



HORUS 9

RAPPORT D'EXPÉRIENCE

GD-1907-A-108
Révision 2.0
11 novembre 2019

Rédigé par : **Antoine FOURCADE**

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	3
1.4	DÉROULEMENT DU VOL ET SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	5
2.	PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIENCE	6
2.1	DESCRIPTION GÉNÉRALE	6
2.1.1	Classification du ballon	6
2.1.2	Chaîne de vol.....	7
2.1.3	Bilan de masse	7
2.2	EXPÉRIENCE EMBARQUÉE	8
2.2.1	Description de la nacelle.....	8
2.2.2	Synoptique de la nacelle.....	9
2.2.3	Module de pression	9
2.2.4	Module température.....	10
2.2.5	Ordinateur de bord OBC GAREF (GD1112S801-2.0, S/N 47).....	10
2.2.6	Module vidéo SERA (GP1530F801-1.0, numéro de série 5)	11
2.2.7	Mécanique de la nacelle	11
2.2.8	Module télémessure	12
2.2.9	Module <i>timecode</i> (GP0916M802-3.0, S/N 37)	14
2.2.10	Module convertisseur analogique-numérique (CAN)	14
2.2.11	Alimentation électrique - blocs de piles	14
2.3	RADIOSONDE	15
2.3.1	Utilisation	15
2.3.2	Caractéristiques	16
2.3.3	GPS	16

2.4	LOGICIELS DES ÉQUIPEMENTS SOL	17
2.4.1	Logiciel de réception des données temps réel de la télémessure	17
2.4.2	Logiciel de réception des données de la radiosonde	18
2.4.3	Logiciel de prévision de trajectoire en vol.....	19
2.4.4	Logiciel de calcul de positionnement de l'antenne	20
2.5	MISE EN ŒUVRE DU BALLON	21
2.5.1	Chaîne de vol.....	21
2.5.2	Lâcher du ballon	22
2.6	STATION DE RÉCEPTION	23
2.6.1.1	Station de réception en bande S GAREF	24
2.6.1.2	Station de réception de la radiosonde	25
2.7	PRÉVISION DE TRAJECTOIRE EN VOL ET RÉCUPÉRATION DU BALLON	25
2.7.1	Enjeu de la récupération.....	25
3.	DÉROULEMENT DE LA JOURNÉE DE LANCEMENT	27
4.	DÉPOUILLEMENT ET RÉSULTATS OBTENUS	28
4.1	POINTS NOTABLES.....	28
4.2	TÉLÉMESURE	28
4.2.1	Qualité de réception.....	28
4.2.2	Données décodées.....	30
4.2.3	Détection et correction d'erreurs par CRC	30
4.3	MODULE VIDÉO.....	31
4.4	MESURES DE PRESSION POUR LA RECONSTRUCTION D'ALTITUDE.....	35
4.5	MESURES DE TEMPÉRATURE DE L'ÉMETTEUR EN BANDE S	36
4.6	RADIOSONDE	37
4.6.1	Données météo	37
4.6.2	Données GPS.....	38
4.7	PRÉVISION DE TRAJECTOIRE	40
5.	PROBLÈMES RENCONTRÉS - RETOUR D'EXPÉRIENCE	43
6.	CONCLUSIONS ET REMERCIEMENTS	44

0. ÉVOLUTION DU DOCUMENT

Version 0.1 : 26 juillet 2019, création du document

Version 0.2 : 28 août 2019, compléments AC

Version 0.3 : 31 août 2019, version pour première diffusion

Version 0.4 : 18 septembre 2019, nettoyage et reprise introduction/conclusion (AC)

Version 0.5 : 21 septembre 2019, détail résultats télémessure (AC)

Version 0.6 : 12 octobre 2019, compléments AF+MT

Version 1.0 : 12 octobre 2019, version de diffusion

Version 1.1 : 19 octobre 2019, remarques suite à relecture

Version 1.2 : 7 novembre 2019, mise à jour synoptique station réception

Version 2.0 : 11 novembre 2019, version de diffusion

1. SYNTHÈSE

1.1 CONTEXTE DU PROJET

HORUS 9 est un ballon-sonde léger, réalisé et lâché en 2019 par le GAREF, contenant plusieurs expériences embarquées, dont une réalisée par une équipe d'élèves du lycée parisien Chaptal avec le support technique du GAREF.

Il s'agit de la 9^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.



Lâcher d'HORUS 9, mardi 16 juillet 2019, au camp de Ger

1.2 OBJECTIFS DU PROJET

HORUS 9 a deux objectifs principaux :

- ❖ La détermination de l'altitude du ballon à partir de la pression atmosphérique mesurée

Un système de mesure de la pression atmosphérique, développé par les jeunes du GAREF, et combiné à un modèle d'atmosphère, permet de déterminer l'altitude du ballon. Le module d'acquisition a également été exploité pour mesurer la température du radiateur de l'émetteur de la télémesure.

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

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 5 Mbits/s. Les différents essais au sol déjà réalisés étaient satisfaisants, mais n'étaient pas très représentatifs des perturbations observées lors d'un vol réel. Ce système a été développé par le GAREF dans le cadre du projet Perseus.

Les données transmises par télémesure sont en parallèle sauvegardées, sur carte SD, par le module OBC et le module vidéo. Seule la vidéo de plus haute qualité n'est pas transmise, mais seulement sauvegardée par le module vidéo.

La récupération du ballon étant donc très souhaitable, une radiosonde GPS *Meteomodem* a été ajoutée dans la nacelle, permettant le suivi de cette dernière par une station de réception dédiée.

1.3 SPÉCIFICATIONS

La nacelle, ayant pour dimensions 30 x 30 x 15 cm, était en polystyrène extrudé (400 g à vide) creusé par une fraiseuse CNC 3 axes.

Elle contenait :

- deux blocs de piles,
- un OBC¹,
- un module *timecode*,
- un module vidéo avec son capteur,
- un module convertisseur analogique-numérique,
- un module d'acquisition de données de pression,
- une radiosonde *Meteomodem*,
- un émetteur 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).

¹ *on board computer*

Consommation électrique :

- Émetteur : 0,82 A à 13,5 V
- Électronique nacelle : 0,63 A à 12 V, 0.52 A à 15 V

Autonomie :

- Émission télémessure : 4 heures
- Électronique nacelle : 3 heures
- Radiosonde : > 4 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).

1.4 DÉROULEMENT DU VOL ET SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Le lâcher du ballon Horus 9 a eu lieu au camp militaire de Ger (Pyrénées-Atlantiques et Hautes-Pyrénées), le mardi 16 juillet 2019 à 09 h 42 min 50 s UTC (T0).

Lâcher	Latitude : 43° 13' 21.7" N Longitude : 00° 01' 32.9" O Altitude : 430 m	16 juillet 2019 09 h 42 min 50 s UTC (H0)
Apogée	Latitude : 43° 04' 21.7" N Longitude : 00° 35' 32.6" E Altitude : 30 617 m	12 h 06 min 37 s UTC
Atterrissage	Latitude : 42° 59' 32" N Longitude : 01° 01' 10" E Altitude : 680 m	13 h 05 min 06 s UTC
Récupération de la nacelle (à flanc de colline, en pleine forêt)		17 juillet 2019 16 h 52 UTC

- Lâcher à 430 m d'altitude au camp de Ger, à T0 = 9h43 UTC

Vitesse ascensionnelle : 3,5 m/s

- Apogée à 30 617 m à T0 + 2h23

Vitesse de chute : 38 m/s initialement, 4,5 m/s en fin de vol, moyenne de 9,0 m/s

- Atterrissage du ballon vers Salège, vers T0 + 3h22

Le dernier point GPS reçu était à 1 418 m d'altitude, dans une zone vallonnée et forestière. Malgré des recherches durant toute l'après-midi, la nacelle n'a pas été retrouvée le jour-même. Ce n'est que le lendemain, après de nouvelles estimations et en recevant le signal de la balise qui émettait toujours, que la nacelle a pu être retrouvée, après de longues heures de progression difficile à travers une forêt de ronces, sur un terrain très accidenté.

Les mesures de pression, de température et d'humidité ont toutes fonctionné et correspondent bien aux valeurs théoriques attendues.

La transmission vidéo en temps réel s'est bien déroulée. La qualité de réception était cependant plus faible que prévu lorsque la nacelle était à faible altitude (< 5 000 m). Les images reçues pendant cette période étaient par conséquent très dégradées, et seules les données atmosphériques étaient correctement reçues.

Le suivi GPS de la nacelle a été continu, du lâcher jusqu'à quelques secondes avant l'atterrissage, à quelques centaines de mètres du sol.

Ces données ont pu être utilisées par le logiciel de prévision de retombée, permettant de diriger l'équipe de récupération pour qu'elle se rende au point d'atterrissage estimé. Le terrain dans la zone de retombée, très difficile d'accès, a malheureusement empêché la récupération immédiate de la nacelle.

2. PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIENCE

2.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE

2.1.1 Classification du ballon

Le ballon HORUS 9 est, au sens de l'article 1 de l'appendice 5 de l'annexe 2 à la convention relative à l'aviation civile internationale "Règles de l'Air" 10^e édition, juillet 2005 :

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*).

Un ballon léger utilisé exclusivement à des fins météorologiques et exploité de manière prescrite par l'autorité compétente, peut être exploité au-dessus du territoire d'un autre État sans autorisation appropriée de cet État (2.2 de l'appendice 5 de l'annexe 2 à la convention).

HORUS 9, qui fait des prises de vue, n'était pas prévu pour être exploité en dehors du territoire français (régions terrestres et eaux territoriales adjacentes).

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 déployable,
- la nacelle, qui constitue la charge utile.

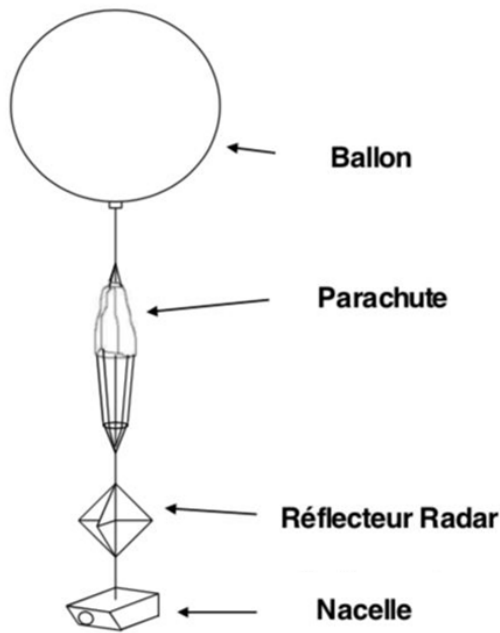


Figure 1 : Schéma de la chaîne de vol (à gauche) et photo de la chaîne de vol au lâcher (à droite)

2.1.3 Bilan de masse

- Ballon : 1 200 g (de type Kaysam 1200)
- Parachute (250 g) + anneau et suspentes diverses (170 g) + réflecteur radar (100 g) : 520 g
- Réflecteur radar passif aluminisé arête de 488 mm (SER 60 m²) : 100 g
- Radiosonde GPS *Meteomodem* : 150 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)
 - module d'acquisition de pression (100 g)
 - mécanique de la nacelle (250 g)
 - câblage et connecteurs (150 g)
 - émetteur (57 g)

Masse totale de la nacelle + radiosonde : 1 620 g (à l'exclusion du réflecteur radar, du parachute et du ballon).

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 capteur de pression et sa carte ;
- le module vidéo SERA avec retransmission en direct ;
- le module de conversion analogique-numérique ;
- le module *timecode* ;
- la radiosonde *Meteomodem* (module GPS) ;
- le thermocouple et son conditionneur ;
- la balise (radiosonde GPS *Meteomodem*).

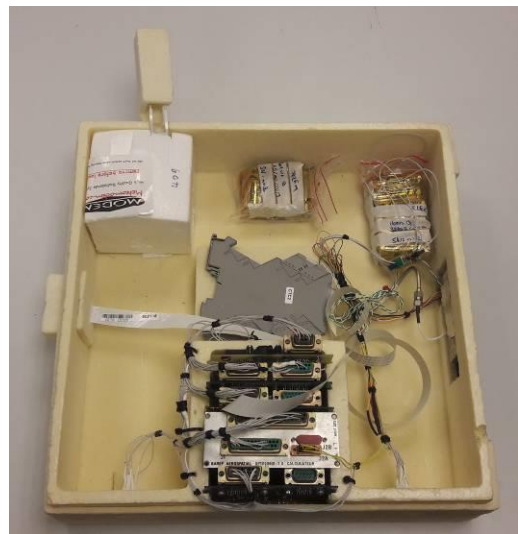


Figure 2 : Vue extérieure (à gauche) et intérieure (à droite) de la nacelle HORUS 9

2.2.2 Synoptique de la nacelle

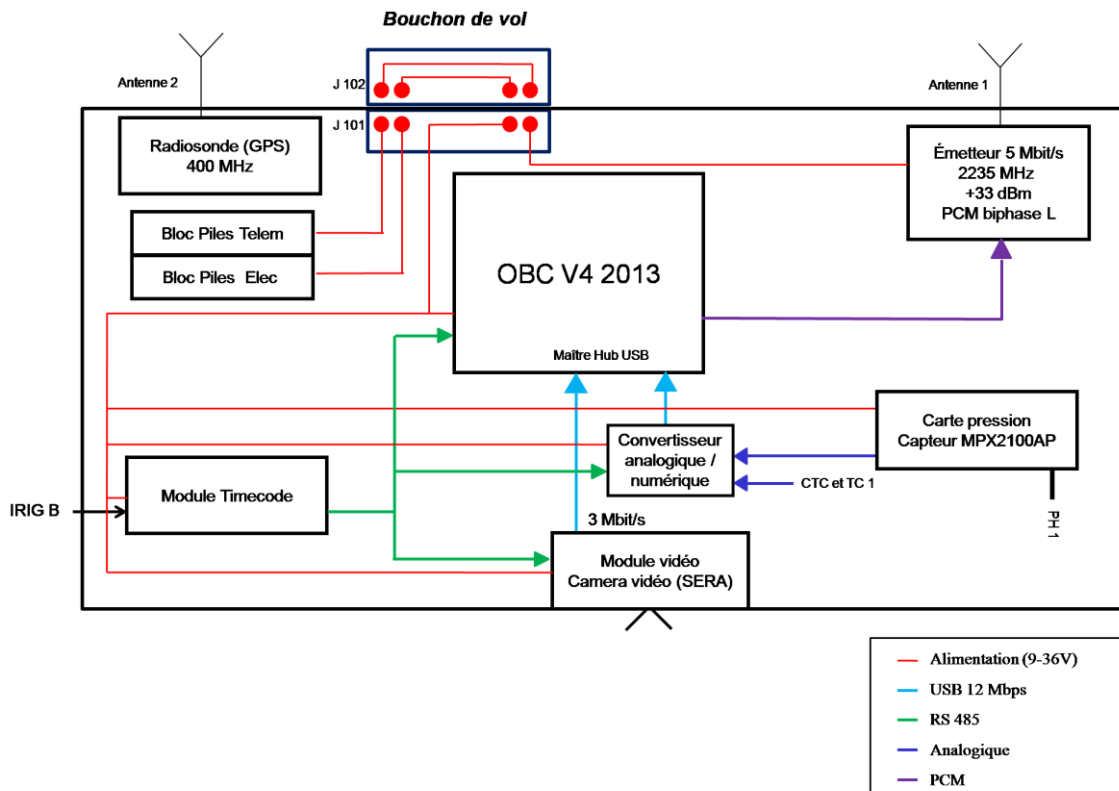


Figure 3 : Synoptique de la nacelle HORUS 9

En plus des connexions présentées ci-dessus, un connecteur 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.

2.2.3 Module de pression

Le capteur de pression utilisé est le MPX2100AP.

Une carte d'adaptation de niveau a été réalisée par des élèves du lycée Chaptal avec le support technique du GAREF, afin d'exploiter l'étendue de mesure du module.

Un étalonnage a été réalisé en étuve pour traduire la valeur sortie par le module CAN en valeur de pression.

- Plage de mesure totale permise par le capteur : 0 - 100 kPa
- Précision du capteur sur sa plage de mesure : 1 kPa
- Incertitude sur l'altitude :

Pression mesurée	Altitude équivalente	Incertitude	Plage utilisée
100 kPa (1 000 mbar)	~100 m	20 m	Oui
10 kPa (100 mbar)	~16 200 m	600 m	Oui

Caractéristiques électriques	
Tension d'alimentation	10 VDC
Intensité	6,0 mA
Valeur pleine échelle	40 mV

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 (GD1112S801-2.0, 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, 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 SERA (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, en utilisant 2 Mbit/s sur les 5 Mbit/s disponibles, et ce, durant toute la durée du vol. La vidéo du vol est acquise en double qualité, 1080p et 720p à 24 images/s.

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 Mécanique de la nacelle

Les précédentes expériences de ballon-sonde réalisées par le GAREF utilisaient une nacelle fabriquée avec des plaques de carton plume (cf. Horus 8, ballon-sonde lancé par le GAREF en juillet 2018).

Pour Horus 9, 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. Lors de l'usinage, les emplacements des cartes électroniques sont alors créés directement dans la mousse, ce qui permet d'intégrer parfaitement les modules dans la mécanique de la nacelle.

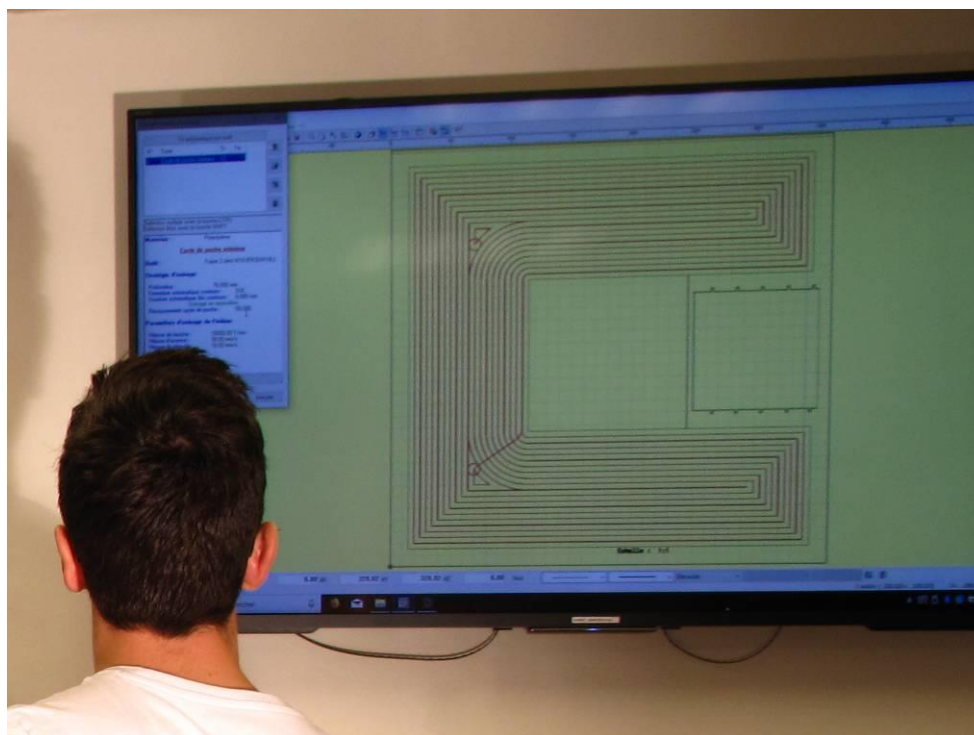


Figure 4 : Programmation de l'usinage à partir de la modélisation 3D de la nacelle

La mécanique de la nacelle est constituée de deux parties : un réceptacle permettant d'accueillir les équipements embarqués, et un couvercle permettant de protéger l'ensemble des équipements.

Ces deux parties ont été modélisées en 3D grâce à un logiciel de CAO³. 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 pleine, progressivement évidé par la fraiseuse.

Les dimensions finales de la nacelle sont : 30 x 30 x 15 cm.



Figure 5 : Usinage d'un bloc de polystyrène extrudé

2.2.8 Module télémétrie

Le module télémétrie est composé d'une antenne permettant l'émission du signal et d'un émetteur de télémétrie.

Caractéristiques de l'antenne d'émission (HUBER SUHNER)

Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques électromagnétiques
Masse : 110 g	Polarisation circulaire droite Fréquence d'émission : 2 100 à 2 300 MHz
Dimensions : 95 x 107,8 x 32 mm	Gain : 8 dBi Impédance : 50 Ohm

³ conception assistée par ordinateur

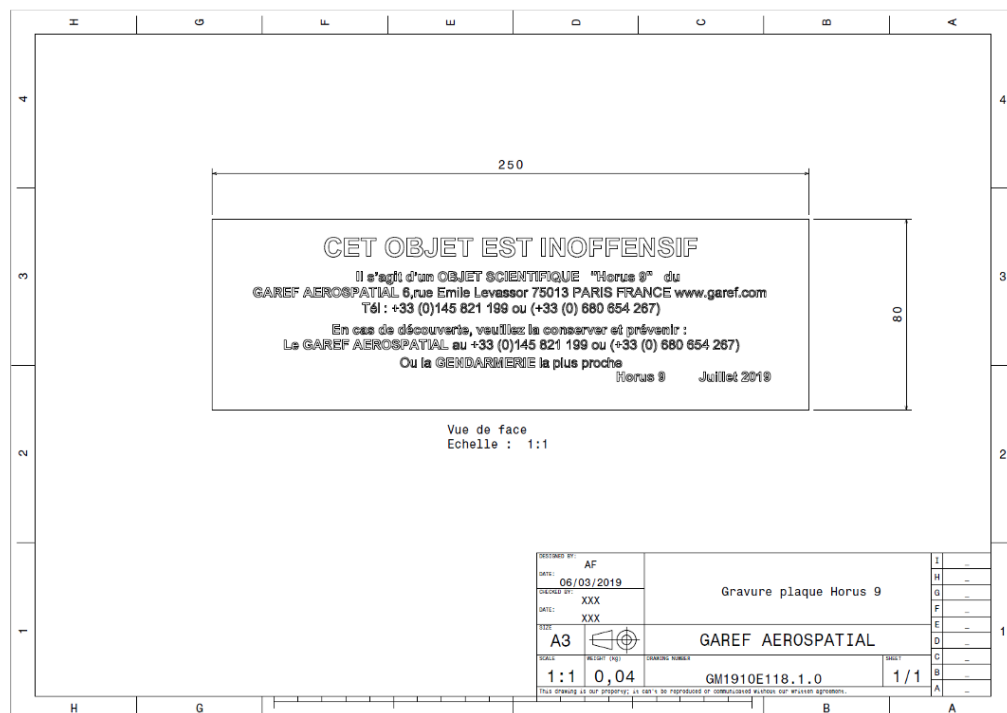
Caractéristiques de l'émetteur de télémétrie (Réf GAREF : 53850101)

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 : 650 mA	Puissance d'émission : +33 dBm nominal (2,0 W)
		Impédance d'entrée : 75 Ohm, 35 pF Impédance de sortie : 50 Ohm

Dans le but de dissiper les 6 watts de perte thermique de l'émetteur de télémétrie, une plaque noire anodisée en aluminium d'une surface de 0,2 m² a été utilisée. Ce matériau a été choisi du fait de sa faible densité et de son émissivité reportée élevée (0,82).

L'émetteur de télémétrie 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.

La plaque comporte un texte indiquant la nature du ballon et les coordonnées du GAREF pour des besoins de récupération (voir plan GM1816E118 ci-dessous).



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.

2.2.9 Module *timecode* (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.

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

2.2.10 Module convertisseur analogique-numérique (CAN)

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.

Pour Horus 9, nous avons utilisé deux 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 les voies activées)

2.2.11 Alimentation électrique - blocs de piles

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 télémessure	9	13,5 V	135 g
Bloc piles électronique	12	18 V	180 g

2.3 RADIOSONDE

2.3.1 Utilisation

Afin de pallier une éventuelle perte de télémessure durant le vol et donc une perte possible de la position du ballon rendant difficile, voire impossible, la récupération du ballon, nous avons décidé d'utiliser une radiosonde. Cette dernière possède son propre émetteur, pouvant émettre dans une plage de fréquence allant de 400 à 406 MHz, ainsi que sa propre station de réception (développée dans la partie 3.2).

La radiosonde est équipée de plusieurs capteurs : un GPS, qui permet de suivre la sonde, un capteur de température et une sonde d'hygrométrie. Le suivi GPS a également permis de reconstruire la trajectoire.

Cet équipement ainsi que sa station de réception sont fabriqués par la marque *Meteomodem* et homologués par l'Organisation Mondiale de la Météorologie.

La radiosonde M10 se trouvait à l'intérieur de la nacelle, et a été configurée pour émettre à une fréquence de 401.4 MHz.

2.3.2 Caractéristiques

Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques électriques
Masse : 150 g	Alimentation : batterie indépendante
Dimensions : 95 x 95 x 88,5 mm	Autonomie : > 4 heures

2.3.3 GPS

Le GPS est de type 3D différentiel, c'est-à-dire qu'il donne sa position selon les 3 axes d'un référentiel cartésien, permettant ainsi d'accéder à l'altitude du ballon. Les données GPS sont acquises à une fréquence de 1 Hz.

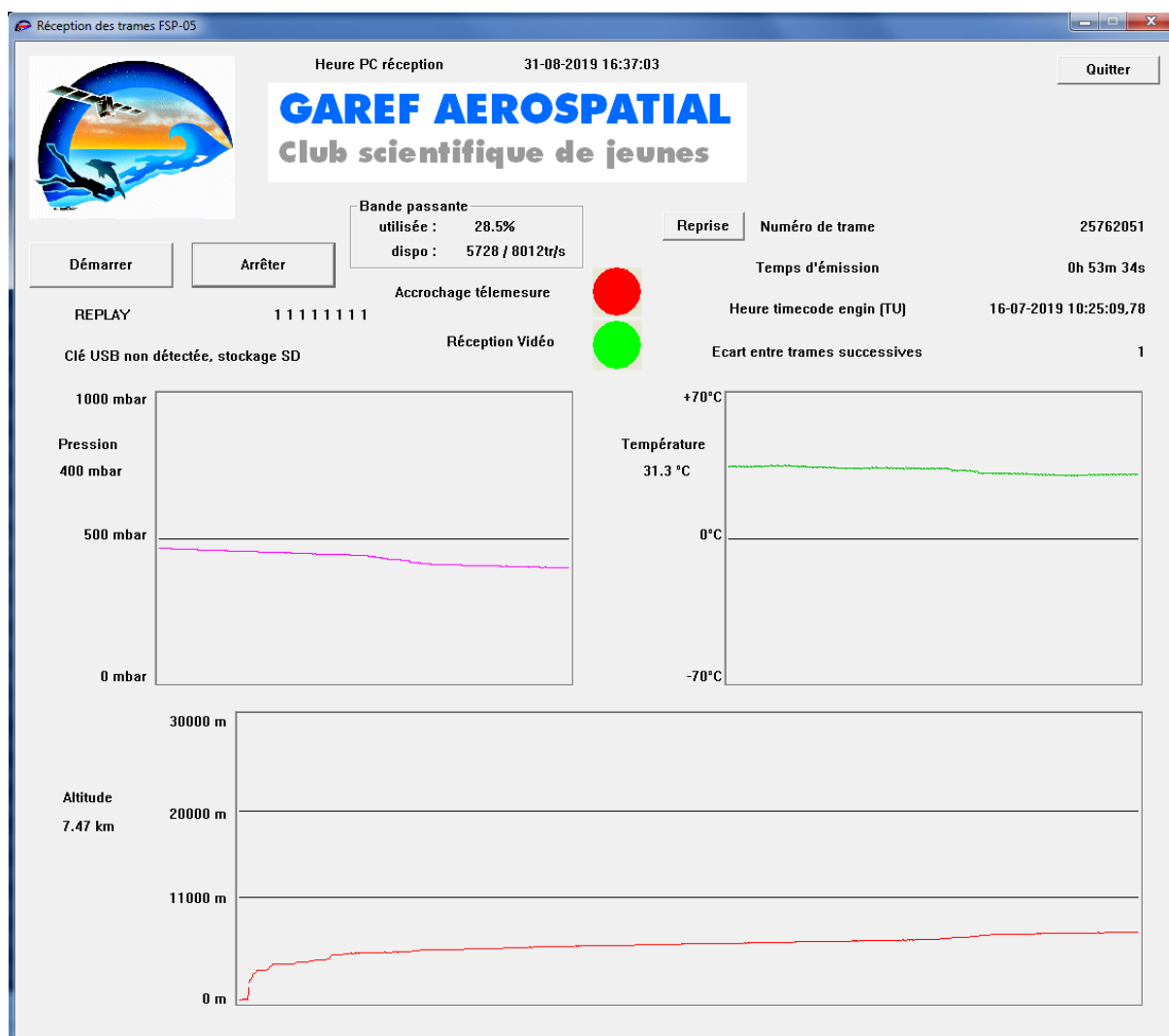
Précision : meilleure que 10 mètres.	Résolution : 0,01 m.
--------------------------------------	----------------------

2.4 LOGICIELS DES ÉQUIPEMENTS SOL

2.4.1 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 9 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 (pression et température de l'émetteur) sont affichées en temps réel après application des courbes d'étalonnage, et une autre courbe donne l'altitude estimée d'après la pression, en appliquant les formules de l'atmosphère standard.

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.

2.4.2 Logiciel de réception des données de la radiosonde

Baptisé **EOSCAN**, il s'agit du logiciel fourni avec la radiosonde *Meteorodem*, qui détecte automatiquement les radiosondes allumées dans les environs, et démarre une session d'enregistrement dès qu'il détecte un lâcher (altitude augmentant brusquement). Pendant cette session, il peut afficher toutes sortes d'informations graphiques, telles que l'altitude, la pression, la température, la vitesse, la direction du vent et la position GPS sur une carte.

Ce logiciel a été configuré pour générer en temps réel un fichier de données textuelles contenant la trajectoire (latitude, longitude, altitude) au cours du temps, dans un format adapté pour être lu directement par le logiciel Crystal (voir 2.4.3).

Le logiciel a très bien fonctionné, mais la connexion a été perdue peu avant l'atterrissage (altitude de 1 418 mètres) à cause du relief montagneux. Les dernières coordonnées GPS n'étaient donc pas tout à fait celles du lieu d'atterrissage (à environ 800 mètres du sol).

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

2.4.3 Logiciel de prévision de trajectoire en vol

Baptisé **Crystal**, programmé en Visual C++ 6.0 et fonctionnant sous Windows 7, ce logiciel utilise les données de position GPS extraites du logiciel EOSCAN pour fabriquer l'équivalent d'un radiosondage en temps réel, donnant la distance parcourue, le temps de la traversée d'une couche d'altitude, et ainsi déterminer la vitesse des vents dans cette couche.

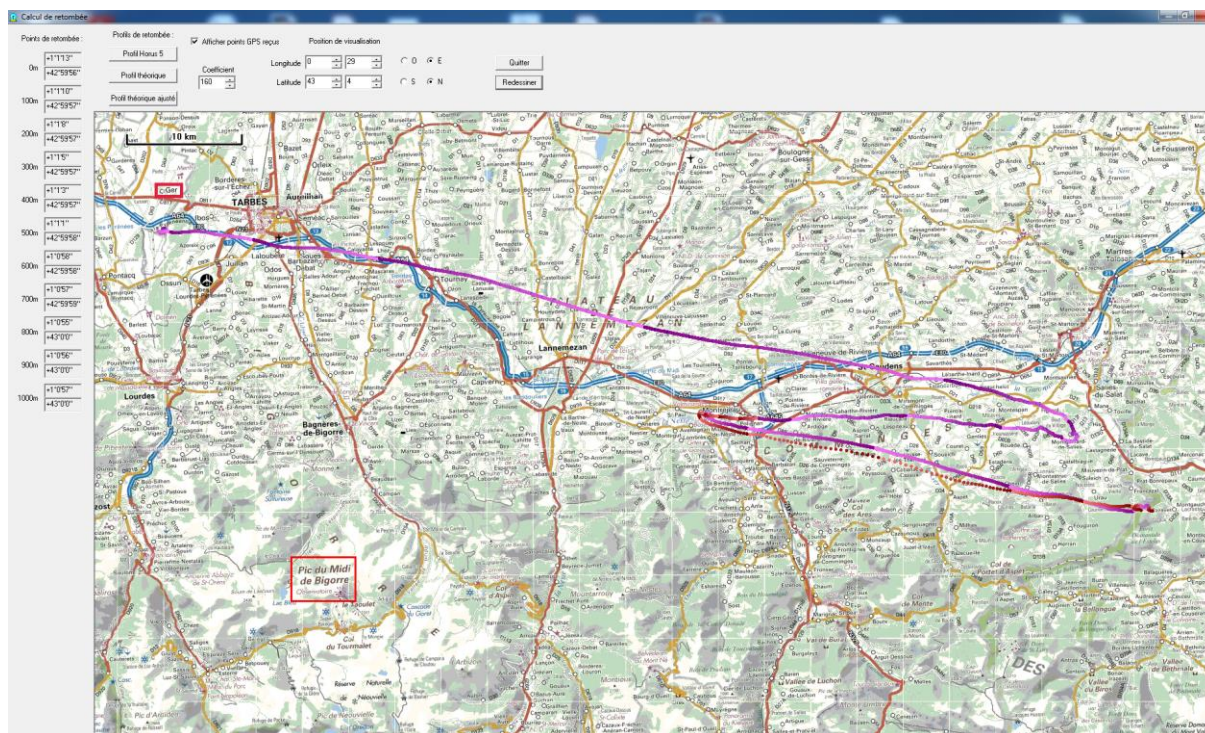


Figure 6 : Trajectoires prévisionnelle depuis l'apogée (en rouge) et réelle (en violet)

Il calcule à tout moment du vol le point d'atterrissage de la nacelle en simulant la descente, en partant de l'hypothèse que les vents rencontrés à la descente seront les mêmes que ceux rencontrés lors de l'ascension, et que la vitesse de descente d'une nacelle sous parachute est connue.

Au cours de la descente, le calcul est constamment ré-effectué à partir de la dernière position GPS connue, afin d'améliorer la précision du point d'atterrissage de la nacelle.

Le GAREF a reconstitué une carte numérique de la région par assemblage de captures d'écran du site internet Géoportail. Cette carte a été utilisée par Crystal comme image de fond, sur laquelle se dessinait la trajectoire, et a facilité les consignes données à l'équipe de récupération.

Ce logiciel a bien fonctionné. La vitesse de descente sous parachute était cependant plus faible que prévu par nos modèles théoriques (détails au 4.7). Il a donc fallu réajuster la prévision au fur et à mesure de la descente. La prévision depuis l'apogée affichée sur l'image ci-dessus a ainsi été **amplifiée d'un facteur 1.6**.

L'équipe de récupération est partie du camp de Ger dès que l'éclatement du ballon a été détecté, et a pu se rapprocher de la zone d'atterrissage prévisionnelle durant sa descente. En raison du terrain difficile et des routes peu praticables de cette zone, l'équipe n'a cependant pu arriver qu'après l'atterrissage.

2.4.4 Logiciel de calcul de positionnement de l'antenne

Il s'agit d'une interface graphique simple, développée par le GAREF, destinée à calculer facilement l'angle et l'élévation à donner au pied d'antenne afin d'orienter correctement l'antenne sol vers le ballon. Ce calcul prend en compte la rotondité de la Terre, et s'appuie sur la position GPS 3D de l'antenne et du ballon. La position GPS du ballon était rentrée manuellement d'après les données lues dans le logiciel EOSCAN.

Le pied d'antenne est un pied de télescope motorisé. À l'aide d'une boussole et d'une mesure de niveau sur smartphone, le pied pouvait être orienté à quelques degrés près dans la direction du ballon.

The screenshot shows a Windows application window titled "AntennaTrackingProgramMFC". The interface is divided into three main sections: "STATION SOL", "BALLON SONDE", and "POSITIONNEMENT ANTENNE".

STATION SOL

- DD (degrés décimaux) -C: Latitude: 42.9369, Longitude: 0.1411
- DMS (degrés, minutes, secondes) -C: Latitude: N S 42 ° 56 m 13 s; Longitude: E O 0 ° 08 m 28 s
- Altitude: 3000

BALLON SONDE

- DD (degrés décimaux) -C: Latitude: 43.6500, Longitude: 0.7364
- DMS (degrés, minutes, secondes) -C: Latitude: N S 43 ° 39 m 0 s; Longitude: E O 0 ° 44 m 11 s
- Altitude: 200

POSITIONNEMENT ANTENNE

- Azimuth: 31
- Elevation: -2

Buttons: "CALCULER" and "Quitter".

2.5 MISE EN ŒUVRE DU BALLON

2.5.1 Chaîne de vol

La chaîne de vol a été assemblée sur 2 jours : le parachute a été assemblé, puis contrôlé par l'aérotechnicien la veille du lâcher ; les autres éléments de la chaîne de vol (réflecteur radar, nacelle et ballon) ont été reliés sur l'aire de lancement.



Figure 7 : Fixation des sustentés et de l'anneau anti-torche au parachute



Figure 8 : Fixation de la nacelle sur la chaîne de vol

2.5.2 Lâcher du ballon

Le jour du lâcher, les équipements sol ont été installés pour prendre les mesures météorologiques au sol et vérifier que la vitesse du vent permettait le lâcher. Puis ont eu lieu les tests électriques, ainsi que les essais de bonne transmission en bande S et de bonne réception de la radiosonde, avec l'équipe postée au Pic du midi.

Le ballon a été gonflé à l'hélium par l'aérotechnicien et maintenu au sol via une bâche par les membres d'un autre club ayant prêté main forte au GAREF. L'aérotechnicien a choisi une pression de gonflage plutôt faible, de manière à assurer un éclatement à au moins 30 km d'altitude. La vitesse de montée était donc plus faible que celle du ballon HORUS 8 : 3,5 m/s au lieu de 5,9 m/s, et l'altitude d'apogée atteinte, supérieure : 30,6 km au lieu de 20,0 km.



Figure 9 : Gonflage du ballon sur l'aire de lancement du camp de Ger, mardi 16 juillet 2019

2.6 STATION DE RÉCEPTION

Dans le cadre d'un lâcher depuis le camp de Ger, le GAREF a implanté sa station de réception sol au pic du Midi. Cette station se compose de la station GAREF en bande S et de la station dédiée à la radiosonde, fournie par le constructeur.

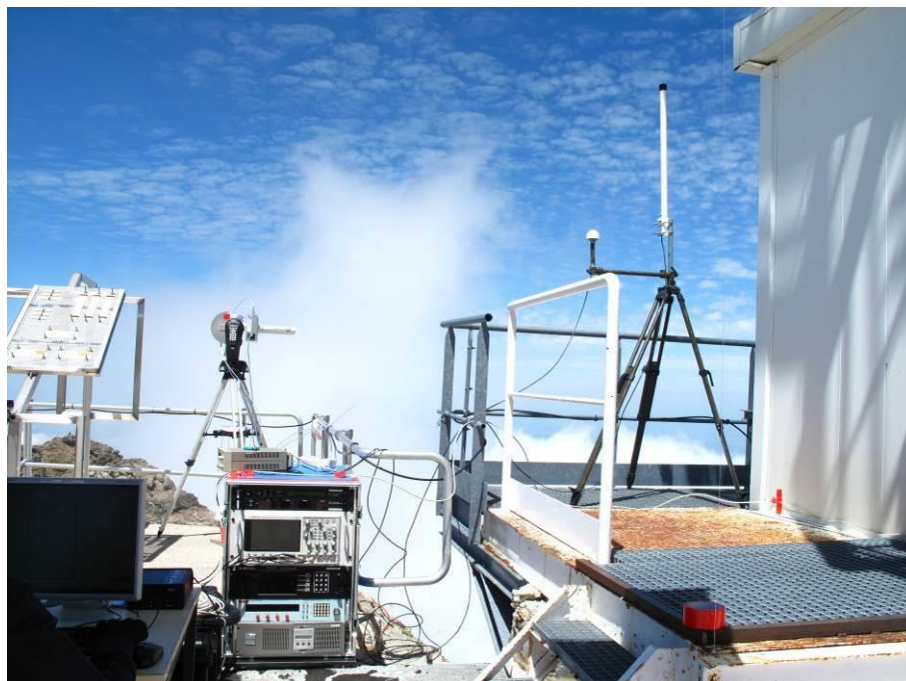
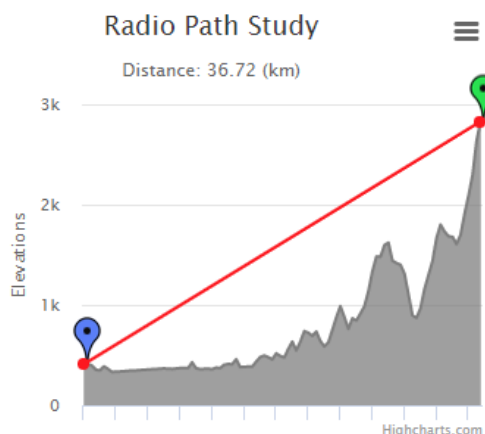


Figure 10 : Les deux stations de réception : bande S (à gauche) et radiosonde (à droite) sur une terrasse de travail de l'observatoire du Pic du Midi

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° 56' 11" N, 0° 08' 34" E) pour y placer la station de réception principale.

Le pic du Midi est situé à un peu moins de 36 kilomètres à vol d'oiseau en vue directe du camp de Ger. Sa position stratégique permet la réception tout au long du vol des données de la télémétrie en bande S et celles de la radiosonde dans la bande 400 MHz.



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, 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 a empêché la réception de la télémétrie).

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.

2.6.1.1 Station de réception en bande S GAREF

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 12 MHz. Nous avons donc, en vue directe, une portée de seulement 60 kilomètres pour un rapport signal sur bruit supérieur à 12 dB.

La station de réception se compose de deux antennes hélicoïdales, une LHCP⁷ et une RHCP⁸.



Figure 11 : L'antenne de réception en bande S

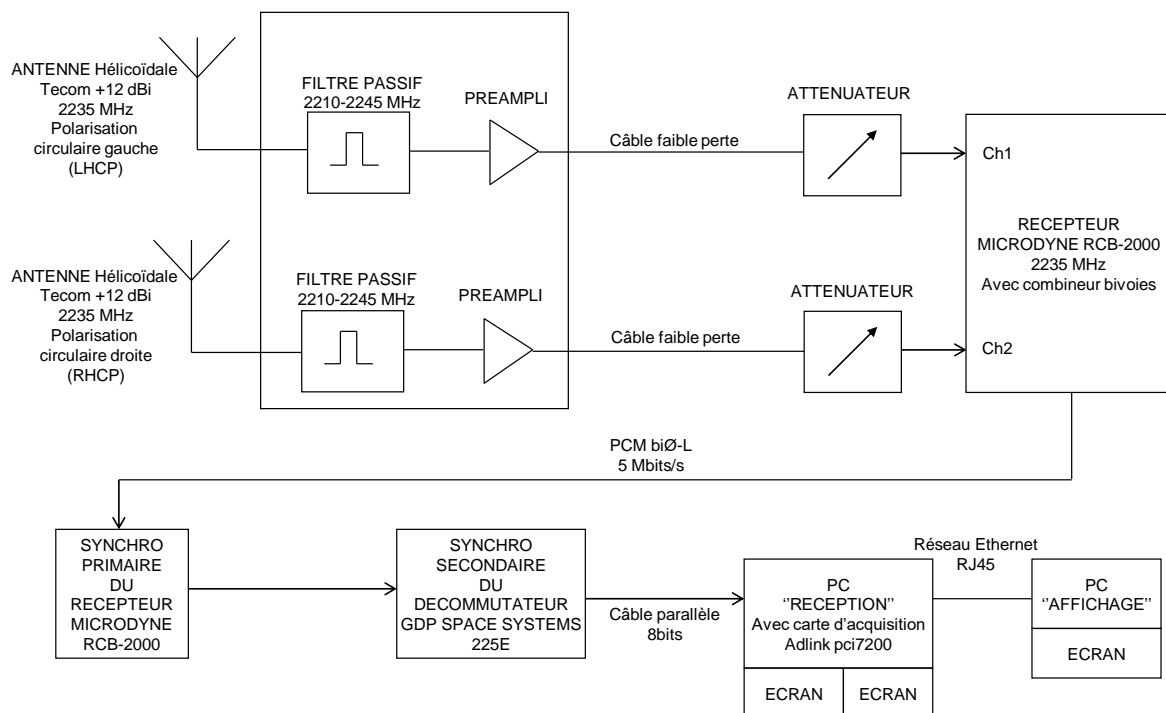


Figure 12 : Synoptique de la station de réception en bande S GAREF

⁷ left hand circular polarized

⁸ right hand circular polarized

2.6.1.2 Station de réception de la radiosonde

L'émetteur de la radiosonde a une puissance de 200 mW, c'est-à-dire de +23 dBm, à une fréquence de 401,4 MHz et pour une bande passante de 5 kHz. À une distance de 350 kilomètres on obtient un rapport signal sur bruit de 24 dB, ce qui est largement suffisant pour la bonne réception du signal, et donc de la position GPS du ballon, à condition que celui-ci soit en vision directe.

2.7 PRÉVISION DE TRAJECTOIRE EN VOL ET RÉCUPÉRATION DU BALLON

2.7.1 Enjeu de la récupération

Compte tenu du matériel qu'il contenait, la récupération du ballon était primordiale.

Pour permettre la récupération du ballon il était nécessaire de connaître la position du ballon à tout moment. Pour ce faire, la nacelle contenait un module GPS, et les informations qu'il fournissait étaient transmises via la télémesure. Il était donc nécessaire que la transmission des données se fasse en continu pendant toute la durée du vol.

Compte tenu du bilan de liaison à 5 Mbit/s de la télémesure en bande S, il est nécessaire, pour recevoir en permanence la position GPS, d'avoir un second système de télémesure (radiosonde) avec une fréquence et un débit plus faibles.

L'enveloppe du ballon n'a pas été retrouvée. Le reste a été retrouvé en bon état !



Figure 13 : L'équipe de récupération avec la chaîne de vol

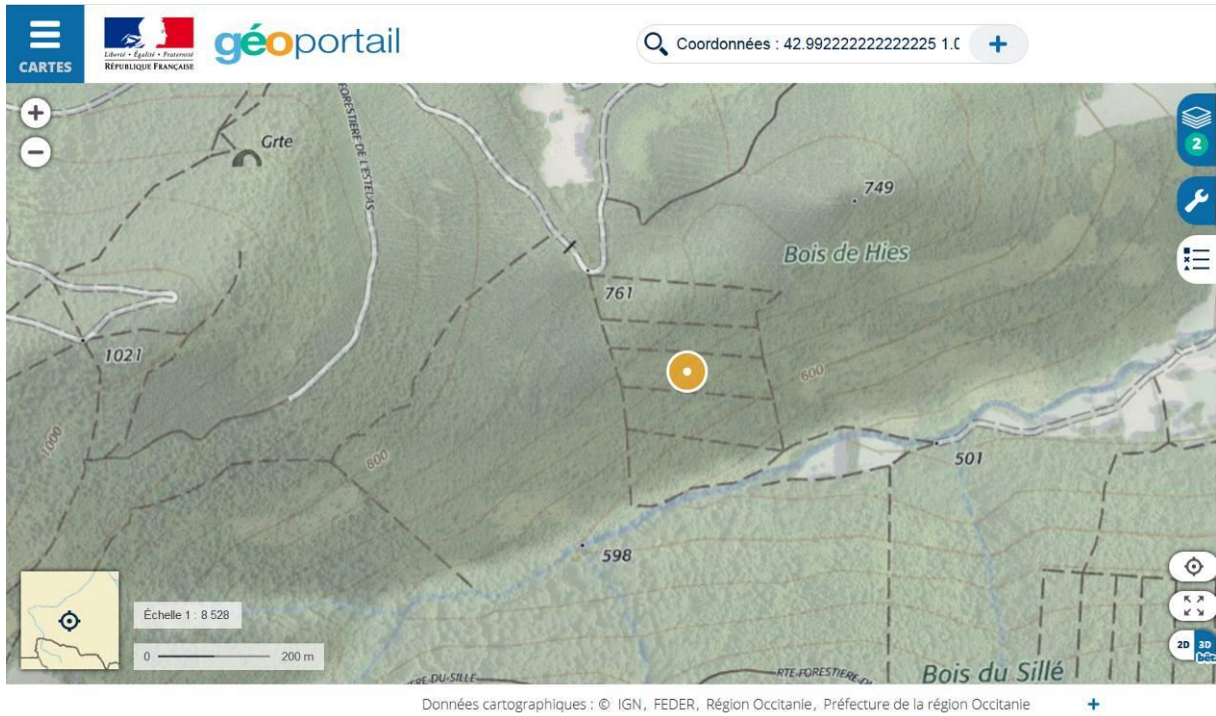


Figure 14 : Point d'atterrissage du ballon (à flanc de colline, dans les broussailles)

3. DÉROULEMENT DE LA JOURNÉE DE LANCEMENT

Mardi 16 juillet : JOUR DU LANCEMENT

08 h 00 : Départ de l'équipe réception et de l'équipe sol

08 h 45 : Arrivée de l'équipe sol au camp de Ger

09 h 30 : Arrivée de l'équipe réception au pic du Midi

10 h 30 : Stations de réception opérationnelles

11 h 07 : Allumage de la radiosonde au camp de Ger
Réception de la radiosonde réussie au pic du Midi

11 h 08 : Relevé météo

11 h 31 : Allumage des équipements sols
Synchronisation du *timecode* via l'ombilical
Allumage de la télémessure ballon
Réception de télémessure en bande S réussie au pic du Midi

11 h 34 : Débranchement de l'ombilical

11 h 43 : LÂCHER DU BALLON HORUS 9

13 h 30 : Départ de l'équipe sol vers le lieu prévisionnel d'atterrissage

14 h 06 : Éclatement du ballon à l'apogée

15 h 03 : Réception de la dernière donnée radiosonde

16 h 30 : Départ de l'équipe réception du pic du Midi vers le lieu d'atterrissage

18 h 30 : Arrivée de l'équipe réception sur le site d'atterrissage

20 h 20 : Abandon de la recherche du ballon

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 juste avant le lâcher par un générateur IRIGB.

	Altitude (m)	Time of day (s)	Heure UTC
Point lâcher	426	34 988	09 : 43 : 08
Apogée	30 617	43 611	12 : 06 : 51
Dernier point GPS	1 418	46 842	13 : 00 : 42
Atterrissage	800	-	13 : 05 : 06

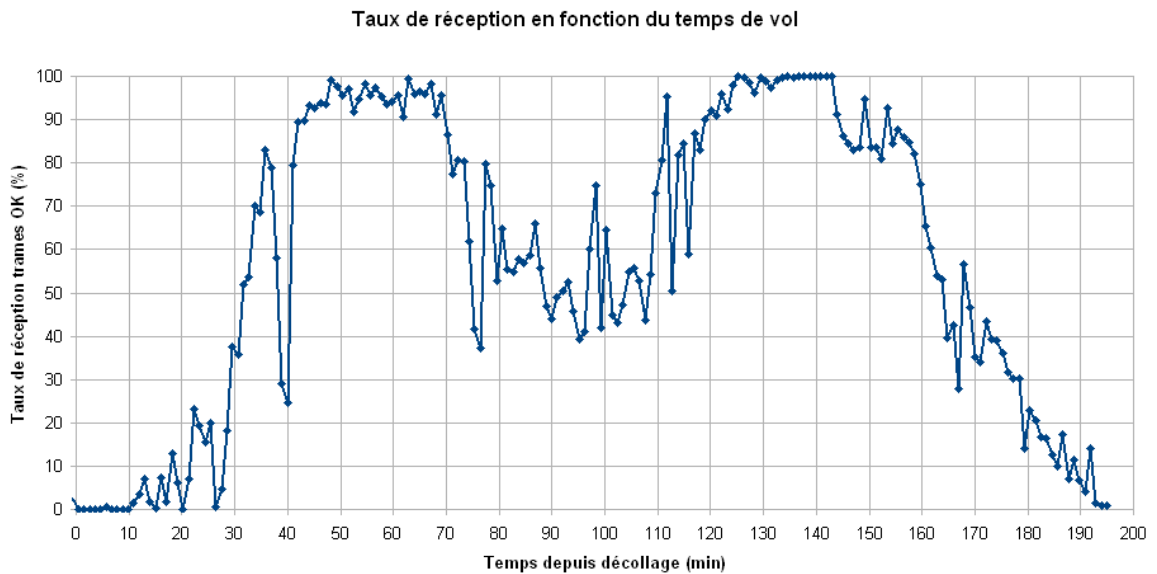
4.2 TÉLÉMESURE

4.2.1 Qualité de réception

La télémétrie a été nettement plus bruitée que ce qui était attendu, en particulier à faible altitude. Ainsi, les premières données de pression et de température n'ont été reçues que 11 minutes après le décollage, soit vers 2 300 mètres, et il n'y a pas d'image complète dans la vidéo reçue avant environ 30 minutes après le décollage, soit à environ 5 300 mètres.

L'antenne hémisphérique utilisée a un diagramme de rayonnement nettement plus faible à l'horizontale. La réception des données par la station du pic du Midi, située à presque 3 000 mètres d'altitude et à plus de 30 kilomètres de l'aire de lâcher, a par conséquent été assez mauvaise lorsque le ballon était en-dessous ou proche de l'horizon, malgré une vue directe.

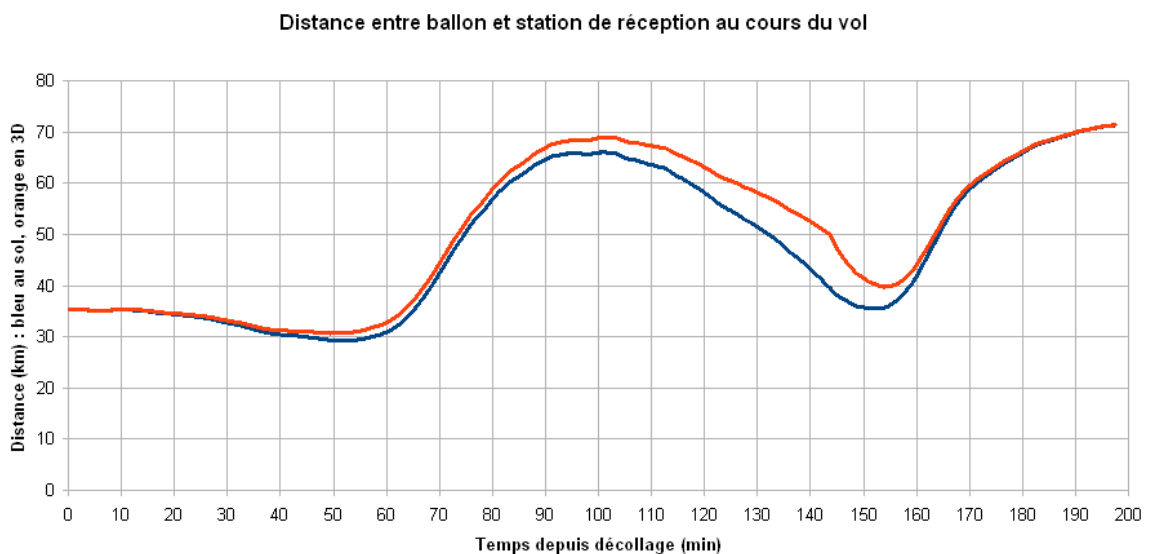
Pour rappel, l'altitude GPS sur l'aire de lâcher était d'environ 400 mètres.



On observe bien que le taux de réception de trames correctes augmente avec l'ascension de la nacelle, puis diminue lorsque la distance entre la nacelle et la station de réception devient trop importante.

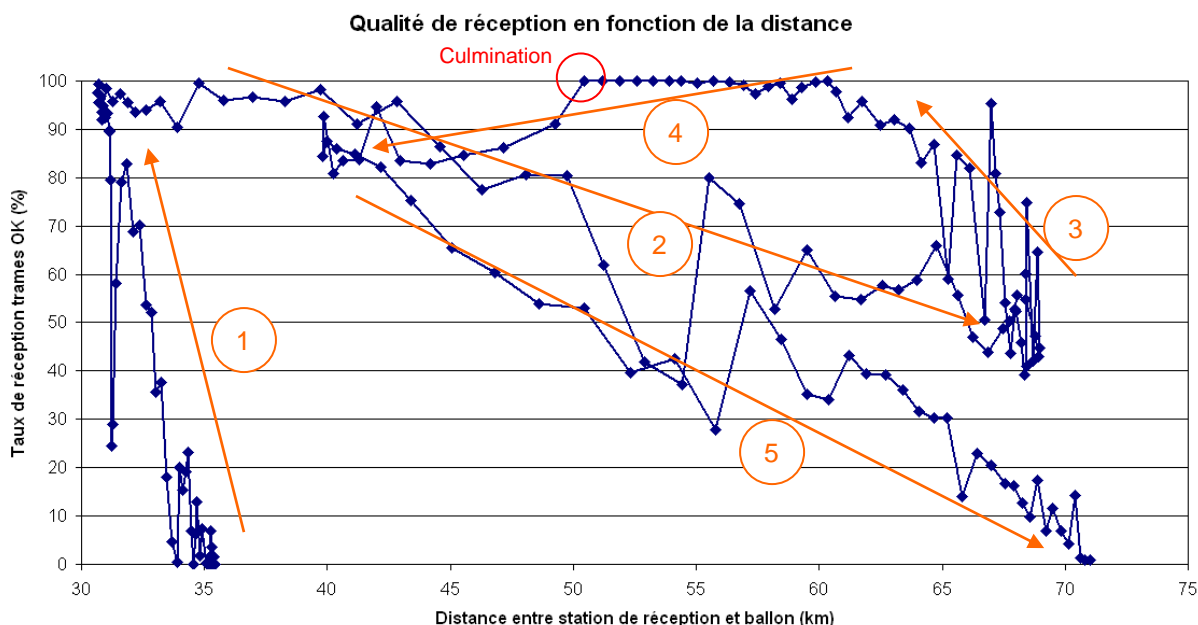
Le ballon, se rapprochant ensuite de la station de réception, poussé dans cette direction par des vents, la qualité de réception s'améliore à nouveau, et le taux de réception augmente donc.

Lors de la descente, le taux de réception chute à nouveau, et ce, pour trois raisons combinées : la nacelle se balance nettement plus, elle est vue sous un angle de plus en plus horizontal, et est poussée par des vents qui l'éloignent de la station de réception.



On peut également tracer un taux de réception de trames correctes en fonction de la distance séparant le ballon de la station de réception, pour avoir une idée de ce que le système de télémesure est capable de supporter et pour conforter les calculs théoriques de niveau de signal.

On observe ainsi qu'avec l'émetteur et l'antenne utilisés, la réception devient difficile au-delà de 70 kilomètres. Cela fait également apparaître la forte influence de l'angle sous lequel est vue la nacelle, qui dégrade la qualité lorsque l'on s'approche de l'horizontale :



4.2.2 Données décodées

La réception de la télémesure s'est déroulée durant environ 3 heures et 30 minutes, ce qui correspond à 126 000 trames de données de mesures atmosphériques (à 10 Hz) qui ont été envoyées, et 22 500 000 trames de données vidéo (à 2 Mbit/s, la vidéo s'étant coupée après 2 heures et 5 minutes d'émission). Environ 101 millions de trames ont été envoyées au total, la plupart étant de remplissage.

Il a été décodé en direct :

- 696 154 trames de statut OBC
- 61 756 trames du module 50 (CAN)
- 11 346 000 trames du module vidéo

➔ Taux moyen de perte : 50%

4.2.3 Détection et correction d'erreurs par CRC

Un CRC est inclus à chaque trame pour détecter une éventuelle corruption. Si la trame est corrompue, elle n'est pas décodée. Il y a un risque de ne pas détecter une corruption si un grand nombre de bits est faux (trame très corrompue), mais ce risque est infime.

Une correction à 3 bits est applicable : on utilise les propriétés mathématiques du CRC pour récupérer 1 bit de faux par tiers de trame (24 octets). Cela ajoute un faible risque d'engendrer des faux OK, c'est-à-dire des fausses trames correctes (= tiers de trame avec 5 bits de faux ou plus, interprété comme 1 bit de faux corrigé).

Déjà appliqué depuis plusieurs années dans les télémesures GAREF, le CRC a parfaitement rempli son rôle, particulièrement dans le cas d'une réception brouillée de façon assez constante comme ici, et la correction (qui est un usage inhabituel d'un CRC) a de nouveau prouvé son efficacité, en récupérant un grand nombre de trames dont 1, 2 ou 3 bits étaient faux.

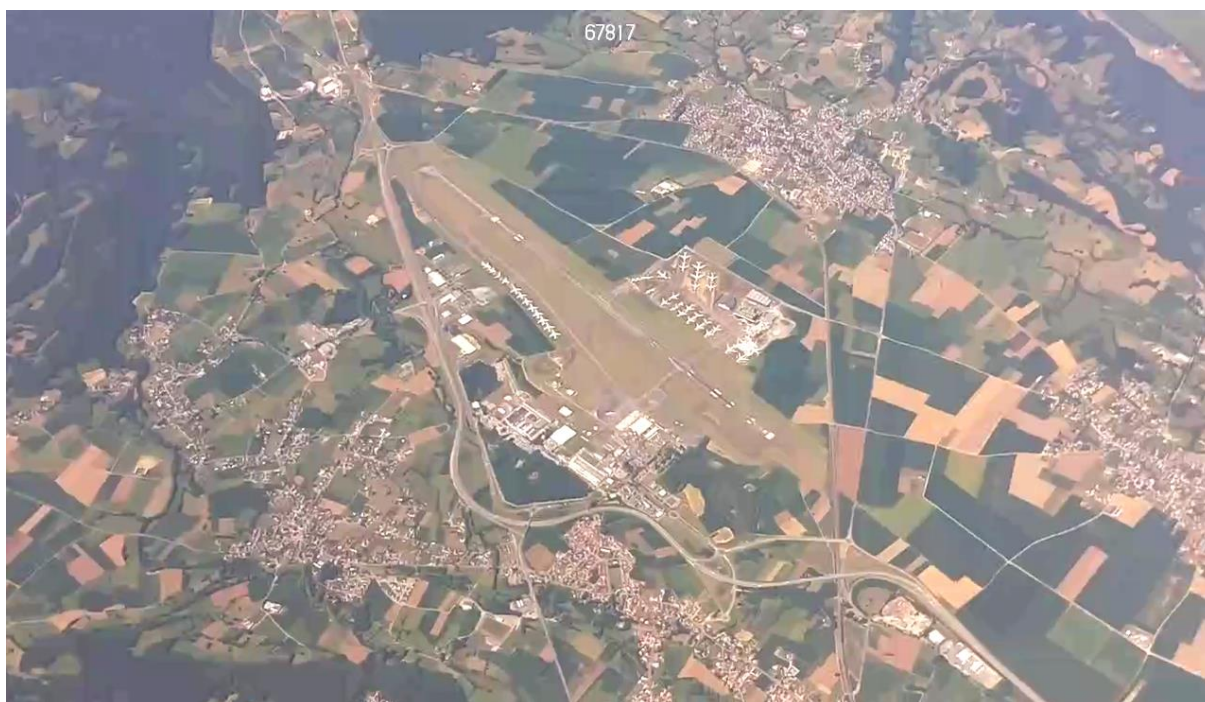
4.3 MODULE VIDÉO

Le module vidéo a retransmis les images jusqu'à 2 heures après le lâcher du ballon, soit peu avant l'apogée. Les deux flux vidéo ont été correctement sauvegardés à bord. La cause de la coupure n'a pas été clairement identifiée, les traces du module s'arrêtant simplement sans montrer d'erreur. Ainsi, on ne sait pas s'il s'agit d'un problème matériel (faux contact sur l'alim, surconsommation ponctuelle) ou logiciel (crash du système aléatoire).

Le capteur vidéo était orienté vers le bas, avec un angle de 45°, ce qui a permis d'avoir uniquement des images du sol. Bien que la nacelle était secouée durant son ascension, il n'y a donc pas d'images permettant de voir le ciel ou l'horizon.

Pour un futur projet ballon-sonde, si l'on souhaite apercevoir ou voir le ciel, il faudra réorienter le capteur vidéo plus vers le haut.

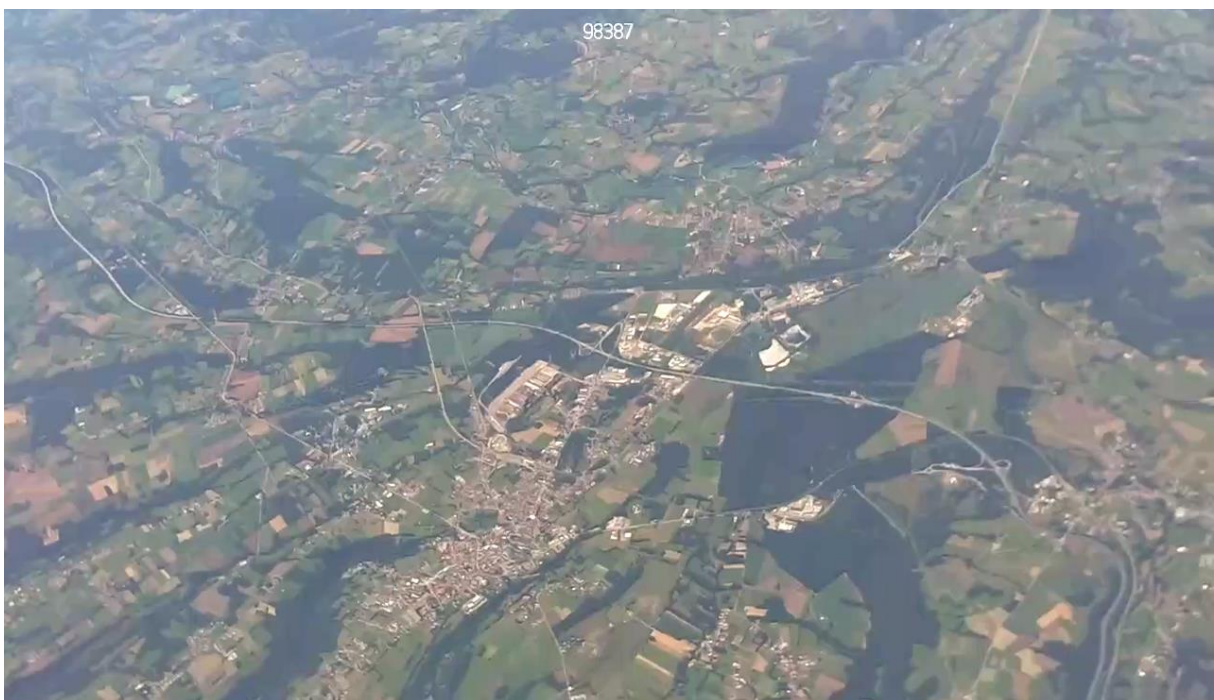
Ci-dessous quelques exemples d'images reçues par la station de télémesure, en direct.



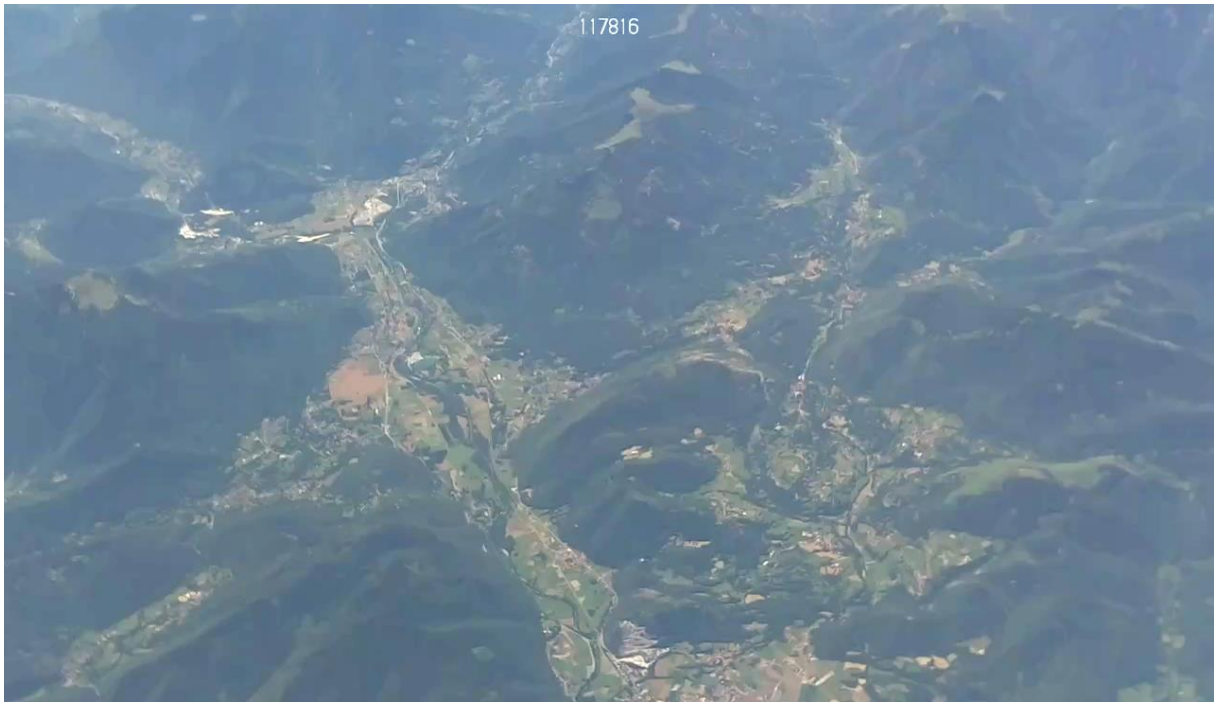
**Figure 15 : Vue de l'aéroport de Tarbes depuis le Nord-Est
(10 : 18 : 21 TU, T0 + 35 : 11, altitude 6 200 m)**



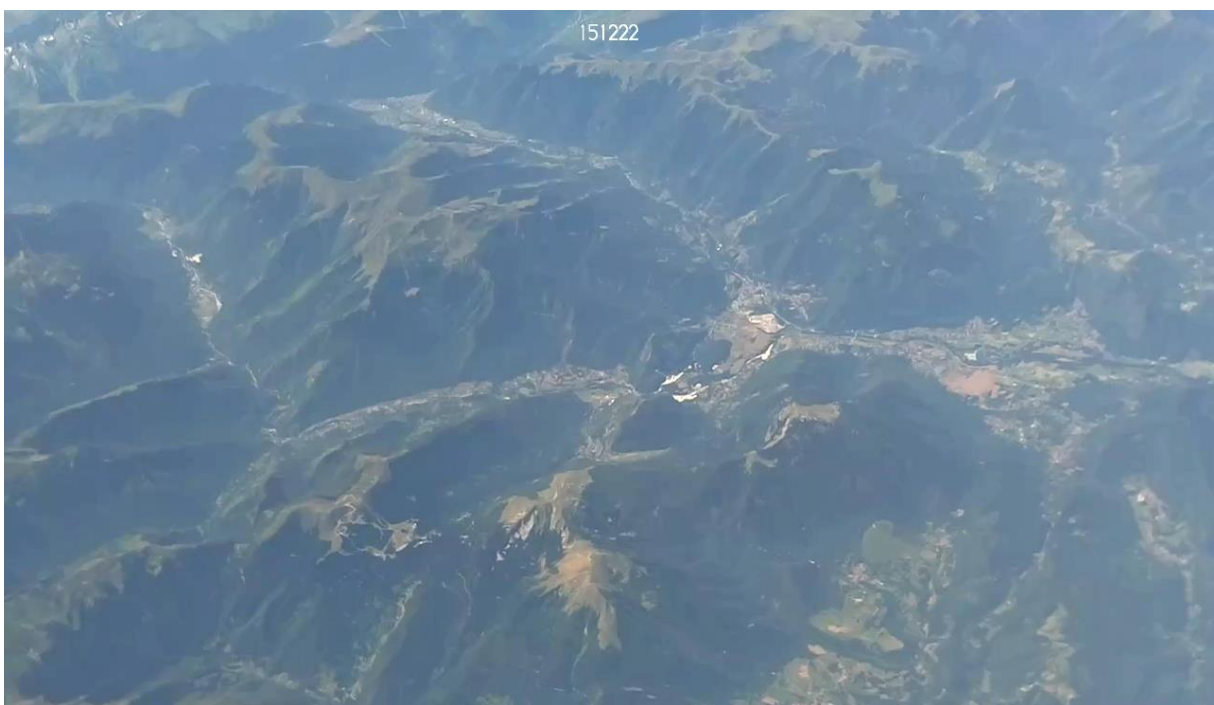
**Figure 16 : Tarbes, vue du Sud-Est
(10 : 29 : 55 TU, T0 + 46 : 46, altitude 8 370 m)**



**Figure 17 : Lannemezan vue par le Nord-Ouest
(10 : 39 : 55 TU, T0 + 56 : 46, altitude 10 340 m)**



**Figure 18 : Montagnes sous Montréal, vues depuis le Nord
(10 : 53 : 25 TU, T0 + 1 : 10 : 15, altitude 13 020 m)**



**Figure 19 : Montagnes sous Montréal, vues depuis le Nord-Est
(11 : 16 : 37 TU, T0 + 1 : 33 : 27, altitude 18 110 m)**



**Figure 20 : Les mêmes montagnes, de plus loin : parmi les dernières images reçues
(11 : 35 : 11 TU, T0 + 1 : 52 : 01, altitude 22 520 m)**

4.4 MESURES DE PRESSION POUR LA RECONSTRUCTION D'ALTITUDE

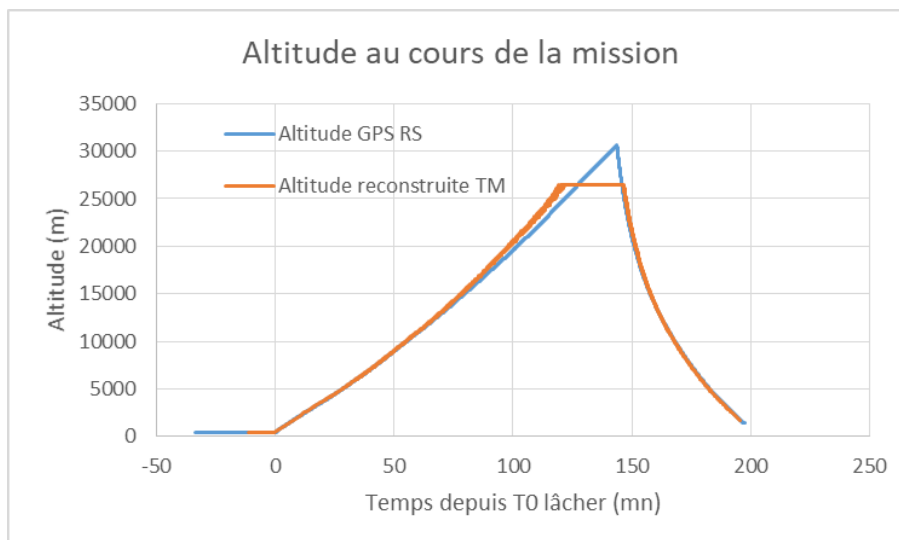


Figure 21 : Altitude reconstruite en exploitant les mesures de pression d'HORUS 9, comparée à l'altitude mesurée par le GPS de la radiosonde

L'altitude reconstruite d'après les mesures de pression et le modèle d'atmosphère, suit l'altitude GPS parfaitement jusqu'à 15 km, et assez bien jusqu'à 25 km. Au-delà, il y a une saturation de la mesure à 23,5 mbar. Après analyse, cela correspond à une tension de 0 V sur le convertisseur analogique-numérique, le montage d'adaptation de niveau ayant été mal calibré pour mesurer les pressions faibles. **Ce point sera à revoir sur les prochaines expériences.**

4.5 MESURES DE TEMPÉRATURE DE L'ÉMETTEUR EN BANDE S

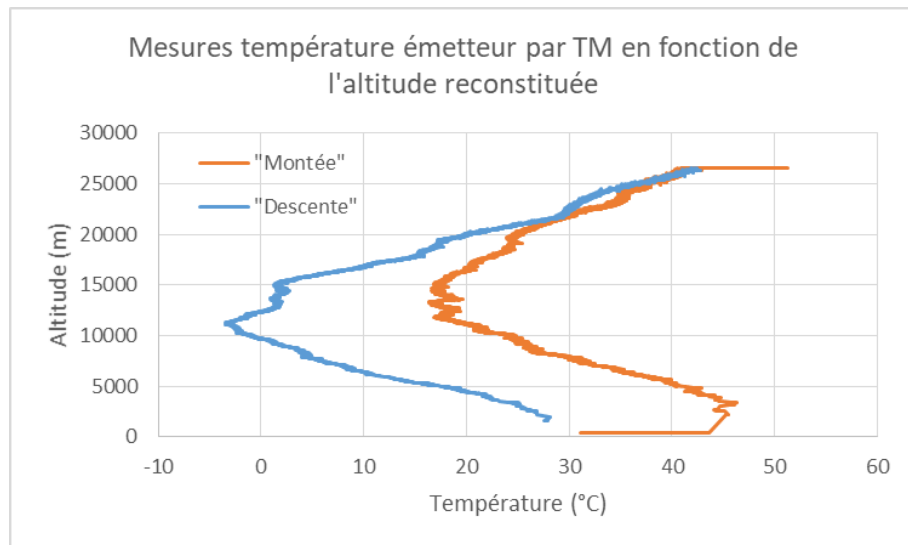


Figure 22 : Température de l'émetteur bande S mesurée par le thermocouple d'HORUS 9, en fonction de l'altitude reconstituée

Au-delà de 20 km d'altitude, la température de l'émetteur est la même pendant la montée et la descente. En-deçà et lors de la descente, elle est plus faible, la vitesse plus importante du ballon amplifiant manifestement son refroidissement.

On voit que même à l'apogée du ballon, où la densité de l'atmosphère est si faible qu'il n'y a presque plus de dissipation par convection, la température de l'émetteur dépasse à peine 50 °C, bien en-dessous de sa limite de fonctionnement (70 °C). La plaque de dissipation thermique par rayonnement (plaque noire anodisée en aluminium) a donc bien rempli son rôle, malgré un vol long et un émetteur de 2 W.

4.6 RADIOSONDE

4.6.1 Données météo

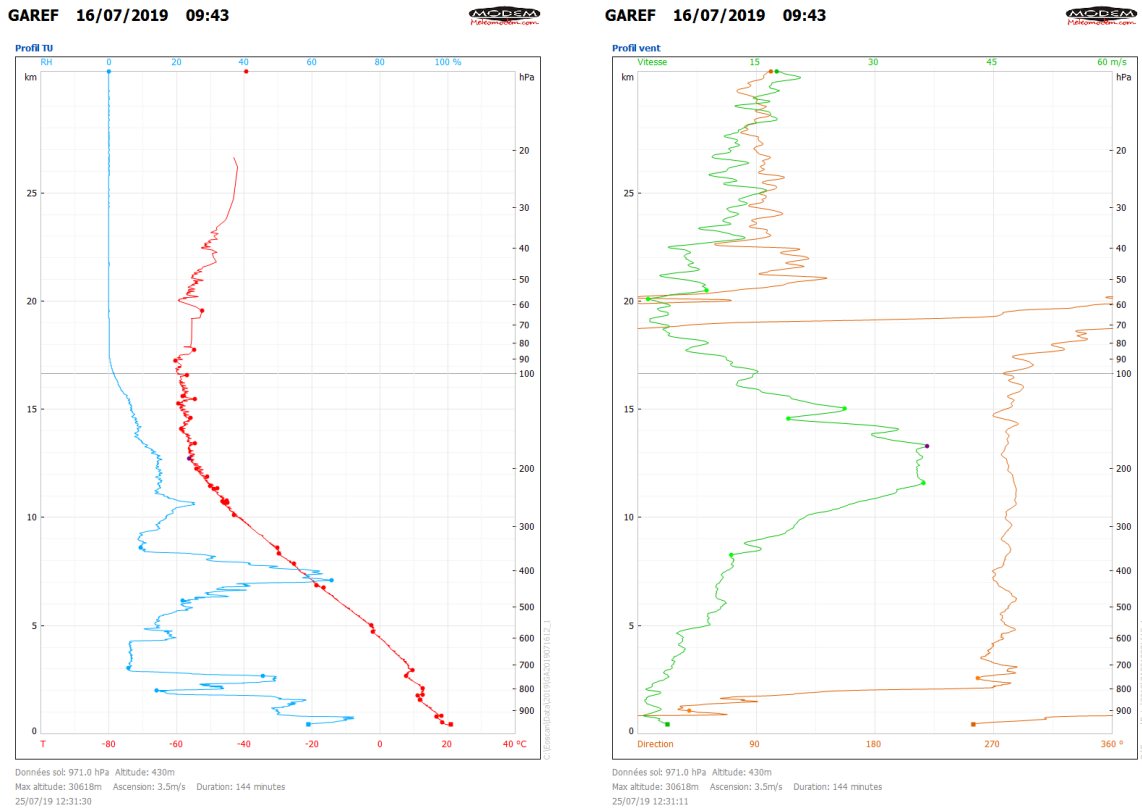


Figure 23 : Données météo (humidité, température, vitesse et direction du vent), affichées dans le logiciel EOSCAN de la radiosonde

La radiosonde a bien fonctionné, en fournissant des données et des mesures météo qui ont été traitées (Figure 23) jusqu'à 26 km d'altitude, et des mesures brutes sur toute la montée et descente (Figure 24), à l'exception de la phase d'atterrissage en-dessous des 1 400 m d'altitude.

On observe un plateau de température autour de -60 °C entre 12 et 21 km d'altitude, ainsi qu'une nette chute de l'humidité de l'air à 17 km.

On observe un maximum de vent à 130 km/h entre 11,5 et 13,5 km d'altitude. La direction du vent est bien plus notable : on passe d'un vent d'Ouest (soufflant donc vers l'Est) en-dessous de 20 km d'altitude à un vent d'Est au-dessus. Cela explique le retour à l'Ouest sur le haut de la trajectoire observable sur la Figure 25.

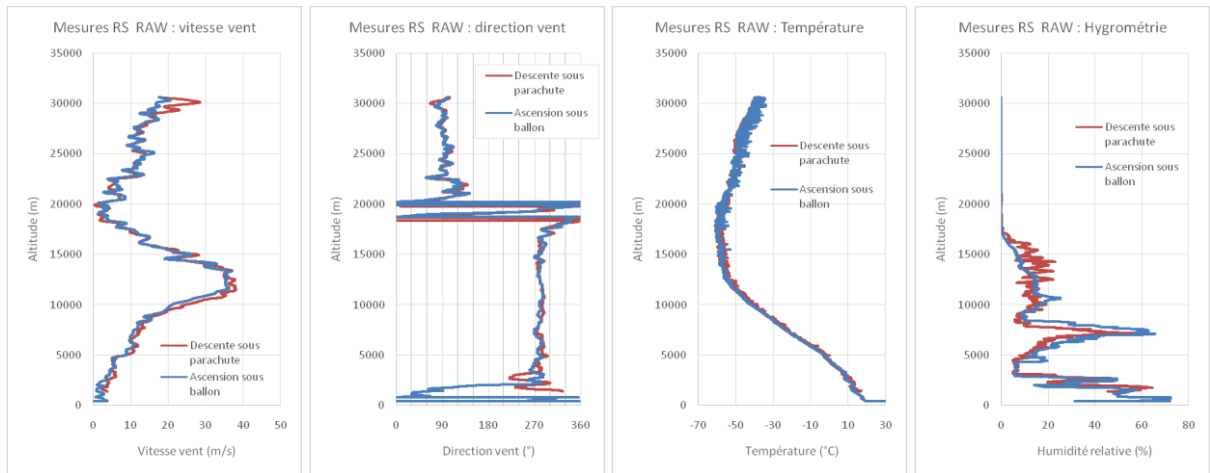


Figure 24 : Données brutes de la radiosonde, durant l'ascension et la descente

4.6.2 Données GPS

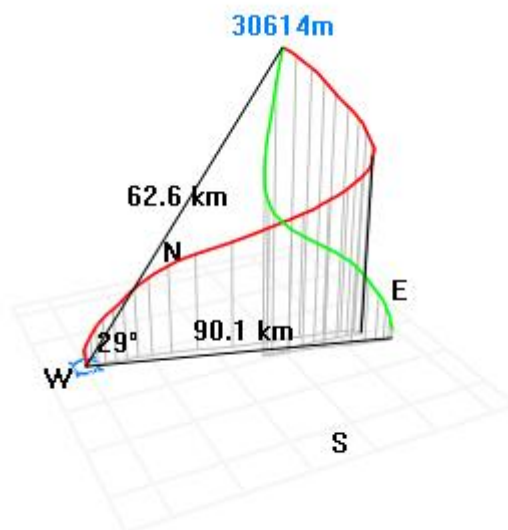
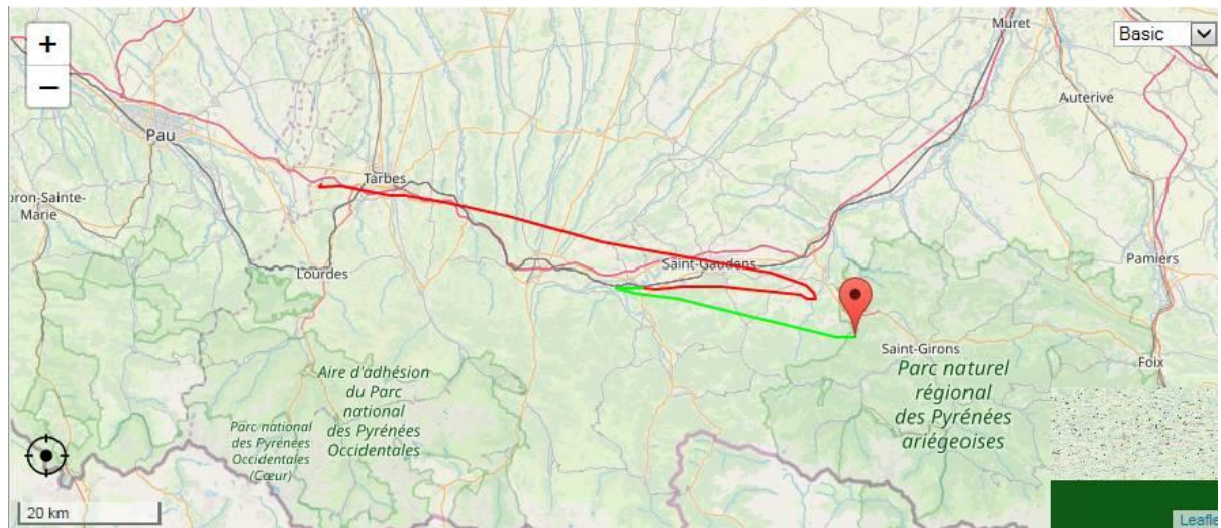


Figure 25 : Trajectoire affichée par le logiciel EOSCAN de la radiosonde (jusqu'à perte du signal à 1 418 m d'altitude)

Les vents importants et la faible vitesse d'ascension du ballon expliquent un déplacement sol important (90,1 km), mais limité par le retour arrière dû à l'inversion de la direction des vents au-dessus de 20 km d'altitude.

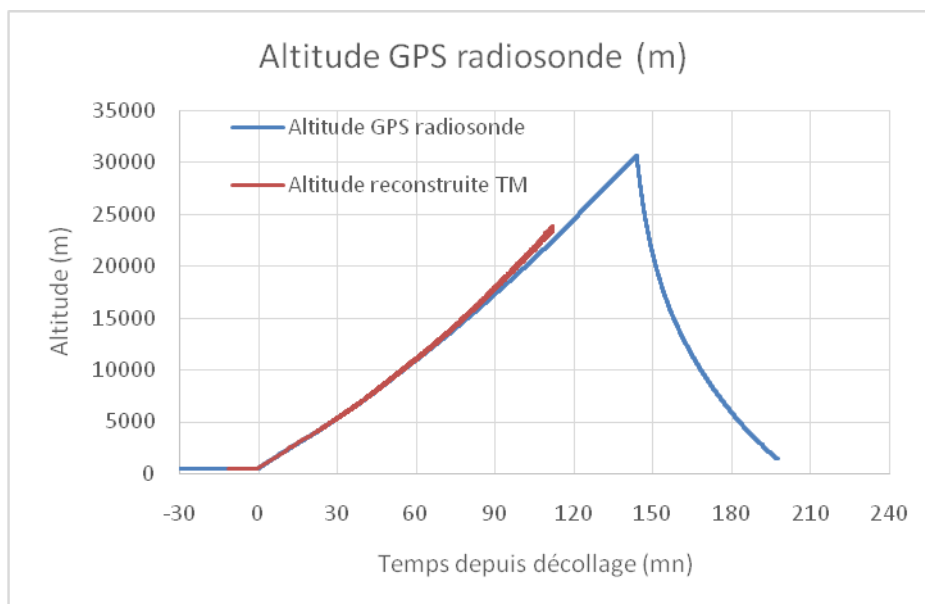


Figure 26 : Évolution de l'altitude au cours du vol : 2h23 de montée, environ 55 mn de descente

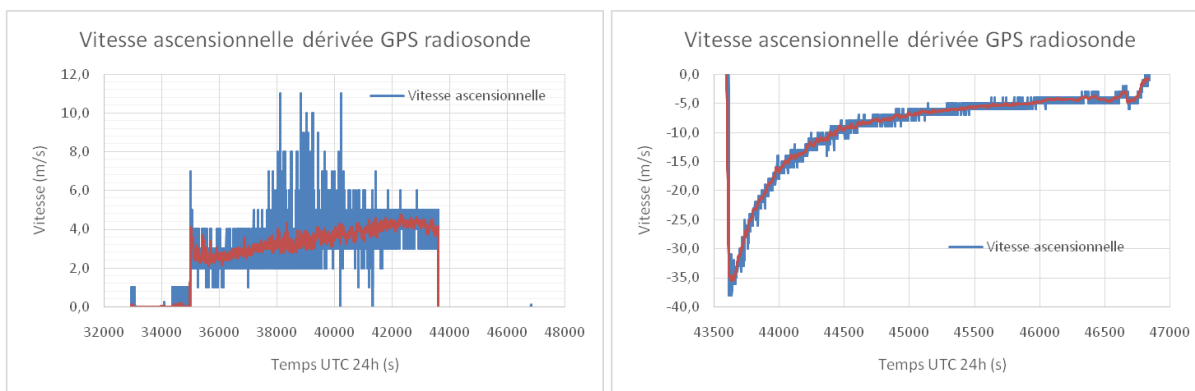


Figure 27 : Vitesse verticale au cours du vol : montée (à gauche) et descente depuis l'apogée (à droite)

La vitesse est en moyenne de 3,5 m/s en montée, mais n'est pas tout à fait constante et augmente au cours du vol de 2,8 m/s à 4,5 m/s environ.

En descente, la vitesse décroît de 38 m/s (haute atmosphère, air très peu dense) à environ 4,5 m/s vers 1,5 km, vitesse qui ne devait plus diminuer significativement jusqu'au sol.

Toutefois, on note vers la fin du vol une chute de la vitesse à 1 m/s. La chaîne de vol ayant gardé son intégrité, cette chute est explicable par des courants ascendants autour des collines où le ballon a atterri. Une prédiction de trajectoire dans ces conditions n'est donc plus très fiable.

4.7 PRÉVISION DE TRAJECTOIRE

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

	Heure de lâcher	Apogée	Vitesse d'ascension	Vitesse sous parachute
Prévision	9 h 00 UTC	30 000 m	5,9 m/s	12,0 m/s
Expérience	9 h 43 UTC	30 614 m	3,5 m/s	9,0 m/s (de 38 m/s à 4,5 m/s, puis 1 m/s à la fin)

Tableau 1 : Paramètres d'entrée utilisés pour les simulations habhub, et paramètres réels

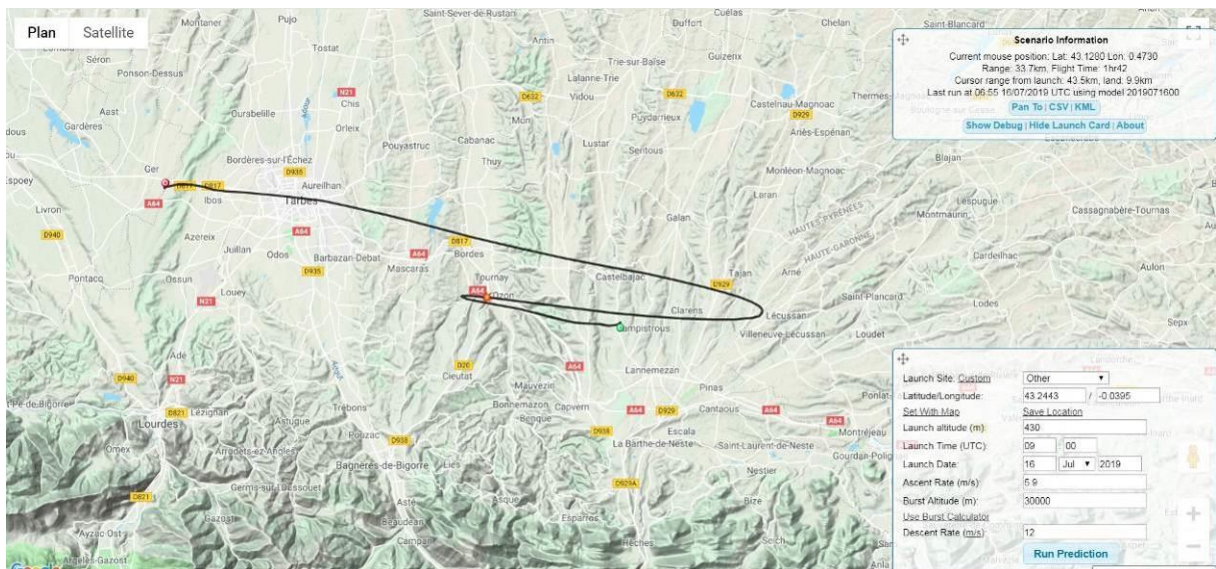


Figure 28 : Trajectoire du ballon prévue par le logiciel habhub

Le ballon est allé en réalité bien plus loin qu'anticipé par cette simulation (cf. Figure 29). L'écart est notamment dû à une différence importante entre les vitesses de montée et de descente, présentées dans le Tableau 1.

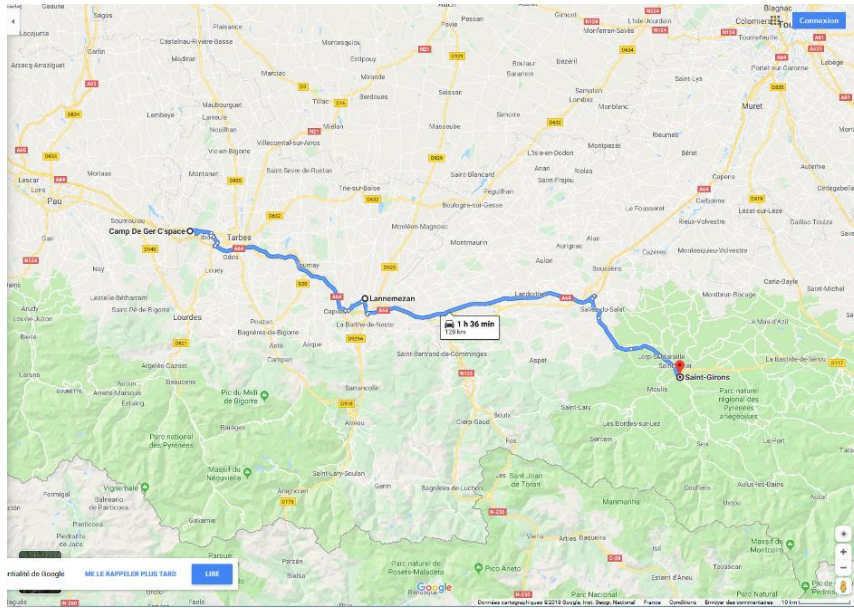


Figure 29 : Positions approximatives du point d'atterrissage prévu (Lannemezan) et du point d'atterrissage réel (Saint Giron)

L'intégration du logiciel Crystal (voir 2.4.3) avec le logiciel EOSCAN de la radiosonde pour extraire les données GPS a été réussie, la prévision était correcte, mais la courbe de descente plus lente que prévue (alors qu'elle était plus rapide sur HORUS 8, l'année précédente !) fait que l'on a au final un écart d'environ 10 km entre la prévision depuis l'apogée et l'atterrissage. Le point de chute prévisionnel s'est toutefois précisé avec le temps, puisqu'il a été recalculé en permanence à partir du dernier point connu.

Ci-dessous, la prévision en amplifiant de 60% la courbe de descente théorique (fonctionnalité présente dans le logiciel Crystal) :

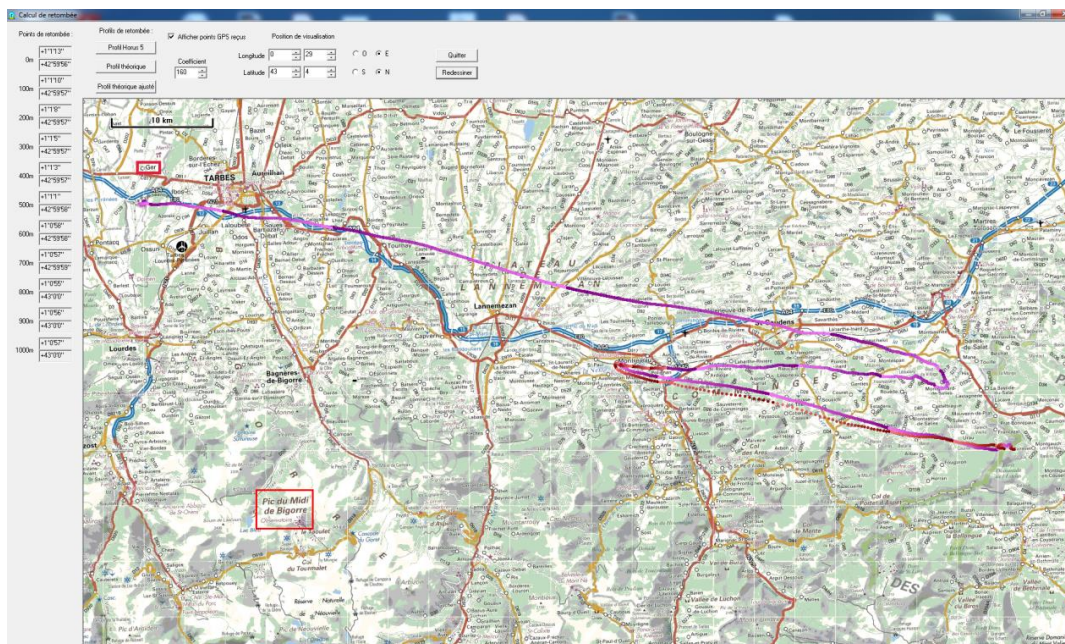


Figure 30 : Trajectoire du ballon (en violet) avec prévision depuis l'apogée (en rouge)

L'équipe de récupération a bien pu suivre le ballon en se déplaçant vers le point de retombée prévu durant la descente, mais en raison du terrain difficile (relief) et des routes peu praticables dans cette zone de retombée finale a empêché l'équipe d'observer la fin de la descente.

5. PROBLÈMES RENCONTRÉS - RETOUR D'EXPÉRIENCE

L'onduleur utilisé pour alimenter les équipements sol sur l'aire de lâcher a eu des problèmes de démarrage le jour J. Il va falloir investiguer le problème : sensibilité à la chaleur, surconsommation, vétusté ?

La récupération de la nacelle a été nettement plus ardue que lors des précédents lâchers de ballon du GAREF : une journée et demi pour apercevoir le ballon, puis une progression de l'ordre de 20 mètres par heure (!), malgré une réception correcte de la position GPS. Des techniques plus précises de localisation sont à évaluer : emmener une station de réception radiosonde avec l'équipe de récupération, mettre une balise de localisation oiseau compatible avec les fréquences européennes... Des équipements supplémentaires peuvent être utiles : cordes, dégaines, gants pour écarter les ronces...

La saturation du capteur de pression à l'approche de l'apogée du ballon a nui à son bon fonctionnement. L'étalonnage n'a pas pu être fait avec la cloche à vide à de si faibles pressions, mais elle aurait pu être prévue simplement en analysant les courbes d'étalonnage mesurées : en évaluant cette courbe aux faibles pressions, on se serait rendu compte qu'elle donnait des tensions négatives.

6. CONCLUSIONS ET REMERCIEMENTS

La diffusion de la vidéo temps réel a fonctionné pendant une partie importante du vol du ballon. La qualité des images était très correcte étant donné le débit disponible. Il faudra faire plus attention à l'orientation du capteur pour avoir une vue de l'horizon et du ciel, nettement plus intéressante.

Le système de télémétrie peut encore être amélioré à plusieurs niveaux : positionner la station de réception plus près de l'aire de lâcher, utiliser une station de réception mobile secondaire, changer d'antenne d'émission pour avoir un meilleur signal à l'horizontale...

L'expérience de mesure de pression et de détermination de l'altitude a fonctionné conformément aux attentes, mais la saturation imprévue du capteur a empêché d'avoir des mesures jusqu'à l'apogée. L'étape d'adaptation sera à revoir, et nous allons ajouter une étape de vérification aux limites lorsque nous faisons des courbes d'étalonnage. De plus, la précision de la mesure peut être améliorée en prenant en compte l'effet de la température sur le capteur de pression.

Le projet HORUS 9 s'appuie sur le savoir-faire historique du GAREF et des connaissances complémentaires acquises par le GAREF AEROSPATIAL lors de son travail sur le projet PERSEUS, pour réaliser une expérience lâchée du camp de Ger lors de la campagne nationale de lancement C'SPACE 2019. Il est l'évolution directe du ballon HORUS 8 lâché en 2018, et a eu de meilleurs résultats que son prédécesseur à tous les niveaux.

La récupération de la nacelle et du matériel qu'elle contenait, point crucial de l'expérience, s'est déroulée comme prévu, grâce à l'utilisation du logiciel de prévision de trajectoire, associé au GPS. L'équipe de récupération a ainsi pu être guidée jusqu'au point d'atterrissage du ballon. La zone de récupération était cependant nettement plus accidentée que lors des expériences ballons précédentes du club, et des systèmes pour augmenter les chances de retrouver la nacelle sont envisagés.

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**
- Frédéric Douguet, aérotechnicien Planète Sciences**
- Nicolas Verdier, responsable qualité sur le projet Insight, anciennement responsable à la division ballon du CNES**

Et bien sûr Claire Edery-Guirado, Stéphane Fredon et tous ceux qui, durant la campagne nationale de lancement du camp de Ger, ont rendu possible la réalisation de ce projet.