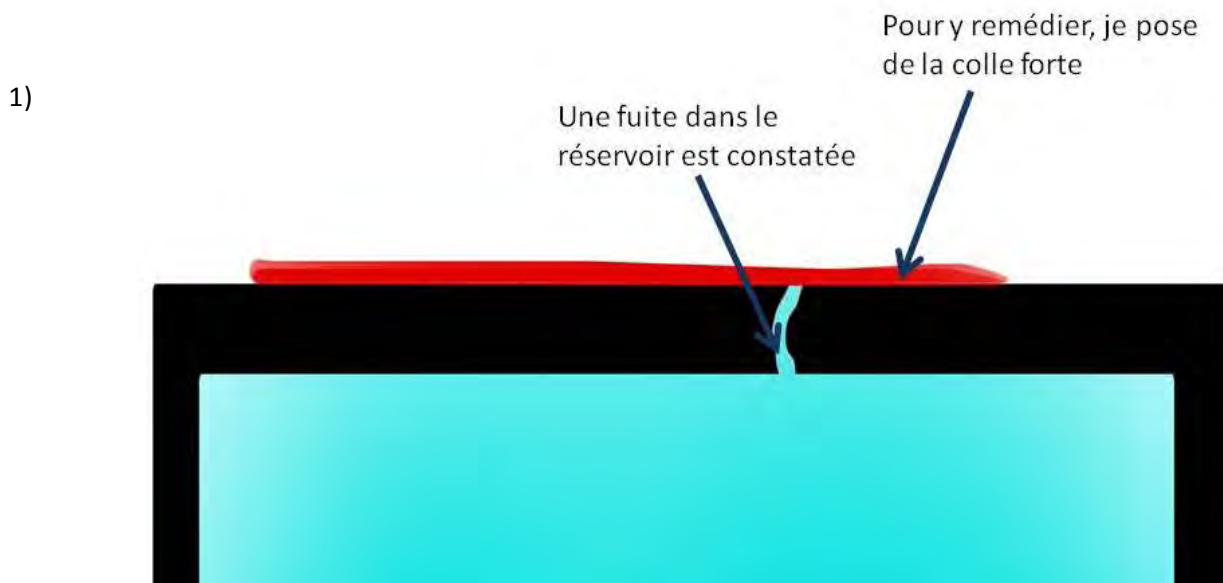
[2.2.2.3 b](#) Embout pour tuyaux de jardin

Je l'ai ensuite rendu étanche avec de la colle. Ce raccord subit beaucoup moins de pression que les deux autres puisque le gaz comprimé est en contact seulement quelques centièmes de seconde.

#### 2.3.2.4 Les fuites

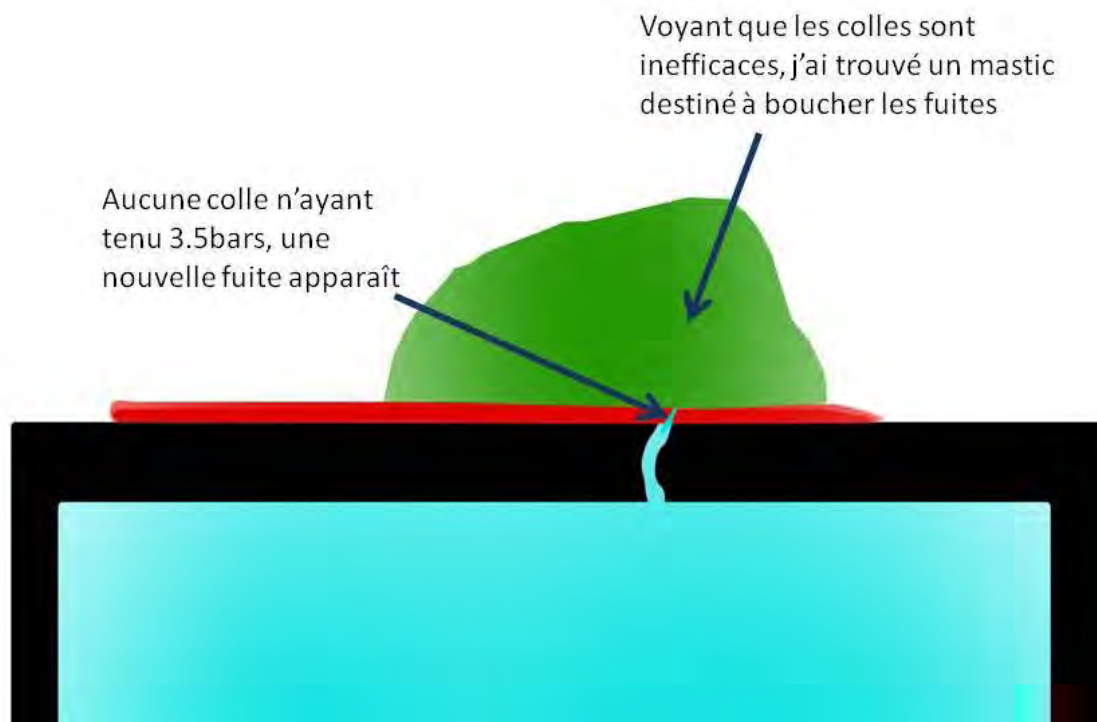
Dans ce sous-chapitre, je vais vous expliquer le problème qui m'a demandé le plus d'effort et d'heures de travail pour le résoudre, à savoir les fuites dans le raccord 2.

Voici un schéma résumant ce qui se passe avec le réservoir (en noir), le gaz (en bleu) et la colle (en rouge) lors d'une fuite.



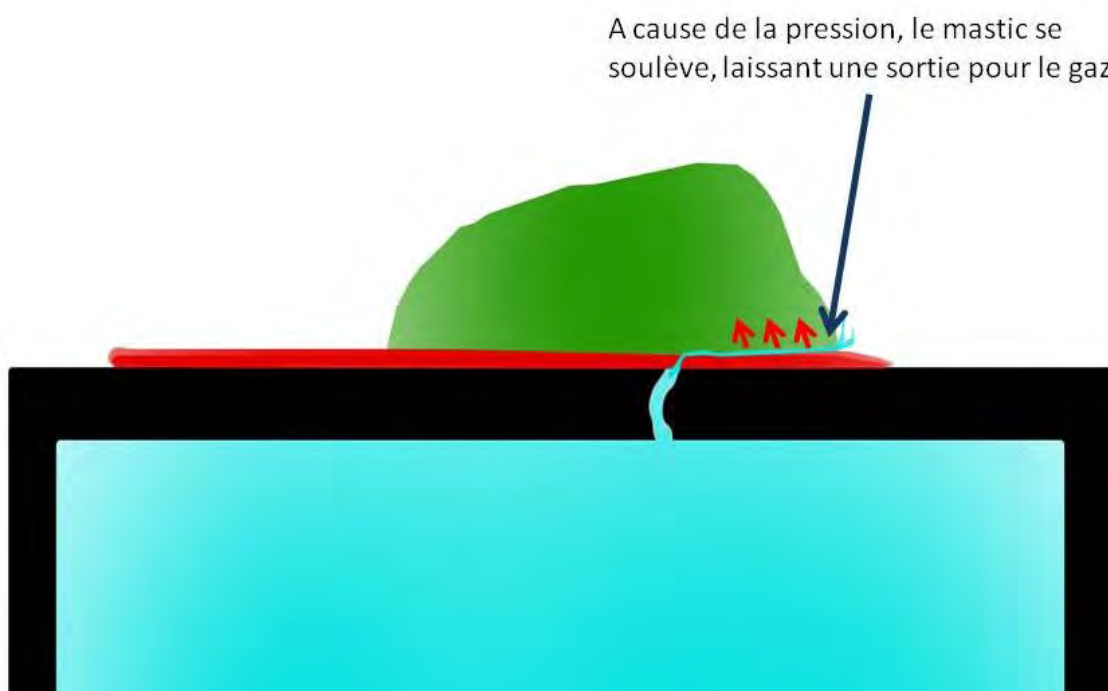
[2.2.2.4 a](#) Schéma 1 illustrant une fuite dans le réservoir

2)



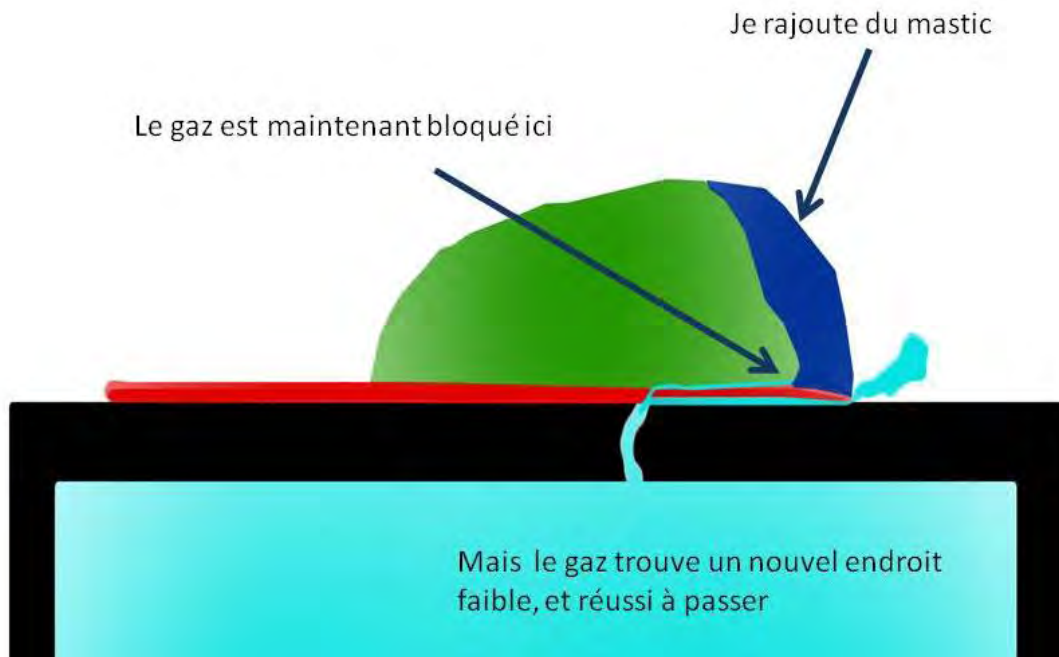
[2.2.2.4 b](#) Schéma 2 illustrant une fuite dans le réservoir

3)



[2.2.2.4 c](#) Schéma 3 illustrant une fuite dans le réservoir

4)



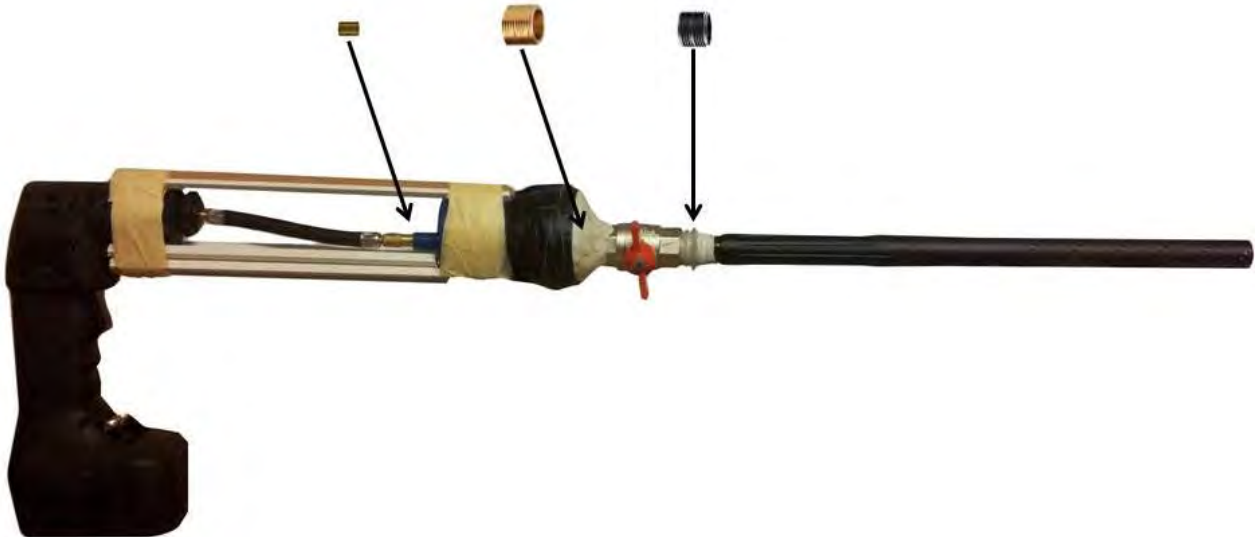
2.2.2.4 d Schéma 4 illustrant une fuite dans le réservoir

Les fuites se produisent généralement à la sortie du réservoir, là où j'ai soudé le raccord 2. La soudure n'est pas étanche de par le fait que lorsque je soudais, la température du réservoir montait, et des gaz sortaient sous forme de fumée, laissant des trous dans la soudure. J'ai donc essayé de boucher les trous par de la colle forte, mais la colle ne tenait pas 3.5 bars de pression. Même en bouchant les trous dans la colle par de la colle, bien que la fuite soit bouchée à cet endroit, la pression s'appliquant partout, le gaz passe par un endroit moins solide. J'ai tout de même mis un quinzaine de couches de colle. Ceci prend beaucoup de temps puisqu'à chaque couche, il faut attendre plusieurs heures pour qu'elle soit sèche. J'ai trouvé du mastic fait pour rendre des fuites étanches, cette solution est de loin la meilleure que j'ai essayée, bouchant efficacement les trous. Un seul problème subsiste avec le mastic, c'est que parfois le gaz s'infiltré jusqu'à la zone où le mastic est plus fin, provoquant un renflement, susceptible de casser à tout moment.

Grâce à ces efforts le réservoir ne fuit plus, bien que cette réussite ait été temporaire (j'ai dû étancher des fuites après un certain nombre de tests avec le fusil).

### 2.3.3 Fusil et accessoires

Voici le résultat des éléments assemblés :



[2.2.2.4 a Schéma 1 illustrant une fuite dans le réservoir](#)

Afin d'avoir une structure solide j'ai ajouté deux lattes de bois scotchées entre elles entre le compresseur et l'entrée du réservoir, ce qui en fait désormais un fusil.

Pour des questions pratiques, j'ai rajouté trois accessoires à ce fusil. A savoir un bipied, un rapporteur et un pointeur laser.

### 2.3.4 Proposition d'amélioration de la construction de fusil

Vous l'aurez bien compris, le principal problème de la construction de fusil se tient dans les fuites. Pour y remédier, la solution optimale aurait été d'avoir un réservoir sur mesure en métal, fait d'une pièce, avec une entrée mâle de même taille que la sortie femelle du compresseur, et une sortie  $\frac{3}{4}$  de pouce. En effet, il aurait suffi alors de visser le compresseur au réservoir et de visser le réservoir à la vanne avec du joint téflon pour ne pas avoir de fuites.

### 2.4 Mesure de la vitesse de la balle à la sortie du canon

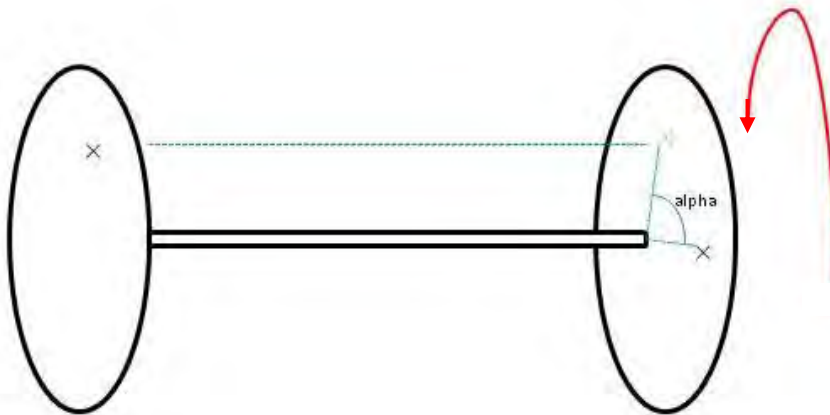
Afin de vérifier la formule permettant de déterminer la vitesse, j'ai effectué trois expériences permettant de trouver une vitesse pratique. J'ai donc pu comparer des résultats de vitesse pratiques et des résultats théoriques.



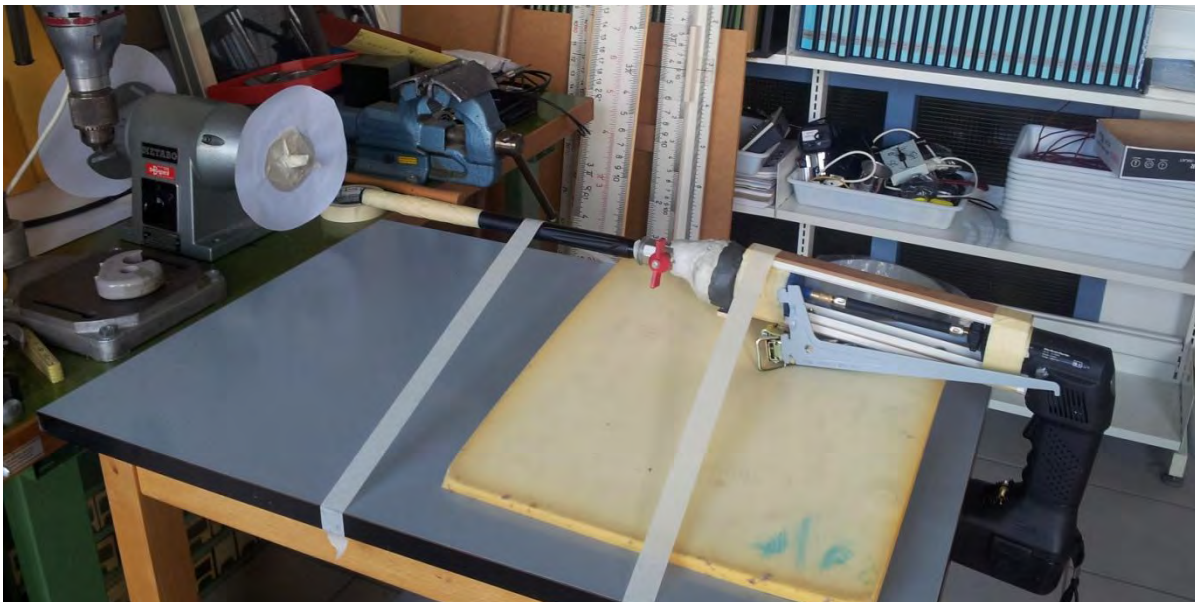
Voici la méthode utilisée pour les trois expériences.

#### 2.4.1 Méthode des disques tournants

Le principe de cette expérience est de tirer dans deux disques tournant à la même vitesse, de mesurer l'angle entre les deux impacts des deux disques, ce qui nous permet de connaître à quelle vitesse la balle est tirée, connaissant la vitesse de rotation des disques. Cette méthode a été prise du dossier (1).



2.4.1 a Schéma illustrant le système des disques



2.4.1 b Le dispositif de tir pour la méthode des disques



2.4.1 c Meuleuse utilisée avec des disques en papier

Pour avoir un système de disques tournant à une vitesse suffisamment élevée j'ai utilisé une meuleuse. J'ai enlevé les deux meules, en les remplaçant par des disques en papier. Connaissant la vitesse de rotation de la meuleuse (pour la mesurer, j'ai utilisé un stroboscope), la distance séparant les deux disques et l'angle entre les deux impacts, la vitesse peut être facilement déterminée selon la formule suivante :

$$v = \frac{d \cdot f \cdot 360}{\alpha}$$

$f$  = tours par seconde de la meuleuse

$d$  = distance entre les deux disques

$\alpha$  = angle entre les deux impacts

Bien que cette expérience ait l'air simple à réaliser, j'ai quand même constaté deux problèmes notables :

-Dû à la grande vitesse de rotation de la meuleuse, environ 3000 tours/sec, le papier se déchirait sur lui-même et s'enroulait autour de l'axe de rotation car le papier était fin. Afin d'y remédier, j'ai agrafé un petit disque de carton de rayon inférieur sur les disques de papier.

-Le papier étant léger et la balle plutôt lourde, plusieurs essais ont été infructueux, le papier étant complètement déchiré. Il n'y avait pas d'impact précis de la balle, mais plutôt un grand morceau de papier arraché. J'ai donc dû parfois estimer où la bille a exactement traversé le disque.



2.4.1 d Meuleuse utilisée avec des disques en papier après un tir

#### 2.4.2 Méthode des cellules photovoltaïques

Cette expérience se base est en théorie très simple. On utilise deux cellules photovoltaïques espacées d'une distance connue et on tire une balle coupant le faisceau lumineux des deux cellules. Le temps de durant lequel la balle traverse la distance entre les deux cellules s'affiche, il suffit juste de calculer la vitesse selon cette formule :

$$v = \frac{1}{t} \cdot d$$

$t$  = temps nécessaire à la balle pour parcourir la distance entre les deux cellules

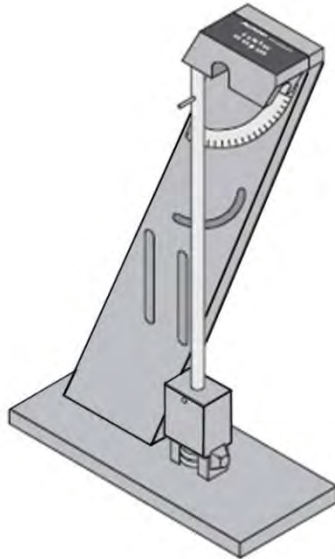
$d$  = distance entre les deux cellules

Bien que cette expérience ait l'air simple, elle se révèle bien plus compliquée à mettre en pratique. En effet il faut que la balle ait une trajectoire parfaite, afin de couper les deux cellules correctement. Cette tâche s'avère ardue car les deux trous des cellules sont petits et la balle aussi. Après plusieurs essais, j'ai tout de même pu tirer des données de cette expérience. Vous verrez dans le chapitre « Résultats » que cette expérience a des conclusions discutables.

### 2.4.3 Méthode du pendule balistique

Afin de valider les résultats des deux expériences ci-dessus, j'ai fait une troisième expérience. Elle consiste à tirer une bille dans un pendule balistique, et à calculer la vitesse selon l'angle parcouru par le pendule.

Pour cette expérience j'ai utilisé un pendule « PASCO scientific Model ME-6830/ME-6831 »



2.4.3 a Schéma illustrant le pendule utilisé

Pour calculer la vitesse on a besoin de connaître la masse du pendule, la masse de la balle, la distance entre l'axe de rotation et le point d'impact de la balle, la distance entre l'axe de rotation et la période du pendule, soit le temps nécessaire au pendule pour faire un aller-retour. La vitesse peut-être déterminée avec cette formule, trouvée grâce à la quantité de mouvement lors de l'impact, la conservation de l'énergie lorsque le pendule monte. On mesure le moment d'inertie  $I$  en mesurant la période du pendule pour de petites oscillations.

$$v = \frac{1}{m R_b} \sqrt{2 I M g R_g (1 - \cos \alpha)}$$

$$I = \frac{M g R_g T^2}{4\pi^2}$$

Symboles utilisés:

$m$  = masse de la balle

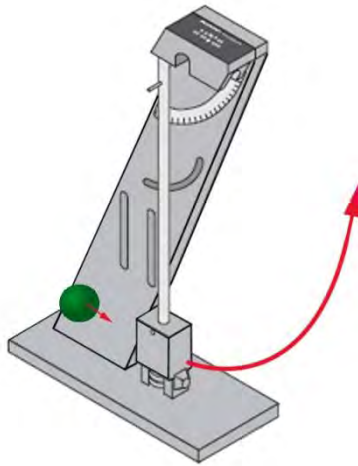
$R_b$  = distance entre axe de rotation et point d'impact

$M$  = masse du pendule

$T$  = période du pendule, soit le temps nécessaire au pendule pour faire un aller-retour

$R_g$  = distance entre l'axe de rotation et le barycentre du pendule

$I$  = moment d'inertie



2.4.3 b Schéma illustrant l'énergie appliquée au pendule lors d'un tir

Le protocole est le suivant, on place le canon proche du pendule et on tire la balle contre le pendule. On relève l'angle parcouru par le pendule.

Le seul problème de cette expérience est que la balle explose sur le pendule. En effet cette expérience se base sur le principe de conservation de la quantité de mouvement, or les fragments de la balle, ainsi que le liquide qu'elle contient, ne restent pas accrochés au pendule : le calcul néglige la quantité de mouvement de ces fragments ainsi que du liquide de la balle. Le pendule va donc monter moins haut qu'il ne devrait, et donc les calculs vont donner une vitesse moins grande que celle de la balle à la sortie du canon.

## 2.5 Mesures de la portée lors de tirs balistiques

Après avoir étudié l'accord entre le modèle et la théorie pour la vitesse de la balle en sortie de canon, j'ai effectué des essais de tirs balistiques.

Pour avoir des résultats pratiques de portée, j'ai effectué deux fois une dizaine de mesures. Ces mesures se font de la manière suivante.

J'ai choisi une route plate, à l'abri du vent, longue d'environ 100m. La route devait être en béton pour permettre à la balle de faire un impact clair et précis (tache d'encre). Elle doit également mesurer impérativement au moins 100m car à 3.5 bars avec un angle de 45 degrés, la portée est d'environ 85 m, 15m de sécurité ne sont pas superflus. J'ai ensuite placé le fusil par terre, avec le trépied sur deux crics, permettant de varier l'angle. En montant le cric, on augmente l'angle du canon, et en descendant le cric, on diminue l'angle. L'angle entre le canon et le sol est mesuré avec l'accessoire du rapporteur prévu à cet effet. La pression est variable en faisant pomper plus ou moins longtemps le compresseur.



2.5 a Le fusil avant un tir pour une mesure de portée

Voici les étapes nécessaires pour la réussite d'un tir :

1. Vérifier que la route est dégagée et que le vent est quasi nul
2. Ajuster le cric pour avoir l'angle désiré
3. Lubrifier le canon avec une bonbonne à lubrifiant
4. Mettre la balle dans le canon et la pousser au fond du canon avec une tige
5. Vérifier à nouveau que la route est dégagée
6. Avertir qu'un tir va être effectué
7. Monter la pression dans le réservoir jusqu'à la pression désirée
8. Ouvrir la vanne d'un coup de poignet vif
9. Repérer l'impact de la balle et le marquer à la craie
10. Mesurer la distance entre l'impact et le fusil (réalisé avec une chevillière de 20 [m], qui a servi à poser des repères tous les 20 [m] le long de la route, et aussi de mesurer la distance entre le point d'impact et le repère de 20 [m] situé en arrière)



2.5 a Impact de balle obtenu lors d'une mesure de portée

Afin d'avoir des mesures plus précises, j'ai effectué trois tirs par choix de variables. J'ai ensuite fait une moyenne des trois mesures, me donnant un résultat pratique à comparer avec le résultat théorique calculé avec la formule suivante (voir chapitre 2.1.2)

$$\frac{\frac{2 P_0 V_0}{m (\gamma - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{V_0}{V_0 + SL} \right)^{\gamma - 1} \right] - \frac{2 F_f L}{m} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{4.905}$$

J'ai ensuite comparé ces résultats pratiques de portée avec des résultats théoriques donnés par le programme en fortran de Kévin Mury, qu'il a créé lors de son travail de maturité. Ce programme prend en compte les frottements de l'air, une donnée que je n'ai pas pu incorporer dans mon programme car elle implique un traitement compliqué. Cela m'aurait prit beaucoup de temps à élaborer un programme avec frottements de l'air. Cette tâche est assez importante pour être à elle seule le principal sujet d'un travail de maturité. Nous avons donc collaboré avec Kévin, lui me donnant son programme et moi lui donnant des données pratiques à comparer.

Ci-dessous le programme de Kévin en fortran:

```
PROGRAM programme_avec_frottements
```

```
IMPLICIT none
```

```
INTEGER i, nb_iter, j, jmax
```

```
DOUBLE PRECISION Vxn, Vyn, Xn, Yn, Vxnp, Vynp, dt, g, k, pi, alpha, Xnp, Ynp, v, s, p, c, m, t
```

```
PRINT *, 'Introduire vitesse v [m/s]'
```

```
READ *, v
```

```
PRINT *, 'Introduire angle alpha [degres]'
```

```
READ *, alpha
```

```
pi = 3.141592654
```

```
alpha = alpha * (pi/180.)
```



$V_{xn} = v * \text{DCOS}(\alpha)$

$V_{yn} = v * \text{DSIN}(\alpha)$

$X_n = 0.$

$Y_n = 0.$

PRINT \*, 'Introduire pas de temps dt [ms]'

READ \*, dt

$dt = dt / 1000.$

PRINT \*, 'Introduire nombre d''iteration'

READ \*, nb\_iter

PRINT \*, 'Introduire coefficient de forme c'

READ \*, c

PRINT \*, 'Introduire section apparente s [cm2]'

READ \*, s

$s = s / 10000.$

PRINT \*, 'Introduire masse m du projectile [g]'

READ \*, m

$m = m / 1000.$

PRINT \*, 'Impression des resultats tous les combien d''iterations:'

READ \*, jmax

OPEN (unit=10, FILE='frott', status='unknown')

$p = 1.293$  ! masse volumique de l'air à 25 deg C, en [kg/m3]

$g = 9.81$

$k = 0.5 * c * s * p$

```
t = 0.
```

```
j = 0
```

```
DO i=1, nb_iter
```

```
! PRINT *, '111 ', dt*k*DCOS(alpha*(pi/180.))
```

```
! PRINT *, 'm=', m
```

```
! PRINT *, '222 ', Vxn**2 + Vyn**2
```

```
Vxnp = Vxn - ( ( dt*k*DCOS(alpha))/m ) * (Vxn**2 + Vyn**2 )
```

```
Vynp = Vyn - ( ( dt*k*DSIN(alpha))/m ) * (Vxn**2 + Vyn**2 ) - (g*dt)
```

```
! IF (DATAN(alpha).EQ.(Vxnp/Vynp)) THEN
```

```
! PRINT *, 'JUSTE'
```

```
! ELSE IF (DATAN(alpha).NE.(Vxnp/Vynp)) THEN
```

```
! PRINT *, 'FAUX'
```

```
! END IF
```

```
Xnp = ( dt*((Vxn+Vxnp)/2) ) + Xn
```

```
Ynp = ( dt*((Vyn+Vynp)/2) ) + Yn
```

```
t = t + dt
```

```
j = j + 1
```

```
IF (j.EQ.jmax) THEN
```

```
V = DSQRT(Vxnp**2 + Vynp**2)
```

```
WRITE (10, '(5(F12.6, 2x))') t, Xnp, Ynp, V, alpha*(180./pi)
```

```
j = 0
```

```
END IF
```

$$\alpha = \text{DATAN}(V_{ynp}/V_{xnp})$$

$$V_{xn} = V_{xnp}$$

$$V_{yn} = V_{ynp}$$

$$X_n = X_{np}$$

$$Y_n = Y_{np}$$

END DO

END

Ce qui donne dans l'IDE plato :

```

PROGRAM programme_avec_frottements
IMPLICIT none

INTEGER i, nb_iter, j, jmax
DOUBLE PRECISION Vxn,Vyn, Xn, Yn, Vxnp, Vynp, dt, g, k, pi, alpha, Xnp, Ynp, v, s, p, c, m, t

PRINT *, 'Introduire vitesse v [m/s]'
READ *, v
PRINT *, 'Introduire angle alpha [degres]'
READ *, alpha
pi = 3.141592654
alpha = alpha * (pi/180.)

Vxn = v * DCOS(alpha)
Vyn = v * DSIN(alpha)

Xn = 0.
Yn = 0.

PRINT *, 'Introduire pas de temps dt [ms]'
READ *, dt
dt = dt / 1000.
PRINT *, 'Introduire nombre d'iteration'
READ *, nb_iter
PRINT *, 'Introduire coefficient de frotte c'
READ *, c
PRINT *, 'Introduire section apparente s [cm2]'
READ *, s
s = s / 10000.
PRINT *, 'Introduire masse m du projectile (g)'
READ *, m
m = m / 1000.
PRINT *, 'Impression des resultats tous les combien d'iterations:'
READ *, jmax
OPEN (unit=10, FILE='frott', status='unknown')

p = 1.293      ! masse volumique de l'air à 25 deg C, en [kg/m3]
g = 9.81
k = 0.5*c*s*p
t = 0.
j = 0

DO i=1, nb_iter

! PRINT *, '111 ', dt*k*DCOS(alpha*(pi/180.))
! PRINT *, 'm=',m
! PRINT *, '222 ', Vxn**2 + Vyn**2
Vxnp = Vxn - ( ( dt*k*DCOS(alpha)/m ) * (Vxn**2 + Vyn**2) )
Vynp = Vyn - ( ( dt*k*DSIN(alpha)/m ) * (Vxn**2 + Vyn**2) ) - (g*dt)

! IF (DATAN(alpha).EQ.(Vxnp/Vynp)) THEN
! PRINT *, 'JUSTE'
! ELSE IF (DATAN(alpha).NE.(Vxnp/Vynp)) THEN
! PRINT *, 'FAUX'
! END IF

Xnp = ( dt*((Vxn-Vxnp)/2) ) + Xn
Ynp = ( dt*((Vyn-Vynp)/2) ) + Yn

t = t + dt
j = j + 1
IF (j.EQ.jmax) THEN
V = DSQRT(Vxnp**2 + Vynp**2)
WRITE (10, '(5(F12.6, 2x))') t, Xnp, Ynp, V, alpha*(180./pi)
j = 0
END IF

```

### 3 Résultats

Les premiers résultats à analyser ont été ceux des mesures de vitesse, puisque déterminer avec précision la vitesse est indispensable pour analyser les mesures de portée.

#### 3.1 Résultats mesures vitesse

##### 3.1.1 Résultats mesures vitesse par la méthode des disques

Voici les résultats donnés par les essais de vitesse avec les disques

##### 3.1.1.2 Mesures vitesse par la méthode des disques

##### 3.1.1.1 Mesures vitesse par la méthode des disques

Pression [bar]	Incertitude pression [bar]	Angle [deg]	Incertitude angle [deg]	Vitesse balle en sortie de canon mesurée [m/s]	Incertitude vitesse balle [m/s]	Vitesse théorique en négligeant les frottements dans le canon [m/s]
2	0.2	115	2	51.5	4.2	105.215805
2.5	0.2	95	2	62.3	5.3	117.634847
3	0.2	100	2	59.2	5.0	128.862518

Ecartement des feuilles : 0.33 [m]                      incertitude 0.02                      [m]

Vitesse rotation disques : 2990 [tour/min]                      incertitude 10                      [tour/min]

Vitesse rotation disques : 49.8333333[tour/sec]= 17940 [deg/sec]

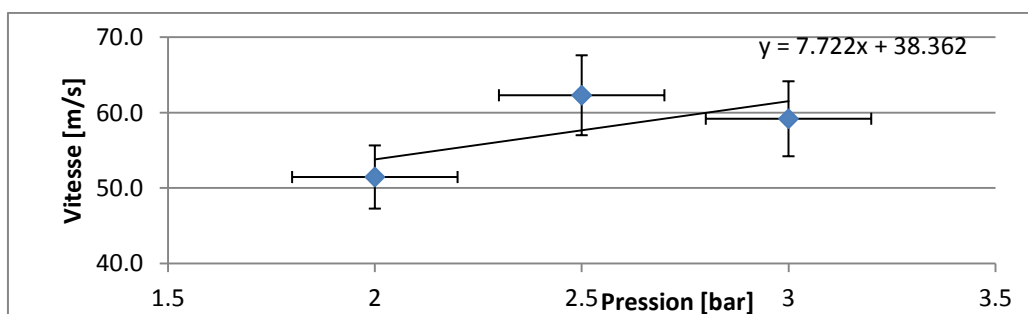
#### Paramètres du canon :

masse balle : 3.13 [g]

diamètre canon : 1.6 [cm]

longueur canon : 40 [cm]

volume réservoir : 0.2 [litre]



### 3.1.1.2 Commentaires mesures vitesse par la méthode des disques

La première chose remarquable dans ces résultats et qu'ils sont nettement inférieur aux données théoriques. Les principales causes de cette différence sont les suivantes.

Ce que je ne savais pas, mais que j'ai remarqué plus tard, c'est que la coque des balles de paintball est faite de gélatine, le même type que celle utilisée pour la coque des capsules de médicament. De ce fait la coque se dilate à l'humidité, créant une protubérance et la balle n'est plus sphérique mais plutôt en forme d'œuf. Ce qui a pour effet d'induire beaucoup plus de frottements quand la balle traverse le canon. Mais toutes les balles ne sont pas forcément dilatées et de la même manière. Il est donc difficile de mesurer une force de frottement moyenne applicable à tous les tirs. Cette force de frottement peut être importante, lors d'une mesure elle a même été de 1.5 newton ! Malgré tout, j'ai pu observer dans les calculs que cette force de frottements dans le canon n'influe pas beaucoup la vitesse de sortie du canon, seulement d'environ 3 (m/s) avec des frottements de 1 newton. Lors des essais qui ont suivi celui-ci j'ai fait attention de ne prendre que des balles non dilatées, bien sphériques.



3.1.1.2 a Deux balles de paintball (celle de gauche est dilatée, celle de droite normale)

La deuxième cause est moins évidente. Dans le chapitre « 2.2.1.5 Le canon » je précise avoir entouré le bout du canon avec du scotch pour boucher les trous présents. Je pensais que ces trous n'avaient comme utilité que de donner à la balle une trajectoire droite et qu'ils diminuaient la vitesse de sortie de la balle. Mais ce que j'ai compris qu'après avoir fait toutes les mesures, c'est que l'air à l'intérieur du canon avant le tir et donc devant la balle, se retrouve compressé par la balle traversant le canon à grande vitesse. La balle avance plus vite que l'air sort du canon. L'air crée donc une sorte de bouchon devant la balle, ce qui la

ralentit. Avec les trous au bout du canon, l'air peut sortir sans obstruer le déplacement de la balle. Cet effet n'est pas pris dans les calculs théoriques, ce qui explique également cette différence. Donc, paradoxalement, la balle a une plus grande vitesse de sortie avec un canon percé qu'avec un canon hermétique.

Le reste de différence peut être expliqué par des approximations effectuées, des données non-prises en comptes, par exemple l'humidité de l'air etc.

Le deuxième fait constatable est que le résultat obtenu avec une pression de 2.5 bars n'est pas cohérent avec les deux autres. En effet il n'y a aucune logique pouvant expliquer que la balle ait une vitesse plus grande à 2.5 bars que 3 bars. Il s'agit donc plus vraisemblablement d'un résultat erroné. Ceci peut être dû à différentes causes, par exemple que la balle ait été déviée de sa trajectoire par le papier en rotation. On voit quand même que la marge d'erreur permet à ce résultat de rester de tout de même en tenir compte.

### 3.1.2 Résultats vitesse par la méthode des cellules photovoltaïques

Cette méthode de mesure de la vitesse en sortie de canon ne donne pas des résultats cohérents avec les deux autres expériences. C'est pourquoi j'ai décidé de ne pas en tenir compte.

#### 3.1.2.1 Mesures vitesse par la méthode des cellules

Pression [bars]	Distance entre les deux cellules [m]	Temps [s]	Vitesse pratique [m/s]	Vitesse théorique sans frottements [m/s]
2	0.25	0.1	25	105.215805
2.5	0.25	0.08	39.0625	117.634847
3	0.25	0.07	51.02040816	128.862518
3.5	0.25	0.05	100	139.187428

#### 3.1.2.2 Commentaires mesures vitesse par la méthode des cellules

On voit que la vitesse pratique comparée aux deux autres expériences, est soit beaucoup trop grande, soit beaucoup trop petite. La principale raison pour laquelle je n'ai pas tenu compte de ces résultats est qu'ils étaient extrêmement variables. Pour les mêmes paramètres j'ai observé de grandes différences, pouvant aller jusqu'à 50 m/s entre deux essais. Les principales raisons de ces différences sont, à mon sens, celles-ci :

J'ignorais comment exactement les cellules se déclenchaient. Il m'était donc particulièrement difficile de viser correctement. Il est très probable que des balles aient déclenché la première cellule avec leurs parties avant et coupé la deuxième avec le bas ou le haut. De ce fait les paramètres sont changés, sans qu'ils puissent être déterminés avec précision. Il n'est pas facile de viser correctement, car les zones d'activation

et de coupure des cellules sont petites. Un grand nombre de tirs ont été infructueux, la balle activant le chronomètre, mais ne coupant pas la deuxième cellule. De plus, les cellules ne sont pas optimales pour mesurer des temps aussi petits, seul le dernier chiffre affiché sur l'écran est significatif. Les résultats de vitesse peuvent donc changer beaucoup entre plusieurs tirs ayant les mêmes paramètres. Ce système de mesure de la vitesse semble ne pas être approprié à de petits objets ayant une grande vitesse.

### 3.1.3 Résultats vitesse par la méthode du pendule

Cette méthode a été utilisée pour déterminer laquelle des deux expériences ci-dessus semblait être la plus juste. En effet puisque les résultats pratiques des deux expériences précédentes se contre disaient, il a fallu une troisième pour savoir quelles vitesses pratique prendre en compte.

#### 3.1.3.1 Mesures vitesse par la méthode du pendule

		incertitude
M [kg]	0.2411	0.005
m [kg]	0.00313	0.00003
g [m/s <sup>2</sup> ]	9.81	0
Rb [m]	0.26	0.01
Rg [m]	0.278	0.005
T	1.112	0.005
l	0.02059496	1.5531E-10
Angle [deg]	variable	0.3

Po	alpha deg	alpha rad	v [m/s]	marge d'erreur [m/s]
2	13.75	0.23998277	34.233843	±1.28
2.5	14.75	0.25743606	36.7102816	±1.19
3.5	20	0.34906585	49.6613444	±0.89

#### 3.1.3.2 Commentaires mesures vitesse par la méthode du pendule

On voit que les résultats sont cohérents entre eux. Malgré tout on voit que qu'ils sont nettement inférieur aux résultats théoriques. Ils ont aussi d'environ 8 [m/s] inférieur aux résultats donnés par la méthode des disques. Ceci est dû principalement à la raison suivante :

La balle éclate au contact du pendule. Ce phénomène n'est pas pris en considération dans les calculs. Le fait que la balle éclate fait que le pendule monte moins haut qu'il le devrait. Ces résultats de vitesse ne sont pas utilisable tels quel, mais permettent de discréditer de manière définitive les résultats obtenu avec les

cellules photovoltaïques. Ceci m'a permis de me rendre compte que la méthode des disques devait donner les résultats de vitesse pratique se rapprochant le plus des vitesses pratiques effectives.

Cette expérience aurait pu avoir un rendu meilleur avec par exemple une mousse collante absorbant bien les chocs collée sur le pendule. De ce fait la balle resterait collée sur le pendule en ne s'éclatant pas. Les calculs devraient donner des résultats de vitesse plus juste. Il existe aussi le problème du canon enroulé de scotch, comme je l'ai déjà expliqué dans le chapitre 3.1.1.2. Par contre, le problème des balles dilatées a été soigneusement évité en n'effectuant que des tirs avec des balles bien sphériques.

Une autre expérience a aussi été envisagée mais n'a pas été réalisée dû au fait qu'elle nécessite un stroboscope avec un flash puissant. Celle-ci est la suivante : Placer un stroboscope s'allumant à une fréquence connue dans une pièce sans lumière. Puis déclencher un appareil photo avec un réglage permettant une ouverture prolongée de l'objectif. Il suffit d'effectuer un tir lorsque l'objectif est ouvert. Sur la photo on verra la position de la balle à certain intervalle de temps. Le calcul de vitesse est simple, on connaît la distance parcourue par la balle, à savoir la distance entre deux positions de la balle, et le temps durant lequel elle a parcouru cette distance, c'est-à-dire  $1/\text{fréquence}$  du stroboscope [Hz]. Avec cette quatrième expérience, les résultats de vitesse auraient dû être obtenus.

#### 3.1.4 Conclusion détermination vitesse

Pour résumer, on voit qu'avec les trois méthodes de mesures, celle qui semble être la plus précise est la méthode des disques. La formule trouvée pour déterminer la vitesse a des résultats moyennement satisfaisants.

Force de frottement (N) :	1
Volume réservoir (litre):	0.21
Longueur canon (cm):	38
Diamètre canon (mm):	17
Masse balle (g):	3.13

Pression (bars)	Vitesse th. balle avec frott canon (m/s)	Vitesse balle th. avec frott canon(km/h)	Vitesse th. balle sans frott canon (m/s)	Vitesse th. balle sans frott canon (km/h)	Vitesse pr. balle avec frott canon (m/s)	coefficient de multiplication vit th. /vit pr.
200000	91.5673365	329.6424114	92.8837371	334.381453	51.5	1.778006534
250000	102.671438	369.6171783	103.847175	373.84983	55.35	1.854949203
300000	112.686607	405.6717855	113.758881	409.53197	59.2	1.903489985
350000	121.881576	438.7736736	122.873635	442.345084	63.05	1.933093989

moyenne de coefficient de multiplication	1.86738493
--	------------



On peut, en incorporant la force de frottement du canon se rapprocher des résultats de vitesse pratique, mais pas avec une un coefficient de frottement équivalent à toutes les balles. On voit que la force de frottements de la balle dans le canon n'influe pas énormément sur la vitesse de sortie de la balle. La principale raison de la différence entre les vitesses pratiques et théoriques est le phénomène décrit dans le chapitre « 3.1.1.2 » à savoir la formation d'un bouchon d'air lent devant la balle. On peut néanmoins utiliser la constante 1.87 pour arriver approximativement de la vitesse théorique sans frottement à la vitesse pratique, cette constante est à peu près correcte pour les pressions entre 2 et 3.5 bars uniquement.

Pour conclure, il me fallait des vitesses pratique pour les pressions suivantes : 2 ; 2.5 ;3 ;3.5 bars. Mon manomètre ne me permettait de toute façon pas de tirer avec précision à d'autres pressions. On voit avec le graphique de la vitesse par rapport à la pression [...] qu'entre 2 bars et 3.5 bars la vitesse augmente presque linéairement par rapport à la vitesse. Me basant sur les résultats donnés par le disque, j'ai pu approximer un tableau d'équivalence reliant pression et vitesse. C'est avec ces vitesses que j'ai obtenu les résultats théoriques de portée.

Pression [bars]	Vitesse pratique [m/s]
2	51.5
2.5	55.35
3	59.2
3.5	63.05

### 3.2 Résultats de mesure de portée

C'est dans ce chapitre que je peux finalement comparer des résultats pratique de portée, obtenus avec la méthode tir décrite dans le chapitre « 2.4 », et des résultats théoriques, obtenus avec le programme fortran avec frottements en prenant comme vitesses les vitesses pratiques données par la méthode des disques.

#### 3.2 .1 Mesures portée de tir

Pression [Bar]	Angle [°]	Portée pratique[m]	Portée théorique[m]	Ecart numérique [m]	Ecart pourcentage [%]
3	45	73.8	71.04	2.76	3.89
3	45	75.35	71.04	4.31	6.07
3	45	74.22	71.04	3.18	4.48
3	35	68.45	74.31	5.86	7.88
2.5	45	68.35	68.01	0.34	0.5
2.5	45	65.85	68.01	2.16	3.18
2.5	45	70.1	68.01	2.09	3.073

Pression [Bar]	Angle [°]	Moyenne Portée [m]	Portée théorique[m]	Ecart numérique [m]	Ecart pourcentage [%]
3	45	74.45666667	71.04	3.416666667	4.809496997
3	35	68.45	74.31	5.86	7.885883461
2.5	45	68.1	68.01	0.09	0.13233348

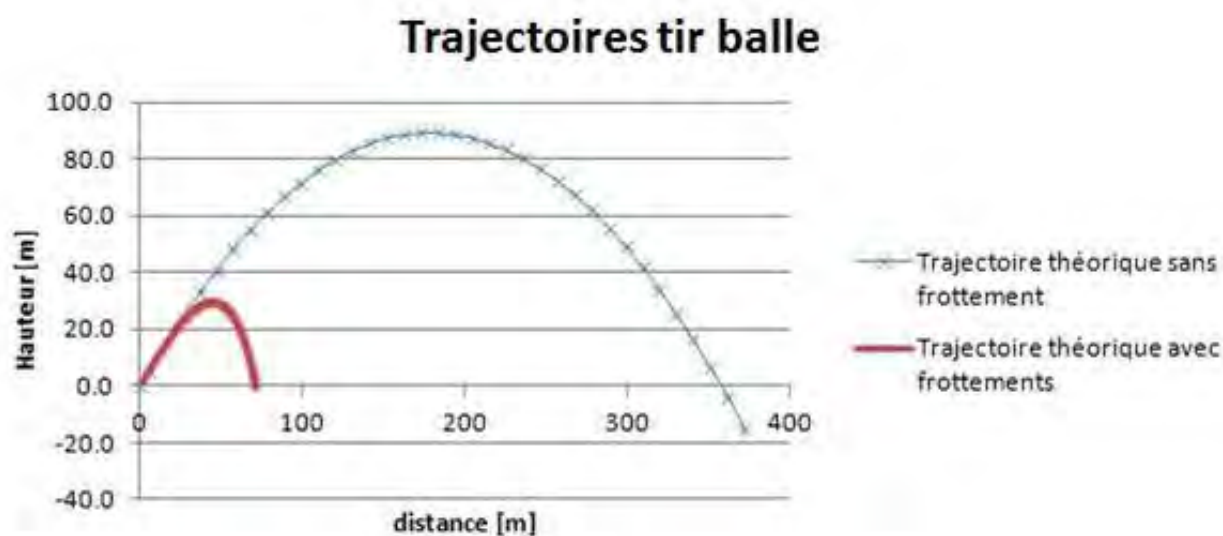
Moyenne pourcentage d'écart = 4.275 %

### 3.2.2 Commentaires mesures de portée de tir

Premièrement, mon but durant la séance de tir était d'effectuer 3 mesures par choix de paramètres, ce qui aurait permis d'avoir des résultats plus précis. Malheureusement, la séance de tir a dû être écourtée par l'intervention du concierge du gymnase, estimant ces tirs trop dangereux. C'est pour cette raison que je n'ai pas de mesures pour des pressions de 3.5 bars, la dernière mesure effectuée étant celle avec les paramètres suivant : 3bars ; 35 degrés.

Deuxièmement, On peut voir que les résultats donnés par le programme sont précis. Avec une moyenne de 4.275% de marge d'erreur, on peut estimer que les résultats théoriques sont bons. On voit que la plus grande marge d'erreur est observée avec le tir de 3 bars ; 35 degré. Il aurait été intéressant de pouvoir comparer ce résultat avec deux autres pour les mêmes variables. Mais cela n'a pas été possible pour la raison mentionnée ci-dessus. Il est étonnant que ces résultats soient de cette précision, car beaucoup de variable ne sont pas prise en compte pour les calculs, que ce soit le vent ou l'humidité de l'air par exemple. On observe également que le tableau de correspondance entre la pression et la vitesse utilisé est correct, et que le choix de la méthode des disques pour déterminer la vitesse était le bon.

En suite on peut remarquer que les frottements de l'air, souvent négligés dans les exercices des cours de physique, ont une grande incidence sur la portée du tir. En témoigne ce graphique, illustrant les trajectoires verticales de la balle de manières théorique.



On peut observer que l'impact théorique calculé sans frottements se situe à 350.58 mètres, alors que calculé avec les frottements de l'air, il se situe à 71.04 mètres. De plus on voit que la courbe de trajectoire avec frottements n'est pas symétrique comme l'autre, la balle tombant plus vite que ce qu'elle ne monte. Ces mesures permettent de remarquer l'importante différence qu'engendre l'approximation de ne pas prendre en compte les frottements de l'air.

### 3.2.3 Sources d'erreurs et propositions d'amélioration

Les principales sources d'erreurs pour les essais de tirs sont les suivantes :

La vitesse pratique de sortie du canon n'est pas déterminée avec précision. Avec une vitesse pratique mesurée plus précisément, je pourrais être sûr d'avoir les résultats théoriques de portée correspondant aux résultats de portée pratiques, afin de les comparer efficacement. Ceci aurait pu être résolu en effectuant la quatrième expérience décrite au chapitre 3.1.3.2. Je sais aussi qu'il existe des radars prévu à cet effet, les clubs de paintball les utilisent pour vérifier que les fusils tirent à des vitesses légales (la limite de vitesse autorisée est à 265 fps, soit environ 80.77 m/s).

Comme je l'ai déjà dit, plusieurs variables ne sont pas prises en compte dans les calculs, la plus grosse étant le vent, puis viennent l'humidité de l'air, la plus ou moins grande rotation de la balle dans l'air, les potentielles résistances rencontrées par la balle en l'air (insectes, poussières etc.) . De plus le tir est rarement droit, ce qui a pour incidence de réduire la portée pratique de certains tirs.

Le système de mesure de l'angle n'est pas très précis, il n'est pas sûr que la base soit parfaitement parallèle au vecteur de vitesse de sortie de la balle du canon. De plus le rapporteur a été imprimé par moi-même, l'imprimante a peut-être changé l'échelle etc.

Le gaz n'est pas relâché d'un coup, il faut quand même le temps d'un coup de poignet. De ce fait le gaz ne sort pas toujours exactement selon le même flux.

Lorsqu'on tourne la vanne d'un coup sec, cela nécessite de la force et donc une précision dans le geste amoindrie. Le fusil a donc tendance à bouger un peu lors de certains essais, ce qui peut modifier l'angle.

Le sol n'est pas parfaitement horizontal. C'est une route, il est donc bosselé à des endroits, et possède sûrement un léger dénivelé.

Pour remédier à ces problèmes, il aurait fallu des moyens plus importants, telle qu'une halle d'essai, ce qui aurait réglé le problème du vent et du sol, un moyen de fixer le fusil sur un support stable, ce qui aurait enlevé les mouvements du fusil lors du tir. Il aurait aussi été intéressant, mais quasiment irréalisable de pouvoir effectuer des essais sous vide d'air, afin de comparer des résultats pratiques sans frottements et des résultats théoriques sans frottements.

#### 4. Conclusion

Malgré les difficultés, ce travail de maturité a été stimulant à réaliser. Il a été un point d'intersection entre ma créativité, mon intérêt pour la physique et l'informatique. En effet que cela soit la partie pratique ou la partie théorique, chaque aspects ont été intéressants. Ce travail m'a permis de mieux comprendre la balistique, de créer un objet par moi-même que je pourrai utiliser à l'avenir et de m'initier au langage de programmation fortran. J'ai également réalisé à quel point les frottements de l'air sont important lors d'un tir.

J'ai en effet été amené à devoir imaginer un fusil sans aucun plan existant, à le construire pratiquement, à trouver de nombreuses alternatives à différents problèmes rencontrés lors de la construction, à persévérer sans aucune garantie de réussite, pour finalement parvenir à créer un objet fonctionnel. J'ai ensuite dû vérifier les différentes formules théoriques élaborées pour le fusil.

Ce travail de maturité m'a amené à résoudre de nombreux problèmes autant bien théoriques que pratiques. Les principaux ont été les suivants :

Comblent les fuites de gaz dans le fusil est certainement la tâche qui a été la plus fastidieuse. J'ai dû essayer beaucoup de solutions, la plupart ayant échouées. A force de tentatives, une solution a convenu, cela a été celle du mastic. Le problème des fuites est symptomatique des systèmes travaillant avec des gaz sous pression. Ce problème a requis toutes les vacances d'été pour être réglé. Si je devais refaire un deuxième modèle de fusil, je prendrais certainement un réservoir sur mesure en métal, fait d'une pièce, avec une entrée mâle de même taille que la sortie femelle du compresseur, et une sortie  $\frac{3}{4}$  de pouce. Le problème des fuites serait réglé simplement.

Le problème de la modélisation de la balle dans le canon a aussi été un problème conséquent à résoudre. Il ne l'est même pas tout à fait, puisqu'il subsiste une différence entre les résultats pratiques et les résultats théoriques. Il est difficile de trouver une vitesse théorique de la balle en sortie du canon car cette vitesse est sujette à beaucoup de variables, pas forcément facilement mesurables. De plus, comme vous avez pu le constater avec les trois expériences de mesures de vitesse, il est difficile de mesurer la vitesse d'un objet d'une si petite taille, surtout lorsqu'on se trouve dans de grande vitesse. Si le travail devait continuer, je me procurerais un radar utilisé par les clubs de paintball et je mesurerais la vitesse de sortie de la balle précisément avec le canon troué au bout, sans le scotch. Je pourrais donc voir si le phénomène du bouchon d'air se vérifie et s'il y a un moyen d'estimer la vitesse théoriquement en prenant en considération les trous au bout du canon. Avec plus de temps, j'aurais également ajouté un système de rechargement semi-automatique des balles, réduisant considérablement le temps nécessaire à un tir.

Mise à par ces deux principaux problèmes, le reste du travail s'est bien déroulé. Les résultats obtenus lors de ce travail sont pour certains excellents, et pour d'autres moyens. Mais, bien que je n'aie pas de formule déterminant la vitesse théorique précisément, grâce aux essais de vitesse, j'ai des vitesses pratiques de sortie de balle du canon selon la pression correspondant avec la réalité. De ce fait je peux calculer avec précision la portée d'un tir pour des pressions comprises entre 2.5 et 3.5 bars selon un angle de tir. Donc en ayant emprunté un autre chemin que celui imaginé au début du travail je suis tout de même arrivé à mon but, celui de construire un fusil à air comprimé et de pouvoir calculer théoriquement la portée d'un tir en variant plusieurs variables.

## 5. Annexes

### 5.1 Sources

#### 5.1.1 Images

##### 2.2.1.1 a

[http://www1.chf.conrad.ch/scripts/wgate/zcop\\_chf/~fINlc3Npb249UDkwX0NIRjpDX0FHQVRFMDQ6MDAwMC4wMDdkLjlxM2Q3MjhJn5odHRwX2NvbnRlbnRfY2hcnNldD1pc28tODg1OS0xJn5TdGF0ZT05MDY0OTk4Mjk=?~template=PCAT\\_AREA\\_S\\_BROWSE&glb\\_user\\_js=Y&shop=CHF&p\\_init\\_ipc=X&zhmmh\\_area\\_kz=&dir\\_ekt\\_aufriss\\_area=0330016&~cookies=&gclid=&scrwidth=1366](http://www1.chf.conrad.ch/scripts/wgate/zcop_chf/~fINlc3Npb249UDkwX0NIRjpDX0FHQVRFMDQ6MDAwMC4wMDdkLjlxM2Q3MjhJn5odHRwX2NvbnRlbnRfY2hcnNldD1pc28tODg1OS0xJn5TdGF0ZT05MDY0OTk4Mjk=?~template=PCAT_AREA_S_BROWSE&glb_user_js=Y&shop=CHF&p_init_ipc=X&zhmmh_area_kz=&dir_ekt_aufriss_area=0330016&~cookies=&gclid=&scrwidth=1366)

2.2.1.3 a [http://www.gmr-robinetterie.com/Robinet-14-de-tour/Robinets-%C3%A0-Boisseau-sph%C3%A9rique-Laiton---vannes/Boisseau-sph%C3%A9rique-Laiton-S%C3%A9rie-60/Robinet-%C3%A0-boisseau-sph%C3%A9rique-femellefemelle\\_128287.html](http://www.gmr-robinetterie.com/Robinet-14-de-tour/Robinets-%C3%A0-Boisseau-sph%C3%A9rique-Laiton---vannes/Boisseau-sph%C3%A9rique-Laiton-S%C3%A9rie-60/Robinet-%C3%A0-boisseau-sph%C3%A9rique-femellefemelle_128287.html)

2.2.1.4 a <http://www.billes-paintball.fr/xo-camotac-sachet-500-billes.html>

2.2.1.4 b <http://www.billes-paintball.fr/psycho-cammo-sachet-500-billes.html>

2.2.1.4 c image personnelle

2.2.2 a image personnelle

2.2.2.1 a image personnelle

2.2.2.2 a image personnelle

2.2.2.2 b

[http://www.google.ch/imgres?q=pas+de+vis+tuyau+male&um=1&hl=fr&nord=1&biw=1366&bih=667&tbs=isz:l&tbnid=hgBKHa3V0AiwWM:&imgrefurl=http://www.wendel.fr/Y15426/15428/SFERACO/vente\\_Vanne-a-sphere-laiton-Male--Femelle-avec-purge/Filetage-26--34.aspx&docid=bSQ-W7Yn4zwHZM&w=1250&h=793&ei=9l2ITrrdLcrDswbCtKjhAQ&zoom=1](http://www.google.ch/imgres?q=pas+de+vis+tuyau+male&um=1&hl=fr&nord=1&biw=1366&bih=667&tbs=isz:l&tbnid=hgBKHa3V0AiwWM:&imgrefurl=http://www.wendel.fr/Y15426/15428/SFERACO/vente_Vanne-a-sphere-laiton-Male--Femelle-avec-purge/Filetage-26--34.aspx&docid=bSQ-W7Yn4zwHZM&w=1250&h=793&ei=9l2ITrrdLcrDswbCtKjhAQ&zoom=1) (modifiée)

2.2.2.3 a image personnelle

2.2.2.3 b

[http://www.google.ch/imgres?q=raccord+tuyau+de+jardin&um=1&hl=fr&sa=X&nord=1&biw=1366&bih=667&tbs=ic:specific,isc:black&tbnid=uaOchdVEVuunEM:&imgrefurl=http://www.provence-outillage.fr/raccords-rapides-4-pieces&docid=MLWxq9gEJyN\\_OM&w=235&h=235&ei=NmalTpijEMrTsgbl3\\_zgAQ&zoom=1&iact=hc&vpx=718&vpy=367&dur=7210&hovh=188&hovw=188&tx=116&ty=155&page=9&tbnh=125&tbnw=125&start=178&ndsp=24&ved=1t:429,r:4,s:178](http://www.google.ch/imgres?q=raccord+tuyau+de+jardin&um=1&hl=fr&sa=X&nord=1&biw=1366&bih=667&tbs=ic:specific,isc:black&tbnid=uaOchdVEVuunEM:&imgrefurl=http://www.provence-outillage.fr/raccords-rapides-4-pieces&docid=MLWxq9gEJyN_OM&w=235&h=235&ei=NmalTpijEMrTsgbl3_zgAQ&zoom=1&iact=hc&vpx=718&vpy=367&dur=7210&hovh=188&hovw=188&tx=116&ty=155&page=9&tbnh=125&tbnw=125&start=178&ndsp=24&ved=1t:429,r:4,s:178) (modifiée)

2.2.2.4 a image personnelle

2.2.2.4 b images personnelle

- 2.2.2.4 c image personnelle
- 2.2.2.4 d images personnelle
- 2.2.2.4 a image personnelle
- 2.4.1 a image personnelle
- 2.4.1 b image personnelle
- 2.4.1 c image personnelle
- 2.4.1 d image personnelle
- 2.4.3 a manuel d'utilisation « PASCO scientific Model ME-6830/ME-6831 » (modifiée)
- 2.4.3 b manuel d'utilisation « PASCO scientific Model ME-6830/ME-6831 » (modifiée)
- 2.5 a image personnelle
- 2.5 a image personnelle
- 3.1.1.2 a image personnelle

#### 5.1.2 Documents

- (1) Site de Conrad où j'ai acheté le compresseur

[http://www1.chf.conrad.ch/scripts/wgate/zcop\\_chf/~fINlc3Npb249UDkwXONIRjpDX0FHQVRFMDQ6MDAwMC4wMTAxLmFINDUxMDJiJn5odHRwX2NvbnRlbnRfY2hhcnNldD1pc28tODg1OS0xJn5TdGF0ZT0yNTc3MTc0MjY4===?~template=PCAT\\_AREA\\_S\\_BROWSE&glb\\_user\\_js=Y&shop=CHF&p\\_init\\_ipc=X&zhmmh\\_area\\_kz=&direkt\\_aufriss\\_area=0330016&~cookies=&gclid=&scrwidth=1366](http://www1.chf.conrad.ch/scripts/wgate/zcop_chf/~fINlc3Npb249UDkwXONIRjpDX0FHQVRFMDQ6MDAwMC4wMTAxLmFINDUxMDJiJn5odHRwX2NvbnRlbnRfY2hhcnNldD1pc28tODg1OS0xJn5TdGF0ZT0yNTc3MTc0MjY4===?~template=PCAT_AREA_S_BROWSE&glb_user_js=Y&shop=CHF&p_init_ipc=X&zhmmh_area_kz=&direkt_aufriss_area=0330016&~cookies=&gclid=&scrwidth=1366)

- (2) Document qui a inspiré deux des trois expériences de mesures de vitesse  
« Travaux pratiques Débutants expérience no.2 TIR : Mesure de la vitesse d'un projectile » de Tobias Gresch.

## 5.2 Remerciements

Durant ce travail de maturité plusieurs personnes m'ont apporté une aide précieuse et je souhaite les remercier.

Monsieur Laurent de Schoulepnikoff      pour vos conseils, votre aide, et votre soutien durant tout ce travail de maturité.

K é vin Mury      pour ton programme informatique et ton aide durant les essais de portées.

David Resin      pour ton aide durant les essais de portée.

K é van Sadeghi      pour ton aide durant les essais de portée.