



HORUS 8

RAPPORT D'EXPERIENCE

GP-1737-D-108

Révision 1.9

11 février 2019

Rédigé par : **Antoine FOURCADE, Mathieu THIBERT**

Approuvé par : **Bernard SCACHE**

SOMMAIRE

0.	EVOLUTION DU DOCUMENT	1
1.	SYNTHESE	2
1.1	OBJECTIFS DU PROJET	2
1.2	SPECIFICATIONS	3
1.3	DEROULEMENT DU VOL ET SYNTHESE DES RESULTATS	3
2.	PRESENTATION DE L'EXPERIENCE	5
2.1	DESCRIPTION GENERALE	5
2.1.1	Classification	5
2.1.2	Chaîne de vol	6
2.2	EXPERIENCE EMBARQUEE	7
2.2.1	Synoptique de la nacelle	7
2.2.2	Caméra SERA 4 (GP1530F801-1.0, numéro de série 5)	8
2.2.3	Ordinateur de bord OBC GAREF (GD1112S801-2.0, numéro de série 50)	8
	Caractéristiques	8
	Mécaniques	8
	Electriques	8
2.2.4	Module télémessure/antenne	8
2.2.5	Timecode (GP0916M802-3.0, numéro de série 37)	10
2.2.6	Alimentation électrique/Piles	10
2.3	RADIOSONDE	10
2.3.1	Utilisation	10
2.3.2	Caractéristiques	11
	2.3.2.1 GPS	11
2.4	LOGICIELS AU SOL	11

2.4.1	Logiciel de réception des données en temps réel.....	11
2.4.2	Lecteur de données PERSEUS.....	12
2.4.3	Station Sol AETNA.....	13
2.4.4	Logiciel de réception des données radiosonde.....	14
2.4.5	Logiciel de prévision de trajectoire en vol.....	14
2.4.6	Logiciel de calcul de direction d'antenne.....	14
2.5	MECANIQUE DE LA NACELLE.....	15
2.6	MISE EN ŒUVRE DU BALLON.....	16
2.7	Station de réception.....	16
2.7.1	Implantation.....	16
2.7.1.1	Station GAREF.....	17
2.7.1.2	Station radiosonde.....	18
2.8	PREVISION DE TRAJECTOIRE EN VOL.....	18
2.8.1	Enjeu de la récupération.....	18
2.8.2	Principe du logiciel de prévision en temps réel.....	18
3.	PROBLEMES RENCONTRES / MODIFICATION DE L'EXPERIENCE.....	19
3.1	NOUVELLES CONTRAINTES.....	19
3.2	SOLUTIONS.....	19
4.	DEROULEMENT DE LA JOURNEE DE LANCEMENT.....	20
5.	DEPOUILLEMENT ET RESULTATS OBTENUS.....	21
5.1	Points notables.....	21
5.2	Télémesure.....	21
5.2.1	Qualité de réception.....	21
5.2.2	Données décodées.....	23
5.2.3	Détection et correction d'erreurs par CRC.....	23
5.3	Module vidéo.....	24
5.4	Radiosonde.....	25

5.4.1	Données météo.....	25
5.4.2	Données GPS	26
5.5	Calcul de trajectoire embarqué	27
5.6	Prévision de trajectoire	28
	Module centrale inertielle	29
5.6.1	Zoom sur lâcher	29
5.6.2	Vol complet.....	31
6.	CONCLUSIONS ET REMERCIEMENTS.....	33

0. EVOLUTION DU DOCUMENT

Version 0.0 : 15 septembre 2018, création du document

Version 1.0 : 29 septembre 2018, ajouts liste modules / Les points qui doivent encore être rédigés apparaissent en rouge dans le sommaire.

Version 1.1 : 14 octobre 2018, ajout de l'exploitation des résultats

Version 1.2 : 20 octobre 2018, modification du Journal de campagne

Version 1.3 : 27 octobre 2018, description des logiciels

Version 1.4 : 17 novembre 2018, intégration des modifications déjà apportées au projet du fait des nouvelles contraintes.

Version 1.5 : 1 décembre 2018, corrections.

Version 1.6 : 22 décembre 2018, corrections.

Version 1.7 : 19 janvier 2019, corrections.

Version 1.8 : 2 février 2019, corrections.

Version 1.9 : 11 février 2019, corrections.

1. SYNTHÈSE

1.1 OBJECTIFS DU PROJET

A) La transmission en temps réel avec la télémesure, de vidéos et le stockage des données sont des aspects techniques qui n'avaient pas encore été totalement maîtrisés sur les démonstrateurs PERSEUS (voir problèmes sur SERA3). HORUS 8 était donc un ballon-sonde léger destiné à embarquer la caméra et le module vidéo développés par les équipes GAREF pour SERA 4, il embarquait aussi une radiosonde avec module GPS.

Ce module permet l'acquisition de vidéos et leur transmission en temps réel 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.

B) Un système de calcul de trajectoire par intégration des données de la centrale inertielle a été implémenté dans l'ordinateur de bord pour SERA4. Comparer ce calcul aux données GPS de la radiosonde permettra de valider ce calcul et de qualifier sa dérive sur une longue durée, ce qui n'est pas faisable sur une fusée qui n'a pas le temps d'accrocher la position GPS précise étant données sa vitesse et sa durée de vol.

HORUS 8 était donc un banc d'essais volant permettant de tester les évolutions du système électrique de SERA4.

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



(Photo G07R101 Photo GAREF PARIS)

1.2 SPECIFICATIONS

Les dimensions de la nacelle principale étaient de 30cmx30cmx15cm en Carton Plume (280g vide), pour une masse de 1660g. La fixation des panneaux en carton plume était assuré par du scotch aluminium 3M 425.

Elle contenait :

- Blocs de piles (255g)
- OBC (250g)
- Module Timecode (175g)
- Centrale inertielle (150g)
- Radiosonde Meteomodem (150g)
- Mécanique nacelle (600g)
- Emetteur (57g)

L'électronique embarquée était alimentée par deux blocs de piles lithium, Energizer L91 AA 3000mA, de 13.5V (émetteur) et 15V. (électronique nacelle)

Consommation : émetteur : 0.60A à 12V, électronique nacelle : 0.63A à 12V, 0.52A à 15V

Autonomie :

Emission télémétrie : 4 heures, électronique nacelle : 4h, Balises 8-9 jours, radiosonde >4h.

Enveloppe du ballon : type Kaysam KCI 1200 latex. Masse 1200g diamètre 2,26m à 1000mbars de pression au sol, 8,60m à 7,3 mbar (éclatement).

1.3 DEROULEMENT DU VOL ET SYNTHESE DES RESULTATS

Le lâcher de Horus 8 a eu lieu au camp de Ger (Pyrénées-Atlantiques) le mercredi 18 juillet 2018 à 12h17m32s TU.

Lancement	Latitude : 43°13'20.5"N Longitude : 00°03'7.5"O Altitude : 430m	18 juillet 2018 12h17m32s TU
Culmination	Latitude : 43°31'25.7"N Longitude : 00°30'8.3"E Altitude : 20069m	13h12m40s TU
Atterrissage	Latitude : 43°39'11"N Longitude : 00°44'21"E Altitude : 187m	13h40m08s TU
Récupération de la nacelle (dans un champ)		14h45m TU

Le vol a duré 1h22m36s (du décollage à l'atterrissage).

La culmination a eu lieu à H0 + 55m08s, à 13h12m TU, à 20 069 mètres d'altitude, après une ascension à une vitesse moyenne de 5.9m/s.

La nacelle a atterri près de Marsan (Gers) à environ 80 km au nord-est de son point de départ. Elle a pu être repérée dans un champ près de la nationale 124, par l'équipe de récupération, et récupérée à 16h45m heure locale.



La nacelle telle qu'elle a été retrouvée dans un champ, avec le véhicule de l'équipe de récupération en arrière-plan (Photo 20180718_165932. Photo GAREF PARIS)

Les mesures de température et d'humidité ont toutes fonctionné, correspondant aux valeurs théoriques auxquelles on pouvait s'attendre.

Le suivi GPS de la nacelle a été continu du décollage jusqu'à quelques secondes avant l'atterrissage, à 20 mètres du sol. Les données transmises par téléphone par l'équipe du Pic du Midi ont permis au véhicule de l'équipe de récupération, de suivre le ballon au cours de la redescente, et de se trouver au plus près du point de chute à l'atterrissage.

Ces données ont pu être utilisées par le logiciel de prévision de retombée, permettant de diriger l'équipe de récupération pour qu'elle se place au plus près du point prévu d'atterrissage. Le ballon ayant éclaté plus tôt que prévu, l'équipe de récupération est allée un peu trop loin, mais a pu récupérer la nacelle seulement une heure après l'atterrissage.

2. PRESENTATION DE L'EXPERIENCE

2.1 DESCRIPTION GENERALE

2.1.1 Classification

Le ballon HORUS 8 est, (au sens de l'article 1 de l'appendice 4 de l'annexe 2 à la convention relative à l'aviation civile internationale "Règles de l'Air" 9^{ème} éd, Juil1990 toujours en vigueur en 2005°) :

Un ballon "**libre non habité de la catégorie léger**" c'est à dire transportant une charge utile d'un ou plusieurs éléments dont la masse combinée est inférieure à 4kg (avec aucun lot n'excédant 3kg, et aucun lot de 2kg ou plus qui aurait une masse surfacique $>13g/cm^2$), et avec une liaison ballon-charge utile cassant ou séparant sous une force $<230N$).

Un ballon léger ne nécessite pas l'émission de NOTAM (NOTice To AirMen)

(La masse surfacique est définie comme la masse totale de l'élément considéré de charge utile, divisé par sa plus petite surface)

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 4 de l'annexe 2).

HORUS 8, qui fait des prises de vue, n'est pas prévu pour être exploité en dehors du territoire français (régions terrestres et eaux territoriales adjacentes).



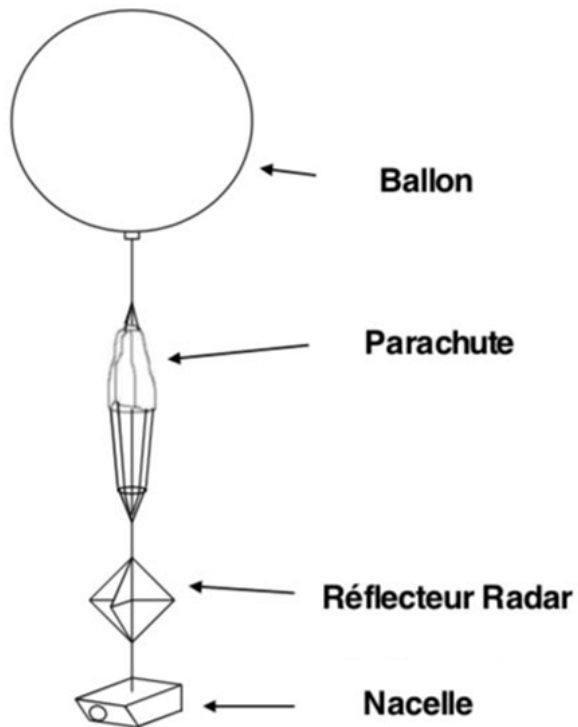
HORUS 8 juste après le lâcher (Photo G071 Photo GAREF PARIS)

2.1.2 Chaîne de vol

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

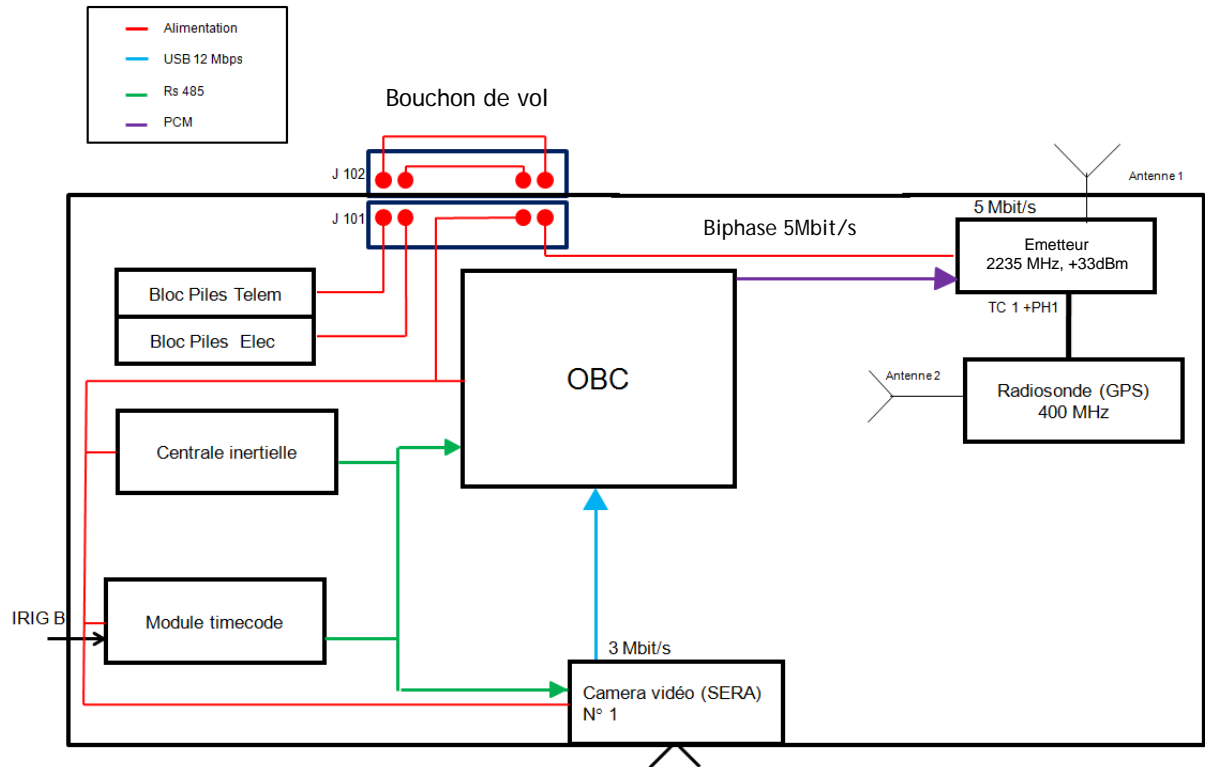
- module vidéo SERA avec retransmission en direct
- radiosonde METEOMODEM (module GPS)
- capteur de température
- module OBC, calculateur de bord GAREF (fusées PERSEUS SERA/ARES)
- module Timecode
- balise

Schéma de la chaîne de vol



2.2 EXPERIENCE EMBARQUEE

2.2.1 Synoptique de la nacelle



Synoptique 1.7

8/07/2018



L'intérieur de la nacelle (Photo GAREF PARIS)

2.2.2 Caméra SERA 4 (GP1530F801-1.0, numéro de série 5)

La fonction du module vidéo SERA est de retransmettre une vidéo du vol en temps réel, en utilisant 4 Mbits/s sur les 5 Mbits/sec disponibles, et ce durant toute la durée de la montée du ballon. La version soft est la 4.0.4.

Caractéristiques :

Mécaniques	Électriques	Vidéo
Poids 140g	Alimentation : 9-36V	Résolution capteur : 5Mp OmniVision OV55647
Dimensions boîtier T1 : 100*105*22 mm (norme GAREF)	Consommation : 1.8 W	Mode : 1080p30, 720p60, 640*480p60/90

2.2.3 Ordinateur de bord OBC GAREF (GD1112S801-2.0, numéro de série 50)

Le module est composé de trois éléments fonctionnels dont 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 stocke et les transmet au FPGA qui les met au format PCM, pour qu'elles soient transmises à l'émetteur.

Tous les modules USB sont des esclaves alors que l'ordinateur de bord assure le rôle de maître.

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

Le programme de vol intègre des algorithmes de calcul de trajectoire utilisant les données d'accélération et de giration envoyées sur USB par le module « centrale inertielle » pour déterminer les vitesses et la position du ballon dans les 3 axes par rapport au sol. Ces informations sont intégrées dans les trames de données.

Caractéristiques

Mécaniques

Poids	~330g
Boîtier Taille 2 (norme GAREF)	100*105*44 mm

Électriques

Alimentation	9-36V
Puissance consommée	4,05W

2.2.4 Module télémétrie/antenne

Le module télémétrie antenne sera composé d'une antenne et d'un Émetteur de télémétrie.

L'Émetteur de télémétrie sera le suivant :

Caractéristique Mécaniques	Caractéristique Électriques	Caractéristique électromagnétiques.
Poids : 57g	Alimentation : 12V +4.5 / -1.5 VDC	Fréquence d'émission : 2200.5 MHz à 2299.5 MHz par incrément de 0.5 MHz. Réf GAREF : 18020101 Réglé à 2235 MHz
Dimension: 95x107.8x32mm	Consommation : 650mA	Puissance d'émission : +33 dBm nominal (2.0 W)
		Impédance d'entrée : 75 Ohm, 35 pF Impédance de sortie : 50 Ohm

L'antenne d'émission choisi sera :

Caractéristique Mécaniques	Caractéristique électromagnétiques.
Poids 110g	HUBER SUHNER, Polar circ. DRT Fréquence d'émission : 2100 à 2300 MHz
Dimension: 95x107.8x32mm	Gain: 8dBi
	Impédance: 50 Ohm.

Dans le but de dissiper les 6 watts de pertes thermiques de l'émetteur télémessure nous utiliserons une plaque en aluminium noire anodisée. Ce matériau a été choisi du fait de son faible poids et son émissivité reporté élevé (0.82). Pour calculer, la surface nécessaire aluminium noire anodisée nous avons utilisé la loi de Stefan-Boltzmann : $M = \sigma \cdot e \cdot T^4$. Nous avons réalisé le calcul en prenant la température maximale atteinte par l'émetteur au cours du vol : 70°C. La surface minimale nécessaire pour dissiper l'échauffement thermique de l'émetteur est de 0.01m². Nous visserons l'émetteur de télémessure à la plaque d'aluminium en positionnant un compound silicone (T300T040) de chez Dow Corning entre les deux composants afin de garantir un transfert thermique optimal. La plaque d'aluminium aura une surface de 0.2m² et comportera de plus un texte permettant d'informer sur la nature du ballon, ainsi que les coordonnées du Garef, pour des besoins de récupération (voir plan GM1816E118).



Vue de face
Echelle : 1:1

DESIGNED BY: GAREF	gravure plaque Ballon
DATE: 10/06/2018	
CHECKED BY: BS	GAREF AEROSPATIAL
DATE: XXX	
SIZE: A3	
SCALE: 1:1	REVISION (no): 0,04
	DRAWING NUMBER: GM1816E118-1.0
	SHEET: 1/1

2.2.5 Timecode (GP0916M802-3.0, numéro de série 37)

La fonction du module Timecode du GAREF est de fournir une date (T.U.) commune à tous les modules en nécessitant. Il est synchronisé avec les installations sol (IRIG-B) jusqu'au décollage. Cela permet de dater les différentes mesures et les événements survenant avec une date commune. Ainsi il est possible de comparer ces mesures et ces événements entre eux, et avec les moyens de mesures au sol. Le timecode est diffusé au format BCD sur un bus RS485, avec une précision de 10ms.

Mécaniques	Électriques
Poids 175g	Alimentation : 9-36V
Dimensions boîtier T1 : 100*105*22 mm	Consommation : 50mA

2.2.6 Alimentation électrique/Piles

Il fallait déterminer l'alimentation électrique qui était nécessaire au bon fonctionnement de l'électronique embarquée afin de répondre à des contraintes de consommation, de tension, et d'autonomie (environ 3h de vol).

L'électronique de mesure et l'émetteur sont alimentés avec deux blocs de piles différents. Chaque module électronique ne requiert pas la même tension, mais nous avons pu n'utiliser qu'un bloc de piles pour l'ensemble de l'électronique de mesure grâce à des convertisseurs DC/DC.

Il fallait ne pas dépasser la tension maximale que peuvent supporter les convertisseurs utilisés, mais aussi leur fournir une tension suffisante pour leur fonctionnement. Il fallait donc être très attentif à la tension à vide et en charge en tenant compte de la température.

Piles utilisées:

Energizer réf L91 Type AA.

Ø 14mm, longueur : 50mm,

masse : 14,3g chacune

Tension : 1,5V en utilisation ; 1.7 à vide.

Nombre de piles : 9 pour l'émetteur, 8 pour l'électronique

Les tests de consommation de l'émetteur et du système électrique à différentes tensions ont permis de déterminer, avec les courbes de décharge des piles réalisées par le GAREF, de déterminer le nombre de piles de chacun des deux blocs. Le bloc de l'émetteur comporte 9 piles, et celui de la case électronique 8 piles.

2.3 RADIOSONDE

2.3.1 Utilisation

Afin de pallier une éventuelle impossibilité de transmettre les données de position nécessaires à la récupération du ballon via notre émetteur durant toute la durée du vol, nous avons décidé d'utiliser une radiosonde. Cette dernière possède son propre émetteur dans la bande 400 MHz ainsi que sa propre station de réception (développée dans la partie 3.2).

La radiosonde est équipée de plusieurs capteurs, mais nous n'exploiterons que les données de GPS et les autres caractéristiques de la sonde ne seront donc pas détaillées. Ce suivi GPS permettra aussi de valider le calcul de trajectoire effectué par l'OBC.

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. Elle émettait à une fréquence de 406 MHz.

2.3.2 Caractéristiques

Caractéristique Mécaniques	Caractéristique Électriques
Poids 150g	Alimentation : Batterie indépendante
Dimensions : 95*95*88,5 mm	Autonomie: >4h

2.3.2.1 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. On a donc ainsi aussi accès à l'altitude du ballon.

Précision : meilleure que 10 m

Les données ainsi acquises sont transmises par radio. La mesure est effectuée à une fréquence de 1 Hz.

2.4 LOGICIELS AU SOL

2.4.1 Logiciel de réception des données en temps réel

Baptisé "DDP" ("Dynamic Data Processing"), développé par le GAREF pour les premiers ballons HORUS, programmé en Visual C++ 6.0, tournant sous Windows.

Il affiche diverses informations telles que le numéro de trame, les erreurs de transmission, la bande passante utilisée, le timecode et les GPIO de l'OBC, et la présence de données vidéo.



La télémesure, sous forme de trames de 78 octets, est fournie à une carte d'acquisition dans le PC 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 sont stockées brutes 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 CRC 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 du démonstrateur sont extraites dans des fichiers séparés pour pouvoir faire des traitements spécifiques ultérieurement, et aussi transmises sur le réseau local pour être affichées par la station sol AETNA située sur un autre PC. Cela rend ce logiciel indépendant de quels modules sont présents et de quels formats de trame sont utilisés par chaque module, qui peuvent varier d'un projet à l'autre.

Les données vidéo sont traitées comme 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 qu'elles sont reçues.

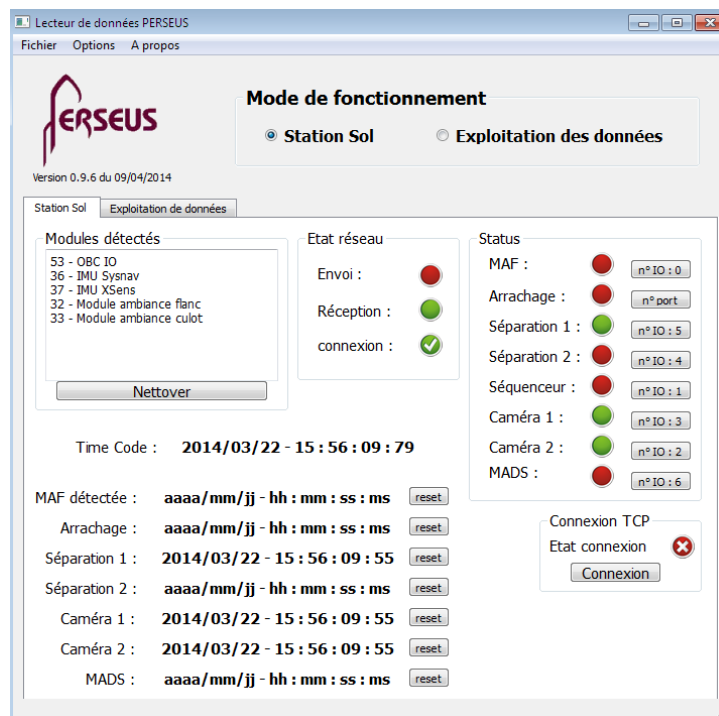
Il dispose aussi d'un mode "REPLAY" pour pouvoir relire des données brutes mémorisées lors d'une réception précédente, en rejouant le traitement en accéléré.

2.4.2 Lecteur de données PERSEUS

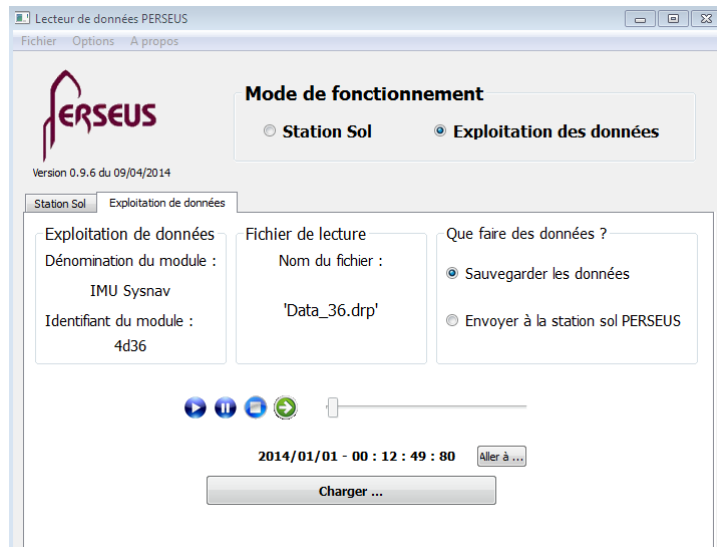
Le Lecteur de Données a été développé dans le projet AETNA du programme PERSEUS, en Qt5/C++, tournant sous Windows.

Il dispose de deux modes :

En mode "station sol", utilisé pendant un vol, il reçoit les trames envoyées par le logiciel DDP, et utilise des fichiers de configuration (facilement éditables) pour en découper et en convertir automatiquement les différentes données (conversion linéaire tirée des courbes d'étalonnage des capteurs par exemple), selon l'identifiant du module. Il crée de nouvelles trames qui contiennent les données décodées, et les envoie en local au logiciel station sol AETNA qui se charge uniquement de les afficher.



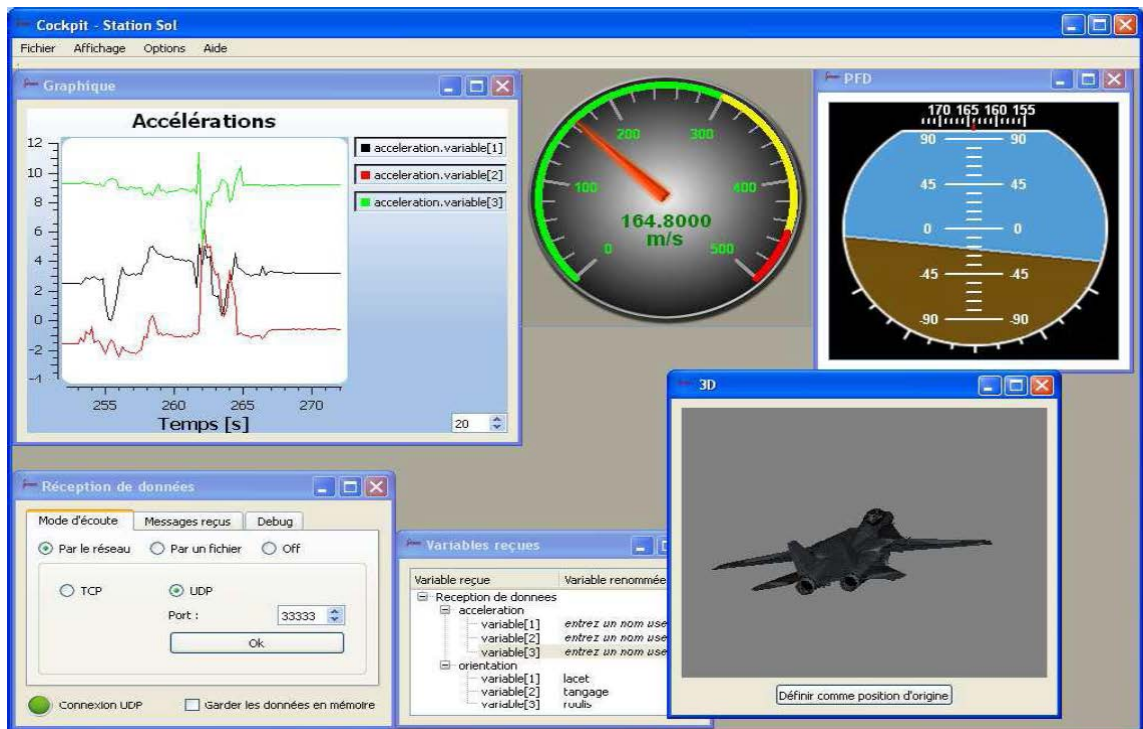
En mode "Exploitation des données", il prend directement en entrée un fichier de données de module généré par le logiciel DDP, et enregistre les données découpées et converties sous forme de tables au format CSV, exploitables sous Excel ou Matlab par la suite. C'est grâce à ce mode que l'on a produit l'essentiel des résultats présentés ci-après (voir chapitre 5).



2.4.3 Station Sol AETNA

Baptisée "**Hermès**", développée dans le projet AETNA du programme PERSEUS, programmée en Qt5/C++, tournant sous Windows.

Elle offre une interface à base de "widgets" permettant facilement de construire une IHM, et d'afficher visuellement les données sous forme de graphiques, cadrans, carte...



Une arborescence fournissant l'ensemble des valeurs disponibles dans les modules du démonstrateur est disponible, chaque variable pouvant être affecté à un widget. Par exemple on peut afficher les accélérations de la centrale inertielle sous forme de courbe en fonction du temps (déterminé en utilisant le timecode de datation de la mesure), en quelques clics.

Le manque de données à cause de la mauvaise télémesure a empêché de se servir vraiment de cette station durant le vol.

2.4.4 Logiciel de réception des données radiosonde

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

Nous l'avons 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 2.4.5).

Ce logiciel a très bien fonctionné, nous donnant l'indication que la ballon avait éclaté, et nous donnant la position GPS d'atterrissage (détails au 5.4).

2.4.5 Logiciel de prévision de trajectoire en vol

Baptisé "**Crystal**", programmé en Visual C++ 6.0, tournant sous Win7, il 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, cela nous donnant la vitesse des vents dans cette couche.

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

Au cours de la descente, le calcul est constamment ré-effectué à partir de la dernière position GPS connue, pour augmenter la précision au plus la nacelle se rapproche du sol.

Nous avons fabriqué une carte numérique de la région par assemblage de captures d'écran du site Géoportail. Cette carte est utilisée par Crystal en image de fond derrière la trajectoire, pour faciliter les consignes données à l'équipe de récupération.

Ce logiciel a bien fonctionné, mais le vol raccourci et la position GPS ayant été reçue jusqu'au sol l'ont rendu de faible utilité (détails au 5.6).

Nous avons recoupé les informations données par ce logiciel avec celles obtenues par **predict.habhub.org**, un logiciel de prévision de trajectoire grand public.

2.4.6 Logiciel de calcul de direction d'antenne

C'est une petite interface graphique développée pour calculer facilement l'angle et l'élévation à donner au pied d'antenne d'après la position GPS de l'antenne et celle du ballon, rentrée à la main d'après les données lues dans le logiciel EOSCAN.

Le pied d'antenne, pour rappel, est un pied de télescope disposant d'une interface pour entrer un angle et une élévation donnée, sur lesquelles le pied se déplace automatiquement.

AntennaTrackingProgramMFC

STATION SOL

DD (degrés décimaux) -

Latitude: 42.9369

Longitude: 0.1411

DMS (degrés, minutes, secondes) -

Latitude: N S 42 ° 56 m 13 s

Longitude: E O 0 ° 08 m 28 s

Altitude: 3000

BALLON SONDE

DD (degrés décimaux) -

Latitude: 43.6500

Longitude: 0.7364

DMS (degrés, minutes, secondes) -

Latitude: N S 43 ° 39 m 0 s

Longitude: E O 0 ° 44 m 11 s

Altitude: 200

POSITIONNEMENT ANTENNE

Azimuth: 31

Elevation: -2

CALCULER Quitter

Ce fonctionnement nécessite cependant un bon calibrage initial du pied, par rapport au Nord et avec un niveau à bulle. Durant le vol, un bug sur la télécommande a hélas provoqué un redémarrage qui a perdu ce calibrage, ce qui a empêché de se servir de ces données pour pointer précisément l'antenne.

Le positionnement a donc dû être fait à la main de façon grossière. Mais l'antenne utilisée dispose d'un angle de réception assez important (30°) donc cela n'est pas suffisant pour expliquer la très mauvaise télémesure en bande S, même si cela a réduit la qualité à laquelle on pouvait s'attendre.

2.5 MECANIQUE DE LA NACELLE

La masse totale de la charge utile doit être inférieure à 1,6kg, pour une masse surfacique inférieure à 13g/cm², sans compter l'enveloppe latex du ballon, le parachute, le réflecteur radar etc. Il est préférable que la nacelle soit bien équilibrée. Elle doit pouvoir résister à des mouvements brutaux et à des vitesses assez élevées (montée : 20km/h environ, descente : moyenne 50km/h mais 180km/h en très haute altitude).

Il faut utiliser un matériau imperméable, peu dense, et le plus résistant possible. Le boîtier de la nacelle a été réalisé avec du carton plume (mousse plastique souple entre deux feuilles de carton rigide glacé, CANSON 5154006, 700g/m² pour une épaisseur de 5mm).

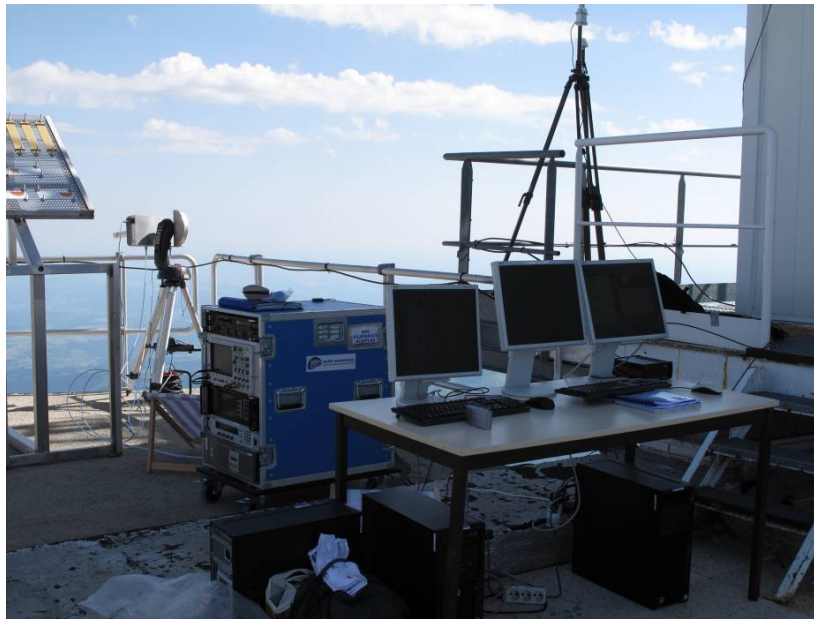
Les dimensions de la nacelle étaient donc au départ de 30cmx30cmx30cm. En ce qui concerne la caméra, nous avons réalisé un socle spécial pour pouvoir la maintenir inclinée vers le bas, selon l'angle de vue désiré (+68° par rapport à l'horizontale). Ces dimensions n'étaient pas celles prévues, mais la nacelle a dû être profondément modifiée (voir 3.1 et 3.2).

2.6 MISE EN ŒUVRE DU BALLON

Le ballon a été gonflé avec la méthode préconisée par l'aérotechnicien dite méthode de lâcher par anneau (un poids de 5kg + le manchon de gonflage de 1,2kg), en vérifiant les différences de pression dans les bouteilles utilisées grâce à un manomètre.

2.7 Station de réception

Dans le cadre d'un lancement depuis le camp de Ger nous avons implanté notre station sol au pic du midi. Cette station se compose de la station GAREF en bande S, ainsi que de la station adaptée à la radiosonde, fournie par le constructeur.



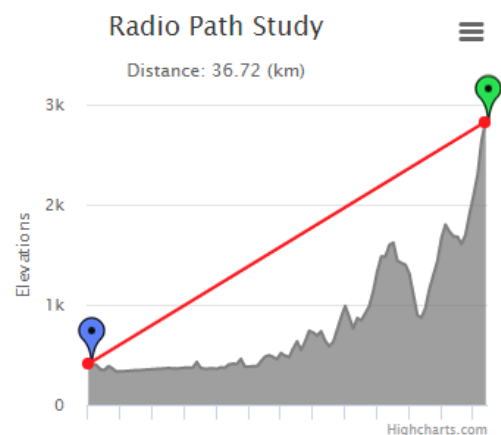
L'installation de la station sol au pic du midi (Photo G180023. Photo GAREF PARIS)

2.7.1 Implantation

Pour permettre la retransmission en temps réel des données de position du ballon, une équipe GAREF a été installée au site du Pic du midi du Bigorre (42° 56' 11" nord, 0° 08' 34" est) pour y placer la station de réception principale

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

Ce site a été choisi car il correspond au point culminant de toute la région. Il atteint une altitude de 2 876 mètres ce qui nous permet d'être, pendant toute la durée du vol, en vision directe avec le ballon, sauf quand il est posé au sol (dans ce cas, des arbres ou un léger relief peuvent empêcher la réception de la télémétrie par la station principale).



L'accès au pic se fait à l'aide d'un téléphérique. L'observatoire du Pic du Midi dépend de l'organisme Observatoire Midi-Pyrénées.

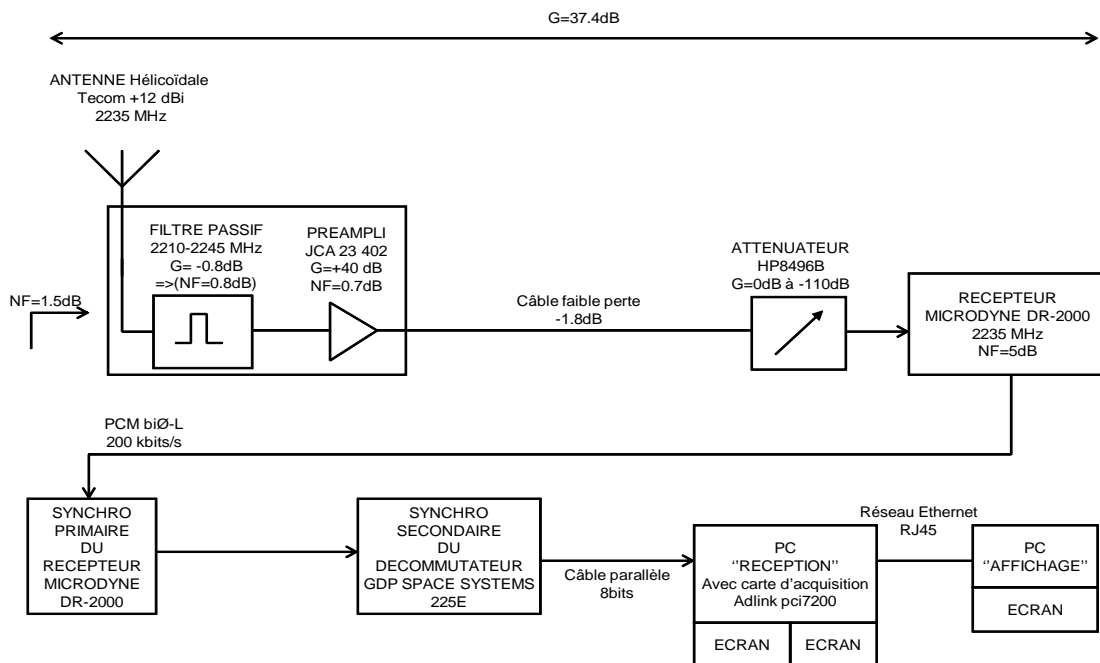
2.7.1.1 Station GAREF

La fréquence d'émission est de 2235 MHz, au format PCM biphasé-L, pour une puissance de 33 dBm, et a une bande passante de 12 MHz. On a donc une portée de seulement 60 km (rapport signal sur bruit > 12 dB), en vue directe.

La station de réception se compose de deux antennes hélicoïdales, une LHCP et une RHCP.



L'antenne de réception en bande S
(Photo G180009. Photo GAREF PARIS)



Synoptique de la station de réception GAREF

2.7.1.2 Station radiosonde

L'émetteur de la radiosonde a une puissance de 200 mW c'est-à-dire de +23 dBm, à une fréquence de 406 MHz et pour une bande passante de 5 kHz. On a donc à 350 km un rapport signal sur bruit de 24 dB, ce qui a largement permis la réception du signal, et donc de la position GPS du ballon, à condition que celui-ci soit en vision directe.

2.8 PREVISION DE TRAJECTOIRE EN VOL

2.8.1 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 contient un module GPS, et les informations qu'il fournit sont transmises via la télémesure. Il est 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 Mbits/sec de la télémesure, on verra que pour avoir en permanence la position GPS, il est nécessaire d'avoir un deuxième système de télémesure (radiosonde) avec une fréquence et un débit plus faible.

2.8.2 Principe du logiciel de prévision en temps réel

Voir 2.4.5

3. PROBLEMES RENCONTRES / MODIFICATION DE L'EXPERIENCE

3.1 NOUVELLES CONTRAINTES

Au départ la nacelle avait été réalisée conformément au cahier des charges du CNES alors en vigueur, selon lequel la masse limite était de 2,5 kg. Nous avons ensuite été informés quelques semaines avant la campagne de lancement, que suite à une réévaluation des risques en cas de chute sans parachute de la nacelle, la limite de masse avait été abaissée à 1,6 kg. Pour adapter notre projet sans supprimer d'expériences, nous avons donc voulu répartir la masse entre deux nacelles distinctes, accrochées sur la même chaîne de vol. Cette solution semblait compatible avec le cahier des charges CNES et la norme de l'air (voir 2.1.1) mais finalement n'a pas été acceptée. Il nous a donc fallu modifier l'expérience la veille du lancement afin de pouvoir lâcher !

3.2 SOLUTIONS

Nous avons dû réfléchir à la manière d'alléger notre nacelle et avons été contraints de supprimer une partie de nos expériences embarquées : les capteurs de température, les mesures de tension de pile ainsi que le convertisseur analogique-numérique associé.

Le ballon devait embarquer un capteur de température placé à l'extérieur. Ces relevés, comparés au modèle standard de l'atmosphère permettaient par exemple de déterminer l'altitude.

Un deuxième capteur aurait permis de connaître la température de l'émetteur de télémesure.

Nous aurions utilisé des capteurs thermocouple Type J, associé transmetteur deux voies de mesures de thermocouples TXDIN70-24V de chez Newport.

Pour convertir les informations de température, pression ou encore la tension des piles de l'analogique à des données numériques nous devions utiliser un convertisseur analogique numérique de cinq voies développé par les équipes du GAREF pour être utilisé dans les fusées PERSEUS, qui de ce fait n'a pas pu être testé.

Ces suppressions ont permis de diminuer la consommation électrique du système, et donc dû supprimer une partie des piles (passage d'un bloc de 12 à 8 piles), abaissant encore la masse de l'ensemble.

Au départ, la nacelle devait mesurer 30x30x30 cm. Cependant, pour abaisser encore la masse de la nacelle, nous avons dû couper la nacelle en deux. Les dimensions finales étaient donc de 30x30x15 cm.

Finalement à la pesée, nous étions juste à la limite de 1600 grammes.

4. DEROULEMENT DE LA JOURNEE DE LANCEMENT

6h00 : Réveil.

6h20 : Départ de l'hôtel pour le camp de Ger.

7h00 : Arrivée au camp de Ger pour déposer l'équipe sol / Départ de l'équipe de réception des données et de l'équipe de récupération pour le Pic du Midi.

8h30 : Arrivée au pic du midi, installation du matériel et test du matériel.

9h00 : Préparation de la chaîne de vol par l'équipe sol.

11h30 : Départ de l'équipe de récupération pour le potentiel lieu d'atterrissage.

14h17 : Lancement du ballon (12h17 TU).

16h45 : Récupération et arrêt de la nacelle.

18h35 : Arrivée des équipes de réception et réception au camp de Ger.

20h10 : Départ du camp de Ger.

21h00 : Arrivée à l'hôtel à Pau.

5. DEPOUILLEMENT ET RESULTATS OBTENUS

5.1 Points notables

La synchronisation par IRIG-B du module timecode permettant de dater toutes les mesures n'a pas fonctionné, à cause du lancement précipité, sans respect des règles et sans confirmation de la station de réception. La datation ne s'est donc faite qu'en relatif, mais un recalage à la seconde a été possible par recoupement des données de la radiosonde (qui a l'heure GPS), de la détection du choc de l'atterrissage sur la centrale inertielle, et des vidéos et photos prises pendant le lâcher.

Le T0 utilisé pour l'exploitation des données est donc celui de l'allumage de l'électronique.

Evènement	TU (heure locale - 2)	T0 +
Allumage de l'électronique	12:14:02	0
Lâcher	12:17:32	3:30
Culmination	13:12:40	58:38
Atterrissage	13:40:08	1:26:06
Récupération	environ 14:45:00	environ 2:30:00

5.2 Télémétrie

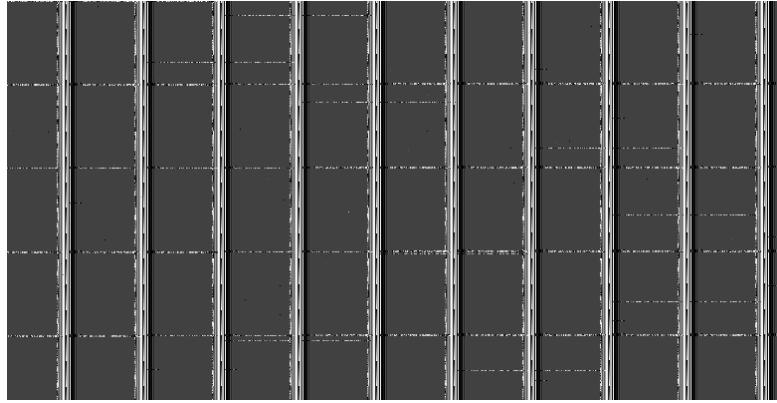
5.2.1 Qualité de réception

La télémétrie a été extrêmement bruitée pendant tout le vol.

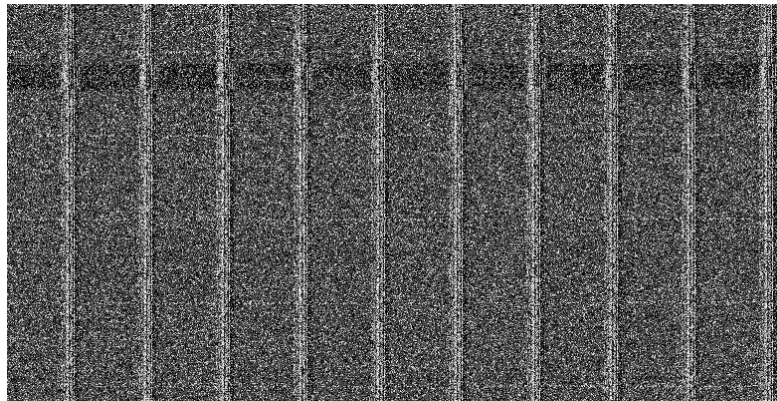
La 1ère trame qui a pu être décodée a été reçue à T0+9mn30 (donc déjà 6mn après décollage, altitude GPS 2400m), et il n'y a quasiment pas eu de réception avant T0+22mn (altitude GPS 6700m).

(Rappel : altitude GPS sol au décollage ~400m)

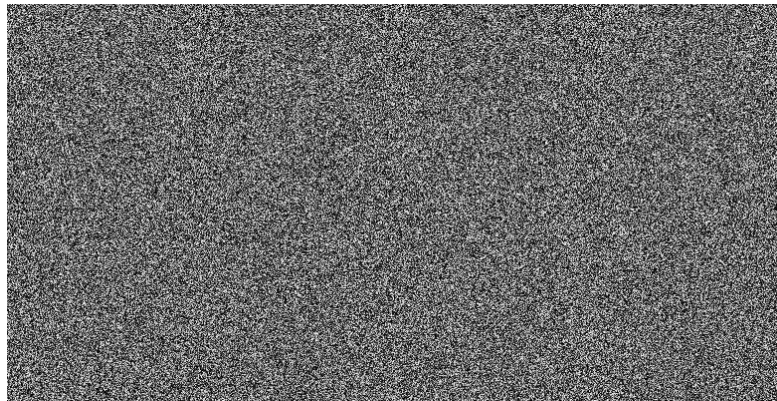
Une analyse graphique des données brutes (qui sont stockées avant tout traitement) montre que la télémétrie était bien présente tout le temps (depuis l'allumage) et contenait bien des données, mais elle était seulement trop bruitée pour être décodée. Cette analyse montre en plus des fluctuations périodiques de qualité, cohérentes avec un balancement de la nacelle.



Données correctes, reçues lors d'une période sans erreur



Données reçues, mais trop bruitées pour être décodées



Absence totale de télémétrie (avant allumage)

Un test de télémétrie a été fait au retour au GAREF et n'a pas montré d'erreur visible : la puissance de 2W comme prévu a bien été mesurée au bolomètre à l'entrée de l'antenne d'émission, le signal reçu a l'air correct à l'oscilloscope et au récepteur de labo (pas de déformation ou décalage de fréquence). L'émetteur et sa réception étant trop proches, ce test ne permettait pas de valider la puissance réellement transmise.

Nous envisageons plusieurs sources d'erreurs, qui vont demander plus d'investigations :

- ❖ **Problème sur l'antenne d'émission ?**
- ❖ **Sur l'antenne de réception ou son étage d'amplification ?**
- ❖ **Sur le récepteur bi-voie, utilisé pendant la campagne ?**
- ❖ ...

Ces investigations seront menées dans les prochaines semaines.

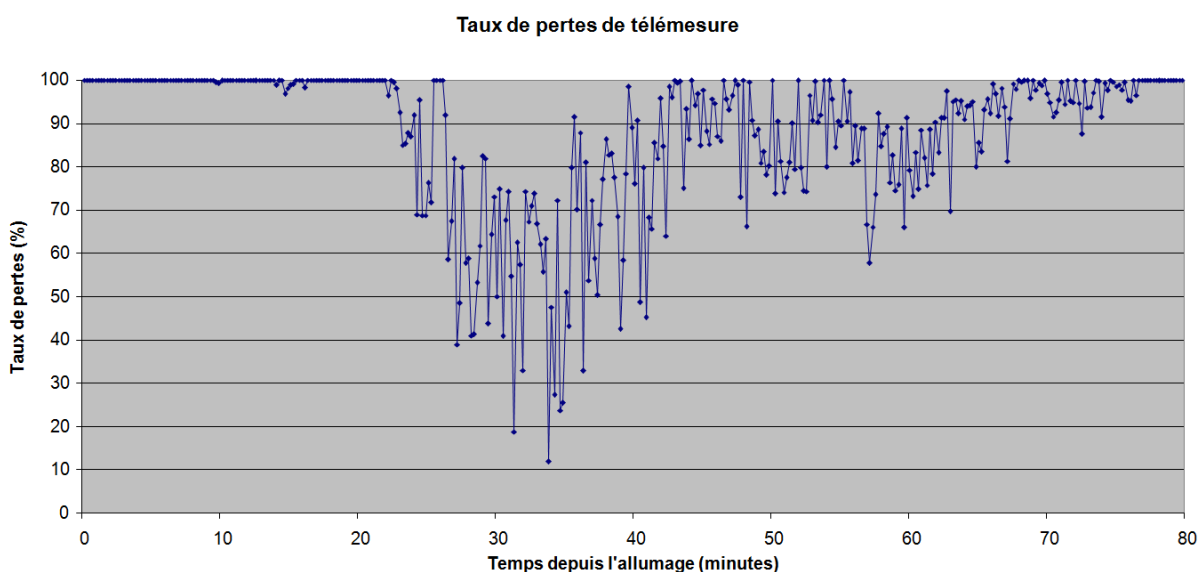
5.2.2 Données décodées

La réception télémessure s'est déroulée pendant environ 1H20 : il y a donc eu 480000 trames de données par module (à 100Hz) qui ont été envoyées (parmi environ 39 millions de trames au total, la plupart étant donc de remplissage).

Il a été décodé :

58372 trames module GPIO, dont 0 faux OK
33 trames "module inconnu" (c'est-à-dire faux OK)
55569 trames module 23 (calcul de trajectoire), dont 4 faux OK
54687 trames module 46 (centrale inertielle), dont 4 faux OK
0 trames vidéo (car données coupées avant la première réception)

=> 88% taux moyen de perte (82% si on compte à partir de T0+22mn)



La courbe du taux de perte moyen confirme que les pertes n'étaient pas liées à un effet de sol ou de masquage par la montagne (à T0+22mn, on était déjà bien trop haut pour être gêné), et que les données étaient bien toujours présentes derrière le bruit.

5.2.3 Détection et correction d'erreurs par CRC

Un CRC est inclus à la trame pour détecter les trames corrompues, que l'on ne décode pas. Il y a une chance de ne pas détecter une corruption si un grand nombre de bits est faux, mais elle est infime.

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

Nous avons rejoué le décodage des données reçues en retirant cette correction :

- le CRC a bien éliminé toutes les trames corrompues, on n'a aucun faux OK s'il n'y a pas de correction

- la correction apporte un gain d'environ 50% de trames OK, avec seulement 0.04% de faux OK, que l'on détecte par des points aberrants dans les données ou une trame "module inconnu"

Le CRC a donc parfaitement rempli son rôle, surtout dans des conditions aussi mauvaises, et la correction (qui est un usage inhabituel d'un CRC) a prouvé son efficacité.

5.3 Module vidéo

Le module vidéo a fonctionné pendant 144 secondes après l'allumage. Les données stockées à bord montrent que la vidéo était correctement enregistrée en deux flux, l'un de basse qualité transmise à l'OBC pour être intégrée aux données émises (34Mo de données au total), l'autre en haute qualité stockée sur carte SD. La coupure de l'enregistrement s'est faite alors que la nacelle était encore au sol, avant la première réception télémesure.



Image extraite (flux émis) alors que la nacelle était posée au sol, sur le côté



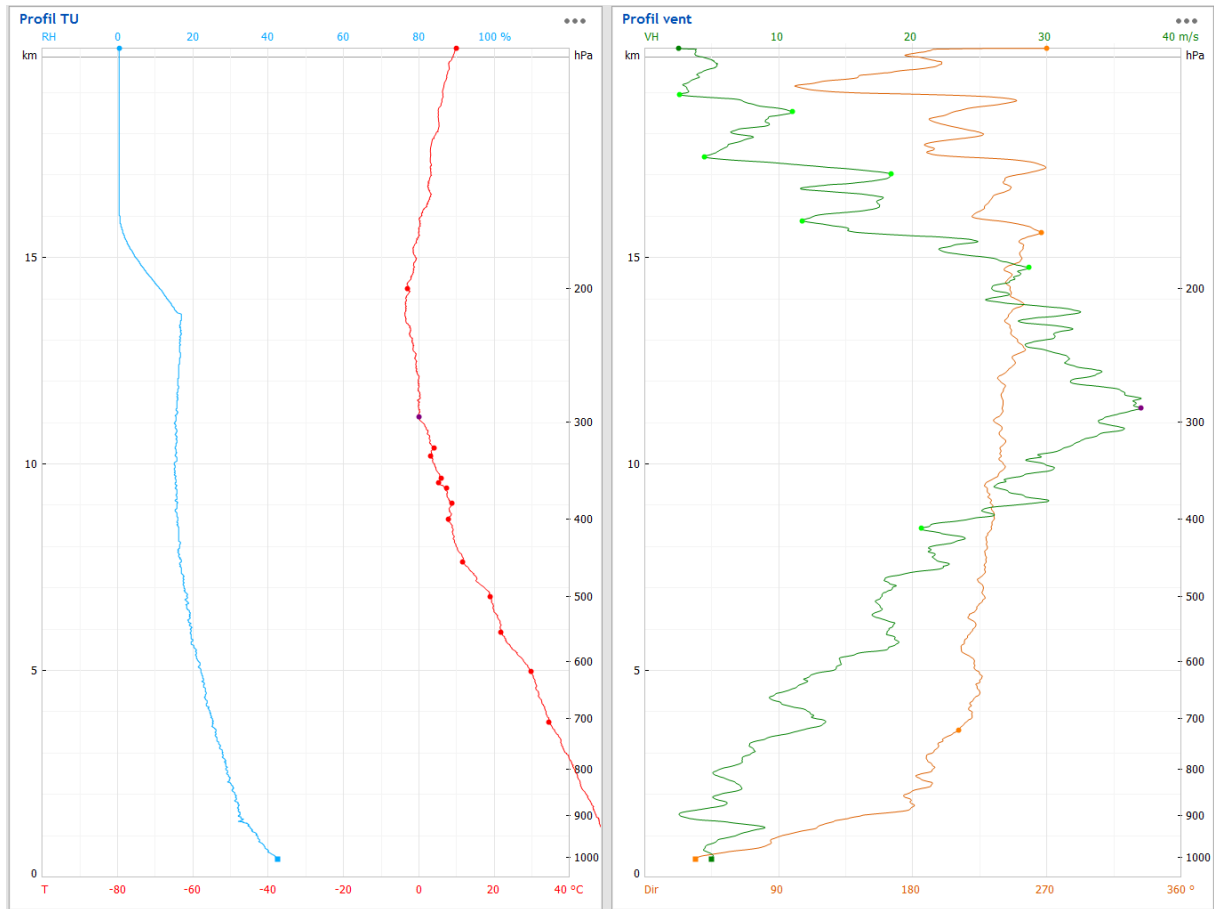
Image extraite (flux émis) alors que la nacelle était captive sous le ballon retenu par anneau

L'investigation du problème a montré un conflit dans l'accès aux données sur la carte SD, à la fois écrites pour stockage et lues pour émission. Ce problème, aléatoire, n'avait pas été détecté auparavant.

Le ballon a été réalisé en un temps très court et le module vidéo a eu des évolutions logicielles significatives, pour permettre l'enregistrement en deux qualités et l'exploitation d'un nouveau hardware utilisant de l'Ethernet "over USB". Cela a hélas conduit à un manque de tests suffisamment poussés pour détecter et corriger ce problème.

5.4 Radiosonde

5.4.1 Données météo



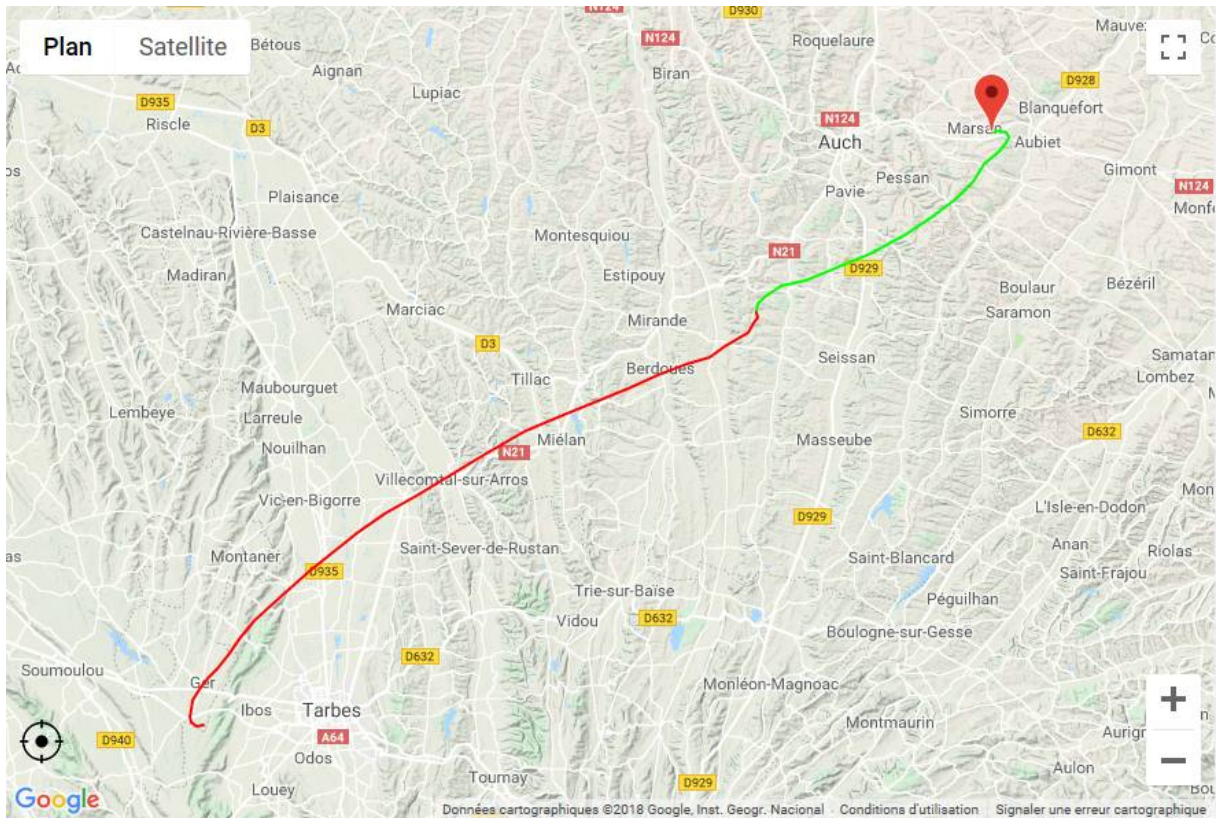
Données météo (humidité, température, vitesse et direction du vent), affichées dans le logiciel EOSCAN de la radiosonde

Les mesures de données météo ont correctement fonctionné, donnant des mesures conformes à ce qui est attendu dans les modèles standards d'atmosphères.

Ainsi, la température est passée par un minimum négatif, vers 13500m, accompagné d'une nette chute de l'humidité de l'air, correspondant au passage de la troposphère à la stratosphère (la tropopause).

On observe un maximum à 130km/h de vent, qui est resté à peu près dans la même direction Sud-Ouest (225°) pendant l'essentiel du vol, expliquant une distance parcourue assez grande (80km) malgré un vol très court (1h20).

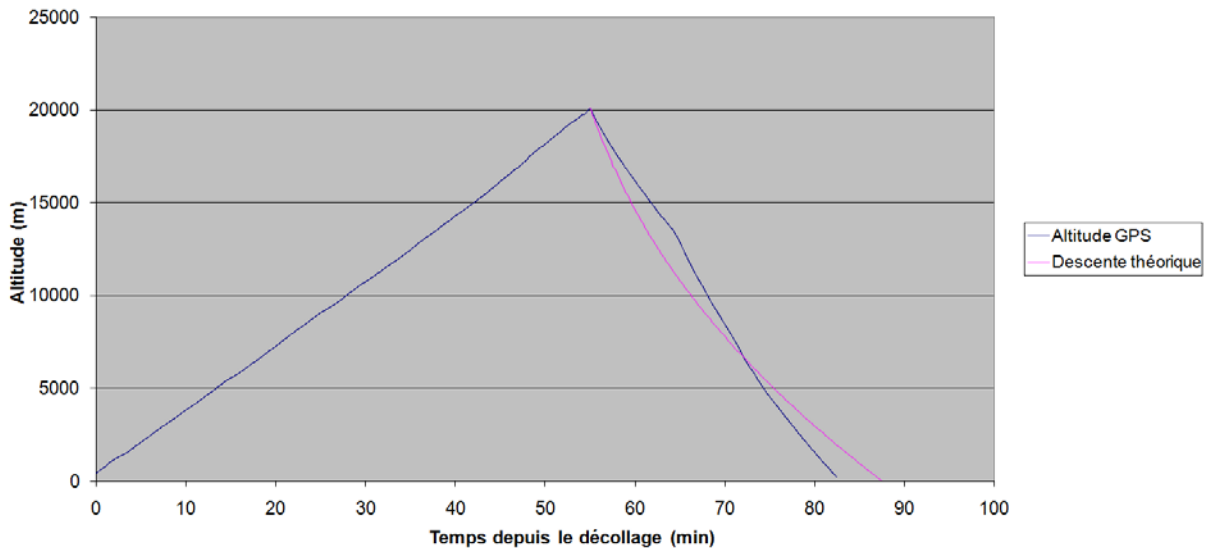
5.4.2 Données GPS



Trajectoire affichée dans le logiciel EOSCAN de la radiosonde

La nacelle a été retrouvée exactement au dernier point GPS reçu (à quelques mètres près).

Altitude en fonction de temps de vol



La montée s'est effectuée à vitesse stable, à 5.9m/s.

On observe cependant plusieurs points inattendus lors de ce vol (comparés aux 6 autres ballons légers de la série des HORUS, lancés par le GAREF précédemment) :

- La culmination s'est effectuée à seulement 20 000m, au lieu de 30 000m environ (ballon probablement défectueux et mal mis en œuvre).

- La courbe de descente sous parachute a une forme anormale, avec une nette inflexion (64min après le décollage), d'abord plus lente que la courbe théorique puis plus rapide.

A la récupération, on a trouvé un ballon encore en un morceau, juste fendu sur une bonne partie de sa longueur, alors qu'il éclate habituellement en de nombreux fragments.

Notre supposition : le ballon a été fragilisé par les mauvaises conditions de vent au décollage, il s'est déchiré avant son point de rupture normal, mais ne s'est pas vidé complètement d'où une descente plus lente que prévu (il a agi comme un parachute), puis la déchirure s'est brusquement agrandie et le ballon encore entier est devenu un poids mort qui a entraîné une descente plus rapide que celle théorique.

5.5 Calcul de trajectoire embarqué

Le calcul (par intégration des données d'accélération et de giration de la centrale inertielle) a été correctement déclenché par un appui du bouton "mise à feu" avant le lâcher (à T0+118, vu sur les trames GPIO de l'OBC), mais la nacelle est restée captive avec la ballon retenu par anneau pendant qu'un fort vent secouait la nacelle et la rabattait sur le sol à plusieurs reprises... (voir courbes 5.6.1)

Le calcul a ainsi commencé 1mn30 avant le lâcher réel, les attitudes et les vitesses 3axes (intégrées) du ballon étaient donc déjà complètement aberrantes (l'erreur est exponentielle) au moment du lâcher.

Pour rappel, ce calcul a vocation à ne tourner que sur les 30 secondes d'ascension d'une fusée PERSEUS, suite à détection de mise à feu, à partir d'une orientation 3axes fixe, connue.

Une nacelle de ballon est finalement beaucoup trop secouée et tourne trop pour qu'un calcul simple comme celui-ci donne des résultats utilisables, il faudrait une stabilisation et des filtres. Autrement le calcul a fonctionné comme prévu et n'a pas perturbé le programme de vol, il reste tout à fait adapté à un démonstrateur de fusée.

5.6 Prédiction de trajectoire



Trajectoire du ballon dans le logiciel de prévision Crystal (en rouge, la prévision depuis l'apogée)

L'intégration du logiciel Crystal avec le logiciel EOSCAN de la radiosonde pour extraire les données GPS a été réussie, la prévision s'est comportée correctement, mais la courbe de descente anormale (voir 5.4) fait que la descente a duré environ 80% de la durée théorique, d'où un écart de quelques kilomètres par rapport à la prévision du point de chute calculé à l'apogée.

Le calcul s'est de toutes façons affiné puisque recalculé en permanence à partir du dernier point connu, de plus comme on a reçu les positions GPS jusqu'au sol, cette prévision n'a pas été réellement exploitée lors de ce vol.

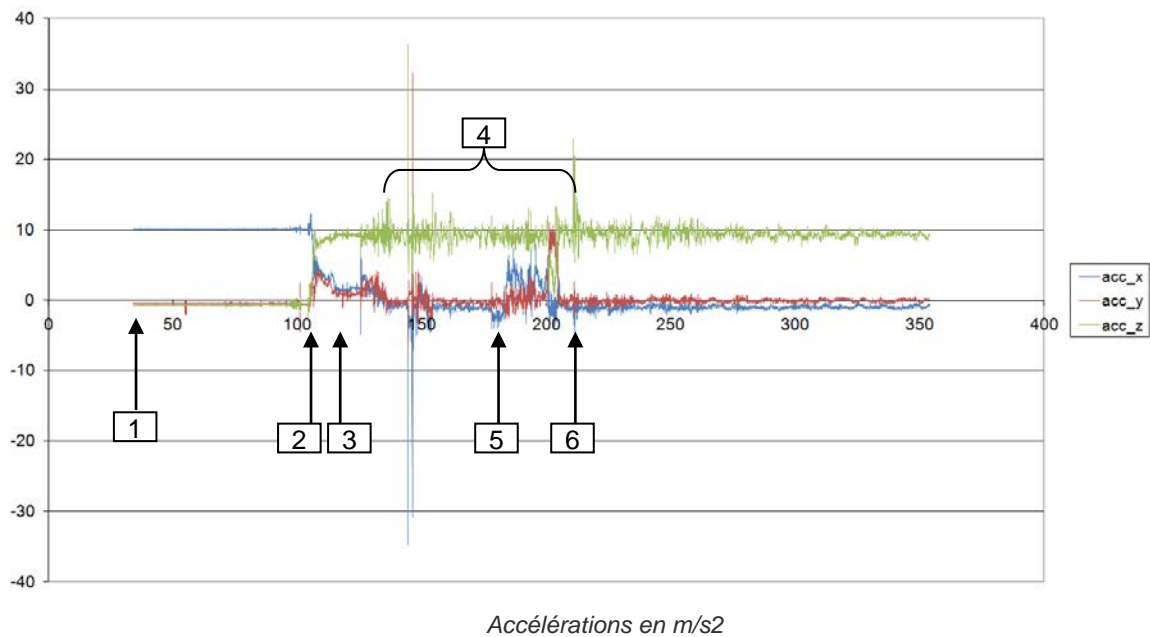
Comme le ballon est redescendu plus tôt que prévu, l'équipe de récupération n'avait pas encore eu le temps de se rendre sur le point de chute prévu par le logiciel de prévision de trajectoire le matin du lancement. Elle n'a donc pas eu besoin de revenir sur ses pas, évitant ainsi des déplacements inutiles, et l'équipe de récupération s'est simplement rendu directement jusqu'au point d'atterrissage.

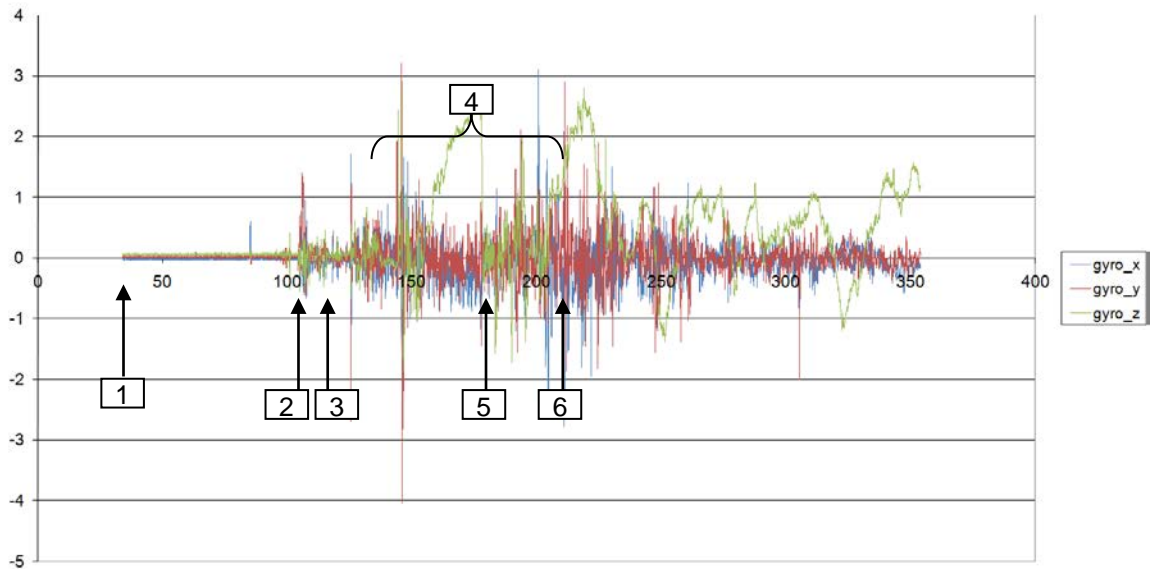
Module centrale inertielle

Rappel : l'axe Z est vertical vers le haut de la nacelle.
T0 correspond au lâcher du ballon. T0 = 12h17m32s TU

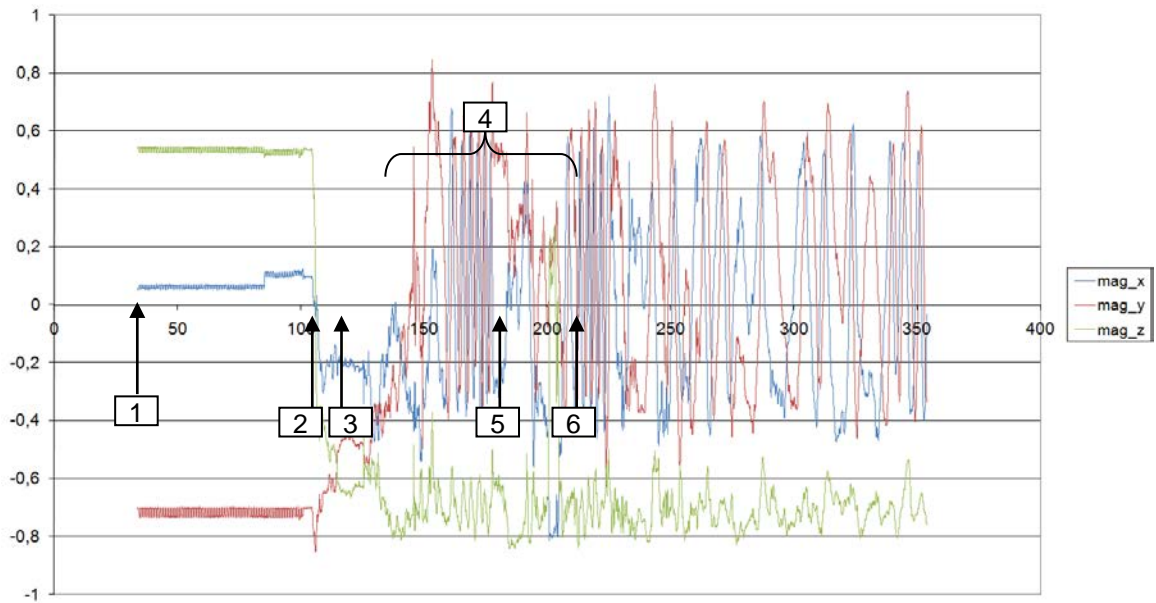
5.6.1 Zoom sur lâcher

Indicateur sur les courbes	Evènement	T0+ (secondes)
1	Début des données	34
2	Prise de la nacelle en main	105
3	appui bouton "mise à feu" (début calcul de trajectoire)	118
4	Nacelle lâchée captive, sous anneau, secouée et rebondissant au sol	136 à 210
5	Coupure vidéo	178
6	Lâcher	210





Vitesses de rotation en rad/s

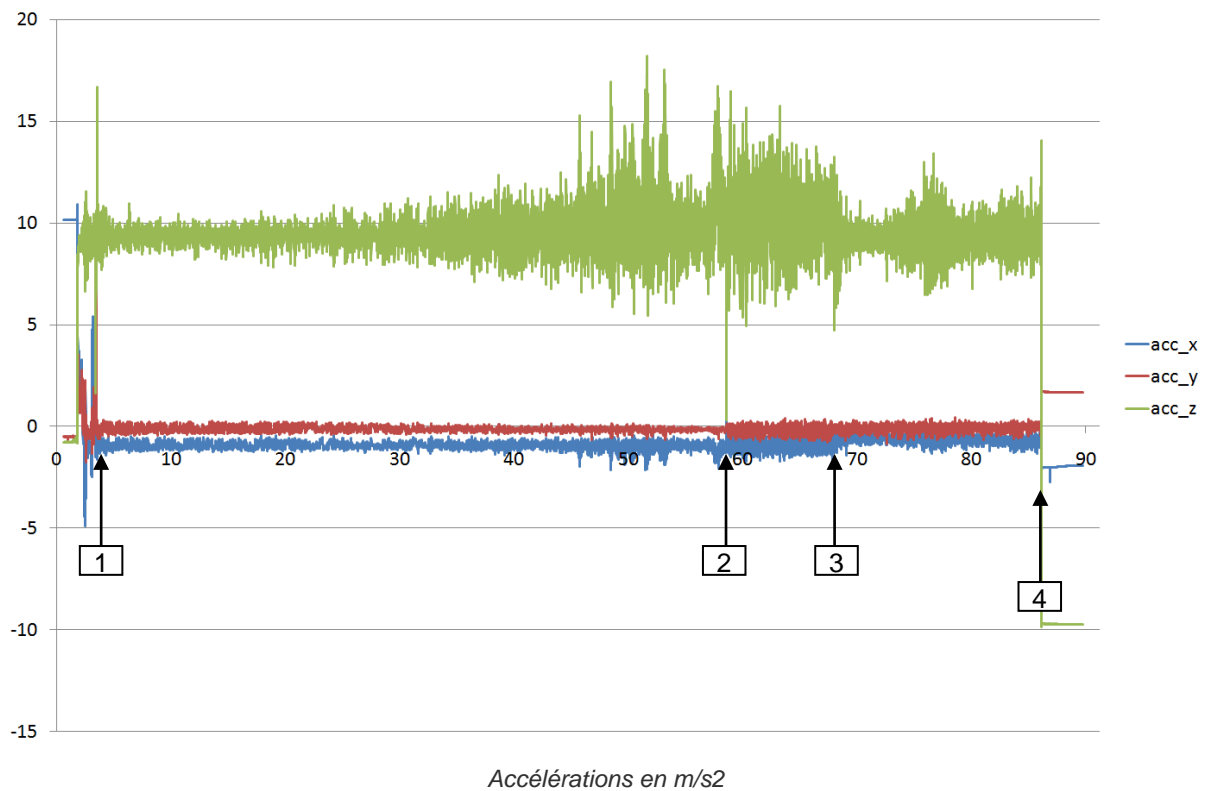


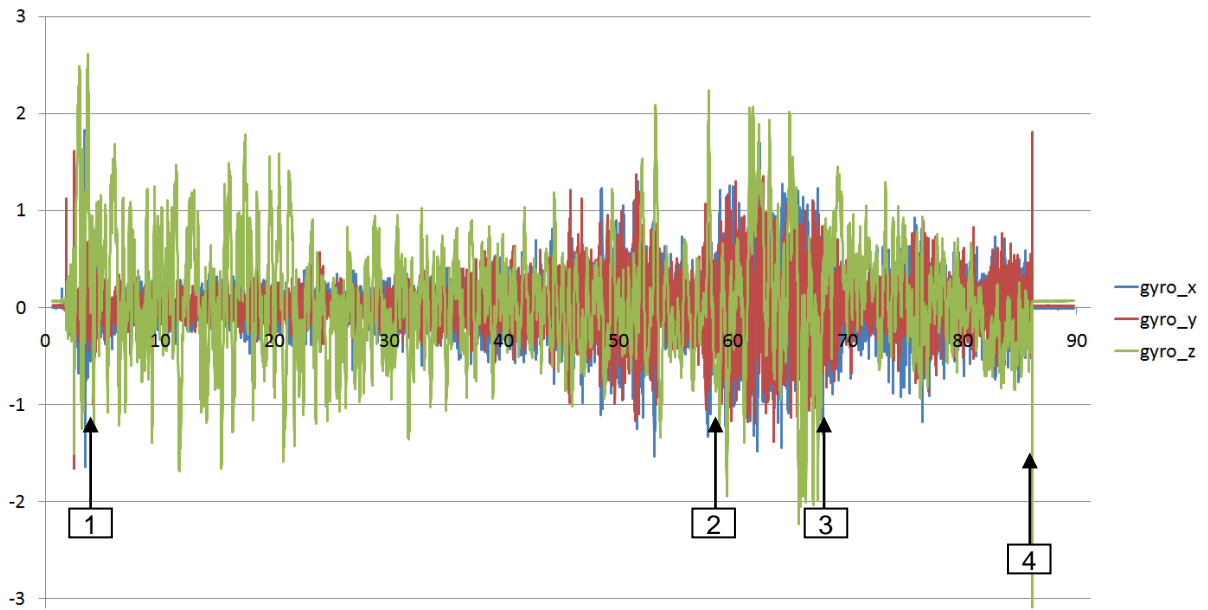
Magnétomètres en champs terrestres

Les données sont bien cohérentes avec les vidéos prises pendant le lâcher, et on observe bien les nombreuses secousses et rotations rendant le calcul de trajectoire par intégration inutilisable.

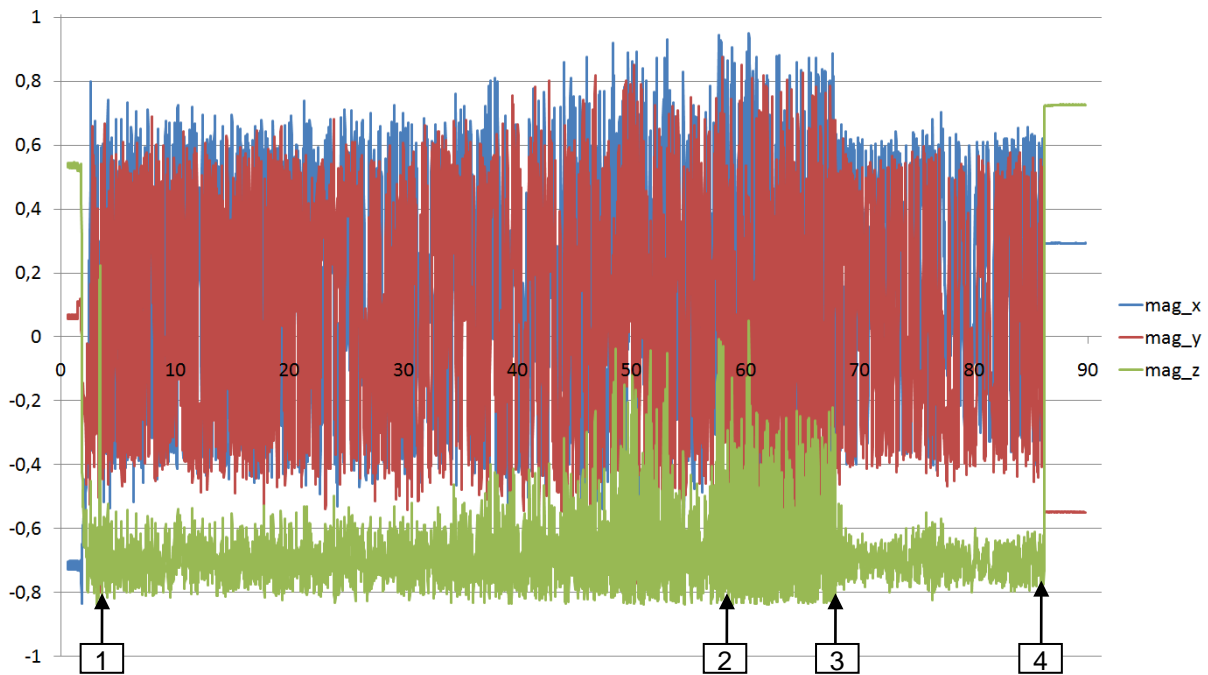
5.6.2 Vol complet

Indicateur sur les courbes	Evènement	T0+ (minutes)
1	Lâcher	3.5
2	Culmination	58.5
3	Inflexion courbe de descente	67.5
4	Atterrissage	86





Vitesses de rotation en rad/s



Magnétomètres en champs terrestres

Les différents évènements sont bien visibles sur les courbes. En particulier, on remarque que l'inflexion sur la courbe de descente a un effet très visible, correspondant à une nacelle nettement plus stable que dans la première partie de la descente. Peut-être que le ballon vide s'est accroché à la nacelle, limitant son balancement ?

6. CONCLUSIONS ET REMERCIEMENTS

Le projet Horus 8 se servait du savoir-faire antérieur du GAREF et des connaissances complémentaires acquises par le GAREF AEROSPATIAL lors de son travail sur le projet PERSEUS, pour réaliser une expérience lancée dans le cadre de la campagne nationale de lancement du camp de Ger 2018.

Utilisant ce projet comme un banc d'essai, il nous a ainsi permis de mettre à jour des problèmes dans le système de transmission en temps réel de la vidéo. Les résultats obtenus ont donc permis de corriger ces défauts et ainsi d'améliorer le système de retransmission vidéo destiné à être utilisé sur SERA 4.

L'analyse des données obtenues par le logiciel de calcul de trajectoire a montré une dérive des résultats obtenus à partir des données de la centrale inertielle Xsens. Le logiciel de calcul de trajectoire n'est donc pas adapté à une utilisation de la durée d'un vol de ballon, mais cette dérive ne pose pas de problème dans le cadre d'une fusée dont la durée de vol est très courte.

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.

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

- **Francis Lacassagne, responsable technique du site de l'observatoire du pic du midi (UMS OMP), ainsi que Stéphanie Baylac et sur site toute l'équipe de l'observatoire du pic du midi pour son aide.**
- **Le général Henry de Roquefeuil, conseiller militaire auprès du président du CNES, qui a permis l'utilisation de la télémétrie en bande S.**
- **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.