



HORUS 10

RAPPORT D'EXPÉRIENCE

GD-1939-A-108

Révision 1.4

27 décembre 2020

Rédigé par : **Axel CHOVET**

Approuvé par : **Bernard SCACHE**

SOMMAIRE

0.	ÉVOLUTION DU DOCUMENT	1
1.	SYNTHÈSE.....	2
1.1	CONTEXTE DU PROJET	2
1.2	OBJECTIFS DU PROJET	3
1.3	SPÉCIFICATIONS	4
1.4	DÉROULEMENT DU VOL ET SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	5
2.	PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIENCE	7
2.1	DESCRIPTION GÉNÉRALE	7
2.1.1	Classification du ballon	7
2.1.2	Chaîne de vol.....	8
2.1.3	Bilan de masse	9
2.2	EXPÉRIENCE EMBARQUÉE	10
2.2.1	Description de la nacelle.....	10
2.2.2	Synoptique de la nacelle.....	11
2.2.3	Mécanique de la nacelle	12
2.2.4	Module température.....	13
2.2.5	Ordinateur de bord OBC GAREF (GP1112S801-2.0, S/N 47).....	14
2.2.6	Module vidéo GAREF (GP1530F801-1.0, numéro de série 5).....	14
2.2.7	Module télémessure	15
2.2.8	Module <i>timecode</i> GAREF (GP0916M802-3.0, S/N 37).....	16
2.2.9	Module convertisseur analogique-numérique (CAN) GAREF	17
2.2.10	Alimentation électrique - blocs de piles	17
2.2.11	Traqueur GPS sur IRIDIUM.....	19
	2.2.11.1 Utilisation.....	19
	2.2.11.2 Caractéristiques	19
2.3	LOGICIELS DES ÉQUIPEMENTS SOL	20
2.3.1	Logiciel de réception des données temps réel de la télémessure	20
2.3.2	Logiciel de prévision de trajectoire en vol.....	21

2.3.3	Logiciel de positionnement de l'antenne	22
2.4	STATION DE RÉCEPTION	23
2.4.1	Pointage d'antenne automatique	25
2.5	MISE EN ŒUVRE DU BALLON	26
2.5.1	Prévision de trajectoire	26
2.5.2	Chaîne de vol.....	27
2.5.3	Lâcher du ballon	28
2.5.4	Déroulement du vol.....	29
2.5.5	Récupération du ballon.....	31
3.	JOURNAL DE LA JOURNÉE DE LANCEMENT	33
4.	DÉPOUILLEMENT ET RÉSULTATS OBTENUS	34
4.1	POINTS NOTABLES.....	34
4.2	TÉLÉMESURE	34
4.2.1	Qualité de réception.....	34
4.2.2	Données décodées.....	34
4.3	TRAQUEUR GPS IRIDIUM	35
4.4	MODULE VIDÉO.....	36
4.5	MESURE DE TEMPÉRATURE DE L'INTÉRIEUR DE LA NACELLE	38
5.	PROBLÈMES RENCONTRÉS - RETOUR D'EXPÉRIENCE	39
6.	CONCLUSIONS ET REMERCIEMENTS	40

0. ÉVOLUTION DU DOCUMENT

Version 0.1 : 10 septembre 2020, création du document

Version 0.2 : 11 novembre 2020, description des expériences

Version 0.3 : 14 décembre 2020, description des résultats

Version 1.0 : 22 décembre 2020, objectifs, stage pied d'antenne

Version 1.1 : 24 décembre 2020, compléments d'analyse résultats

Version 1.2 : 24 décembre 2020, première version texte fini

Version 1.3 : 26 décembre 2020, relecture et intégration photos

Version 1.4 : 27 décembre 2020, finalisation pour diffusion

1. SYNTHÈSE

1.1 CONTEXTE DU PROJET

HORUS 10 est un ballon-sonde léger, réalisé et lâché en 2020 par le GAREF, contenant plusieurs expériences embarquées, toutes réalisées par le GAREF.

Il s'agit de la 10^e itération de la série des ballons HORUS (qui a débuté au début des années 2000), dont l'objectif d'origine est de faire des prises de vues aériennes retransmises en temps réel.

Il a été réalisé dans le contexte sanitaire difficile du début de l'année 2020 (crise COVID19), limitant fortement la présence de l'équipe. Celle-ci a tout de même continué ses activités de façon réduite mais ininterrompue, y compris pendant le confinement national, à l'aide de visio-conférences et de déplacements exceptionnels d'une ou deux personnes dans les locaux. Cependant, plusieurs expériences embarquées prévues dans l'avant-projet ont dû être abandonnées, pour permettre d'assurer le lancement à l'été 2020.

De plus, c'est le premier ballon GAREF à être lancé de façon autonome, en dehors du C'SPACE (annulé cette année), donc sans le soutien d'un aérotechnicien entraîné. La réalisation de la chaîne de vol et la mise en œuvre du lâcher ont donc dû être pris en main par l'équipe GAREF.



Lâcher d'HORUS 10, mardi 21 juillet 2020, au Pic du Midi de Bigorre

1.2 OBJECTIFS DU PROJET

HORUS 10 a deux objectifs principaux :

- L'utilisation d'un nouveau système de suivi de position, exploitant la constellation de satellites IRIDIUM.

Un traqueur GPS autonome, transmettant régulièrement sa position à travers le système satellite IRIDIUM, a été mis dans la nacelle pour suivre sa trajectoire même lorsque la nacelle n'est plus en visée directe de la station de réception.

- Et la validation de l'utilisation d'une antenne patch cylindrique, pour pallier les problèmes de réception observés avec l'antenne hémisphérique l'année précédente, qui limitait la réception lorsque la nacelle est observée avec un angle proche de l'horizontale.

De plus, on trouve en expériences secondaires :

- La transmission en temps réel d'une vidéo via la télémesure

Comme les années précédentes, un module vidéo permet l'acquisition et la compression de deux flux vidéo, ainsi que la transmission en temps réel d'un des deux flux vidéo via la télémesure à 1 Mbits/s. Ce système a été développé par le GAREF dans le cadre du projet PERSEUS.

- La mesure de la température à l'intérieur de la nacelle

Nous avons déjà vérifié l'année précédente que l'émetteur dissipait correctement sa chaleur, nous voulions cette fois-ci nous assurer de l'ambiance entourant l'électronique de bord.

1.3 SPÉCIFICATIONS

La nacelle, cylindrique, ayant pour dimensions 17,6cm de diamètre pour 20cm de hauteur, était en polystyrène extrudé (400 g à vide) creusé par une fraiseuse CNC 3 axes.

Elle contenait :

- deux blocs de piles lithium,
- un OBC¹,
- un module *timecode*,
- un module vidéo avec son capteur,
- un module convertisseur analogique-numérique,
- un conditionneur thermocouple muni d'un thermocouple type K
- un traqueur GPS autonome avec transmission par Iridium,
- un émetteur bande S et son antenne.

L'électronique embarquée était alimentée par deux blocs de piles lithium *Energizer* L91 AA de 3 000 mAh, l'un de 13,5 V (pour l'émetteur) et l'autre de 18 V (pour l'électronique nacelle).

Consommation électrique :

- Émetteur 2W : 0,82 A à 13,5 V
- Électronique nacelle : 0,63 A à 12 V, 0,52 A à 15 V

Autonomie :

- Émission télémessure : 3 heures
- Électronique nacelle : 3 heures
- Traqueur GPS : 7 heures

Enveloppe du ballon : type Kaysam KCI 1200 latex.

Masse : 1 200 g.

Diamètre : 2,26 m à 1 000 mbar de pression au sol ; 8,60 m à 7,3 mbar (éclatement).

Masse totale mesurée de la nacelle équipée : 1 570 g.

¹ *on board computer*

1.4 DÉROULEMENT DU VOL ET SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Le lâcher du ballon Horus 10 a eu lieu à l'Observatoire du Pic du Midi de Bigorre (Hautes-Pyrénées), le mardi 21 juillet 2020 à 12 h 02 min 26 s UTC (T0). Pour rappel, heure locale = UTC+2h

Lâcher	Latitude : 42° 56' 11.5" N Longitude : 00° 08' 31.7" E Altitude GPS : 2840 m	21 juillet 2020 12 h 02 min 26 s UTC (H0)
Apogée (position estimée)	Latitude : 43° 12' 18" N Longitude : 00° 24' 42" E Altitude GPS : 30 500 m	13 h 23 min UTC
Atterrissage	Latitude : 43° 19' 20.4" N Longitude : 0° 37' 23.9" E Altitude GPS : 350 m	14 h 04 min UTC (estimé)

- Lâcher à 2840 m d'altitude au Pic du Midi, à T0 = 12h02 UTC
Vitesse ascensionnelle : 6,3 m/s
- Apogée vers 30 500 m à T0 + 1h21, heure déterminée d'après les mesures de température
Vitesse de chute moyenne : 12,4 m/s
- Atterrissage du ballon vers Lalanne-Arqué (Gers), vers T0 + 2h02

Malheureusement, le suivi de la position GPS de la nacelle n'a pas fonctionné pendant le vol. Nous nous sommes rendus compte lors d'essais après notre retour à Paris qu'il y avait un problème de brouillage du récepteur Iridium par notre émission de télémesure à 2W ! Par manque de temps, nous n'avons pas pu faire beaucoup d'essais en conditions réelles, avec nacelle en émission et traqueur à l'intérieur. De plus le traqueur GPS a un fonctionnement particulier : il n'envoie pas de nouveau point tant qu'il n'a pas détecté de mouvement suffisant (environ 20m), donc en allumant la télémesure après avoir allumé le traqueur, un premier point est reçu puis l'absence de nouvelle position est normale. Tout ceci fait que nous ne nous sommes pas rendus compte de ce problème avant le décollage.

L'apogée est donc estimée selon la prévision de vol qui a été calculée avant le décollage (voir chapitre 2.5.1), car celle-ci a prévu de façon très proche le point d'atterrissage réel. Le point d'atterrissage a lui été reçu une fois que l'émetteur s'est arrêté (à cause de ses piles vides, ou à cause de la température trop élevée dans la nacelle), avant que la nacelle ne soit ramassée par une résidante, dans son champ, en plaine. Celle-ci nous a appelé pour nous prévenir avant que notre équipe n'arrive sur les lieux, nous permettant de récupérer la nacelle sans la moindre difficulté.

La télémesure a quant à elle parfaitement fonctionné, avec quasiment aucune perte, ce qui a bien validé l'utilisation de l'antenne cylindrique comme remplacement de l'antenne hémisphérique utilisée précédemment sur les ballons HORUS. La réception était tellement bonne que nous n'avons pas détecté l'atterrissage en observant la qualité de réception.

Les mesures de température ont bien fonctionné, cependant elles ont montré une mauvaise dissipation de la chaleur par la plaque anodisée. Ainsi, après l'atterrissage l'intérieur est monté à près de 80°C avant que l'électronique se coupe, elle aussi soit faute de piles soit à cause de la chaleur. Les valeurs paraissaient tellement extrêmes que nous avons revalidé l'étalonnage après être rentrés au GAREF, et les valeurs trouvées ont bien été confirmées correctes.

La transmission vidéo n'a pas pu être validée correctement avant le lancement, et a donc volé avec une version du logiciel non finalisée. La transmission en temps réel n'a donc pas été à la hauteur des attentes, même si le stockage à bord a partiellement fonctionné. Au final, une vidéo s'est correctement enregistrée pendant les opérations de lâcher puis le lâcher lui-même, mais s'est interrompue durant le vol. Un nouveau modèle de module vidéo est en cours d'étude pour les prochaines expériences.

2. PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIENCE

2.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE

2.1.1 Classification du ballon

Le ballon HORUS 10 est, au sens de l'article 1.1 a) de l'appendice 2 du Règlement européen sur les règles de l'air (UE) n°923/2012 modifié, dit « SERA », en vigueur depuis le 12 octobre 2017 :

Un ballon "**libre non habité léger**", c'est-à-dire transportant une charge utile comportant un ou plusieurs lots dont la masse combinée est inférieure à 4 kg (avec aucun lot n'excédant 3 kg, et aucun lot d'au moins 2 kg qui présente une masse surfacique² de plus de 13 g/cm²), et avec une liaison ballon-charge utile cassant ou séparant sous une force inférieure à 230 N.

Un ballon léger ne nécessite pas l'émission de NOTAM (*notice to airmen*).

Conformément à l'article SERA.3140/FRA.3140, et à l'article 2.1 de l'appendice 2 du même règlement, HORUS10 a fait l'objet d'une demande d'autorisation d'exploitation à la Direction Générale de l'Aviation Civile (cerfa 15915) de la région concernée, qui a été approuvée préalablement au vol.

HORUS 10, qui fait des prises de vue, n'était pas prévu pour être exploité en dehors du territoire français (régions terrestres et eaux territoriales adjacentes). Un calcul de trajectoire selon les sondages météo devait être effectué le jour du lancement, préalablement au vol, pour s'assurer que le ballon ne risquait pas d'être entraîné au-delà de la frontière espagnole.

Une demande d'émission en bande S à 2235MHz a d'autre part été faite, selon les règles régissant l'utilisation de cette bande de fréquence en France métropolitaine.

² La masse surfacique est définie comme la masse totale de l'élément considéré de charge utile, divisée par sa plus petite surface.

2.1.2 Chaîne de vol

La chaîne de vol est composée des éléments suivants :

- le ballon
- le parachute, ses suspentes et son anneau anti-torche,
- un réflecteur radar octaèdre (carton aluminisé),
- la nacelle, qui constitue la charge utile.

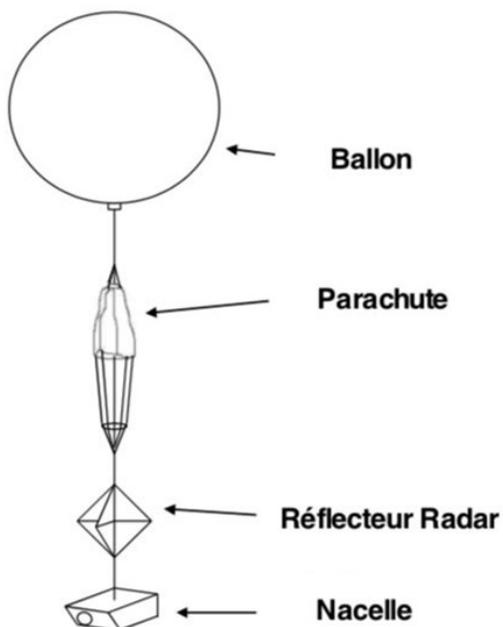


Figure 1 : Schéma de la chaîne de vol (à gauche) et photo de la chaîne de vol au lâcher (à droite)

2.1.3 Bilan de masse

- Enveloppe du ballon : 1 200 g (de type Kaysam 1200)
- Parachute avec anneau et suspentes diverses : 40 g
- Réflecteur radar passif aluminisé arête de 290 mm : 200 g
- Nacelle (environ 1,5 kg) :
 - deux blocs de piles (315 g)
 - OBC (200 g)
 - module *timecode* (175 g)
 - module vidéo avec son capteur (140 g)
 - module convertisseur analogique-numérique (80 g)
 - thermocouple et son conditionneur (60 g)
 - antenne cylindrique avec colle époxy (120g)
 - mécanique de la nacelle (170 g)
 - câblage et connecteurs (150 g)
 - traqueur GPS Iridium (97g)
 - émetteur (57 g)

Masse totale de la nacelle : 1 570 g (à l'exclusion du réflecteur radar, du parachute et du ballon).



Figure 2 : Pesée de la nacelle complète

2.2 EXPÉRIENCE EMBARQUÉE

2.2.1 Description de la nacelle

L'ensemble de la charge utile de la nacelle a été divisé en plusieurs modules :

- le module OBC, calculateur de bord GAREF ;
- le module vidéo GAREF (modèle type SERA) ;
- le module de conversion analogique-numérique GAREF ;
- le module *timecode* GAREF ;
- le thermocouple et son conditionneur Phoenix Contact ;
- le traqueur GPS sur Iridium Garmin.

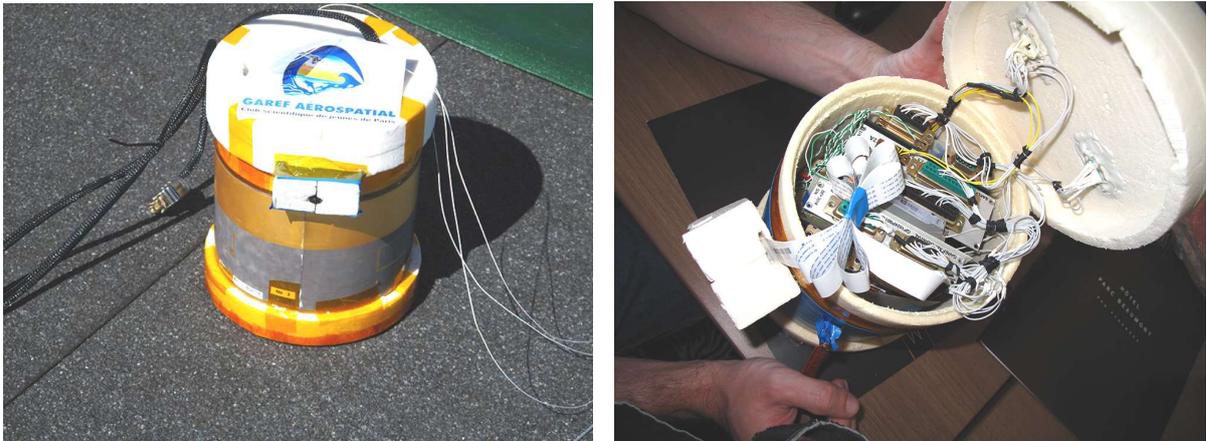


Figure 3 : Vue extérieure et intérieure de la nacelle HORUS 10

2.2.2 Synoptique de la nacelle

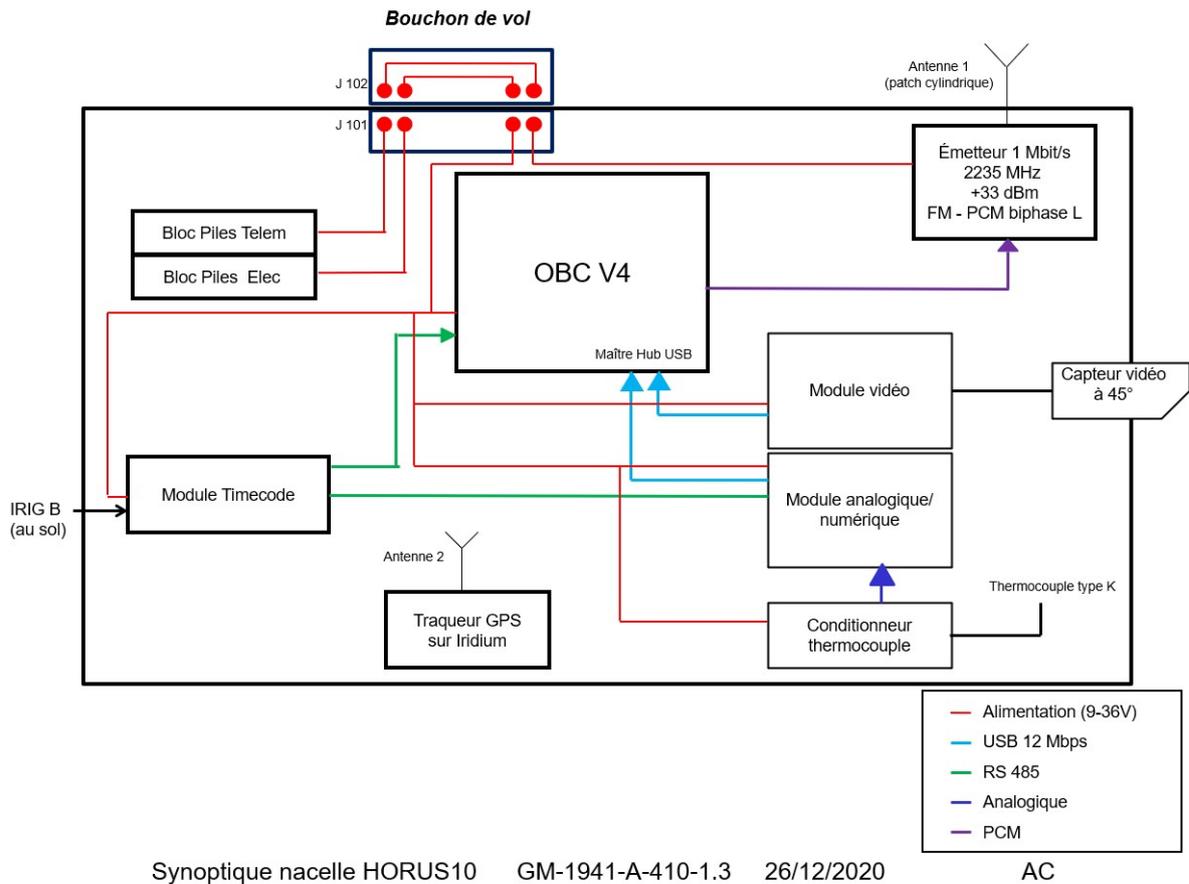


Figure 4 : Synoptique de la nacelle HORUS 10

En plus des connexions présentées ci-dessus, un connecteur (mis à la place du bouchon de vol) permet de connecter la nacelle à la station de réception sol et de l'alimenter, évitant ainsi de puiser inutilement dans les blocs de piles avant le lâcher. On fournit aussi un signal timecode IRIG B qui synchronise le module *timecode*

2.2.3 Mécanique de la nacelle

Comme HORUS 9, pour fabriquer la nacelle d'HORUS 10, du polystyrène extrudé (mousse) a été choisi afin de limiter la masse de la nacelle et améliorer la disposition des différents modules. Traditionnellement utilisé pour des travaux d'isolation, ce matériau présente les avantages d'être rigide, très léger et facile à usiner.

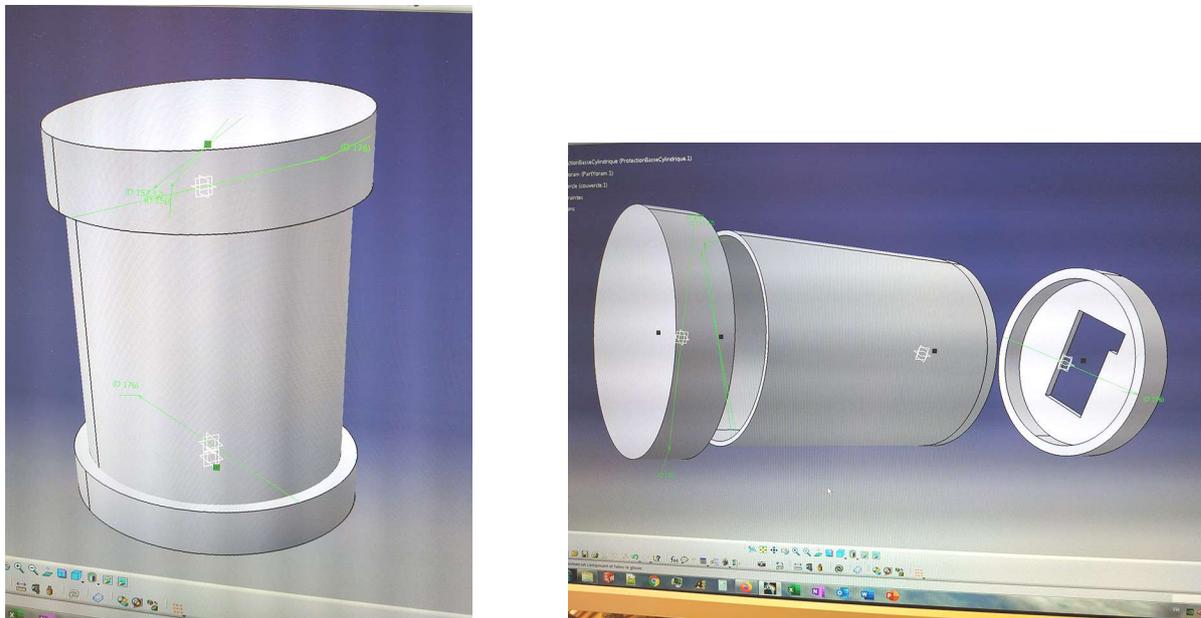


Figure 5 : Modélisation 3D de la nacelle, servant à l'usinage

La mécanique de la nacelle est constituée de quatre parties : le cylindre central est fait en deux morceaux s'emboîtant, car la hauteur de la nacelle empêche de le fabriquer dans un seul bloc de mousse, et deux couvercles permettent de boucher le cylindre et protéger l'ensemble des équipements.

Ces parties ont été modélisées en 3D grâce au logiciel de CAO³ CATIA. Le modèle ainsi généré a permis leur usinage, réalisé au moyen d'une fraiseuse numérique CNC 3 axes. Chaque partie a été fabriquée à partir d'un bloc de mousse plein, progressivement évidé par la fraiseuse du GAREF marque CharlyRobot.

Le cylindre est dimensionné pour s'adapter à une antenne patch cylindrique (mise au point grâce à la collaboration de l'école ENSEA) qui avait été utilisée précédemment pour des fusées expérimentales. Celle-ci a été collée uniformément sur la surface du cylindre.

Le couvercle du haut permet de supporter les connecteurs ombilicaux, ainsi que le bouchon de vol, et dispose d'une encoche pour accrocher un petit bloc de mousse maintenant le capteur vidéo à 45° pour filmer l'horizon.

Le couvercle du bas a été usiné pour accueillir l'émetteur incrusté dans l'épaisseur, ainsi que la plaque d'aluminium anodisé noir servant à dissiper sa chaleur. La forme modélisée assure qu'une épaisseur de mousse importante couvre toutes les parties tranchantes, de cette plaque ainsi que du bord de l'antenne collée sur le cylindre, pour s'assurer que la nacelle ne puisse pas blesser quelqu'un en tombant (ce qui est une contrainte imposée par la réglementation de l'air encadrant ce type de ballon).

³ conception assistée par ordinateur

Les dimensions finales de la nacelle sont : 17,6cm de diamètre pour 20cm de hauteur, pour une masse finale nue de seulement 170g.

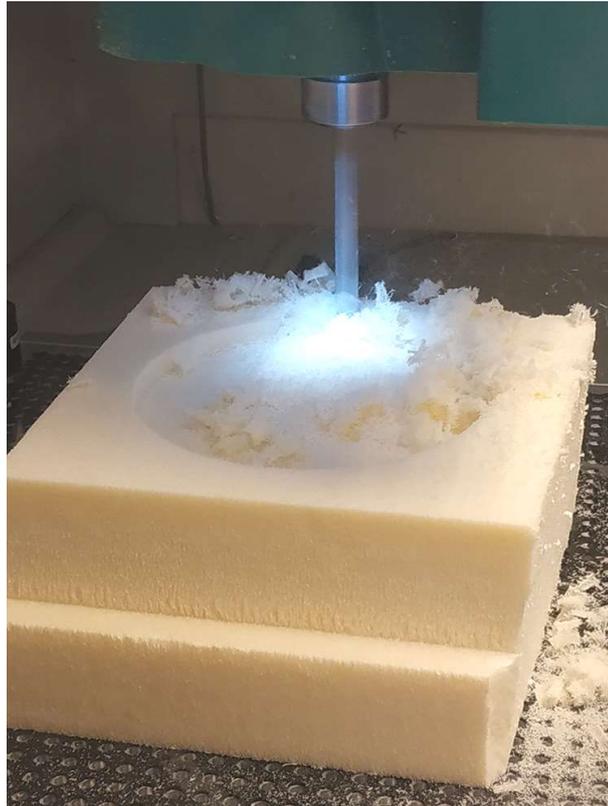


Figure 6 : Usinage d'un couvercle de la nacelle dans un bloc de polystyrène extrudé

2.2.4 Module température

Le capteur de température utilisé est un thermocouple de type K.

Il est couplé à un conditionneur de signal commercial Phoenix Contact.

2.2.5 Ordinateur de bord OBC GAREF (GP1112S801-2.0, S/N 47)

Le module OBC est composé de trois éléments fonctionnels : une carte processeur, un FPGA gérant les différentes interfaces et une carte hub USB.

La carte processeur est le cœur de l'électronique embarquée. Elle joue le rôle d'ordinateur de bord, grâce à un logiciel programmé par le GAREF. Elle reçoit les données des différents modules reliés par le hub USB et des entrées numériques, les met sous forme de trames, les sauvegarde sur une mémoire flash et les transmet au FPGA qui les met au format PCM biphase-L, pour qu'elles soient transmises à l'émetteur.

Tous les modules USB sont en esclave, alors que l'ordinateur de bord assure le rôle de maître.

Le flux vidéo venant du module vidéo par USB est également découpé en trames pour être envoyé, si la bande passante le permet.

Le programme de restitution de trajectoire n'a pas été utilisé lors de ce vol.

Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques électriques
Masse : ~ 200 g	Alimentation : 9-36 V
Dimensions : 100 x 105 x 44 mm	Puissance consommée : 4,05 W

2.2.6 Module vidéo GAREF (GP1530F801-1.0, numéro de série 5)

La fonction du module vidéo, développé pour les fusées SERA, est d'acquérir sur une mémoire flash et de retransmettre une vidéo basse qualité du vol en temps réel, et ce, durant toute la durée du vol. La vidéo du vol est acquise en double qualité, 1080p et 720p à 24 images/s. Malheureusement le manque de temps et les contraintes liées au COVID19 ont empêché le débogage final de la version de vol, qui se contentait de stocker les deux flux sans les transmettre.

Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques électriques	Caractéristiques vidéo
Masse : 140 g	Alimentation : 9-36 V	Résolution capteur : 5 Mpx OmniVision OV55647
Dimensions : 100 x 105 x 22 mm	Consommation : 1,8 W	Modes : 1080p24, 720p24

2.2.7 Module télémétre

Le module télémétre est composé d'une antenne 8 « patches » (mise au point grâce à la collaboration avec l'école ENSEA) permettant l'émission du signal et d'un émetteur de télémétre.

Le signal PCM est du biphase L à 1Mbit/sec qui module l'émetteur en FM avec une déviation $\Delta f = \pm 0.7$ MHz (conformément aux recommandations IRIG 106) [soit ± 350 kHz pour du 1Mbps NRZ, ± 700 kHz pour du 1Mbps Biphase]

Le format de trame choisi est de 624 bits, dont un mot de synchro de 24 bits FAF320 (hexa).

L'ensemble de la télémétre est conforme à la norme IRIG 106-19.

Caractéristiques de l'antenne d'émission (Réf GAREF : GP1311Z035-1.3 sn 3)

Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques électromagnétiques
Masse : 80 g (sans la colle époxy)	Polarisation linéaire Bande d'émission : 2 230 à 2 240 MHz
Dimensions : 503 x 111,4 x 0,5 mm à plat avant collage	Return loss à 2235MHz : -29dB Gain : +0 dBi Impédance : 50 Ohm

Caractéristiques de l'émetteur de télémétre (Réf GAREF : 20940301 sn 203)

Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques électriques	Caractéristiques électromagnétiques
Masse : 57 g	Alimentation : 12 V (+4.5 / -1.5 VDC)	Fréquence d'émission ⁴ : 2 235 MHz
Dimensions : 95 x 107,8 x 32 mm	Consommation : 860 mA	Puissance d'émission : +34 dBm (nominal +33dBm 2,0 W)
		Impédance d'entrée : 75 Ohm, 35 pF Impédance de sortie : 50 Ohm

Dans le but de dissiper les 8 watts de perte thermique de l'émetteur de télémétre, une plaque noire anodisée en aluminium circulaire d'une surface de 0,02 m² a été utilisée. Ce matériau a été choisi du fait de sa faible densité et de son émissivité reportée élevée (0,82). La dissipation se fait par le principe du rayonnement du corps noir (absence d'atmosphère donc de convection en haute altitude)

L'émetteur de télémétre est vissé à la plaque d'aluminium en positionnant un compound silicone de chez *Dow Corning* entre les deux éléments afin de garantir un transfert thermique optimal.

⁴ L'émetteur est réglable sur la plage de fréquence de 2 200,5 MHz à 2 299,5 MHz par incrément de 0,5 MHz.

La plaque comporte un texte indiquant la nature du ballon et les coordonnées du GAREF pour des besoins de récupération.



Figure 7 : Plaque de dissipation thermique de l'émetteur, avec un texte donnant les coordonnées du GAREF

2.2.8 Module *timecode* GAREF (GP0916M802-3.0, S/N 37)

La fonction du module *timecode* est de fournir à tous les modules le nécessitant, une date (T.U.) commune et synchronisée avec les installations sol (IRIG-B).

Cela permet de dater, avec une précision de 10 ms, les différentes mesures acquises et les événements survenant durant le vol de manière synchronisée. Il est dès lors possible de comparer ces mesures et ces événements entre eux avec les équipements au sol.

Le *timecode* est diffusé au format BCD sur un bus RS485 suivant la norme CCSDS 301.0-B-3.

Le module *timecode* embarqué est synchronisé jusqu'au lâcher du ballon par un générateur *timecode* au sol via une liaison filaire.

Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques électriques
Masse : 175 g	Alimentation : 9-36 V
Dimensions : 100 x 105 x 22 mm	Consommation : 0,9 W

2.2.9 Module convertisseur analogique-numérique (CAN) GAREF

Des capteurs analogiques sont utilisés pour réaliser les mesures de pression et de température. Afin de traduire les signaux analogiques en signaux numériques, un convertisseur analogique-numérique à cinq voies a été développé au GAREF, dans le cadre des fusées PERSEUS, capable de gérer simultanément jusqu'à cinq capteurs analogiques.

Les plages d'entrées des cinq voies sont configurables indépendamment, sur 0/+5V, 0/+10V, -5/+5V, -10/+10V, et elles disposent d'une isolation galvanique et d'une précision sur 10bits.

Pour Horus 10, nous avons utilisé une seule des cinq voies du module.

Caractéristique mécaniques	Caractéristique électriques
Masse : 90 g	Alimentation : 9-36 V
Dimensions : 102 x 99 x 22 mm	Consommation : 1,65 à 4,5 W (selon le nombre de voies activées)

2.2.10 Alimentation électrique - blocs de piles

Les modules étant sensiblement les mêmes que sur HORUS 9, les blocs de piles ont été fabriqués à l'identique.

Pour rappel, voici comment nous avons déterminé leur constitution :

Il s'est agi de déterminer l'alimentation électrique nécessaire au bon fonctionnement de l'électronique embarquée. Il fallait pouvoir répondre à des contraintes de consommation, de tension et d'autonomie (environ 3 heures de vol).

La case électronique et la case télémessure (émetteur) n'ayant pas besoin de la même tension, sont alimentées par un bloc de piles chacune.

Concernant la case électronique, chaque module possède un convertisseur DC/DC en entrée permettant ainsi de n'utiliser qu'un seul bloc de piles.

Il fallait ne pas dépasser la tension maximale prévue pour des ballons de type léger, fixée à 24 V, mais également fournir une tension suffisante pour le fonctionnement des différents modules. Il fallait donc être très attentif à la tension à vide et en fonctionnement en tenant compte de la température.

Le GAREF avait déjà qualifié des piles dont il dispose les courbes de décharge pour ce type d'application.

Grâce à ces courbes de décharge et des mesures de consommation (de l'émetteur et de la case électrique) à différentes tensions, il a été possible de déterminer le nombre de piles nécessaire pour chacun des deux blocs, soit 9 pour le bloc destiné à l'émetteur et 12 pour celui de la case électronique.

Caractéristiques des piles utilisées (Energizer réf L91)

Type	Diamètre	Longueur	Masse	Tension nominale	Tension à vide
AA	14 mm	50 mm	14,3 g	1,5 V	1,7 V

Caractéristiques des deux blocs de piles

	Nombre de piles	Tension	Masse totale
Bloc piles télémesure	9	13,5 V	135 g
Bloc piles électronique	12	18 V	180 g



Figure 8 : Montage des derniers blocs de piles dans une salle réservée pour l'occasion à l'hôtel à Pau

2.2.11 Traqueur GPS sur IRIDIUM

2.2.11.1 Utilisation

Nous avons rencontré de grosses difficultés l'année précédente pour retrouver la nacelle d'HORUS 9. En effet celle-ci est retombée dans une région montagneuse : nous avons donc perdu avant l'atterrissage la réception de la radiosonde qui nous donnait la position GPS, car elle avait besoin d'une visée directe avec la station de réception au Pic du Midi (voir chapitre 2.4). De plus, même la balise oiseau, prévue pour la localisation fine à faible portée (environ 5km), a été peu efficace lorsque nous sommes arrivés à proximité, la réverbération des ondes sur les vallées faussant la direction de la réception.

Nous avons donc choisi cette année d'utiliser un nouveau système, nous transmettant la position à travers un réseau satellite, pour la recevoir même en l'absence de visée directe (seule une vue du ciel étant nécessaire).

Le choix s'est porté sur la constellation IRIDIUM, en orbite basse donc demandant moins de puissance pour communiquer avec eux, et déjà prévue pour permettre de suivre les randonneurs en région isolée. Celle-ci fournit une interface de type téléphone mobile : moyennant un abonnement au réseau, des SMS et des données peuvent être envoyés sur Internet, pour être reçus ensuite avec l'application de son choix.

Nous avons sélectionné un traqueur GPS du commerce, de marque Garmin, pour sa simplicité d'utilisation. Le traqueur est autonome, avec sa propre batterie, et il dispose d'une antenne 1,6GHz qui peut à la fois recevoir les signaux des satellites GPS, et communiquer en bidirectionnel avec les satellites IRIDIUM. Il peut être configuré pour envoyer automatiquement sa position de façon périodique (variable selon l'abonnement choisi : dans notre cas, toutes les 2 minutes). Garmin propose aussi une interface web affichant directement les positions transmises sur une carte, et une API est disponible pour nous permettre de développer notre propre interface à l'avenir, si nous voulons l'intégrer à d'autres systèmes (pointage d'antenne automatique par exemple, voir chapitre 2.4.1).

2.2.11.2 Caractéristiques

Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques électriques
Masse : 97 g	Alimentation : batterie lithium-ion 1250mAh intégrée
Dimensions : 100 x 50 x 27 mm	Autonomie : 7 heures avec envoi du suivi toutes les 2 minutes

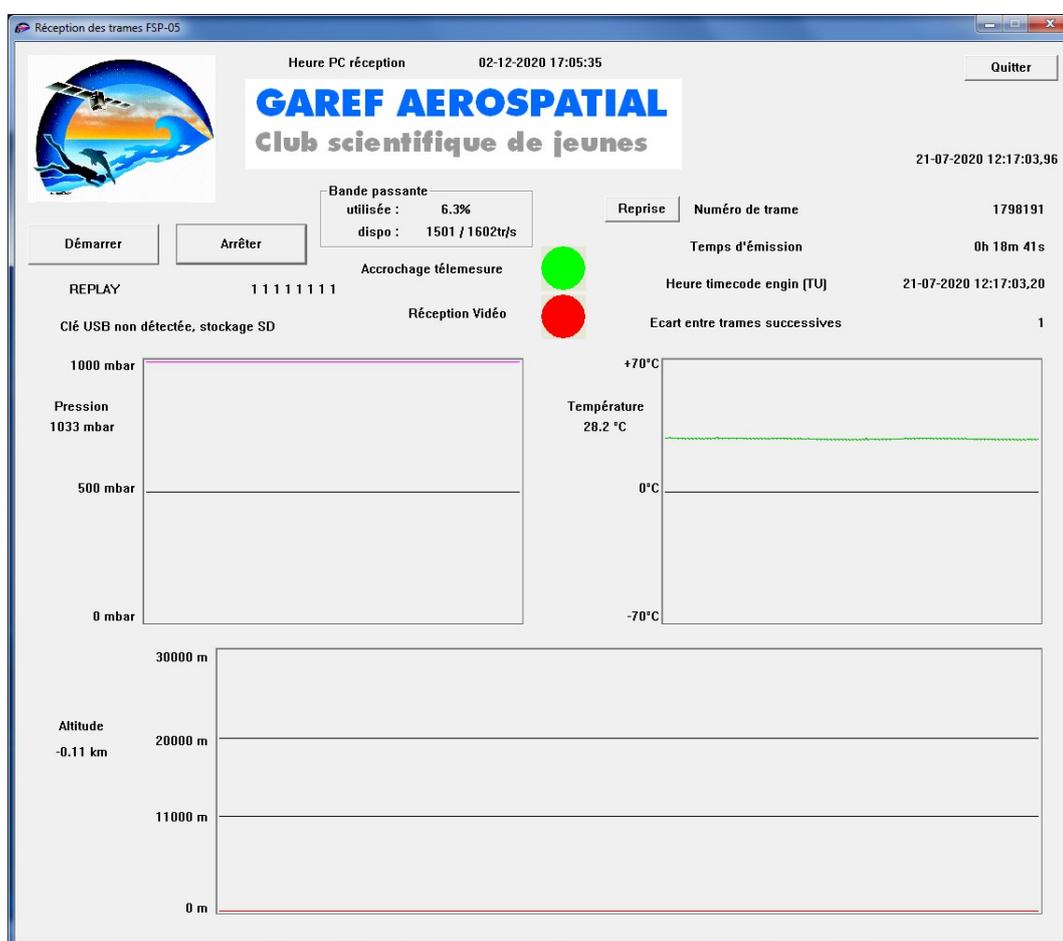
Caractéristiques antenne	Plage de température de fonctionnement
Fréquence : 1,6GHz à 31,7dBm	De -20 à +60 °C

2.3 LOGICIELS DES ÉQUIPEMENTS SOL

2.3.1 Logiciel de réception des données temps réel de la télémesure

Baptisé **DDP** (Dynamic Data Processing), il a été développé par le GAREF pour les premiers ballons HORUS. Il est programmé en Visual C++ 6.0 et fonctionne sous Windows.

Il affiche diverses informations telles que le numéro de trame, les erreurs de transmission, la bande passante utilisée, le *timecode*, les GPIO⁵ de l'OBC, la présence d'un flux vidéo, ainsi que les courbes des mesures atmosphériques.



⁵ *general purpose input output* (entrées et sorties numériques)

La télémesure, sous forme de trames de 78 octets, est fournie à une carte d'acquisition dans le PC de réception par le synchro secondaire du décommutateur, qui a extrait les données numériques du signal de télémesure sous forme d'octets. Cette carte remplit des buffers tournants auxquels le programme DDP accède par une librairie adaptée. Les données brutes sont stockées sous forme de fichiers, puis ceux-ci sont aussitôt analysés. On repère le découpage en trames d'après un mot de synchronisation de 24 bits. Un champ de la trame contenant un code de contrôle CRC⁶ est utilisé pour détecter si une trame est corrompue, et un système de correction de bits a aussi été implémenté, utilisant les propriétés mathématiques du CRC pour récupérer jusqu'à 3 bits faux par trame.

Les données des modules d'HORUS 10 sont extraites dans des fichiers séparés pour pouvoir faire des traitements spécifiques ultérieurement.

Les données vidéo sont traitées comme l'un de ces modules, et le fichier associé est lu en parallèle (par VLC Media Player) comme un flux, prenant en compte les nouvelles données au fur et à mesure de leur réception.

Les données du module convertisseur analogique-numérique (température de l'intérieur de la nacelle) sont affichées en temps réel après application des courbes d'étalonnage.

DDP dispose également d'un mode "replay" permettant de relire des données brutes sauvegardées lors d'une réception précédente, en rejouant le traitement en accéléré.

2.3.2 Logiciel de prévision de trajectoire en vol

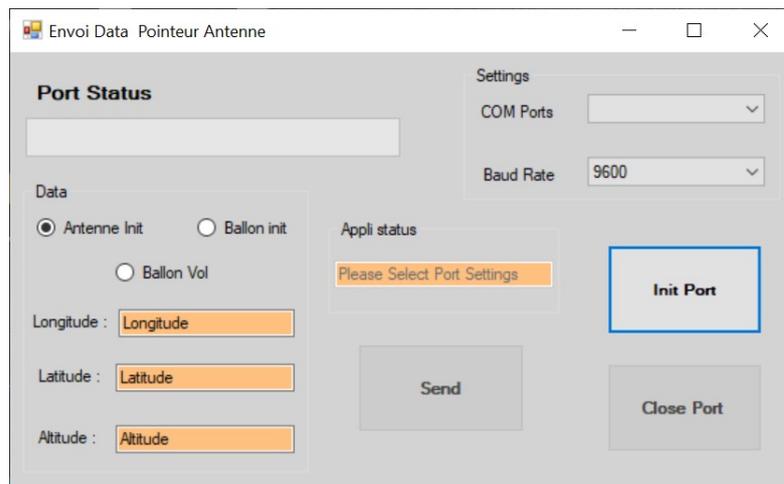
Contrairement aux années précédentes, le logiciel de prévision de trajectoire en vol n'a pas été mis en œuvre, car le système de localisation par Iridium (voir chapitre 2.2.11) permet de localiser la nacelle même en l'absence de visée directe, y compris au sol. De plus nous n'avons pas eu le temps de développer une interface permettant d'injecter les données reçues d'Iridium dans notre logiciel, c'est une amélioration envisageable.

⁶ *cyclic redundancy check* (contrôle de redondance cyclique)

2.3.3 Logiciel de positionnement de l'antenne

Il s'agit d'une interface graphique simple, développée pour piloter le nouveau pied d'antenne développé par les stagiaires de l'école IPSA au GAREF (voir chapitre 2.4.1).

Il permet d'initialiser l'antenne pour lui indiquer sa position de repos, dirigée vers le Nord et à l'horizontale, de renseigner les positions GPS initiales du ballon avant lâcher et de la station de réception, puis de renseigner de nouvelles positions du ballon au fur et à mesure qu'elles sont reçues. La carte de contrôle intégrée au pied se charge ensuite de calculer les angles et pointer l'antenne dans la bonne direction.



2.4 STATION DE RÉCEPTION

Le GAREF a implanté sa station de réception sol au Pic du Midi, comme il en avait l'expérience les deux années précédentes, car la position répond bien à nos besoins. Le lâcher s'effectuant cette année à proximité, sur la même terrasse, cela simplifiait aussi le déroulement des opérations pour l'équipe réduite de cette année. Cette station se compose de la station GAREF en bande S.



Figure 9 : La station de réception bande S sur une terrasse de travail de l'observatoire du Pic du Midi

Pour permettre la retransmission en temps réel des données de position du ballon, une équipe du GAREF s'est installée sur le site du pic du Midi du Bigorre ($42^{\circ} 56' 11''$ N, $0^{\circ} 08' 34''$ E) pour y placer la station de réception principale.

Ce site a été choisi en raison de son dégagement, parce qu'il correspond au point culminant de toute la région. Le pic du Midi de Bigorre, dont l'accès se fait par téléphérique, est situé à une altitude de 2 876 mètres, ce qui permet d'être, durant toute la durée du vol, en vision directe avec le ballon (sauf à l'approche de l'atterrissage où le relief empêche la réception de la télémessure).

L'observatoire du pic du Midi dépend de l'organisme **Observatoire Midi-Pyrénées**. Ce dernier a généreusement accueilli le GAREF et son équipe a aidé le club à monter le matériel, en autorisant l'accès aux zones professionnelles, habituellement fermées au public.



Figure 10 : Montée du matériel de la station de réception trop lourd pour être porté à la main, par un treuil opéré par l'équipe technique de l'Observatoire que l'on remercie vivement.

La fréquence d'émission de l'émetteur est de 2 235 MHz, au format PCM Biphase-L, pour une puissance de +33 dBm et une bande passante de 1.5 MHz. Nous avons donc, en vue directe, une portée de 250 kilomètres pour un rapport signal sur bruit S/N supérieur à 12 dB.

La station de réception, avec diversité d'espace et de polarisation, conçue et réalisée par le GAREF se compose de deux antennes hélicoïdales, une LHCP⁷ et une RHCP⁸ de gain +12dBi chacune (suivies de filtres de bande NF<0.8dB et de préamplis G=+38dB, NF 0.6dB) espacées de la distance idoine pour avoir une diversité d'espace. Le récepteur comprenant un combineur, est suivi d'un synchronisateur de bits et de trame et d'un PC d'acquisition qui retransmet par réseau Ethernet les données aux PC de dépouillement en temps réel.



Figure 11 : Suivi du ballon avec l'antenne de réception en bande S

⁷ left hand circular polarized

⁸ right hand circular polarized

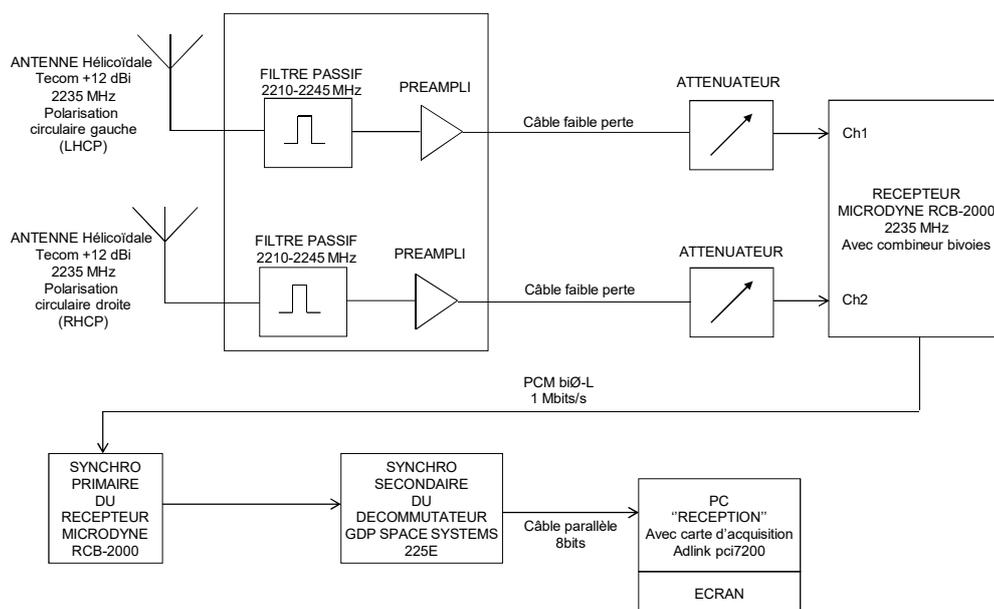


Figure 12 : Synoptique de la station de réception en bande S GAREF (2235MHz,NF<1dB)

2.4.1 Pointage d'antenne automatique

Un système permettant de pointer automatiquement l'antenne de réception en direction du ballon, celle-ci étant calculée en fonction des positions GPS du ballon et de la station de réception, a été développé au GAREF dans le cadre d'un stage de six semaines par trois étudiants de l'école d'ingénieurs IPSA de Paris.

Il est composé d'un pied de monture astronomique, équipé de deux servomoteurs et d'une carte de contrôle pilotée par un logiciel tournant sur le PC de réception. Ce logiciel prend en entrée la position du ballon, soit entrée de façon manuelle soit automatiquement depuis une interface logicielle, puis il calcule l'angle (direction et azimut) auquel l'antenne doit être pointée, puis il envoie l'ordre à la carte de contrôle du pied qui active les servomoteurs pour atteindre l'angle demandé.



Figure 13 : Vérification du fonctionnement du pied d'antenne à l'hôtel, avant le vol

2.5 MISE EN ŒUVRE DU BALLON

2.5.1 Prédiction de trajectoire

La prédiction de trajectoire a été réalisée à l'aide de l'outil CUSF Landing Predictor 2.5 (url : <http://predict.habhub.org/>).

Plusieurs prédictions ont été effectuées, en faisant varier légèrement les paramètres tels que l'altitude d'apogée, la vitesse de montée et la vitesse de descente.

Le ballon a atterri à environ 3 km des différentes prévisions (sur une distance d'environ 60km), mais qui donnent des positions à peu près autour du point réel. Ainsi on peut améliorer l'estimation de la trajectoire réelle en faisant une moyenne des prédictions.

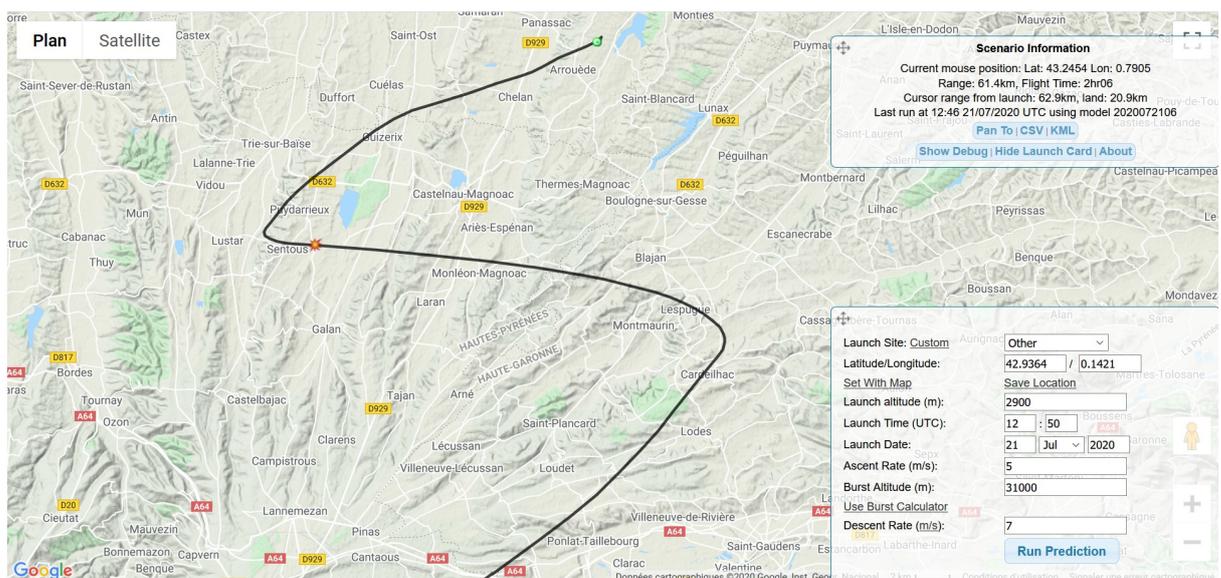


Figure 14 : Une des trajectoires du ballon prévues par le logiciel habhub

2.5.2 Chaîne de vol

Contrairement aux années précédentes, la mise en œuvre du lâcher a été entièrement assurée par les membres du GAREF. Il a ainsi fallu obtenir les différents éléments de la chaîne de vol : le ballon, son système de gonflage et le parachute ont été fournis par METEOMODEM, le réflecteur radar a été construit au GAREF, et l'hélium a été acheté en bouteille à un revendeur Air Liquide de Pau. Puis il a fallu prendre en main les différentes procédures de montage et de gonflage, ainsi que comprendre les réglementations s'appliquant à ce type d'engin volant, et remplir les démarches administratives nous autorisant à effectuer ce lâcher.

Cet hélium a d'ailleurs été source d'un certain nombre de difficultés : en effet, il a fallu trouver un fournisseur capable de nous donner 10 m³ d'hélium (0.18kg/m³), de qualité industrielle, pour pouvoir lancer dès mardi matin (en effet un lancement nécessite près de 5 m³, et le double est à prévoir pour pouvoir préparer un second gonflage si le premier rencontre un problème). Puis il a fallu transporter deux grosses bouteilles d'hélium comprimé, l'une contenant 7,3 m³ et l'autre 2,7 m³, avec les contraintes de sécurité du téléphérique empêchant de les transporter en même temps que le public. Puis il a fallu les monter à la main sur la terrasse toit par les escaliers. De plus, on a rencontré des difficultés de connectique pour relier la sortie des bouteilles au système de gonflage tout en assurant un contrôle du débit.



Figure 15 : Manipulation des bouteilles d'hélium pendant le gonflage du ballon

2.5.3 Lâcher du ballon

La météo pendant la mission était hélas peu encourageante : les conditions étaient plutôt orageuses, donc les prévisions indiquaient presque tous les jours de la pluie, et variaient fréquemment d'un jour sur l'autre, avec plus ou moins de pluie et d'orage. Nous avons donc décidé d'être prêts à lancer dès le mardi 21 juillet 2020, en essayant de nous adapter au fur et à mesure, pour se laisser la possibilité de lancer les jours suivants si la météo nous en empêchait. Au final, nous avons eu de la chance : nous avons passé tout le séjour sans une goutte de pluie ! Mais la menace d'orage a pesé comme une épée de Damoclès sur toutes les opérations, car à cette altitude, les risques de foudroiement sont très importants : il pouvait nous être demandé de tout ranger et d'entrer dans les bâtiments à tout moment, en un délai très court.

Le mardi 21 juillet 2020 donc, nous sommes partis vers le Pic du Midi, après un réveil à 6h30 pour pouvoir prendre la nacelle de téléphérique dédiée aux professionnels à 8h30, qui nous permettait de monter les bouteilles d'hélium. Après l'installation de la station de réception (qui était déjà sur place, elle avait été montée la veille), les blocs de piles de vol ont été installés et les tests électriques ont été effectués. La météo paraissait correcte, la prévision de trajectoire selon les vents nous indiquait une retombée en plaine, et tous les équipements se comportaient correctement. Nous avons donc pu commencer à gonfler le ballon à 11h30, sur la surface hélicoptère à côté de la terrasse Dauzère, sur le toit d'un des bâtiments de l'Observatoire.



Figure 16 : Maintien du ballon pendant son gonflage

Nous avons utilisé une interface de calcul de gonflage de ballon sonde : www.habhub.org/calc, qui prend en paramètre le poids de la nacelle, le type de ballon et l'altitude d'apogée visée (30500m), ce qui nous a donné un contre-poids de 3,9kg et une vitesse ascensionnelle de 6,5m/s. En fabriquant ce contre-poids à l'aide de petites bouteilles d'eau, nous avons pu gonfler le ballon jusqu'à équilibre du contre-poids, auquel moment nous savons qu'il est convenablement gonflé. La connectique fournie avec la bouteille fournissant un débit beaucoup trop faible, nous avons dû tester plusieurs branchements, et le gonflage ne s'est finalement fini qu'à 13h00. Pendant ce temps, la chaîne de vol (parachute, réflecteur radar, suspentes) était montée à proximité et attachée au ballon.



Figure 17 : Gonflage du ballon en terrasse, mardi 21 juillet 2020

Une fois le gonflage fait, la nacelle a pu être mise en marche par son bouchon de vol. C'est à ce moment que nous avons rencontré un problème : l'émetteur était bien reçu mais l'électronique ne s'allumait pas ! Le problème a donc été investigué pendant que le ballon était maintenu au sol, et que d'autres personnes limitaient les mouvements de l'enveloppe pour éviter qu'elle ne s'abîme.

Un faux contact sur les piles a été découvert, qui n'apparaissait que sous la pression du couvercle de la nacelle fermé. Une équipe de chercheurs de l'Observatoire de Paris, en mission sur site, assistait au lâcher et n'a pas hésité à nous aider, nous permettant d'utiliser son matériel d'électronique, dans son labo, pour effectuer la réparation. Les tests ont été concluants, et la procédure de lâcher a pu reprendre.

2.5.4 Déroulement du vol

Enfin, à 14h02 locale (12h02 TU, soit 2h30 après le début du gonflage !) le lâcher a enfin pu être effectué. La station de réception recevait parfaitement, et à 14h20 une première équipe est descendue pour commencer le trajet vers le point de retombée prévu, afin que la récupération de la nacelle puisse se faire assez rapidement après son atterrissage. Celui-ci s'est produit vers 16h00 (14h00 TU), la réception se poursuivant. A 16h25 nous avons choisi d'arrêter la réception qui ne présentait plus d'intérêt, et commencé à ranger la station de réception, qui est restée sur place. Ainsi la deuxième équipe a pu prendre le téléphérique de 17h00.

Nous sommes retournés sur le site de l'Observatoire vendredi 24 juillet 2020 pour récupérer tous nos équipements et rendre les bouteilles d'hélium consignées avec l'hélium non utilisé.



Figure 18 : La station de réception empaquetée, prête à la redescente

2.5.5 Récupération du ballon

Alors que l'équipe de récupération était en chemin vers le point de retombée prévue, à 17h38 (15h38 TU), nous avons reçu un appel d'une résidente, Mme Lozes à Lalanne-Arqué (Gers), qui nous a indiqué avoir récupéré la nacelle dans son champ et qui appelait le numéro indiqué sur la plaque de dissipation. L'équipe de récupération qui arrivait à proximité s'est donc redirigé vers son adresse et l'équipe de réception s'est dirigée vers l'hôtel pour éviter un long trajet inutile.

Ainsi la nacelle a pu être récupérée sans difficulté, et Mme Lozes nous a donné le lieu exact et les conditions dans lesquelles elle a ramassé la nacelle : elle l'a découvert par sa fenêtre qui donnait sur le flanc de la colline où la nacelle était posée avec son parachute rouge vif, et est allée la ramasser vers 17h. A ce moment, la nacelle était posée debout, et la plaque de dissipation était brûlante : ceci est logique puisqu'elle se trouvait contre le sol, empêchant l'évacuation de la chaleur, et est cohérent avec les mesures remontées par la télémesure. Cela indique aussi que l'émetteur fonctionnait encore, du moins jusqu'à peu de temps avant.



Figure 19 : La zone où le ballon a atterri avant d'être ramassé, visible depuis la maison qu'on aperçoit au fond

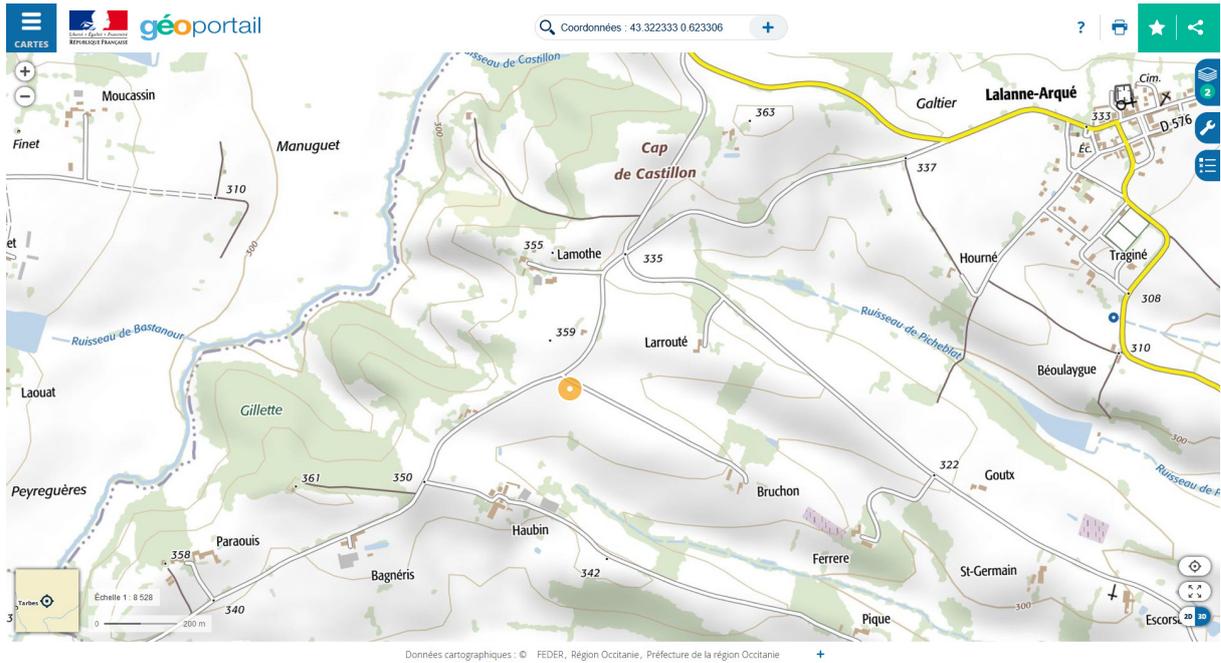


Figure 20 :  Point d'atterrissage du ballon (à flanc de colline, dans un champ)

3. JOURNAL DE LA JOURNÉE DE LANCEMENT

Mardi 21 juillet : JOUR DU LANCEMENT

06h30 Réveil

08h15 Arrivée au pied du téléphérique (grignotage pendant le trajet)

09h20 arrivée au sommet du Pic du Midi

11h30 Début du gonflage du ballon

13h10 Détection d'un problème électrique sur la nacelle

14h02 et 36 secondes : LÂCHER DU BALLON HORUS 10

14h20 Départ de l'équipe de récupération vers le lieu prévisionnel d'atterrissage

16h00 Atterrissage (estimé)

16h25 Rangement de la station de réception

17h00 Départ de l'équipe de réception du Pic du Midi

17h38 La résidente qui a retrouvé la nacelle nous appelle

17h55 Récupération de la nacelle par l'équipe de récupération

19h00 Arrivée à l'hôtel de l'équipe de réception

20h15 Arrivée à l'hôtel de l'équipe de récupération, avec la nacelle

Fin de la journée

4. DÉPOUILLEMENT ET RÉSULTATS OBTENUS

4.1 POINTS NOTABLES

Toutes les mesures sont synchronisées par une datation à l'aide du module *timecode*, synchronisé en temps TU juste avant le lâcher par un générateur IRIGB.

Lâcher	Latitude : 42° 56' 11.5" N Longitude : 00° 08' 31.7" E Altitude GPS : 2 840 m	21 juillet 2020 12 h 02 min 26 s UTC (H0)
Apogée (position estimée)	Latitude : 43° 12' 18" N Longitude : 00° 24' 42" E Altitude GPS : 30 500 m	13 h 23 min UTC
Atterrissage	Latitude : 43° 19' 20.4" N Longitude : 0° 37' 23.9" E Altitude GPS : 350 m	14 h 04 min UTC (estimé)

4.2 TÉLÉMESURE

4.2.1 Qualité de réception

La télémessure a été de très bonne qualité, que ce soit du décollage jusqu'à l'atterrissage à plus de 60km à vol d'oiseau, et est même restée presque sans erreur au sol après l'atterrissage, au point qu'on n'a pas su détecter celui-ci en observant la qualité de réception.

L'expérience constituant à utiliser une antenne patch cylindrique de fusée pour avoir une bonne réception a donc bien été validée. De plus, le diagramme de rayonnement de ces antennes est suffisamment large pour que même l'angle mort de réception dans l'axe longitudinal de la nacelle n'ait pas eu d'impact notable : en effet, les balancements continus de la nacelle font que cet angle mort n'est jamais maintenu dans la direction de la station de réception.

4.2.2 Données décodées

La réception de la télémessure s'est déroulée durant 2 heures et 26 minutes. Environ 14 millions de trames ont été envoyées au total, la plupart étant de remplissage. 31830 trames ont été perdues, soit un taux moyen de perte de trames de 0,2%, ce qui est très bon avec une nacelle en mouvement aléatoire. Pour mémoire l'année précédente on était à près de 50% de perte !

Il a été décodé en direct :

- 877 706 trames de statut OBC
- 92 203 trames du module 50 (CAN)

Comme les années précédentes, le système de détection d'erreur par CRC a très bien fonctionné, et aucun point aberrant n'a été observé sur les courbes de données.

4.3 TRAQUEUR GPS IRIDIUM

Le traqueur GPS embarqué dans la nacelle n'a pas transmis de position durant tout le vol, se contentant d'une position lors de son allumage au Pic du Midi, avant d'être placé à l'intérieur de la nacelle, et d'un nouveau point après l'atterrissage.

En effet, des tests ultérieurs ont montré que son placement à proximité de l'antenne cylindrique de télémétrie émettant 2W de puissance, l'empêchait de communiquer avec ses satellites. Bien qu'ils utilisent une fréquence différente (1,6GHz au lieu de 2,2GHz), l'étage d'entrée se trouve probablement saturé.

Là encore, le manque de temps a limité les essais que nous avons pu faire avant le départ. De plus, nous avons découvert peu avant de partir qu'il ne retransmet de nouvelle position que s'il considère qu'elle a suffisamment bougé par rapport à la précédente envoyée, ce qui a contribué à masquer le problème : en effet la terrasse où nous effectuions le lâcher n'était pas assez grande pour se déplacer avec la nacelle allumée et provoquer l'envoi d'un nouveau point, donc le test de changement de point avec nacelle fermée n'a pas pu être fait au moment du lâcher.

Cela dit, lorsqu'il n'est pas perturbé par l'émetteur de télémétrie, il se comporte très bien : ainsi nous avons pu suivre la trajectoire de la nacelle lorsqu'elle a été récupérée par Mme Lozes jusqu'à son domicile, puis tout le trajet qu'a suivi l'équipe de récupération qui ramenait la nacelle à l'hôtel, tout cela alors que le traqueur était toujours enfermé dans la nacelle, avait subi un passage un 80°C bien au-delà de ses spécifications, et était dans le coffre de la voiture. Une fois que nous aurons établi une certaine distance avec l'antenne de télémétrie pour assurer qu'il n'est plus perturbé, le système restera un très bon moyen de suivi que nous utiliserons dans les expériences suivantes. Des essais récents au GAREF ont montré qu'une distance d'1,5 mètres étaient suffisants pour pallier ce problème.

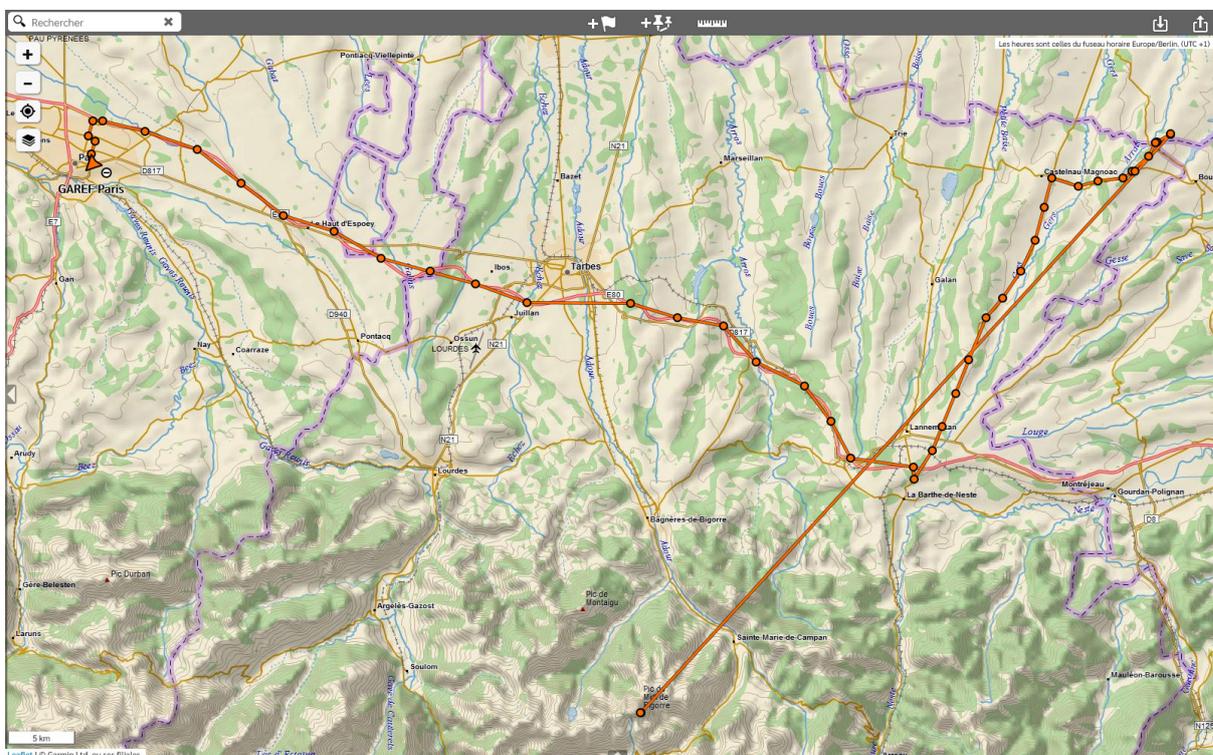


Figure 21 : Trajet remonté par le traqueur GPS pendant le vol, puis pendant le retour de la nacelle à l'hôtel (le point d'atterrissage est celui le plus en haut à droite)

4.4 MODULE VIDÉO

Le module vidéo n'a stocké de vidéo que pendant une partie du vol. Sur cette période, la qualité et le débit de la vidéo a bien été conforme à l'attendu. La cause de la coupure n'a pas été identifiée, mais ressemble à des problèmes observés l'année précédente, qui n'ont pas eu le temps d'être analysés et corrigés à cause des difficultés de cette année. La coupure semble impliquer le système d'exploitation entier, laissant soupçonner un problème électronique ou lié à l'alimentation.

Le capteur vidéo a été orienté plus haut que l'année précédente, montrant l'horizon, et les images dont on dispose montrent que l'angle est à conserver pour les expériences futures, rendant les images plus intéressantes.

Remarque : le module a redémarré à deux reprises après l'atterrissage, nous donnant deux autres vidéos de quelques minutes, montrant en partie le bosquet d'arbres à proximité du champ où la nacelle a atterri avant d'être ramassée. On soupçonne que la forte chaleur (voir chapitre 4.5) qui régnait dans la case électronique a provoqué l'arrêt de l'OBC, et que les fluctuations sur l'alimentation ont provoqué le reset du module vidéo.

Ci-dessous quelques exemples d'images extraites de la vidéo extraite du module (l'heure indiquée en haut n'est pas synchronisée, et sert juste à mesurer l'écoulement du temps).

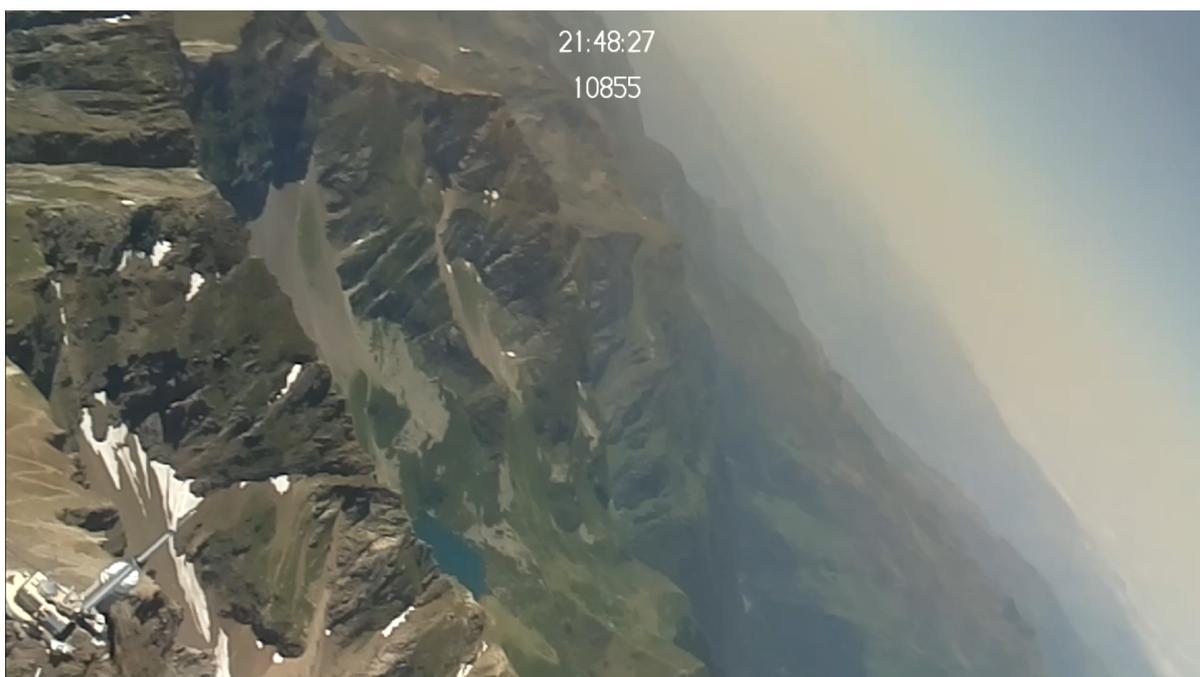


Figure 22 : Vue de l'observatoire (en bas en gauche), quelques minutes après le lâcher



Figure 23 : Vue des Pyrénées, orientée vers l'horizon

4.5 MESURE DE TEMPÉRATURE DE L'INTÉRIEUR DE LA NACELLE

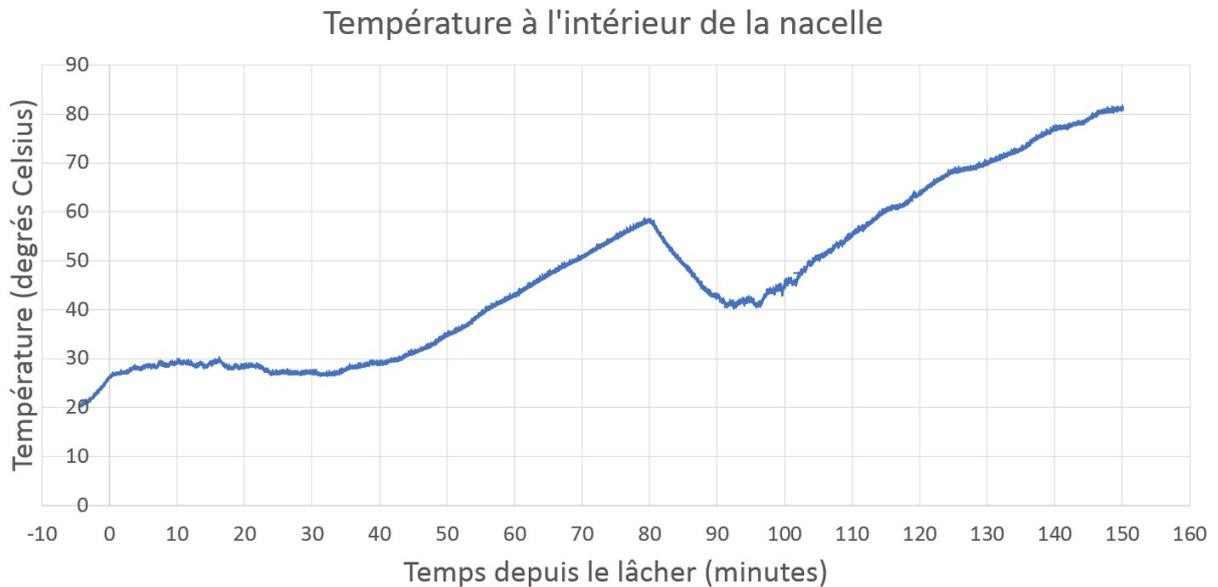


Figure 24 : Température à l'intérieur de la nacelle mesurée par le thermocouple d'HORUS 10, en fonction du temps de vol

Une inflexion très nette nous permet de déterminer l'apogée, à T0+81mn, ce qui est cohérent avec les valeurs prévues par le logiciel qui a été utilisé pour le gonflage du ballon. Malgré les très faibles pressions présentes à cette altitude (30km), qui limitent la dissipation par convection, on a observé cette inflexion sur tous les ballons précédents de la série HORUS, donc elle est bien conforme à l'attendu.

On remarque tout de même que la dissipation de la chaleur par la plaque anodisée noire semble être nettement moins efficace que prévu : sur HORUS 9 avec la même surface de dissipation (rayonnement du corps noir) et la même puissance d'émetteur (2W), on avait à peine atteint 45°C à l'apogée. Pourtant la plaque étant sur le dessous de la nacelle, elle ne subit pas le rayonnement du soleil. Il y a sans doute eu un souci de fabrication, qui devra être corrigé sur la prochaine expérience.

On ne détecte pas d'inflexion au moment de l'atterrissage, ce qui nous empêche de déterminer son heure avec certitude. Mais on observe que la température continue d'augmenter au sol, sans doute car la nacelle était à priori posée verticalement sur sa plaque de dissipation (alors que pour rappel, la dissipation est proportionnelle à la température, donc on devrait tendre vers une température d'équilibre). Avant que l'électronique se coupe, on voit que les températures atteintes sont de plus de 80°C, ce qui peut avoir causé des dommages. Cependant les tests effectués après le retour au GAREF n'ont pas montré de dégâts.

5. PROBLÈMES RENCONTRÉS - RETOUR D'EXPÉRIENCE

La plus grande déception a concerné l'utilisation du traqueur GPS sur Iridium, qui constituait notre expérience principale et n'a pas permis d'avoir la trajectoire du ballon. Cependant la mission a été riche d'enseignements, et la solution mérite d'être utilisée. Une fois que nous aurons établi une distance suffisante avec l'antenne de télémétrie et que nous aurons pris le temps de faire des tests avec la nacelle complète sur des distances raisonnables, ce système fera très bien office de suivi de la trajectoire et de récupération.

L'autre problème a concerné la chaleur rencontrée dans la nacelle, bien plus élevée que sur les ballons précédents alors que le système de dissipation de la chaleur était sensiblement le même. Les procédés de fabrication seront à revoir, et des tests longue durée à effectuer pour s'assurer que la situation ne se reproduise pas, au risque de détruire les équipements.

Malgré de petits accrocs, la mise en œuvre de la procédure du gonflage et du lâcher d'un ballon s'est plutôt bien déroulée. L'expérience aidant, nous devrions gagner du temps et éviter des difficultés (en particulier sur la manipulation des bouteilles d'hélium) dans les prochaines expériences ballon, réalisées en autonomie.

Le module vidéo (qui avait été conçu en 2014) va être complètement revu, pour repartir sur de nouvelles bases exploitant les technologies liées aux drones qui se sont fortement améliorées ces dernières années.

6. CONCLUSIONS ET REMERCIEMENTS

Etant données les conditions très difficiles de l'année 2020, avec une équipe peu présente, réduite, et l'éviction du GAREF du projet PERSEUS qui a réorienté ses activités, le projet HORUS 10 était nécessairement moins ambitieux que ceux auxquels le GAREF est habitué. Malgré cela, il a mis en œuvre de réelles nouveautés et innovations, qui ont permis de prévoir de nombreuses améliorations :

- le système de télémétrie nous permet de garantir un haut débit avec très peu de pertes, sur de grandes distances (on recevait même toujours la télémétrie après l'atterrissage !)
- le système de localisation par envoi des infos par satellite, permettant la localisation de la nacelle peu importe sa région de retombée
- la forme de la nacelle, cylindrique, réalisée en mousse par notre fraiseuse numérique, qui permet d'optimiser l'espace utilisé et réduire le poids de la nacelle

De plus il a permis de maintenir le bon contact que les équipes du GAREF ont avec l'Observatoire du Pic du Midi, qui s'est à nouveau montré très agréable et apportant un fort soutien, nous encourageant à continuer les activités en collaboration avec eux. Les équipes de scientifiques travaillant sur place se sont aussi montrées intéressées et réceptives et ce type d'expérience réalisées par de jeunes lycéens et étudiants, et peuvent déboucher sur des collaborations futures.

L'équipe du GAREF adresse ses remerciements à toutes les personnes ayant permis la réalisation de cette expérience, en particulier :

- **Francis Lacassagne, responsable technique du site de l'observatoire du pic du Midi (UMS OMP), ainsi que Stéphanie Baylac et toute l'équipe de l'Observatoire du Pic du Midi pour son aide**
- **Alexandre PELLETIER et Timothée GERLINGER pour leur aide au lancement**
- **Mme Lozes, qui nous a permis de retrouver la nacelle sans difficulté et sans dommage.**