

Projet de Physique P6-3
STPI/P6-3/2012 – 14

ETUDE DES AEROSTATS



Etudiants :

BingRong CHEN

Nicolas RUTARD

Radu TAMPIZA

Zhe CHEN

Xiaoxiao SUN

Thomas WIART

Enseignant-responsable du projet :

Didier VUILLAMY

Date de remise du rapport : **17/06/2012**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2012 – 14**

Intitulé du projet : ***Etude des aérostats.***

Type de projet : ***Bibliographie, modélisation, expérimentation.***

Objectifs du projet :

Etudier les différentes caractéristiques des ballons à air chaud afin de permettre au groupe de concevoir et de réaliser son propre ballon et de pratiquer quelques expérimentations sur celui-ci.

Mots-clefs du projet : ***Ballon à air chaud, construction, expérimentation, groupe.***

TABLE DES MATIERES

Remerciements	1
Introduction	2
1. Historique	3
1.1. Histoire des aérostats.....	3
1.2. Histoire de montgolfière.....	4
2. Méthodologie / Organisation du travail	5
2.1. Méthodologie	5
2.2. Organisation du travail.....	5
3. Etude théorique du ballon à air chaud	6
3.1. Détermination du volume minimal du ballon nécessaire	6
3.2. Etude des différentes formes pouvant caractériser le ballon à air chaud	7
3.3. Etude des patrons nécessaires à la découpe du tissu	11
3.4. Détermination de la quantité de paraffine à utiliser	13
4. Conception	15
4.1. Définition de la forme.....	15
4.2. Choix du matériau.....	15
4.3. Réalisation des patrons	15
4.4. Découpage du tissu.....	15
4.5. Couture de l'enveloppe.....	17
4.6. Construction du brûleur	18
4.7. Structure de décollage.....	18
5. Expérimentation	19
5.1. Prototype.....	19
5.1.1. Création	19
5.1.2. Caractéristiques techniques.....	19
5.1.3. Observations	19
5.2. Ballon 4m ³	20
5.2.1. Test tissu	20
5.2.2. Test de la colle « scotch ».....	21
5.2.3. Test du brûleur	21
5.2.4. Test de vol n°1	22
5.2.5. Test de vol n°2	22
5.2.6. Test étanchéité	22
5.2.7. Test capacité ascensionnelle.....	22
5.2.8. Mesure de la température	22
Conclusion	23
6. Bibliographie	24
7. Annexes	25
7.1. Annexe 1. Méthode de calcul du rayon du ballon en fonction de la hauteur	25
7.2. Annexe 2. Programmation des fonctions sous Excel	28
7.3. Annexe 3. Feuille de résultat sur l'étude du patron.	31
7.4. Annexe 4. Fiche expérimentale : Test de solidité	32
7.5. Annexe 5. Fiche expérimentale : Test de résistance à la chaleur.....	33
7.6. Annexe 6. Fiche expérimentale : Test de résistance à la chaleur du tissu	34
7.7. Annexe 7. Fiche expérimentale : Test de résistance à la chaleur de la colle	35
7.8. Annexe 8. Fiche expérimentale : Test de vol.....	36
7.9. Annexe 9. Fiche expérimentale : Test de vol n°2	37
7.10. Annexe 10. Fiche expérimentale : Test d'étanchéité.....	38

REMERCIEMENTS

Durant ce projet, nous avons reçu beaucoup d'aide et de conseil de la part de nombreuses personnes que nous souhaitons ici remercier.

Tout d'abord nous voudrions remercier tout particulièrement M.VUILLAMY pour son aide, ses conseils et sa motivation qui nous ont beaucoup apportée lors de ce projet. Nous tenons également à remercier Mme.VUILLAMY qui a fort aimablement et avec beaucoup de talent cousu l'intégralité du ballon.

Nous souhaitons remercier toutes les personnes qui ont pu de près ou de loin nous conseillé et nous aidé durant tout notre projet. Ainsi nous voulons remercier M.BOUFFLERT de la SNECMA qui nous a apporté de nombreuses informations grâce à sa propre expérience dans la construction d'un ballon à air chaud, M.CHARLES de la société Opale Aéro System qui nous a vendu le tissu et conseillé pour la conception du ballon.

Nous souhaitons remercier la déchetterie Montville qui nous a généreusement fourni des tubes en aluminium.

Nous souhaitons finalement remercier chaleureusement tous nos amis étudiants qui nous ont soutenu et qui ont montré un intérêt tout particulier à notre projet, ce qui nous a d'autant plus motivé.

INTRODUCTION

Pour les futurs ingénieurs, il est très important de travailler en groupe. C'est pourquoi les étudiants de deuxième année de l'INSA de Rouen sont amenés à réaliser un projet en groupe. Le sujet de ce projet a été l'étude des aérostats durant les 14 semaines.

Nous avons chacun choisi ce projet pour des raisons similaires, ainsi même si les connaissances dans ce domaine de la plupart des membres du groupe étaient faibles, les objets volants attirent notre curiosité. Par ailleurs, l'aspect modélisation a constitué un facteur important pour le choix de ce sujet, en effet pouvoir allier la pratique à la théorie est pour nous un point que nous avons rarement (voir jamais) pu réaliser dans un projet de cette ampleur. Finalement la partie expérimentation qui se rapproche d'un véritable travail de recherche a également motivé certains membres du groupe pour le choix de ce sujet.

L'intérêt principal d'un aérostat est de faire voler des personnes ou des marchandises dans les airs. Les aérostats sont les premières machines qui ont permis aux hommes de voyager dans les airs. L'invention de la montgolfière est très ancienne et année après année, et encore de nos jours, les scientifiques continuent d'améliorer constamment la technologie des aérostats.

Mais pour une montgolfière à air chaud, les problèmes apparaissent au niveau de la surface de l'enveloppe et de la température intérieure très élevée qui nécessite beaucoup d'énergie quand il vole dans les airs. Ce sont ces problèmes que nous avons eu à résoudre durant notre projet.

Les objectifs principaux du projet étaient l'étude des aérostats, la construction d'une montgolfière et les possibles améliorations à apporter sur une montgolfière.

Dans ce dossier, nous allons tout d'abord présenter la méthodologie et l'organisation du travail durant ce projet, pour ensuite expliquer les différents calculs théoriques que nous avons effectués. Nous allons ensuite présenter les méthodes de construction de notre ballon dans une troisième partie, et finalement, nous allons exposer dans la quatrième partie les différents tests et expériences que nous avons mis en œuvre durant ce projet.

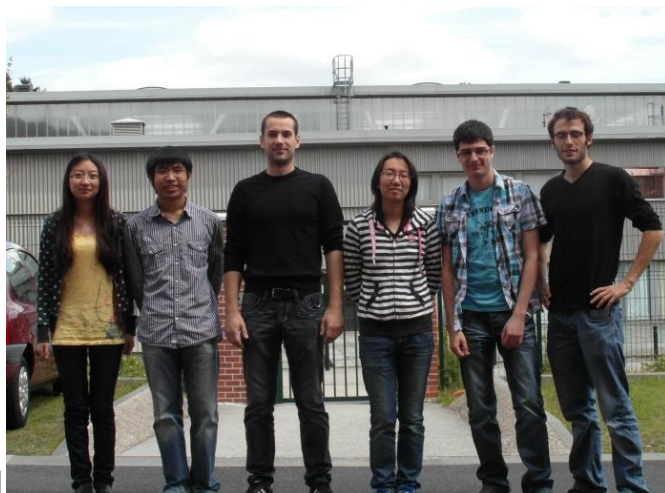


Photo de l'ensemble du groupe

1. HISTORIQUE

1.1. Histoire des aérostats

Un aérostat est un aéronef « plus léger que l'air », dont la sustentation est assurée par la poussée d'Archimède, contrairement à un aérodyne (source wikipédia).



Ce principe était connu des chinois (inventeurs présumés du papier) : l'envol de petits ballons de papier gonflés à l'air chaud était pratiqué par eux. D'après la tradition populaire chinoise, la Lanterne Kongming, premier ballon à air chaud de l'histoire, fut inventée par l'un des plus brillants tacticiens de l'époque des Trois Royaumes Zhuge Liang (181-234 ap. J.C.) plus connu sous le prénom social de Kongming. Au début du 3e siècle après J.-C., Zhuge Liang eut l'idée d'utiliser des lanternes volantes pour la signalisation militaire.

De nombreux précurseurs (entre autres Bartolomeu de Gusmão) ont illustré ce principe. Les premières applications pratiques d'engins plus importants ont été réalisées par les Français Joseph et Étienne de Montgolfier.

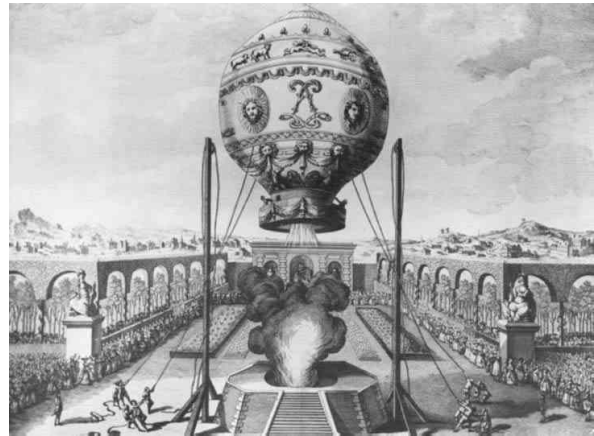
Voici les différents types d'aérostats existant :

- la montgolfière, ou ballon à air chaud ;
- le ballon à gaz ;
- le ballon stratosphérique, ballon à gaz conçu pour monter dans la stratosphère ;
- le dirigeable, ballon à gaz muni de moteurs lui permettant de se diriger.
- Le ballon peut être libre de tous mouvements, ballon libre, ou relié au sol par un câble qui ne lui permet que de monter ou descendre, il est nommé alors ballon captif.



1.2. Histoire de montgolfière

La montgolfière a été inventée par les frères Montgolfier, Joseph et Étienne, en 1784, le 14 décembre à Annonay. Le 19 septembre 1785, un coq, un mouton et un canard firent l'expérience du premier vol habité, tandis que le 21 novembre Jean-François Pilâtre de Rozier et le Marquis d'Arlandes eurent le bonheur d'être les premiers êtres humains à voler.



Après des débuts prometteurs, les montgolfières vont être supplantées par les charlières, les ballons à gaz, dont le premier s'est envolé le 1er décembre 1783. L'hydrogène, couteux et difficile à préparer, pourra être remplacé par du gaz d'éclairage bon marché.

Les montgolfières étaient délicates à mettre en œuvre avec le foyer qu'il fallait alimenter sans mettre le feu au ballon avec des escarbilles ou un fétu de paille à moitié consommé.

Pendant la période de déclin, les ballons n'étaient pas équipés de foyer, ils étaient gonflés à bloc au sol puis on lâchait tout. La montgolfière s'élevait très rapidement pour un vol d'une dizaine de minutes.

Au début du siècle, Louis Godard inventa un brûleur à pétrole, mais il n'était pas assez efficace pour donner une véritable utilité au ballon à air chaud.

Il a fallu attendre les années soixante pour voir apparaître la montgolfière moderne, grâce à l'invention de nouveaux matériaux, et surtout grâce à l'utilisation de brûleurs à propane.



Depuis il n'y a pas eu de grosses évolutions dans la forme de l'enveloppe ou dans les technologies utilisées.



3. ETUDE THEORIQUE DU BALLON A AIR CHAUD

3.1. Détermination du volume minimal du ballon nécessaire

Le principe fondamental à l'origine des ballons à air chaud provient tout particulièrement de la poussée d'Archimède. Ce principe énonce que tout corps soumis à un champ de gravité et plongé entièrement ou partiellement dans un fluide (liquide ou gaz) subira une force particulière nommée poussée d'Archimède. La valeur de cette force, que l'on notera P_A , vaut la valeur du poids du volume de fluide déplacé par le corps :

$$P_A = m_f \times g$$

(avec m_f la masse du volume de fluide déplacé et g la constante de gravité terrestre)

Dans le cas des ballons à air chaud, il est nécessaire que la valeur du poids du ballon notée P_{ballon} (poids de l'aérostat à vide + poids de l'air chaud contenu par le ballon) soit inférieur à la valeur du poids du volume d'air déplacé par celui-ci. Soit en équation mathématique :

$$P_{\text{ballon}} = P_{\text{ballon vide}} + P_{\text{air chaud}}$$

$$P_{\text{ballon vide}} = m_{\text{ballon vide}} \times g$$

$$P_{\text{air chaud}} = m_{\text{air chaud}} \times g = \rho_{\text{air chaud}} \times V_{\text{ballon}} \times g$$

$$P_A = m_{\text{air froid}} \times g = \rho_{\text{air froid}} \times V_{\text{ballon}} \times g$$

$$P_A \geq P_{\text{ballon}}$$

Déterminons pour commencer les données connues et celles recherchées. Nous souhaitons tout d'abord un ballon ayant une masse de **1 kg** à vide, comprenant la masse du tissu et celle du brûleur. La constante de gravité quant à elle vaut **9,81 m.s⁻²**. Pour finir, la donnée recherchée à travers cette équation est le volume du ballon V_{ballon} nécessaire pour faire voler un ballon de **1 kg**. Il ne nous reste donc qu'à déterminer la masse volumique de l'air chaud $\rho_{\text{air chaud}}$ et de l'air froid $\rho_{\text{air froid}}$.

$$m_{\text{ballon vide}} = 1 \text{ Kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m. s}^{-2}$$

La masse volumique de l'air chaud se calcule à pression atmosphérique (**1 bar**) pour un air sec à une température de **100°C** soit de **373 K**.

La masse volumique de l'air froid se calcule à pression atmosphérique (**1 bar**) pour un air sec à une température de **20°C** soit de **293 K**.

En considérant l'air comme un gaz parfait on obtient :

$$PV = nRT$$

$$PV = \frac{m}{M} RT$$

$$PV = \frac{\rho V}{M} RT$$

$$\rho = \frac{PM}{RT}$$

En considérant M comme la masse molaire de l'air ($M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$) et R comme la constante des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) on obtient alors une valeur de $\rho_{\text{air froid}}$ de



1.19 kg.m^{-3} et une valeur de $\rho_{\text{air chaud}}$ de 0.93 kg.m^{-3} . A l'aide de la relation précédente $P_A \geq P_{\text{ballon}}$ on peut déterminer le volume minimal du ballon pour soulever une charge de **1 kg** :

$$\rho_{\text{air froid}} \times V_{\text{ballon}} \times g \geq \rho_{\text{air chaud}} \times V_{\text{ballon}} \times g + m_{\text{ballon vide}} \times g$$

$$\rho_{\text{air froid}} \times V_{\text{ballon}} \times g - \rho_{\text{air chaud}} \times V_{\text{ballon}} \times g \geq m_{\text{ballon vide}} \times g$$

$$(\rho_{\text{air froid}} - \rho_{\text{air chaud}}) \times V_{\text{ballon}} \geq m_{\text{ballon vide}}$$

$$V_{\text{ballon}} \geq 3,85 \text{ m}^3$$

3.2. Etude des différentes formes pouvant caractériser le ballon à air chaud

Une fois le volume minimal du ballon déterminé, il nous a été nécessaire de choisir la forme que notre futur ballon. Pour cela nous avons tout d'abord réfléchi à ce qui pourrait pousser un constructeur de ballon à choisir telle ou telle forme plutôt qu'une autre. Nous avons alors dégagé trois critères principaux qui sont : l'**apparence**, la **quantité de tissu utilisé**, la **répartition des efforts dans le tissu** et enfin la capacité ascensionnelle plus ou moins rapide. Nous ne traiterons pas ici du critère esthétique, étant donné qu'il s'agit d'un critère purement subjectif n'ayant rien à voir avec nos études théoriques, ni de la rapidité d'ascension du ballon. Commençons tout d'abord par étudier l'influence de la forme sur la surface de tissu à utiliser pour un même volume. Durant cette partie, nous étudierons des ballons de volumes assez grands pour obtenir des résultats suffisamment significatifs pour effectuer des comparaisons.

Pour déterminer le volume et la surface du ballon, nous devons connaître son rayon r en fonction de la hauteur z afin de pouvoir ensuite l'intégrer car :

$$V_{\text{ballon}} = \int_{z_{\text{min}}}^{z_{\text{max}}} [\pi \times (r(z))^2] dz$$

$$S_{\text{ballon}} = \int_{z_{\text{min}}}^{z_{\text{max}}} [2 \times \pi \times r(z)] dz$$

M. Vuillamy nous a ensuite appris à utiliser un module sous Excel nous permettant de calculer informatiquement l'équation de n'importe quelle courbe. Pour cela il suffit d'utiliser un logiciel permettant d'obtenir les coordonnées d'une multitude de points sur une image de référence (*voir annexe 1*).

Grâce à ce module, nous avons obtenu l'équation de la courbe d'un ballon classique en forme de Poire d'environ **16 m** de hauteur :

$$r_1(z) = A_1 + B_1 z + C_1 z^2 + D_1 z^3$$

$$A_1 = 1,830556058 ; B_1 = 0,730086226 ; C_1 = 0,040891689 ; D_1 = -0,005708118$$

Calculons maintenant son volume à l'aide de la formule vue précédemment :

$$V_{\text{ballon1}} = \int_{z_{\text{min}}}^{z_{\text{max}}} [\pi \times (r(z))^2] dz$$

$$V_{\text{ballon1}} = 1604 \text{ m}^3$$

Calculons à présent la surface de tissu nécessaire pour une telle forme :

$$S_{\text{ballon1}} = \int_{z_{\text{min}}}^{z_{\text{max}}} [2 \times \pi \times r(z)] dz$$

$$S_{\text{ballon1}} = 534 \text{ m}^2$$



Le but de cette partie étant de comparer la quantité de tissu utilisée selon la forme du ballon, il nous faut maintenant calculer la surface d'un ballon de forme différente mais de même volume.

L'équation d'une sphère étant une équation quadratique très simple à déterminer, nous l'avons utilisée pour calculer son volume et sa surface. Mais l'intégrale d'une fonction polynômiale étant grandement plus facile à intégrer, nous utiliserons encore une fois le module sous Excel permettant de calculer informatiquement sous forme polynômiale le rayon en fonction de la hauteur. Mais attention, la forme de poire vue précédemment comportait une ouverture à l'entrée du ballon qui doit également être présente dans la forme sphérique. Après calcul sous Excel, nous obtenons l'équation suivante :

$$r_2(z) = A_2 + B_2 z + C_2 z^2 + D_2 z^3 + E_2 z^4$$

$$A_2 = 1,82687509058068 ; B_2 = 2,47978771021203 ; C_2 = -0,453695434951907 ;$$

$$D_2 = 0,0398779691651929 ; E_2 = -0,001431808595646$$

Vérifions alors à présent que cette forme sphérique possède bien un volume égal à **1604 m³** :

$$V_{\text{ballon2}} = \int_{z_{\text{min}}}^{z_{\text{max}}} [\Pi \times (r(z))^2] dz$$

$$V_{\text{ballon2}} = 1625 \text{ m}^3$$

On observe donc un écart de **21 m³** avec le volume recherché soit un écart de **1,25 %**. Cet écart provient du fait que le module complémentaire sur Excel n'est pas précis à 100 %, il ne permet d'obtenir qu'une équation polynômiale approchée de notre courbe. Mais cet écart restant convenable l'équation trouvée est validée. Calculons désormais la surface de tissu nécessaire à la conception d'un tel ballon :

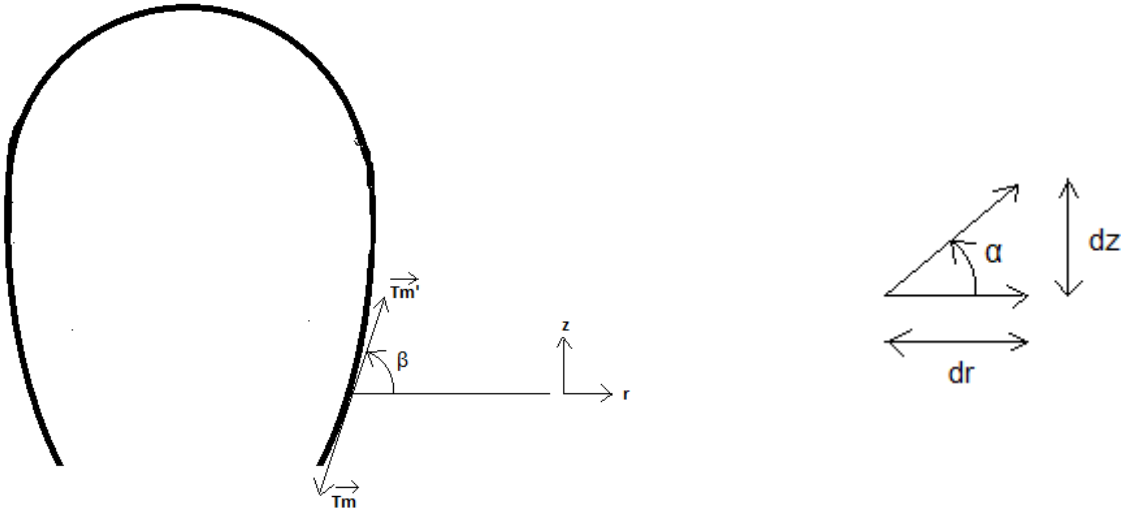
$$S_{\text{ballon2}} = \int_{z_{\text{min}}}^{z_{\text{max}}} [2 \times \Pi \times r(z)] dz$$

$$S_{\text{ballon2}} = 522 \text{ m}^2$$

On observe donc un écart de **12 m²** avec la surface de tissu nécessaire pour un ballon en forme de poire ce qui correspond à un écart d'environ **2 %**. Cet écart étant relativement faible et du fait des incertitudes dues au module de calcul sur Excel, nous pouvons affirmer qu'un ballon de forme sphérique nécessitera autant de tissu qu'un ballon en forme de poire de même volume. Ce n'est donc pas un critère qui rentre en jeu dans le choix de la forme du ballon.

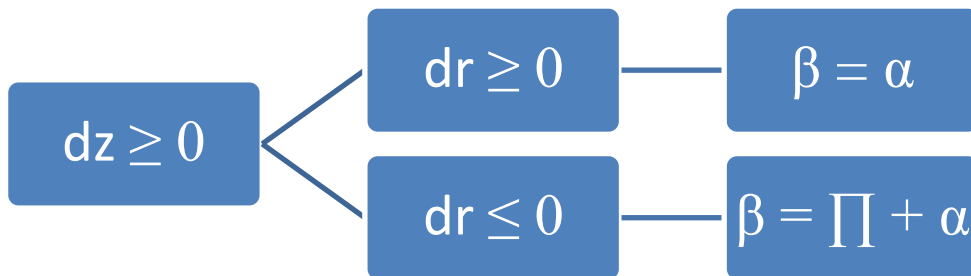
Etudions maintenant la répartition des efforts dans le tissu en fonction de la forme du ballon. Pour cela nous étudierons les tensions méridiennes **T_m** par unité de surface exercées par le bas du ballon sur la calotte supérieure de ce dernier.





Le croquis ci-dessus permet de voir que la composante suivant (Oz) de T_m' vaut $|T_m| \times \sin(\beta)$. Ainsi, en intégrant cette valeur sur la totalité du périmètre du cercle formé par la coupe horizontale du ballon à une hauteur z , la valeur de la force ascensionnelle (force suivant (Oz) permettant au ballon de voler) notée F_a vaut $2\int r(z) \times |T_m| \times \sin(\beta)$. De plus, pour connaître β il suffit de poser :

On observe en effet deux cas. Le premier est le cas où l'on se trouve sur l'hémisphère sud du ballon, c'est-à-dire là où une variation dz positive implique une variation dr positive sur la courbe. Dans ce cas on a $\beta = \alpha$. Dans le deuxième cas, on se trouve sur l'hémisphère nord du ballon et une variation dz positive implique une variation dr négative sur la courbe. Dans ce cas on a $\beta = \pi + \alpha$.



$$\tan(\alpha) = \frac{dz}{dr}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{1}{dr/dz}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1}{dr/dz}\right)$$

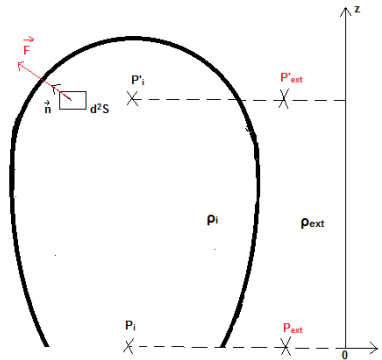
Ainsi, connaissant l'expression de $r(z)$, α peut être calculé et il en est donc de même pour β et $\sin(\beta)$. On obtient donc pour finir :

$$|T_m|(z) = \frac{F_a(z)}{2\int r(z) \times \sin(\beta(z))}$$



Connaissant $r(z)$ et $\sin(\beta(z))$, il ne nous reste plus qu'à calculer $F_a(z)$.

Comme précisé précédemment, $F_a(z)$ représente la force ascensionnelle de la calotte supérieure du ballon, c'est-à-dire de z à z_{max} . En effet, les forces méridiennes T_m résistent à cette force ascensionnelle. Pour calculer cette force ascensionnelle $F_a(z)$ il faut d'abord savoir qu'elle provient de la différence de pression entre l'air chaud à l'intérieur du ballon et l'air froid à l'extérieur (Principe d'Archimède) :



En considérant l'air chaud intérieur comme étant statique (bien que ce ne soit pas réellement le cas), la pression intérieure et la pression extérieure suivent alors la loi $P + \rho g z = C^{ste}$. Ainsi, d'après le croquis ci-dessus, et en posant P_i et P_{ext} égales à la pression atmosphérique P_0 on obtient :

$$P_0 = P'_i + \rho_i \times g \times z \rightarrow P'_i = P_0 - \rho_i \times g \times z$$

$$P_0 = P'_{ext} + \rho_{ext} \times g \times z \rightarrow P'_{ext} = P_0 - \rho_{ext} \times g \times z$$

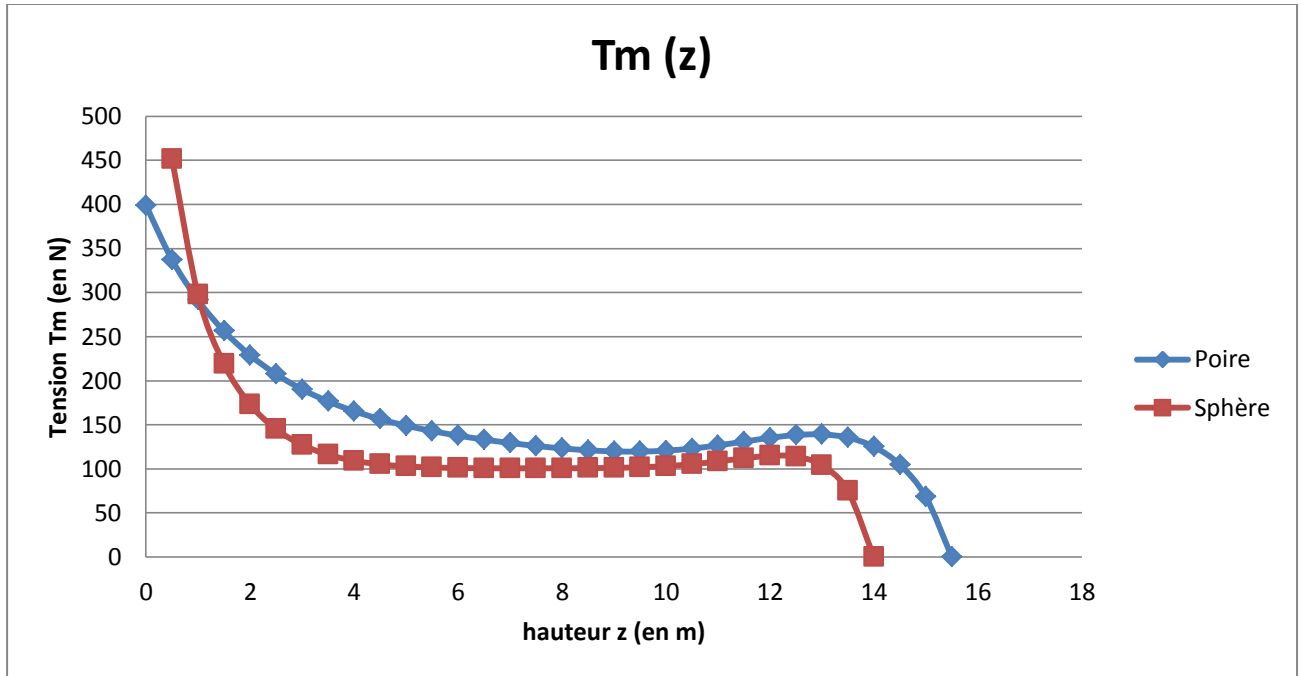
De plus, notons la force F due à la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du ballon agissant sur d^2S . Alors $F = \Delta P \times d^2S$ avec $\Delta P = P'_i - P'_{ext} = g z (\rho_{ext} - \rho_i)$. En projetant F sur l'axe z, nous obtenons :

$$F_a(z) = \int_z^{z_{max}} [\Delta P(z) \times 2\pi r(z)] \frac{dr}{dz} dz$$

$$F_a(z) = \int_z^{z_{max}} [g z (\rho_{ext} - \rho_i) \times 2\pi r(z)] \frac{dr}{dz} dz$$

Connaissant l'expression de la force ascensionnelle de la calotte supérieure du ballon de z à z_{max} nous pouvons maintenant calculer les valeurs de T_m en fonction de la hauteur z . Pour cela nous avons utilisé des fonctions (voir annexe 2) sous Excel et avons obtenu ces résultats :





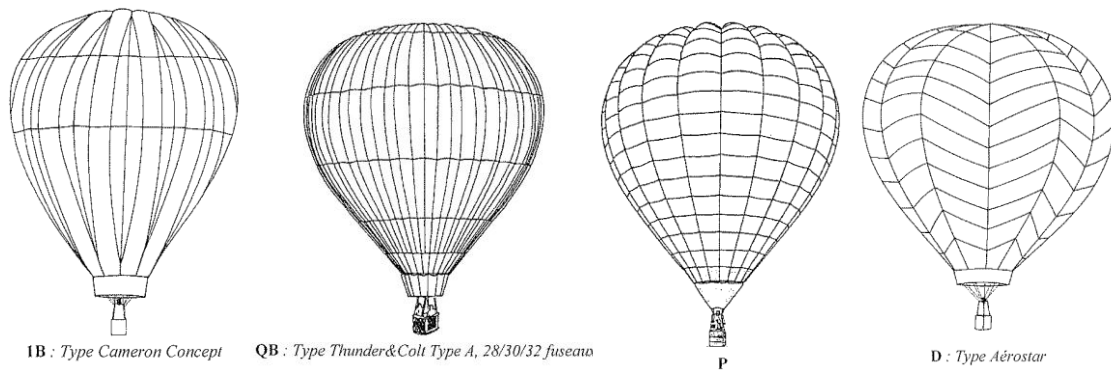
Nous pouvons donc remarquer que d'après les résultats ci-dessus, la poire et la sphère subissent des efforts équivalents au sein du tissu (les écarts sont simplement dus à la différence de volume entre les deux modèles bien que celle-ci ne soit pas très grande). Nous pouvons donc en conclure que le critère d'efforts dans le tissu ne joue pas un rôle prépondérant dans le choix de la forme du ballon. Ne sachant pas quels sont alors les critères entrant réellement en compte dans le choix de la forme, nous avons décidé de suivre le modèle le plus courant qui est celui de la poire.

3.3. Etude des patrons nécessaires à la découpe du tissu

Présentons tout d'abord les différents types de découpe possible :

- **1B (une bande)** – le fuseau est découpé dans une seule bande, la largeur des fuseaux étant limitée par la largeur du tissu. Certains constructeurs ne pratiquent pas directement cette technique mais l'adaptent pour diminuer les pertes de tissu.
- **QB (quelques bandes)** – le fuseau est découpé en quelques bandes (2,3 ou 4 par exemple). La largeur de ces fuseaux est limitée par la largeur du tissu.
- **P (panneaux)** – c'est la découpe horizontale que l'on rencontre le plus souvent. La largeur des fuseaux n'est plus limitée, mais la hauteur des panneaux est limitée par la largeur du tissu.
- **D (diagonale)** – la découpe est réalisée en diagonale mais paraît plus difficile à calculer. Le nombre de panneaux sera là aussi proportionnel à la hauteur du ballon.





Ces informations ont été tirées d'une revue spécialisée dans les aérostats nommée « Le Bulletin de la Construction Amateur d'Aérostats Française » publiée en 1998. Dans ce même numéro est présentée une feuille de calcul reliant le profil de l'enveloppe de Smalley (voir figure ci-après) au calcul des fuseaux (type QB).

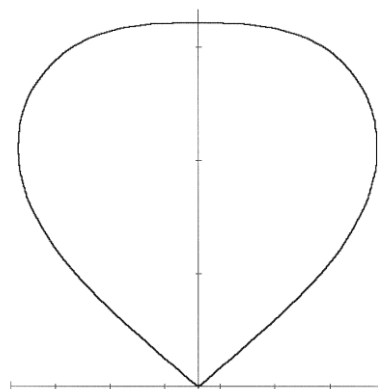
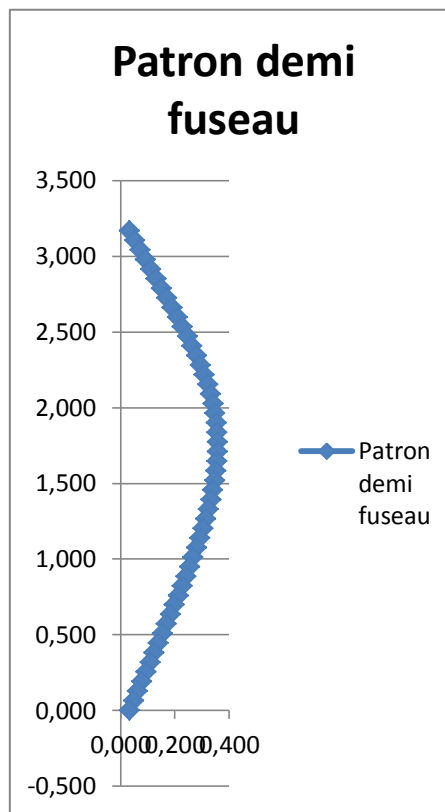


Figure 1 : Profil de Smalley

Dans cette feuille de calcul figurent trois champs à remplir (le volume du ballon, les marges de coutures et le nombre de fuseaux désirés), l'abscisse curviligne du ballon en % (données calculées par Smalley), le rayon du ballon en % (données calculées par Smalley) et la dimension d'un demi fuseau (largeur du demi fuseau en fonction de la hauteur). Pour obtenir la dimension d'un demi-fuseau plusieurs colonnes de passage sont nécessaires comme le calcul du rayon et du périmètre en fonction de la hauteur. Il nous a suffi de remplir les trois champs cités ci-dessus, la feuille de calcul a ensuite livré les résultats (voir annexe 3).

Cette feuille de résultat nous permet ainsi d'obtenir le demi-fuseau ci-dessous :





3.4. Détermination de la quantité de paraffine à utiliser

Pour faire voler notre ballon à air chaud il nous a fallu choisir le moyen que l'on utiliserait pour le gonfler. Nous avons décidé dans un premier temps d'utiliser un décapeur thermique, produisant de l'air chaud entre **50°C** et **600 °C**, afin d'apporter la chaleur nécessaire au gonflage du ballon. Cependant, nous avons changé d'idée en cours de route (voir partie « expérimentation ») et avons choisi d'utiliser une bouteille de gaz « Campingaz » pour le démarrage. Puis, une fois le ballon gonflé, nous pensions utiliser une simple bougie à plusieurs mèches placée à l'entrée du ballon afin de maintenir la chaleur à l'intérieur de celui-ci. Le problème qui s'est alors posé était de déterminer quelle quantité de paraffine serait nécessaire pour faire voler le ballon et de savoir si une bougie suffirait. Les calculs suivants nous ont démontré que l'utilisation d'une bougie n'était pas une bonne solution.

D'après les informations collectées par un collègue de M. Vuillamy, le vol d'un ballon à air chaud grandeur nature durant **2 h** consommerait **13 kg** de propane. Ainsi, le débit de propane servant à s'opposer aux pertes de chaleur à travers le tissu du ballon est de **1,8 g.s⁻¹**. De plus, le propane ayant un pouvoir calorifique de **10 000 kcal.kg⁻¹** soit **4,18.10⁷ J.kg⁻¹**, en multipliant ce pouvoir calorifique avec le débit instantané de propane nous obtenons alors le flux instantané d'énergie qui est de **7,55.10⁴ W** (valeur qu'il faut diviser par la surface du ballon afin d'obtenir le flux instantané d'énergie par m², soit **105 W.m⁻²**). Multiplions maintenant cette valeur par la surface de tissu de notre ballon (environ **12,5 m²**) pour obtenir un flux instantané d'énergie de **1319,5 W** pour notre ballon. Etant donné que le pouvoir calorifique de la paraffine est le même que celui du propane, en divisant notre flux instantané par le pouvoir calorifique de la paraffine nous obtenons un débit de paraffine de **3,16.10⁻² g.s⁻¹**.



Maintenant que nous connaissons le débit de paraffine consommé pour notre ballon, voyons combien de bougies seraient nécessaires. Sachant qu'une petite bougie à une mèche dure **4 h** et que cette même bougie contient **11 g** de paraffine, elle consomme donc **$7,6.10^{-4} \text{g.s}^{-1}$** .

	A	B	C	D
1	pouvoir calorifique (Kcal/kg)	1,00E+04		
2	pouvoir calorifique (J/kg)	4,18E+07		
3	volume de montgolfiere (m ³) de Boufflert	1800		
4	rayon (m) de montgolfiere de Boufflert	7,546220133		
5	surface (m ²) de montgolfiere de Boufflert	715,5900444		
6	masse de combustible / 2 heures (kg) Boufflert	13		Données
7	débit instantané (kg/s)	0,001805556		Résultats
8	flux instantané pour toute la surface (W)	7,55E+04		
9	flux par m ²	1,05E+02		
10				
11				
12	surface de notre ballon (m ²)	12,56624		
13	flux imposé (w/m ²) de notre ballon	105		
14	flux total de notre ballon (W)	1319,4552		
15	débit de paraffine (kg/s) en supposant que le PCS de la paraffine est celui du propane	3,16E-05		
16	débit de paraffine (g/s)	3,16E-02		
17				
18				
19	masse d'une petite bougie (g)	11		
20	durée d'une petite bougie (h)	4		
21	1 petite bougie à une mèche débite (g/s)	0,00076		
22	Nbr de bougies à une mèche nécessaires	4,13E+01		
23	Nbr de bougies made in INSA à 5 mèches nécessaires	8,26E+00		

Nous avons préparé une bougie « made in INSA » composée de **55 g** de paraffine et de 5 mèches avant de faire tous ces calculs. Nous avons donc voulu savoir combien de ces bougies seraient nécessaires. En divisant le débit de paraffine nécessaire pour faire voler le ballon par le débit d'une bougie « made in INSA » (équivalent à 5 petites bougies) nous avons obtenu le nombre de bougies nécessaires, soit environ **8** bougies.



Photo 1 : bougie made INSA

Sachant que l'enveloppe de notre ballon pèse à elle seule environ **500 g** et que ce ballon ne peut soulever qu'une masse de **1 kg** alors nous ne pourrions pas utiliser plus de **500 g** de paraffine à la fois. Puisque 8 bougies « made in INSA » ont un poids total de **420g** et qu'il ne faut pas oublier de prévoir un support pour les bougies, le poids total du brûleur dépasserait les **500 g** max. Nous avons donc décidé d'utiliser plutôt une petite bouteille de gaz assez légère pour pouvoir être soulevée par le ballon.



4. CONCEPTION

4.1. Définition de la forme

Après avoir fait une étude théorique préliminaire, nous nous sommes lancés dans la conception du ballon. (Voir partie « Étude théorique ») Tout d'abord il nous a fallu définir une forme. Plusieurs formes ont été proposées, parmi lesquelles : une sphère, une poire verticale, une poire horizontale. Au vue de l'avancement des techniques actuelles et de la qualité des matériaux de construction des ballons d'aujourd'hui, nous n'avons été restreints que par le volume de notre montgolfière. Donc, pour optimiser la force ascensionnelle ainsi que l'utilisation du matériel, nous nous sommes mis d'accord pour prendre la forme d'une poire verticale.

4.2. Choix du matériau

Dans un deuxième temps, il a fallu choisir le tissu de construction. Nous nous sommes basés sur 3 critères de base : le poids, la résistance à la température et l'étanchéité. Le matériel qui correspond à ces critères est le tissu skytex 40 composé essentiellement de fibres de nylon. (Voir partie « Expérimentation B »). Nous avons acheté ce tissu dans la société Opale Aéro System à Boulogne-sur-Mer, nous avons ainsi décidé de prendre 18m * 1.5m de tissu pour un prix de 106.2€



Photo 2 : Tissu Skytex 40

4.3. Réalisation des patrons

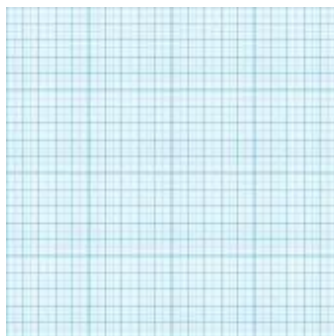


Photo 3 : Papier quadrillé

Comme nous avons voulu fabriquer une montgolfière assez grande, notre ballon devait être composé de 10 morceaux de même forme. Pour réaliser ces 10 fuseaux qui ont la forme d'une "baleine", il faut tout d'abord fabriquer un patron. Comme notre fuseau fait 3,16 mètres de long, nous l'avons construit en carton pour le rendre rigide. Sitôt dit, sitôt fait. Pour éviter les erreurs de courbure et faciliter la réalisation du patron nous avons collé du papier quadrillé (1cmx1 cm) sur le carton. Ensuite nous avons dessiné la forme de la "baleine". C'est simple si on s'applique un peu. Il suffit de savoir mesurer avec précision et tracer des perpendiculaires.

Quand tous les points ont été tracés, nous les avons reliés et coupés le carton. C'est à cette étape que nous avons pu nous rendre compte des dimensions réelles assez grandes de notre ballon.

4.4. Découpage du tissu

Grâce à l'étape précédente, nous avons pu enfin fabriquer les 10 morceaux de la montgolfière.

Il nous a suffi de reporter la forme du patron 2 fois sur la largeur de la bande de tissu (1,6m) et réaliser la découpe.





Photo 5 : Patron lors de la découpe



Photo 4 : Patron

Pour éviter que le matériau ne se déchire et pour qu'il n'y ait pas de fils de tissu qui se détachent, nous avons réalisé la découpe à l'aide d'un fer à souder. Nous l'avons fait glisser sur le tissu ni trop lentement car le tissu risquait de trop brûler, ni trop vite car il fallait un peu de temps pour faire fondre le matériau. De même, nous avons fait attention à ce qu'il n'y ait pas de trous.



Photo 6 : découpe au fer à souder



Photo 8 : Récupération d'un fuseau

Photo 7 : Récupération d'un fuseau

Une fois les fuseaux découpés, il était indispensable de les garder dans la même position, c'est-à-dire de mettre en correspondance le bas et le haut.

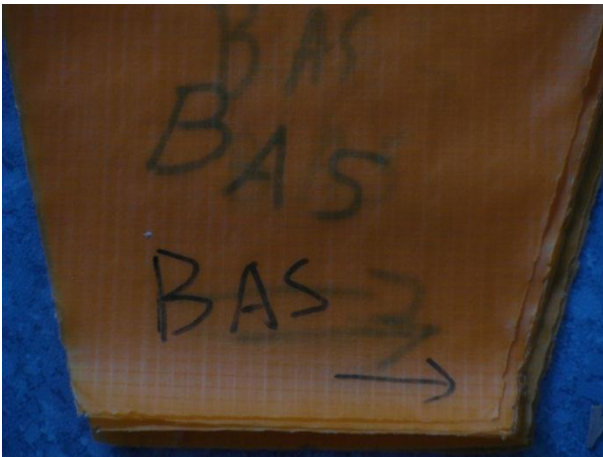


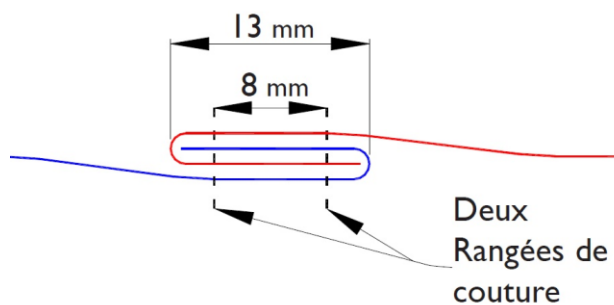
Photo 9 : Mise en correspondance des fuseaux



Photo 10 : Fuseaux superposés

4.5. Couture de l'enveloppe

La couture que nous avons choisie dans un premier temps pour notre enveloppe est connue sous le nom de "couture ballon" (couture à double rabat). Pour réaliser cette couture correctement, il est essentiel que les deux rabats du tissu soient cousus ensemble par les deux rangées de points.



Mais, pour notre ballon, qui n'est pas trop grand, nous nous sommes arrêtés à une simple couture en ligne droite. Cette couture a été réalisée par une machine à coudre avec des fils en coton. Nous devons signaler que la couture du ballon a été réalisée par Mme.Vuillamy assisté de son mari, car il disposait d'une machine à coudre. Pour l'intégralité du ballon il a fallu 2 heures de couture.



Photo 11 : Couture simple

Le haut de l'enveloppe a été cousu par un disque de 30 cm, tandis qu'en bas, nous avons gardé un trou de 40 cm de diamètre. En effet, c'est par là que la flamme va passer et amener de l'air chaud dans la montgolfière. La partie basse a été rigidifiée par 2 rangées de fils métalliques au-dessus desquelles nous avons passé une enveloppe en plastique, pour pouvoir ensuite accrocher la nacelle supportant le brûleur.





Photo 12 : Base



Photo 13 : Dôme

4.6. Construction du brûleur

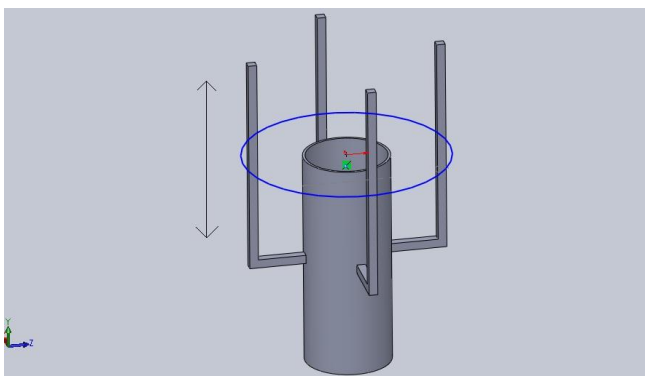
La construction d'un brûleur est délicate et requiert certaines connaissances et compétences que nous ne possédons pas tous. Mais dans notre cas, la solution proposée a été de réaliser un brûleur nous-mêmes. La première solution proposée qui s'est avérée inefficace a été de mettre plusieurs bougies ensemble. Nous avons donc fait fondre de la cire que nous avons ensuite mis dans une forme pré-coupée de canette contenant plusieurs mèches dedans. Finalement cette solution a été refusée et remplacée par une petite bouteille à gaz (voir...partie « Théorique »).



Photo 14 : Construction des bougies

4.7. Structure de décollage

Pour faciliter le décollage et éviter de brûler le tissu, nous avons décidé de construire la structure suivante:



Modélisation 1 : Structure de décollage sous SolidWorks



Structure de décollage

Elle permet de transmettre la chaleur directement dans la montgolfière sans avoir de pertes par les côtés. Les 4 barres viennent centrer le bas du ballon et assurent un glissement permettant au ballon de s'envoler.



5. EXPERIMENTATION

5.1. Prototype

5.1.1. Création

Avant la construction du véritable ballon, nous avons opté pour la création d'un prototype de taille réduite. La création de ce prototype nous a permis de rencontrer les difficultés de construction et nous également entraîné à l'utilisation des outils de constructions que sont le logiciel, le patron ...

Pour la construction de ce prototype nous avons choisi un tissu « classique » trouvé dans le commerce et qui n'est absolument pas prévu pour la construction d'un ballon. De plus, il faut noter que la colle utilisée pour l'assemblage des fuseaux est une colle spéciale pour tissu.

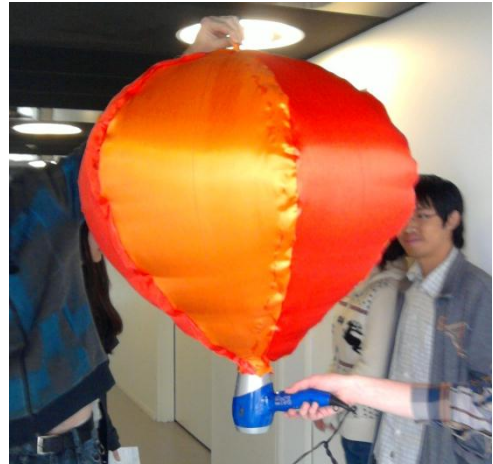


Photo 15 : Prototype gonflé

5.1.2. Caractéristiques techniques

Pour notre prototype nous avons utilisé les mêmes feuilles de calcul que pour le véritable ballon présenté auparavant (*voir partie « Théorie » et « Conception »*). Ainsi les fuseaux réalisés pour le prototype sont proportionnels aux fuseaux réels, la forme est donc également identique.

Les différences notables entre la construction du ballon et du prototype résident au niveau de la découpe effectuée à l'aide de ciseaux, de l'assemblage des fuseaux par collage et de l'absence de dôme dans le prototype.

5.1.3. Observations

Grâce au prototype nous avons pu effectuer quelques observations qui nous ont permis d'éviter quelques erreurs lors de la construction du véritable ballon.

Tout d'abord nous avons observé directement que la chaleur, même peu élevée du sèche-cheveux, s'échappait très rapidement après l'arrêt de celui-ci. Nous avons pu remarquer que la chaleur était dissipée essentiellement par le tissu en lui-même, en effet il n'est pas conçu pour garder le gaz qu'il contient.

Nous avons également pu observer que l'utilisation de colle alourdissait de façon conséquente le ballon. De plus, la construction par collage s'est révélée assez compliquée, en effet nous étions obligés d'être 3 pour coller deux fuseaux. Nous avons donc décidé de coudre le ballon final et de n'utiliser la colle que pour de petits détails de finition.



5.2. Ballon 4m³

Après la création du ballon de 4m³ (*voir partie « Conception »*) nous avons entamé les phases de test. Certains tests qui ont été réalisés, sont devenus parfois inutile car nous avons quelques fois changé de solution pour résoudre un problème (ex : test sur la colle). Nous allons tout de même vous les présenter.

5.2.1. Test tissu

Avant d'effectuer des tests sur le ballon, nous avons décidé de tester le tissu utilisé pour sa conception et ainsi utiliser les résultats pour perfectionner la construction du ballon. Ce tissu spécialisé pour la construction de parapente est le Skytex 40g/m² vendu par la société Porcher. Il est constitué de nylon.



Photo 16 : Test zone d'embrasement (annexe5)

5.2.1.1 Test de solidité du tissu

Pour commencer nous avons souhaité réaliser un test de résistance au déchirement du tissu. Les résultats de ce test ne seront pas utilisés, en effet nous avons choisi ce tissu qui est également utilisé pour les voiles de parapentes. Ainsi nous savons que dans notre cas les forces qui vont s'exercer sur le ballon seront nettement inférieures à celles appliquées pour un vol en parapente.

Le test que nous avons prévu de réaliser consistait à suspendre sur une bande de tissu de dimensions connues des masses jusqu'au déchirement du tissu (*voir annexe 4*). Ce test n'a pas été réalisé car nous avons eu la possibilité de faire tester la résistance du tissu grâce aux machines utilisées dans le département mécanique.

5.2.1.2. Zone d'embrasement

Dans cette expérience nous avons voulu connaître la distance à laquelle le ballon risquait de prendre feu à l'approche d'une flamme de bougie. Ce test nous a permis de décider de la distance où installer la bougie (système prévu initialement) et savoir si un système de protection en aluminium était nécessaire.

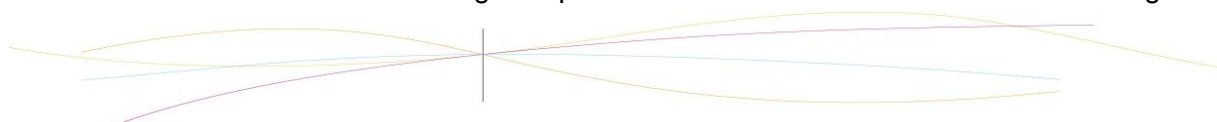
Comme on peut le lire dans la feuille d'expérience (*voir annexe 5*), le risque que le tissu prenne feu est très faible si le tissu n'approche pas trop de la flamme (une dizaine de centimètre) et surtout si le tissu ne se retrouve pas directement au-dessus de la flamme de la bougie. Ces conditions sont remplies si la bougie est placée au centre de la base du ballon qui est un cercle de rayon d'une quinzaine de centimètre.

Ainsi le risque d'embrasement du tissu nécessite d'être vigilant mais ne constitue pas un problème important et ne nécessite pas de protection particulière.

5.2.1.3. Test de résistance à la chaleur du tissu

Ce test a pour but de mesurer la température à laquelle le tissu s'enflamme et ainsi connaître la limite maximale de chauffage du ballon.

Nous avons projeté plusieurs expériences possibles pour la mesure de la valeur de température, dans un premier temps en utilisant un banc de chauffage utilisé en chimie, malheureusement le banc serait dégradé par la fonte du tissu. Nous avons donc été guidé



vers une expérience plus « traditionnelle » utilisée en chimie pour la métallurgie. On chauffe un morceau de tissu dans un récipient en céramique fermé par un couvercle et muni d'un thermomètre, on enregistre ensuite les variations de température jusqu'à un saut de température caractéristique de l'embrasement du tissu. Malheureusement, cette expérience est très compliquée à mettre en œuvre et nécessite l'utilisation des laboratoires de chimie. C'est pourquoi nous avons cherché une expérience plus facile à réaliser.

Finalement nous avons pensé à un moyen plus simple pour tester la résistance : introduire le tissu dans un four préchauffé à la température voulue (*voir annexe 6*). Cette expérience correspond à un état proche du fonctionnement réel avec une température quasiment uniforme. Malgré tout, la précision de la température est limitée, le thermostat du four n'étant pas d'une précision élevée. Les résultats vont donner un ordre d'idée du véritable résultat.

Ainsi ce test nous a permis de voir que le Skytex 40 ne fond qu'à une température comprise entre 200 et 215°C.

La température que nous avons prévu d'obtenir à l'intérieur du ballon ne dépassera jamais les 150°C au maximum, ainsi le tissu convient parfaitement et ne risque pas de fondre lors des essais de vol.

5.2.2. **Test de la colle « scotch »**

Pour la mise en place du dôme en haut du ballon nous nous sommes demandé si nous pouvions utiliser de la colle « scotch ». Avant son utilisation nous avons décidé de tester sa résistance à la chaleur pour éviter toute surprise lors des essais de vols. Nous avons donc procédé au même test que pour la zone d'embrasement (*voir annexe 7*) en remplaçant le tissu par une plaque d'aluminium enduite de colle.

Ainsi, nous avons pu observer qu'à une température élevée et lorsque la colle est très proche de la flamme, la colle s'enflamme violemment. Nous avons donc finalement décidé de ne pas utiliser cette colle qui nous a semblé trop risquée, et c'est pourquoi nous avons préféré coudre le dôme.

5.2.3. **Test du bruleur**

Pour entretenir notre ballon nous avons dans un premier temps prévu d'utiliser des bougies en paraffine. Nous avons donc fabriqué des bougies à 9 mèches. Nous avons réalisé un test de ces bougies avant de les installer dans le ballon.

Nous avons rapidement remarqué que les flammes étaient trop hautes et surtout très instables. De plus, au bout de quelques instants, quand la paraffine a fondu, les mèches installées dans les canettes tombent dans la paraffine liquide. Nous avons donc abandonné l'idée de l'utilisation des bougies pour entretenir la chaleur au sein du ballon.



Photo 17 : Test d'une bougie



5.2.4. Test de vol n°1

Nous avons ensuite commencé les tests sur le ballon. Le premier test est évidemment le test de vol (voir annexe 8) c'est-à-dire savoir si le ballon est capable de soulever son propre poids.

Nous avons donc testé dans le hall (lieu sans vent) le gonflage du ballon. Dans un premier temps nous avons dû gonfler le ballon grâce à un camping gaz pour insuffler de l'air déjà suffisamment chaud pour espérer soulever le ballon. Par la suite nous aurions voulu installer un système de bougie (4 bougies de 9 mèches) pour entretenir la chaleur à l'intérieur du ballon. Malheureusement il nous a rapidement semblé que ce système ne serait véritablement pas suffisant pour entretenir la chaleur et il est également trop instable (voir « Test du bruleur »).

Nous avons donc décidé de partir sur un système permettant de supporter le ballon pendant le gonflage et un système pour gonfler avec le « campingaz » (voir « Conception / Structure de décollage »).



Photo 18 : Test de vol1

5.2.5. Test de vol n°2

En tenant compte des observations que nous avons pu faire lors du premier test de vol, nous avons effectué un deuxième test de vol (voir annexe 9). Ce deuxième essai a vu le décollage du premier ballon à air chaud de l'INSA de Rouen.

5.2.6. Test étanchéité

Un test important que nous avons effectué est le test de l'étanchéité du ballon à l'air (voir annexe 10). Pour cela, nous avons utilisé une machine à fumée utilisée pendant les concerts. Une fois le ballon gonflé, nous avons introduit la fumée à l'intérieur du ballon. Nous avons ensuite observé que pour une pression d'utilisation normale aucune fumée ne s'échappait du ballon. Par ailleurs, pour une pression plus élevée, nous avons observé quelques fuites de fumée à travers les coutures.

Ainsi le ballon peut être considéré, dans notre cas et pour notre utilisation, comme étant suffisamment étanche.

5.2.7. Test capacité ascensionnelle

Après le test de vol, nous avons voulu mesurer la capacité ascensionnelle du ballon et ainsi pouvoir la comparer avec la valeur théorique calculée auparavant.

Pour cela, nous avons pensé utiliser une chaîne que nous aurions suspendue au ballon. A partir du moment où l'ascension du ballon est stoppée, nous notons le dernier maillon de la chaîne soulevé. Au repos, nous n'aurions plus qu'à peser et calculer la masse qui a été soulevée et donc la force ascensionnelle du ballon (test qui n'a pas été réalisé).

5.2.8. Mesure de la température

Nous n'avons trouvé aucun moyen simple pour mesurer et contrôler la température à l'intérieur même du ballon. Il est évident que pour effectuer d'autres expériences, la connaissance de la température à l'intérieur du ballon est un point crucial.



CONCLUSION

Le but de ce projet était d'étudier le fonctionnement des aérostats mais nous avons plus particulièrement choisi de nous intéresser aux ballons à air chaud. Au final, nous avons pour objectifs de concevoir et de réaliser notre propre ballon. Après avoir étudié les différentes caractéristiques des ballons à air chaud, nous avons déterminé le volume nécessaire pour que notre ballon puisse voler tout en transportant avec lui une masse de 1 kg et la chaleur nécessaire à apporter à celui-ci pour le maintenir en l'air. Il s'agissait ainsi d'un projet assez complet puisqu'il nous a fallu procéder à des études théoriques avant de pouvoir concevoir notre ballon.

De plus, concernant les objectifs que nous nous étions fixés, à savoir étudier, construire et tester un ballon à air chaud, nous pouvons dire que nous avons réussi à tous les atteindre dans le temps imparti. Le décollage du ballon lors des derniers tests représente le mieux l'atteinte de nos objectifs. Nous sommes vraiment heureux et satisfait d'avoir réussi à faire décoller notre ballon au terme de notre projet.

Par ailleurs, ce projet nous aura permis d'en apprendre d'avantages sur le fonctionnement des ballons à air chaud et sur leur conception. Nous avons également pu, par le biais de ce projet, obtenir un aperçu de ce que représentait le travail d'un ingénieur. En effet, nous avons pu suivre un projet dans son ensemble depuis sa création jusqu'à sa réalisation. Pour finir, notre groupe étant constitué de membres provenant de pays différents (Chine, Moldavie, France), ce projet nous a enseigné une ouverture d'esprit nécessaire à tout ingénieur voulant travailler à l'international.

En conclusion, nous pouvons également ajouter qu'avec un peu plus de temps, nous aurions pu procéder à des améliorations sur notre ballon comme par exemple y ajouter un système permettant de le manœuvrer par le biais d'une télécommande ou bien encore installer une nacelle contenant une caméra permettant d'obtenir une vidéo de vol de notre ballon.



6. BIBLIOGRAPHIE

Livres :

- "Articles on Aerostats, Including: Airship, Aerostat, Cloud Nine (Tensegrity Sphere), Lifting Gas, Integrated Sensor Is Structure", *Hephaestus Books*, 2011
- Montgolfière France Records, Le Bulletin de la Construction Amateur d'Aérostats Française, volume 2, mars 1998

Liens internet :

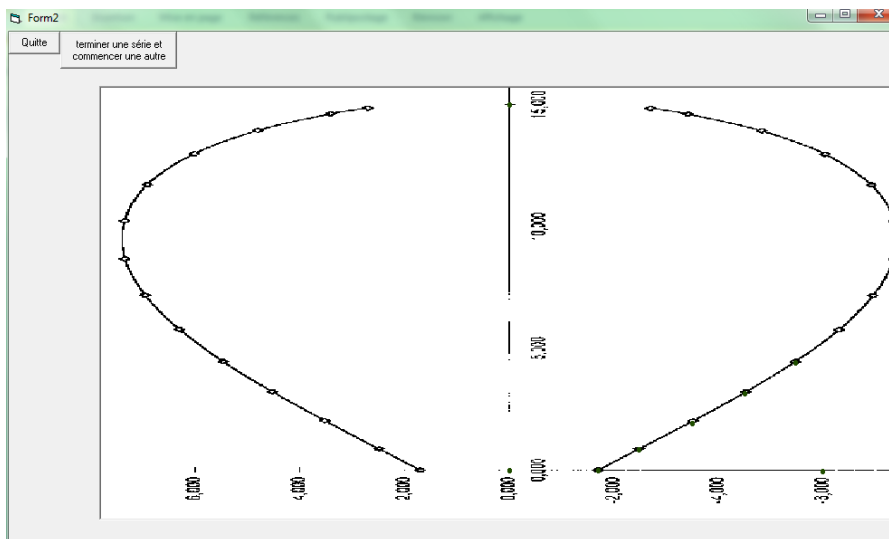
- <http://www.ffaerostation.org/> (valide à la date du 14/06/2012)
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Aérostat> (valide à la date du 14/06/2012)
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Poussée_d'Archimède (valide à la date du 14/06/2012)
- <http://www.ballons-montgolfier.com/montgolfiere-rc> (valide à la date du 14/06/2012)
- <http://www.gliderengineering.com/laboratoridenvol/info/tech/Ripstop/fabric.en.html> (valide à la date du 14/06/2012)
- <http://jballonrc.free.fr/montgolfiere.PDF> (valide à la date du 14/06/2012)



7. ANNEXES

7.1. Annexe 1. Méthode de calcul du rayon du ballon en fonction de la hauteur

Dans un premier temps, le logiciel demande de choisir le fichier dans lequel seront collectés les résultats. Dans un deuxième temps, le logiciel demande de choisir le fichier où se trouve la courbe à analyser puis de choisir le type d'échelle voulu (choisir linéaire pour les axes x et y). Il nous est ensuite demandé de pointer l'origine géométrique des axes x et y sur la courbe puis de pointer l'extrémité de l'axe x et enfin celle de l'axe y (une fenêtre s'ouvre pour nous demander les valeurs de chacun de ces points). Il ne reste ensuite qu'à pointer autant de points que l'on veut sur l'image de références :



Une fois tous les points voulus pointés, le logiciel enregistre pour chaque point la valeur x du pixel pointé, sa valeur y, la valeur x du point sur la courbe et sa valeur y :



```
lol - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
|"Origine"
"x en pixel","y en pixel","x valeur vraie","y valeur vraie"
8295,7260,0,0
"Extrémité x"
"x pixel","y pixel","valeur vraie de fin de x"
13485,7275,3
"Extrémité y"
"x en pixel","y en pixel","valeur vraie de fin de y"
8295,1200,15
"ax,bx,ay,by :","0,0,0,0
"série 1"
"x pixel","y pixel","x vraie","y vraie"
9765,7260,0.849710982658959,0
10440,6915,1.23988439306358,0.869305499914153
11325,6480,1.7514450867052,1.95236936988497
12195,5985,2.25433526011561,3.18384078292222
13035,5475,2.73988439306358,4.45222629199336
```

Vient ensuite le moment d'utiliser le module sur Excel. Ce module permet de calculer informatiquement les coefficients de plusieurs polynômes de degrés différents se rapprochant le plus possible de la courbe recherchée. Ce module présente 4 feuilles : une feuille où copier les valeurs x et y obtenues à l'aide du logiciel précédent, une feuille où apparaissent les coefficients de polynômes de degrés 1, 2, 3, 4 et 5, une feuille où copier les valeurs des coefficients du polynôme choisis et une dernière feuille permettant de visualiser la courbe du polynôme choisi afin de vérifier que celui-ci forme une courbe se rapprochant bien de notre profil de ballon.

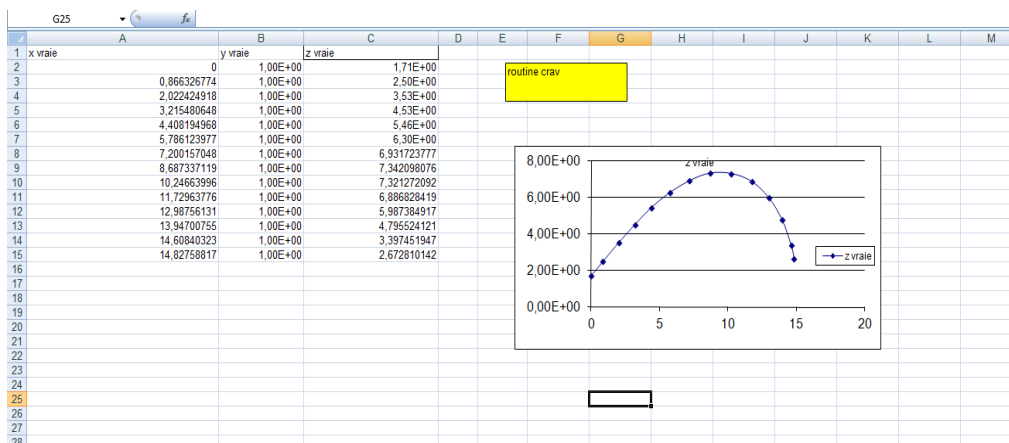


Tableau 1 : 1^{ère} feuille



H8				fx				fx				
1	resultats pour			resultats pour			resultats pour			resultats pour		
2	degres polynome			degres polynome			degres polynome			degres polynome		
3	coeff	1		coeff	1		coeff	1		coeff	1	
4	rx	0		rx	0		rx	0		rx	0	
5	ry	0		ry	0		ry	0		ry	0	
6	MATRICE C(1,J) POUR K1, MX, NY			MATRICE C(1,J) POUR K1, MX, NY			MATRICE C(1,J) POUR K1, MX, NY			MATRICE C(1,J) POUR K1, MX, NY		
7	kt	1		kt	1		kt	1		kt	1	
8	KX	0		KX	0		KX	0		KX	0	
9	KY	0		KY	0		KY	0		KY	0	
10	coeff 1	4,9532328		coeff 1	1,1441974		coeff 1	1,829303682		coeff 1	1,829303682	
11	VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I), xmm	-1,26883E-18		coeff 2	4,58897958		coeff 2	1,151025408		coeff 2	1,151025408	
12	VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I)^2, xmm	3,465373245		coeff 3	-8,89291258		coeff 3	-8,009666884		coeff 3	-8,009666884	
13	POINT LE + ECARTS ECART X1			coeff 4	-8,97854E-16		coeff 4	0,008364578		coeff 4	0,008364578	
14	POINT LE + ECARTS ECART Y1			coeff 5	0,219889885		coeff 5	-8,000556888		coeff 5	-8,000556888	
15	POINT LE + ECARTS ECART Z3MX	3,246646464		VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I)^2, xvar	0,219889885		VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I), xmm	-2,41076E-15		VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I)^2, xvar	0,011695941	
16				POINT LE + ECARTS ECART Y1	14,62758817		VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I)^2, xvar	0,011695941		POINT LE + ECARTS ECART Y1	13,84700755	
17				POINT LE + ECARTS ECART Z3MX	0,876847916		POINT LE + ECARTS ECART Y1	1		POINT LE + ECARTS ECART Z3MX	0,219118546	
18	resultats pour			resultats pour			resultats pour			resultats pour		
19	degres polynome	4		degres polynome	4		degres polynome	4		degres polynome	4	
20	coeff	1		coeff	1		coeff	1		coeff	1	
21	rx	0		rx	0		rx	0		rx	0	
22	ry	0		ry	0		ry	0		ry	0	
23	MATRICE C(1,J) POUR K1, MX, NY			MATRICE C(1,J) POUR K1, MX, NY			MATRICE C(1,J) POUR K1, MX, NY			MATRICE C(1,J) POUR K1, MX, NY		
24	kt	1		kt	1		kt	1		kt	1	
25	KX	0		KX	0		KX	0		KX	0	
26	KY	0		KY	0		KY	0		KY	0	
27	coeff 1	4,07585918		coeff 1	1,830556058		coeff 1	1,830556058		coeff 1	1,830556058	
28	coeff 2	8,11846888		coeff 2	0,730086226		coeff 2	0,730086226		coeff 2	0,730086226	
29	VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I), xmm	4,44088E-18		coeff 3	0,040891689		coeff 3	0,040891689		coeff 3	0,040891689	
30	VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I)^2, xvar	3,148953248		coeff 4	-0,005708118		coeff 4	-0,005708118		coeff 4	-0,005708118	
31	POINT LE + ECARTS ECART X1			VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I)^2, xvar	0,031483359		VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I), xmm	4,5995E-16		VALEURS MOYENNES DES ECARTS EX(I)^2, xvar	0,031483359	
32	POINT LE + ECARTS ECART Y1			POINT LE + ECARTS ECART X1	14,62758817		POINT LE + ECARTS ECART Y1	1		POINT LE + ECARTS ECART Y1	1	
33	POINT LE + ECARTS ECART Z3MX	3,051348172		POINT LE + ECARTS ECART Z3MX	0,365298155		POINT LE + ECARTS ECART Z3MX	0,365298155		POINT LE + ECARTS ECART Z3MX	0,365298155	
34												
35												
36												
37												
38												
39												

Tableau 2 : 2^{ème} feuille

C12						
	A	B	C	D	E	F
1	Coeff 1	1,830556058				
2	Coeff 2	0,730086226				
3	Coeff 3	0,040891689				
4	Coeff 4	-0,005708118				
5						
6						
7						

routine appli correl

Tableau 3 : 3^{ème} feuille

D9														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	x vraie	y vraie	z vraie	modele	écart									
2	0		1,70687713	1,83055606	0,12367893									
3	0,86632677		2,49800844	2,49002802	-0,00798043									
4	2,02242492		3,52983351	3,42713765	-0,10269586									
5	3,21548065		4,52709085	4,41115493	-0,11593592									
6	4,40819497		5,45538346	5,35457103	-0,10081243									
7	5,78612398		6,29704339	6,31819982	0,02115643									
8	7,20015705		6,93172378	7,07652617	0,1448024									
9	8,68733712		7,34209808	7,51672616	0,17462808									
10	10,24664		7,32127209	7,46387816	0,14260607									
11	11,7296378		6,88682842	6,80841421	-0,07841421									
12	12,9875613		5,98738492	5,70530117	-0,28208375									
13	13,9470075		4,79552412	4,4814	-0,31412412									
14	14,6084032		3,39745195	3,42732861	0,02987666									
15	14,8275882		2,67281014	3,0381083	0,36529815									
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24														

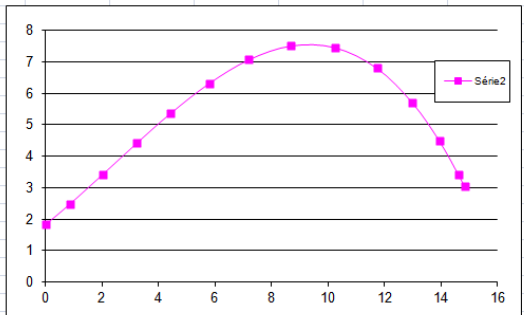


Tableau 4 : 4^{ème} feuille



7.2. Annexe 2. Programmation des fonctions sous Excel

Pour faciliter nos calculs de la force T_m dans le tissu en fonction de la hauteur, nous avons utilisé des fonctions programmées sous Excel. Voici les fonctions et les résultats sous forme de tableur :

```

Microsoft Visual Basic - Tm poire et sphère.xls - [Module1 (Code)]
Fichier  Edition  Affichage  Insertion  Format  Débogage  Exécution  Outils  Compléments  Fenêtre  ?
Li1, Col1

(Général)
Option Explicit

Function r_f(p1) As Double
Dim a As Double, B As Double, C As Double, D As Double
a = 1.830556058
B = 0.730086226
C = 0.040891689
D = -0.005708118
r_f = a + B * p1 + C * p1 * p1 + D * p1 * p1 * p1
End Function

' *****
Function I_f(n, xmin, xmax) As Double
Dim s As Double, i As Integer, dx As Double, xi As Double
Dim xipl As Double, yi As Double, yipl As Double
s = 0#
For i = 1 To (n - 1)
dx = (xmax - xmin) / (n - 1)
xi = xmin + (i - 1) * dx
xipl = xi + dx
yipl = p_f(xipl)
yi = p_f(xi)
s = s + (xipl - xi) * (yipl + yi) / 2
Next i
I_f = s
End Function

' *****
Function p_f(z) As Double
p_f = z * r_f(z) * dr_f(z)
End Function

' *****
Function dr_f(p1) As Double
Dim B As Double, C As Double, D As Double
B = 0.730086226
C = 0.040891689
D = -0.005708118
dr_f = B + 2 * C * p1 + 3 * D * p1 * p1
End Function

' *****
Function Tm_f(z, n, xmax) As Double
Tm_f = -16.03 * I_f(n, z, xmax) / (2 * (3.14) * r_f(z) * Sin(Atn(1 / dr_f(z))))
End Function
    
```

Figure 2 : Fonctions Excel




```

Microsoft Visual Basic - Tm poire et sphère.xls - [Module1 (Code)]
Fichier  Edition  Affichage  Insertion  Format  Débogage  Exécution  Outils  Compléments  Fenêtre  ?
Li 57, Col 49

(Général)

Function r_f2(p1) As Double
Dim a As Double, B As Double, C As Double, D As Double, E As Double

a = 1.826875091
B = 2.47978771
C = -0.453695435
D = 0.039877969
E = -0.001431809
r_f2 = a + B * p1 + C * p1 * p1 + D * p1 * p1 * p1 + E * p1 * p1 * p1 * p1

End Function
' *****

Function I_f2(n, xmin, xmax) As Double
Dim s As Double, i As Integer, dx As Double, xi As Double
Dim xip1 As Double, yi As Double, yip1 As Double
s = 0#
For i = 1 To (n - 1)
dx = (xmax - xmin) / (n - 1)
xi = xmin + (i - 1) * dx
xip1 = xi + dx
yip1 = p_f2(xip1)
yi = p_f2(xi)
s = s + (xip1 - xi) * (yip1 + yi) / 2
Next i
I_f2 = s
End Function
' *****

Function p_f2(z) As Double
p_f2 = z * r_f2(z) * dr_f2(z)
End Function
' *****

Function dr_f2(p1) As Double
Dim B As Double, C As Double, D As Double, E As Double
B = 2.47978771
C = -0.453695435
D = 0.039877969
E = -0.001431809
dr_f2 = B + 2 * C * p1 + 3 * D * p1 * p1 + 4 * E * p1 * p1 * p1
End Function
' *****

Function Tm_f2(z, n, xmax) As Double
Tm_f2 = -16.03 * I_f2(n, z, xmax) / (2 * (3.14) * r_f2(z) * Sin(Atn(1 / dr_f2(z))))
End Function

```

Figure 3 : Fonctions Excel (suite)



Y34		fx							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2		Résultats pour le ballon en Poire				Résultats pour le ballon sphérique			
3									
4		z	r_f(z)	Tm_f(z)		z'	r_f2(z)	Tm_f2(z)	
5		0	1,8305561	398,6793044		0	1,8268751	852,4561536	
6		0,5	2,2051086	337,2492386		0,5	2,9582403	451,6318997	
7		1	2,5958259	291,4194599		1	3,8914135	297,6596089	
8		1,5	2,9984268	256,3517425		1,5	4,6530815	219,0285241	
9		2	3,4086303	229,0313336		2	5,2677836	173,3465789	
10		2,5	3,8221553	207,4759572		2,5	5,7579111	145,111386	
11		3	4,2347208	190,3168185		3	6,1437079	127,2716341	
12		3,5	4,6420455	176,5647638		3,5	6,4432701	116,0581227	
13		4	5,0398484	165,4748452		4	6,6725459	109,1756832	
14		4,5	5,4238485	156,4663074		4,5	6,845336	105,1039608	
15		5	5,7897647	149,075528		5	6,9732933	102,8063782	
16		5,5	6,1333158	142,9296214		5,5	7,065923	101,5851528	
17		6	6,4502207	137,7336644		6	7,1305825	100,9864628	
18		6,5	6,7361985	133,2672221		6,5	7,1724818	100,7278183	
19		7	6,9869679	129,3870708		7	7,1946827	100,6428069	
20		7,5	7,198248	126,033131		7,5	7,1980997	100,6435822	
21		8	7,3657575	123,2336977		8	7,1814994	100,7014344	
22		8,5	7,4852155	121,1041489		8,5	7,1415007	100,8443849	
23		9	7,5523409	119,8310582		9	7,0725748	101,1677331	
24		9,5	7,5628525	119,6329874		9,5	6,9670452	101,8469184	
25		10	7,5124692	120,6935324		10	6,8150877	103,1299016	
26		10,5	7,39691	123,0733476		10,5	6,6047303	105,2700808	
27		11	7,2118939	126,6210543		11	6,3218534	108,351776	
28		11,5	6,9531396	130,9063029		11,5	5,9501897	111,9761613	
29		12	6,6163661	135,1849118		12	5,471324	114,8091672	
30		12,5	6,1972923	138,3847933		12,5	4,8646935	113,9756594	
31		13	5,6916372	139,0865331		13	4,1075878	104,0814028	
32		13,5	5,0951196	135,4637338		13,5	3,1751487	74,78405116	
33		14	4,4034585	125,1218721		14	2,0403702	0	
34		14,5	3,6123727	104,6559666					
35		15	2,7175812	68,17410542					
36		15,5	1,7148029	0					
37									

Figure 4 : Résultats exprimant Tm en fonction de z

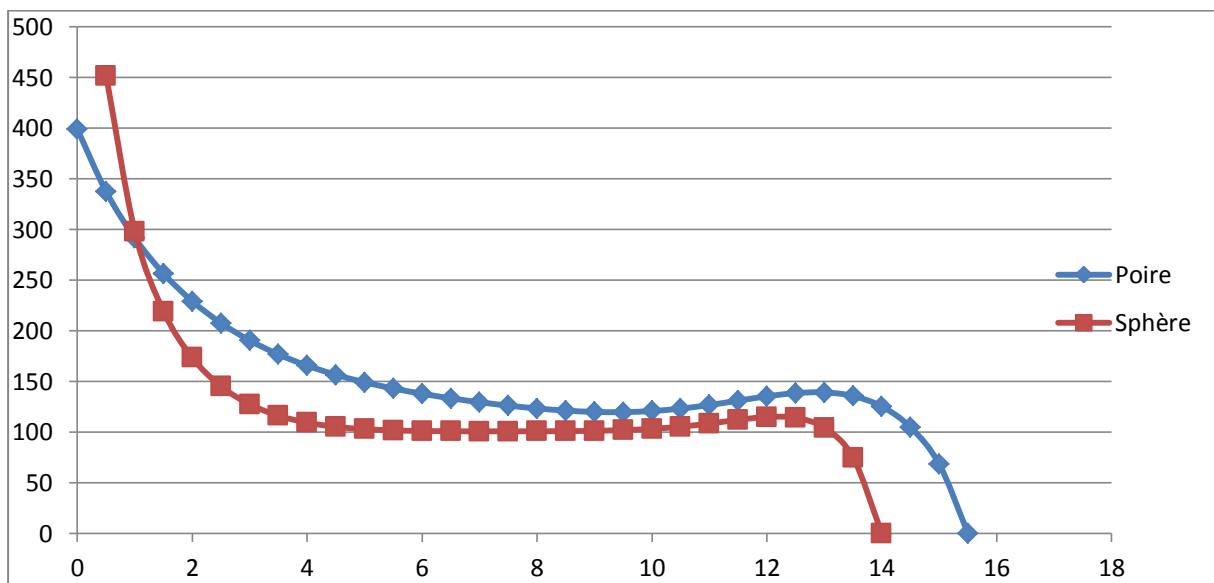


Figure 5 : graphique représentant Tm(z) pour chaque ballon



7.3. Annexe 3. Feuille de résultat sur l'étude du patron.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Calcul des fuseaux (2 demis fuseaux = 1 fuseau)							
2								
3	Volume		4 mètres cubes					
4	Marges coutures		0,016 mètres			Longueur d'un fuseau 3,167554442 mètres		
5	Nb de fuseaux		10 fuseaux					
6								
7	s	r	Longueur fuseau	Rayon	Diamètre	Périmètre	Demi fuseau cousu	Demi fuseau brut
8	%	%	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres
9								
10	1,00	0,00000	3,168	0,000	0,000		0,000	0,032
11	0,98	0,02000	3,104	0,063	0,127		0,398	0,052
12	0,96	0,04000	3,041	0,127	0,253		0,796	0,072
13	0,94	0,05999	2,978	0,190	0,380		1,194	0,092
14	0,92	0,07997	2,914	0,253	0,507		1,592	0,112
15	0,90	0,09989	2,851	0,316	0,633		1,988	0,131
16	0,88	0,11974	2,787	0,379	0,759		2,383	0,151
17	0,86	0,13944	2,724	0,442	0,883		2,775	0,171
18	0,84	0,15891	2,661	0,503	1,007		3,163	0,190
19	0,82	0,17805	2,597	0,564	1,128		3,544	0,209
20	0,80	0,19673	2,534	0,623	1,246		3,915	0,228
21	0,78	0,21480	2,471	0,680	1,361		4,275	0,246
22	0,76	0,23210	2,407	0,735	1,470		4,619	0,263
23	0,74	0,24844	2,344	0,787	1,574		4,945	0,279
24	0,72	0,26364	2,281	0,835	1,670		5,247	0,294
25	0,70	0,27751	2,217	0,879	1,758		5,523	0,308
26	0,68	0,28989	2,154	0,918	1,836		5,769	0,320
27	0,66	0,30064	2,091	0,952	1,905		5,983	0,331
28	0,64	0,30962	2,027	0,981	1,961		6,162	0,340
29	0,62	0,31677	1,964	1,003	2,007		6,304	0,347
30	0,60	0,32203	1,901	1,020	2,040		6,409	0,352
31	0,58	0,32540	1,837	1,031	2,061		6,476	0,356
32	0,56	0,32691	1,774	1,036	2,071		6,506	0,357
33	0,54	0,32662	1,710	1,035	2,069		6,500	0,357
34	0,52	0,32461	1,647	1,028	2,056		6,460	0,355
35	0,50	0,32100	1,584	1,017	2,034		6,389	0,351
36	0,48	0,31591	1,520	1,001	2,001		6,287	0,346
37	0,46	0,30945	1,457	0,980	1,960		6,159	0,340
38	0,44	0,30175	1,394	0,956	1,912		6,006	0,332
39	0,42	0,29295	1,330	0,928	1,856		5,830	0,324
40	0,40	0,28316	1,267	0,897	1,794		5,636	0,314
41	0,38	0,27251	1,204	0,863	1,726		5,424	0,303
42	0,36	0,26109	1,140	0,827	1,654		5,196	0,292
43	0,34	0,24900	1,077	0,789	1,577		4,956	0,280
44	0,32	0,23633	1,014	0,749	1,497		4,704	0,267
45	0,30	0,22317	0,950	0,707	1,414		4,442	0,254
46	0,28	0,20959	0,887	0,664	1,328		4,171	0,241
47	0,26	0,19564	0,824	0,620	1,239		3,894	0,227
48	0,24	0,18139	0,760	0,575	1,149		3,610	0,213
49	0,22	0,16689	0,697	0,529	1,057		3,321	0,198
50	0,20	0,15218	0,634	0,482	0,964		3,029	0,183
51	0,18	0,13730	0,570	0,435	0,870		2,733	0,169
52	0,16	0,12228	0,507	0,387	0,775		2,434	0,154
53	0,14	0,10716	0,443	0,339	0,679		2,133	0,139
54	0,12	0,09195	0,380	0,291	0,583		1,830	0,124
55	0,10	0,07669	0,317	0,243	0,486		1,526	0,108
56	0,08	0,06138	0,253	0,194	0,389		1,222	0,093
57	0,06	0,04605	0,190	0,146	0,292		0,917	0,078
58	0,04	0,03071	0,127	0,097	0,195		0,611	0,063
59	0,02	0,01535	0,063	0,049	0,097		0,306	0,047
60	0,00	0,00000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,032

Tableau 5 : Feuille de résultat étude du patron



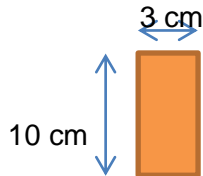
7.4. Annexe 4. Fiche expérimentale : Test de solidité

Objectif : connaître la résistance au déchirement du tissu à une contrainte physique. (Expérience non réalisée).

Matériel : tissu (chute), 2 tiges en métal, masses.

Procédé :

- Couper le tissu aux dimensions voulues



- Coudre une tige de métal de part et d'autre du tissu.



- Bloquer une des tiges.
- Ajouter des masses sur la tige inférieure.
- Rajouter des masses de 5 kg jusqu'à l'observation d'un changement sur le tissu.

Résultats :

Noter l'étirement observé au fur et à mesure de l'expérience

Masse (kg)											
Etirement (cm)											

Masse à partir de laquelle le tissu se déchire :kg



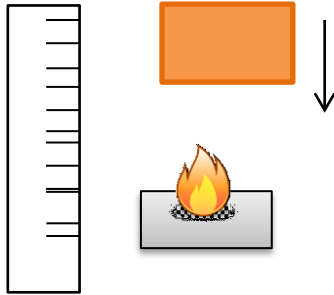
7.5. Annexe 5. Fiche expérimentale : Test de résistance à la chaleur

Objectif : connaître la distance à laquelle le tissu commence à se transformer (fondre, s'enflammer,...) à cause de la flamme d'une bougie.

Matériel : tissu (chute), bougie, règle.

Procédé :

- Descendre le morceau de tissu progressivement au-dessus de la flamme.



Résultats :

Tout d'abord nous avons remarqué que le tissu commence dans un premier temps à fondre puis ensuite s'enflamme.

A partir de 10 cm au-dessus de la base de la flamme, le tissu commence à fondre. Soit à 8cm au-dessus du haut de la flamme.

A partir de 3 cm au-dessus de la base de la flamme, le tissu s'enflamme. Pour s'enflammer le tissu doit donc être quasiment en contact avec le haut de la flamme.

Par ailleurs, l'expérience a été réalisée en rapprochant le tissu directement au-dessus de la flamme, en réalité le tissu sera décalé. On peut donc penser qu'il n'y aura quasiment aucun risque si le tissu ne se retrouve jamais au-dessus de la flamme.



7.6. Annexe 6. Fiche expérimentale : Test de résistance à la chaleur du tissu

Objectif : connaître la résistance à la chaleur du tissu. Ce qui correspond à la température de fonte du tissu dans notre cas.

Matériel : tissu skytex 40 (chute), aluminium, four électrique traditionnel (4 résistances).

Procédé :

- Préchauffer le four à la température voulue.
- Introduire le tissu dans le four sur du papier aluminium pour éviter d'abimer les plaques si le tissu fond.



Photo 1 : Four traditionnel



Photo 2 : Bouton réglage température

Résultats :

On veut noter la température à laquelle on observe un changement d'état du tissu (fonte).

Le premier test de température est effectué à 100°C, à cette température on remarque une légère déformation du tissu (les bords se replient, voir photo3). On peut penser que cela est dû à la petite taille du tissu.

Ensuite, on augmente petit à petit la température (120°C, 135°C, 150°C, 165°C, 180°C, 190°C, 200°C). Jusqu'à 200°C, nous n'observons aucun changement.

En passant à une température de 215°C, on observe que le tissu commence à fondre (voir photo 4).

Ainsi on peut conclure que la température de fusion du tissu est comprise entre 200°C et 215°C.



Photo 3 : Tissu replié



Photo 4 : Tissu fondu



7.7. Annexe 7. Fiche expérimentale : Test de résistance à la chaleur de la colle « scotch »

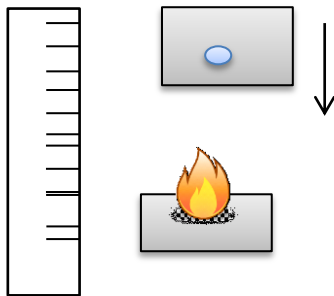
Objectif : connaître la réaction de la colle à l'approche d'une flamme de bougie.

Matériel : Feuille d'aluminium, bougie, colle « scotch ».



Procédé :

- Etaler de la colle sur le papier aluminium.
- Descendre la feuille d'aluminium progressivement au-dessus de la flamme.



Résultats :

Tout d'abord nous avons remarqué que la colle commença par « bouillir » et à probablement émettre des gaz.

Au bout de quelques secondes la colle s'est violemment enflammée, enflammant également les gaz émis auparavant.

Par prudence nous avons décidé de ne pas utiliser la colle pour fixer des éléments du ballon.



7.8. Annexe 8. Fiche expérimentale : Test de vol

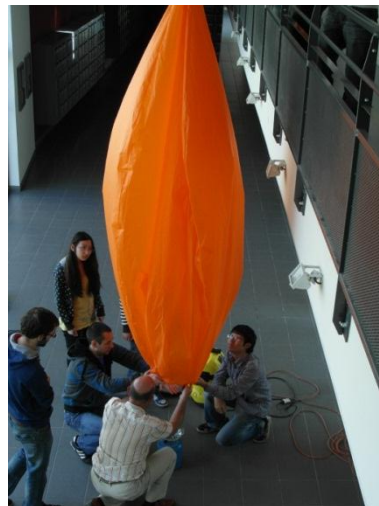
Matériel : ballon, bruleur (camping gaz), souffleur.

- Test de gonflage avec air froid grâce au souffleur.



- Test de gonflage avec bruleur

Pour assurer un gonflage optimal, nous avons installé sur le haut du ballon un fil soutenu avec une perche qui permet de maintenir le ballon en hauteur.



7.9. Annexe 9. Fiche expérimentale : Test de vol n°2

Matériel : ballon, bruleur (camping gaz), structure de décollage.

- Test de gonflage n°1 avec bruleur et structure de décollage sous l'arche verte.

Structure de gonflage



Trop de vent pour gonfler le ballon !

Malheureusement lors de ce test, le vent s'est avéré trop fort, nous avons dû trouver un endroit encore plus protégé.

- Test de gonflage n°2 avec la structure de décollage dans le patio.

Au bout de 3 minutes de gonflage, le ballon avait déjà la forme de poire voulue.

Au bout de 6 minutes et 30 secondes, le ballon a décollé, c'est-à-dire qu'il n'avait plus besoin du support pour rester en l'air.



Gonflage du ballon



Décollage du ballon !



7.10. Annexe 10. Fiche expérimentale : Test d'étanchéité

Objectif : Observer l'étanchéité à l'air du ballon.

Matériel : ballon, machine à fumée.

Procédé :

- Gonfler le ballon partiellement.
- Quand le ballon est suffisamment gonflé, introduire à l'intérieur la fumée issue de la machine.

Résultats :



Photo 1 : Machine à fumée reliée au ballon



Photo 2 : Sortie de la fumée



Photo 3 : Sortie de la fumée



Photo 4 : Ballon en dégonflage

Nous avons effectué cette expérience après avoir gonflé partiellement le ballon. Ainsi nous avons introduit dans le ballon la fumée en grande quantité en bouchant l'entrée. Nous n'avons tout d'abord observé aucune fuite dans le ballon.

Nous avons ensuite pensé à augmenter la pression à l'intérieur du ballon en diminuant le volume intérieur (raccourcissement de l'entrée). Ainsi nous avons pu observer dans ce cas de légères fuites au niveau des coutures.

Ainsi le ballon est étanche pour de faible pression de l'air intérieur ce qui correspond à un fonctionnement réel.

De plus, comme on peut l'observer sur la photo 4, nous avons remarqué après avoir gonflé le ballon que l'air emprisonné à l'intérieur ne s'échappait quasiment pas quand l'entrée est bouchée.

