



HORUS 8

RAPPORT D'EXPÉRIENCE

GP-1737-D-108

Révision 1.11

23 mars 2019

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

Approuvé par : **Bernard SCACHE**

SOMMAIRE

0.	ÉVOLUTION DU DOCUMENT	1
1.	SYNTHÈSE.....	2
1.1	OBJECTIFS DU PROJET	2
1.2	SPÉCIFICATIONS	3
1.3	DÉROULEMENT DU VOL ET SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	3
2.	PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIENCE	5
2.1	DESCRIPTION GÉNÉRALE	5
2.1.1	Classification.....	5
2.1.2	Chaîne de vol.....	6
2.2	EXPÉRIENCE EMBARQUÉE	7
2.2.1	Synoptique de la nacelle.....	7
2.2.2	Module vidéo SERA4 (GP1530F801-1.0, Serial No 5)	8
2.2.3	Ordinateur de bord OBC GAREF (GD1112S801-2.0, Serial No 50).....	8
2.2.4	Module télémessure/antenne	9
2.2.5	Timecode (GP0916M802-3.0, Serial No 37)	10
2.2.6	Alimentation électrique/Piles	11
2.3	RADIOSONDE	11
2.3.1	Utilisation	11
2.3.2	Caractéristiques.....	11
2.3.3	GPS	12
2.4	LOGICIELS AU SOL.....	12
2.4.1	Logiciel de réception des données en temps réel	12
2.4.2	Lecteur de données PERSEUS.....	13
2.4.3	Station Sol AETNA	14
2.4.4	Logiciel de réception des données radiosonde	14
2.4.5	Logiciel de prévision de trajectoire en vol.....	15
2.4.6	Logiciel de calcul de direction d'antenne	15
2.5	MÉCANIQUE DE LA NACELLE	16
2.6	MISE EN ŒUVRE DU BALLON	16
2.7	STATION DE RÉCEPTION	17
2.7.1	Implantation	17
2.7.2	Station GAREF	18
2.7.3	Station radiosonde.....	18
2.8	PRÉVISION DE TRAJECTOIRE EN VOL	19
2.8.1	Enjeu de la récupération.....	19
2.8.2	Principe du logiciel de prévision en temps réel	19

3.	PROBLÈMES RENCONTRÉS / MODIFICATION DE L'EXPÉRIENCE	20
3.1	NOUVELLES CONTRAINTES.....	20
3.2	SOLUTIONS	20
4.	DÉROULEMENT DE LA JOURNÉE DE LANCEMENT	21
5.	DÉPOUILLEMENT ET RÉSULTATS OBTENUS	22
5.1	POINTS NOTABLES.....	22
5.2	TÉLÉMESURE	22
5.2.1	Qualité de réception.....	22
5.2.2	Données décodées.....	24
5.2.3	Détection et correction d'erreurs par CRC	24
5.3	MODULE VIDÉO.....	25
5.4	RADIOSONDE	26
5.4.1	Données météo	26
5.4.2	Données GPS.....	27
5.5	CALCUL DE TRAJECTOIRE EMBARQUÉ	28
5.6	PRÉVISION DE TRAJECTOIRE	29
5.7	MODULE CENTRALE INERTIELLE	30
5.7.1	Zoom sur lâcher	30
5.7.2	Vol complet.....	32
6.	CONCLUSIONS ET REMERCIEMENTS	34

0. ÉVOLUTION 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.
Version 1.10 :	14 mars 2019	corrections.
Version 1.11 :	23 mars 2019	corrections.

1. SYNTHÈSE

1.1 OBJECTIFS DU PROJET

A) La transmission en temps réel de vidéos via une télémesure 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 la fusée SERA4, mais également une radiosonde avec module GPS.

Ce module vidéo permet l'acquisition de vidéos ainsi que leur transmission en temps réel via la télémesure à 5 Mbit/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 parce qu'elle n'a pas le temps d'accrocher la position GPS précise, en raison de sa vitesse et de 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 SPÉCIFICATIONS

Les dimensions de la nacelle principale étaient de 30 cm x 30 cm x 15 cm, en carton plume (280 g à vide), pour une masse totale de 1 660 g. La fixation des panneaux en carton plume était assurée par du scotch aluminium 3M 425.

Elle contenait :

- un bloc de piles (255 g),
- un OBC (Ordinateur de bord) (250 g),
- un module Timecode (175 g),
- une centrale inertielle (150 g),
- une radiosonde Meteomodem (150 g),
- la mécanique de la nacelle (600 g),
- un émetteur (57 g).

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 15 V (pour l'électronique nacelle).

Consommations :

- Émetteur : 0,60 A à 12 V
- Électronique nacelle : 0,63 A à 12 V ; 0,52 A à 15 V

Autonomie :

- Émission télémesure : 4 heures
- Électronique nacelle : 4 heures
- Balises : 8 à 9 jours
- 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).

1.3 DÉROULEMENT DU VOL ET SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Le lâcher de HORUS 8 a eu lieu au camp de Ger (Pyrénées-Atlantiques et Hautes-Pyrénées), le mercredi 18 juillet 2018 à 12 h 17 min 32 s UTC (T0).

Lancement	Latitude : 43°13' 20.5" N Longitude : 00°03' 07.5" O Altitude : 430 m	18 juillet 2018 12 h 17 min 32 s UTC (T0)
Culmination	Latitude : 43°31' 25.7" N Longitude : 00°30' 08.3" E Altitude : 20 069 m	13 h 12 min 40 s UTC
Atterrissage	Latitude : 43°39' 11" N Longitude : 00°44' 21" E Altitude : 187 m	13 h 40 min 08 s UTC
Récupération de la nacelle (dans un champ)		14 h 45 UTC

Le vol a duré 1 h 22 min 36 s (du décollage à l'atterrissage).

La culmination a eu lieu à T0 + 55 min 08 s, soit 13 h 12 min 40 s UTC, à 20 069 mètres d'altitude, après une ascension à une vitesse moyenne de 5,9 m/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 16 h 45 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 toute fonctionné, et correspondent bien aux valeurs théoriques attendues.

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 re-descente 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 d'atterrissage prévu. Le ballon ayant éclaté plus tôt que prévu, l'équipe de récupération est allée un peu trop loin, mais a pu récupérer la nacelle une heure seulement après l'atterrissage.

2. PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIENCE

2.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE

2.1.1 Classification

Le ballon HORUS 8 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 qui transporte 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 surfacique¹ 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 utilisé exclusivement à des fins météorologiques et exploité de la manière prescrite par l'autorité compétente, peut être exploité au-dessus du territoire d'un autre État sans autorisation appropriée de cet État (article 2.2 de l'appendice 5 de l'annexe 2 à la Convention).

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

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)

¹ 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

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

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

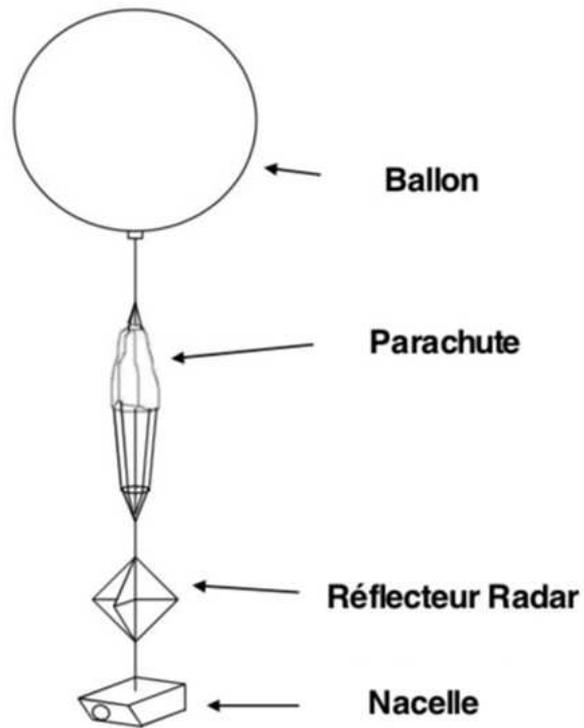
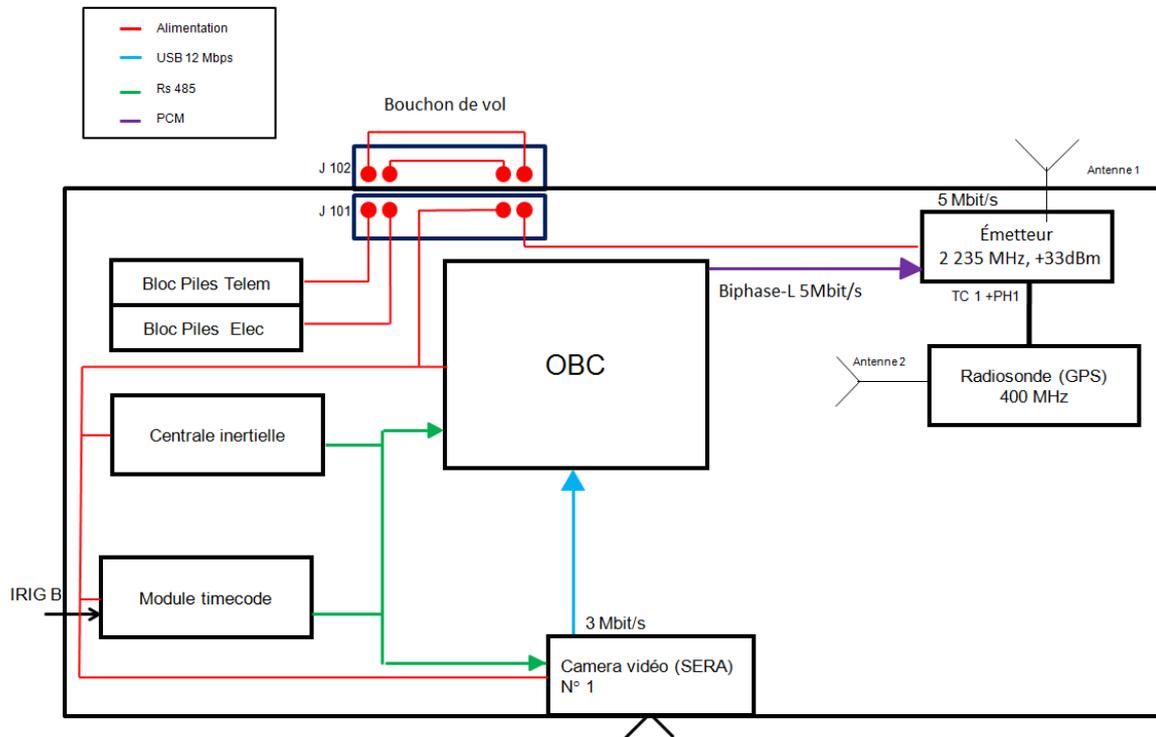


Schéma de la chaîne de vol

2.2 EXPÉRIENCE EMBARQUÉE

2.2.1 Synoptique de la nacelle



Synoptique 1.7

8/07/2018



L'intérieur de la nacelle (Photo GAREF PARIS)

2.2.2 Module vidéo SERA4 (GP1530F801-1.0, Serial No 5)

La fonction du module vidéo des fusées SERA est d'acquérir, sur une mémoire flash, une vidéo du vol en double qualité (1080p30 et 720p30) et de retransmettre en temps réel au sol la vidéo basse qualité (720p30). Cette transmission vidéo vers le sol nécessite une bande passante de 2 Mbps sur les 5 Mbps disponibles, et ce, durant toute la durée de vol du ballon. La version logicielle est la 4.0.4.

Caractéristiques :

Mécaniques	Électriques	Vidéo
Poids : 140 g	Alimentation : 9-36 V	Résolution capteur : 5 Mpx OmniVision OV55647
Dimensions boîtier T1 ² : 100 mm x 105 mm x 22 mm	Consommation : 1,8 W	Mode 2 flux: 1080p30 et 720p30

2.2.3 Ordinateur de bord OBC GAREF (GD1112S801-2.0, Serial No 50)

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 aussi découpé en trames pour être envoyé, si la bande passante le permet.

Le programme de vol intègre également des algorithmes de calcul de trajectoire utilisant les données d'accélération et de giration envoyées via l'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	~ 330 g
Boîtier Taille 2 (norme GAREF)	100 mm x 105 mm x 44 mm

Caractéristiques électriques	
Alimentation	9-36 V
Puissance consommée	4,05 W

² Norme GAREF

2.2.4 Module télémessure/antenne

Le module télémessure/antenne est composé d'une antenne et d'un émetteur de télémessure.

L'émetteur de télémessure est le suivant :

Caractéristiques		
Mécaniques	Électriques	Électromagnétiques
Poids : 57 g	Alimentation : 12 V +4,5 / -1,5 VDC	Fréquence d'émission : 2 200,5 MHz à 2 299,5 MHz par incrément de 0,5 MHz Réglé à 2 235 MHz Réf GAREF : 18020101
Dimensions : 95 mm x 107,8 mm 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

L'antenne d'émission choisie sera :

Caractéristiques	
Mécaniques	Électromagnétiques
Poids : 110 g	HUBER SUHNER, Polarisation circulaire droite Fréquence d'émission : 2 100 à 2 300 MHz
Dimensions : 95 mm x 107,8 mm x 32 mm	Gain : 8 dBi
	Impédance: 50 Ohm

Dans le but de dissiper les 6 W de perte thermique de l'émetteur télémessure, nous utiliserons une plaque en aluminium noire anodisée. Ce matériau a été choisi en raison de son faible poids et de son émissivité reportée élevée (0,82). Pour calculer la surface nécessaire d'aluminium noire anodisée, nous avons utilisé la loi de Stefan-Boltzmann :

$$M = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

M : émittance énergétique du corps ($W \cdot m^{-2}$)

ϵ : émissivité reportée du corps

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,670\ 367 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

T : température du corps en kelvin (K)

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 **0,01 m²**. L'émetteur de télémessure a été vissé à la plaque d'aluminium, et entre les deux éléments, afin de garantir un transfert thermique optimal, une pâte thermique a été placée, de la marque Dow Corning (T300T040).

La plaque d'aluminium aura finalement une surface de **0,2 m²** et comportera en 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 ci-dessous).



DESIGNED BY:	GAREF		gravure plaque Ballon
DATE:	10/06/2018		
CHECKED BY:	BS		GAREF AEROSPATIAL
DATE:	XXX		
SIZE:	A3		
SCALE:	1:1	WEIGHT (KG): 0,04	DRAWING NUMBER: GM1816E118-1.0
			SHEET: 1/1

2.2.5 Timecode (GP0916M802-3.0, Serial No 37)

La fonction du module Timecode du GAREF est de fournir une date (UTC) commune à tous les modules le nécessitant. Il est synchronisé avec les installations sol, selon la norme IRIG-B, jusqu'au décollage. Cela permet de dater les différentes mesures et événements survenant avec une date commune. Ainsi, il est possible de synchroniser ces mesures et ces événements entre eux, et avec les équipements de mesures restés au sol. Le timecode est diffusé au format BCD sur un bus RS485, avec une précision de 10 ms.

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

2.2.6 Alimentation électrique/Piles

Il a fallu 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 3 heures de vol).

L'électronique de mesure et l'émetteur sont alimentés avec deux blocs de piles différents. Chaque module électronique possédant un convertisseur DC/DC, il a été possible de n'utiliser qu'un seul bloc de piles pour l'ensemble de l'électronique de mesure. Cependant, il ne fallait pas dépasser la tension maximale que peuvent supporter ces convertisseurs, mais également leur fournir une tension suffisante pour leur fonctionnement. Il a donc fallu être très attentif à la tension à vide et en charge en tenant compte de la température.

Piles utilisées : Energizer réf L91 Type AA.

Diamètre : 14 mm. Longueur : 50 mm.

Masse : 14,3 g chacune.

Tension : 1,5 V en utilisation ; 1,7 V 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, le nombre de piles nécessaire pour chacun des deux blocs. Le bloc de l'émetteur comporte 9 piles et celui de la case électronique, 8.

2.3 RADIOSONDE

2.3.1 Utilisation

Afin de pallier une éventuelle impossibilité de transmettre les données de position GPS, indispensables 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, pouvant émettre dans une plage de fréquence allant de 400 à 406 MHz, ainsi qu'une station de réception dédiée (développée dans la partie 3.2).

La radiosonde est équipée de plusieurs capteurs, mais nous n'exploiterons que les données 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 Météomodem 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 406 MHz. (+23dBm (200mW))

2.3.2 Caractéristiques

Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques électriques
Poids : 150 g	Alimentation : batterie indépendante
Dimensions : 95 mm x 95 mm 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. On a ainsi accès à l'altitude du ballon.

Précision : meilleure que 10 mètres.

Les données ainsi acquises sont transmises par radio. La fréquence d'échantillonnage des mesures était de 1 Hz.

2.4 LOGICIELS AU SOL

2.4.1 Logiciel de réception des données en temps réel

Baptisé **DDP** (Dynamic Data Processing), il a été développé par le GAREF pour les premiers ballons HORUS, 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 GPIO de l'OBC, et la présence d'un flux 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 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 (3 octets). 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 afin de pouvoir effectuer des traitements spécifiques ultérieurement, mais également transmises sur le réseau local pour être affichées par la station sol AETNA située sur un autre PC. Cela rend ce logiciel indépendant du nombre et du type de modules présents, variant d'un projet à un autre, mais aussi de l'éventuel format de trame propre à chaque module, qui peut varier d'un module à un 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.

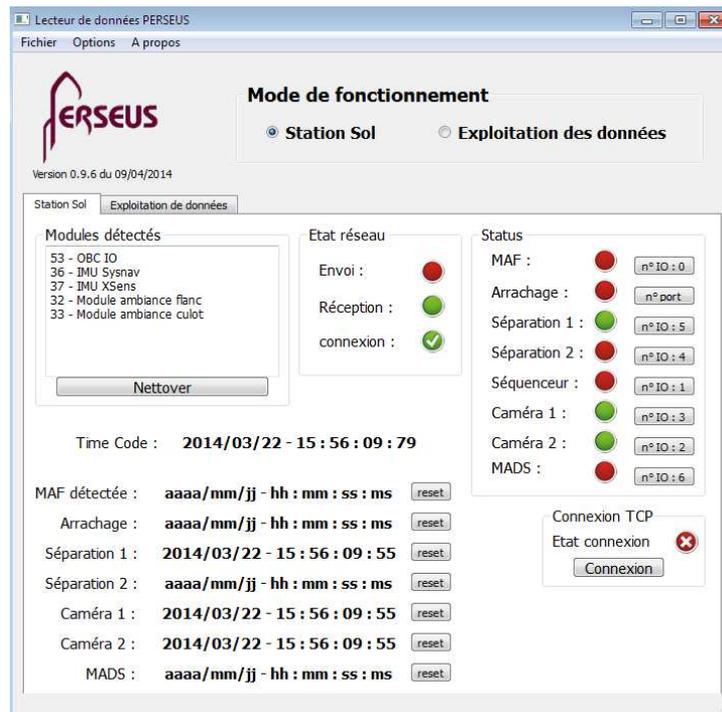
DDP dispose aussi d'un mode "REPLAY" permettant de relire des données brutes sauvegardées lors d'une réception précédente, en rejouant le traitement en accéléré.

2.4.2 Lecteur de données PERSEUS

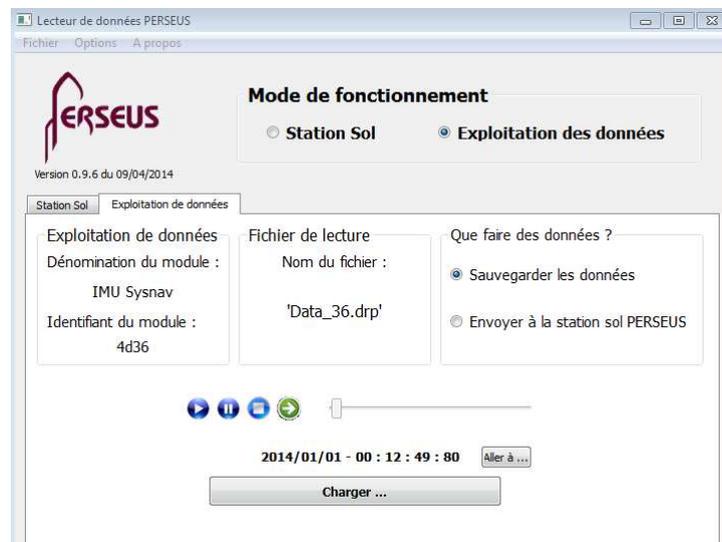
Le « lecteur de données PERSEUS » a été développé dans le cadre du projet AETNA du programme PERSEUS, programmé en Qt5/C++, et fonctionne sous Windows.

Il dispose de deux modes : « station sol » et « exploitation des données » :

- 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 (par exemple la conversion linéaire tirée des courbes d'étalonnage des capteurs), selon l'identifiant du module. Il crée de nouvelles trames qui contiennent les données décodées, puis les envoie en local au logiciel station sol AETNA qui se charge uniquement de les afficher.



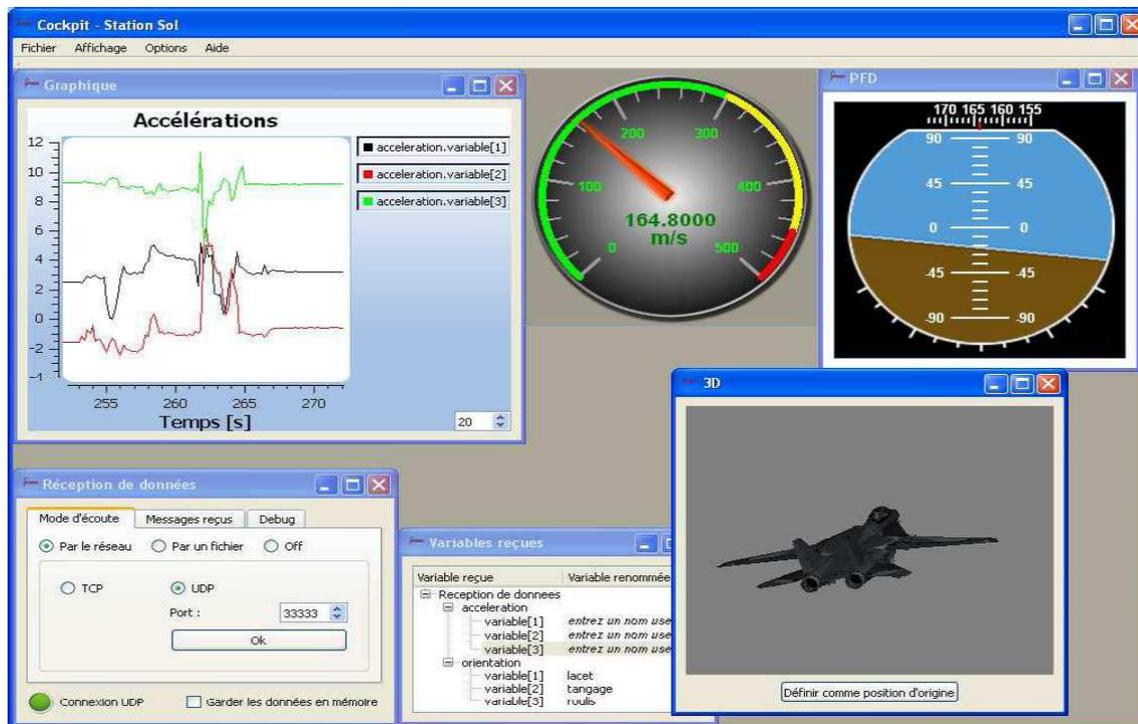
- En mode « exploitation des données », il prend directement en entrée un fichier de données de module généré par le logiciel DDP, et enregistre les données découpées et converties sous forme de tableaux au format CSV, exploitables sous Excel ou Matlab par la suite. C'est grâce à ce mode que l'on a produit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



2.4.3 Station Sol AETNA

Baptisée « **Hermès** », elle a été développée dans le cadre du projet AETNA du programme PERSEUS, programmée en Qt5/C++, et fonctionne 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 affectée à un widget. Par exemple on peut afficher les accélérations de la centrale inertielle sous forme de courbes en fonction du temps (déterminées en utilisant le timecode de datation de la mesure), en quelques clics.

Le manque de données à cause de la mauvaise télémétrie 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 Météomodem, 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.

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 le 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** », (développé par GAREF) il a été programmé en Visual C++ 6.0 et fonctionne sous Windows 7. 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, et ainsi déterminer 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 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, ceci afin d'améliorer la précision du point d'atterrissage de la nacelle.

Nous avons fabriqué une carte numérique de la région par assemblage de captures d'écran du site Géoportail. Cette carte est utilisée par **Crystal** comme image de fond, sur laquelle se dessine la trajectoire, et facilite 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 afin d'orienter correctement l'antenne sol vers le ballon. Ce calcul s'appuie sur la position GPS de l'antenne et celle du ballon. Cette dernière était rentrée à la main d'après les données lues dans le logiciel EOSCAN.

Le pied d'antenne, pour rappel, est un pied de télescope motorisé disposant d'une interface pour entrer un angle et une élévation donnée, pour déplacer automatiquement l'antenne.

Section	DD (degrés décimaux)	DMS (degrés, minutes, secondes)	Altitude
STATION SOL	Latitude: 42.9369 Longitude: 0.1411	Latitude: 42° 56' 13\"	

Ce fonctionnement nécessite cependant un bon calibrage initial du pied, par rapport au Nord mais aussi de son horizontalité (à l'aide d'une boussole et d'un niveau à bulle par exemple). 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 orienter précisément l'antenne.

Le positionnement a donc dû être fait à la main de façon grossière, réduisant la qualité de réception à laquelle on pouvait s'attendre, et bien que l'antenne utilisée dispose d'un angle de réception assez important (30°), ces raisons sont insuffisantes pour expliquer la très mauvaise télémessure en bande S.

2.5 MÉCANIQUE DE LA NACELLE

La masse totale de la charge utile doit être inférieure à 1,6 kg, pour une masse surfacique inférieure à 13 g.cm⁻², en excluant les masses de l'enveloppe latex du ballon, du parachute, du 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 : ~20 km/h durant la montée, 50 km/h en moyenne durant la descente, mais surtout 180 km/h lors de la descente 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, 700 g/m² pour une épaisseur de 5 mm).

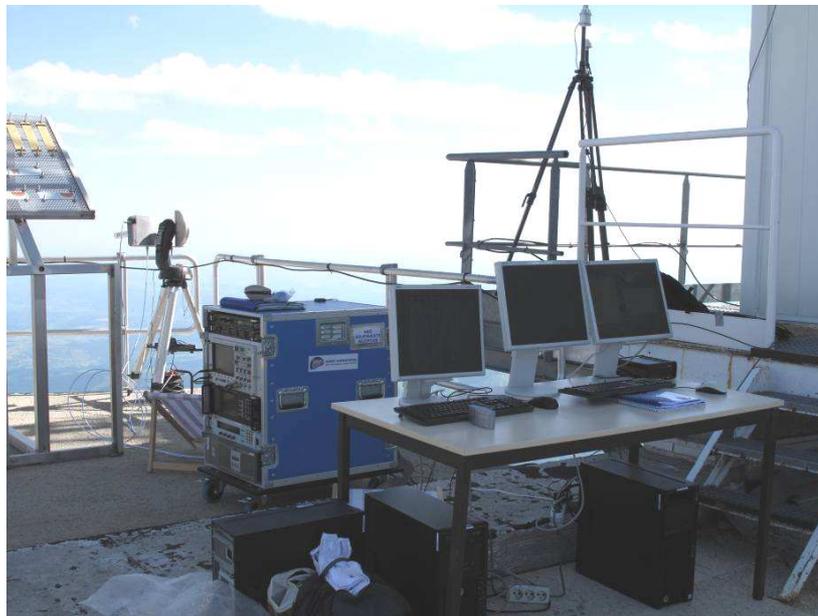
Les dimensions de la nacelle étaient donc au départ de 30 cm x 30 cm x 30 cm. En ce qui concerne la caméra, nous avons réalisé un socle spécial afin de la maintenir inclinée vers le bas, selon l'angle de vue désiré (+68° par rapport à l'horizontale). Ces dimensions n'étaient pas celles prévues, **mais 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 5 kg + le manchon de gonflage de 1,2 kg), 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 dédiée 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 ($42^{\circ}56'11''$ N, $0^{\circ}08'34''$ E) 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 parce qu'il correspond au point culminant de toute la région. Il atteint une altitude de 2 876 m, 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 télémessure 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.



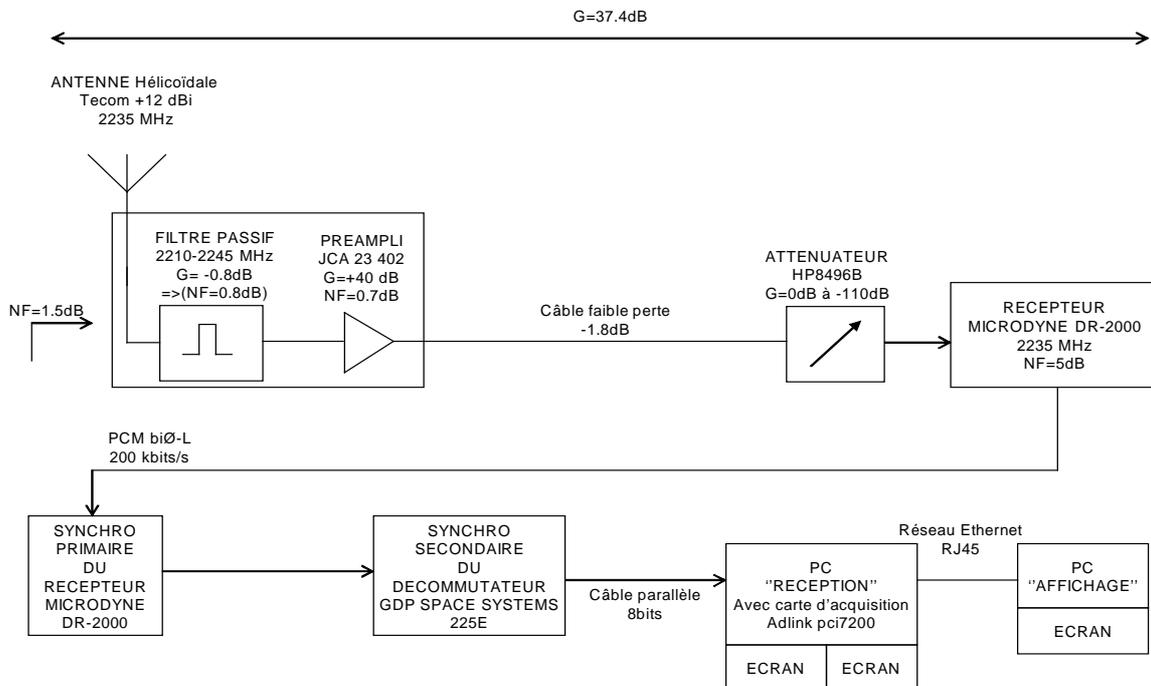
2.7.2 Station GAREF

La fréquence d'émission de l'émetteur est de 2 235 MHz, au format PCM Biphase-L, pour une puissance de 33 dBm, et a une bande passante de 12 MHz. Le calcul du bilan de liaison nous donne 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

2.7.3 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. Le calcul du bilan de liaison nous donne une portée utile >350km. On a à 350 km 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.

2.8 PRÉVISION 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 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, 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. (voir 2.7.2 et 2.7.3)

2.8.2 Principe du logiciel de prévision en temps réel

Voir 2.4.5

3. PROBLÈMES RENCONTRÉS / MODIFICATION DE L'EXPÉRIENCE

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 embarquées, nous avons pensé à 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 conforme aux Règles de l'air (voir 2.1.1), mais a été finalement refusée. Il nous a donc fallu modifier l'expérience la veille du lancement pour réaliser le lâcher d'HORUS 8 !

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 ont été retirés.

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

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

Pour convertir le signal analogique des capteurs de température, de pression ou encore la tension des piles en données numériques, nous devions utiliser un convertisseur analogique-numérique, ayant cinq voies de conversion, 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 nous ont permis de diminuer la consommation électrique du système, et donc de réduire le nombre de piles nécessaires (passage d'un bloc de 12 piles à 8 piles seulement), abaissant encore la masse de l'ensemble.

À l'origine, les dimensions de la nacelle étaient de 30 cm x 30 cm x 30 cm. Cependant, pour réduire davantage la masse de la nacelle, nous avons dû couper la nacelle en deux. Les dimensions finales étaient donc de 30 cm x 30 cm x 15 cm.

Finalement à la pesée, nous étions tout juste à la limite de 1 600 g.

4. DÉROULEMENT DE LA JOURNÉE DE LANCEMENT

06 h 00 : Réveil.

06 h 20 : Départ de l'hôtel pour le camp de Ger.

07 h 00 : Arrivée au camp de Ger pour déposer l'équipe sol

Départ de l'équipe de réception fixe et de l'équipe de récupération pour le pic du Midi.

08 h 30 : Arrivée au pic du Midi, installation et test du matériel.

09 h 00 : Préparation de la chaîne de vol par l'équipe sol.

11 h 30 : Départ de l'équipe de récupération pour le potentiel lieu d'atterrissage.

14 h 17 : Lancement du ballon (12 h 17 UTC).

16 h 45 : Récupération et arrêt de la nacelle.

18 h 35 : Arrivée des équipes de réception fixe et de récupération au camp de Ger.

20 h 10 : Départ du camp de Ger.

21 h 00 : Arrivée à l'hôtel à Pau.

5. DÉPOUILLEMENT ET RÉSULTATS 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 du ballon, sans respect des règles et sans confirmation de la station de réception. La datation ne s'est donc faite qu'en relatif.

Cependant, une synchronisation 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.

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

5.2 TÉLÉMESURE

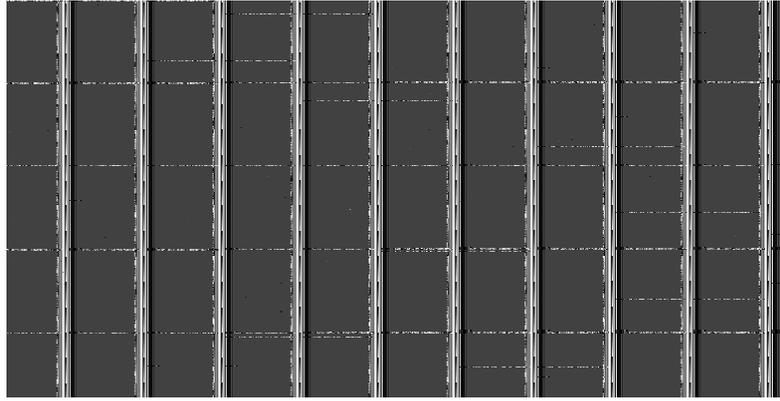
5.2.1 Qualité de réception

La télémesure a été extrêmement bruitée pendant tout le vol.

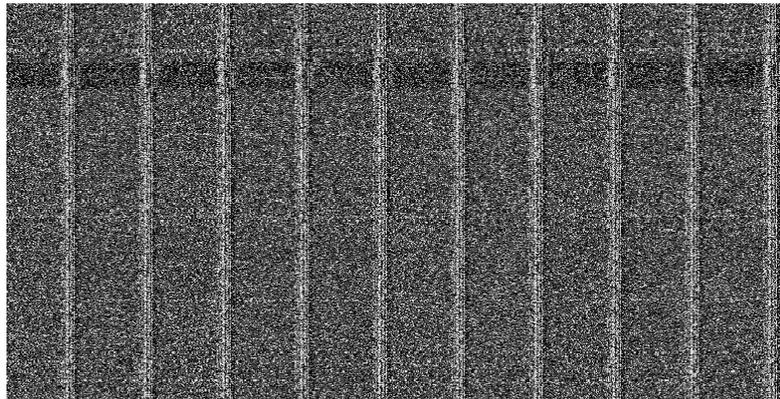
La 1^{ère} trame qui a pu être décodée a été reçue à T0 + 9 min 30 s (donc déjà 6 min après le décollage, à une altitude GPS de 2 400 m), et il n'y a quasiment pas eu de réception avant T0 + 22 min (altitude GPS 6 700 m).

Pour rappel, l'altitude GPS du sol au décollage était de ~400 mètres.

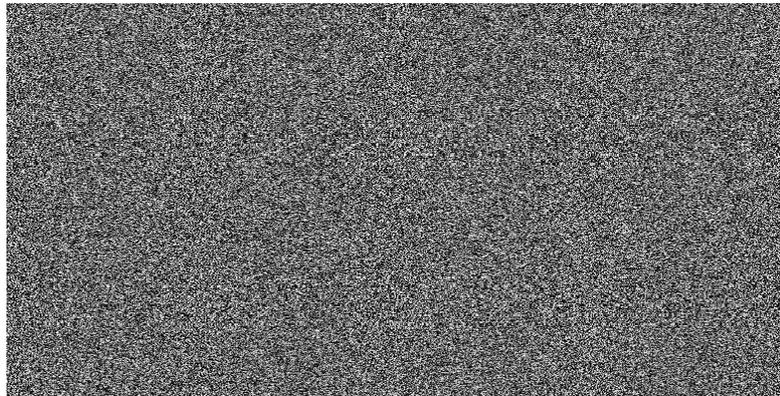
Une analyse graphique des données brutes (qui sont stockées avant tout traitement) montre que la télémesure était bien présente tout le temps (depuis l'allumage) et contenait bien des données, mais elle était seulement trop bruitée pour être décodée. Cette analyse montre en plus des fluctuations périodiques 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'erreurs visibles : la puissance de 2 W a bien été mesurée au bolomètre à l'entrée de l'antenne d'émission comme prévu, le signal reçu semble 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 1 h 20 : il y a eu 480 000 trames de données par module (à 100 Hz) qui ont été envoyées (parmi environ 39 millions de trames au total, la plupart étant de remplissage).

Il a été décodé :

58 372 trames module GPIO, dont 0 faux OK

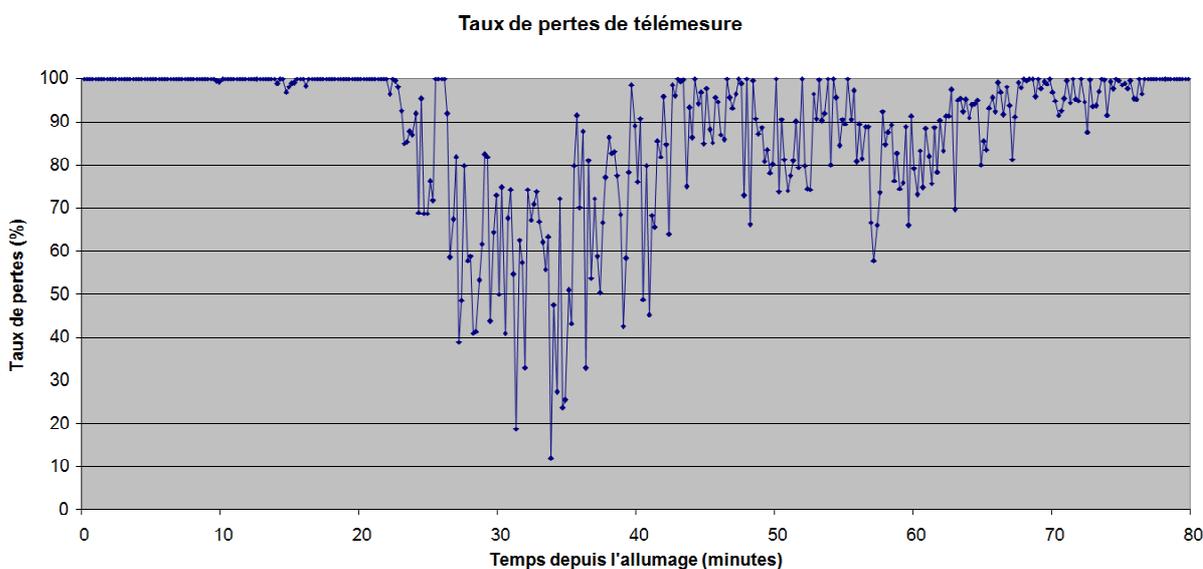
33 trames "module inconnu" (c'est-à-dire faux OK)

55 569 trames module 23 (calcul de trajectoire), dont 4 faux OK

54 687 trames module 46 (centrale inertielle), dont 4 faux OK

0 trames vidéo (la communication a été coupée avant la première réception)

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



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 + 22 min, on était déjà bien trop haut pour être gêné), et que les données étaient toujours bien 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 (24 octets). Cela ajoute un faible risque d'engendrer des faux OK (= tiers de trame avec 5 bits de faux ou plus, interprété 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 en basse qualité transmis à l'OBC pour être intégré aux données émises (34 Mo de données au total), l'autre en haute qualité enregistré sur une carte SD. La coupure de l'enregistrement s'est faite alors que la nacelle était encore au sol, avant la première réception télémétrie.

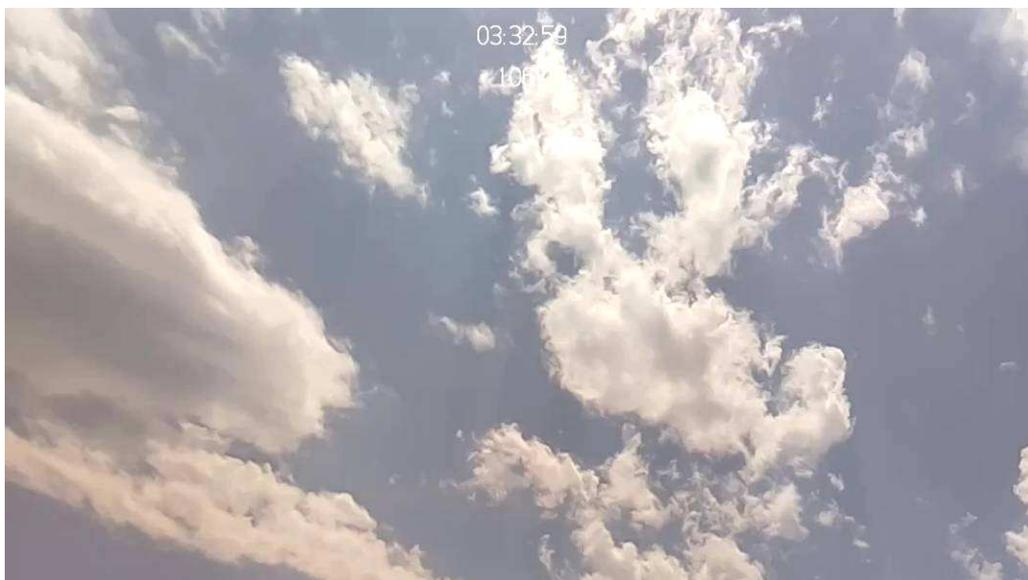


Image extraite (flux émis) alors que la nacelle était posée au sol, sur le côté

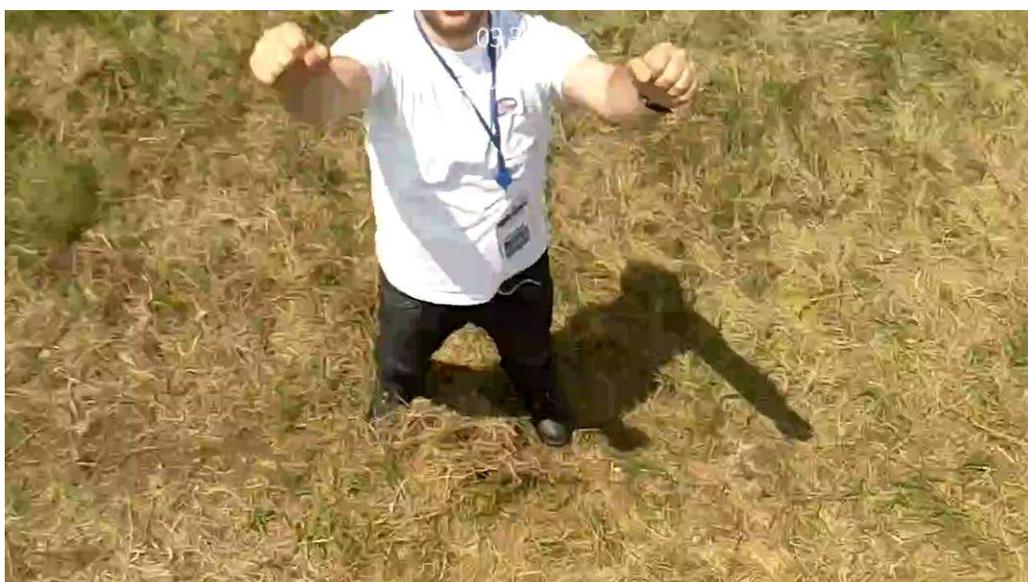


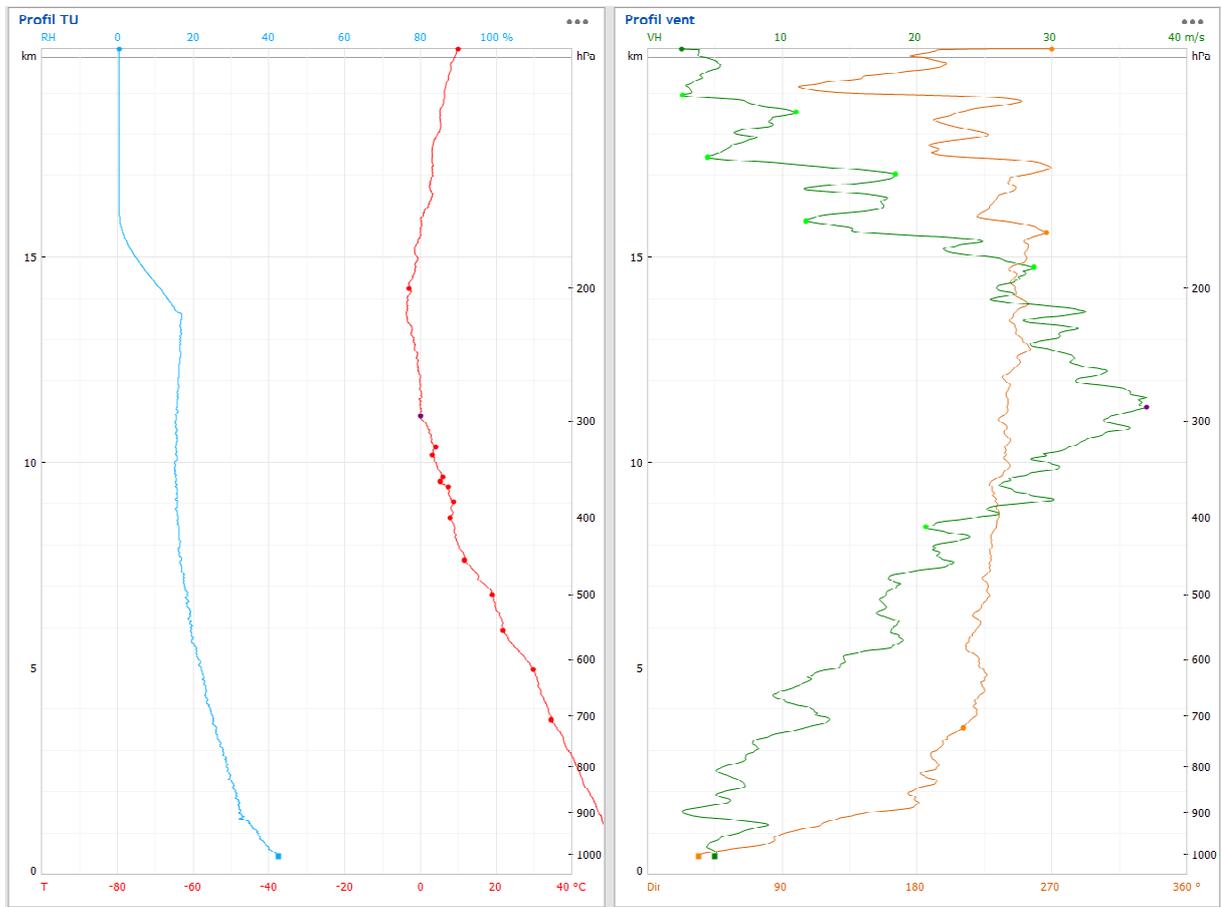
Image extraite (flux émis) alors que la nacelle était captive sous le ballon retenu par anneau

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

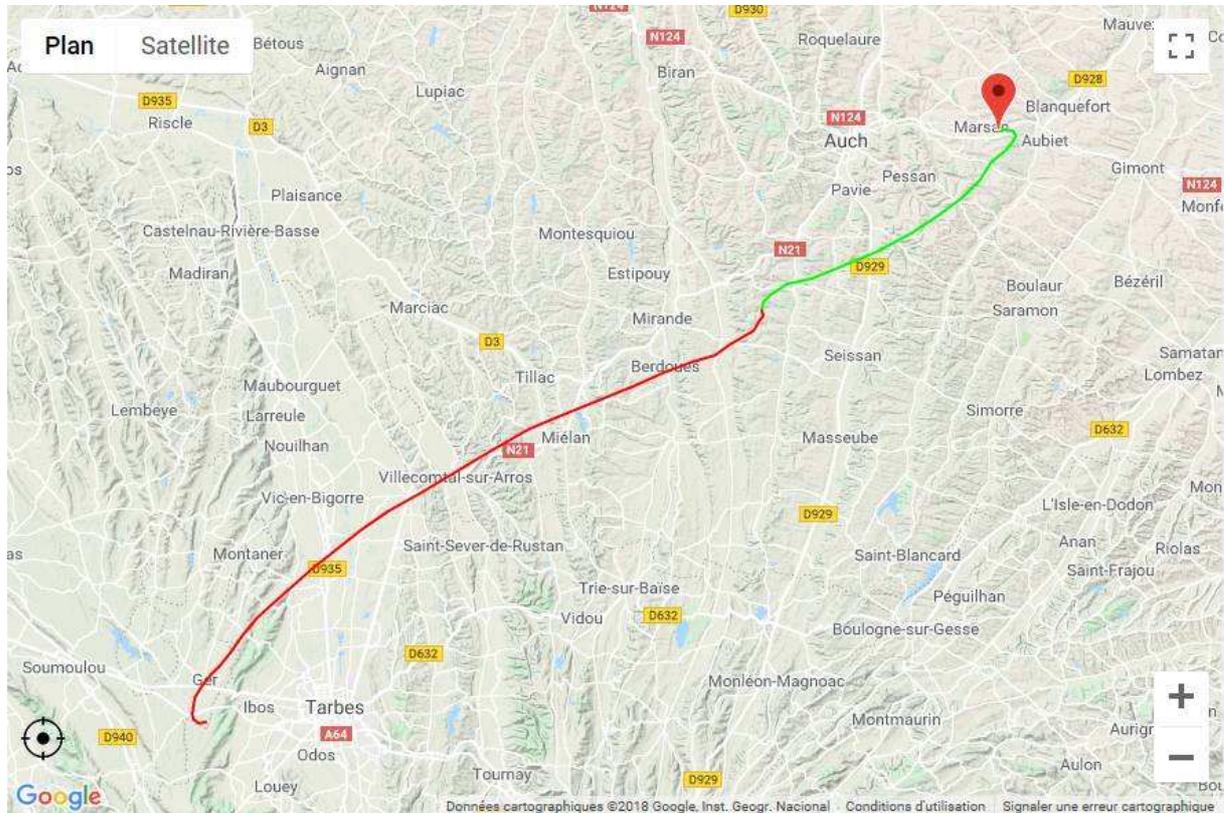
Les mesures de données météo ont correctement fonctionné, donnant des mesures conformes à ce qui était attendu dans les modèles standards d'atmosphères.

Ainsi, la température est passée par un minimum, négatif, vers 13 500 m, 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 130 km/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 (80 km) malgré un temps de vol très court (1 h 20).

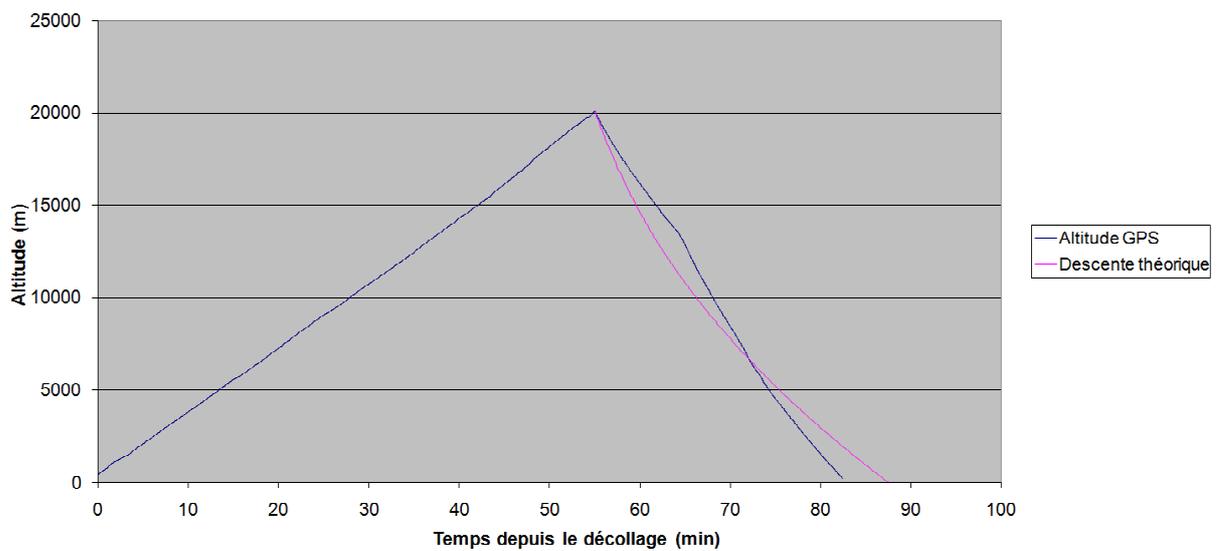
5.4.2 Données GPS

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



Trajectoire affichée dans le logiciel EOSCAN de la radiosonde

Altitude en fonction de temps de vol



La montée s'est effectuée à une vitesse constante de 5,9 m/s.

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

- La culmination s'est effectuée à seulement 20 000 m, au lieu de 30 000 m environ (l'enveloppe du ballon était probablement défectueuse et le ballon mal mis en œuvre).
- La courbe de descente sous parachute a une forme anormale, avec une nette inflexion (environ 64 min après le décollage), d'abord plus lente que la courbe théorique, puis plus rapide.

À la récupération, on a trouvé un ballon quasiment intact, seulement 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

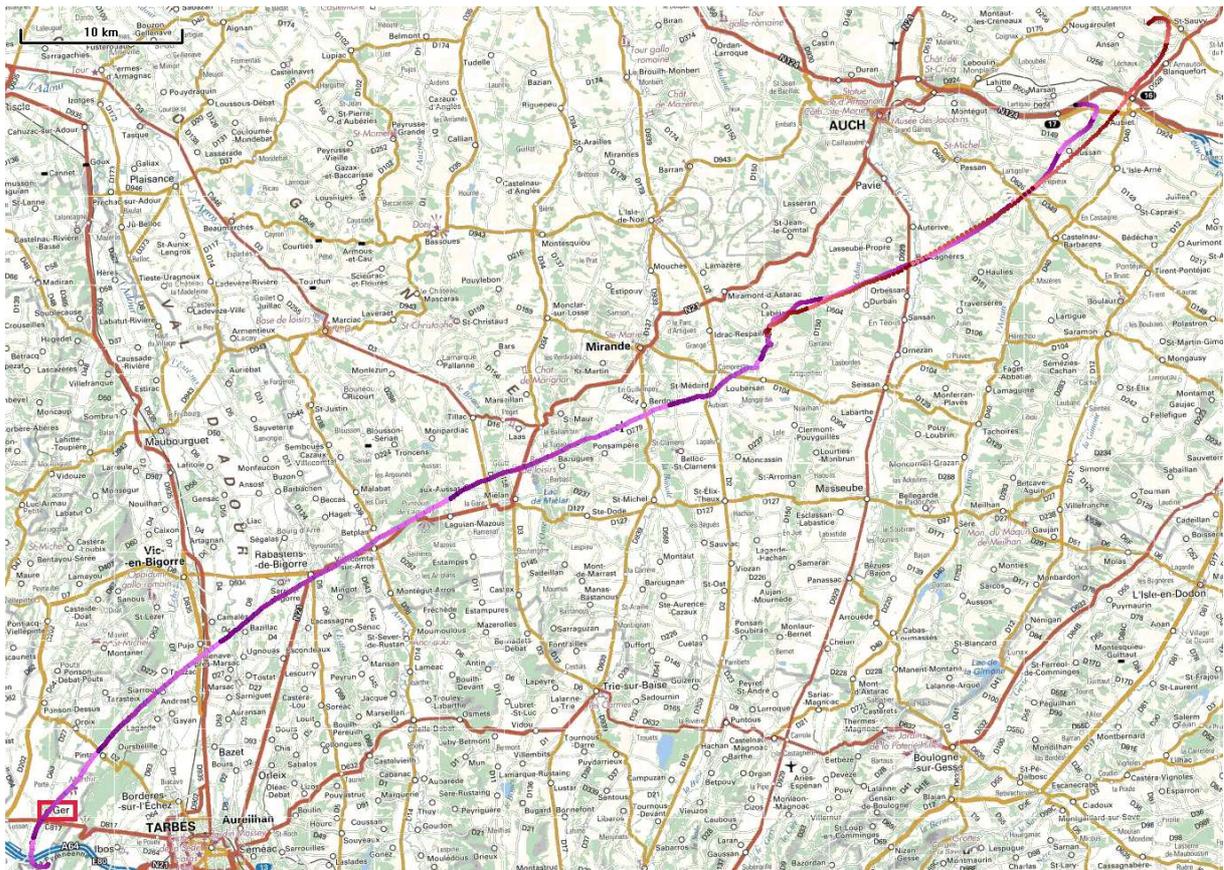
Le calcul de la trajectoire, par intégration des données d'accélération et de giration de la centrale inertielle, a été correctement déclenché par un appui du bouton « mise à feu » avant le lâcher (à $T_0 + 118$ s, vu sur les trames GPIO de l'OBC), mais la nacelle est restée captive avec le ballon retenu par anneau pendant qu'un fort vent secouait la nacelle et la rabattait sur le sol à plusieurs reprises... (voir courbes 5.7.1)

Le calcul a ainsi commencé 1 min 30 avant le lâcher réel, les altitudes et les vitesses sur les 3 axes (intégrées) du ballon étaient donc déjà complètement aberrantes (l'erreur est exponentielle) au moment du lâcher.

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

Une nacelle de ballon est finalement beaucoup trop secouée et tourne beaucoup trop sur elle-même pour qu'un calcul simple comme celui-ci donne des résultats exploitables. Il faudrait ajouter une stabilisation et des filtres. Finalement, ce 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 PRÉVISION 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 point de chute prévisionnel s'est précisé avec le temps puisqu'il a été recalculé en permanence à partir du dernier point connu, mais comme nous avons 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. L'équipe n'a donc pas eu besoin de revenir sur ses pas, évitant ainsi des déplacements inutiles, et s'est simplement rendue directement jusqu'au point d'atterrissage donné par le GPS de la radiosonde.

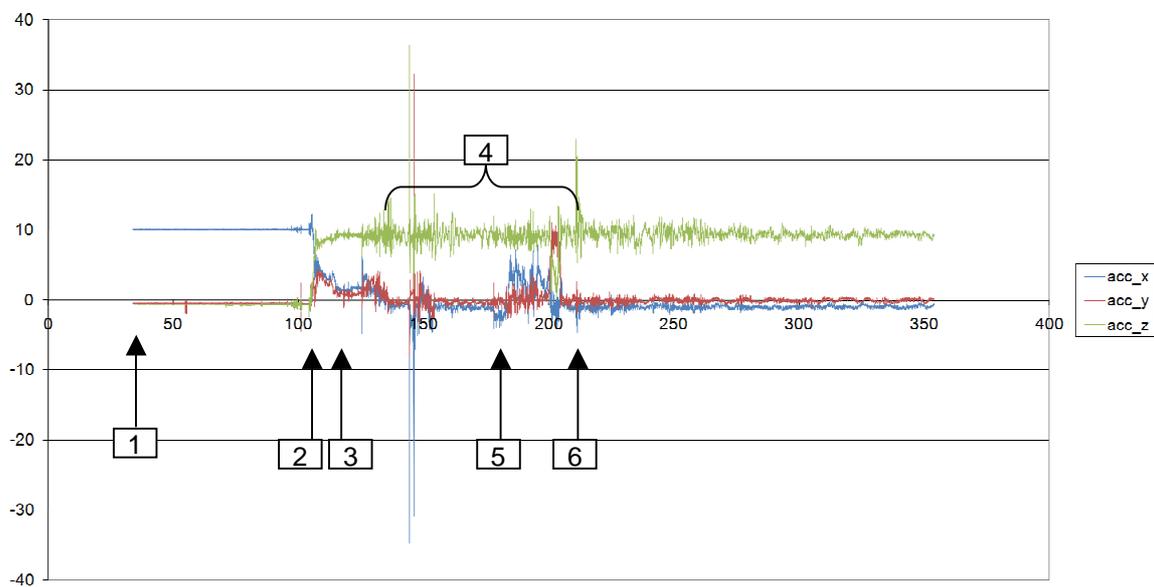
5.7 MODULE CENTRALE INERTIELLE

Rappel : l'axe Z est vertical vers le haut de la nacelle.

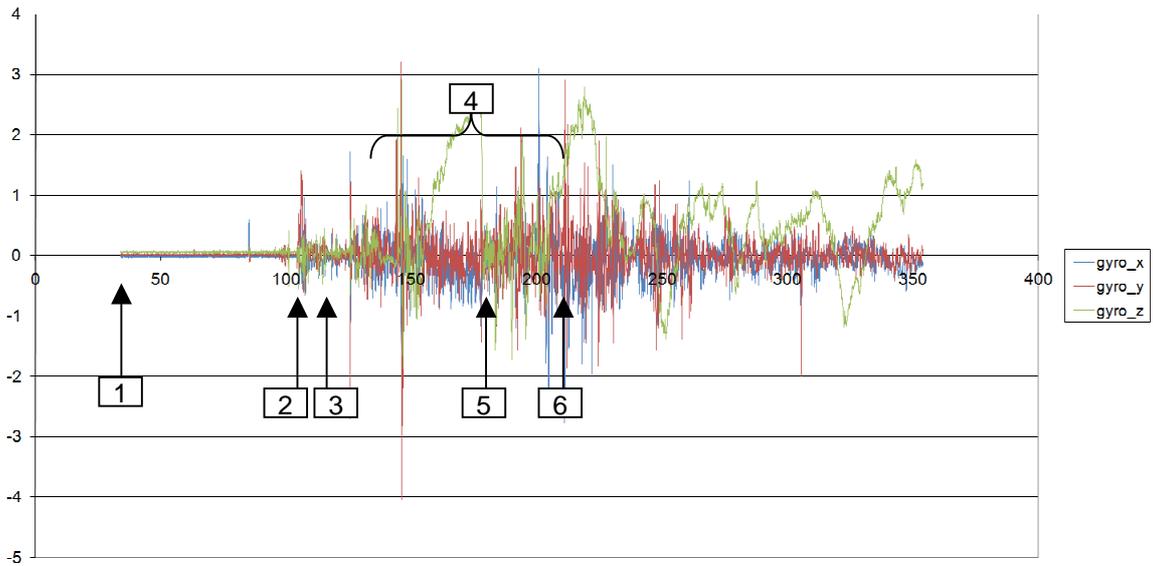
T0 correspond au lâcher du ballon. T0 = 12 h 17 min 32 s UTC

5.7.1 Zoom sur lâcher

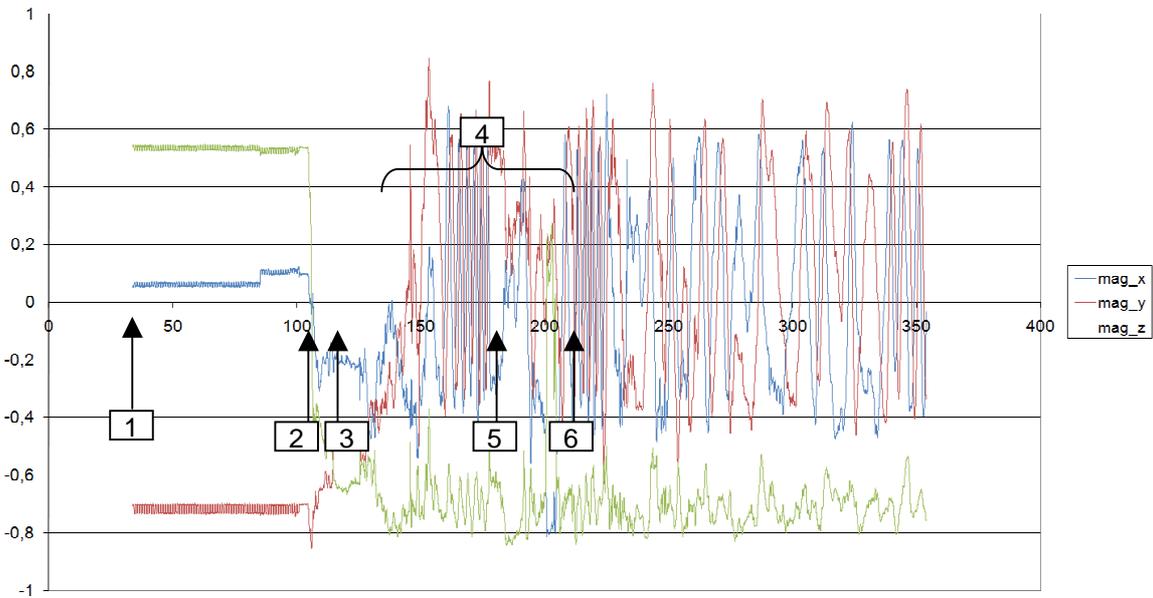
Marqueur	Évènement	T0 + (secondes)
1	Début des données	34
2	Prise de la nacelle en main	105
3	Appui bouton "mise à feu" (début calcul de trajectoire)	118
4	Nacelle lâchée captive, sous anneau, secouée et rebondissant au sol	136 à 210
5	Coupure vidéo	178
6	Lâcher	210



Accélérations en $m.s^{-2}$



Vitesses de rotation en rad.s^{-1}

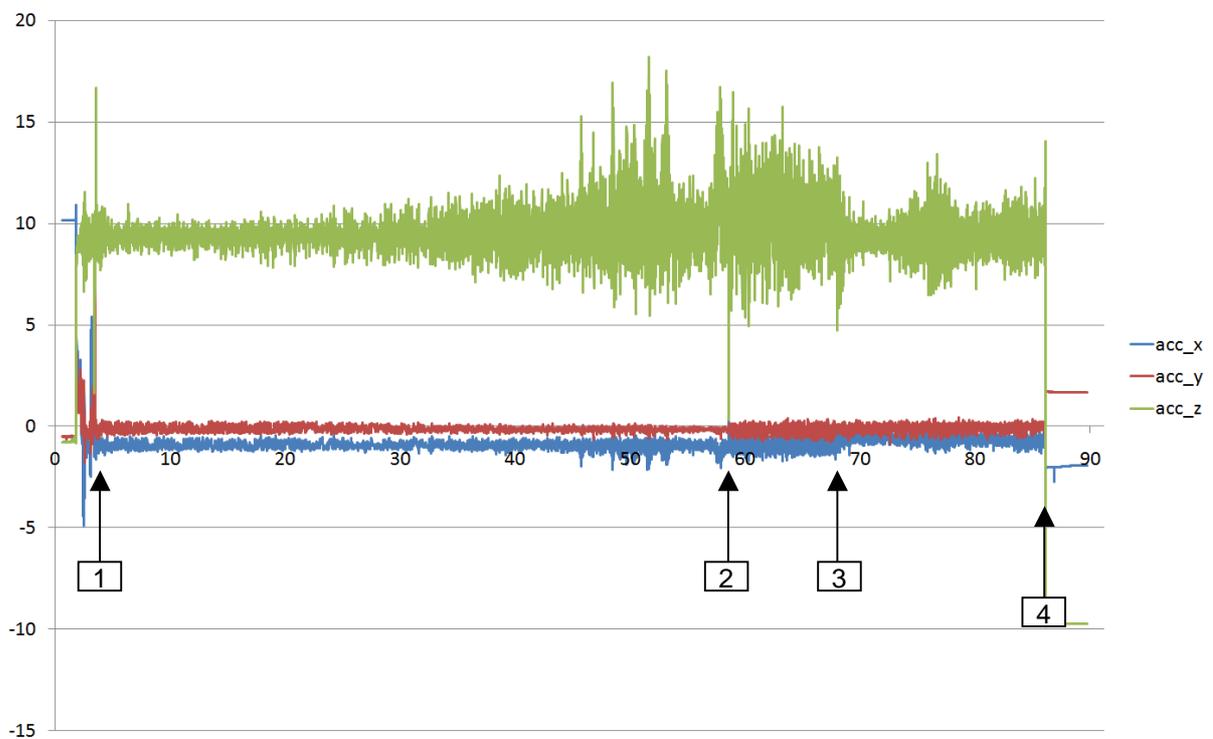


Magnétomètres en champs terrestres

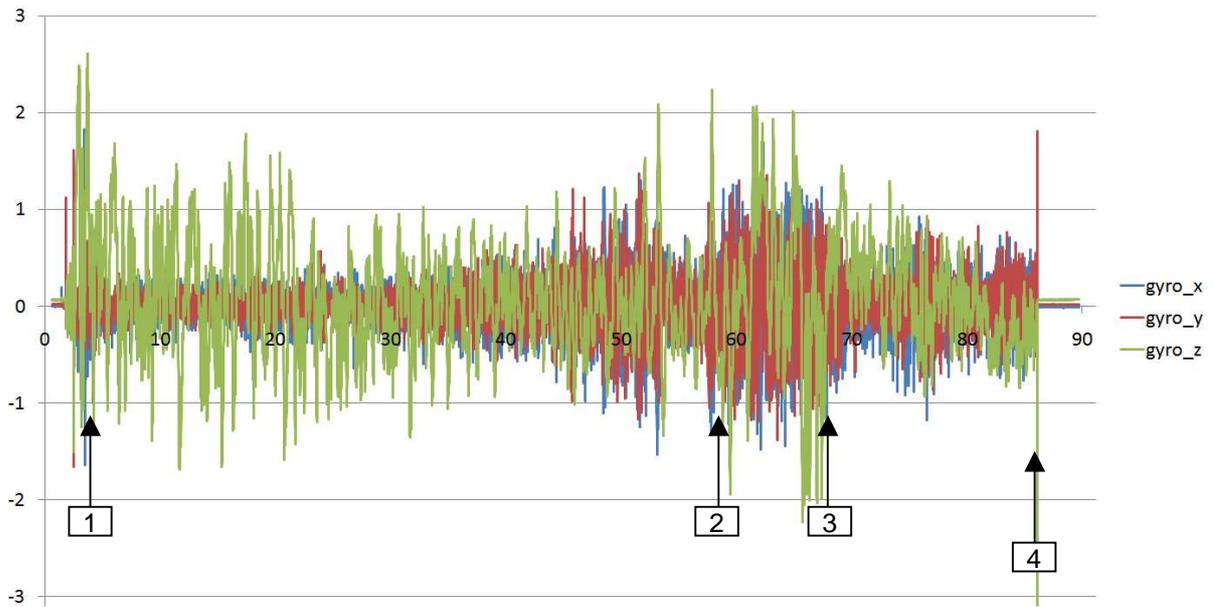
Les données sont bien cohérentes avec les vidéos prises pendant le lâcher, et on observe bien les nombreuses secousses et rotations rendant le calcul de trajectoire par intégration inutilisable.

5.7.2 Vol complet

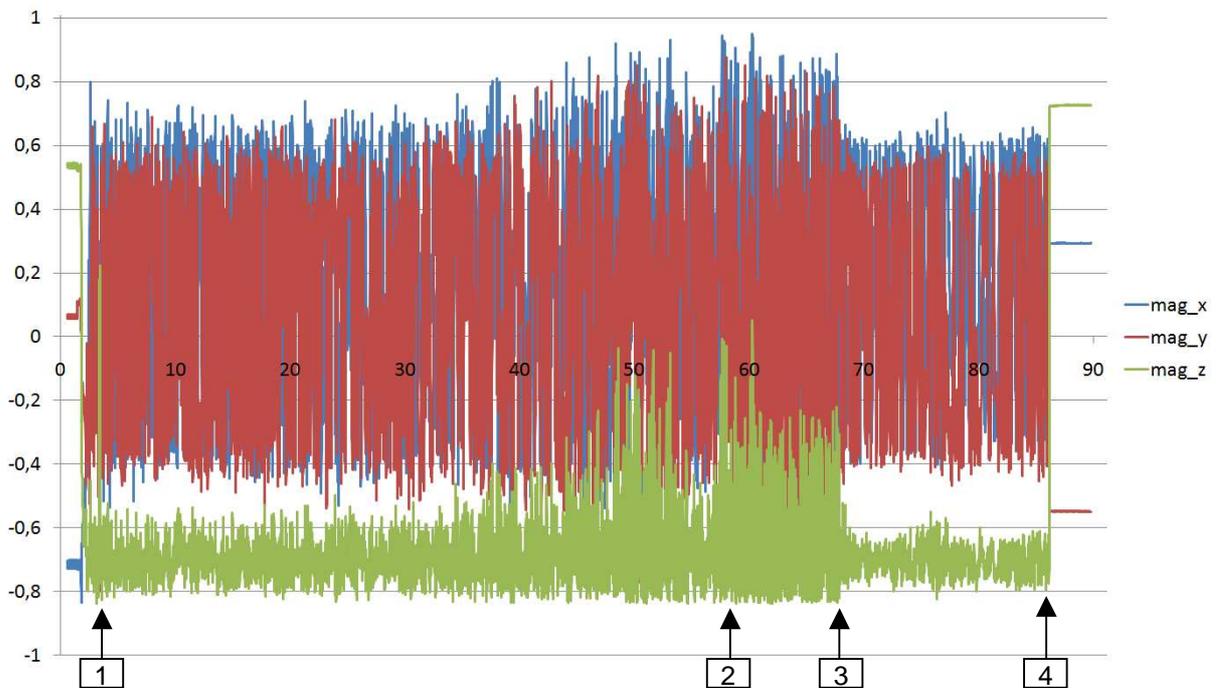
Marqueur	Évènement	T0 + (minutes)
1	Lâcher	3,5
2	Culmination	58,5
3	Inflexion courbe de descente	67,5
4	Atterrissage	86



Accélérations en $m.s^{-2}$



Vitesses de rotation en rad.s^{-1}



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 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 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 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 SERA4.

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 durant toute la durée d'un vol de ballon, mais cette dérive ne poserait 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, 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.
- Le général **Henry de Roquefeuil**, conseiller militaire auprès du président du CNES, qui a permis l'utilisation de la télémesure 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.