

## Vanguard (FX09)

**Membres:** Etienne Camincher, Ossian Bouix, Amaury Couderc, Chloé Cadeac, Lucas Jeannot, Célia Sanz, Anouk Vitis, Julien Chevalier, Quentin Bénot, Valentin Le Coz, Irvin Petit, Raphael Regnier, Lucas Riolland, Chloé Gaillard, Esteban Decline, Emilien Debarge, Hugo Boutheon

**Club :** Aerolpsa

**Année de mise en œuvre :** 2021

### Résumé :

Vanguard est une fusée expérimentale d'environ 1m50 de hauteur pour un diamètre de 105mm. Elle est équipée d'une tuyère annulaire entre la coiffe et le fuselage qui permet d'accélérer l'air qui passe à l'intérieur. L'objectif que la fusée atteigne une grande vitesse en vol (sans dépasser le mur du son) et de mesurer la vitesse de l'air en différents points de la tuyère.



## 1 Introduction

Le projet est financé et développé par les membres d'AeroIpsa. Cependant toute la partie tuyère et acquisition des vitesses était le projet de fin d'études de 4 étudiants en 5<sup>e</sup> année (Etienne Camincher, Ossian Bouix, Amaury Couderc, Sophian Shaita).

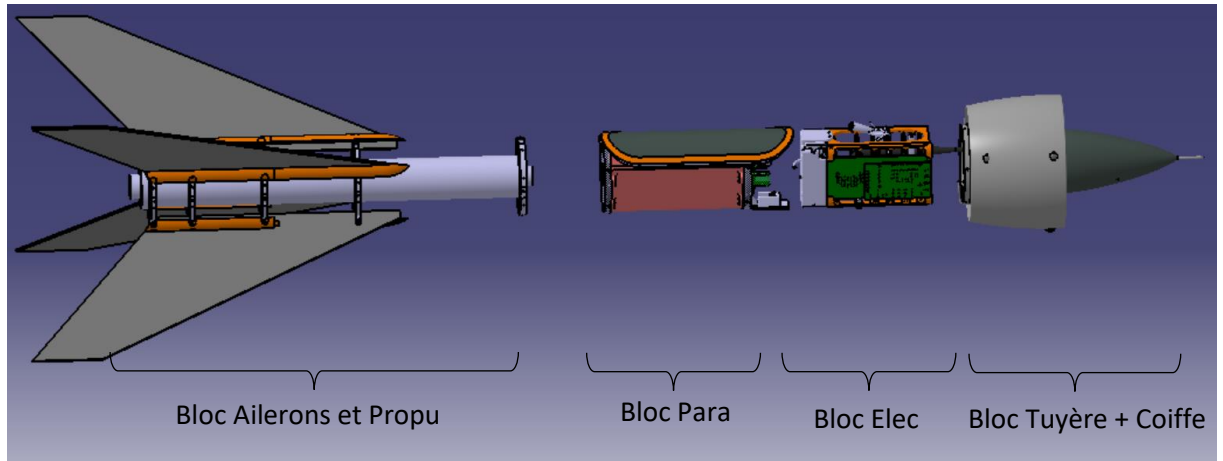
A la fin de l'année le projet comptait une quinzaine de membres actifs dont 7 sont venus au C'Space. Le projet c'est ordonné comme suit :

- Mécaniciens :
  - Etienne Camincher (5<sup>e</sup> année) : Chef de projet
  - Ossian Bouix (5<sup>e</sup> année) : Responsable Mécanique
  - Lucas Jeannot (1<sup>e</sup> année)
  - Chloé Cadeac (3<sup>e</sup> année)
  - Anouk Vitis (1<sup>e</sup> année)
  - Irvin Petit (1<sup>e</sup> année)
  - Raphael Regnier (1<sup>e</sup> année)
  - Hugo Boutheon (1<sup>e</sup> année)
  - Lucas Riolland (3<sup>e</sup> année)
  - Esteban Decline (1<sup>e</sup> année)
  - Emilien Debarge (1<sup>e</sup> année)
  - Valentin Le Coz (1<sup>e</sup> année)
- Electroniciens :
  - Amaury Couderc (5<sup>e</sup> année) : Responsable Electronique
  - Célia Sanz (3<sup>e</sup> année)
  - Chloé Gaillard (1<sup>e</sup> année)
  - Quentin Bénot (3<sup>e</sup> année)
  - Julien Chevalier (3<sup>e</sup> année)

L'idée d'une tuyère telle que celle de Vanguard vient du projet Aksworbuz réalisé à AeroIpsa en 2006 (<https://www.aeroipsa.com/aksworbuz>). Nous avons souhaité « mieux » designer le profil de la tuyère en s'appuyant sur des simulations numériques lors de notre projet de fin d'étude.

## 2 Description mécanique

La fusée a un fuselage en composite sandwich (carbone/mousse/carbone) d'un diamètre interne de 100mm. Le fuselage sert de structure donc on est dans le cas d'une peau porteuse. La particularité de la fusée est la tuyère en aluminium entre la coiffe et le fuselage.



La tuyère étant une géométrie complexe, nous n'avons pas pu utiliser uniquement le stabtraj pour la stabilité. Des simulations ont été faites sur StarCCM+ pour obtenir le Gradient de portance  $Cn\alpha$  et le Centre aérodynamique  $XCp$  de la coiffe et les utiliser dans le stabtraj. Les ailerons ont été faits en aluminium, découpés à la meuleuse d'angle.

La fusée est récupérée grâce à un parachute en croix de  $0,84 \text{ m}^2$ . Il est plié selon le schéma suivant :

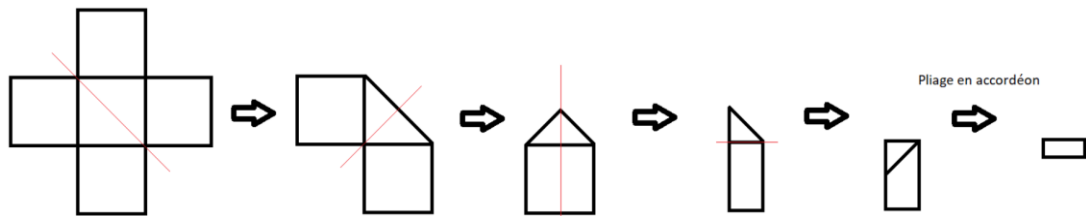


Figure 1 : Pliage du parachute

Les cartes électroniques et les batteries sont supportées par des pièces imprimées en PLA de façon à former un unique bloc qui est fixé au fuselage de la fusée par 8 vis.

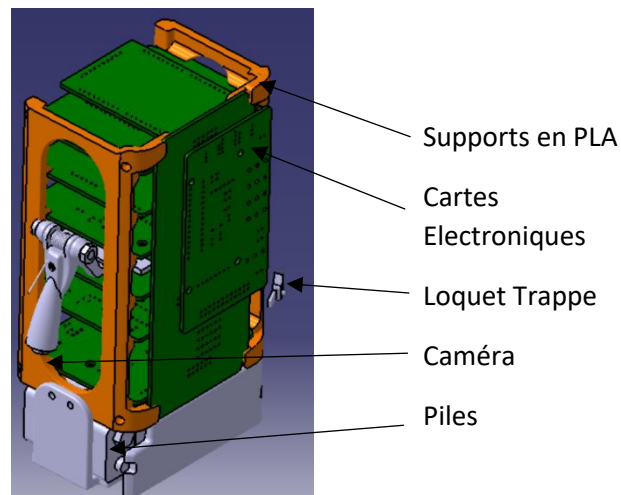


Figure 2 : CATIA du bloc Elec

### 3 Description électronique et informatique

Au sein du système électronique de bord se trouvaient deux cartes expériences : une dédiée à l'expérience tuyère comportant les 8 capteurs de pression et les 4 chaînes d'acquisition des thermocouples (type T) et une carte comportant un altimètre et une IMU afin d'obtenir une trajectographie. Les données de ces capteurs sont enregistrées sur carte SD tout le long du vol.

Une carte gérant la prise de vidéo fut intégrée afin de filmer le vol. Initialement une télémesure était prévue, mais des problèmes d'intégration peu avant la campagne de lancement empêchèrent la mise en œuvre de ce sous-système.

Le système de récupération (séquenceur) détecte le décollage via un jack et actionne le servomoteur du parachute à l'apogée.

La carte d'alimentation du système comporte des capteurs de tension afin de monitorer la consommation des piles 9V durant la phase de préparation au vol.

Tous ces systèmes s'interfacent via une PCB type carte mère qui assure la liaison entre les cartes. Aussi, chaque système (sauf le séquenceur) communique avec la carte IHM afin de surveiller les phases de fonctionnement de l'électronique.

Au total la fusée comporte 9 cartes, et utilise des ATMEGA 328P pour l'électronique.

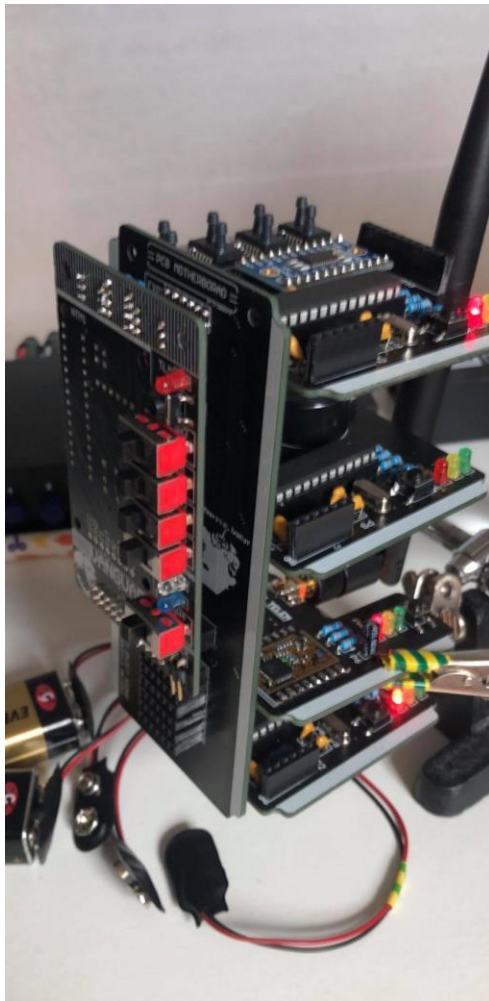


Figure 3 : Bloc elec en cours d'assemblage



Figure 4 : Bloc elec assemblé

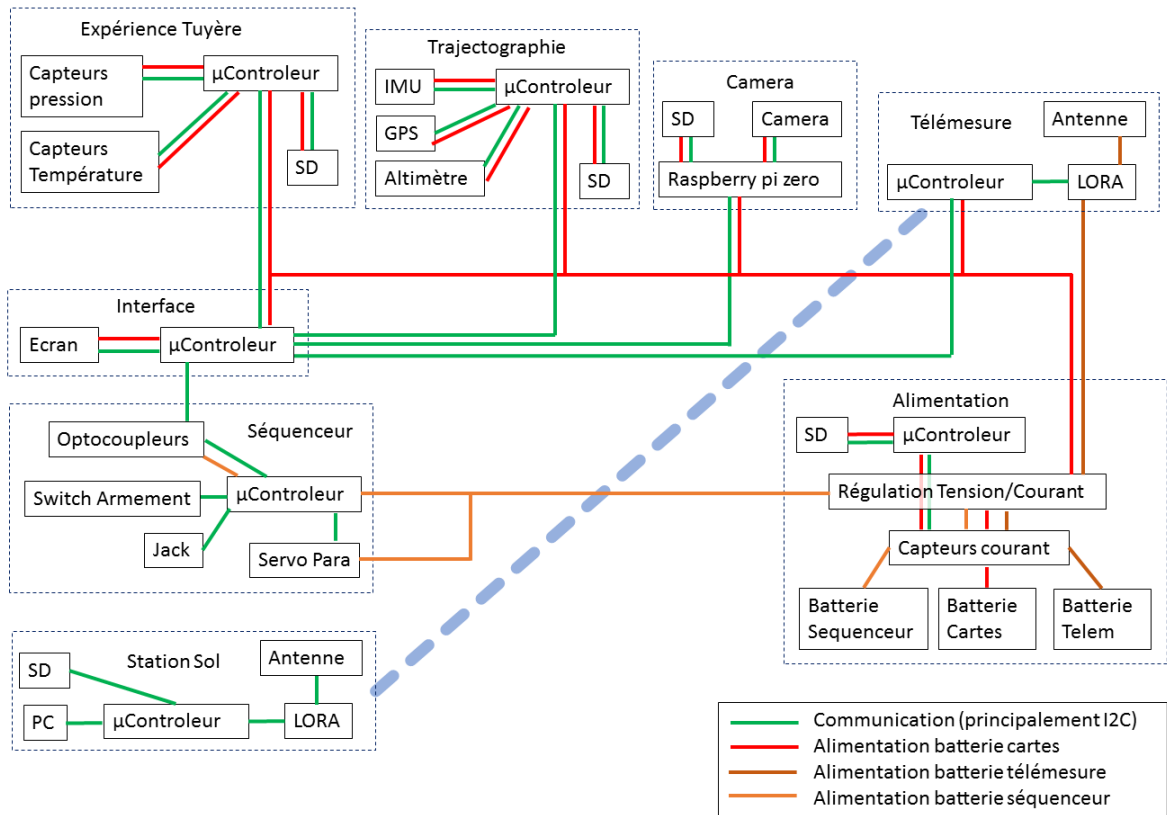


Figure 5 : Schéma électronique de la fusée (avant l'abandon de la télémétrie)



## 4 Expérience

- But de l'expérience

Pour rappel, Vanguard avait pour but d'être une fusée allant à des vitesses légèrement plus faibles que celle du son, mais grâce à une géométrie variable, d'accélérer le flux d'air incident jusqu'à Mach 1 au col de la Tuyère voire Mach 1.2 dans la partie divergente de la tuyère. A ce stade d'avancement, la masse de la fusée n'était pas connue et le moteur choisi était un pro-75.

Après avoir présenté le projet à Planètes sciences, ceux-ci nous ont indiqué que le projet dans l'état ne pourrait être lancé qu'en 2022. À la suite de cela, nous avons pris la décision d'amputer l'expérience afin d'essayer de requalifier le projet pour 2021. A cette période de l'année, la masse de la fusée commençait à se dessiner, et nous nous étions rendu compte qu'elle avait été grandement surestimée, et d'après des calculs, une propulsion plus faible nous aurait permis d'atteindre la vitesse voulue. Nous avons donc décidé de basculer sur une propulsion Pro-54. Après coup, nous nous sommes rendu compte que les précédents calculs n'avait pas pris en compte le coefficient de traînée plus élevé de la fusée.

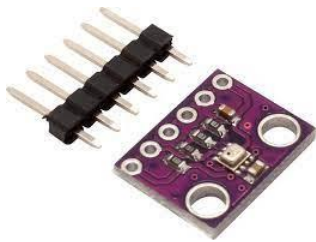
Finalement, le projet a dû voir ses ambitions à la baisse pour pouvoir être réalisé cette année en tant que dernier projet et projet de fin d'étude pour les membres ayant initié le projet.

L'expérience de Vanguard est donc devenue de mesurer une accélération du flux d'air dans sa tuyère annulaire.

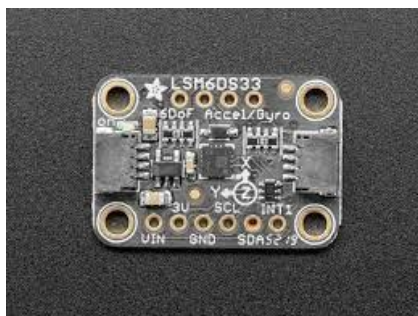
- Capteurs et paramètres mesurés

Afin de pouvoir effectivement bien mesurer le nombre de Mach au sein de la tuyère, il fallait relever trois grandeurs à chaque point de mesure : la température, la pression totale et la pression statique. Aussi, un altimètre et une IMU était présents afin d'obtenir une trajectographie.

- BMP-280 : Altimètre, Baromètre, (Température : Non exploité)



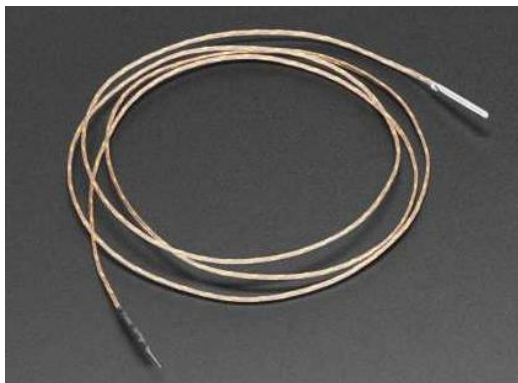
- IMU LSM6DS33 : Accéléromètre, Gyromètre



- 4 Capteurs pression différentiels
- 4 Capteurs pression absolu



- 4 Thermocouples



L'utilisation des capteurs se faisait comme suit :

L'IMU devait enregistrer les accélérations pour que l'on puisse retracer la trajectographie de la fusée, et comparer les vitesses déduites par rapport aux vitesses mesurées avec le Pitot de la coiffe.

Le BMP, devait nous fournir l'altitude et la pression ambiante pour retrouver la pression totale mesurée par le capteur de pression différentielle.

Les capteurs de pression absolu étaient utilisés pour mesurer la pression statique des sondes Pitot à 4 positions : coiffe, convergent, col, divergent.

Les capteurs de pression différentielles mesuraient la pression totale des sondes Pitot par rapport à l'intérieur de la fusée. Ainsi, pression différentielle + BMP nous donnait la vraie pression totale.

Les thermocouples nous ont permis de connaître la température de l'air au passage de la tuyère et ainsi de retrouver la vitesse du son.

- Etalonnage des capteurs

Un étalonnage a été réalisé pour les thermocouples, en effet il fallait une température de référence afin de pouvoir tous les mettre au même niveau. Cet étalonnage a été implémenté

dans la carte expérience et était donc automatique. Concernant les autres capteurs aucun étalonnage n'a été réalisé car les données ont été traitées après le vol.

- Valeurs estimées avant le vol

Pour le vol nous avons considéré que le capteur Pitot du col allait mesurer une vitesse proche du Mach.



## 5 Déroulement du vol

Vanguard a décollé le 23 juillet 2021 vers 11h. Le plafond nuageux était plutôt bas mais puisque la fusée a une trainée importante à cause de sa tuyère, son altitude en fin de propulsion était suffisamment basse ( $\approx 460\text{m}$ ). La fusée a effectué un vol nominal et a atterri coiffe en avant autour de  $11\text{ m/s}$ .

A la récupération nous n'avons pas retrouvé la trappe du bloc parachute qui était pourtant attachée à la fusée par une suspente. Nous soupçonnons la vis qui liait la suspente et la trappe d'avoir traversé cette dernière lors de l'ouverture para tant le choc était violent. Hormis la trappe aucune casse n'est à déplorer, même la coiffe en PLA qui a pourtant plongé dans le sol à tenue.



Figure 6 : Décollage de la fusée



Figure 7 : Récupération de la fusée

## 6 Résultats

(Décollage à  $t = 5s$ )

Accélération :

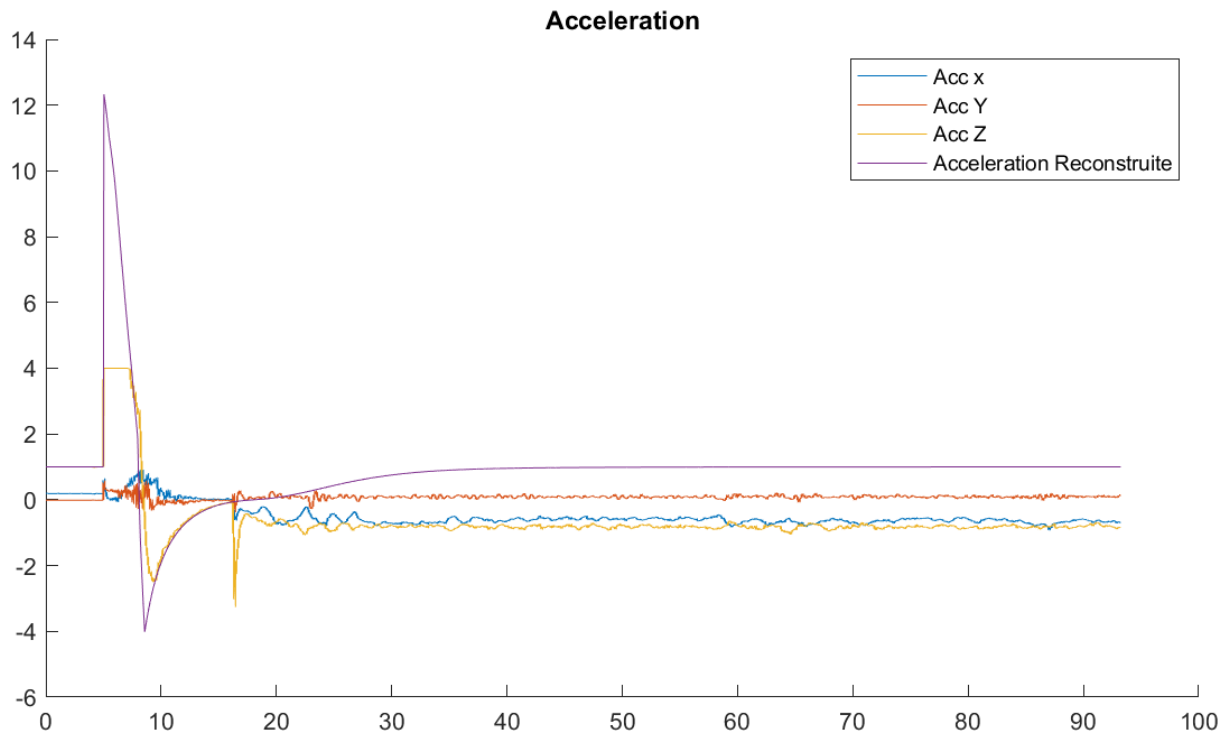


Figure 8 : Représentation des Accélérations

Le capteur de l'accélération Z (en jaune) a été plafonné à 4 G, en effet le capteur IMU possède un réglage qui définit sa mesure maximum (entre 4 et 16 G), plus ce plafond est haut, moins la mesure est précise. L'oubli de changer ce paramètre a entraîné une saturation du capteur, il a donc été nécessaire de recréer la trajectographie avec les données du stabtraj (courbe violette) et de la pression ambiante ce jour-ci. A noter que la courbe violette simulant notre accélération sur les 3 axes ne prend pas en compte l'ouverture du parachute (vers  $t \sim 17.5 s$ ).

Gyroscope :

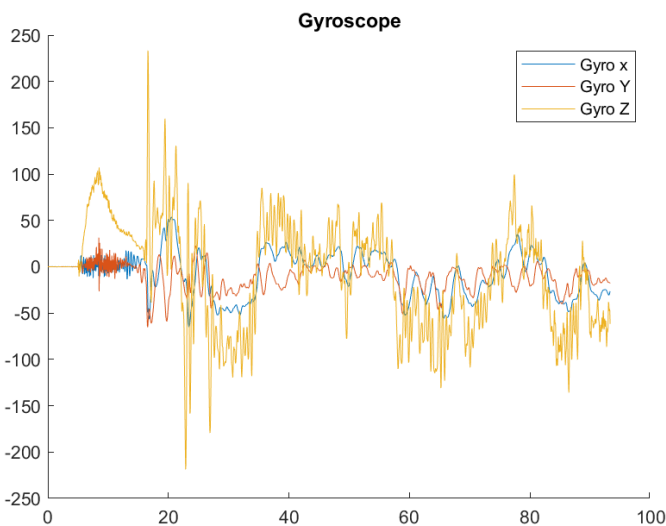


Figure 9 : Données du capteur gyroscope

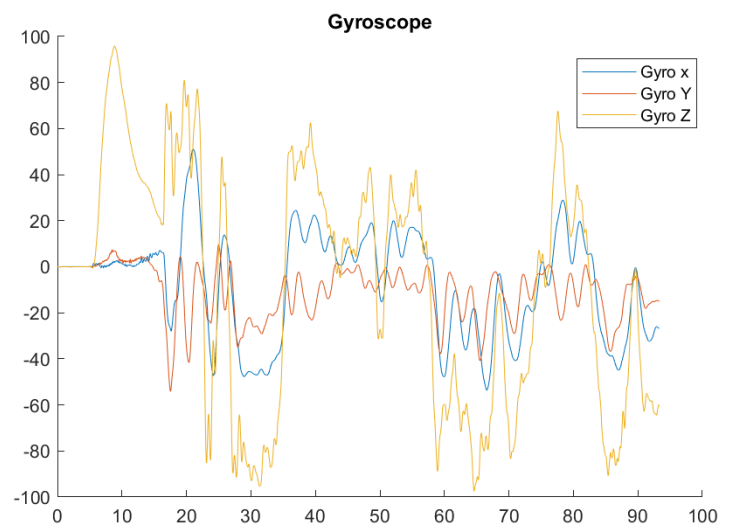


Figure 10 : Données filtrées

Le Gyroscope nous permet de constater 3 phénomènes notables :

- Le décollage à  $t = 5s$ .
- Une rotation importante sur Z pendant  $\sim 10$  secondes qui correspond au roulis de la fusée et qui est proportionnelle à la vitesse de la fusée.
- L'ouverture du parachute, bien visible avec la fluctuation des axes X et Y.

Altitude /Pression (BMP) :

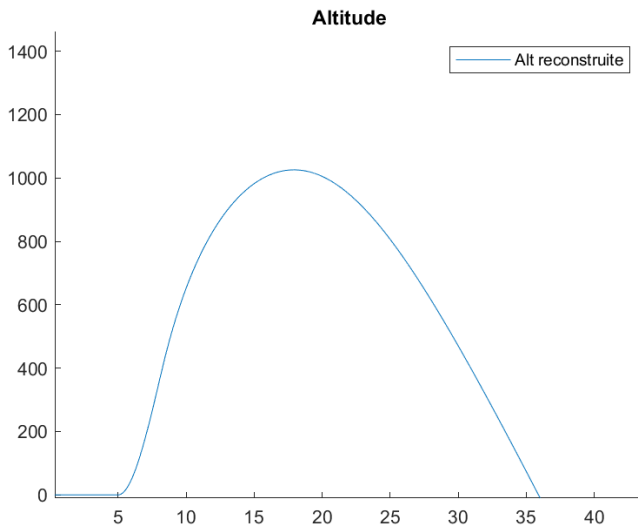


Figure 11 : Reconstruction de l'altitude en vol balistique

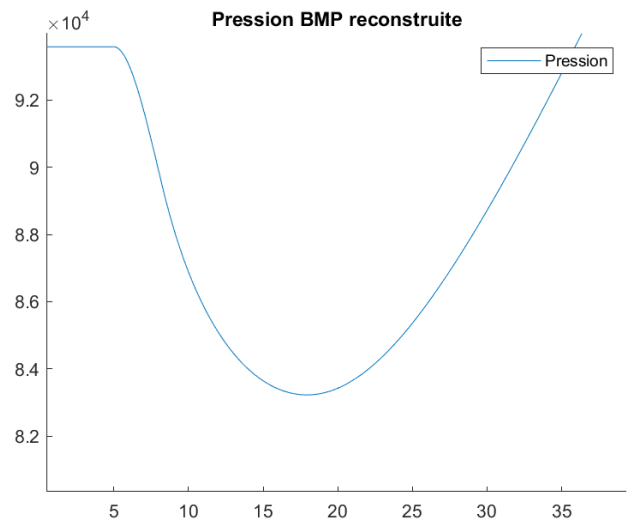


Figure 12 : Reconstruction de la pression ambiante en vol

Le BMP est l'un des capteurs qui n'a pas fonctionné durant le vol. Son importance cruciale nous a obligé à reconstruire les données avec celles fournies sur le stabtraj et la pression ambiante mesurée près de notre lancement (information demandée au club ISS de l'ISPA). Cette reconstruction ne prend pas en compte l'ouverture du parachute qui devrait apparaître à  $t \sim (5 + 11,5)$  s.

Capteurs Pression Différentielle :

Pour tous les graphiques suivants, sauf mention contraire, les indices 1,2,3 et 4 désignent respectivement le capteur placé sur la coiffe, le convergent, le col ou le divergent.

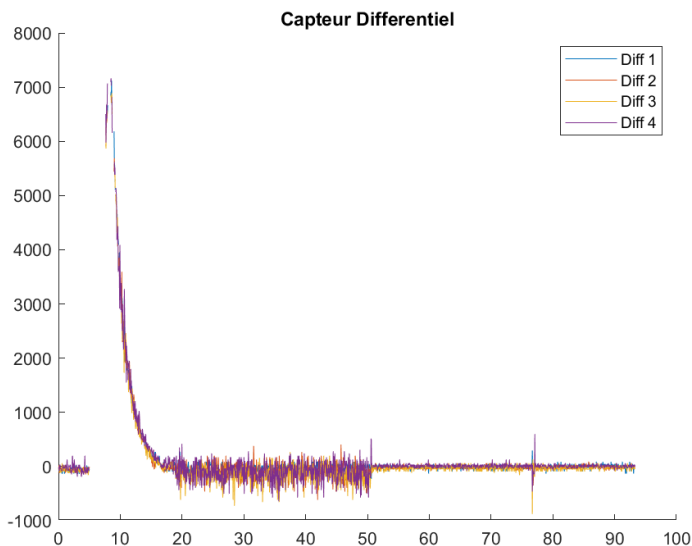


Figure 13 : Données capteur différentiel

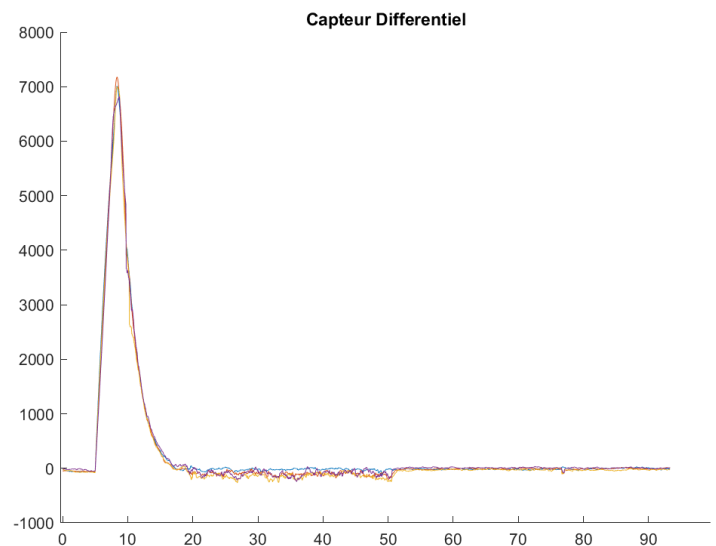


Figure 14 : Données reconstruites des capteurs

Les 4 capteurs de pression différentielle (connectés à la prise de pression totale du Pitot) ont enregistré des valeurs. Malgré cela, le choc du décollage a généré de grosses pertes dans les données au début de la phase propulsée, les capteurs ont cependant repris l'enregistrement près de la phase du vol la plus importante à savoir le moment où la vitesse est maximale. Il nous a alors été possible de reconstruire les données perdues à l'aide d'interpolation et de filtrage. On remarque ainsi que la pression différentielle maximale a été enregistrée au même moment où la pression statique (graphique en dessous) était minimale.

Capteur Pression absolue :

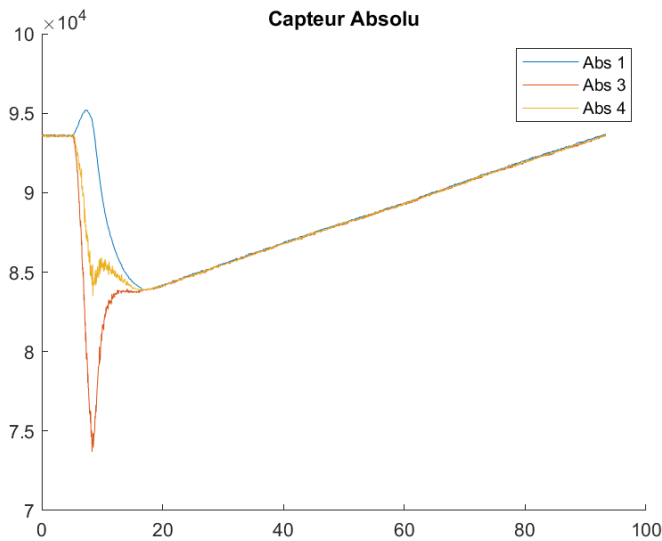


Figure 16 : Données capteurs absolus

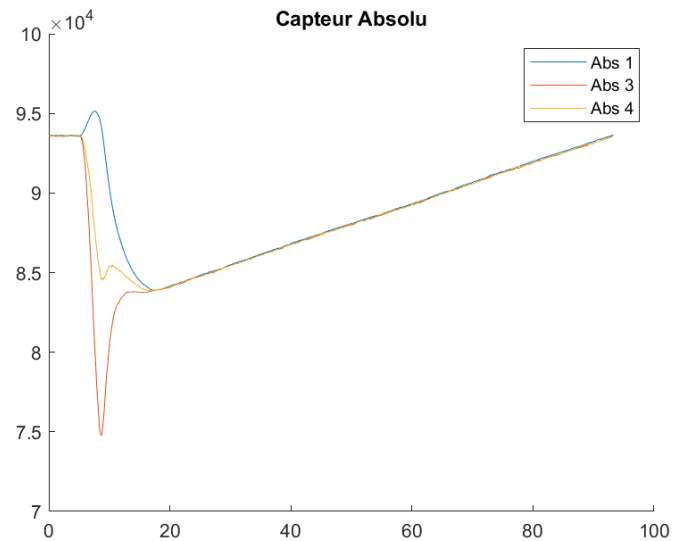


Figure 15 : Données filtrées

Pour rappel, les capteurs de pression absolus étaient fixés sur la prise statique des sonde Pitots. Sur ces 4 capteurs seul 3 ont bien fonctionnés, le 2<sup>ème</sup> (Capteur situé dans le convergent) n'a pas répondu. Néanmoins, les données représentées sont très intéressantes et il est déjà possible d'observer des phénomènes propres à l'expérience. On peut noter une suppression du capteur 1 qui peut traduire d'un dysfonctionnement du capteur.

Thermocouple :

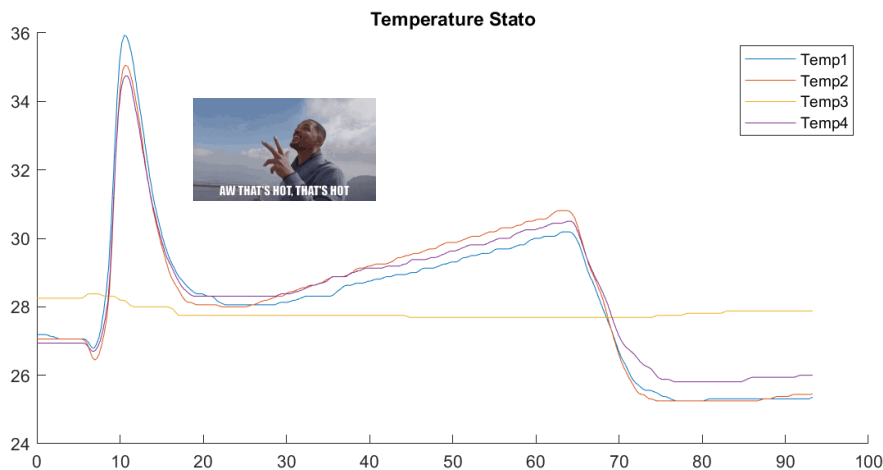


Figure 17 : Données capteur des thermocouples

(À savoir qu'ici le thermocouple 3 était celui installé dans la coiffe, 1-2-4 étaient respectivement : convergent, col, divergent. Cela s'explique car le capteur 3 était défaillant durant les tests et que nous préférons le positionner dans la zone la moins importante. Finalement, et contre toute attente, le thermocouple 3 a bien fonctionné)

Les thermocouples permettent d'observer un phénomène intéressant, celui de l'augmentation rapide de la température ( $\sim 36^\circ\text{C}$  mesuré au convergent) dans la tuyère mais pas au niveau de la coiffe. Cela nous permet de constater que lors de l'accélération de la fusée, la tuyère a réchauffé l'air incident jusqu'à la vitesse maximale et qu'en décélérant, la température est redescendue tout aussi vite pour rejoindre celle de la tuyère. La ré-augmentation des capteurs semble être due à un dérèglement des 3 capteurs car à partir de  $\sim 18$  s, le parachute s'est ouvert, et notre descente était de l'ordre de  $11.5\text{m/s}$ .

Nombre de Mach reconstruit :

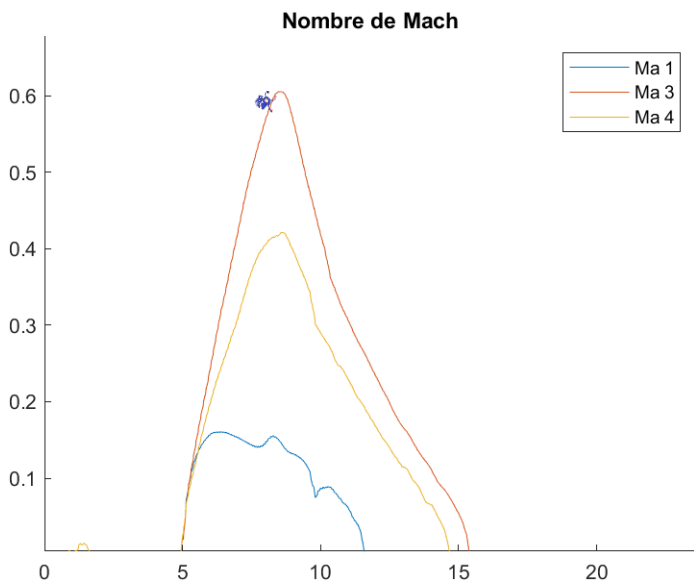


Figure 198 : Reconstruction du nombre de Mach dans la tuyère

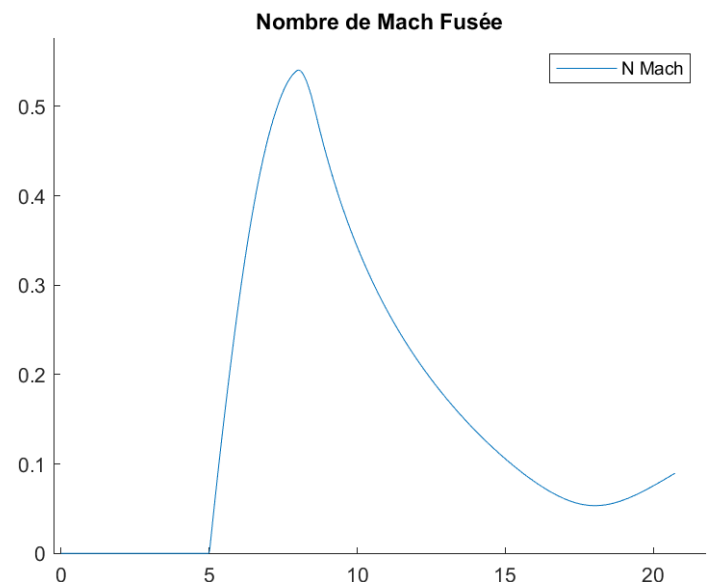


Figure 19 : Reconstruction du nombre de Mach de la fusée

Une fois toutes les données filtrées et reconstruites, il nous a été possible de retrouver le nombre de Mach atteint dans la tuyère. Ainsi, en considérant la trajectographie reconstruite, le nombre de Mach maximal atteint par la fusée était de  $\sim 0.55$  Ma (courbe à droite). Sur le graphique à gauche on peut observer le nombre de Mach mesuré sur 3 des 4 sets de mesures : au niveau de la coiffe, du col et du divergent. En effet, le capteur absolu du convergent n'ayant pas répondu, la reconstruction du Mach est impossible.

Des données observables, on peut constater que le nombre de Mach observé au niveau de la coiffe est erroné, en effet le capteur absolu semblait défaillant et ce graphique confirme cette supposition car la vitesse maximale enregistrée ne correspond pas à la fin phase propulsée. Pour les deux autres courbes, les données semblent beaucoup plus proches des résultats attendus.

On observe une accélération du flux d'air jusqu'à 0.605 Ma dans le convergent. Etant donné que le Mach n'est pas atteint au col, on a une décélération dans la partie divergente.

Vitesse flux d'air déduit :

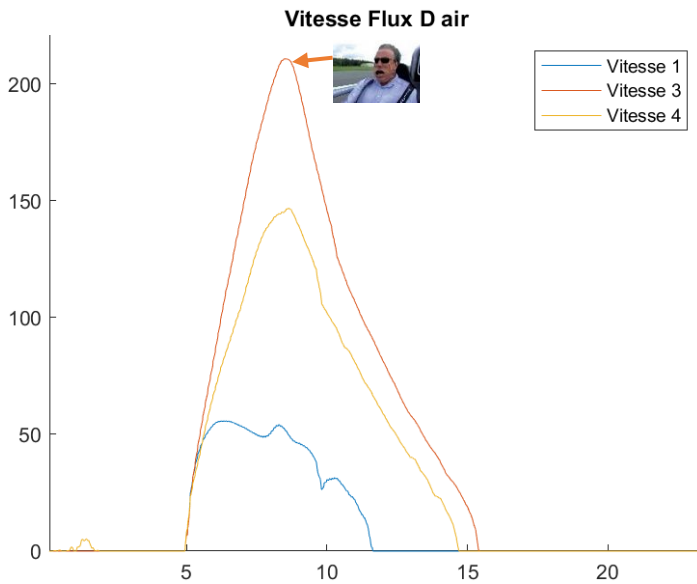


Figure 20 : Vitesse du flux d'air reconstruit

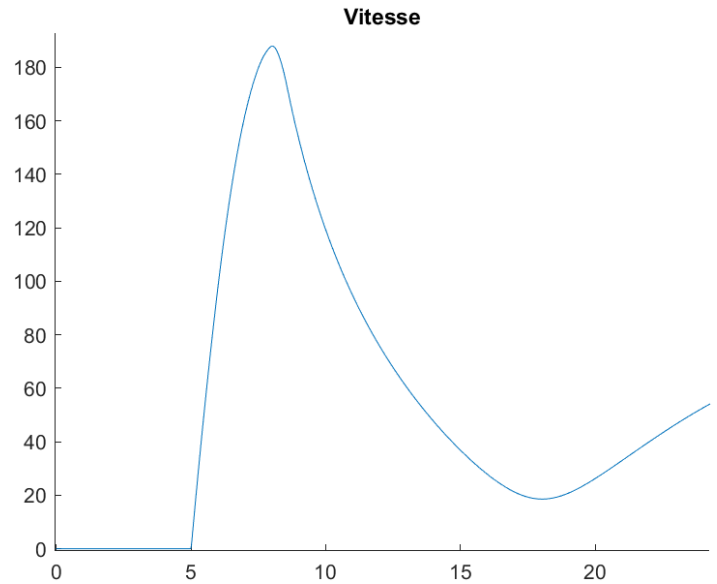


Figure 21 : Vitesse de la fusée

En reprenant la formule liant le nombre de Mach, la température et la vitesse : on peut déduire la vitesse de l'écoulement dans la tuyère. On note ainsi les mêmes phénomènes que ceux liés au nombre de Mach (au-dessus).

Au cours des différents tests effectués au sol, on a remarqué que les thermocouples étaient soumis à un retard proportionnel à la différence de température enregistré. Ainsi, si un phénomène amène un échauffement (ou un refroidissement) très rapide, le thermocouple va minimiser ce phénomène dû à son retard. Après étude du phénomène, nous avons évalué que le  $\Delta T$  non enregistré influençait très peu la valeur de la vitesse (étant donné la présence d'une racine carrée dans la formule).

Nous allons à présent comparer les résultats obtenus expérimentalement à ceux obtenus à l'aide de simulation CFD. Nous allons placer notre modèle dans un écoulement qui correspond à la vitesse maximale atteinte au cours du vol (185 m/s).

Simulation à 185 m/s (0.543 Ma) :

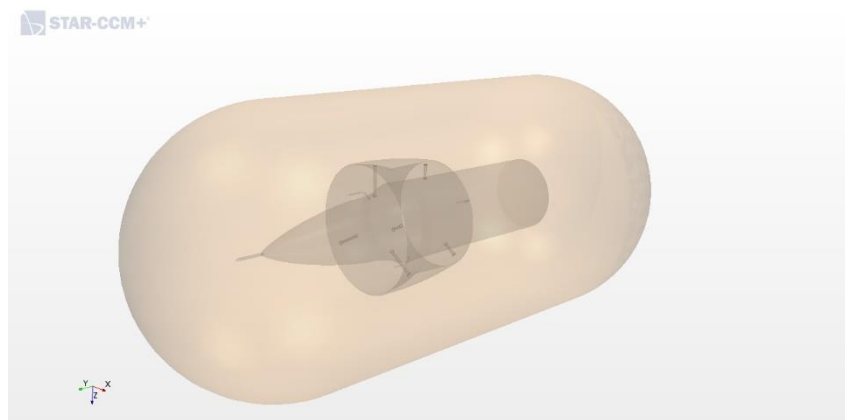


Figure 23 : Modèle CFD



Représentation du Nombre de Mach près du Pitot col :

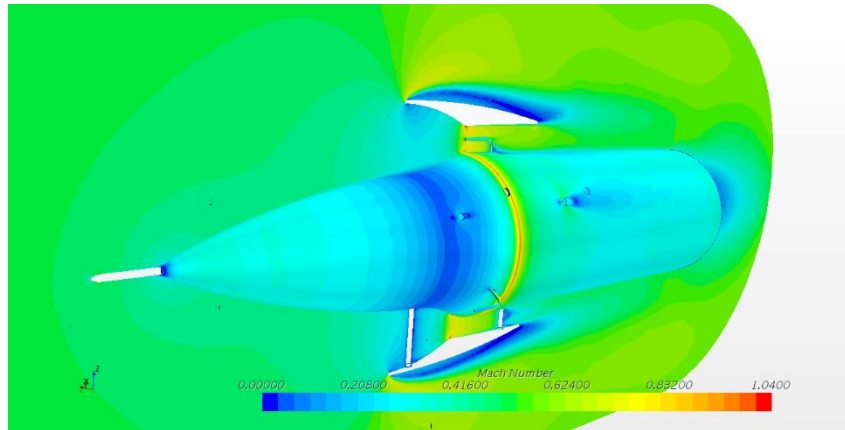


Figure 24 : Représentation nombre de Mach

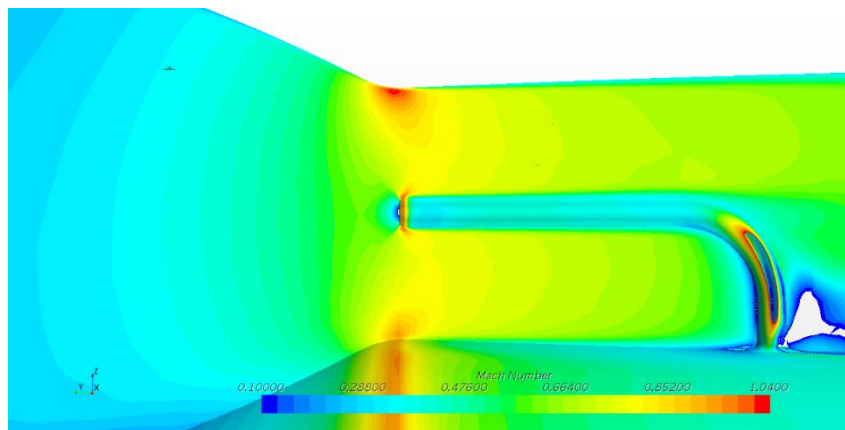


Figure 25 : Représentation du nombre de Mach au niveau du Pitot col

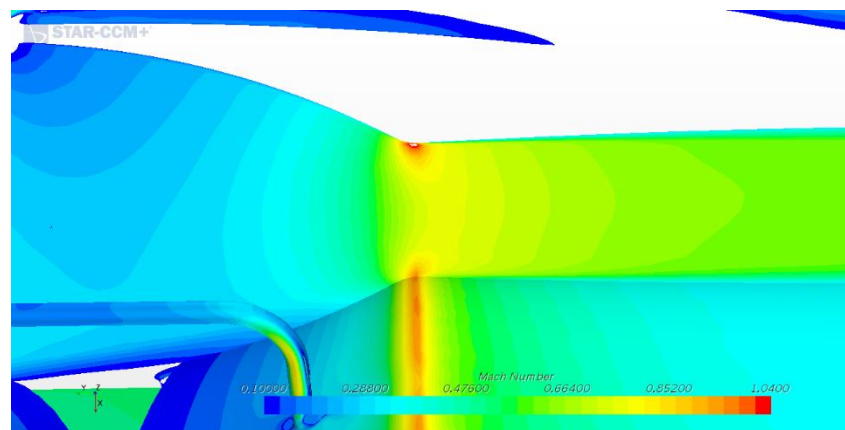


Figure 26 : Représentation du nombre de Mach sans Pitot col

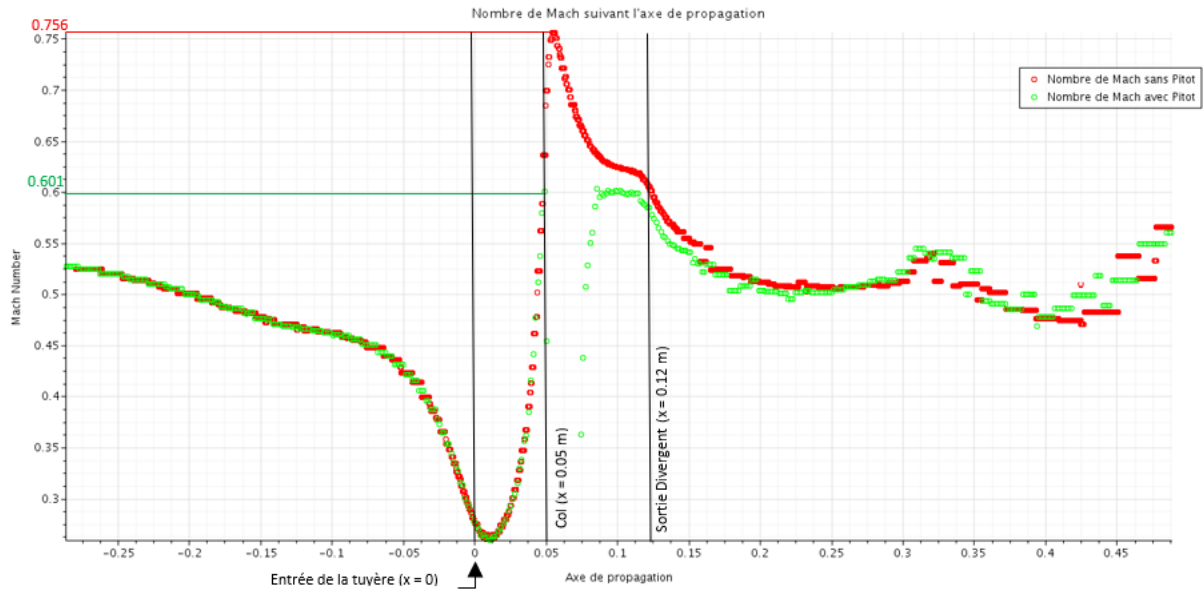


Figure 207 : Comparaison du nombre de Mach avec et sans Pitot au niveau du col

Ces dernières simulations nous ont permis de tirer les conclusions finales de notre expérience. Un tube Pitot est une sonde qui est supposée être non-intrusive dans un écoulement donné, son dimensionnement est donc crucial pour un volume d'écoulement petit. Bien que durant notre année d'étude sur le problème, nous ayons fait tout notre possible pour minimiser les perturbations dans l'écoulement (en diminuant au maximum le volume des structures porteuses et des sondes pitots). Les simulations CFD témoignent que la présence ou non d'une sonde Pitot perturbe de manière non négligeable l'écoulement. Le but de cette étude CFD était donc de vérifier que l'écoulement contraint par une sonde Pitot correspond aux résultats expérimentaux.

En l'occurrence, on arrive bien à une concordance des résultats entre les valeurs reconstruites par les capteurs (figure 18) et ceux obtenus par CFD (tracé vert de la figure 27).

Cette vérification numérique nous permet ainsi de supposer que la vitesse atteinte par le flux d'air sur une trajectoire non perturbée par une sonde correspond au tracé rouge de la figure 19. On a donc probablement atteint une vitesse de l'ordre de 0,75 Ma bien que nous n'ayons mesuré que 0,6 Ma.

## 7 Conclusions

Le bilan du projet est positif dans l'ensemble malgré quelques points d'ombre. Le vol a été nominal et l'expérience a visiblement fonctionné. On a bien réussi à mesurer une accélération du flux d'air dans la tuyère. Cependant nous retenons 4 points négatifs ou regrets :

- Malgré nos efforts les tubes Pitot étaient trop intrusifs dans la tuyère et la vitesse mesurée n'est pas égale à la vitesse de l'air qui ne rencontre pas le Pitot.
- Certains capteurs n'ont pas fonctionné (BMP par exemple) ou ont été mal réglé avant le vol (accéléromètre Z)
- Un problème logiciel a entraîné une mauvaise acquisition de la vidéo embarquée : au final nous n'avons la vidéo que lorsque la fusée a atterri
- Les problèmes de masse et stabilité n'ont pas permis d'atteindre la vitesse désirée au début du projet

Cependant nous retirons de cette année une grande fierté d'avoir mené ce projet à terme. Nous particulièrement fiers de nos « bizuths » pour qui Vanguard était la première fusée et qui se sont accrochés au projet malgré les conditions très particulières de cette année.