



RAPPORT DE PROJET MISTRAL

2025

FAJAL Dimitri

LORIN DE LA GRANDMAISON Alexandre

LORIN DE LA GRANDMAISON Clément



SOMMAIRE

I. Lancement de la fusée	Page 3
1) Déroulement du vol	Page 3
2) Dégâts occasionnés par le vol	Page 3
II. L'expérience principale	Page 4
1) Expérience principale	Page 4
2) Résultats de vol	Page 5
III. Résultats du capteur BMP 288	Page 6
1) La pression	Page 6
2) La température	Page 6
3) L'altitude	Page 7
4) La vitesse	Page 9
IV. Remerciements	Page 13



I. LANCEMENT DE LA FUSÉE

1) DÉROULEMENT DU VOL

La mini-fusée Mistral a été qualifiée le dimanche 6 juin 2025 en début d'après-midi. Son lancement a eu lieu le lundi 7 juin 2025 à 15h32, environ 13 minutes après sa mise en rampe. Il s'agissait du premier lancement du C'Space 2025. Le vol était nominal.

Les conditions météorologiques étaient particulièrement mauvaises. En effet, il y avait des bourrasques de vent atteignant pour certaines 50 km.h^{-1} , ce qui a d'ailleurs occasionné deux arrêts de compte à rebours à H-30s. Une bourrasque de vent a dévié la trajectoire de Mistral dès sa sortie de rampe. Le parachute s'est déployé au bout de 9s, soit un peu plus d'une seconde après l'apogée. Ce décalage est entre autre dû au temps de rotation du moteur pour séparer les demi-ogives. Le parachute s'est déployé correctement et la fusée s'est posée à quelques dizaines de mètres de la rampe, en direction du sud.

La récupération de la fusée s'est déroulée sans encombre, et la fusée était de retour en tente club 20 minutes après sa mise en rampe. Les données se sont bien enregistrées sur la carte SD. Quelques dégâts ont été notés au niveau de la coiffe.

2) DÉGÂTS OCCASIONNÉS PAR LE VOL



Figure 1: Coiffe de Mistral après le vol

Sur les deux demi-ogives, une est intacte et l'autre a été endommagée au point d'être inutilisable. En effet, la partie supérieure est cassée et l'endroit où la charnière était vissée est également cassée. De plus le moteur, bien qu'enfoncé sur 3cm dans la pièce orange, est parvenu à en sortir et s'est coupé en deux (il manque la moitié comprenant des engrenages et la came servant à verrouiller l'ogive). Malgré tout, il fonctionne encore, bien qu'il soit désormais inutilisable.

Aucune pièce manquante n'a été retrouvée en ZAS. Pour la demi-ogive imprimée en 3D, les cassures sont nettes et situées à proximité de vis (charnières, bague de fixation moteur). Il s'agit donc de points plus fragiles.



II. L'EXPÉRIENCE PRINCIPALE

1) EXPÉRIENCE PRINCIPALE

L'expérience principale consistait en une mesure de la force exercée sur la sangle principale du parachute à l'aide d'un dynamomètre « fait maison ».

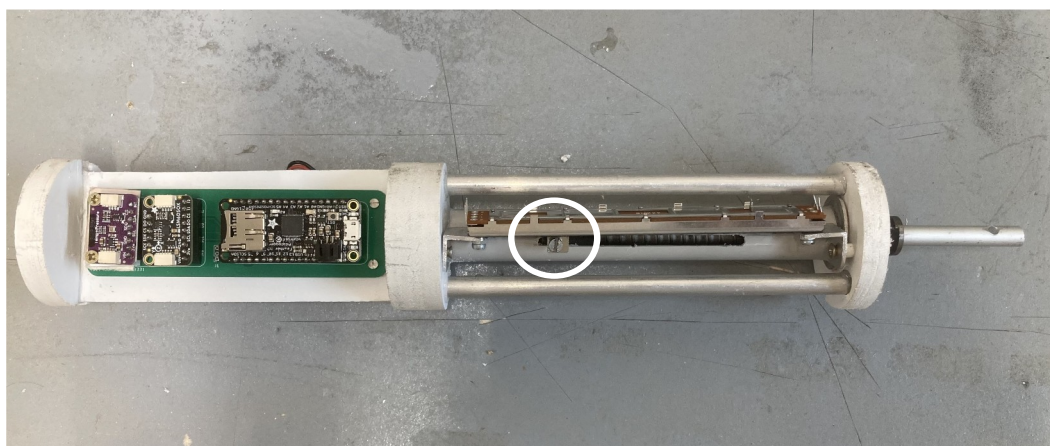
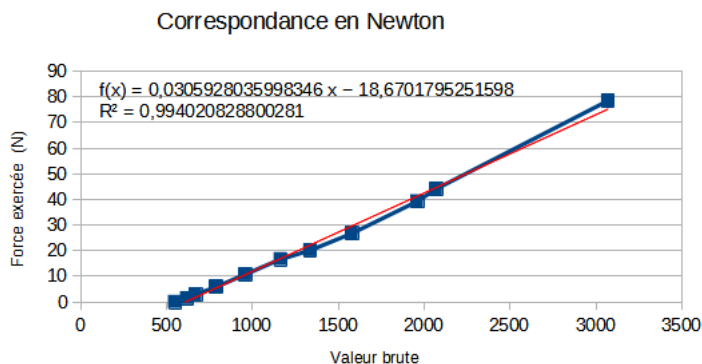
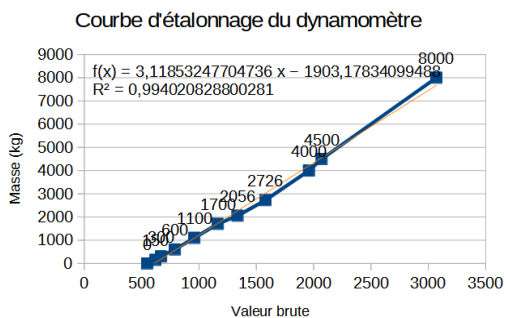


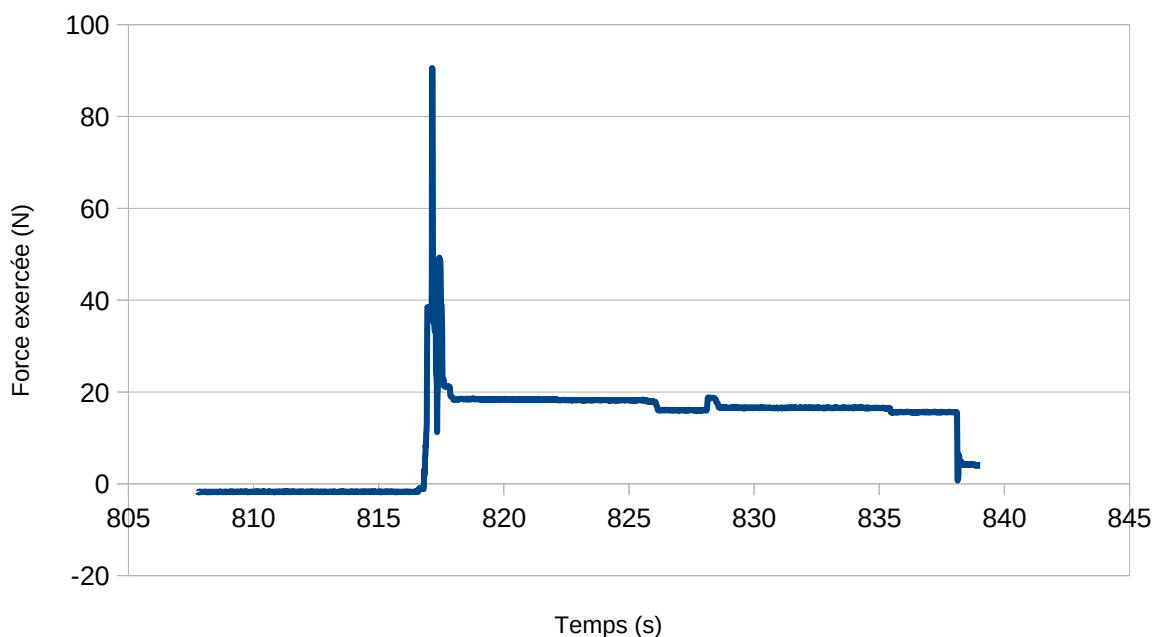
Figure 2 : Bloc expérience de Mistral

La sangle principale du parachute est accrochée à la tige métallique (à droite). Lorsque le parachute se déploie, la tige est tirée, ce qui comprime le ressort maintenu en place dans le cylindre gris. La tige est attachée à un potentiomètre linéaire (cercle blanc), et en se déplaçant, une variation de tension se produit. La valeur brute renvoyée par le potentiomètre linéaire est comprise entre 0 et 4096. Un étalonnage a permis d'établir la correspondance entre la valeur brute et la force exercée. Cet étalonnage consistait en la suspension d'objets dont la masse (et donc le poids) était connue à la tige. La lecture de la valeur brute était ensuite effectuée sur un ordinateur.

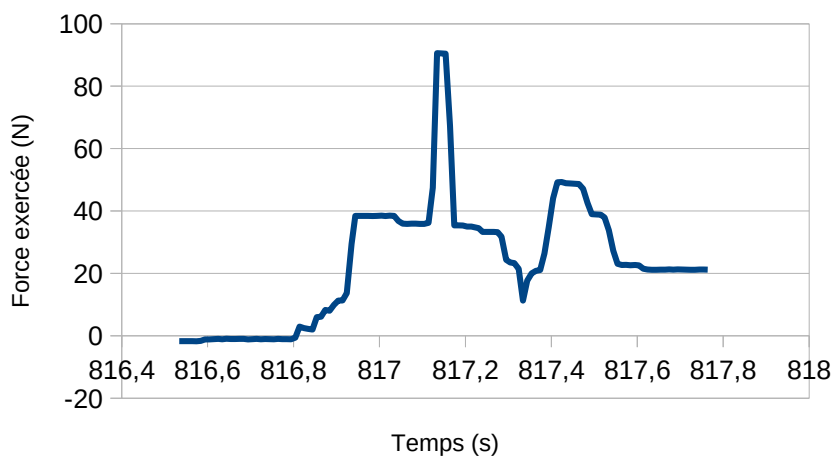




2) RÉSULTATS DE VOL



La force maximale exercée sur la suspenste du parachute était de 90N au moment du déploiement du parachute. Il y a ensuite eu une stabilisation de la force exercée vers 17N, ce qui correspond au poids de la fusée avec le propulseur vide. La force indiquée par le StabTraj était de 50,8N et la force testée au contrôle pour vérifier la solidité des suspentes était de 50N. Une telle différence entre théorie et pratique peut s'expliquer par l'ouverture tardive de l'ogive (environ deux secondes après l'apogée) et montre qu'il est important de s'assurer que les suspentes résistent à des forces supérieures à celles indiquées sur StabTraj.



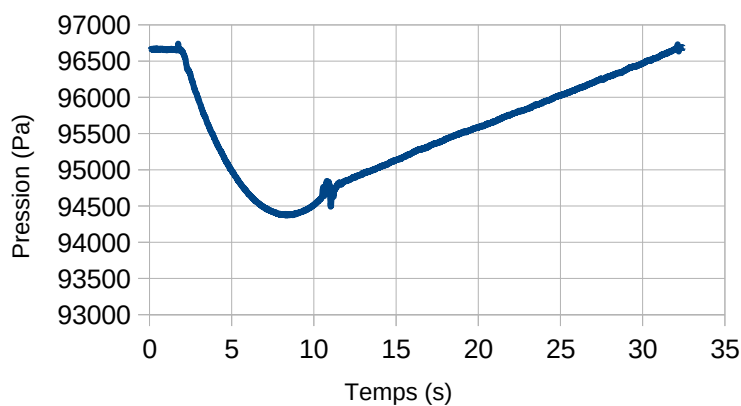
On constate qu'il y a eu un pic à 90N pendant environ 30ms d'après les données enregistrées, puis la force exercée a fortement diminué pour atteindre 10N. Un second pic à 50N est présent. Il est probablement dû à un rebond de la fusée en vol.



III. RÉSULTATS DU CAPTEUR BMP 288

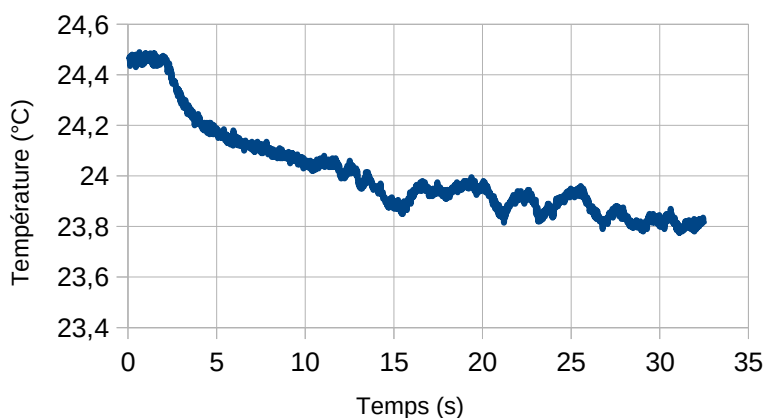
La fréquence d'échantillonnage de tous les capteurs (expérience principale comprise) était de 10ms.

1) LA PRESSION



La courbe de la pression en fonction du temps obtenue est très nette. Elle a permis de déduire l'altitude de la fusée. La valeur de référence pour la pression qui a été utilisée était 96655,93Pa. C'était la première valeur enregistrée par le capteur à l'allumage.

2) LA TEMPÉRATURE



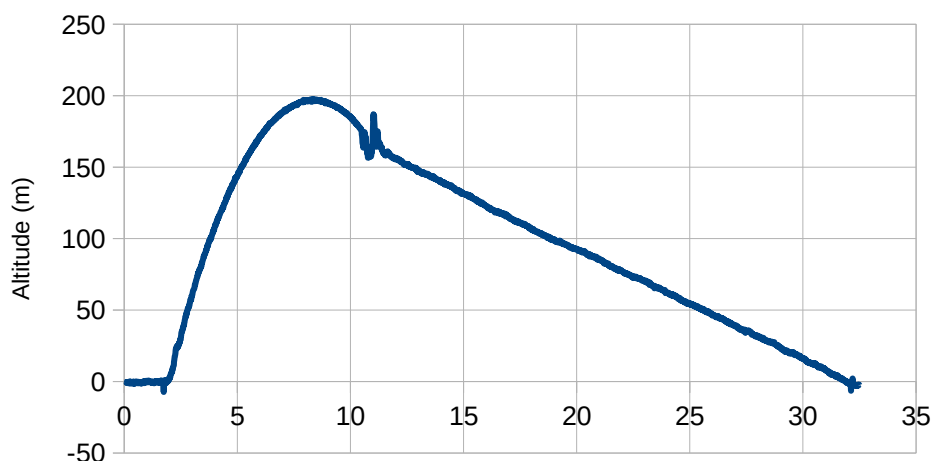
La température pendant le vol était comprise entre 24,4°C et 23,8°C. Cela a permis de choisir une valeur cohérente pour la masse volumique de l'air lors du calcul de l'altitude. La masse volumique de l'air retenue était de 1,18kg.m⁻³.



3) L'ALTITUDE

Pour calculer l'altitude de la fusée au cours de son vol, la loi fondamentale de la statique des fluides a été utilisée.

Sachant que $P_i - P_A = p_{\text{air}} \cdot g \cdot (z_A - z_i)$, avec $P_i = 96655,93\text{Pa}$ (pression initiale) et $z_i = 0$ (altitude initiale de la fusée), on en déduit que l'altitude z_A de la fusée est égale à : $z_A = (P_i - P_A) / (p_{\text{air}} \cdot g)$. La formule qui a été employée était donc : $z_A = (96655,93 - P_A) / (1,18 \cdot 9,81)$.



Culmination, Apogée	7,3 s	254 m
Ouverture parachute fusée	8,0 s	252 m

Informations fournies par le StabTraj

L'apogée a eu lieu 6,5s après le décollage, soit 0,8 seconde de moins que ce qui était prévu dans le StabTraj. De plus, le parachute ne s'est déployé qu'au bout de 8,5s environ, soit un peu plus d'une seconde de plus que ce qui était indiqué par le StabTraj. Cela explique notamment la différence entre l'effort théorique subi par les suspentes du parachute et l'effort réel qui a été constaté.

La différence la plus notable est celle entre l'altitude théorique que la fusée devait atteindre, estimée à 254m, et l'altitude réellement atteinte, environ 200m (197m précisément). Une différence aussi importante peut s'expliquer par le temps de vol réel plus court que le temps de vol théorique (30s au lieu de 40s) et par une prise en compte insuffisante des forces de frottements liées à l'air. Il a également été remarqué que, en sortie de rampe, une bourrasque de vent a dévié Mistral de sa trajectoire prévue.



Figure 3: Mistral en sortie de rampe



Figure 4: Déviation par une bourrasque de vent

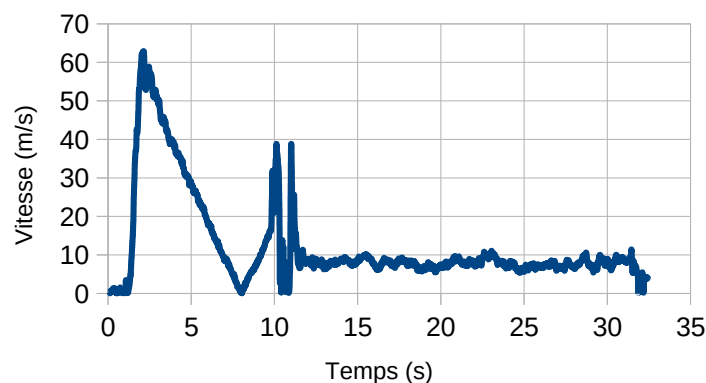
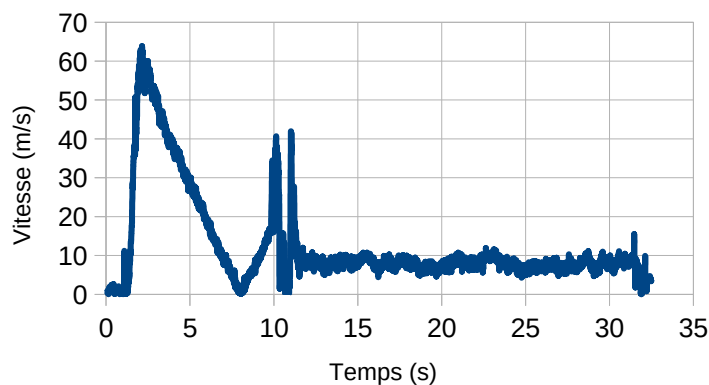


4) LA VITESSE

Pour calculer la vitesse, l'altitude a été utilisée. Le principe était le suivant : en calculant $(z_A - z_B) / (t_A - t_B)$, avec z_A et z_B , deux altitudes atteintes par la fusée, et t_A et t_B , les instants lors desquels les altitudes ont été atteintes, on obtient la vitesse moyenne de la fusée entre les points A et B.

Cependant, plusieurs problèmes se sont posés. Tout d'abord, du fait de la fréquence d'échantillonnage rapide (toute les 10ms), prendre deux points consécutifs donnait des aberrations (vitesse de pointe de 700m.s^{-1} par exemple). Il a donc été choisi de prendre la vitesse moyenne de la fusée entre deux points dont l'altitude a été enregistrée à un intervalle de 650ms. En effet, prendre un intervalle de temps supérieur commençait à donner des vitesses trop basses, tandis que prendre un intervalle de temps inférieur commençait à donner des aberrations de plus en plus marquées.

Du fait de la fréquence d'échantillonnage rapide, du bruit était présent, et la courbe de la vitesse de la fusée en fonction du temps initialement obtenue était très perturbée. Une moyenne 3 points de la pression a donc été effectuée. L'altitude a ensuite été recalculée à partir de ces nouvelles valeurs de pressions. Une moyenne 3 points de l'altitude a ensuite été effectuée. La vitesse a ensuite été recalculée à partir de ces nouvelles valeurs d'altitude. La courbe obtenue était plus « lisse ».

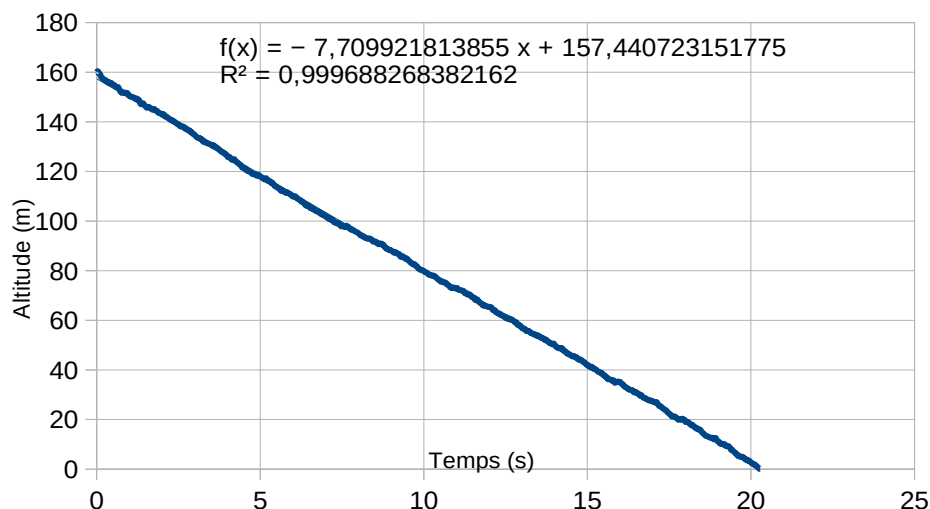
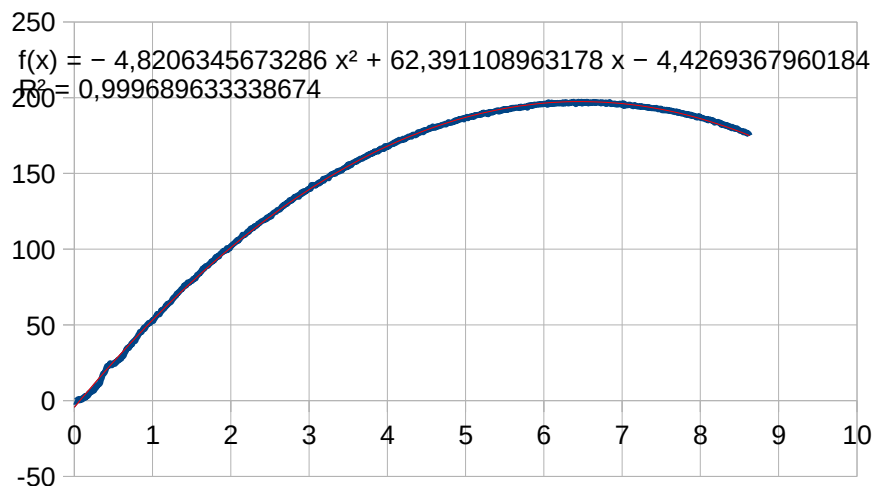




En haut, la courbe n'a pas été corrigée, tandis qu'en bas, un traitement des données a été effectué. On constate que la vitesse maximale atteinte par la fusée était de 63m.s^{-1} contre les 71m.s^{-1} indiqués par le StabTraj. La différence provient ou bien d'imprécisions liées à la méthode de calcul, ou bien d'une prise en compte insuffisante des forces de frottements. Toutefois, cette vitesse de 63m.s^{-1} concorde avec l'altitude moins élevée que prévue qui a été atteinte.

Le déploiement du parachute ayant perturbé la mesure de la pression, le calcul de l'altitude à ce moment là est faussé. Par conséquent, la vitesse calculée de la fusée lors du déploiement du parachute est probablement erronée.

Une autre idée pour calculer la vitesse était d'établir l'équation de la trajectoire de la fusée pour la phase sans parachute et de faire de même pour la phase sous parachute.



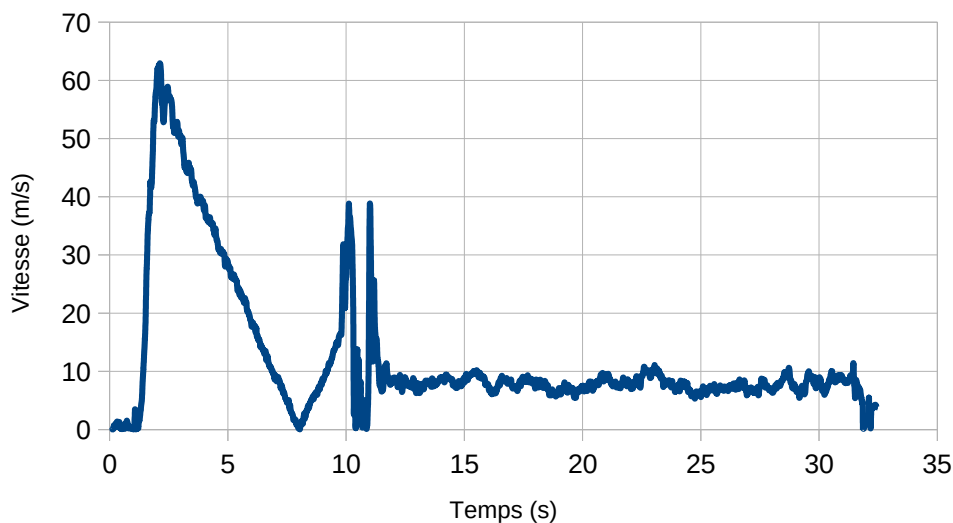
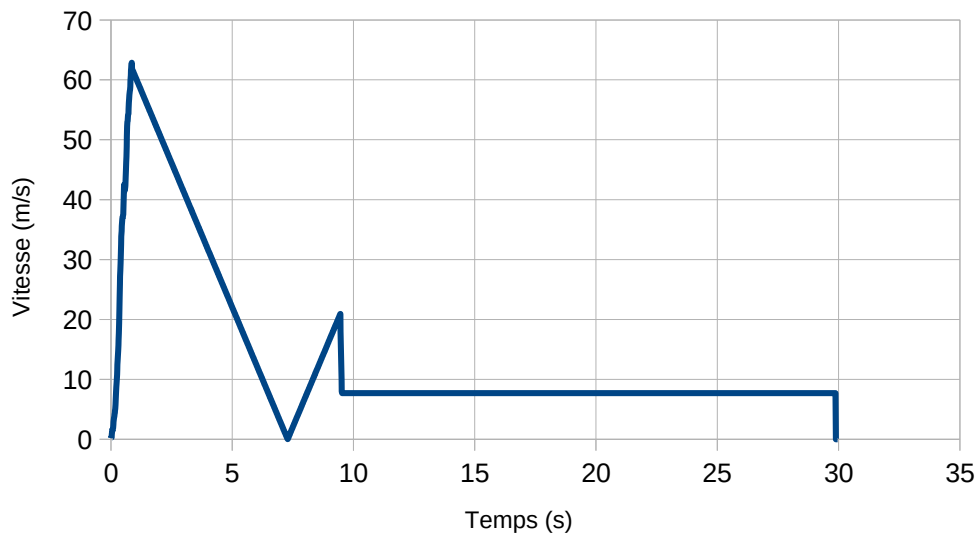


La vitesse de la fusée correspond à la limite lorsque le temps tend vers 0 du quotient $\Delta h / \Delta t$ (h étant l'altitude de la fusée), ce qui correspond à la dérivée de l'altitude de la fusée en fonction du temps. Ainsi, en établissant l'équation de la trajectoire de la fusée, et en dérivant la fonction obtenue, il est possible d'obtenir une fonction donnant la vitesse de la fusée pour chaque phase.

Pour la phase sans parachute, $v_{\text{fusée}} = -9,64t + 62,39$

Pour la phase sous parachute, $v_{\text{fusée}} = 7,7 \text{ m.s}^{-1}$

Dernière étape : raccorder les deux fonctions sur un même graphique, et ajouter la phase où la fusée accélère, à partir de la vitesse calculée avec la première méthode, celle-ci n'ayant pas pu être calculée avec cette deuxième méthode.





On observe donc le découpage suivant :

- la fusée accélère et atteint une vitesse de pointe de 63m.s^{-1} (ce résultat est d'ailleurs identique sur les deux graphiques).
- la fusée ralentit jusqu'à ce que sa vitesse soit nulle : ce qui correspond à l'apogée.
- la fusée accélère à nouveau : le parachute n'est pas encore sorti.
- la vitesse de la fusée reste constante et vaut $7,7\text{m.s}^{-1}$: le parachute est déployé. Cette valeur est d'ailleurs cohérente avec le StabTraj qui indiquait une vitesse de descente de $7,8\text{m.s}^{-1}$.
- la vitesse de la fusée est nulle : la fusée s'est posée.



IV. REMERCIEMENTS

En tant que chef de projet, il s'agissait de ma dernière fusée avant mon entrée en études supérieures.

Je tenais donc à remercier le CNES et Planètes Sciences pour l'organisation du C'Space 2025 ainsi que le 1^{er} RHP pour leur accueil sur le camp de Ger.

Merci particulièrement à Roger et Sylvain pour leur investissement dans le club fusée AcelSpace, leur aide pour surmonter les difficultés rencontrées et les conseils apportés tout au long de l'année.

Merci également aux membres de mon équipe sans qui la réalisation de l'électronique pour les expériences (Dimitri) et la fabrication de la fusée n'auraient pas pu être achevées à temps.

Clément Lorin de la Grandmaison