

Document de définition - ARDAN

AEROIPSA - Novembre 2024 - Version 1.0



TABLE DES MATIERES

0.	GENERAL.....	4
1.	EXPERIENCE.....	5
2.	VECTEUR.....	7
2.1	STRUCTURE MECANIQUE.....	8
2.1.1	ARCHITECTURE.....	8
2.1.2	SECTION SUPERIEUR.....	8
2.1.3	SECTION INFERIEUR.....	9
2.2	ELECTRONIQUE.....	11
2.2.1	SEQUENCEUR.....	11
2.2.2	EXPERIENCE COIFFE.....	12
2.2.3	EXPERIENCE AILERON.....	13
2.2.4	BALISE RADIO SECONDAIRE.....	15
2.3	RECUPERATION.....	16
2.3.1	SEPARATION.....	16
2.3.2	PARACHUTE.....	17
2.4	PERFORMANCE ET STABILITE.....	18
2.4.1	PERFORMANCE.....	18
2.4.2	STABILITE.....	18
3.	ORGANISATION.....	19

TABLES DES FIGURES

Figure 1 : Dégradation de l'état de surface des ailerons de Fast Forward.	5
Figure 2 : Instrumentation de la coiffe.	6
Figure 3 : Instrumentation des ailerons.	6
Figure 4 : Géométrie	7
Figure 5 : Architecture	8
Figure 6 : Pointe et coiffe (avant découpe)	8
Figure 7 : Coupleur	9
Figure 8 : Fuselage	9
Figure 9 : Cloison récupération.....	9
Figure 10 : Bagues de fixation et culot.....	10
Figure 11 : Ailerons	10
Figure 12 - Séquenceur.....	11
Figure 13 : PCB Expérience	12
Figure 14 : Synoptique simple de l'expérience aileron.....	13
Figure 15 : CAO Instrumentation aileron.....	14
Figure 16 PCBs ailerons et distribution.....	14
Figure 17 : Système CO2.....	16
Figure 18 : Données parachute	17
Figure 19 : Trajectographie.....	18
Figure 20 : Stabilité	18

0. GENERAL

Ce projet n'est pas dans la continuité d'un ancien projet.

ASSOCIATION	AEROIPSA
PROJET	ARDAN
CHEF DE PROJET	Vincent FAUQUEMBERGUE*
MEMBRES	Julien DENAT* Alicia HEDDADJ* Malo AMARANTI Alexis PAILLARD Paul KREBS Anthony APPRELON Elouan FRAUDET

* Membres du Projet Master IPSA

1. EXPERIENCE

L'objectif principal du projet est de mesurer l'échauffement aérodynamique de la coiffe conique et du bord d'attaque des ailerons en régime supersonique. Ce projet est en lien avec notre Projet Master IPSA : ET45 - Étude de l'échauffement aérodynamique des coiffes coniques et bords d'attaque en régime supersonique. Ce projet a donc pour objectif de valider expérimentalement nos résultats théoriques, obtenus par CFD et méthode analytique.

En régime supersonique, l'échauffement aérodynamique peut devenir suffisamment important pour dégrader l'état de surface ou compromettre l'intégrité de la structure. Ce phénomène d'échauffement a été observé lors du premier vol de Fast Forward¹ (AEROIPSA 2022) en octobre 2023, la vitesse atteinte était de Mach 2. Lors de ce vol la dégradation a été uniquement esthétique.

Les structures composites sont particulièrement susceptibles aux dégradations par échauffement : les résines époxydes, fréquemment utilisées pour ces structures, perdent leur rigidité entre 80 et 200°C. Cette perte peut alors mener à une délamination totale ou partielle, une perte d'intégrité structurelle, modifiant alors les caractéristiques aérodynamiques du vecteur ou pire, menant à sa perte.

La pointe est instrumentée d'un capteur de pression absolue et de température pour la mesure de la pression totale. La section en fibre de verre est instrumentée de 8 thermocouples (4 surface externe, 4 surface interne). Le bord d'attaque des ailerons est instrumenté avec 3 thermocouples.



Figure 1 : Dégradation de l'état de surface des ailerons de Fast Forward.

¹ <https://www.aeroipsa.com/fastforward>

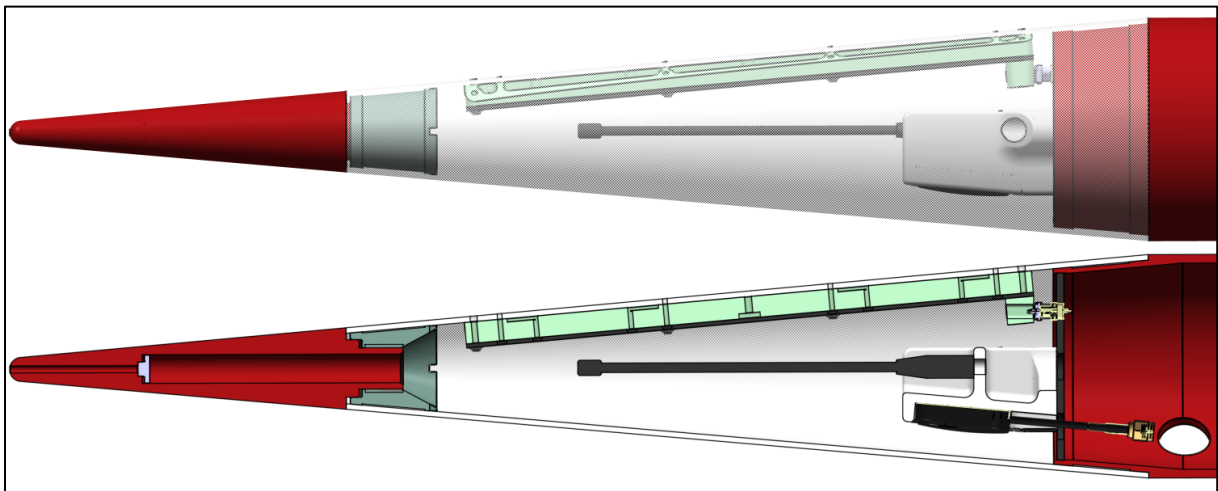


Figure 2 : Instrumentation de la coiffe.

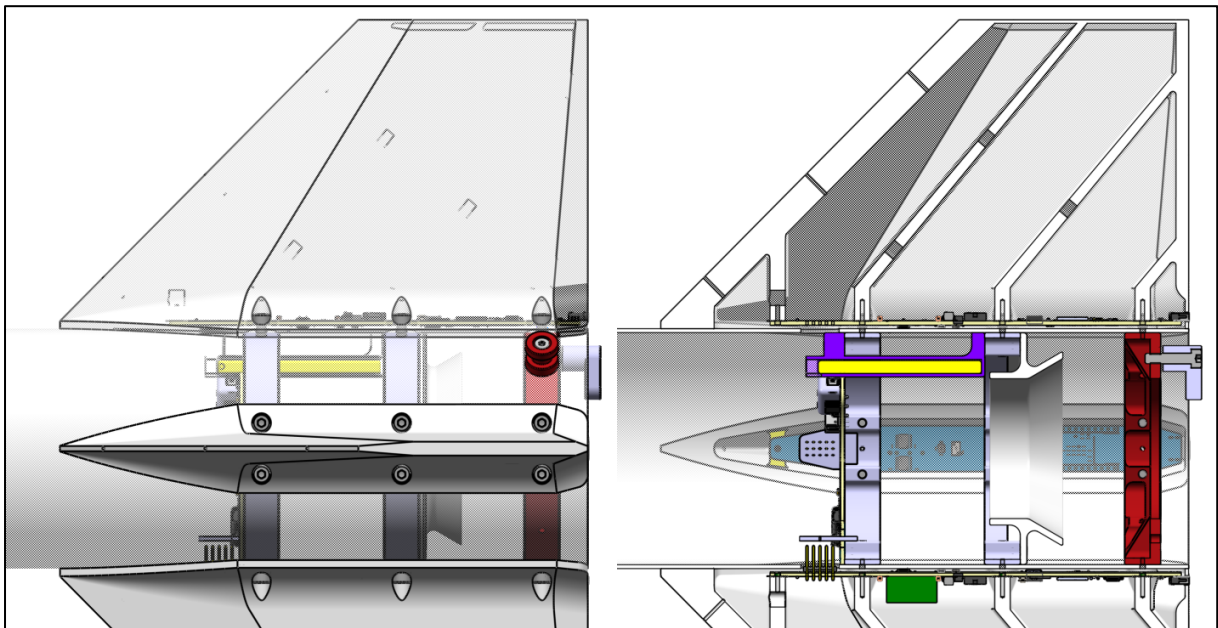


Figure 3 : Instrumentation des ailerons.

2. VECTEUR

Le propulseur choisi est le Pro54-5G White Thunder (K1200). Les dimensions du vecteur sont résumées dans le tableau et les schémas suivants.

Note 1 : les dimensions données entre parenthèses sont données à titre indicatif pour faciliter la modélisation de la fusée : elles sont pilotées par d'autres dimensions.

Note 2 : la référence prise pour toutes les distances longitudinales et la pointe du cône sans émoussage.

Projet				FXxx : ARDAN	
Masse – GLOW		[g]	4990		
CdG	Sans propulseur	[mm]	930		
	Début du vol	[mm]	1070		
	Fin du vol	[mm]	990		
Longueur totale		[mm]	1553		
Coiffe	Forme		Conique		
	Demi-angle	[°]	5		
	Rayon émoussage	[mm]	5		
	Diamètre	[mm]	93		
	(Longueur)	[mm]	(480)		
Ailerons	Emplanture				
	Angle de flèche bord d'attaque	[°]	45		
	Angle de flèche bord de fuite	[°]	0		
	Envergure	[mm]	120		
	Demi-angle profile bord d'attaque	[°]	4.5		
	Demi-angle profile bord de fuite	[°]	20		
	Epaisseur bord d'attaque et bord de fuite	[mm]	2		
	Epaisseur/corde		0.06		
	(Saumon)	[mm]	(90)		
	(Fleche)	[mm]	(120)		
	(Epaisseur emplanture)	[mm]	(12.6)		
	(Epaisseur saumon)	[mm]	(5.4)		
	Nombre		4		
	Position du bas	[mm]	1553		

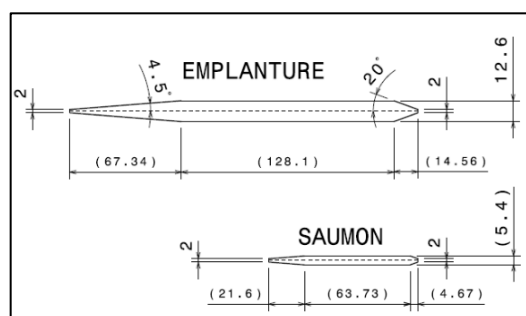
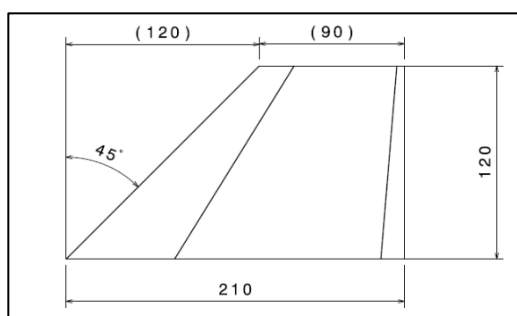
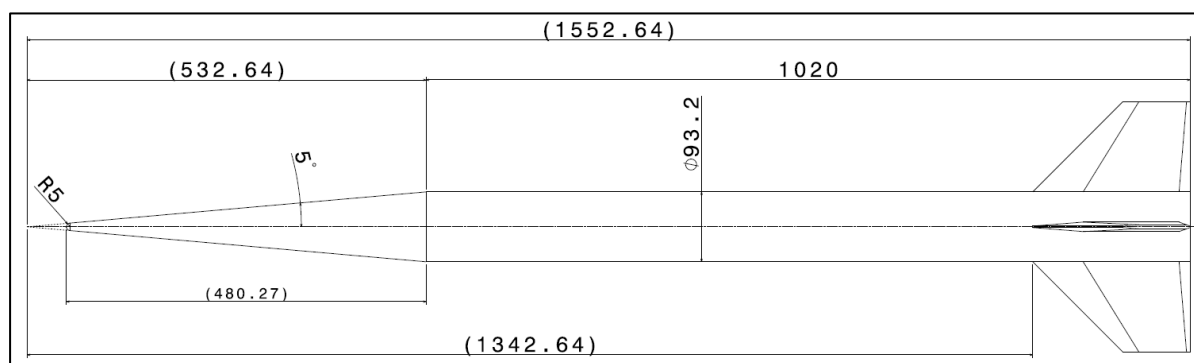


Figure 4 : Géométrie

2.1 STRUCTURE MECANIQUE

2.1.1 ARCHITECTURE

L'architecture de ARDAN reprend celle du projet Fast Forward, divisée en deux sections. Toute l'électronique excepté l'instrumentation des ailerons est dans la section supérieure. A l'apogée, la section supérieure est éjectée entraînant avec elle le parachute situé dans la section inférieure. La séparation est faite par pressurisation du compartiment parachute (CO₂). La section supérieure est maintenue à la section inférieure pendant le vol par des vis en nylon M2, cisailées lors du déploiement. Aucune connexion électronique est envisagée entre l'électronique expérience principale et expérience aileron.

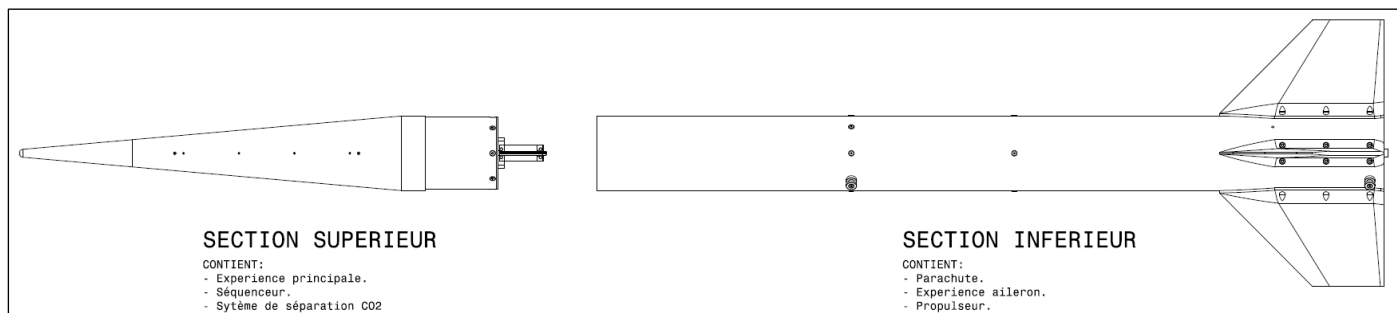


Figure 5 : Architecture

2.1.2 SECTION SUPERIEUR

2.1.2.1 Coiffe

La coiffe conique de 5° de demi-angle est moulée par un procédé de compression. Cela nous garantit un état de surface et des tolérances acceptable, sans post-usinage. La coiffe est en fibre de verre S2-Glass et est d'une épaisseur de 2.3mm. La pointe en aluminium 6061 contient le capteur de pression absolue utilisé pour la mesure de la pression dynamique. La pointe est rigidement vissée à un écrou sur-mesure monté dans la coiffe.

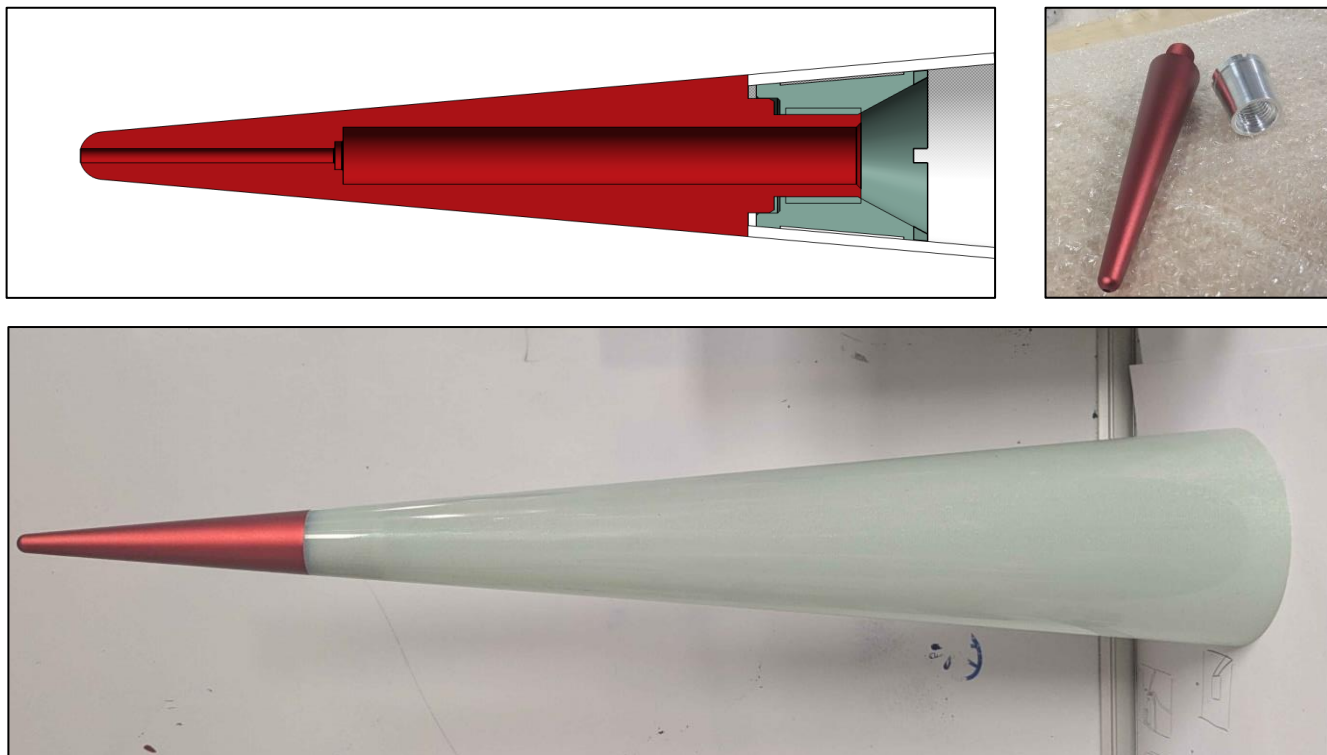


Figure 6 : Pointe et coiffe (avant découpe)

2.1.2.2 Coupleur

La coiffe étant uniquement conique, la jonction est faite par une pièce en aluminium 6061. Elle contient les différentes cartes expérience, la camera, les batteries et la cartouche CO2. Le coupleur est collé à la coiffe. A la base du coupleur est monté la cloison de récupération.

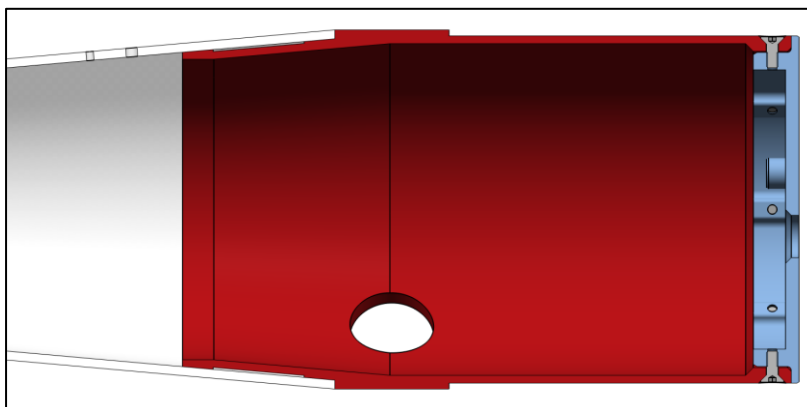


Figure 7 : Coupleur

2.1.3 SECTION INFÉRIEURE

2.1.3.1 Fuselage

Le fuselage est fabriqué sur un mandrin en aluminium, en fibre de carbone/époxy par stratification par voie humide. L'épaisseur du fuselage est d'environ 1.56mm. Il s'agit d'une peau-porteuse.



Figure 8 : Fuselage

2.1.3.2 Cloison récupération

La cloison récupération est usiné en aluminium 7075. Cette bague est fixée au fuselage avec 8 vis M3 acier. La position finale de cette cloison sera déterminée par le volume minimum nécessaire pour la section récupération. La corde de récupération est fixée à la cloison avec un boulon en U acier.

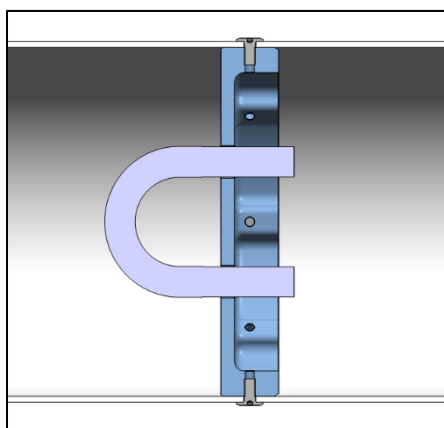


Figure 9 : Cloison récupération

2.1.3.3 Bagues de fixation, centrage et culot

Les deux bagues de fixation des ailerons sont usinées en aluminium 6061. La bague culot (reprise de poussée) est usinée en aluminium 7075. La partie de centrage du moteur sont imprimé en Nylon (SLS). La rétention du moteur est faite par deux crochets en aluminium 6061.

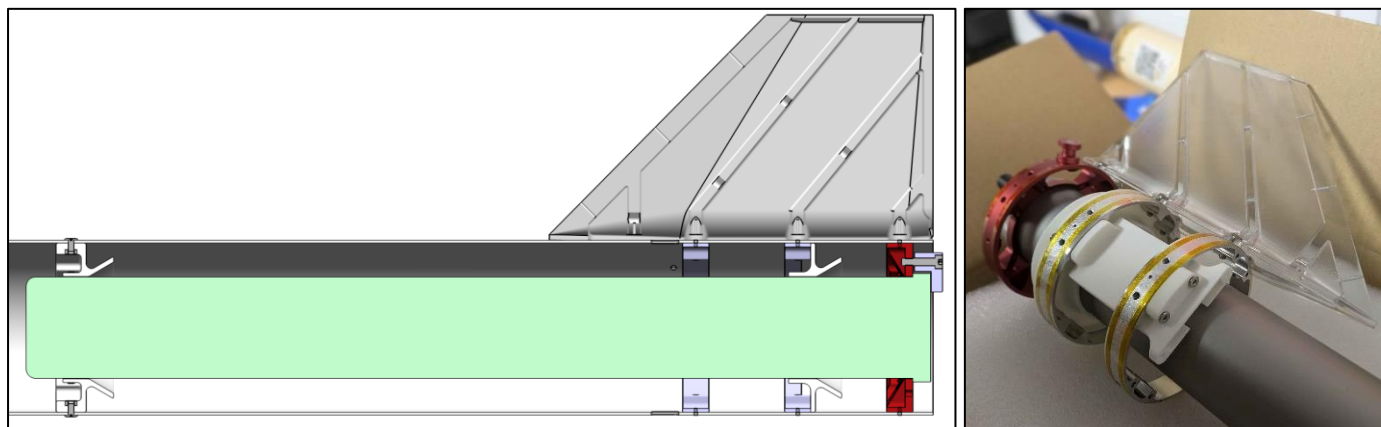


Figure 10 : Bagues de fixation et culot

2.1.3.4 Ailerons

Afin de faciliter leurs instrumentations, les ailerons sont imprimés en aluminium SLM (AlSi10Mg). La structure de l'aileron est évidée pour réduire leur masse et la géométrie est optimisée pour être imprimable avec le moins de supports possible. Ce type d'aileron imprimé en aluminium SLM et évidé a déjà été utilisé sur des projets² ayant atteint des pressions dynamiques plus de 7 fois supérieures à celles actuellement estimées pour le vol de ARDAN. L'instrumentation est directement montée dans l'emplanture de l'aileron.

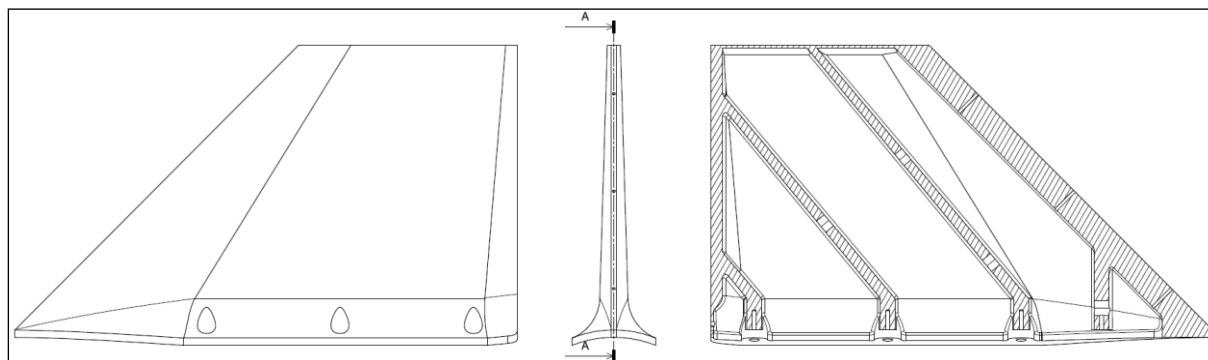


Figure 11 : Ailerons

² <https://grabcad.com/library/gas-gas-gas-mach-3-experimental-rocket-1>

2.2 ELECTRONIQUE

2.2.1 SEQUENCEUR

Le séquenceur et le servomoteur sont alimentés par une unique batterie Li-ion 2S1P (type 18650, protégée). La tension est réduite à 3.3V par un convertisseur step-down et le servomoteur est directement alimenté par la batterie.

/	COMPOSANTS	REFERENCES
/	MCU	ATMEGA32U4
ALIM.	Alimentation 3V3 (Step-down)	TPS62172
CAPTEURS	Baromètre	BMP388
INTERF.	Buzzer	/
	Accelero-contact	D2F-L
	Switch allumage	/

Lors du décollage, une masse libre utilise son inertie pour activer le switch d'allumage. Cette activation lance une minuterie qui fournit un temps relatif de référence.

Une fois ce compte à rebours enclenché, le système procède à l'évaluation de l'apogée dans une fenêtre temporelle correspondant à $\pm 20\%$ du temps d'apogée prévu. À ce moment précis, un baromètre mesure les variations de pression afin de détecter un delta égal à zéro, ce qui correspond à l'apogée.

Trois scénarios possibles peuvent se présenter :

- Détection erronée d'apogée au passage supersonique : Le baromètre identifie à tort une "apogée" lors du passage supersonique. Dans ce cas, le système de récupération se déclenche prématurément à T-20 %.
- Détection correcte de l'apogée réelle : Le baromètre identifie l'apogée réelle et déclenche le système de récupération au bon moment.
- Absence de détection d'apogée : Si le baromètre ne parvient pas à détecter l'apogée, une ouverture d'urgence du système de récupération se produit à T+20 %.

Le scénario 1 nécessite une attention particulière. Il est crucial que le baromètre ne commence pas à enregistrer ou analyser les données avant l'entrée dans la plage temporelle définie, afin d'éviter toute détection erronée.



Figure 12 - Séquenceur

2.2.2 EXPERIENCE COIFFE

L'expérience de la coiffe est composée de deux cartes interconnectées permettant de mesurer et d'enregistrer les températures et pressions subies par la coiffe durant le vol. L'enregistrement est lancé lorsque le décollage est détecté par l'accéléromètre, un buffer circulaire est utilisé pour enregistrer la seconde précédente.

Une première carte principale assure la gestion de tous les capteurs à l'aide d'une Teensy 4.1. Elle assure également l'alimentation de toute l'expérience par une batterie Li-ion 18650 1S1P (intégrant un BMS pour une protection contre les surtensions et courts-circuits), fournissant 3.7V convertis en deux niveaux de tension :

- Un convertisseur AP63300 réduit la tension de la batterie à 3V3 afin de fournir l'alimentation nécessaire au microcontrôleur et certains capteurs (accéléromètre, IMU, baromètre, GNSS).
- Un second convertisseur TPS63020 élève quant à lui la tension de la batterie à 5V afin d'alimenter le module LoRa et le buzzer.

Le même convertisseur step-up est utilisé pour alimenter une camera en 5V à partir d'une batterie Li-ion 1S1P. Ce circuit est galvaniquement isolé du reste de la PCB. L'allumage de la camera sera contrôlé depuis la station sol.

La carte principale est aussi reliée à une autre carte réservée pour la mesure des températures et de la pression au niveau de la coiffe dont le transfert de données sera assuré via les protocoles SPI et I2C.

La carte « Coiffe Température », installée de façon permanent dans la coiffe, contient huit thermocouples type T de la marque OMEGA mesurant la température à deux niveaux : quatre des thermocouples sont fixés sur la surface extérieure tandis que les quatre autres mesureront l'échauffement sur la surface intérieure du cône. Une LED indiquera également l'état d'alimentation de cette carte pour s'assurer de la bonne connexion entre les cartes.

/	COMPOSENTS	REFERENCES
/	MCU	Teensy 4.1
STOCKAGE	Flash (2Gbit)	W25N02KVZEIR
	Carte SD	/
TELEM.	Module LoRa	LoRa1276F30
	Antenne émission	Gizont 868Mhz
CAPTEURS	Module GNSS	MAX-M10S
	Antenne GNSS (Active)	AA.162.301111
	IMU ($\pm 32G$, $\pm 2000deg/s$)	LSM6DSO32
	Accéléromètre ($\pm 200G$)	ADXL375
	Baromètre	MS5607
	Pression absolue pointe	MS5803-05BA
	Amplificateur thermocouples	MCP9600
	Thermocouples type T	OMEGA 5SRTC
ALIM.	Li-ion 18650 1S1P, BMS intégré	// RS
	Alimentation 3V3 (Step Down)	AP63300
	Alimentation 5V (Step Up)	TPS63020
INTERF.	Buzzer 100dBm	/
	LEDs	/
	Switch allumage	/

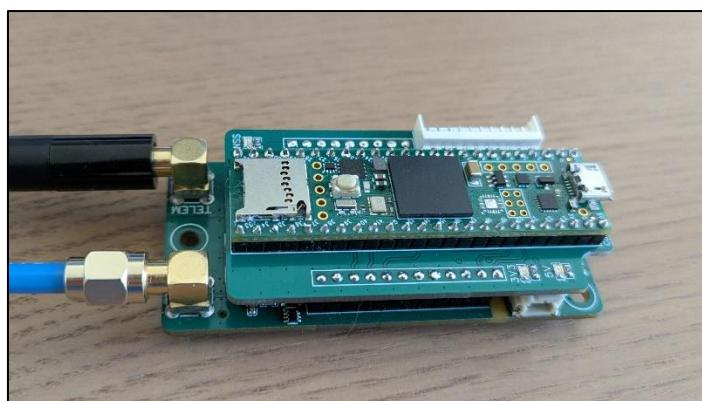


Figure 13 : PCB Expérience

2.2.3 EXPERIENCE AILERON

L'expérience aileron est composée de quatre cartes, galvaniquement isolées les unes des autres. La carte de distribution, contenue dans le fuselage, permet d'alimenter les trois cartes ailerons avec une tension de 5V et de recharger la batterie li-ion protégée. Elle fait aussi office de connexion entre les différentes cartes contenues dans les ailerons.

La carte aileron principal, « FinLogger », est basée sur la schématique d'une Teensy 4.1. Elle enregistre les données des deux autres cartes ailerons en plus des données d'une centrale inertielle et d'un baromètre. L'enregistrement est lancé lorsque le décollage est détecté par l'accéléromètre, un buffer circulaire est utilisé pour enregistrer la seconde précédente.

La carte « FinTemp » contient trois amplificateurs pour thermocouple, elle mesure la température sur le bord d'attaque. La troisième carte est *pour le moment*, destinée à enregistrer la pression sur le bord d'attaque. Etant donné que les ailerons sont interchangeables, il est envisageable de mesurer d'autres paramètres telle que la déformation de l'aileron tant que le protocole de communication des capteurs est l'I2C ou le SPI.

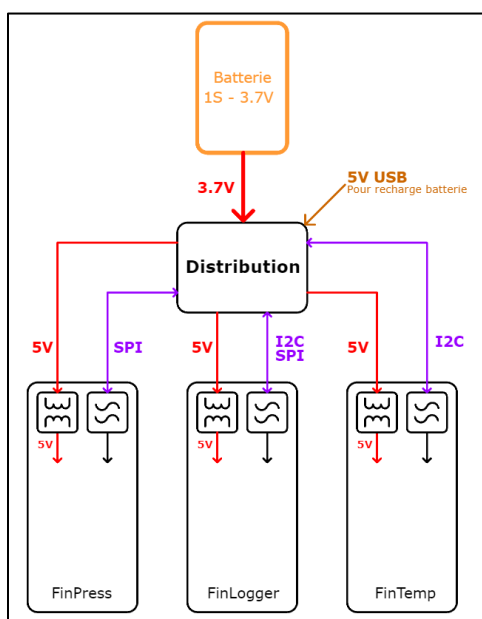


Figure 14 : Synoptique simple de l'expérience aileron.

/	COMPOSANTS	REFERENCES
/	MCU (MKL02 Teensy)	MIMXRT1062DVJ6B
STOCKAGE	Flash (2Gbit)	W25N02KVZEIR
	Carte SD	/
CAPTEURS	Accéléromètre ($\pm 200G$)	ADXL375
	Baromètre	MS5607
	Amplificateur thermocouples	MCP9600
	Thermocouple type T	OMEGA 5SRTC
ALIM.	1.1Ah Li-Po avec BMS	LP-503562-IS-3
	Alimentation 5V (Step Up)	TPS63020
	Alimentation isolée 5V	MEF1S0505SPC
	Chargeur Li-Po	MCP73831
	Superviseur Li-Po	MAX17048G
ISOL.	Isolateur SPI	ISO7741FD
	Isolateur I2C	ISO1540DR
INTERF.	Buzzer 85dBm	/
	LEDs	/
	Microswitch allumage	D2F-L-A

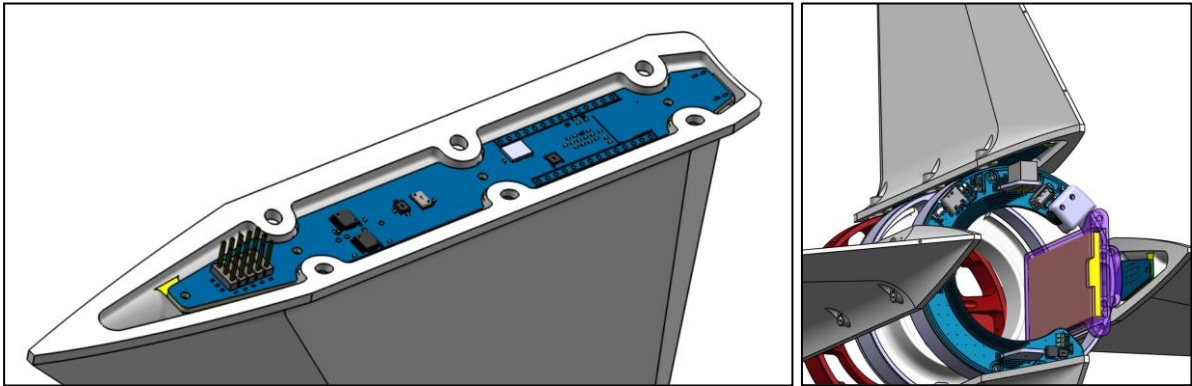


Figure 15 : CAO Instrumentation aileron

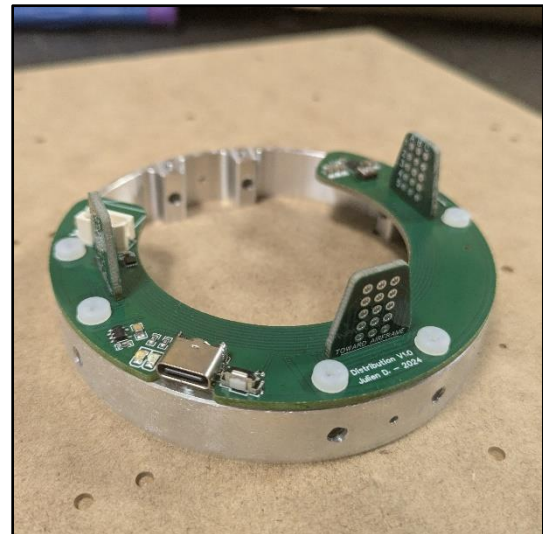
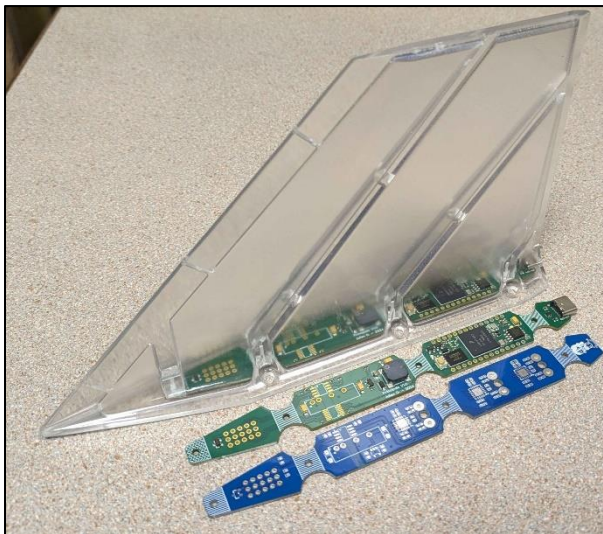



Figure 16 PCBs ailerons et distribution

2.2.4 BALISE RADIO SECONDAIRE

En cas de dysfonctionnement de la télémessure ou du système GNSS, une balise radio sera attachée sur la corde. La localisation est faite à l'aide d'une simple radio et d'une antenne directionnelle (Yagi ou Moxon, triangulation possible). Cette balise est Open Source³ et entièrement paramétrable.

Elle sera attachée à la corde et contenue avec le parachute dans le fuselage en fibre de carbone. Elle nous permettra aussi de confirmer la séparation de la coiffe à l'apogée par une augmentation audible du RSSI car elle ne sera plus atténuée par le fuselage (méthode utilisée sur le vol 2 de Fast Forward, AEROIPSA 2022).

/	/	« Elvin Beacon »
Fréquence	Bande 440Mhz	
Modulation	FSK ou CW	
Puissance	22dBm maximum, sera paramétré à 10dBm (TEL6)	
Alimentation	CR2032	
Autonomie	~20h	
Réception	Quansheng UV-K5, firmware modifié. Antenna Moxon ou Yagi.	

³ <https://github.com/ElvinC/rocketbeacon>

2.3 RECUPERATION

2.3.1 SEPARATION

Le déploiement du parachute est réalisé grâce à un système de déploiement de CO2 inspiré des déclencheurs de CO2 pour gilet de sauvetage (Halkey Roberts V87000 'mini' inflator). Ce système est actionné à l'aide d'un servomoteur. L'avantage d'un tel système est son aspect inerte : l'énergie nécessaire pour percer la cartouche n'est pas stockée dans un ressort et la cartouche de CO2 n'est pas modifiée. De plus, ce système n'utilise pas de valve.

Une fois la cartouche de CO2 percée, le gaz pressurise le fuselage, forçant alors l'éjection de la coiffe et le déploiement du parachute. Avant l'éjection, la coiffe est maintenue au fuselage à l'aide de vis nylon M2, elles sont cisaillées lors de la séparation. Un prototype du système a été testé en 2022 pour le projet Fast Forward.

Paramètres	Valeurs
Cartouche CO2	16g
Servomoteur	SC-1251MG+
Corps	Aluminium 6061
Came	Aluminium 6061
Pin	Acier
Adapteur (réf. 4010-0025-0250)	Laiton

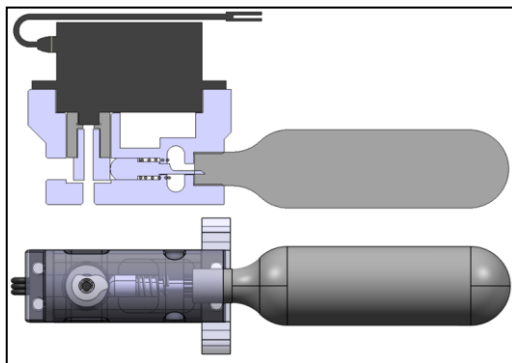


Figure 17 : Système CO2

2.3.2 PARACHUTE

Nous avons fait le choix d'utiliser un seul parachute cruciforme, fabriqué par un membre de Delft Aerospace Rocket Engineering (DARE). Ce choix a été fait afin de réduire les efforts au déploiement et garantir une performance prédictible.

Paramètres	Valeurs
Type	Cruciforme 4:1
Dimensions des bandes	1.30m x 0.325m
Surface de référence	0.739m ²
Coefficient de trainée	0.66 – 0.7
Couleur	Orange
Tissu	Nylon Rip Stop MIL-C-7020 type I
Lignes	Dyneema
Vitesse de descente	11.70 m/s

Une version plus petite du parachute a été testée en mai 2024 à l'Open Jet Facility à l'Université de technologie de Delft. La surface de référence était de 0.63m² (surface tissu). Les résultats du test nous permettent de déduire un coefficient de trainée variant de 0.66 à 0.7.

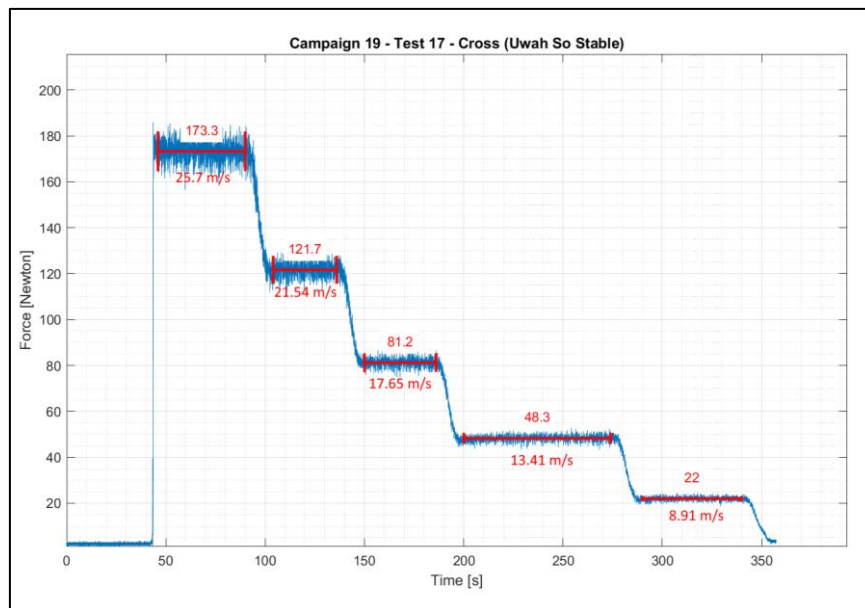
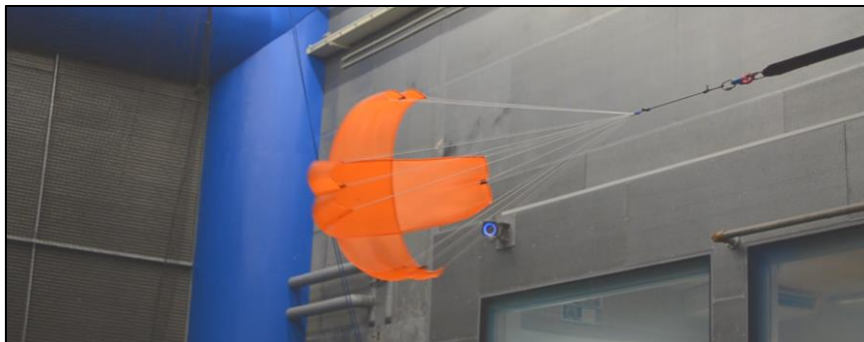


Figure 18 : Données parachute

2.4 PERFORMANCE ET STABILITE

Note : l'analyse des performance et de la stabilité détaillée du vecteur est disponible dans un document dédié. Cette section est un résumé.

Les coefficients de stabilité sont issus de RASAero II et le coefficient de trainées de AeroLab. Les simulations de vol sont faites à l'aide de la librairie Python RocketPy.

2.4.1 PERFORMANCE

Paramètres		Valeur
Vitesse sortie de rampe	[m/s]	44.8
Vitesse maximale	[m/s]	380
Altitude apogée (AGL)	[m]	2673
Vitesse apogée	[m/s]	27.3
Portée balistique 80°	[m]	1295
Portée balistique 45°	[m]	3800

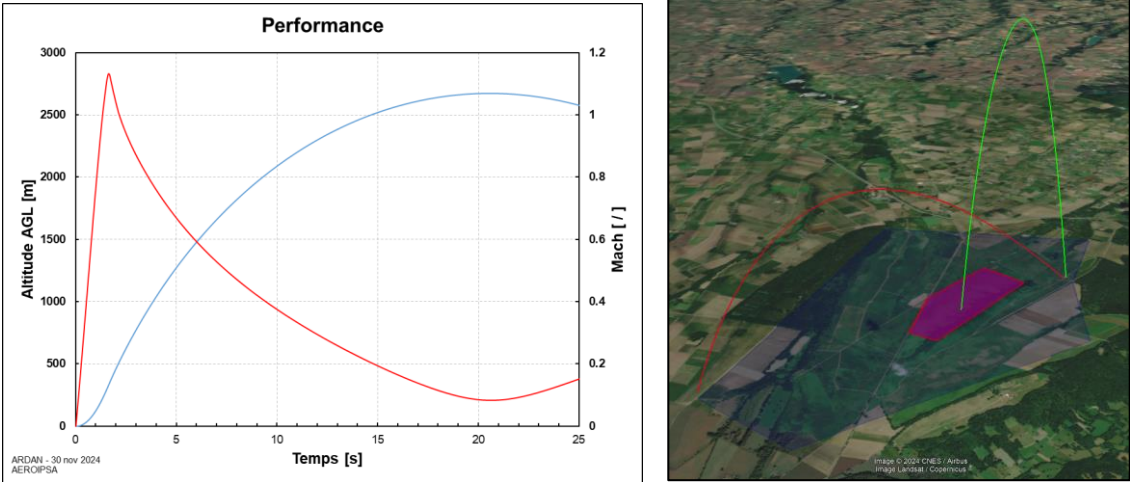


Figure 19 : Trajectographie

2.4.2 STABILITE

			Borne min.	ARDAN	Borne max.
STAB1	Vitesse en sortie de rampe	[m/s]	20	44.8	N/A
STAB2	Elancement	[/]	10	16.65	35
STAB3	Portance	[/rad]	15	21.9 – 24.4	40
STAB4	Marge statique	[/]	2	2.66 – 3.82	6
STAB5	Couple	[/rad]	40	58.4 – 93.3	100

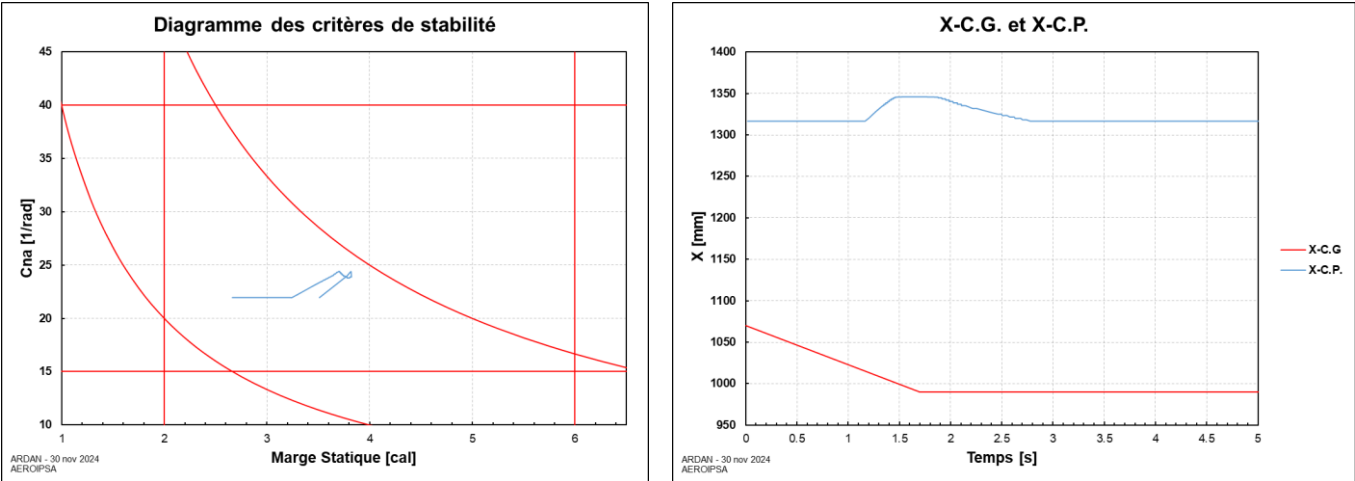


Figure 20 : Stabilité

3. ORGANISATION

