



Compte-Rendu de Projet Fusée Expérimentale FAST-1 Club Ajsep 1999-2001



Médrick Auclair - medrick.auclair@wanadoo.fr

Nicolas Couronneau - nicolas.couronneau@free.fr

I. Fast One à Millau...

1. Le festival, présentation

Le festival 2001 des clubs espace s'est déroulé à Millau, dans l'Aveyron, du lundi 20 au jeudi 26 Août 2001.

2. Les contrôles et les problèmes rencontrés



a) **Electronique**

Le problème principal se situait au niveau de l'amplificateur de l'expérience. Le signal de sortie déviait en tension dans le temps, et au bout de quelques minutes on risquait la saturation de l'amplificateur. Le gain de l'amplificateur était lui correct mais la dérive permanente risquait de fausser les résultats des télémessures.

Sur les conseils de Manu Jolly, on a stabilisé l'alimentation de l'expérience avec un montage classique autour de 2 LM317, qui ont été récupérés sur l'alimentation de Médrick. En effet, tous nos tests ont toujours été faits avec une alimentation stabilisée, ce qui est une erreur car les piles ont des caractéristiques bien différentes. Il a ensuite fallu loger ce nouveau circuit imprimé dans la fusée. On est parvenu à le faire rentrer dans le logement des piles et souder les connecteurs des piles directement dessus.

Fast-1 en vol simulé

b) **Stabilité**

Le centre de gravité de la fusée était 2cm trop en avant, ce qui rendait la fusée instable. En pistocollant 500g de plomb au fond de la case parachute, on a pu corriger le problème, au détriment de la masse.

Avec cette nouvelle répartition des masses, la fusée était limite surstable, ce qui est suffisant pour passer les contrôles.

Avec une fusée limite surstable, il se peut que le vent relatif ne soit pas parallèle à l'axe de la fusée, et donc que la pression mesurée par le tube de Pitot ne soit pas le reflet exact du vent relatif. Ce point devra être retenu lors de l'exploitation des résultats.

c) **Mécanique**

La flèche était trop importante (presque 2%) pour satisfaire au cahier des charges, à cause de la plaque de poussée qui n'était fixée que par une vis. Médrick a donc dû percer et tarauder deux autres trous. Après ces modifications, la flèche était redescendue dans les normes (moins de 1%).

3. Etat final lors du lancement

a) **Extrait fiche de lancement**

Club : AJSEP	Nom du projet : Fast One
Chef de projet : Couronneau Nicolas	Date : 23 / 08 / 2001

MOTEUR

Type de propulseur : Isard.....

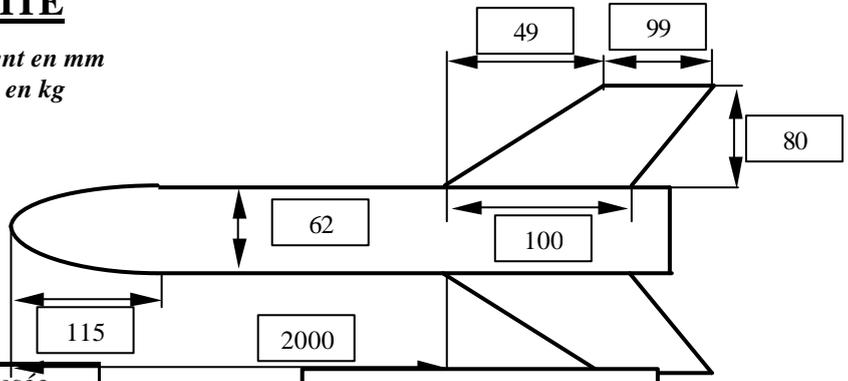
Virole STANDARD : Oui

DIMENSIONS ET STABILITE

Toutes les mesures de distance s'expriment en mm
Toutes les mesures de masse s'expriment en kg

Nombre d'Ailerons :

4



Rétréint : Non

	Fusée
Maitre couple :	3757
Longueur hors tout de la fusée avec propulseur et sans antenne	2080
Plus grand diamètre extérieur	62
Envergure maximale	227
position du centre de poussée par rapport au sommet :	1831,7

Marge statique Ms	5,9 6	$2 < Ms < 6$
Coef de portance Cn	15,2	$15 < Cn < 40$
produit $Ms \times Cn$	89,68 91,2	$40 < Ms.Cn < 100$

	Avec propulseur plein et virole	Avec propulseur vide et virole
Masse de la fusée	6.200 kg	5.100 kg
Distance sommet de l'ogive / CG	1462 mm	1100 mm

(Rayez les mentions incorrectes et entourez le choix final)

i) Fusée Limite instable Fusée stable Fusée limite surstable

Remarques importantes :

15,2 en Cn et marge statique haute, fermeture par fil (limite de solidité)
Le club apporte son propre goujon.

BALISTIQUE ET LOCALISATION

Couleur du corps :Orange/Jaune
Couleur de l'ogive :
Couleur du parachute :Orange

Si la fusée se sépare en plusieurs éléments, lequel est à suivre en priorité :

Ralentisseur :

Type de ralentisseur utilisé : parachute	
Temps d'ouverture : 16 sec	Cx du parachute (<i>facultatif</i>) :
Vitesse de descente sous parachute : 12 m/s	

Simulation de vol

Site utilisé dans le calcul	70 °	80 °
Temps de culmination	15,5 s	15,4 s
Altitude de culmination	1014 m	1134 m
Vitesse à la culmination	50 m/s	26 m/s
Portée balistique	1434 m	788 m
Vitesse maximale	163 m/s	162 m/s
Accélération maximale	118 m/s ²	118 m/s ²
Cx utilisé dans les calculs	0.6	

Commentaires :

RAMPE

(Rayez les mentions incorrectes et entourez le choix final)

Type de rampe prévue : Rail Idéfix Astérix Obélix Menhir Autre

TELEMESURE

8

Emission SNR	Vitesse :	Fréquences modulantes :	et	Bit de stop : 1 ou 2				
Trame :	<table border="1" style="width: 100%; height: 20px;"> <tr> <td style="width: 25%;"></td> <td style="width: 25%;"></td> <td style="width: 25%;"></td> <td style="width: 25%;"></td> </tr> </table>							

Emission IRIG	Fréquence min	Fréquence centrale	Fréquence Maximale	Désignation
Voie 1	1073	1300	1566	Pression
Voie 2				
Voie 3				
Voie 4				

Expériences embarquées :

pression

Demandes spécifiques du club auprès de différents postes du plan d'opérations (météo, balistique...)? Si oui, précisez :

b) Remarques :

On a programmé l'ouverture du parachute après la culmination. De cette façon, on observera nettement la phase de culmination et on pourra étalonner le capteur à cette position et mesurer le temps de vol.

4. Résultats

a) Vol

Le vol a été nominal, le parachute a été correctement déployé et la fusex est retombée au sol à vitesse constante.

La totalité du vol s'est déroulée en 1'20''

b) Récupération et atterrissage

La phase de récupération, en Jeep militaire, a eu lieu une demie-heure après le tir. La fusex a été vite repérée grâce à sa couleur dominante orange.

Par contre le choc lors de l'atterrissage a brisé le corps principal en trois morceaux, au niveau de la case parachute. Ce point était connu comme fragile, car la découpe de la porte d'éjection a nettement diminué la rigidité du tube. En plus le point d'attache du parachute était très près de la porte et du centre de gravité de la fusex, de sorte que les efforts exercés en ce point étaient très importants (la répartition des masses étant à peu près de 3kg de part et d'autre).



Le logement des piles a aussi souffert des accélérations, et une rondelle de bois a même traversé l'écrou qui la maintenait.

Les interrupteurs ont été projetés contre l'ouverture faite dans le tube, et les deux les plus en arrière (ceux de l'expérience) sont tordus. Il s'agit donc de l'accélération au décollage. Néanmoins, l'expérience semblait toujours être alimentée lors de la récupération, donc les interrupteurs devaient bien être fermés.

Remarque importante : si ces deux interrupteurs avaient été ceux de la minuterie, ce sont eux qui auraient été tordus, ce qui aurait pu couper l'alimentation du gévelot et compromettre l'éjection du parachute.

La planchette soutenant l'émetteur s'est cassée, certainement lors de l'impact au sol.

En revanche le tube de Pitot et les cartes électroniques ont très bien supporté le vol et tout semble pouvoir marcher de nouveau.

c) Téléméasures

Suite à un oubli du Cnes, les téléméasures n'ont pas été enregistrées, et nous n'en avons donc aucune trace (même si on aurait pu les recevoir sur Pluton quelques jours après).

Par contre, le responsable des téléméasures nous a confirmé qu'elles ont bien été émises, et il a remarqué une baisse constante de la fréquence avant le tir.

Ceci correspond aux problèmes de stabilité de l'amplificateur évoqués plus haut.

II. Exploitation des données

1. Expérience, mesure de vitesse

Aucune télém => Aucune exploitation...

Toutefois, la déviation en fréquences permet de conclure que pour un prochain projet, il faudra veiller particulièrement à l'adéquation du capteur avec la gamme de mesure. Ici nous utilisons un capteur 0-2 bars, pour une amplitude maximale de 0,4 Bars.

L'utilisation d'un amplificateur d'instrumentation pourrait aussi permettre une plus grande stabilité de la mesure.

2. Analyse du vol

a) **Deuxième simulation sous Trajec**

On utilise les données définitives, issues de la fiche de lancement.

On trouve une durée totale de vol prévue de 108s. Or on a chronométré 80s.

Après quelques essais, une modification du C_x de ± 0.2 donne une variation du temps total de $\pm 8s$, ce qui est donc insuffisant comme explication.

Une vitesse de descente de 17m/s correspond par contre à la durée de vol observée.

En l'absence de données concernant l'altitude maximale atteinte, et en prenant celle calculée, on peut donc penser que la descente s'est effectuée à 17m/s.



b) **Stabilité du vol**

Elle a été trop rapidement perdue de vue pour pouvoir étudier sa trajectoire.

Durant la descente sous parachute, la fusée a tourné assez vite autour du parachute. Elle a aussi maintenue une assiette horizontale, ce qui est normal car le parachute était attaché très près du centre de gravité de la fusée.

c) **Vol qualitatif**

Sur la photo en sortie de rampe, on remarque que la porte de la case parachute est bombée, et légèrement entrouverte au milieu. Peut être que la poussée du propulseur a créé des contraintes axiales qui ont fléchi la case parachute.

A l'avenir, il faudra améliorer la rigidité de cette partie.

III. Bilan

Malgré l'absence de données à exploiter, le projet Fast-1 est un succès. Nous sommes parvenus à mener sur deux ans un projet technique, ce qui est déjà une source de satisfaction.

Le festival des clubs Espace est un lieu de rencontres fructueuses, où nous avons pu tirer de riches enseignements des projets des autres. Nous imaginons déjà toutes sortes de projets pour les prochaines années.

Nous avons également été interviewé par BFM, et avons pu faire connaître notre passion et l'association.

Enfin, le prix ANSTJ obtenu pour ce projet renforce l'AJSEP et permettra de concrétiser des projets plus lourds et complexes.

IV. Remerciements

Nos parents, qui ont bien voulu assurer les déplacements, coudre le parachute, et payer quelques factures...

L'AJSEP, qui nous a accordé le budget et soutenu pendant deux ans.

Christophe Magnière, pour son suivi très enrichissant, son soutien et sa disponibilité.

L'atelier du lycée G.Eiffel, qui a tourné la plaque de poussée.

Le CFAI de Bruges, et plus particulièrement R. Nicolini pour pliage du support des interrupteurs et le tournage de l'embout du tube Pitot.



DOSSIER DE CONCEPTION

Fusée expérimentale FAST-1

1999-2001

Médrick Auclair - medrick.auclair@wanadoo.fr
Nicolas Couronneau - nicolas.couronneau@free.fr

SOMMAIRE

SOMMAIRE	3
Le mot du suiveur...	5
Introduction	6
I. Caractéristiques générales :	7
II. La structure :	7
1. Plan d'ensemble	7
2. L'assemblage mécanique	7
3. Les solutions technologiques	8
III. L'expérience	9
1. Principe	9
a) Présentation du tube de Pitot	9
b) Relation entre la vitesse de l'air et la pression :	9
2. Conception du tube de Pitot	10
3. L'ensemble électronique de la sonde	11
a) Présentation du capteur :	11
b) Schéma électronique	11
c) Calculs théoriques :	11
4. Essais :	12
a) Préparation des essais	12
b) Première campagne d'essais sur voiture	13
c) Deuxième campagne d'essais sur voiture	13
5. Etalonnage	15
IV. Les télémesures	16
1. Principe	16
2. Chaîne de télémesure	16
3. Conception du modulateur	16
4. Antenne	17
5. Emetteur	18
6. Réception et décodage :	18
V. La récupération	19
1. Principe général	19
2. Le parachute	19
a) Choix	19
b) Dimensions	19
c) Conception	19
3. La porte	19
a) Schéma fonctionnel	19
4. La minuterie	20
a) Schéma électronique	20
b) Routage	20
c) Autonomie	21
VI. SIMULATION SOUS TRAJEC	22

1.	Trajectoire	22
a)	Paramètres d'entrée.....	22
b)	Résultats : phases importantes du vol.....	22
2.	Stabilité	22
a)	Paramètres d'entrée :	22
b)	Résultats	22
VII.	Intégration	24
1.	Alimentations	24
2.	Alimentation des cartes	24
a)	schéma de principe	24
b)	brochage de la prise piles.....	24
3.	Assemblage des éléments	25
a)	Césures	25
b)	Cartes électroniques.....	25
c)	L'émetteur:.....	25
VIII.	Prévision des résultats	26
1.	Chaîne de transmission des données	26
2.	Calcul de toutes les erreurs :.....	26
a)	Simulation Trajec.....	26
b)	Conversion vitesse-pressure, relation de Bernouilli	27
c)	Capteur	28
d)	Amplificateur et VCO.....	28
e)	Erreur à l'émetteur.....	28
f)	Erreur à la réception	28
3.	Erreur totale	28
IX.	Bibliographie	29
X.	Contacts	29
XI.	Annexes	31
1.	Amplificateur tube de Pitot	31
a)	Schéma de principe.....	31
b)	Schéma d'implantation.....	32
2.	Modulateur VCO	33
a)	Schéma de principe.....	33
b)	Schéma d'implantation.....	Erreur ! Signet non défini.
3.	Minuterie	35
a)	Schéma	35
b)	Routage.....	37
c)	Implantation des composants :	39

Le mot du suiveur...

« Le projet FAST1 est dans sa phase finale de qualification.

Je ne me lasse pas de m'émerveiller de la curiosité naturelle de certains jeunes et du recul qu'ils prennent par rapport à la démarche scientifique. La physique, la mécanique, l'électronique, la conception technologique, la méthode expérimentale ne sont plus prises comme des matières vides de sens mais comme des outils interdépendants au service de leur curiosité intellectuelle. Les trois jeunes de l'aventure "FAST1" (Nicolas, secondé par Julien au début et Médrick à la fin) sont arrivés en deux ans au bout de leur projet, en dominant de façon rare et naturelle les outils scientifiques mis à leur disposition. Quel plaisir pour le suiveur de constater que ces jeunes peuvent répondre si élégamment à leurs propres questions. Ils sauront - j'en suis sûr - répondre aux autres interrogations que l'avenir leur réserve .

"Our problem is not that we don't know how to do things but that we don't know what we really want". citation de Peter Harper reprise par Theodore Monod

Nicolas, Julien et Médrick savent ce qu'ils veulent, tous mes vœux de succès donc pour le lancement. »

Christophe Magnière - suiveur ANSTJ / AJSEP - 21 juillet 2001

Introduction

Le projet FAST-1 a débuté en septembre 1999 avec Nicolas Couronneau et Julien Cassagne, sous la bienveillance du président de l'AJSEP Christophe Magnière. Julien était alors en terminale L, et Nicolas en première S. Ensemble, ils ont défini les grandes lignes du projet et les choix principaux. Ainsi l'expérience, les dimensions, et le mode de récupération ont été établis dans les premiers mois. Julien, qui préparait un concours de piano, dut abandonner courant mars 2000, et Nicolas a poursuivi en étudiant les différentes solutions techniques et en les essayant.

Le projet reprit en septembre 2000 par la validation de l'expérience. Médrick Auclair est venu se joindre au projet en octobre. A partir de ce moment, la construction de la fusée a avancé à grands pas. Les études et la réalisation ont été menées en parallèles, autant pour l'expérience que pour le système de récupération.

Durant ces deux années, la principale difficulté fut de concilier les activités liées à la fusée avec les impératifs scolaires et l'échéance du bac. De plus, nous ne disposions que du matériel disponible dans nos garages, et la fusée est donc faite avec les moyens de bord. Mais avant même le verdict du lancement, on peut d'ores et déjà affirmer que cette expérience est un véritable succès. En deux ans, nous avons acquis de nombreuses connaissances dans des domaines allant de la mécanique du vol à l'électronique. Mais plus important encore, nous avons surtout approché la méthode liée à la conduite d'un projet technique, à force d'essais et d'erreurs, tous enrichissants.

I. Caractéristiques générales :

Cette partie présente les caractéristiques d'ensemble de la fusée. (calculs sous Trajec 2.2)

Moteur : Isard

Longueur : 1,90 m

Diamètre extérieur : $\phi 63$

Masse : 5,6 kg

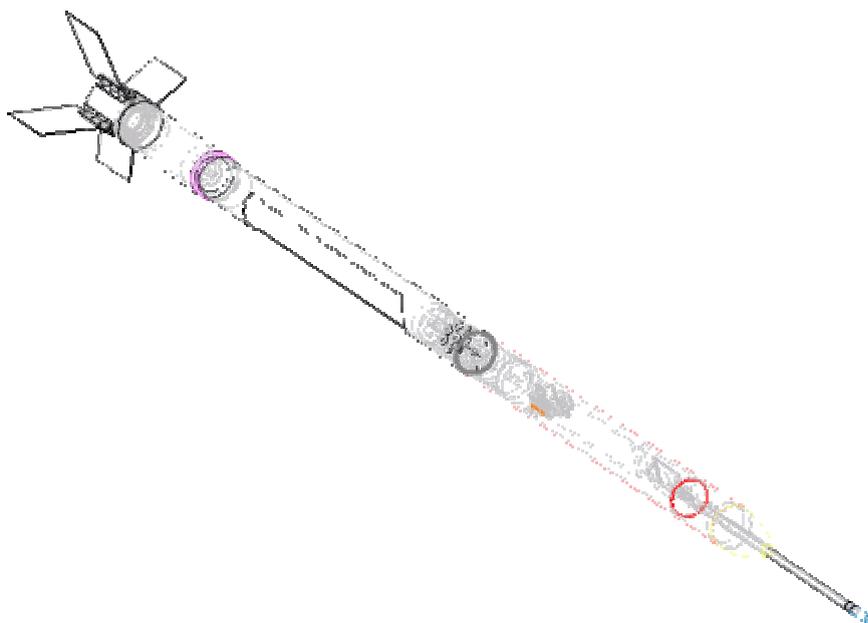
Expérience : Mesure et télémesure de vitesse par tube de Pitot.

Altitude maxi : 1,5 km

Vitesse maxi : 206 m/s

II. La structure :

1. Vue d'ensemble



2. L'assemblage mécanique

La fusée est composée de deux grandes parties pour pouvoir être démontable et faciliter la mise en place des éléments.

La partie supérieure contient le tube de Pitot, l'émetteur, l'antenne et les cartes électroniques.

La partie inférieure contient les piles, qui doivent être facilement accessibles, et la case parachute. Le système d'éjection du parachute et les piles sont reliés à la partie supérieure par un connecteur verrouillable.

Le propulseur se fixe sur une pièce tronconique qui adapte le diamètre du corps de fusée au diamètre du propulseur. La liaison est assurée par un goujon M10.

Les ailerons sont fixés en arrière du propulseur au moyen de la virole Isard fournie par l'ANSTJ.

3. Les solutions technologiques

- **L'ogive**

Elle est entièrement réalisée en balsa. Elle est percée dans son axe pour pouvoir loger le tube de Pitot. Deux couches de vernis assurent une protection contre l'humidité, et font de l'ogive l'élément le plus esthétique de la fusée.

- **La liaison**

Le tube de PVC inférieur est prolongé par un tube de plus faible diamètre dans lequel vient s'emmancher le tube supérieur. La liaison est ensuite assurée par 4 vis qui traversent les deux tubes et se vissent dans un disque de bois.

- **Le propulseur**

Le propulseur Isard est fixé à l'extrémité de la fusée par l'intermédiaire d'un goujon qui se visse sur une pièce tronconique (comme celle présentée dans le document ANSTJ « Les propulseurs des clubs scientifiques spatiaux »). La pièce tronconique en aluminium est tournée par le lycée G.Eiffel.

- **Les ailerons**

Les ailerons sont réalisés en aluminium de 2mm d'épaisseur, et ils seront montés sur la virole Isard.

- **Le parachute**

Le parachute cruciforme est éjecté par une porte latérale sciée dans le tube PVC. Il est réalisé en toile de cerf volant.

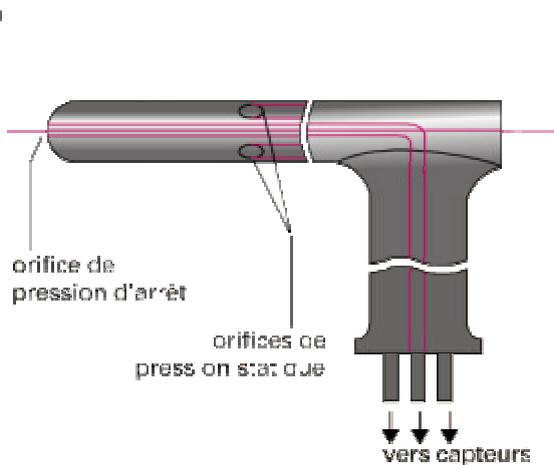
III. L'expérience

L'expérience consiste à mesurer la vitesse de la fusée dans l'axe longitudinal.

1. Principe

On mesure la vitesse du vent relatif dans l'axe de la fusée : il s'agit de la vitesse de celle-ci par rapport à l'air. Pour ce faire, on utilise un tube de Pitot, qui mesure la différence de pression entre deux prises d'air : une prise d'air statique, et une dynamique.

a) Présentation du tube de Pitot



Il s'agit d'une sonde de mesure imaginée par Henri Pitot en 1732, puis améliorée par Darcy et Prandtl. On le trouve sur tous les avions, où il sert à déterminer la vitesse 'air', c'est à dire la vitesse relative de l'avion par rapport à l'air.

b) Relation entre la vitesse de l'air et la pression :

Ces calculs servent à déterminer la relation entre la différence de pression mesurée et la vitesse de la fusée.

Encore merci à Christophe Magnière pour les avoir trouvés.

Conservation de l'énergie pour une quantité de masse m de gaz :

énergie thermique $E_t = m \cdot C_p \cdot T$ (masse, chaleur spécifique du gaz à pression constante, température statique)

énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2} m V^2$ (masse, vitesse) quelque soit la vitesse, l'énergie se

conservent : $E_c + E_t = Cte$

$$\text{d'où : } T_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot C_p} = T_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot C_p}$$

Cette relation peut s'écrire en Mach avec les notations suivantes :

Nombre de mach $M = \frac{V}{a}$ a vitesse du son et $a^2 = \gamma \cdot r \cdot T$ (pour l'air, $\gamma = 1.4$, $r = 287.053$).

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, (C_v chaleur spécifique du gaz à volume constant ; $r = C_p - C_v$)

$$T \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) = Cte = T_a \text{ température d'arrêt.}$$

Comportement isentropique du gaz (écoulement sans apport de chaleur et réversible)

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{g}{g-1}}$$

La combinaison des deux lois précédentes conduit à l'équation de Saint-Venant :

$$\frac{P_i - P}{P} = \left(1 + \frac{g-1}{2} M^2 \right)^{\frac{g}{g-1}}$$

Avec P_i pression d'arrêt, P pression statique, M mach, ce qui donne pour l'air :

$$\frac{P_i - P}{P} = (1 + 0.02M^2)^{3.5-1}$$

Heureusement, pour la plupart des calculs en vitesse subsonique, on peut utiliser la relation de Bernoulli, qui est une approximation de l'équation précédente

$$P_i - P = \frac{\rho \cdot g \cdot M^2}{2}$$

soit encore

$P = \frac{1}{2} \rho V^2$, avec P la différence de pression, V la vitesse du vent relatif, et ρ la masse volumique de l'air.

2. Conception du tube de Pitot

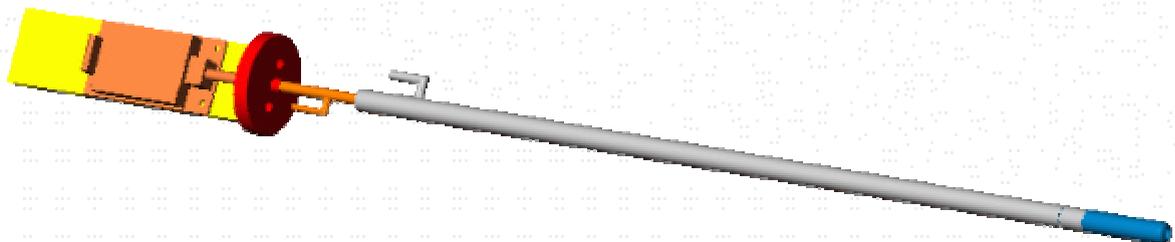
La sonde est placée en amont de l'ogive car dans cette partie le fluide (l'air) n'a pas été perturbé par la fusée.

Elle est réalisée en laiton pour le tube de plus petit diamètre, et en plastique pour le tube de plus grand diamètre.

Pour des raisons aérodynamiques, il faut respecter certaines distances entre les différents orifices. Ces côtes sont trouvées sur divers documents, notamment des tubes de Pitot déjà réalisés par des clubs spatiaux.

Le tube est ensuite relié par l'intermédiaire de tuyaux souples à un capteur de pression différentielle MPX2200DP de Motorola.

De plus, la sonde sert aussi d'antenne pour l'émission des télémesures, et le tube de laiton est ajusté à la bonne longueur pour être accordé avec la fréquence d'émission.



3. L'ensemble électronique de la sonde

La carte électronique se charge de l'amplification du signal fourni par le capteur pour son exploitation par les télémesures.

a) **Présentation du capteur :**

Le capteur de pression différentielle est un MPX2200DP de Motorola. Il s'agit d'un capteur de pression piezoélectrique compensé en température et humidité, d'une grande linéarité et précision.

- **Caractéristiques principales :**

Gamme de pression : 0 à 2 bars

Tension d'alimentation typique : 10Vdc (16V maxi)

Sensibilité : 0,2mV/kPa

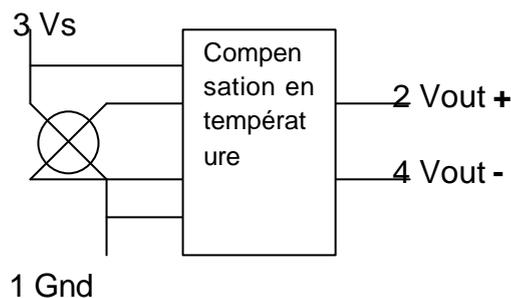
Impédance d'entrée : 1300 à 1500 ohms

Impédance de sortie : 1400 à 3000 ohms

Temps de réponse : <1ms

Effet maxi de la température sur la tension d'offset : $\pm 1\text{mV}$

- **Schéma de principe**



b) **Schéma électronique**

Il s'agit d'un montage amplificateur-comparateur simple, dont l'offset peut être contrôlé à chaque étage pour éviter toute saturation. Après essais, un montage plus complexe nécessitant 4 AOP, mais ayant une très grande impédance d'entrée, s'avère inutile.

c) **Calculs théoriques :**

- **Calcul du gain :**

Pour permettre un étalonnage précis des mesures, la plage de sortie souhaitée est de 0 à 6V.

Sensibilité capteur (d'après la data-sheet) : 0.2mV/kPa

Pression maxi P, pour une vitesse maxi de 250m/s

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad P = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \times 250^2 = 38300 \text{ Pa}$$

Soit une tension maxi de : $.2 \times P(\text{kPa}) = .2 \times 38.3 = 7.66\text{mV}$

Ce qui représente un gain de : $A_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{6}{0.00766}$

$$A_v=783$$

- **Calculs des valeurs des résistances :**

Le capteur fournit une différence de tension proportionnelle à la pression.
L'amplificateur différentiel de gain 780 est composé d'un premier étage amplificateur différentiel inverseur de gain 4,7 suivi de 3 étages amplificateurs inverseurs, le premier de gain 4,7, le second de gain variable et le dernier gain 5,6.

$$\frac{R_2}{R_1}=5.3 \Rightarrow \frac{R_4}{R_3}=5.3$$

$$R_1=R_3=10\text{k}\Omega$$

$$R_2=R_4=280\text{k}\Omega$$

$$\frac{R_6}{R_5}=28 \Rightarrow R_7=\frac{R_5 \cdot R_6}{R_5+R_6}$$

$$R_6=280\text{k}\Omega$$

$$R_5=10\text{k}\Omega$$

$$R_7=70\text{k}\Omega$$

4. Essais :

Dans un premier temps, on réalise des essais en voiture, c'est à dire avec une vitesse maximum de 100km/h, soit 27m/s. Dans ce montage, la tension maximale est prévue à 5V et non à 6V comme elle l'est sur le montage définitif.

a) Préparation des essais

- **Calcul du gain :**

Pression maxi P, pour une vitesse maxi de 36m/s

$$P = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad P = \frac{1}{2} 1.225 \times 27^2 = 547\text{Pa}$$

Soit une tension maxi de : $2 \times P(\text{kPa}) = 2 \times 547 = 1.1\text{mV}$

Ce qui représente un gain de : $A_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{5}{0.00011}$

$$A_v \approx 50000$$

- **Calculs des valeurs des résistances :**

Le capteur fournit une différence de tension proportionnelle à la pression.
L'amplificateur différentiel de gain 50000 est composé d'un premier étage amplificateur inverseur différentiel de gain 220, suivi d'un étage amplificateur inverseur de gain 220.

$$\frac{R_2}{R_1} = 220 \Rightarrow \frac{R_4}{R_3} = 220$$

$$R_1 = R_3 = 10k\Omega$$

$$R_2 = R_4 = 2.2M\Omega$$

$$\frac{R_6}{R_5} = 71 \Rightarrow R_7 = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6}$$

$$R_5 = 10k\Omega$$

$$R_6 = 2.2M\Omega$$

$$R_7 = 10k\Omega$$

- **Graphiques pour les essais :**

$$U = f(V)$$

$$U = \frac{1}{2} \rho V^2 \times 10^{-3} \times 0.0002 \times \frac{R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3} \Leftrightarrow U = \frac{R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3} \rho V^2 \times 10^{-7}$$

$$U = \frac{2200}{10} \times \frac{2200}{10} 1.225 \times 10^{-7} \times V^2$$

b) Première campagne d'essais sur voiture



- **Conditions des essais**

Les premiers essais sur voiture eurent lieu début 2000, par des conditions météo fraîches. La fusée n'en était qu'à ses débuts, et le tube était de diamètre 50, avec un tube de Pitot bien plus court, et une ogive en papier mâché avec une aérodynamique catastrophique. De plus le circuit électronique était expérimental et très différent de celui définitivement retenu.

- **Résultats :**

Echec total du point de vue résultats attendus.

Aucun signal n'a pu être mesuré en sortie, et ce à toutes les vitesses.

- **Interprétation**

Plusieurs sources d'erreurs sont envisageable, et la principale reste le circuit électronique retenu. La conception du tube de Pitot et l'ogive sont aussi à mettre en cause, car les vibrations sortaient trop souvent le tube de l'axe du vent relatif.

Enfin, une grosse erreur de calcul du gain de l'amplificateur fait que dans tous les cas les tensions mesurées auraient été 10 fois moindre que celles prévues.

c) Deuxième campagne d'essais sur voiture

- **Conditions des essais**

La seconde série d'essais eut lieu le dimanche 26 novembre dans la matinée, sur une route peu fréquentée. Après plusieurs semaines de pluie, le temps était plutôt beau et la route avait eu le temps de sécher. Le seul ennui était un vent assez important qui a pu fausser les mesures.

De plus, Christophe ayant changé de voiture, on est passé d'une R21 à un Espace flambant neuf. Les conditions de mesure était donc très satisfaisantes, et le

vibrations bien plus faibles que sur la R21 (surtout qu'un voltmètre à aiguille était utilisé).

- **Résultats**

[Cf fichier excel](#)

Données brutes						
Vitesse (km/h)	Montante V	Montante V	Montante (V)	Descendante (V)	Descendante (V)	Descendante (V)
0	-0,9	0,6	1,7	0	1,8	1,7
20	-0,8	0,6	1,7	0,9	1,9	2,1
40	-0,6	1,1	2,4	1,5	2,2	2,6
60	0,1	1,4	3,1	2,6	2,9	3,5
80	1,5	2,5	4,2	3,2	3,3	4,6
100	2,5	4,2	5,6	5,3	4,3	5,5

Comparaison théorie/expérience			
Vitesse (km/h)	Théorie (V)	Mesurée (V)	Erreur
0	0	0,00	#DIV/0!
20	0,18	0,25	33%
40	0,73	0,72	2%
60	1,65	1,45	13%
80	2,93	2,40	20%
100	4,57	3,75	20%

- **Interprétation**

(cf graphiques joints)

Comme prévu, la tension augmente bien avec la vitesse.

Une première incohérence apparaît sur les tensions mesurées à vitesse nulle. En soustrayant cette valeur à toutes les autres mesures pour chaque série, on obtient des valeurs à « zéro décalé », qui semble correctes. C'est sur ces valeurs corrigées qu'on exploite l'essai. On remarque que la tension à vitesse nulle augmente au cours du temps, ce qui laisse penser à un problème d'ordre électronique, comme un « temps de préchauffage » de l'amplificateur opérationnel.

On observe aussi une différence avec les valeurs calculées. Ces erreurs peuvent être expliquées par la plage de vitesse des essais: d'une part les calculs ne sont peut être pas adaptés, d'autre part le tube a été conçu pour des vitesses bien supérieures.

Enfin, à même vitesse, les valeurs décalées sont souvent éloignées les une des autres. On mesure cette plage de dispersion à l'aide de l'indice de dispersion.

- **Bilan**

Cet essai s'est avéré positif, car les mesures sont assez proches de celles espérées. De plus aucune difficulté particulière n'a été remarquée (par exemple les vibrations de la fusée auraient pu influencer le capteur).

On remarque que plus la vitesse est élevée, et plus l'indice de dispersion est faible, ce qui laisse envisager de bons résultats lors du vol réel.

5. Etalonnage

L'étalonnage est effectué à l'aide d'une seringue de 3mL fixée à l'extrémité d'un flexible de volume 3mL.

On désire une variation de pression de $P=38\,400\text{Pa}$.

Sous pression atmosphérique, $P=100\,000\text{Pa}$, $V=6\text{mL}$ (la seringue n'est pas comprimée)

$P.V=Cte$ soit $P.V=100000 * 0.006 = 600$

Pour obtenir $P=138\,400\text{Pa}$ $V = \frac{Cte}{P} = \frac{600}{138400} = 4,33\text{mL}$

Ce qui revient à comprimer la seringue de $6 - 4,33 = 1,67\text{mL}$

D'après la documentation constructeur :

- Fréquence centrale $f_0 = \frac{1}{RC}$
- Fréquence f en fonction de V_c $f = \frac{1}{RC} \left[1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{V_c}{3} \right) \right]$

$$\text{d'où } f = \frac{1}{RC} \left[1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{V_c}{3} \right) \right] \Leftrightarrow f = f_0 \left[1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{V_c}{3} \right) \right]$$

Or, notre signal varie de 0 à 6V, ce qui simplifie les formules :

- si $V_c = 0$, alors $f = f_0 + \frac{20}{100} f_0 = 1,2 f_0$
 $f_0 \left[1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{0}{3} \right) \right] = 1,2 f_0 \Leftrightarrow 1 + \frac{R}{R_c} = 1,2 \Leftrightarrow \frac{R}{R_c} = 0,2$
- si $V_c = 6V$, alors $f = f_0 - \frac{20}{100} f_0 = 0,8 f_0$
 $f_0 \left[1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{6}{3} \right) \right] = 0,8 f_0 \Leftrightarrow 1 - \frac{R}{R_c} = 0,8 \Leftrightarrow \frac{R}{R_c} = 0,2$

d'où on obtient les relations :

$$\boxed{f_0 = \frac{1}{RC} \text{ et } \frac{R}{R_c} = 0,2}$$

Calculs :

Fréquence centrale : 1300Hz

$$\text{D'où } f_0 = \frac{1}{R_1 C_1} = 1300 .$$

On fixe $C_1 = 47\text{nF}$, ce qui implique $R_1 = \frac{1}{f_0 * C_1} = 16366 \text{ } \Omega$

Pour pouvoir ajuster la fréquence centrale, on construit R_1 en associant un potentiomètre de 5K et une résistance de 10K.

La tension modulatrice variant de 0 à 6V, on utilise la formule simplifiée pour calculer R_7 :

$$R_7 = \frac{R_1}{0,2} = 81830 \text{ } \Omega$$

Le potentiomètre P_2 règle l'amplitude du signal de sortie. On souhaite une amplitude de 5V. A raison de 60mV/par K Ω , on choisit $P_2 = 100\text{K}\Omega$.

Les autres composants sont choisis selon les recommandations du constructeur.

(cf *Emetteur Toucan*)

4. Antenne

Elle est conjuguée avec la sonde de Pitot. Son orientation et sa position sont ainsi idéales. En effet, on aurait pu loger l'antenne à l'intérieur de la fusée, sur un bord du tube, mais son efficacité aurait alors varié au cours du vol, selon que l'antenne soit en vue directe de l'émetteur, ou que son signal traverse les divers circuits imprimés. De plus, ce système aurait été générateur de nombreux parasites à l'intérieur du corps.

L'antenne est donc réalisée par une tige conductrice de laiton perpendiculaire à un disque conducteur du diamètre du tube (appelé le plan de masse).

Fréquence d'émission : 136.5MHz

$$\text{Longueur d'onde : } \lambda = c \times \frac{1}{f} = 3.10^8 \frac{1}{136,5 \times 10^6} = 2,2 \text{ m}$$

$$\text{D'où : longueur de l'antenne } l = \frac{1}{4} \lambda = 55 \text{ cm}$$

5. Emetteur

Il s'agit de l'émetteur Toucan, fourni par l'ANSTJ, et spécialement conçu pour les fusées expérimentales.

Caractéristiques principales :

Tension d'alimentation : 12V

Consommation maxi : 150 mA

Niveau d'entrée (modulation) : 0 à 5V

Puissance HF : 200 mW

Portée maxi : 20 Km

Fréquence d'émission : 136 à 138 MHz

Masse : 30g

6. Réception et décodage :

La réception est assurée par le camion télémessure du CNES. Les données sont stockées en temps réel.

Formule de conversion :

$$f = \frac{1}{RC} \left[1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{U_s}{3} \right) \right] = \frac{1}{RC} \left[1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{1}{6} A_{v0} G_0 r v^2 \right) \right]$$

ce qui est équivalent à

$$v = \sqrt{\frac{6 - 6 \frac{R_c}{R} (R_c f - 1)}{A_{v0} G_0 r}}$$

Application numérique : à faire après valeurs définitives des composants

V. La récupération

cf : Note 4

1. Principe général

La récupération se fait grâce à un parachute éjecté d'une porte latérale. La porte est retenue en position fermée par un fil de sac poubelle. Un inflammateur pyrotechnique sectionne le fil au bout d'un temps préprogrammé et, poussée par un ressort, la porte est éjectée.

2. Le parachute

a) **Choix**

Deux possibilités s'offrent quant au choix du parachute :

- le parachute hémisphérique, fiable, mais encombrant et plus difficile à réaliser.
- Le parachute cruciforme, un peu moins fiable et risquant de se mettre en torche, mais moins encombrant et d'une réalisation très simple.

Etant donné le faible diamètre de la fusée, ce qui se traduit par un logement parachute exigu, le parachute cruciforme apparaît bien plus sûr. Son manque de fiabilité est ici secondaire, et son encombrement réduit rend ses chances d'éjection bien supérieures au volumineux hémisphère.

De plus, pour limiter les risques de mise en torche, on utilise un anneau anti-torche de 20cm de diamètre, réalisé par un anneau de plastique que l'on plie en trois boucles pour le loger dans la case parachute, puis qui se déploiera au moment de l'éjection.

b) **Dimensions**

Masse estimée de la fusée : 4,4 kg moteur Isard vide

$$P = mg$$

$$F = \frac{1}{2} rSv^2Cx$$

On cherche à déterminer la surface S du parachute.

La vitesse de descente est de 10m/s à 15m/s. Le Cx d'un parachute est très proche de 1.

Le poids P de la fusée doit être équilibré par la portance F du parachute.

$$mg = \frac{1}{2} rSv^2Cx \Leftrightarrow S = \frac{2mg}{rv^2Cx}$$

d'où $S=0,66m^2$ pour un vitesse de descente de 10m/s

c) **Conception**

Le parachute est un modèle cruciforme, qui outre sa simplicité de fabrication, semble donner de très bon résultats car il se déploie en fonction de la vitesse.

Il est réalisé en toile de cerf-volant.

3. La porte

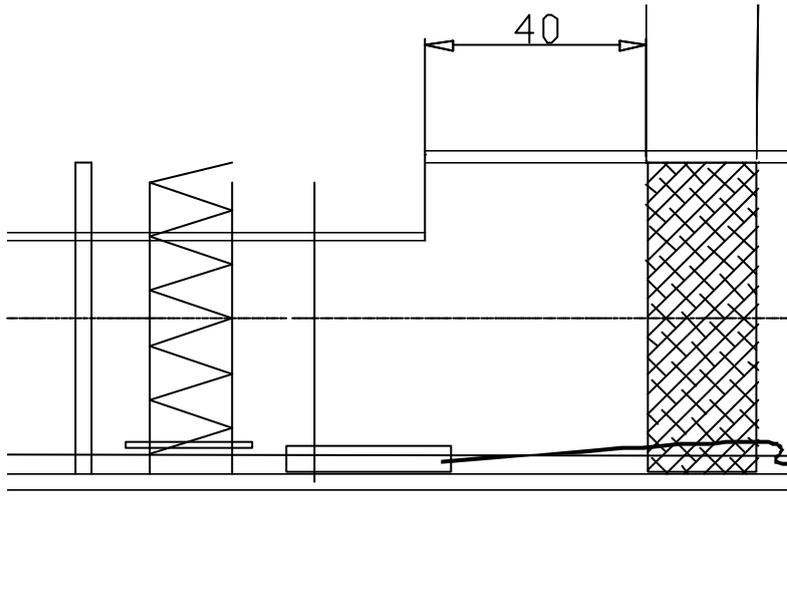
a) **Schéma fonctionnel**

Son angle d'ouverture est de 120°, et la longueur de son ouverture est de 50 cm.

L'ouverture est provoquée par la section du fil reliant la porte au tube PVC, au moyen d'un inflammateur (gévelot). Un ressort guidé par un tube et solidaire de la fusée éjecte la porte. La porte est reliée au parachute qu'elle extrait donc de son logement.

L'inflammateur pyrotechnique est plaqué sur le tube intérieur de la fusée, dans un tube de laiton, qui est traversé par le fil. Il est solidaire du tube intérieur pour éviter qu'avec l'accélération le support du gévelot ne cisaille le fil.

La porte est maintenue en place d'un côté, par une palette qui joue le rôle de charnière. De l'autre côté (côté fil de sac poubelle), la porte est simplement guidée par deux morceaux de PVC, collés contre la paroi intérieure du tube. Pour rigidifier l'ensemble, on a collé une languette de PVC à l'intérieur de la porte.



4. La minuterie

La minuterie est déclenchée par l'arrachage d'une prise jack, qui est reliée au sol. La commande d'ouverture du parachute est quant à elle commandée par la comparaison entre une valeur issue du compteur 4060 et une valeur présélectionnée par des microrupteurs. On peut ainsi ajuster l'instant d'ouverture avec une précision du dixième de seconde. Lorsque les deux valeurs sont identiques, un étage de puissance commande l'inflammation du gévelot.

a) **Schéma électronique**

Le schéma a été réalisé avec une version d'évaluation du logiciel Eagle de Cadsoft. (cf schéma en annexe). L'utilisation de circuits tout numérique et non analogiques limite l'influence des parasites.

Conformément au cahier des charges, c'est l'ouverture d'un contact (la prise jack) qui démarre la minuterie. La première led (verte) indique le bon fonctionnement du compteur, en clignotant alternativement entre une intensité lumineuse faible puis élevée. Le deuxième led (rouge) indique que la sortie du comparateur est à l'état haut, et que le gévelot peut être allumé. Cet allumage n'a lieu que si l'interrupteur de sécurité est en position 'vol'. Sinon, en position 'sécurité', seule la led s'allume.

b) **Routage**

Pour des raisons d'encombrement, le circuit imprimé a été réalisé en double face, ce qui a compliqué la soudure des composants.

c) Autonomie

Consommation comptage inactif (fiche jack branchée) : 25mA

Energie consommée en 45 min : $0.75 * 25 = 18,8\text{mA.h}$

VI. SIMULATION SOUS TRAJEC

1. Trajectoire

a) Paramètres d'entrée

Masse	5 kg
Maître couple	3757 mm ²
Cx estimé	0,40
Site de la rampe	80°
Pas de calcul	0,01 s

b) Résultats : phases importantes du vol

Evènement	Temps	Altitude	Vitesse	Distance au sol	Accélération	Inclinaison
Sortie de rampe	0,26 s	4 m	31 m/S	1 m	132 m/s ²	80°
Fin de propulsion	1,79 s	198 m	206 m/S	39 m	18 m/s ²	78°
Culmination	18,38 s	1692 m	30 m/s	597 m	10 m/s ²	0°

2. Stabilité

a) Paramètres d'entrée :

Longueur jusqu'au propulseur : 1600 mm

Longueur jusqu'aux ailerons : 1860 mm

Longueur de l'ogive : 150 mm

Masse estimée : 5 kg avec moteur Isard plein

Position CDG depuis haut de la fusée sans moteur: 875 mm

Présence virole de masse 0,5 kg

Envergure ailerons : 80 mm

Longueur ailerons : 100 mm

Epaisseur ailerons : 2 mm

Décrochement ailerons : 50 mm

b) Résultats

Marge statique : $4,1 < M_s < 4,9$

Portance : $C_n = 15,9$

Produit $C_n * M_s$: $65,2 < M_s * C_n < 77,9$

VII. Intégration

1. Alimentations

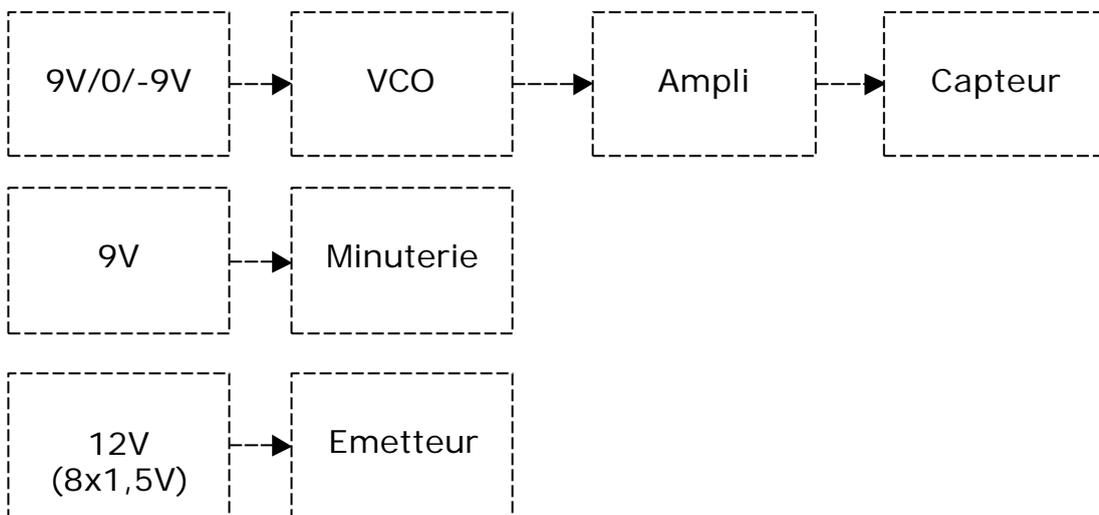
Il existe une alimentation indépendante pour chacun des modules suivants, en vue d'une meilleure fiabilité :

- Minuterie : 9V (une pile 9V)
- Emetteur : 12V (8 piles de 1,5V)
- Expérience : -9V 0 +9V (2 piles 9V)

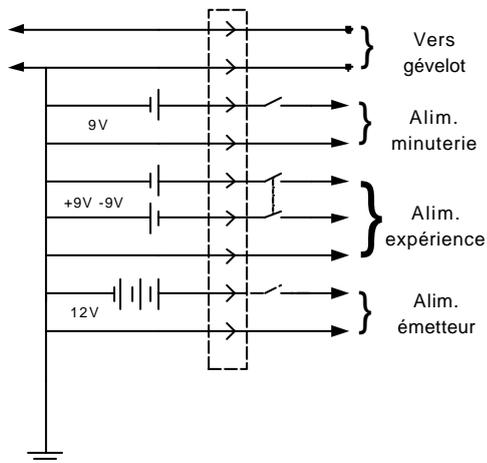
Chaque sous-système est relié à son alimentation par un interrupteur, placé horizontalement afin d'éviter que l'accélération ne fasse basculer le levier.

2. Alimentation des cartes

a) schéma de principe



b) brochage de la prise piles



3. Assemblage des éléments

a) Césures

b) Cartes électroniques

c) **L'émetteur:**

Comme il est livré lors de la campagne, il faut prévoir un système de mise en place simple, rapide, et très résistant, compte tenu de l'accélération et de la masse du propulseur.

Etienne Maier nous a très gentiment prêté un exemplaire de Toucan le 14 septembre 2000, et son intégration a donc pu être étudié plus précisément.

Il sera en définitive fixé sur une planchette de bois, elle même collée sur le plan de masse de l'antenne (côté bois).

VIII. Prévision des résultats

1. Chaîne de transmission des données

On s'intéresse ici au paramètre Vitesse

Simulation Trajec <i>Etrajec</i>	Le Cx est estimé, et il a une influence importante sur les résultats de la simulation . Les conditions atmosphériques (masse volumique de l'air, etc...) du jour du lancement sont inconnues
Conversion vitesse->pression <i>Eb</i>	La relation de Bernouilli est une approximation. Les conditions atmosphériques du jour du lancement sont inconnues.
Capteur <i>Ec</i>	Les données sont fournies par le constructeur.
Amplificateur <i>Eelec</i>	Toutes les résistances ont une tolérance de 5%. Comme elles sont toutes soumises à la même température, on suppose qu'elles varient toutes de manière linéaire. Le choix du circuit fait que leurs effets s'annulent. L'utilisation de potentiomètres multitours limitent les incertitudes. Un montage simulant le capteur permet de connaître avec exactitude le gain de l'ampli.
VCO <i>Eelec'</i>	Toutes les résistance ont une tolérance de 5%, mais leurs effets risquent cette d'être importants, surtout sur la variation de fréquence L'utilisation de potentiomètres multitours limitent ces effets, mais il faut retenir que les valeurs des résistances sont susceptibles de changer au cours du vol.
Emetteur <i>Ee</i>	Sa marge d'erreur est connue.
Transmission dans l'air <i>O</i>	On néglige l'effet Doppler.
Réception ANSTJ <i>Er</i>	La marge d'erreur est connue.

2. Calcul de toutes les erreurs :

a) **Simulation Trajec**

On fixe arbitrairement $0,4 < Cx < 0,6$

Pour $C_x=0,4$ $v_{max}= 182$ m/s et culmination à $t=17,05$ s
 Pour $C_x=0,6$ $v_{max}= 180$ m/s et culmination à $t=15,96$ s

Erreurs liées au C_x :

Sur la vitesse $\frac{182-180}{182}=1\%$

Sur le temps $\frac{17.05-15.96}{17.05}=6\%$

Erreur sur le C_x $E_{trajec}=1\%$

b) Conversion vitesse-pression, relation de Bernouilli

Incertitude sur la formule :

Relation complète :

$$\frac{P_i - P}{P} = \left(1 + \frac{g-1}{2} M^2 \right)^{\frac{g}{g-1}}$$

Relation simplifiée (relation de Bernouilli)

$$P_i - P = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Explication :

$$\frac{P_i - P}{P} = \left(1 + \frac{g-1}{2} M^2 \right)^{\frac{g}{g-1}} \approx 1 + \frac{g}{g-1} \cdot \frac{g-1}{2} M^2 \approx 1 + \frac{1}{2} g M^2$$

Or $M = \frac{V}{c}$ avec c célérité du son $c = \sqrt{\frac{gP}{\rho}}$

$$\text{Donc } \frac{P_i - P}{P} = \left(1 + \frac{g-1}{2} M^2 \right)^{\frac{g}{g-1}} \approx 1 + \frac{1}{2} g \left(\frac{V}{\sqrt{\frac{gP}{\rho}}} \right)^2 \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{\rho}{P} V^2.$$

$$\text{Soit } P_i - P = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Calcul de l'erreur :

Pour $V=180$ m/s, $\rho = 1,2$ g/l et $P=1013$ hPa, $g = 1,4$

Relation complète : $P_i = 122109$

Relation de Bernouilli : $P_i = 120740$

Soit une erreur : $E_b = \frac{122109 - 120740}{120740} = 1,1\%$

$E_b = 1,1\%$

Incertitude sur la masse volumique de l'air :

En connaissant la pression et la température exacte le jour du lancement, on pourra éliminer cette erreur

$$\text{Masse volumique : } \rho = \frac{M_{air} \times P}{R \times T}$$

Arbitrairement :

(Très) beau temps : $T=30^\circ\text{C}$, $P=1020$ hPa

Mauvais temps (pour Août) : $T=15^\circ\text{C}$, $P=1008$ hPa

Application numérique :

$$\text{Beau temps : } r = \frac{0,028966 \times 102000}{8,31441 \times 303} = 1,17$$

$$\text{Mauvais temps : } r = \frac{0,028966 \times 100800}{8,31441 \times 288} = 1,22$$

ATTENTION : Cas favorables, car $P1 > P2$ mais aussi $T1 > T2$!, et donc le rapport P/T est dans tous les cas plus faible que pour les extrêmes $P1 > P2$ et $T1 < T2$

$$\frac{1,22 - 1,17}{1,17} = 0,04$$

Soit une incertitude sur la masse volumique de $\text{Emvol} = \pm 4\%$
Ce qui représente une erreur de 20% sur la mesure de vitesse

c) Capteur

Les valeurs sont données par le constructeur Motorola.

Linéarité: $\pm 0,25\%$

Hystérésis de pression : $\pm 0,1\%$

Il n'y a pas d'erreur liée à la température, car elle ne varie pas au cours du vol.

On prend **$E_c = 0,4\%$**

d) Amplificateur et VCO

On mesure expérimentalement l'erreur :

Protocole expérimental :

On réalise un pont diviseur simulant le capteur.

On mesure la valeur en sortie du pont diviseur, de l'amplificateur et la fréquence en sortie du VCO.

On recommence avec différentes valeurs du pont diviseur.

On recommence également avec des conditions atmosphériques différentes (surtout de température).

Résultats :

$E_{elec} = 5\%$ (au pif)

e) Erreur à l'émetteur

Arbitrairement (et au pif) : $E_e = 1\%$

f) Erreur à la réception

Toujours au pif : $E_r = 1\%$

3. Erreur totale

Moyenne quadratique

$$E = \sqrt{E_{trajec}^2 + E_b^2 + E_c^2 + E_{elec}^2 + E_e^2 + E_r^2}$$

$E = 8\%$

IX. Bibliographie

- 1 : SYSTEMES DE BORD par Y. RIBES, photocopié ENAC 1977
- 2 : 200kPa On-Chip Temperature Compensated & Calibrated Pressure Sensors, datasheet Motorola 1998
- 3: L'amplificateur opérationnel", Notice technique ANSTJ
- 4: Les parachutes des fusées expérimentales, Notice technique ANSTJ
- 5: Protection HF des télémesures, Notice technique ANSTJ
- 6 : XR-2206 Monolithic Function Generator Datasheet
- 7 : Note technique: le VCO à circuit intégré
- 8 : Datasheet TL081
- 9 : L'amplificateur opérationnel, photocopié Jeunes Science Bordeaux

X. Contacts

Le projet est suivi par Christophe Magnière christophe.magniere@wanadoo.fr

Et réalisé par

Médrick Auclair : medrick.auclair@wanadoo.fr

Nicolas Couronneau: nicolas.couronneau@libertysurf.fr Tel 05.56.97.04.97

Association Nationale Science et Technique Jeunesse:

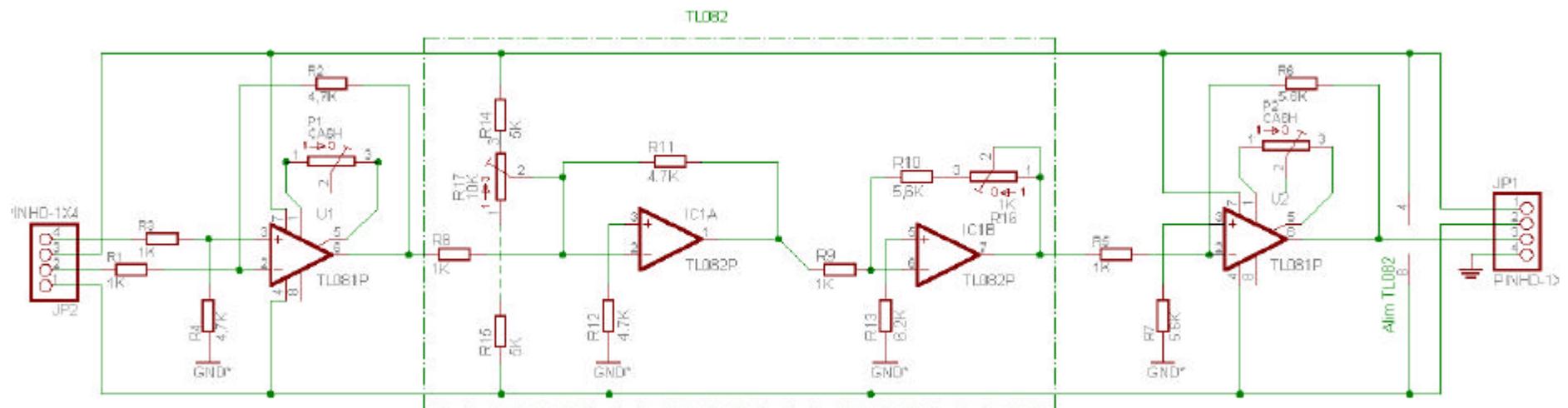
Secteur Espace de l'Anstj - 16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS

<http://anstj.mime.univ-paris8.fr>

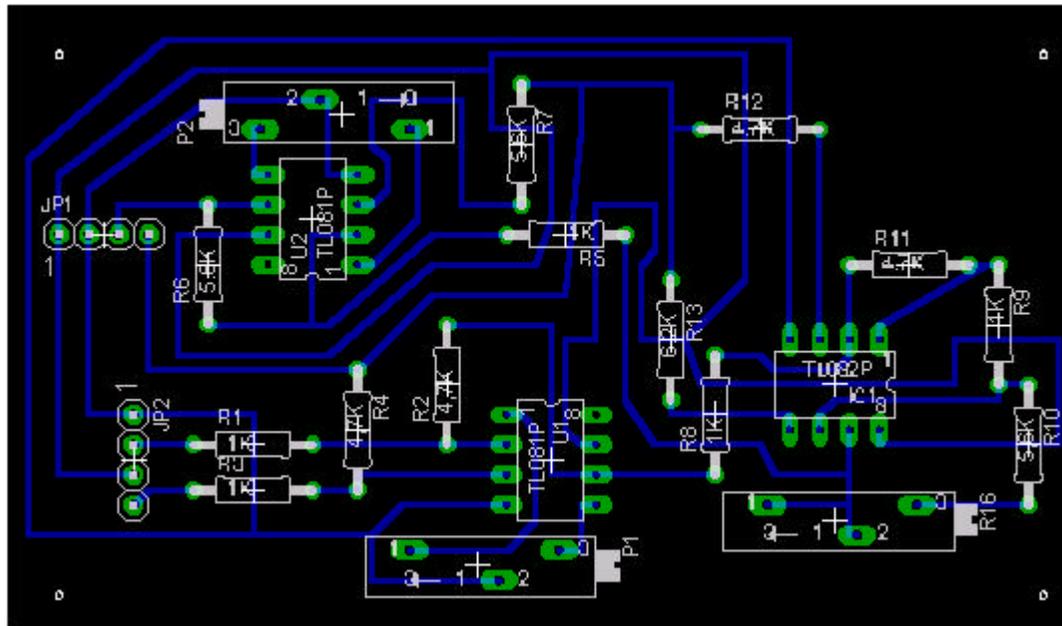
XI. Annexes

1. Amplificateur tube de Pitot

a) Schéma de principe

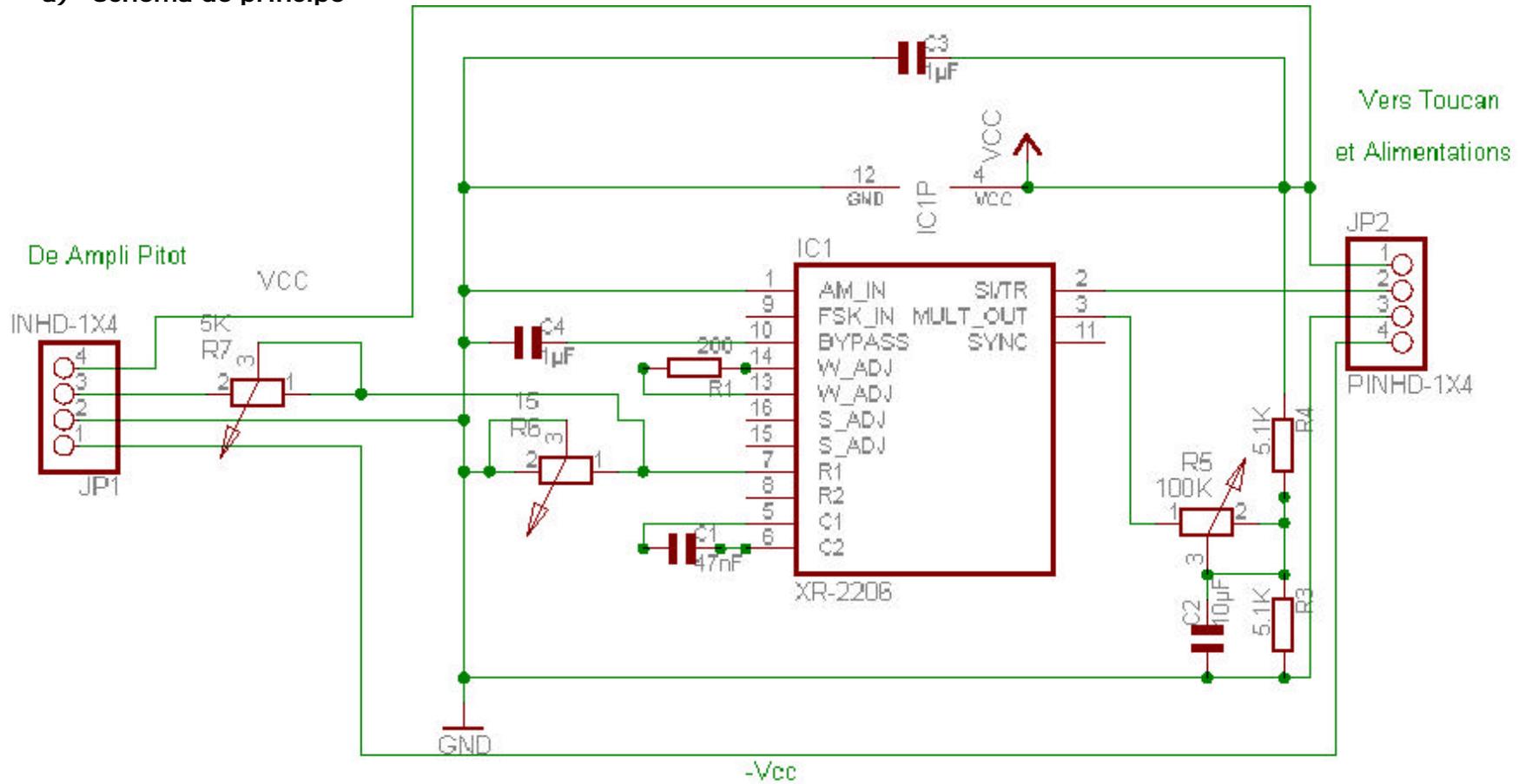


b) Schéma d'implantation



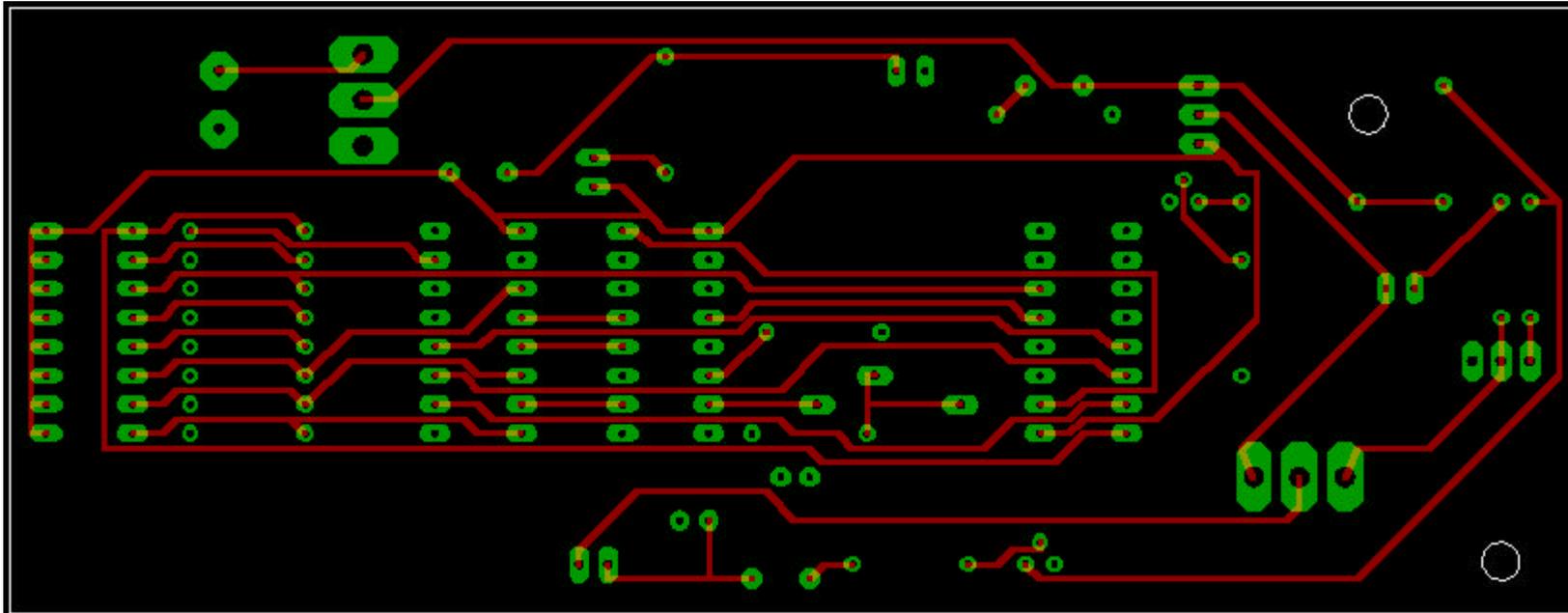
2. Modulateur VCO

a) Schéma de principe

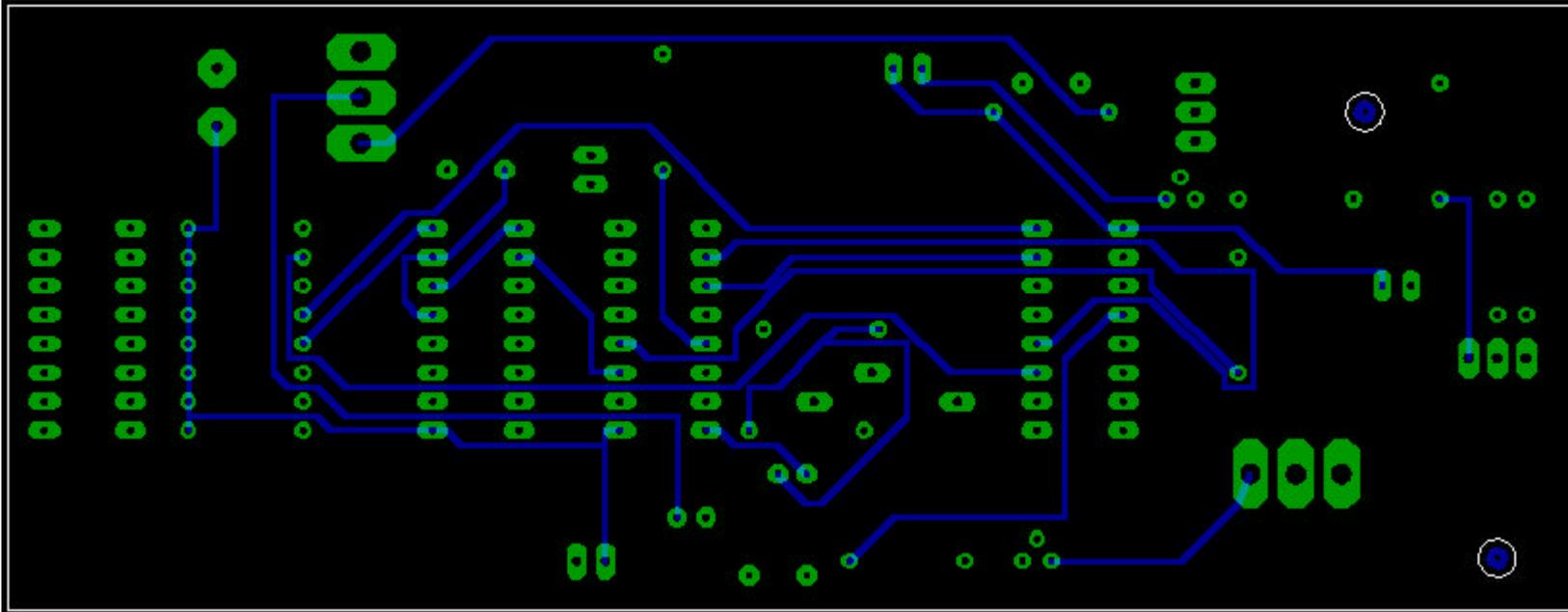


b) Routage

Typon coté composants : (résolution 150dpi)



Typon coté cuivre



c) Implantation des composants :

