

Agence spatiale canadienne

PRISM pour Stratos **Strato-Science 2018 Analyse des données de** **téléométrie après le lancement de Nimbus-5**



Première version

Février 2019

Tous les droits de propriété sur les renseignements de base sont et doivent rester la propriété de l'État. Tous les droits de propriété intellectuelle sur les renseignements originaux doivent, dès la conception, le développement, la mise en pratique ou la production, être attribués à l'État et rester sa propriété. Il est interdit de divulguer des renseignements de base ou des renseignements originaux, en tout ou en partie, sans l'autorisation écrite préalable de l'État.

Page laissée presque blanche intentionnellement



HISTORIQUE DES RÉVISIONS

Rév.	Description	Date
Initiale	Initiale	2019-02-14



Page laissée presque blanche intentionnellement



TABLE DES MATIÈRES

	PAGE
CSA-STRATOS-RPT-0093	I
AGENCE SPATIALE CANADIENNE	I
PRISM POUR STRATOS	I
STRATO-SCIENCE 2018 ANALYSE DES DONNÉES DE TÉLÉMÉTRIE APRÈS LE LANCEMENT DE NIMBUS-5	I
.....	I
PREMIÈRE VERSION	I
FÉVRIER 2019	I
HISTORIQUE DES RÉVISIONS	3
TABLE DES MATIÈRES.....	4
LISTE DES FIGURES.....	6
1 INTRODUCTION.....	8
1.1 APERÇU DU DOCUMENT	8
1.1.1 <i>Acronymes et sigles</i>	8
1.1.2 <i>Dictionnaire</i>	8
1.1.3 <i>Documents applicables</i>	8
1.1.4 <i>Documents de référence</i>	9
1.1.5 <i>Convention</i>	9
1.2 APERÇU DU SYSTÈME.....	9
1.3 CHRONOLOGIE DE VOL.....	11
1.4 FICHIERS DE DONNÉES	12
2 SPÉCIFICATIONS DES SOURCES DE DONNÉES	13
2.1 APERÇU.....	13
2.2 SPÉCIFICATIONS DES CAPTEURS	15
2.2.1 <i>GPS1</i>	15
2.2.2 <i>GPS2</i>	15
2.2.3 <i>GPS3</i>	16
2.2.4 <i>CAM1 et CAM2</i>	16
2.2.5 <i>SHOCK1</i>	17
2.2.6 <i>ACC1</i>	17
2.2.7 <i>ACC2</i>	17
2.2.8 <i>ACC3</i>	18
2.2.9 <i>AD1</i>	18
2.2.10 <i>HUMID1</i>	19
2.2.11 <i>PRESS1</i>	19
2.2.12 <i>PRESS2</i>	19
2.2.13 <i>PRESS3</i>	20
2.2.14 <i>TEMP1</i>	20
2.2.15 <i>TEMP2</i>	20
2.2.16 <i>MAG1</i>	21
2.2.17 <i>MAG2</i>	21
2.2.18 <i>MAG3</i>	21
2.2.19 <i>GYRO1</i>	22
2.2.20 <i>GYRO2</i>	22
2.2.21 <i>GYRO3</i>	23



3	SOUS-SYSTÈME DE COMMANDE ET DE TRAITEMENT DES DONNÉES	24
3.1	INTRODUCTION	24
3.2	EMPLACEMENT DES DONNÉES	24
3.3	DONNÉES DE SERVITUDE.....	24
3.4	DONNÉES DE LOCALISATION	26
3.5	IMAGERIE.....	30
3.5.1	<i>Modifications des paramètres d'imagerie.....</i>	<i>30</i>
3.5.2	<i>Images</i>	<i>31</i>
4	SOUS-SYSTÈMES DE NAVIGATION ET DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT	34
4.1	INTRODUCTION	34
4.2	EMPLACEMENT DES DONNÉES	34
4.3	DONNÉES DE SERVITUDE.....	34
4.4	TÉLÉMÉTRIE DU LOGICIEL DE NAVIGATION.....	37
4.4.1	<i>Données de localisation</i>	<i>37</i>
4.4.2	<i>Données d'attitude</i>	<i>38</i>
4.4.3	<i>Données cinématiques, dynamiques et environnementales.....</i>	<i>43</i>
4.4.4	<i>Direction solaire.....</i>	<i>46</i>
4.5	TÉLÉMÉTRIE LOGICIELLE DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT.....	50
4.5.1	<i>Température, pression et humidité.....</i>	<i>50</i>
5	MESURES DES MAGNÉTOMÈTRES.....	54
5.1	INTRODUCTION	54
5.2	DONNÉES DU MAGNÉTOMÈTRE (MAG1) PROVENANT DE L'IMU 3DM-GX5-45	54
5.3	DONNÉES DU MAGNÉTOMÈTRE (MAG2) PROVENANT DE L'IMU LSM9DS1	55
5.4	DONNÉES DU MAGNÉTOMÈTRE MPU9250.....	57
6	SOUS-SYSTÈME DU CONTRÔLEUR E/S.....	59
6.1	INTRODUCTION	59
6.2	EMPLACEMENT DES DONNÉES	59
6.3	DONNÉES DE SURVEILLANCE DE L'ALIMENTATION EMBARQUÉE.....	59

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SCHÉMA D'UN SYSTÈME DE BALLON À HAUTE ALTITUDE DU CNES.....	11
FIGURE 2 : PROFIL DE VOL DE NIMBUS-5 (ENSEMBLE DE DONNÉES DU CNES).....	12
FIGURE 3 : PRINCIPAL TEMPS DE PROPAGATION DU C&DH – INTERVALLE DE TEMPS ALÉATOIRE EN VOL	25
FIGURE 4 : MÉMOIRE LIBRE DE C&DH (MO) – DURÉE COMPLÈTE	25
FIGURE 5 : TEMPÉRATURE DE LA CPU DU C&DH EN DEGRÉS CELSIUS – DURÉE COMPLÈTE	26
FIGURE 6 : GPS01 : ALTITUDE DE LA NACELLE (EN MÈTRES) – DURÉE COMPLÈTE	27
FIGURE 7 : GPS01 : VARIATIONS DE L'ALTITUDE DE LA NACELLE AU LEVER DU SOLEIL (PLAGE DE TEMPS DE 30 MIN).....	27
FIGURE 8 : GPS01 : LONGITUDE DE LA NACELLE – DURÉE COMPLÈTE	28
FIGURE 9 : LATITUDE DE LA NACELLE – DURÉE COMPLÈTE.....	28
FIGURE 10 : GPS01 : NOMBRE DE SATELLITES UTILISÉS DANS LA SOLUTION – DURÉE COMPLÈTE.....	29
FIGURE 11 : GPS01 : DILUTION HORIZONTALE DE LA PRÉCISION (HDOP) – DURÉE COMPLÈTE.....	29
FIGURE 12 : EXEMPLE D'UNE IMAGE DE LA CAM1 (POINTANT VERS LE NADIR)	32
FIGURE 13 : EXEMPLE D'UNE IMAGE DE LA CAM2 (POINTANT VERS L'HORIZON).....	33
FIGURE 14 : UTILISATION DE LA CPU DU NAVEM – DURÉE COMPLÈTE.....	35
FIGURE 15 : MÉMOIRE LIBRE DE L'ORDINATEUR DU NAVEM (MO) – DURÉE COMPLÈTE	35
FIGURE 16 : TEMPÉRATURE DE LA CPU DU NAVEM (°C) – DURÉE COMPLÈTE.....	36



FIGURE 17 : POSITION DE LA NACELLE, SELON LES INDICATIONS DE SWNAV – DURÉE COMPLÈTE	37
FIGURE 18 : NACELLE EN COURS DE PRÉPARATION POUR UN VOL.....	38
FIGURE 19 : SYSTÈME DE COORDONNÉES DE LA NACELLE.....	39
FIGURE 20 : NAVEM : ESTIMATION DU CAP VRAI DE LA NACELLE – DURÉE COMPLÈTE DE VOL	40
FIGURE 21 : NAVEM : ESTIMATION DU CAP VRAI ET ALTITUDE DE LA NACELLE – PÉRIODE D’ASCENSION	40
FIGURE 22 : NAVEM : ESTIMATION DU CAP VRAI ET ALTITUDE DE LA NACELLE – PÉRIODE POST-ASCENSION	41
FIGURE 23 : SWNAV : ESTIMATIONS DU ROULIS ET DU TANGAGE DE LA NACELLE ET ÉTAT DU FILTRE – DURÉE COMPLÈTE	42
FIGURE 24 : SWNAV : ROULIS ET TANGAGE DE LA NACELLE – AGRANDISSEMENT DE LA PÉRIODE DE LEVER DU SOLEIL.....	43
FIGURE 25 : SWNAV : VITESSE NED ESTIMÉE DE LA NACELLE ET DRAPEAU DE VALIDITÉ.....	44
FIGURE 26 : SWNAV : VITESSE NED DE LA NACELLE – AGRANDISSEMENT DE LA PÉRIODE AUTOUR DU LEVER DU SOLEIL.....	44
FIGURE 27 : SWNAV : VITESSES ANGULAIRES DE LA NACELLE DANS LES AXES X, Y, Z EN DEGRÉS/S – DURÉE COMPLÈTE	45
FIGURE 28 : SWNAV : ACCÉLÉRATION LINÉAIRE DE LA NACELLE DANS LES AXES X, Y, Z – DURÉE COMPLÈTE	46
FIGURE 29 : VUE DE L’HORIZON À 10:03:24.....	47
FIGURE 30 : VUE DE L’HORIZON À 10:06:16.....	47
FIGURE 31 : VUE DE L’HORIZON À 10:08:26.....	48
FIGURE 32 : VUE DE L’HORIZON À 10:10:56.....	48
FIGURE 33 : SWNAV : HAUTEUR DU SOLEIL POUR UN OBSERVATEUR AU NIVEAU DE LA MER – DURÉE COMPLÈTE	49
FIGURE 34 : SURVEILLANCE DE LA TEMPÉRATURE PAR LE SWEM – DURÉE COMPLÈTE	50
FIGURE 35 : SURVEILLANCE DE L’HUMIDITÉ RELATIVE PAR LE SWEM – DURÉE COMPLÈTE	51
FIGURE 36 : SWEM : PRESSION BAROMÉTRIQUE (HPA) – 30 MINUTES AU LEVER DU SOLEIL	53
FIGURE 37 : AMPLITUDE DU CHAMP MAGNÉTIQUE MESURÉ PAR MAG1 ET DU CHAMP MAGNÉTIQUE CALCULÉ SELON LE WMM.....	55
FIGURE 38 : CHAMP MAGNÉTIQUE MESURÉ PAR MAG2.....	56
FIGURE 39 : IOCTL : SURVEILLANCE DE LA TENSION DE SORTIE DES CONVERTISSEURS C.C./C.C. – DURÉE COMPLÈTE	59



1 INTRODUCTION

1.1 APERÇU DU DOCUMENT

La Campagne Strato-Science 2018 a eu lieu à Timmins (Ontario, Canada) en août 2018. Le PRISM, un système construit par l'ASC pour supporter l'utilisation des charges utiles scientifiques du ballon stratosphérique, a été installé sur une nacelle CARMEN (du CNES) pour le vol Nimbus-5. Le vol a décollé à 23 h 20 (heure locale) le 26 août et a duré un peu plus de 11 heures (atterrissage à 10 h 37 le 27 août). La mission visait à lancer du matériel à une altitude d'environ 37 kilomètres, à mettre à l'essai différentes fonctionnalités et à observer les diverses données saisies pendant le vol. Le document présente et examine les données de télémétrie que les différents sous-systèmes ont recueillies pendant la mission. Les données obtenues seront présentées et analysées dans le document.

1.1.1 ACRONYMES ET SIGLES

Les acronymes et sigles suivants sont utilisés dans l'ensemble du présent document :

ASC	Agence spatiale canadienne
CNES	Centre national d'études spatiales (France)
COTS	Commercial sur étagère
CSA	Canadian Space Agency
GPS	Système mondial de localisation
PRISM	Interface de charge utile à distance, suite de capteurs et mémoire de masse
HTR	Horloge temps réel
SI	Système international d'unités
UTC	Temps universel coordonné

1.1.2 DICTIONNAIRE

CARMEN	Nacelle du ballon stratosphérique du CNES
u-blox	Un GPS utilisé pendant le vol pour recueillir et enregistrer des données
Novatel	Un GPS utilisé pendant le vol pour recueillir et enregistrer des données

1.1.3 DOCUMENTS APPLICABLES

N° de DA	N° de document	Titre du document	N° de rév.	Date
1.	TN2018-02-PRISM	Stratos PRISM TM/TC Interface Specifications – StratoScience 2018 Campaign	2	Janv. 2019
2.	TN2018-03-PRISM	Stratos PRISM Telemetry Definition – StratoScience 2018 Campaign	2	Janv. 2019



1.1.4 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

N° de DR	N° de document	Titre du document	N° de rév.	Date
1.	8400-0091 – LORD Microtrain	LORD Datasheet, 3DM®-GX5-45, GNSS-Aided Inertial Navigation System (GNSS/INS).	A	2016
2.	D21050 - NovAtel	NovAtel Receivers OEM729 Specifications	1	Sept. 2016
3.	UBX-15031086 - UBLOX	NEO-8M uBlox M8 Concurrent GNSS Modules – Datasheet	3	5 août 2016
4.	ADXL372 – Analog Devices	ADXL372 Data Sheet	B	2018
5.	025715 - ST	LSM9DS1 Data Sheet	3	2015
6.	PS-MPU-9250-A-01	InvenSense MPU-9250 Product Specifications	1.1	6 juin 2016
7.	19-0171-F – Digi International	Rabbit BL4S200 User Manual	F	2013
8.	BST-BME280-DS001-10	BME-280 Data Sheet	1.1	7 mai 2015
9.	DA5611-01BA01-006 – Measurements Specialities	MS5611-01BA01 Product Description	6	19 juill. 2011
10.	DS25095A	MCP9808 Product Description	A	08-02-2011

1.1.5 CONVENTION

Heure : À moins d'indication contraire, l'heure sera fournie en UTC. En général, le préfixe « Z » indique une heure en UTC. L'heure de vol locale (à Timmins, en Ontario, en août) était UTC – 4 h (p. ex. 2018-08-26 03:20:01Z était 2018-08-25 23:20:01 local).

Unités : À moins d'indication contraire, toutes les unités sont indiquées selon le Système international d'unités (SI).

1.2 APERÇU DU SYSTÈME

Les ballons stratosphériques servent à transporter des charges utiles dans la haute atmosphère aux fins de recherche scientifique et de démonstration technologique. De nombreux organismes ont la capacité de lancer des ballons, chacun ayant des caractéristiques de système particulières et différentes. La figure 1 est un exemple du système du Centre national d'études spatiales (CNES), qui se compose de deux parties : l'enveloppe et le train de vol. L'enveloppe comprend le ballon qui assure la capacité de levage et sa nacelle associée (NEV), qui fournit



des services de localisation pendant les activités de vol et de récupération. Le train de vol comporte deux nacelles, un parachute, des balises anticollision pour les aéronefs et un câble à deux fils. De plus, la nacelle de commandement et de contrôle (NSO) fournit des services de communication avec le sol pendant le vol et des services de localisation pendant les activités de vol et de récupération. La nacelle scientifique (NCU) transporte les charges utiles et peut aussi assurer, dans certains cas, des services de pointage, d'alimentation et de communication. Le câble à deux conducteurs sert de lien mécanique entre ces deux nacelles et procure une rigidité en torsion dans le sens vertical. Les balises anticollision pour les aéronefs sont des éléments de sécurité obligatoires pendant le vol et la descente, et le parachute permet un atterrissage en toute sécurité de la NCU et des charges utiles embarquées.

Même si certains instruments sont dotés de leurs propres capacités complètes de commande et de traitement des données, la grande majorité des charges utiles nécessiteraient que la nacelle hôte leur fournisse des services complémentaires de données et de gestion des données pour accomplir leurs missions, comme la télémessure, les télécommandes, la synchronisation de l'horloge, la datation, la localisation, les données sur l'attitude et l'environnement, les enregistrements, la mémoire de masse, etc. L'objectif du sous-système PRISM pour Stratos de l'ASC, intégré à la nacelle en tant que système générique de service de données, est de fournir des services comme la commande et le traitement des données, ainsi que la référence d'attitude et de cap, aux clients canadiens utilisant leurs instruments à bord de nacelles de l'ASC non munies de ces fonctions.



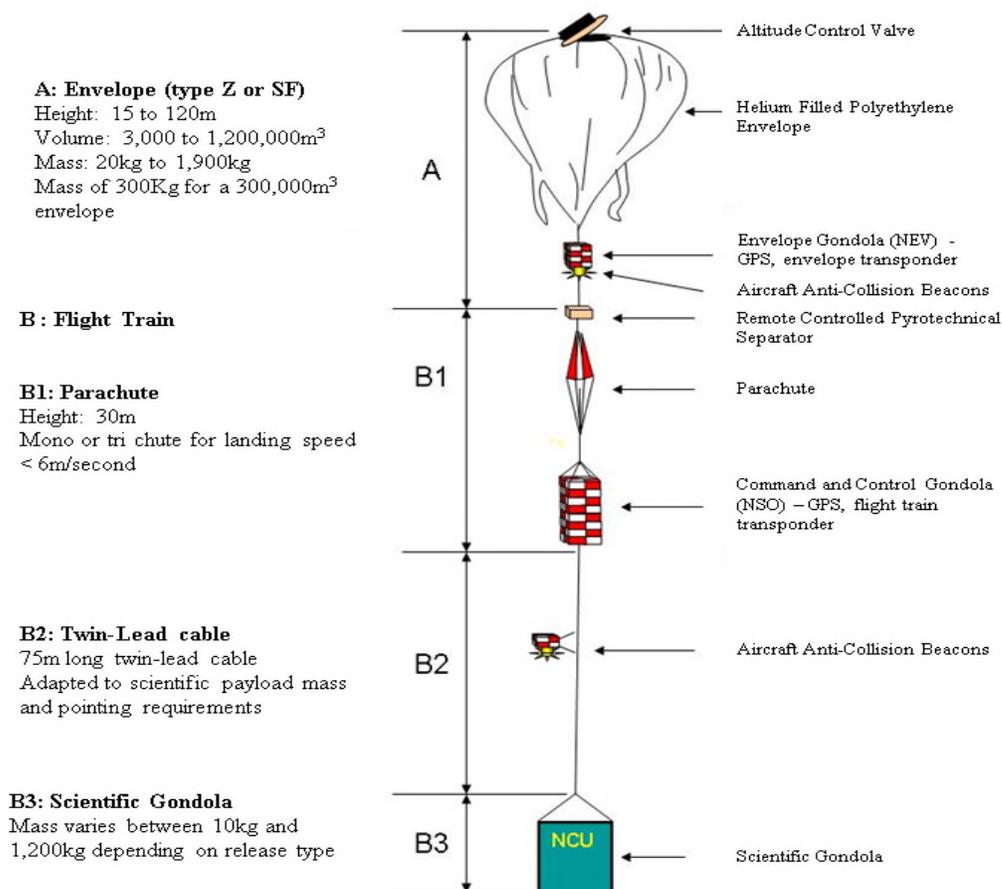


Figure 1 : Schéma d'un système de ballon à haute altitude du CNES

1.3 CHRONOLOGIE DE VOL

La liste suivante indique les événements importants lors du vol du Nimbus-5 de Strato-Science 2018. Toutes les heures sont indiquées en heure UTC (heure locale de Timmins = UTC - 4).

- 2018-08-26 **03:20:01Z** (23:20:01 local) : Launch – Lancement
- 2018-08-26 **05:34:48Z** : Ceiling reached – Plafond atteint
- 2018-08-26 **10:07:00Z** : Sunrise – Lever du soleil
- 2018-08-26 **13:28:34Z** : Maximum altitude (36,862.6m – Reported by CNES) – Altitude maximale atteinte (36 862,6 m – signalée par le CNES)
- 2018-08-26 **14:03:33Z** : Separation (start of descent under parachute) – Séparation (Début de la descente en parachute)
- 2018-08-26 **14:37:20Z** : Landing – Atterrissage

Durée du vol : **11 h 17 m 20 s**



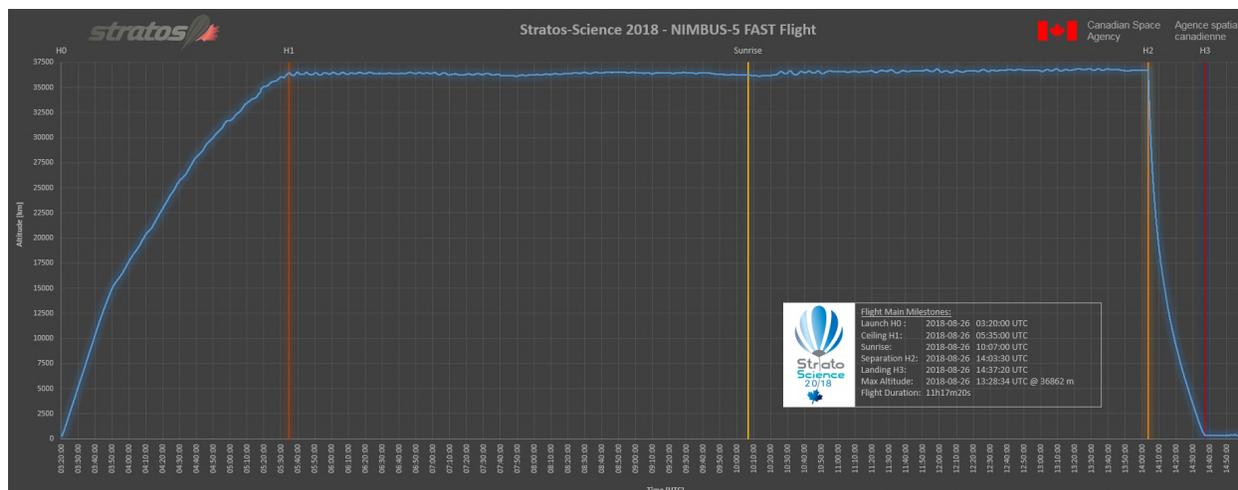


Figure 2 : Profil de vol de Nimbus-5 (ensemble de données du CNES)

1.4 FICHIERS DE DONNÉES

Les données enregistrées à partir de chaque appareil PRISM ont été téléchargées dans un fichier de vidage (CDH_tm_raw.txt) qui a ensuite été trié (CDH_tm_processed.txt) puis séparé en différents fichiers de sortie traités. Chaque fichier de sortie représente un seul type de télémétrie. Le fichier de vidage initial contient 212 253 entrées de télémétrie. Les fichiers de sortie traités ont été versés dans les dépôts correspondants au sous-sous-système qui les a générés. Un fichier Excel a été créé, et les données ont été importées dans des onglets individuels.

Remarque : Un « sous-sous-système » fait référence à un sous-système du sous-système PRISM. Sans créer de confusion, « sous-sous-système » sera abrégé par « sous-système » dans le reste du document.



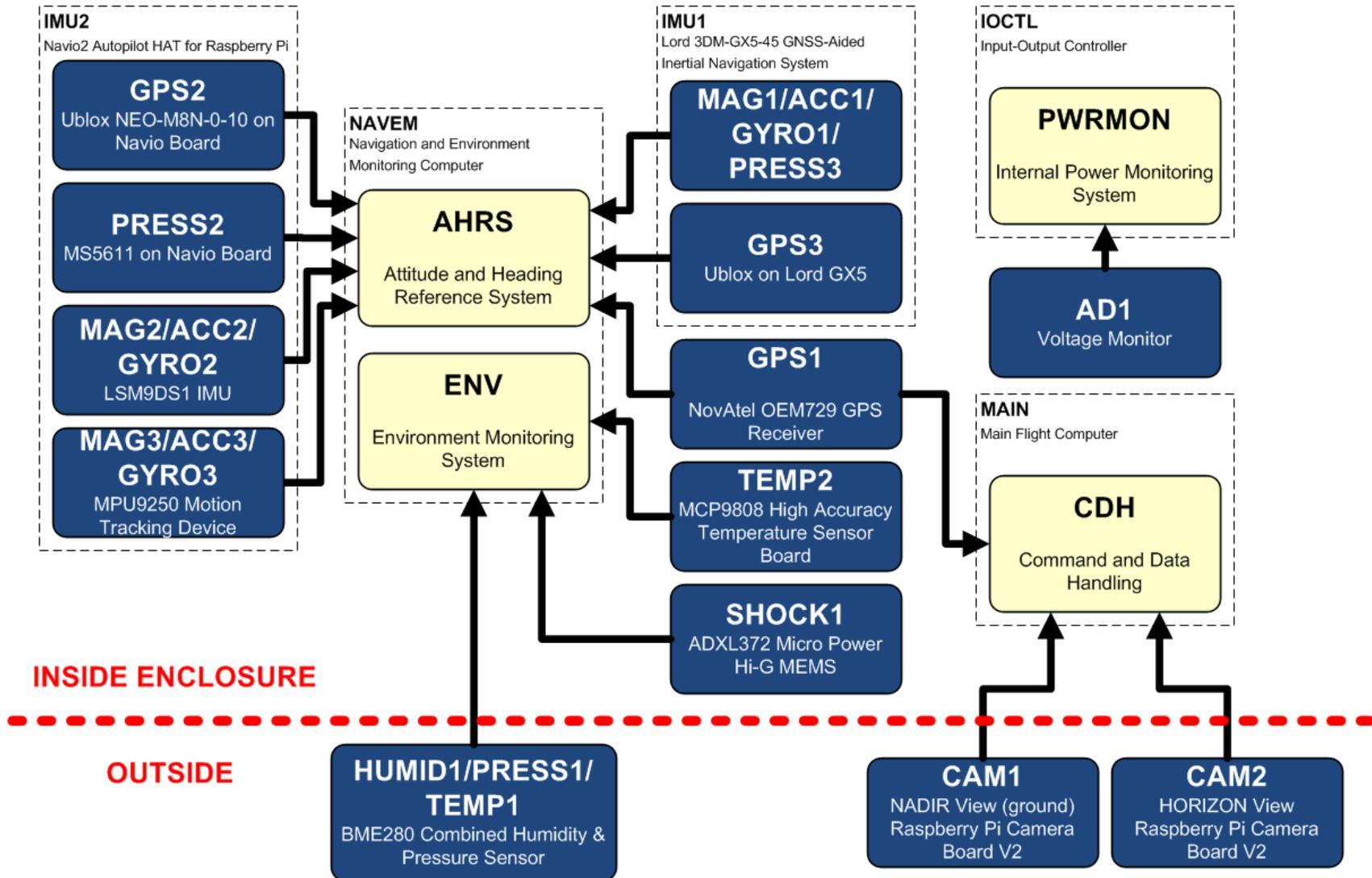
2 SPÉCIFICATIONS DES SOURCES DE DONNÉES

2.1 APERÇU

Le PRISM comprend trois principales unités de traitement. Chaque processeur acquiert des données des capteurs situés soit à l'intérieur de l'enceinte principale du PRISM, soit dans des enceintes éloignées permettant l'exposition à l'environnement hors de la structure de la nacelle. Les détails sont fournis dans la liste suivante et dans la figure qui l'accompagne :

1. **MAIN** : L'ordinateur de vol principal, qui exécute la tâche CDH (Commande et traitement des données). MAIN acquiert les données de :
 - a. **GPS1** : Un récepteur GPS, qui fournit des informations sur la position et l'heure;
 - b. **CAM1** et **CAM2** : Deux caméras, une pointant vers le sol (NADIR) et l'autre vers l'horizon;
2. **NAVEM** : Le processeur chargé de fournir les données de navigation et d'environnement, qui exécute :
 - a. l'AHRS (centrale d'attitude et de cap), qui recueille les données de :
 - i. **GPS1** : Le même récepteur GPS que celui qui apparaît dans MAIN ci-dessus et qui fournit les mêmes données de position et de synchronisation que pour MAIN (aux fins de redondance);
 - ii. **IMU1** : Système de navigation inertielle de haute précision qui comprend un récepteur GPS (**GPS3**), un capteur de pression (**PRESS3**), un magnétomètre triaxial (**MAG1**), des accéléromètres triaxiaux (**ACC1**) et des gyroscopes triaxiaux (**GYRO1**);
 - iii. **IMU2** : Un système de navigation inertielle de secours qui comprend un récepteur GPS (**GPS2**), un capteur de pression (**PRESS2**), deux magnétomètres triaxiaux (**MAG2** et **MAG3**), des accéléromètres (**ACC2** et **ACC3**) et des gyroscopes (**GYRO2** et **GYRO3**);
 - b. les tâches ENV (surveillance de l'environnement), qui recueillent des données :
 - i. d'un capteur de température interne (à l'enceinte de PRISM) [**TEMP2**];
 - ii. d'un capteur de choc à forte accélération (**SHOCK1**);
 - iii. d'un module HPT (humidité, pression et température) intégré, qui fournit des données sur l'humidité ambiante (**HUMID1**), la pression (**PRESS1**) et la température (**TEMP1**), et qui est monté dans une petite enceinte protectrice à l'extérieur de l'enveloppe de la nacelle de façon à être exposé à l'environnement;
3. **IOCTRL** : Le processeur chargé de gérer les entrées/sorties génériques et d'exécuter la tâche PWRMON (surveillance de l'alimentation). Cette tâche interagit avec un circuit analogique-numérique pour acquérir des lectures des niveaux de tension à différents points d'essai du sous-système d'alimentation interne de PRISM (**AD1**).





En plus de la collecte des données des capteurs, chaque unité de traitement recueille un ensemble de données de servitude.

Il est à noter que l'IMU1 est un ensemble COTS intégré comprenant ses propres processeurs et filtres perfectionnés pour prétraiter ses données de capteurs, ce qui n'est pas entièrement reflété dans la hiérarchie ci-dessus.

2.2 SPÉCIFICATIONS DES CAPTEURS

2.2.1 GPS1

Dispositif

- **Récepteur GNSS OEM729 de NovAtel** (monofréquence GPS L1)
- Antenne GPS L1 active de 3,5 po, 33 dB, de NovAtel

Installation

- Carte de récepteur de NovAtel installée dans une enceinte de PRISM. Équipée d'une carte mezzanine conçue et fabriquée à l'ASC, pour connecter les sorties d'alimentation, Ethernet et PPS
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Rendement nominal

- Précision de la position horizontale (eff.) : 1,5 m
- Précision de la vitesse (eff.) : 0,03 m/s
- Limite de vitesse : 515 m/s (restriction liée aux permis d'exportation)

Cote écologique

- Température de fonctionnement : -40 à 85 °C
- Humidité : 95 % sans condensation

Voir DR2.

2.2.2 GPS2

Dispositif

- **Récepteur GPS NEO-M8N-0-10 d'u-blox.**
- Antenne GPS active, gain de 28 dB, par Adafruit.

Installation

- Inclus sur le HAT du pilote automatique Navio2 pour Raspberry Pi, par Emlid. Ce HAT est installé sur l'ordinateur NAVEM, à l'intérieur de l'enceinte de PRISM.
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Rendement nominal

- Précision de la position horizontale : 2,5 m
- Altitude maximale : 50 000 m (aéroporté <mode 4G)
- Vitesse maximale : 500 m/s (aéroporté <mode 4G)
- Précision de la vitesse : 0,05 m/s
- Précision du cap : 0,3 degré

Cote écologique

- Température de fonctionnement : -40 à 85 °C



Voir DR3.

2.2.3 **GPS3**

Dispositif

- **Récepteur GPS d'u-blox** (dispositif exact inconnu).
- Antenne GPS active, gain de 28 dB, par Adafruit.

Installation

- Intégré au système de navigation inertielle assistée par GNSS 3DM-GX5-45 de LORD, qui est installé dans l'enceinte de PRISM
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Précision horizontale : +/- 2,5 m eff.
- Précision verticale : +/- 5 m eff.
- Précision de la vitesse : 0,1 m/s
- Précision du cap : 0,5 degré
- Limite d'accélération : <= 4G
- Limite d'altitude : Aucune
- Limite de vitesse : 500 m/s
- Température de fonctionnement : -40 à 85 °C

Voir DR1.

2.2.4 **CAM1 ET CAM2**

Dispositif

- Module de caméra v2 de Raspberry Pi
- Capteur : capteur d'images CMOS couleur IMX219 de Sony

Installation

- À l'intérieur d'une enceinte imprimée en 3D conçue à l'ASC
- Installé à l'extrémité d'un bras de +/- 2 pi qui dépasse du bas de la nacelle
- Enceinte exposée directement aux éléments, aucun élément chauffant
- CAM1 : pointée vers le sol (NADIR)
- CAM2 : pointée vers l'horizon

Cotes

- Champ de vision horizontal : 62,2 degrés (il faut déterminer si cela s'applique aux images prises en vol)
- Champ de vision vertical : 48,8 degrés (il faut déterminer si cela s'applique aux images prises en vol)
- Température de rendement garanti (température de jonction) : -20 à 60 °C (tiré du manuel de conception du module IMX219PQH5 V2.2)
- Système configuré pour prendre des images selon les spécifications suivantes :
 - Stockage à bord : images « pleine grandeur » : 3 280 x 2 464 px – niveau de qualité : 100 (complète)
 - Liaison descendante en temps réel : « petites » images : 1 920 x 1 080 px – niveau de qualité : 10 (faible)



2.2.5 **SHOCK1**

Dispositif

- MEMS à forte accélération et microalimentation ADXL372

Installation

- Installé sur un contrôleur d'interface à accéléromètre numérique EVAL-ADXL372Z
- Installé dans une enceinte de PRISM

Cotes

- Plage de mesures de +/- 200 g, triaxiale
- Seuil d'enregistrement : 6 g
- Température de fonctionnement : -40 à 105 °C
- Facteur d'échelle : 100 mg/LSB (sortie de 12 bits)

Voir DR4.

2.2.6 **ACC1**

Dispositif

- Accéléromètres triaxiaux
- Fabricant : inconnu

Installation

- Intégré au système de navigation inertielle assistée par GNSS 3DM-GX5-45 de LORD, qui est installé dans l'enceinte de PRISM
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage de mesure : +/- 8 g (standard), 2, 4, 20, 40 en option
- Résolution : 0,1 mg
- Instabilité de polarisation : +/- 0,04 mg
- Erreur initiale de justesse : +/- 0,002 g
- Stabilité du facteur d'échelle : +/- 0,03 %
- Erreur d'alignement : +/- 0,05 degré
- Taux d'échantillonnage : 1 000 Hz
- Température de fonctionnement : -40 à 85 °C

Voir DR1.

2.2.7 **ACC2**

Dispositif

- IMU LSM9DS1
- Accéléromètres triaxiaux

Installation

- Inclus sur le HAT du pilote automatique Navio2 pour Raspberry Pi, par Emlid. Ce HAT est installé sur l'ordinateur NAVEM, à l'intérieur de l'enceinte de PRISM.
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage de mesure d'accélération linéaire : +/-2, 4, 8 ou 16 g
- Sensibilité de l'accélération linéaire :



- Plage à +/- 2 g : 0,061 mg/LSB
 - Plage à +/- 4 g : 0,122 mg/LSB
 - Plage à +/- 8 g : 0,244 mg/LSB
 - Plage à +/- 16 g : 0,732 mg/LSB
 - Plage de température : -40 à 85 °C
- Voir DR5.

2.2.8 ACC3

Dispositif

- Dispositif de suivi des mouvements MPU9250
- Accéléromètres MEMS triaxiaux

Installation

- Inclus sur le HAT du pilote automatique Navio2 pour Raspberry Pi, par Emlid. Ce HAT est installé sur l'ordinateur NAVEM, à l'intérieur de l'enceinte de PRISM.
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage de mesure à pleine échelle : +/- 2, 4, 8 ou 16 g
- Résolution des données de sortie : 16 bits
- Échelle de sensibilité :
 - Plage à 250 degrés/s : 16 384 LSB/g
 - Plage à 500 degrés/s : 8 192 LSB/g
 - Plage à 1 000 degrés/s : 4 096 LSB/g
 - Plage à 2 000 degrés/s : 2 048 LSB/g
- Plage de température : -40 à 85 °C

Voir DR6.

2.2.9 AD1

Dispositif

- Capacités de conversion analogique-numérique de l'ordinateur monocarte BL4S200 de Rabbit

Installation

- Intérieur de l'enceinte de PRISM
- Connexions aux sorties des convertisseurs de puissance internes de PRISM (+12 V, +5 V et +3,3 V)

Cotes

- 8 entrées analogique-numérique 12 bits (11 bits pour les valeurs et 1 bit pour le signe)
- Impédance d'entrée de 1 MΩ
- Plage de lecture de la tension configurable
- Plage de tension maximale : 0-20 V
- 4 entrées permettant aussi de mesurer le courant (4-20 mA)
- Température de fonctionnement : -40 à 85 °C

Voir DR7.



2.2.10 **HUMID1**

Dispositif

- Capteur numérique d'humidité, de pression et de température BME280

Installation

- Intérieur de l'enceinte imprimée en 3D et conçu à l'ASC
- Installé à l'extrémité d'un bras de +/- 2 pi qui dépasse du bas de la nacelle
- Enceinte exposée directement aux éléments, aucun élément chauffant

Cotes

- Plage de température de fonctionnement : -40 à +85 °C
- Plage de valeurs d'humidité : humidité relative de 1 à 100 %
- Hystérésis : humidité relative de +/- 1 %
- Tolérance de précision : humidité relative de +/- 3 %
- Temps de réponse : de l'ordre de 1 s

Voir DR8.

2.2.11 **PRESS1**

Dispositif

- Capteur numérique d'humidité, de pression et de température BME280

Installation

- Intérieur de l'enceinte imprimée en 3D et conçu à l'ASC
- Installé à l'extrémité d'un bras de +/- 2 pi qui dépasse du bas de la nacelle
- Enceinte exposée directement aux éléments, aucun élément chauffant

Cotes

- Plage de température de fonctionnement : -40 à +85 °C
- Plage de valeurs de la pression : 300 à 1 100 hPa
- Pression, exactitude absolue : +/- 1,0 hPa
- Pression, exactitude relative : +/- 0,12 hPa
- Résolution des données de sortie de la pression : 0,18 Pa

Voir DR8.

2.2.12 **PRESS2**

Dispositif

- Module capteur de pression haute précision MS5611 01BA01 de MEAS Switzerland

Installation

- Inclus sur le HAT du pilote automatique Navio2 pour Raspberry Pi, par Emlid. Ce HAT est installé sur l'ordinateur NAVEM, à l'intérieur de l'enceinte de PRISM.
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage de pression étendue : 10 à 1 200 mbar (hPa)
- Plage de pression, exactitude complète : 450 à 1 100 mbar (hPa)
- Résolution de 8 à 24 bits sélectionnable
- Pression haute résolution : 0,012 mbar (hPa) ou 10 cm d'altitude
- Pression basse résolution : 0,065 mbar (hPa) ou 55 cm d'altitude



- Précision à 25 °C, 750 mbar : +/- 1,5 mbar (hPa)
- Plage de température : -40 à 85 °C
- Temps de réponse : de l'ordre de 10 ms

Voir DR9.

2.2.13 **PRESS3**

Dispositif

- Capteur de pression barométrique
- Fabricant : Inconnu

Installation

- Intégré au système de navigation inertielle assistée par GNSS 3DM-GX5-45 de LORD, qui est installé dans l'enceinte de PRISM
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage : -1 800 à 10 000 m
- Résolution : < 0,1 m
- Densité de bruit : 0,01 hPa eff.
- Température de fonctionnement : -40 à 85 °C

Voir DR1.

2.2.14 **TEMP1**

Dispositif

- Capteur numérique d'humidité, de pression et de température BME280

Installation

- Intérieur de l'enceinte imprimée en 3D et conçu à l'ASC
- Installé à l'extrémité d'un bras de +/- 2 pi qui dépasse du bas de la nacelle
- Enceinte exposée directement aux éléments, aucun élément chauffant

Cotes

- Plage de température de fonctionnement : -40 à +85 °C
- Plage, exactitude complète : 0 à +65 °C
- Température, exactitude absolue : +/- 0,5 °C à 25 °C, +/- 1 °C entre 0 et 65 °C
- Résolution des données de sortie de la température : 0,01 °C

Voir DR8.

2.2.15 **TEMP2**

Dispositif

- Capteur de température haute précision MCP9808

Installation

- Mini-carte installée dans l'enceinte de PRISM, au-dessus de l'ordinateur NAVEM

Cotes

- Plage de température de fonctionnement : -40 à +125 °C
- +/- 0,25 °C (typique) de -40 à 125 °C
- +/- 0,5 °C (maximum) de -20 à 100 °C



- +/- 1 °C (maximum) de -40 à 125 °C
 - Temps de réponse thermique : de l'ordre de 1,5 s
- Voir DR10.

2.2.16 **MAG1**

Dispositif

- Magnétomètre triaxial
- Fabricant : Inconnu

Installation

- Intégré au système de navigation inertielle assistée par GNSS 3DM-GX5-45 de LORD, qui est installé dans l'enceinte de PRISM
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage de mesure : +/- 2,5 G
- Erreur initiale de justesse : +/- 0,003 G
- Stabilité du facteur d'échelle : +/- 0,1 %
- Erreur d'alignement : +/- 0,05 degré
- Taux d'échantillonnage : 50 Hz
- Température de fonctionnement : -40 à 85 °C

Voir DR1.

2.2.17 **MAG2**

Dispositif

- IMU LSM9DS1

Installation

- Inclus sur le HAT du pilote automatique Navio2 pour Raspberry Pi, par Emlid. Ce HAT est installé sur l'ordinateur NAVEM, à l'intérieur de l'enceinte de PRISM.
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage de mesure magnétique : +/-4, 8, 12 ou 16 G
- Sensibilité magnétique :
 - Plage à +/- 4 G : 0,14 mG/LSB
 - Plage à +/- 8 G : 0,29 mG/LSB
 - Plage à +/- 12 G : 0,43 mG/LSB
 - Plage à +/- 16 G : 0,58 mG/LSB
- Plage de température : -40 à 85 °C

Voir DR5.

2.2.18 **MAG3**

Dispositif

- Dispositif de suivi des mouvements MPU9250



- Capteur de champ magnétique à effet Hall monolithique au silicium à trois axes doté d'un concentrateur magnétique

Installation

- Inclus sur le HAT du pilote automatique Navio2 pour Raspberry Pi, par Emlid. Ce HAT est installé sur l'ordinateur NAVEM, à l'intérieur de l'enceinte de PRISM.
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage de mesure à pleine échelle : +/- 4 800 μ T
- Résolution des données de sortie : 14 bits (0,6 μ T/LSB)
- Plage de température : -40 à 85 °C
- Taux de répétition : 8 Hz

Voir DR6.

2.2.19 **GYRO1**

Dispositif

- Gyroscopes triaxiaux
- Fabricant : inconnu

Installation

- Intégré au système de navigation inertielle assistée par GNSS 3DM-GX5-45 de LORD, qui est installé dans l'enceinte de PRISM
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage de mesure : 300 degrés/s (standard)
- Résolution : +/- 0,003 degré/s
- Instabilité de polarisation : 8 degrés/h
- Erreur initiale de justesse : +/- 0,04 degré/s
- Stabilité du facteur d'échelle : +/- 0,05 %
- Erreur d'alignement : +/- 0,05 degré
- Taux d'échantillonnage : 4 000 Hz
- Température de fonctionnement : -40 à 85 °C

Voir DR1.

2.2.20 **GYRO2**

Dispositif

- IMU LSM9DS1

Installation

- Inclus sur le HAT du pilote automatique Navio2 pour Raspberry Pi, par Emlid. Ce HAT est installé sur l'ordinateur NAVEM, à l'intérieur de l'enceinte de PRISM.
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage de mesure de la vitesse angulaire : +/-245, 500 ou 2 000 degrés/s
- Sensibilité de la vitesse angulaire :
 - Plage à +/- 245 degrés/s : 0,00875 degré/s/LSB
 - Plage à +/- 500 degrés/s : 0,01750 degré/s/LSB



- Plage à +/- 2 000 degrés/s : 0,070 degré/s/LSB
 - Plage de température : -40 à 85 °C
- Voir DR5.

2.2.21 **GYRO3**

Dispositif

- Dispositif de suivi des mouvements MPU9250
- Gyroscopes MEMS triaxiaux

Installation

- Inclus sur le HAT du pilote automatique Navio2 pour Raspberry Pi, par Emlid. Ce HAT est installé sur l'ordinateur NAVEM, à l'intérieur de l'enceinte de PRISM.
- Intérieur des parois de la nacelle, avec protection thermique

Cotes

- Plage de mesure à pleine échelle : +/- 250, 500, 1 000 ou 2 000 degrés/s
- Résolution des données de sortie : 16 bits
- Échelle de sensibilité :
 - Plage à 250 degrés/s : 131 LSB/(degrés/s)
 - Plage à 500 degrés/s : 65,5 LSB/(degrés/s)
 - Plage à 1 000 degrés/s : 32,8 LSB/(degrés/s)
 - Plage à 2 000 degrés/s : 16,4 LSB/(degrés/s)
- Tolérance zéro initiale (à 25 °C) : +/- 5 degrés/s
- Plage de température : -40 à 85 °C
- Taux de répétition : de 4 à 8 000 Hz

Voir DR6.



3 SOUS-SYSTÈME DE COMMANDE ET DE TRAITEMENT DES DONNÉES

3.1 INTRODUCTION

Le sous-système de commande et de traitement de données (C&DH) a recueilli des données de position de la nacelle (à partir de GPS01), des données de servitude générales pour surveiller son propre état, ainsi que des images à l'aide des CAM1 et CAM2.

3.2 EMPLACEMENT DES DONNÉES

- Données de servitude de C&DH :
 - Fichier `Flight/CDH/HKP/swcdh_events.txt` = Liste des événements enregistrés
 - Fichier `Flight/CDH/HKP/swcdh_hkp0.txt` = Données de servitude générales
 - Fichier `Flight/CDH/HKP/swcdh_hw0.txt` = Données matérielles supplémentaires
 - Onglets `SWCDH_HKP0` et `SWCDH_HW0` dans le fichier `Flight/FlightData.xlsx`
- Données sur l'emplacement :
 - Fichier `Flight/CDH/GPS01/swcdh_gps01_gga.txt`
 - Onglet `SWCDH_GPS01_GGA` dans le fichier `Flight/FlightData.xlsx`
- Images :
 - Pointage vers le sol : Fichier JPG dans `Flight/CDH/CAM1-NADIR`
 - Pointage vers l'horizon : Fichier JPG dans `Flight/CDH/CAM2-HOR`

3.3 DONNÉES DE SERVITUDE

Dans la présente section, nous présenterons les données d'échantillonnage traitées ainsi que de brefs commentaires fondés sur les données de servitude du C&DH.

Principal temps de propagation en boucle du C&DH : Le temps de propagation en boucle demeure toujours inférieur à 100 ms pendant tout le vol, avec des pointes entre 10 et 20 s aux 2 minutes, qui correspondent au moment où le C&DH prenait des photos.



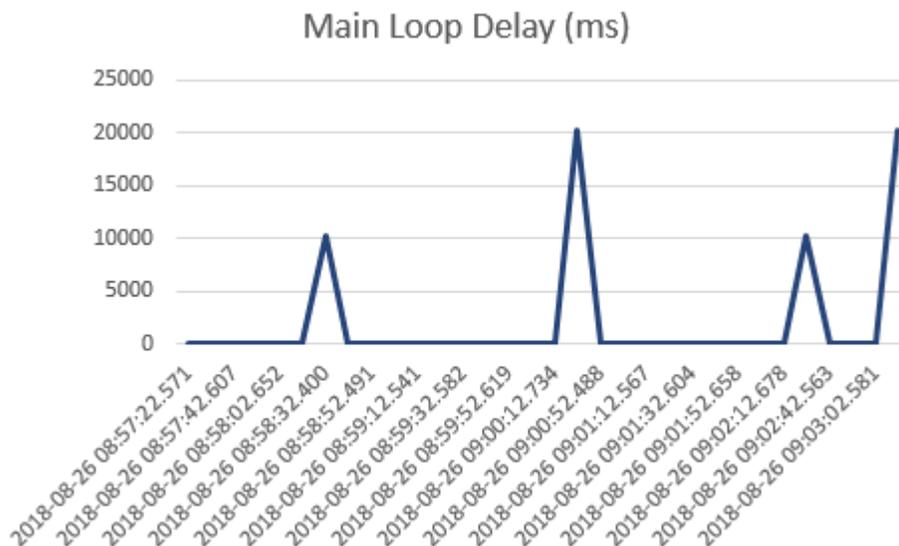


Figure 3 : Principal temps de propagation du C&DH – intervalle de temps aléatoire en vol

Mémoire libre du C&DH : La quantité de mémoire système libre a été surveillée, et elle est restée relativement constante entre 13 et 20 Mo, SAUF pendant les 15 dernières minutes de vol, où nous constatons une nette tendance à la baisse, donnant une mémoire libre de 10 Mo. Cette baisse est due au fait que, à ce moment-là, nous avons commencé à transférer de gros fichiers de données brutes juste avant la descente.

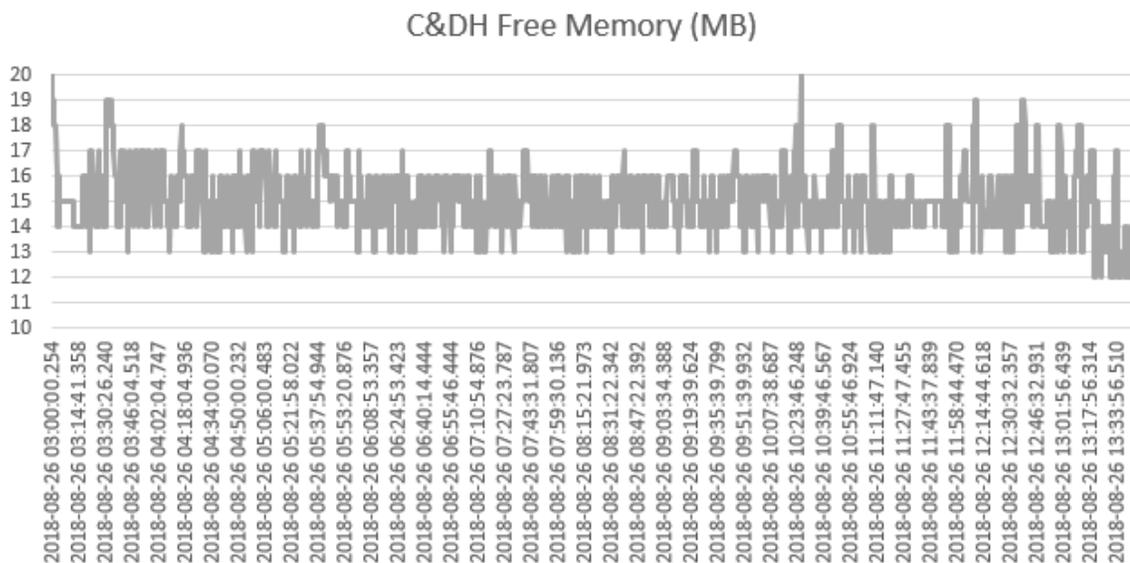


Figure 4 : Mémoire libre de C&DH (Mo) – durée complète

Température de l'unité centrale (CPU) du C&DH : La température de la CPU de l'ordinateur du C&DH (Raspberry Pi 2) a immédiatement commencé à chuter au lancement, passant d'un peu plus de 45 °C à environ 22 °C vers 12:30Z, quand elle a commencé à monter



à 28 °C environ. Notez que cette heure ne correspond pas au lever du soleil. Des recherches plus approfondies sont nécessaires pour comprendre la raison de la hausse à ce moment-là.

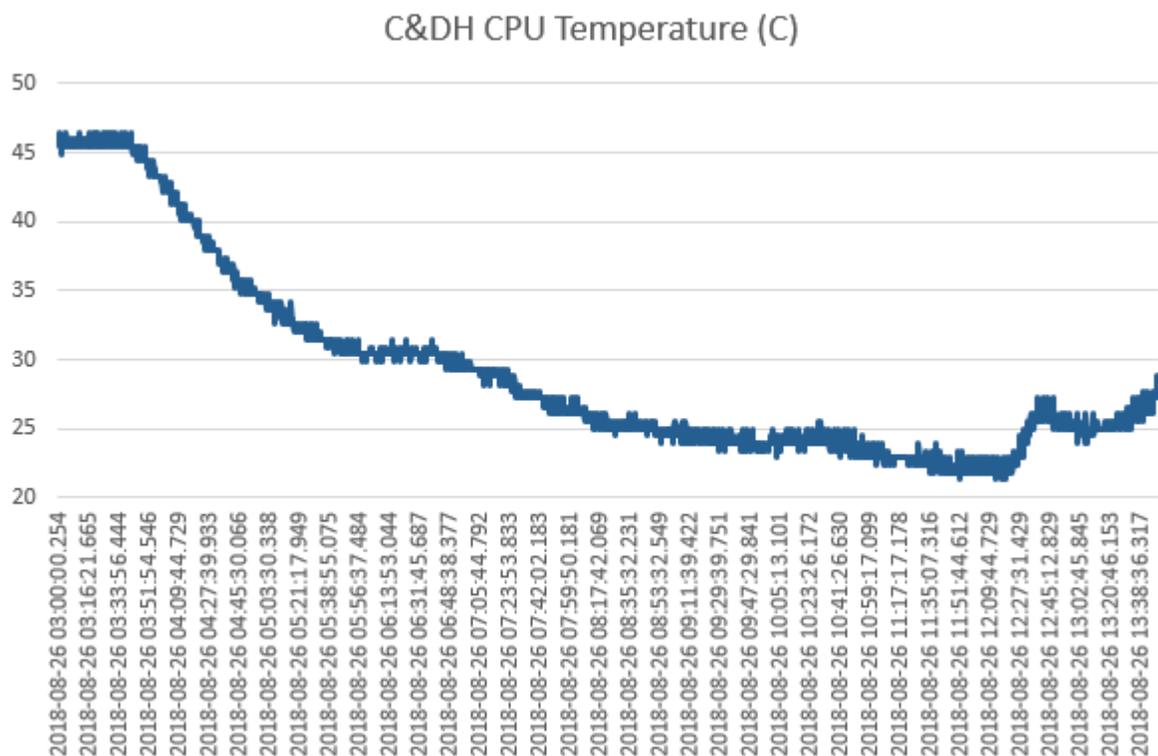


Figure 5 : Température de la CPU du C&DH en degrés Celsius – durée complète

3.4 DONNÉES DE LOCALISATION

Dans la présente section, nous présentons les données d'échantillonnage de localisation de la nacelle, collectées par le C&DH à partir du récepteur GPS de NovAtel (GPS01).

Altitude de la nacelle : La nacelle est montée à environ 36 km en 2 h environ, et son altitude est demeurée relativement constante jusqu'à la perte de signal (séparation).



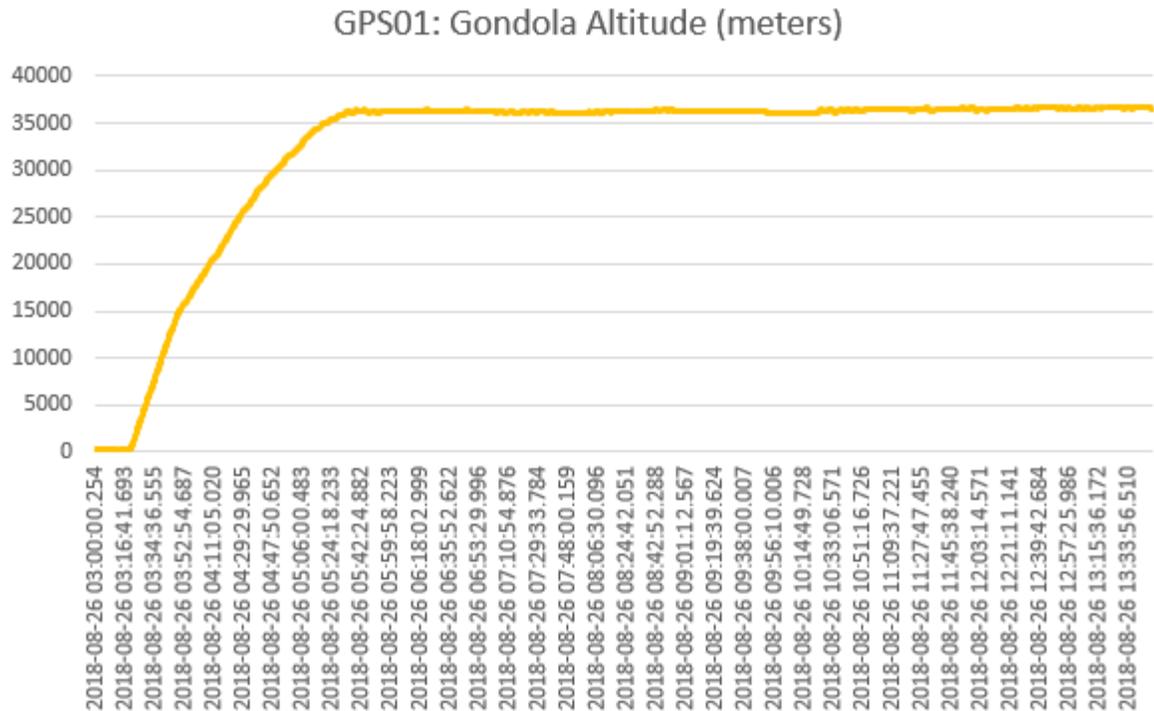


Figure 6 : GPS01 : Altitude de la nacelle (en mètres) – durée complète

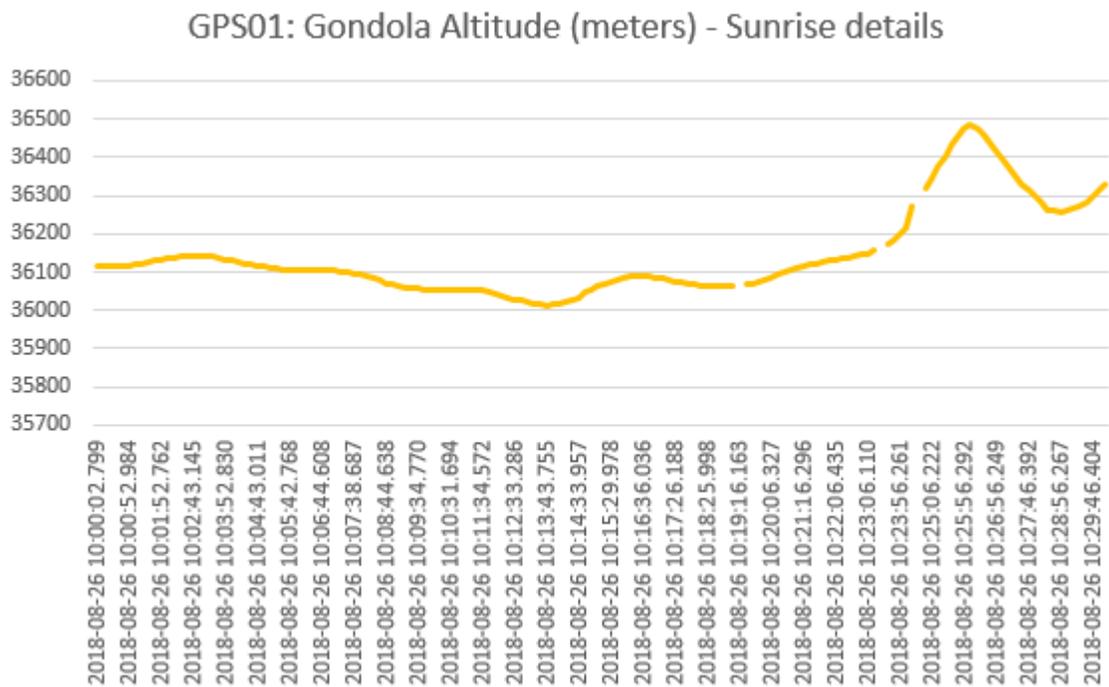


Figure 7 : GPS01 : Variations de l'altitude de la nacelle au lever du soleil (plage de temps de 30 min)



Position de la nacelle (latitude et longitude) : La latitude et la longitude de la nacelle ont été relevées de façon constante pendant le vol, à l'exception de trois valeurs aberrantes (valeurs de zéro). La longitude est demeurée entre 80 et 84 degrés O et la latitude entre 48 et 48,5 degrés N.

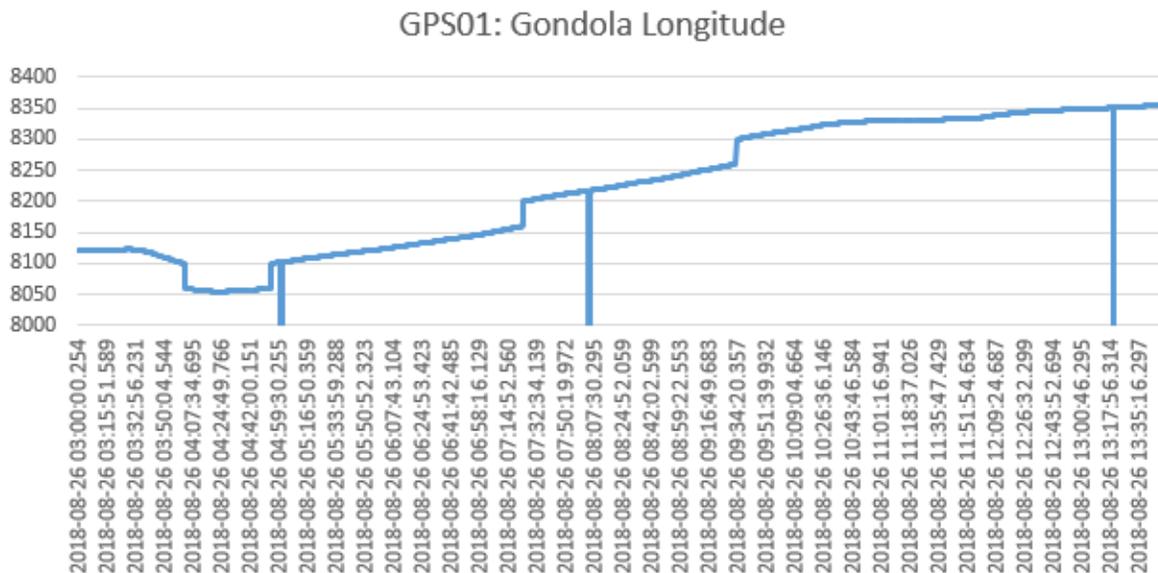


Figure 8 : GPS01 : Longitude de la nacelle – durée complète

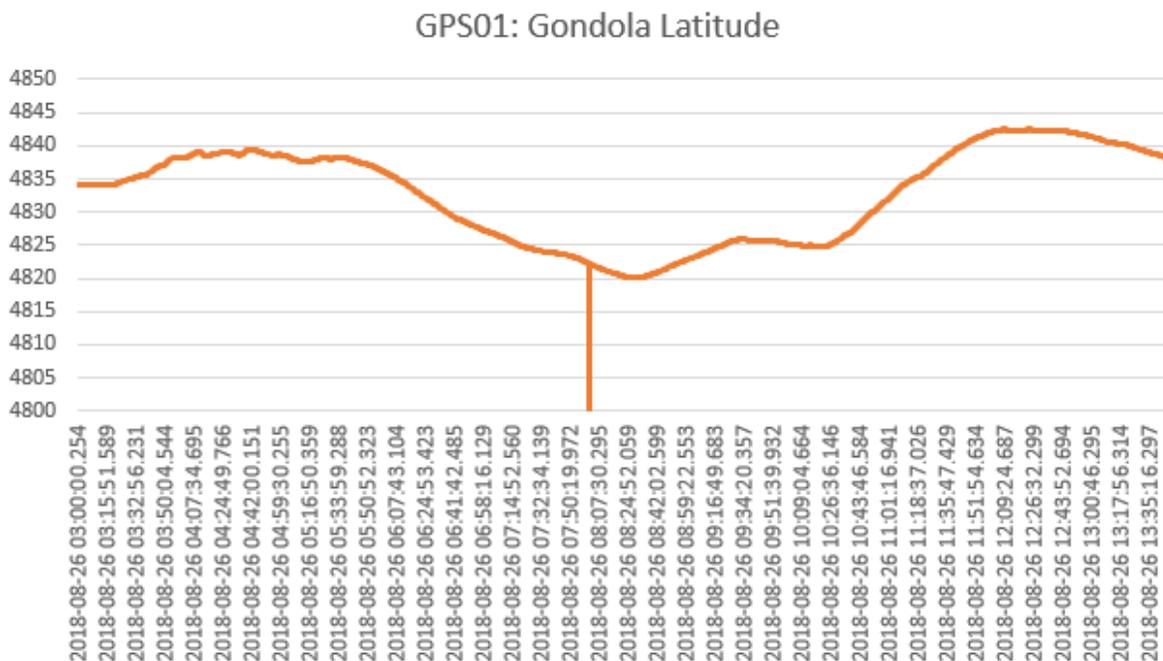


Figure 9 : Latitude de la nacelle – durée complète



Qualité des données GPS : À une brève exception près pendant laquelle le signal semble avoir été perdu à 4:42Z, le nombre de satellites GPS utilisés dans la solution est en général supérieur à 7. L'indice HDOP (dilution horizontale de la précision) est resté autour de 1 pendant toute la durée du vol, ce qui indique un très bon signal (<1 = redondant, 1 = idéal, entre 1,0 et 2,0 = excellent).

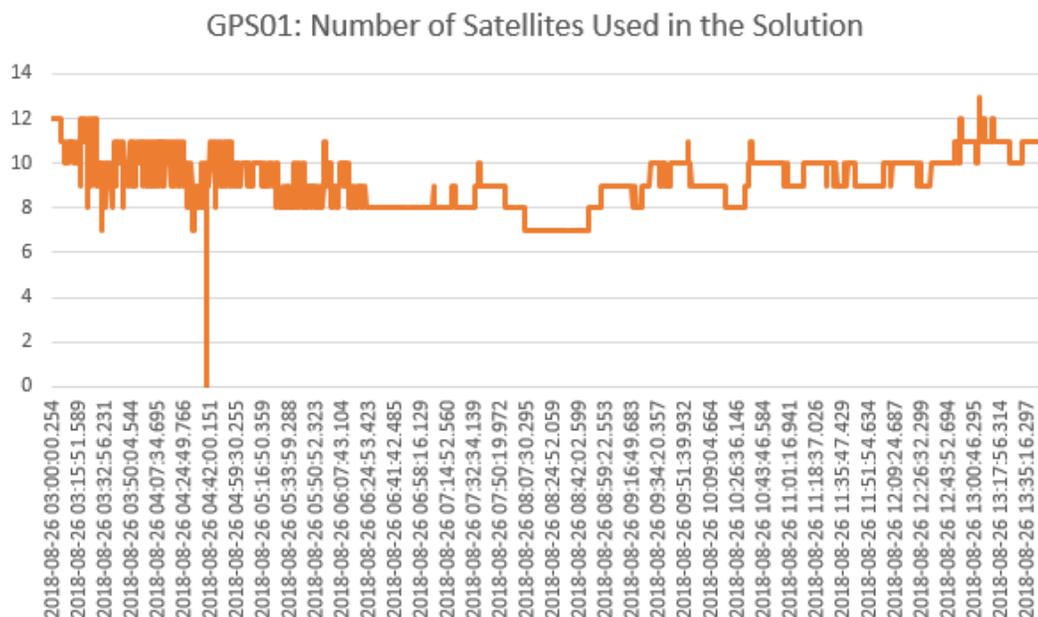


Figure 10 : GPS01 : Nombre de satellites utilisés dans la solution – durée complète

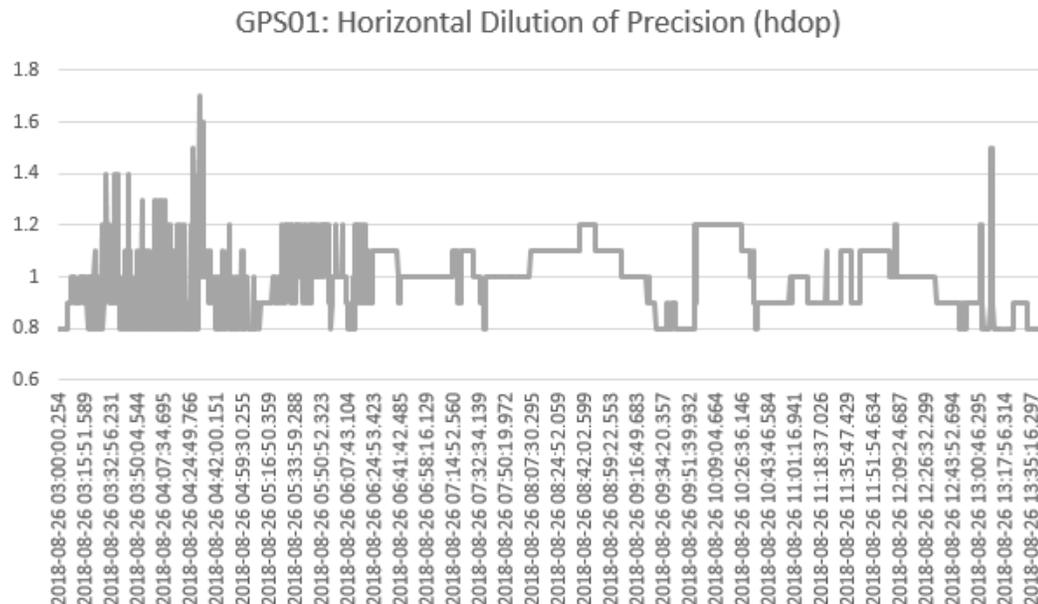


Figure 11 : GPS01 : Dilution horizontale de la précision (HDOP) – durée complète



3.5 IMAGERIE

3.5.1 MODIFICATIONS DES PARAMÈTRES D'IMAGERIE

Des commandes ont été envoyées pendant le vol pour modifier les réglages des caméras, plus précisément la commande CAM_OPTIONS. La chaîne de paramètres de cette commande est ajoutée à la commande (à l'emplacement marqué par « options » ci-dessous) pour demander une image de bord :

Basse rés. :

```
raspistill -n -vf -hf -w 1920 -h 1080 -q 10 Options -t 2000 -o imageName.jpg
```

Haute rés. :

```
raspistill -n -vf -hf -q 100 Options -t 2000 -o imageName.jpg
```

Pour en savoir plus, veuillez consulter les documents de référence sur l'application « raspistill » de Raspberry Pi. Voici la chronologie :

```
GASPAR,20180826 032550867,,CMD,swcdh,71,77,CAM_OPTIONS,-a 12
GASPAR,20180826 053114599,,CMD,swcdh,79,-51,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex verylong
GASPAR,20180826 053333892,,CMD,swcdh,81,113,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex night
GASPAR,20180826 053500013,,CMD,swcdh,83,-34,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex night -br 75
GASPAR,20180826 053656418,,CMD,swcdh,85,-40,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex night -br 60
GASPAR,20180826 053716914,,CMD,swcdh,86,-34,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex night -br 60 -drc high
GASPAR,20180826 055454590,,CMD,swcdh,0,30,CAM_OPTIONS,-a "CSA PRISM" -a 12 -ISO 800 -br 60 -ex verylong -
drc high
GASPAR,20180826 055533347,,CMD,swcdh,2,-22,CAM_OPTIONS,-a 12 -ISO 800 -br 60 -ex verylong -drc high
GASPAR,20180826 070822841,,CMD,swcdh,9,106,CAM_OPTIONS,-a 12 -ISO 800 -br 60 -drc high
GASPAR,20180826 071305128,,CMD,swcdh,10,77,CAM_OPTIONS,-a 12
GASPAR,20180826 071826802,,CMD,swcdh,12,-3,CAM_OPTIONS,-a 12 -ISO 800
GASPAR,20180826 072722654,,CMD,swcdh,17,-51,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex verylong
GASPAR,20180826 073304389,,CMD,swcdh,18,113,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex night
GASPAR,20180826 074315294,,CMD,swcdh,20,77,CAM_OPTIONS,-a 12
GASPAR,20180826 090225724,,CMD,swcdh,46,-113,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex sport
GASPAR,20180826 090237726,,CMD,swcdh,47,-113,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex sport
GASPAR,20180826 090435927,,CMD,swcdh,49,56,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex sport -ISO 100
GASPAR,20180826 093800745,,CMD,swcdh,59,77,CAM_OPTIONS,-a 12
GASPAR,20180826 094450233,,CMD,swcdh,60,-125,CAM_OPTIONS,-a 12 -ISO 800 -ex verylong -drc high
GASPAR,20180826 095158853,,CMD,swcdh,63,77,CAM_OPTIONS,-a 12
```



```
GASPAR,20180826 095642306,,CMD,swcdh,65,-51,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex verylong
GASPAR,20180826 095843109,,CMD,swcdh,68,-45,CAM_OPTIONS,-a 12 -ex verylong -drc high
GASPAR,20180826 095955488,,CMD,swcdh,70,77,CAM_OPTIONS,-a 12
GASPAR,20180826 101057309,,CMD,swcdh,77,77,CAM_OPTIONS,-a 12
GASPAR,20180826 101058159,,CMD,swcdh,78,77,CAM_OPTIONS,-a 12
GASPAR,20180826 101115500,,CMD,swcdh,79,77,CAM_OPTIONS,-a 12
```

3.5.2 **IMAGES**

Les images ont été prises automatiquement à des intervalles de deux (2) minutes, en alternant entre la CAM1 et la CAM2, une image basse résolution étant d'abord prise (transmise immédiatement au sol), suivie d'une image haute résolution (enregistrée dans la mémoire de masse embarquée aux fins de récupération ultérieure, après l'atterrissage).

Chaque image est en format JPEG standard et comporte un calque avec horodatage sur le dessus (en UTC).

Les images de laCAM1 sont disponibles dans :

Data/Flight/CDH/CAM1-NADIR





Figure 12 : Exemple d'une image de la CAM1 (pointant vers le nadir)



Les images de la CAM2 sont disponibles dans :

Data/Flight/CDH/CAM2-HOR



Figure 13 : Exemple d'une image de la CAM2 (pointant vers l'horizon)



4 SOUS-SYSTÈMES DE NAVIGATION ET DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

4.1 INTRODUCTION

Le sous-système de navigation et de surveillance de l'environnement (NAVEM) a exécuté deux processus principaux : un qui devait recueillir et traiter des données pour fournir des informations de référence sur l'attitude et le cap (SWNAV) et l'autre qui devait collecter des données environnementales (SWEM). Le SWNAV a également recueilli des données de position provenant de divers récepteurs GPS. Chacun de ces processus génère sa propre télémétrie de maintenance pour surveiller son état.

4.2 EMPLACEMENT DES DONNÉES

- Données de servitude SWNAV :
 - Fichier `Flight/NAVEM/swnav_hkp.txt`
 - Onglet SWNAV_HKP dans le fichier `Flight/FlightData.xlsx`
- Données sur l'emplacement SWNAV :
 - Fichier `Flight/NAVEM/swnav_pos0.txt`
 - Onglet SWNAV_POS0 dans le fichier `Flight/FlightData.xlsx`
- Données de références sur l'attitude et le cap SWNAV :
 - Fichier `Flight/NAVEM/swnav_ahr0.txt`
 - Onglet SWNAV_AHR0 dans le fichier `Flight/FlightData.xlsx`
- Données de servitude SWEM :
 - Fichier `Flight/NAVEM/swem_hk.txt`
 - Onglet SWEM_HK dans le fichier `Flight/FlightData.xlsx`
- Données sur l'environnement SWEM :
 - Fichier `Flight/NAVEM/swem_em0.txt`
 - Onglet SWEM_EM0 dans le fichier `Flight/FlightData.xlsx`

4.3 DONNÉES DE SERVITUDE

Utilisation des ressources du NAVEM (provenant de SWEM) : Tout au long du vol, le SWEM a obtenu des données sur l'utilisation de la CPU (Raspberry Pi 3), ainsi que la quantité de mémoire libre (RAM) restante et la température de la CPU. Certains pics indiquaient une utilisation à 100 % de la CPU. Mais, en moyenne, l'utilisation est restée inférieure à 60 %.

Quant à la quantité de mémoire libre, les données indiquent clairement une tendance à la baisse constante de la quantité de mémoire disponible pendant le vol. Des recherches sur l'utilisation de la mémoire seront menées, et les mesures d'atténuation correspondantes seront mises en place lors de missions futures pour éliminer les impacts négatifs potentiels de cette baisse de quantité de mémoire libre.



La température de la CPU était stable au départ à 64 °C, et elle a chuté lentement à 40 °C pendant le vol jusqu’à environ 12:30Z, lorsqu’elle a commencé à remonter jusqu’à 45 °C. Il est à noter que, durant le vol, la température de la CPU du NAVEM (Raspberry Pi 3) est demeurée 20 °C plus élevée environ que celle de la CPU de C&DH (Raspberry Pi 2).

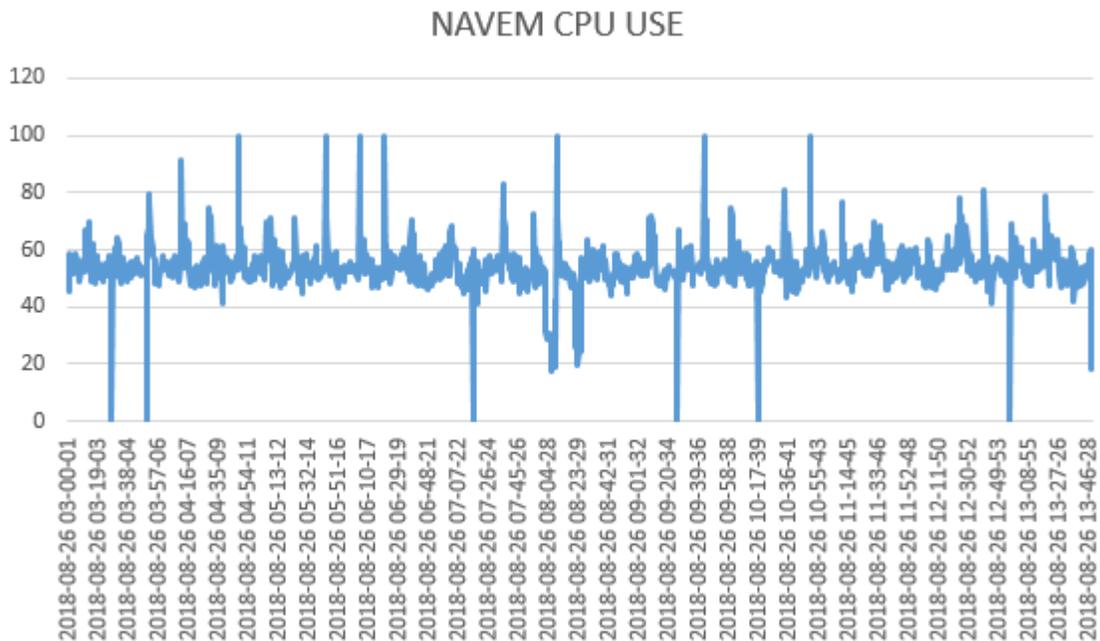


Figure 14 : Utilisation de la CPU du NAVEM – durée complète

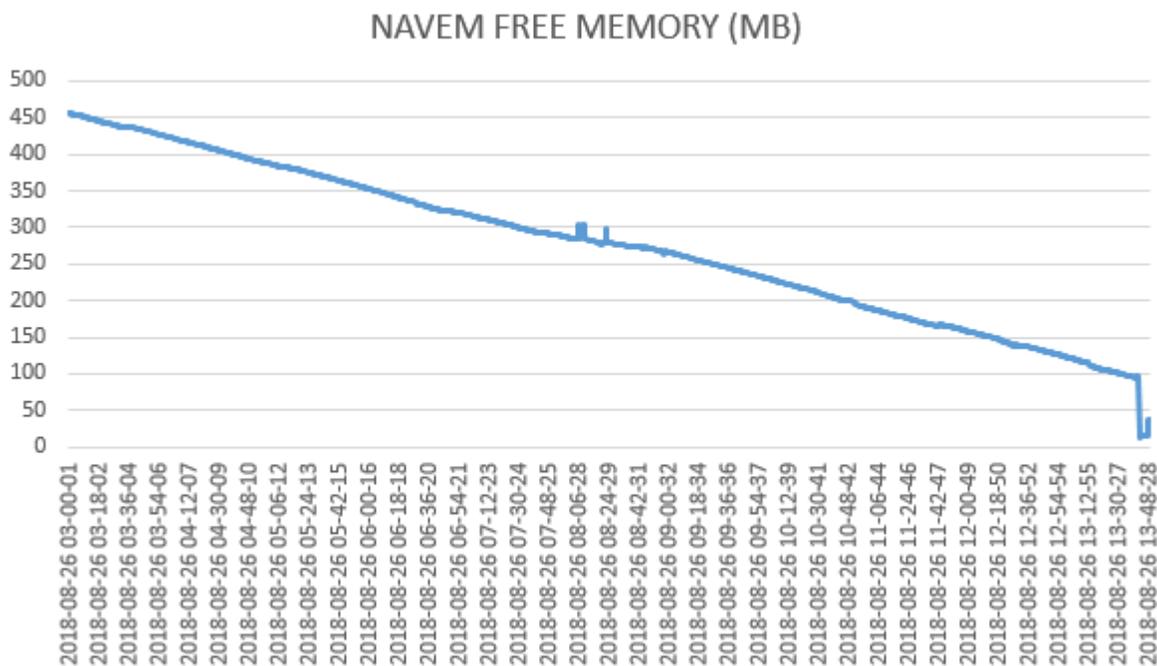


Figure 15 : Mémoire libre de l’ordinateur du NAVEM (Mo) – durée complète



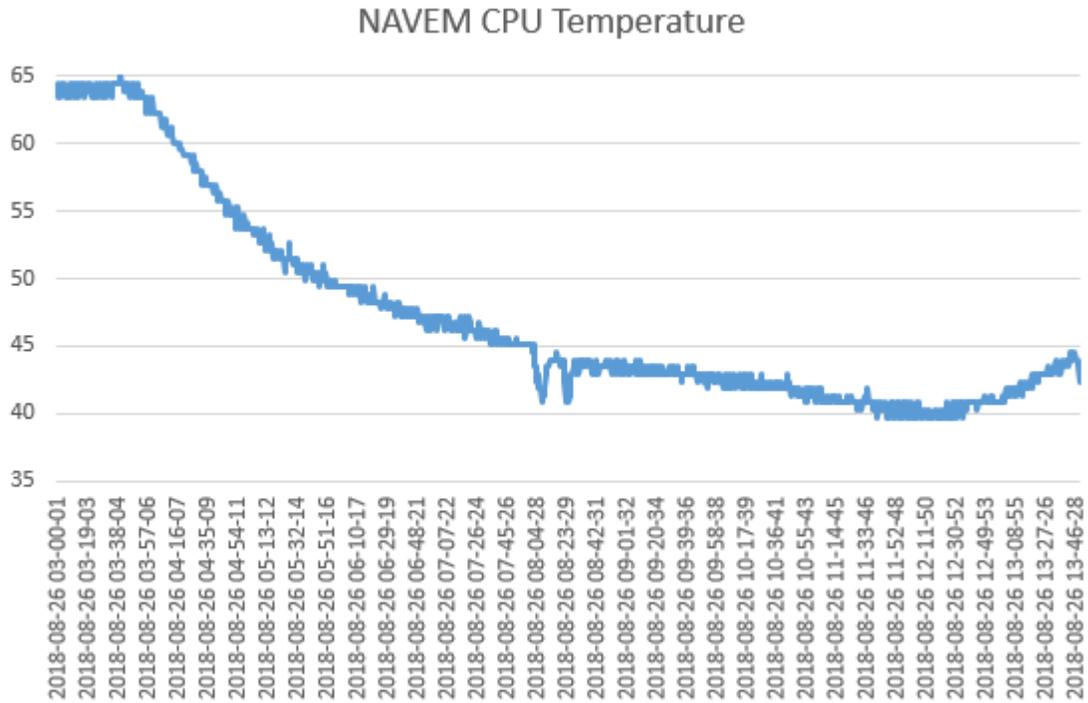


Figure 16 : Température de la CPU du NAVEM (°C) – durée complète



4.4 TÉLÉMÉTRIE DU LOGICIEL DE NAVIGATION

4.4.1 DONNÉES DE LOCALISATION

Le processus SWNAV a recueilli des données de position des GPS01, GPS02 et GPS03. Après analyse, la séquence de priorité des trois récepteurs GPS est établie comme suit : GPS01, puis GPS02 et ensuite GPS03. C'est-à-dire que la position finale est tirée de la première solution « valide » lors du balayage des trois solutions de récepteurs GPS en suivant la séquence de priorité. Par ailleurs, l'analyse après vol montre que, pendant le vol, GPS01 a fourni des solutions valides pendant la totalité du vol. Par conséquent, les sorties de position provenant du PRISM sont fournies uniquement par le récepteur GPS de NovAtel (GPS01).

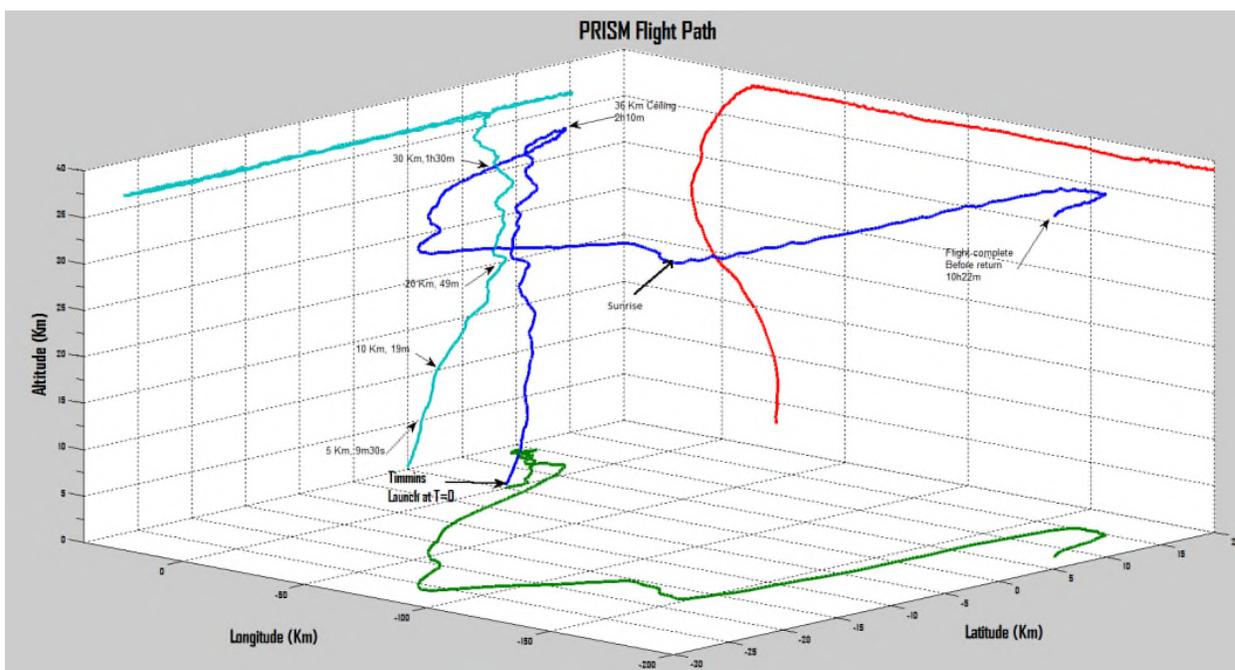


Figure 17 : Position de la nacelle, selon les indications de SWNAV – durée complète

GPS02 : Le récepteur GPS d'u-blox sur le NavIO2 (GPS02) était fonctionnel au lancement, mais il a cessé de fournir des données d'altitude à 3:22Z lorsqu'il a atteint 1 000 m (dernière altitude signalée = 993 m) et de communiquer la position (latitude/longitude) 20 minutes plus tard, à environ 12 000 m (selon les indications de l'autre récepteur GPS).

GPS03 : Le récepteur GPS inclus dans l'IMU1 (GX5 de Lord) a fourni de bonnes données tout au long du vol, avec des interruptions pendant les périodes suivantes :

- entre 3:30:47Z et 3:38:07Z (8 minutes)
- entre 4:08:06Z et 4:08:41Z (33 secondes)
- entre 4:51:14Z et 4:51:35Z (31 secondes)
- entre 4:58:53Z et 4:59:19Z (26 secondes)
- entre 6:42:43Z et 6:48:33Z (environ 6 minutes)
- entre 6:48:34Z et 6:52:15Z (environ 4 minutes)



- entre 6:56:11Z et 6:56:27Z (16 secondes)

Les interruptions peuvent être dues à la réinitialisation ou à la reconfiguration de l'IMU1 pendant le vol dans le cadre de divers essais. À part cela, les données semblent cohérentes, le nombre de satellites utilisés étant plus élevé que celui du GPS01. Mais les valeurs de HDOP sont légèrement plus élevées (moins bonne qualité, mais toujours proche de 2, ce qui est considéré comme bon) que celles du GPS01.

4.4.2 ***DONNÉES D'ATTITUDE***

La section fournit des données d'échantillonnage provenant de l'unité de mesure inertielle principale (IMU1) installée sur le PRISM. L'unité contient un magnétomètre triaxial (MAG1), un accéléromètre triaxial (ACC1) et un gyroscope triaxial (GYR1), ainsi qu'une antenne et un récepteur GNSS (GPS03).

La photo ci-dessous montre la nacelle en cours de préparation pour un vol. Le système de coordonnées de la nacelle est illustré dans la figure qui suit la photo. Sauf indication contraire, toutes les mesures de l'IMU1 ont été exprimées selon le système de coordonnées de la nacelle.



Figure 18 : Nacelle en cours de préparation pour un vol

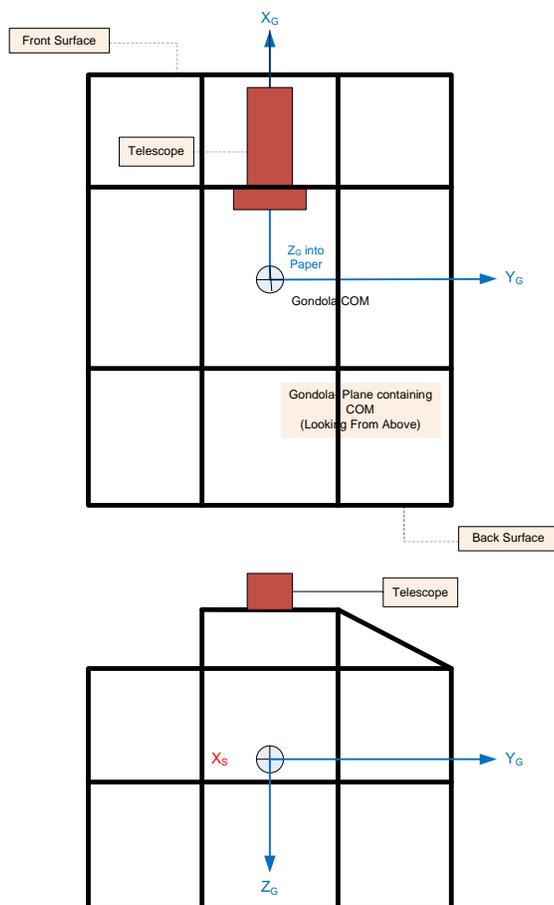


Figure 19 : Système de coordonnées de la nacelle

Cap de la nacelle

Le cap indique l'angle par rapport au nord vrai à $+X_G$. Dans cette section, nous présentons des données d'échantillonnage de cap fournies par le système (capteur IMU1). **REMARQUE IMPORTANTE :** Selon l'analyse des données, les estimations de cap ne représentent pas les caps vrais pendant la majeure partie de la période post-ascension. Plus précisément, elles ont commencé à devenir problématiques vers la fin de la période d'ascension lorsque la nacelle a atteint une altitude d'environ 30 km. Des études sont en cours pour déterminer les facteurs qui ont influé sur ces estimations.

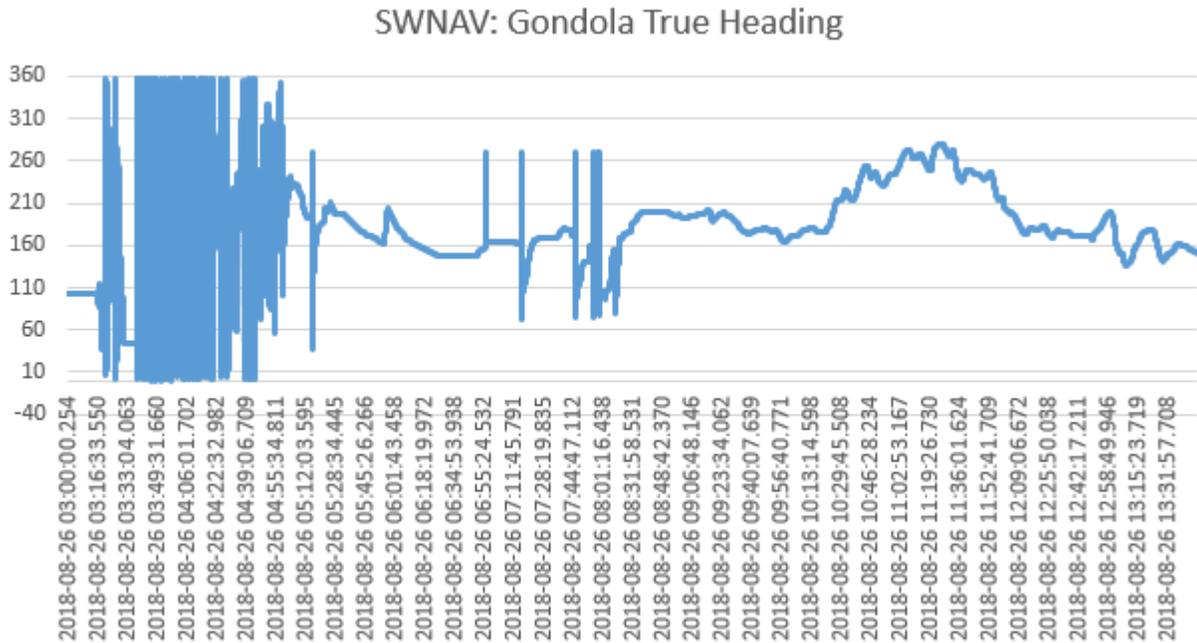


Figure 20 : NAVEM : Estimation du cap vrai de la nacelle – durée complète de vol

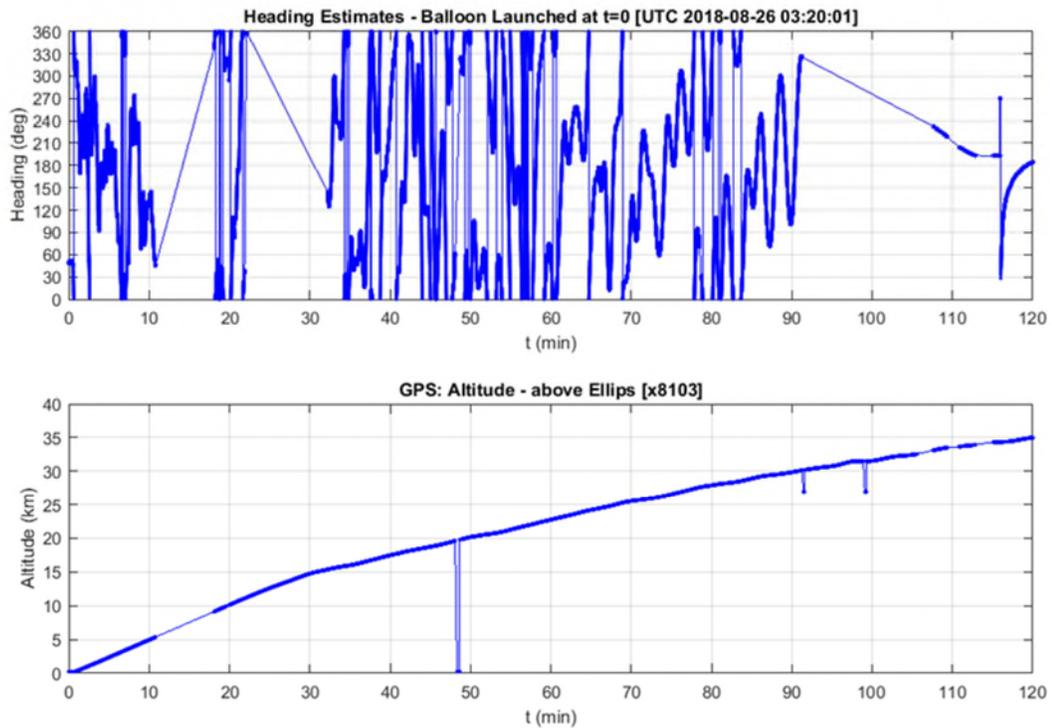


Figure 21 : NAVEM : Estimation du cap vrai et altitude de la nacelle – période d’ascension



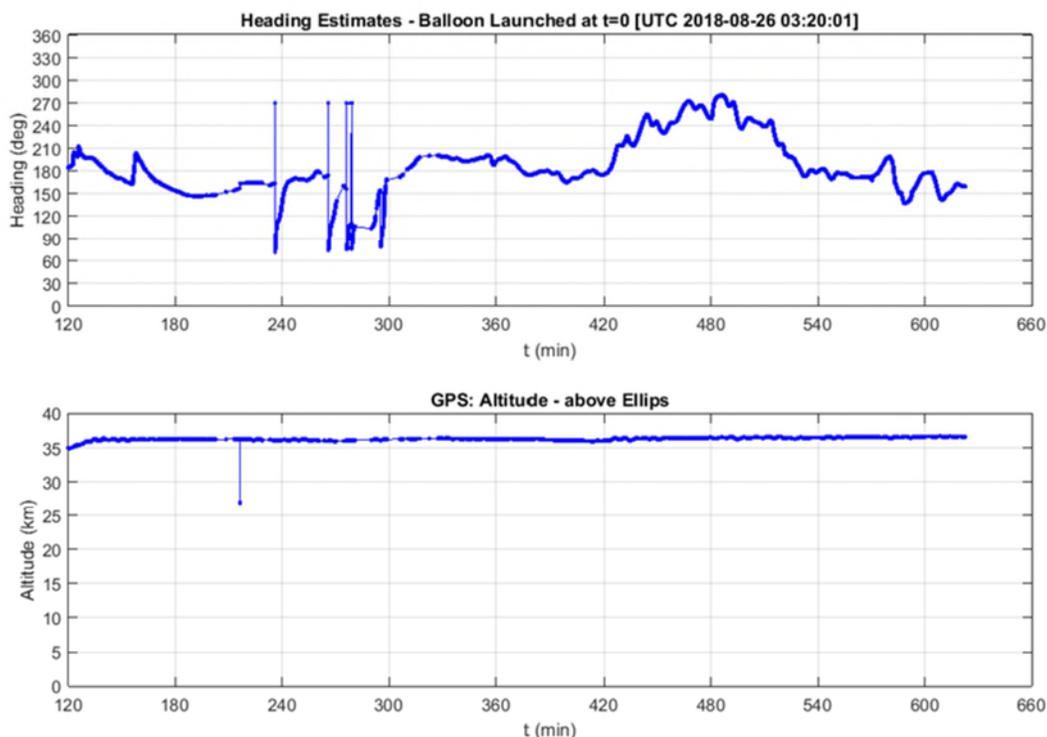


Figure 22 : NAVEM : Estimation du cap vrai et altitude de la nacelle – période post-ascension

Après le lancement, la période d’ascension (du lancement jusqu’au plafond) a duré environ 2 heures, pendant lesquelles la nacelle a été en rotation libre sans application du contrôle du cap. C’est ce qu’indiquent les données de cap pendant cette période, données qui sont beaucoup plus volatiles que celles de la période ultérieure de vol. Lorsque la nacelle a atteint le plafond, elle a été stabilisée en cap pour effectuer des expériences scientifiques. Toutefois, comme nous l’avons mentionné précédemment, pendant la majeure partie de la période qui a suivi l’ascension, les estimations de cap ont été problématiques; et des études sont en cours pour déterminer les causes des erreurs de cap.

Roulis et tangage de la nacelle : Les graphiques suivants montrent les profils de roulis et de tangage de la nacelle pendant toute la période de vol. Pendant l’ascension, on observe une inclinaison de plus de 10 degrés. L’attitude de la nacelle est stabilisée environ 2 heures après le lancement, soit vers 5:15 UTC. Pendant le vol stabilisé, l’inclinaison reste à environ 0,3 degré. Certains dépassements dans les estimations de roulis et de tangage peuvent être causés par des erreurs de filtre.



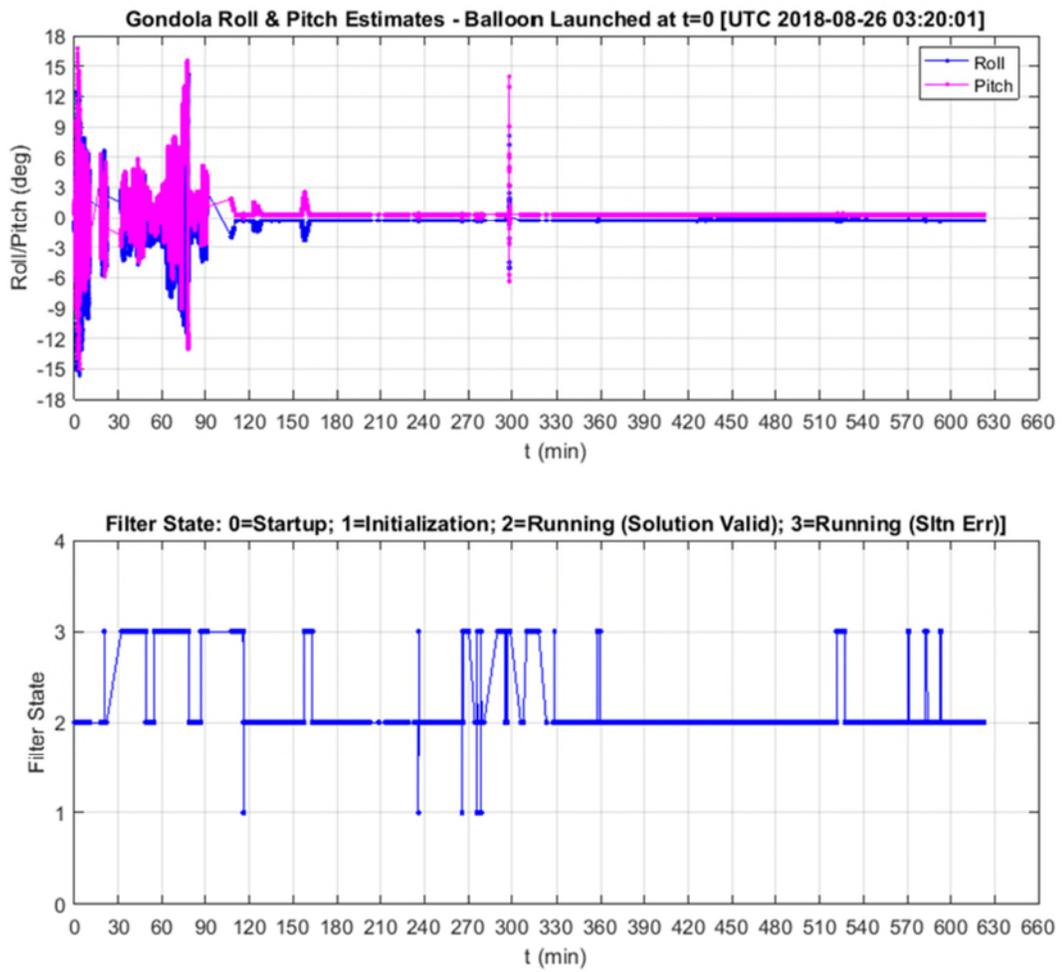


Figure 23 : SWNAV : Estimations du roulis et du tangage de la nacelle et état du filtre – durée complète



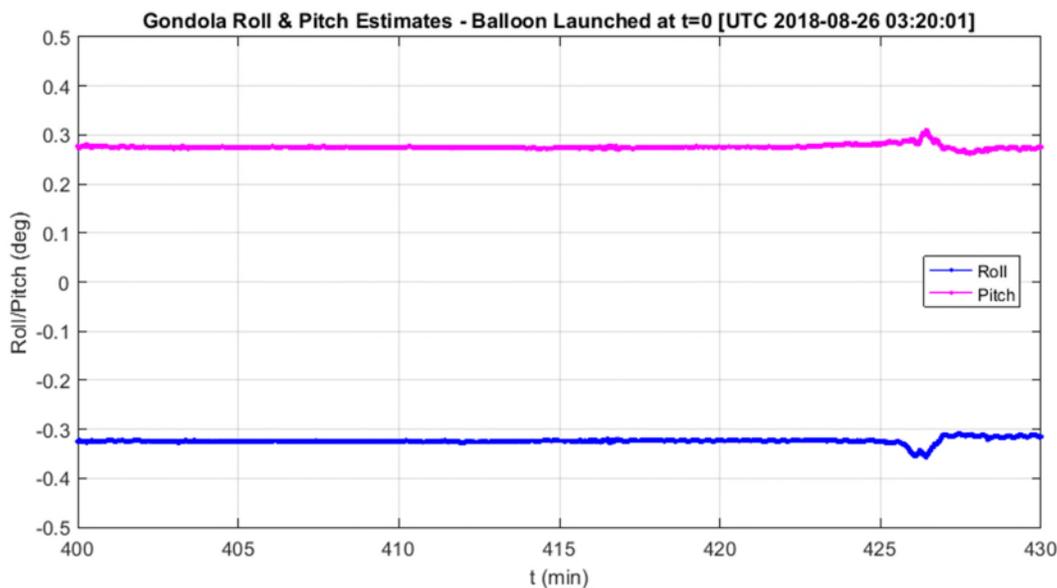


Figure 24 : SWNAV : Roulis et tangage de la nacelle – agrandissement de la période de lever du soleil

4.4.3 DONNÉES CINÉMATIQUES, DYNAMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES

La section contient des données d'échantillonnage tirées de l'unité de mesure inertielle principale (IMU1) installée sur le PRISM. L'unité contient un magnétomètre triaxial (MAG1), un accéléromètre triaxial (ACC1) et un gyroscope triaxial (GYR1), ainsi qu'une antenne et un récepteur GNSS (GPS03).

Vitesse linéaire de la nacelle : Le premier graphique montre la vitesse NED de la nacelle fournie dans SWNAV, qui provient d'estimations d'un filtre embarqué. On observe qu'au cours de l'ascension du ballon, il y a eu des périodes où le drapeau de validité de la vitesse NED avait la valeur « 0 », indiquant une « estimation non valide ». Des estimations divergentes de la vitesse nord/est ont été observées et correspondent à des valeurs de drapeau de validité « 0 ». *Remarque : Les composantes de vitesse nord-est-bas ont été exprimées dans le système de coordonnées nord-est-bas. Pendant l'ascension, la direction de la Vd pointait vers le haut, indiquée par les valeurs négatives.*



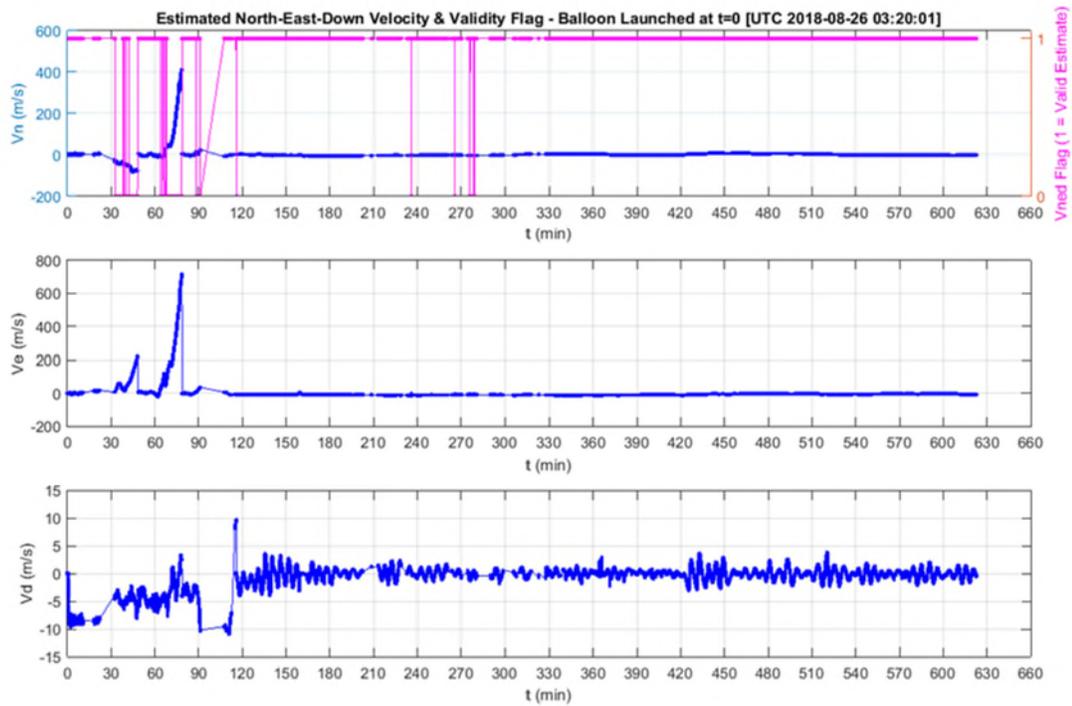


Figure 25 : SWNAV : Vitesse NED estimée de la nacelle et drapeau de validité

Le graphique ci-dessous montre les composantes de la vitesse NED autour du lever du soleil.

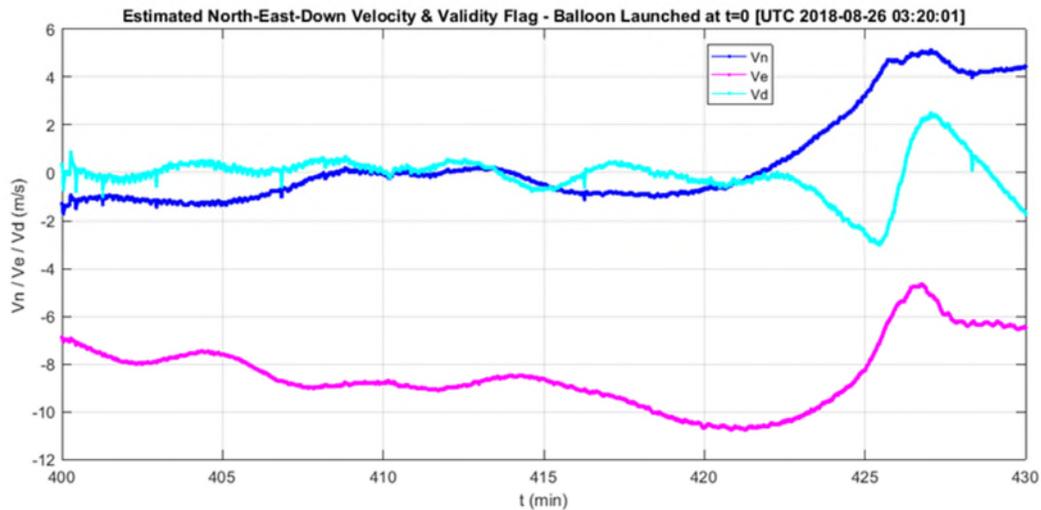


Figure 26 : SWNAV : Vitesse NED de la nacelle – agrandissement de la période autour du lever du soleil

Vitesses angulaires : Le graphique montre que la nacelle a eu les mouvements angulaires les plus volatiles pendant l’ascension, avec une vitesse angulaire de lacet de pointe de 25 degrés/s.



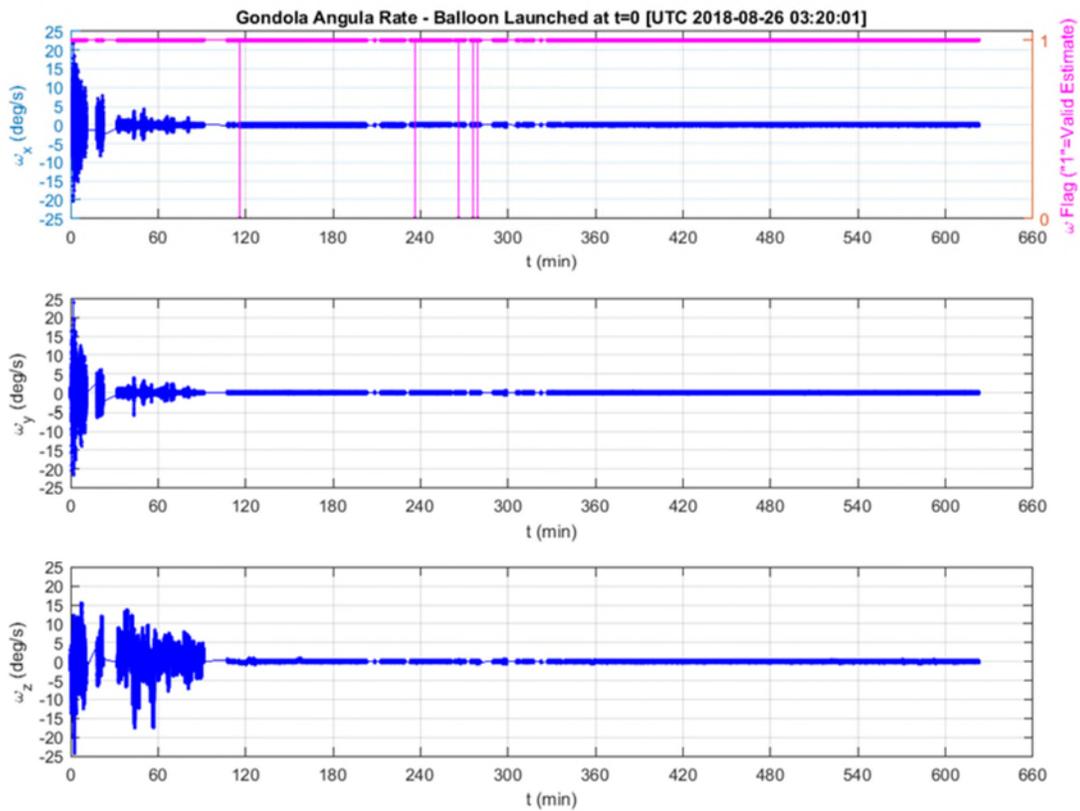


Figure 27 : SWNAV : Vitesses angulaires de la nacelle dans les axes X, Y, Z en degrés/s – durée complète

Accélérations linéaires : Le graphique ci-dessous montre que la nacelle a maintenu une accélération linéaire (gravité enlevée) d’au plus 3 m/s² pendant l’ascension.



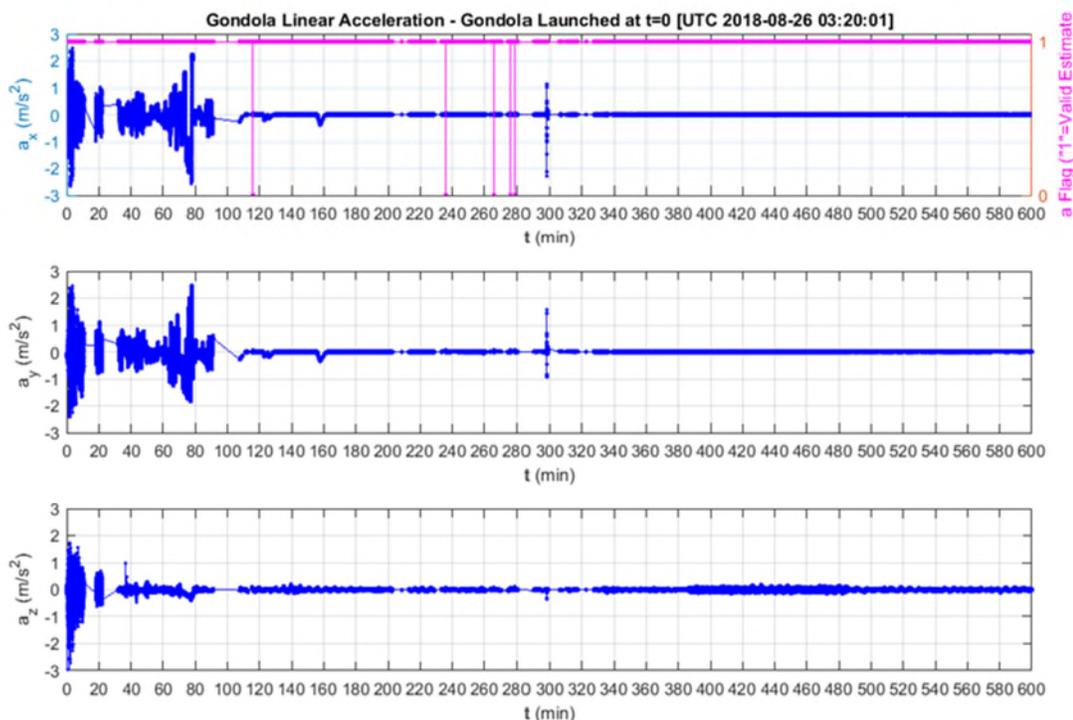


Figure 28 : SWNAV : Accélération linéaire de la nacelle dans les axes X, Y, Z – durée complète

4.4.4 DIRECTION SOLAIRE

Parmi les données que PRISM a fournies par multidiffusion aux instruments scientifiques, il y a la position du Soleil pendant le vol. PRISM a aussi fournit un drapeau indiquant si le Soleil est visible.

Pour calculer la position du Soleil, PRISM a utilisé la bibliothèque Java SunPosition.jar développée par Klaus Brunner (klaus@brunners.name) et disponible sur le site :

<https://github.com/KlausBrunner/solarpositioning>. Cette bibliothèque fournit les angles d’azimut et d’élévation du Soleil en fonction de la longitude, de la latitude, de la hauteur et de l’heure locale, que le logiciel PRISM utilise pour calculer la direction solaire dans le système de coordonnées de la nacelle et déterminer la visibilité du Soleil.

PRISM a prédit que la nacelle pourrait voir le Soleil à 10:09:17 UTC (altitude de 36,1 km). Cette prédiction a été corroborée par les photos prises aux 2 minutes environ par PRISM (caméra au fond de la nacelle et pointant vers l’horizon). Le calcul a utilisé un rayon terrestre fixe de 6 378 140,0 m, et il n’a pas inclus la correction du rayon du disque solaire de 0,8 degré.



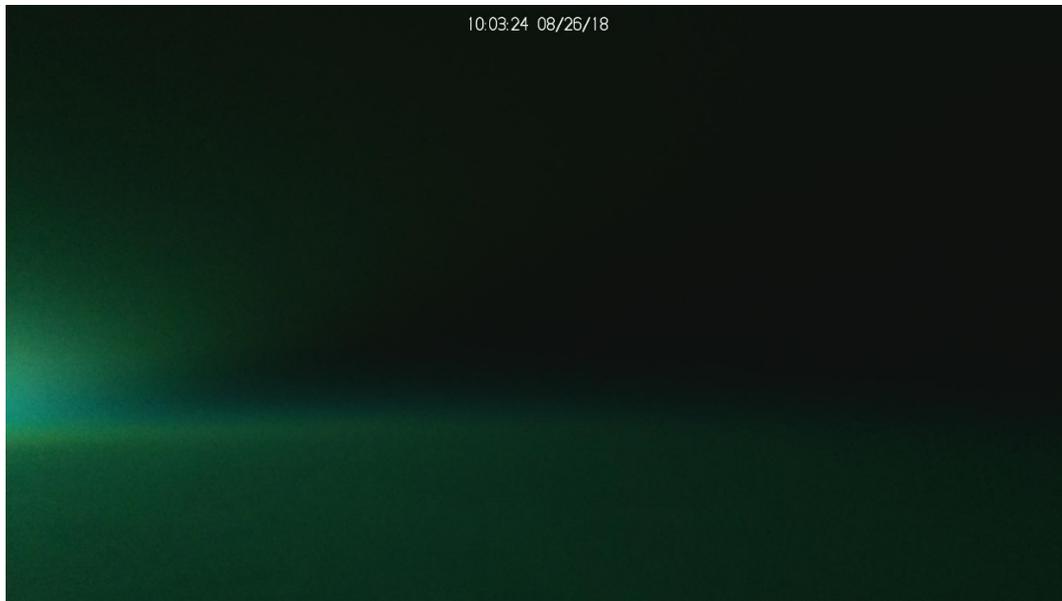


Figure 29 : Vue de l'horizon à 10:03:24

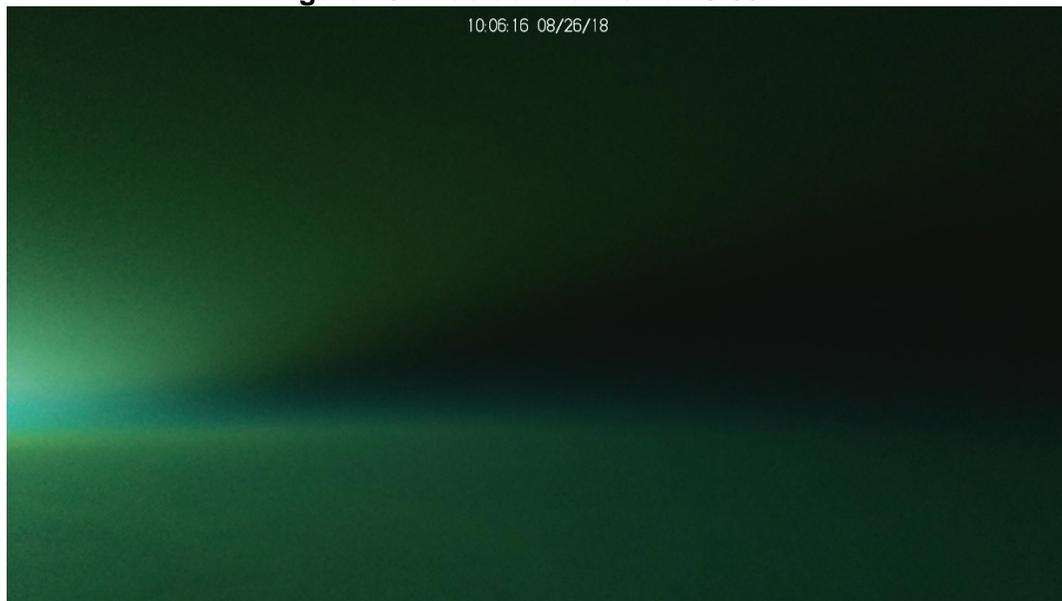


Figure 30 : Vue de l'horizon à 10:06:16



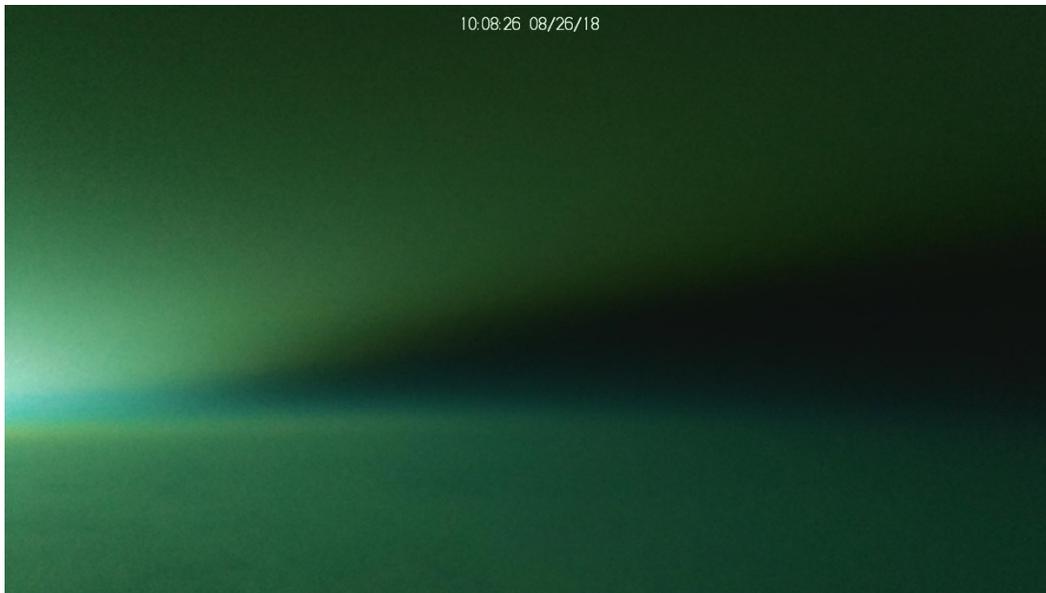


Figure 31 : Vue de l'horizon à 10:08:26

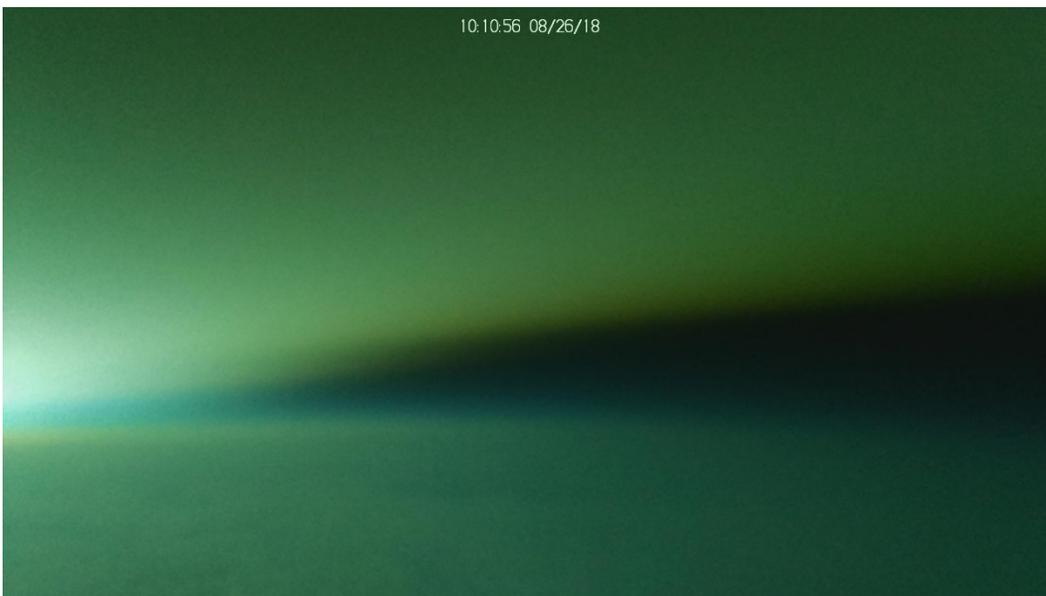


Figure 32 : Vue de l'horizon à 10:10:56



Hauteur du soleil : Le SWNAV indique la hauteur du Soleil (angle au-dessus de l’horizon). Une hauteur de zéro est signalée à 10:44Z. Il est à noter que les calculs sont effectués pour déterminer la hauteur du Soleil du point de vue d’un observateur au niveau de la mer, ce qui explique la différence entre l’heure indiquée au moment où le Soleil devient visible (pour un observateur dans la nacelle) et celle qui correspond à une hauteur zéro. *Nous prévoyons mettre à jour le calcul de la hauteur du Soleil lors des prochains vols, de sorte que la hauteur du Soleil et la visibilité du Soleil seront calculées selon le point de vue d’un observateur dans la nacelle.*

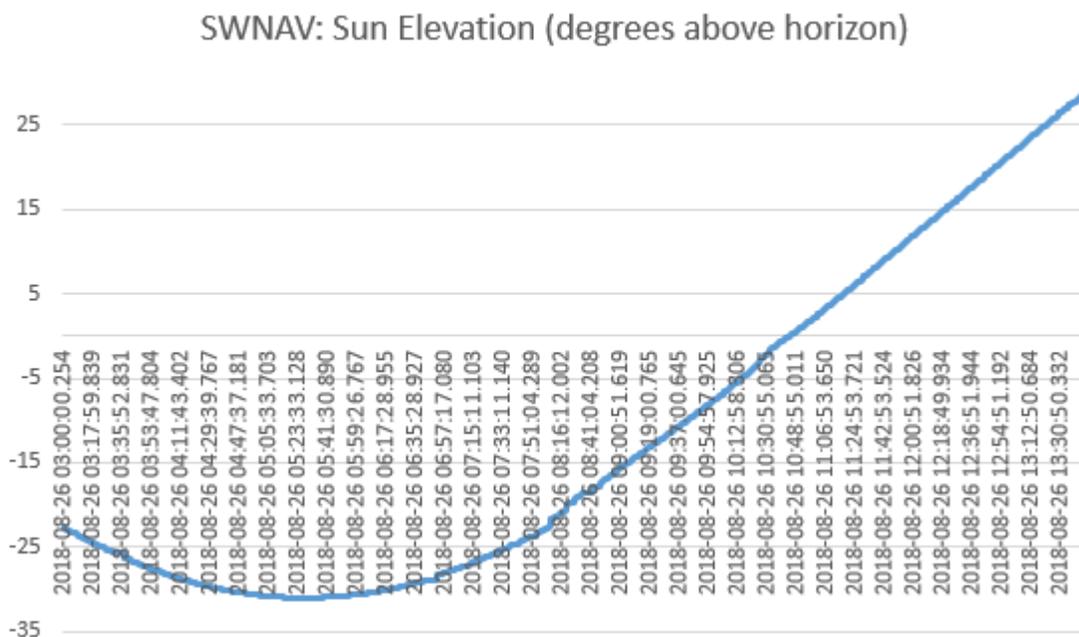


Figure 33 : SWNAV : Hauteur du Soleil pour un observateur au niveau de la mer – durée complète



4.5 TÉLÉMÉTRIE LOGICIELLE DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

4.5.1 TEMPÉRATURE, PRESSION ET HUMIDITÉ

Dans la présente section, nous présentons des données d'échantillonnage recueillies par le SWEM qui fonctionne sur le NAVEM, et relatives à l'environnement (p. ex. température, pression et humidité).

Températures : Le SWEM a détecté la température externe (capteur TEMP1) et la température interne de l'enceinte (capteur TEMP2). Au lancement, les températures interne et externe différaient d'un peu plus de 20 °C, en raison de l'électronique à l'intérieur de l'enceinte. La température externe a rapidement chuté à environ -45 °C (notez que la spécification du capteur TEMP1 indique une température minimale de -40; donc, à partir de ce point, nous sommes hors de la plage du capteur) dans la tropopause, puis elle a remonté aux alentours de -35 °C, pour rester constante jusqu'après le lever du soleil (11:00Z environ). La lecture de la température externe a augmenté à 10 °C, mais cela pourrait être dû au soleil qui a réchauffé l'enceinte du capteur (à confirmer). Entre-temps, la température interne a lentement chuté de 40 °C à environ 7 °C, puis elle a lentement augmenté de nouveau lorsque le Soleil est monté au-dessus de l'horizon. À noter que la température interne n'a pas semblé atteindre un état stable, et qu'elle a encore baissé très lentement avant de recommencer à augmenter.

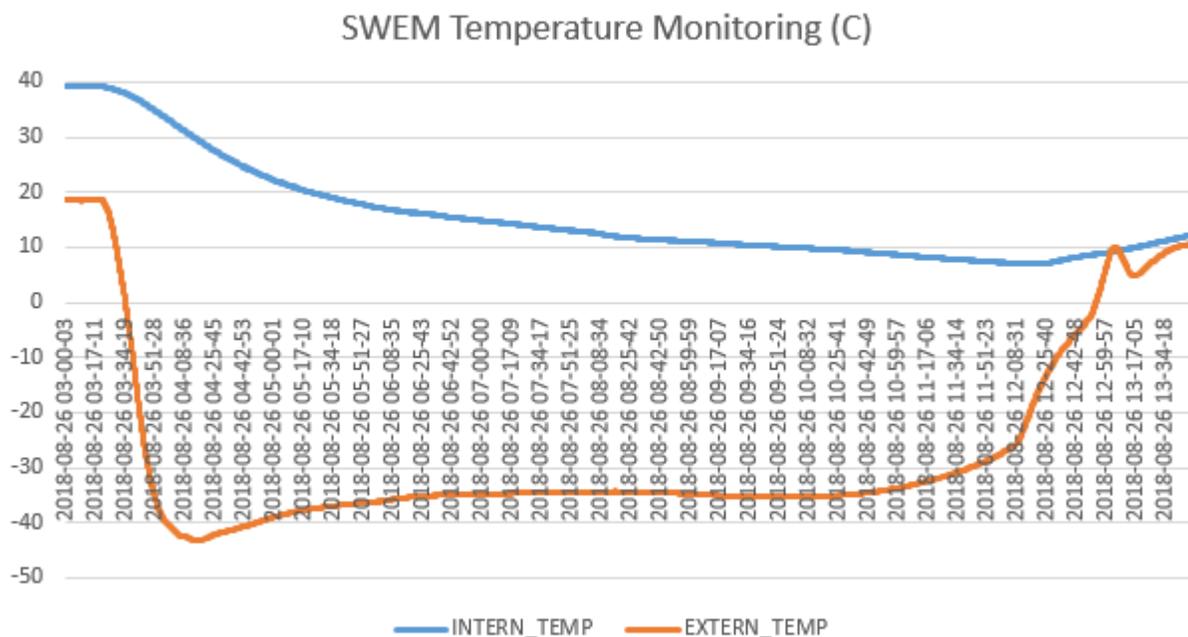


Figure 34 : Surveillance de la température par le SWEM – durée complète

Humidité relative : L'humidité relative a été mesurée par le SWEM (capteur HUMID1). Il est à noter qu'avant le lancement, le taux d'humidité à proximité du capteur était extrêmement bas (proche de zéro) en raison des mécanismes de purge utilisés sur les charges utiles optiques. Il a rapidement augmenté jusqu'à 65 % pendant l'ascension, mais il est redescendu, d'abord autour de 15 %, puis il a baissé graduellement sous 5 % pendant le reste (soit la majeure partie) du vol.



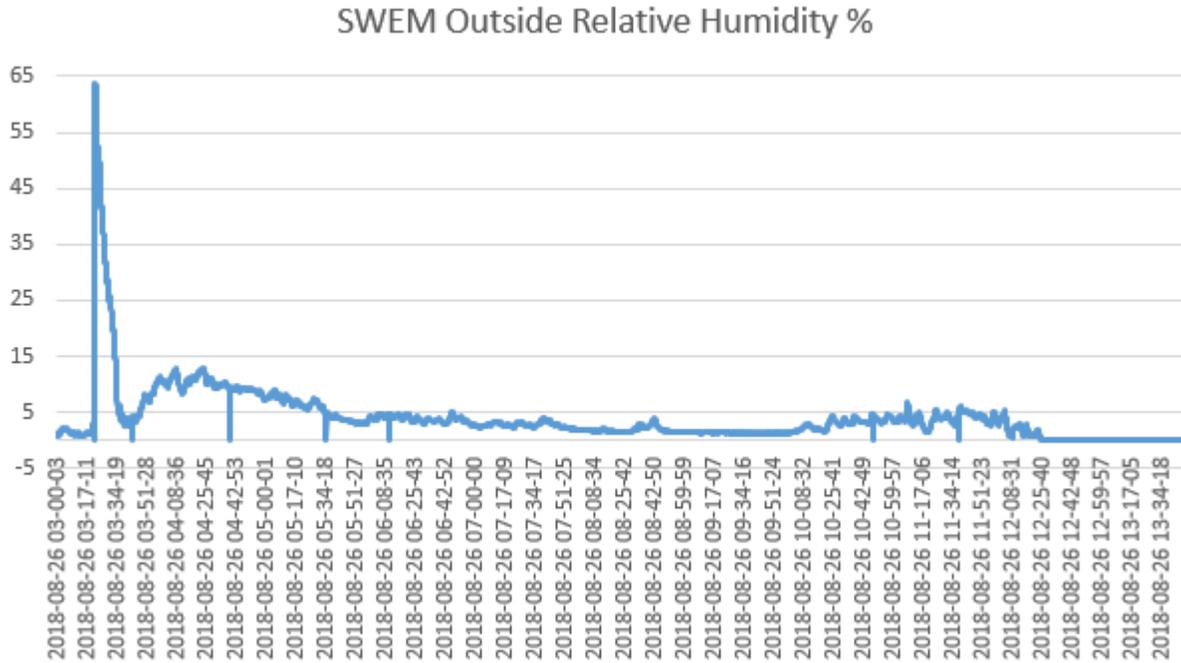
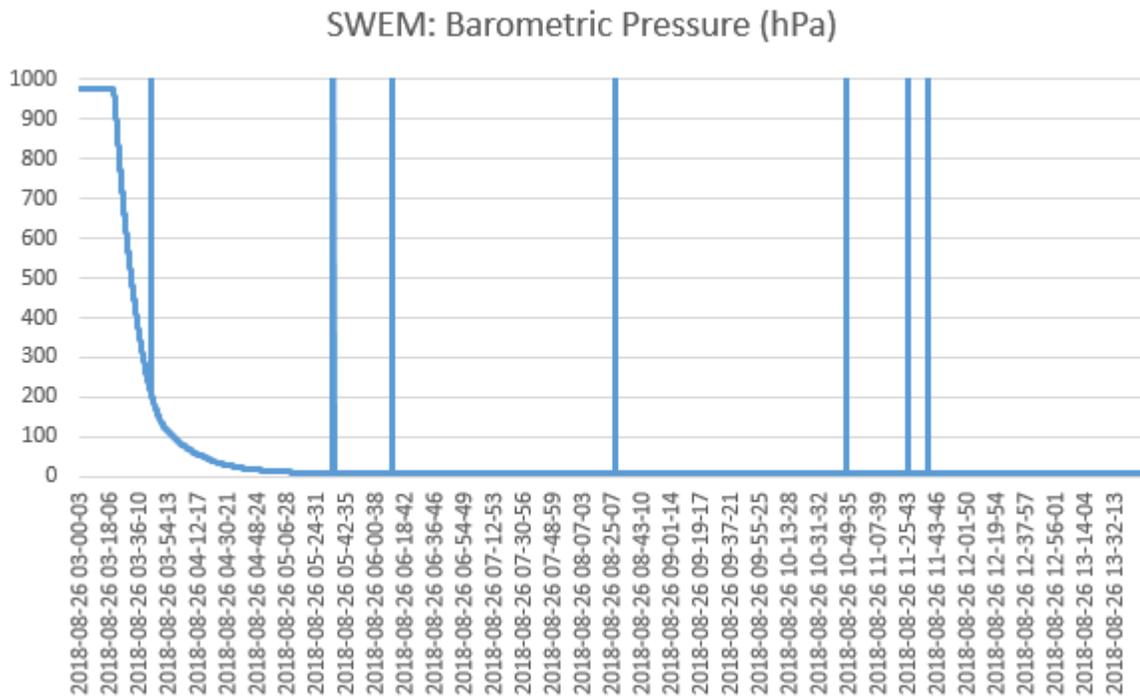


Figure 35 : Surveillance de l'humidité relative par le SWEM – durée complète



Pression barométrique : Le SWEM a détecté la pression barométrique (capteur PRESS1). Les valeurs ont commencé à environ 980 hPa au niveau du sol, pour descendre à environ 8 hPa au plafond. Il est à noter que les spécifications du capteur PRESS1 indiquent que le minimum est de 300 hPa, donc notre capteur est hors plage à partir de ce point. Cependant, la valeur de 8 hPa est proche de ce à quoi on pourrait s’attendre à une altitude de 36 km. Il faut aussi noter que nos données échantillonnées contiennent 7 valeurs aberrantes, mais que les autres valeurs semblent être très cohérentes.



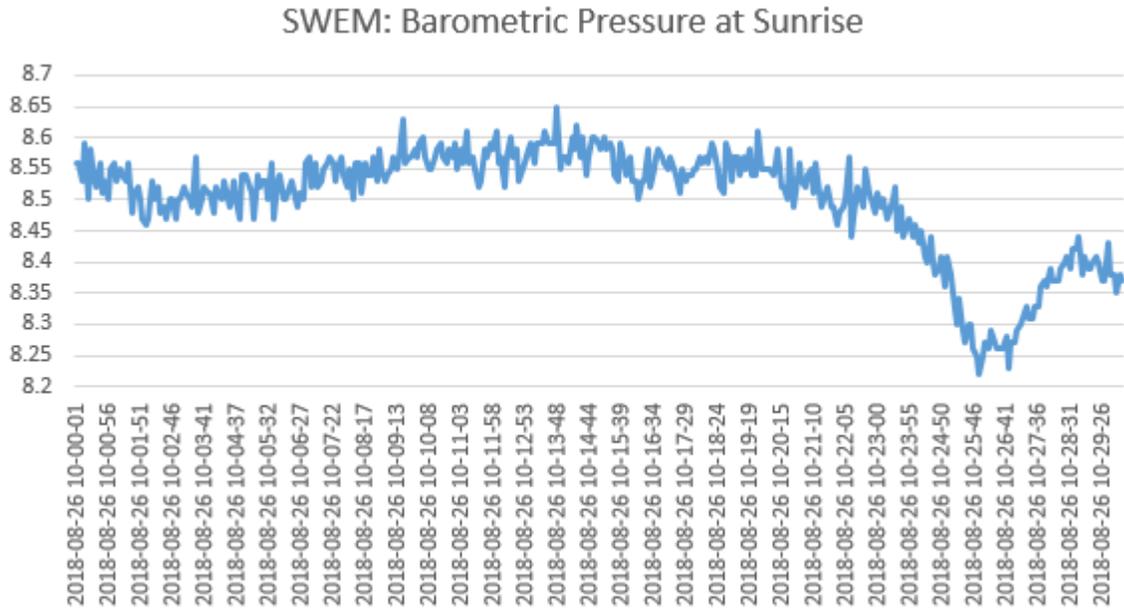


Figure 36 : SWEM : Pression barométrique (hPa) – 30 minutes au lever du soleil

Choc : Le SWEM n’a enregistré aucun choc important pendant le vol. Il faut toutefois préciser que le système a été éteint avant la descente, et nous n’avons donc pas d’échantillons pendant la descente (parachute) ni l’atterrissage.



5 MESURES DES MAGNÉTOMÈTRES

5.1 INTRODUCTION

Au cours de ce vol, trois magnétomètres étaient à bord du PRISM : MAG1 (dans 3DM-GX5-45 de LORD), MAG2 (dans l'IMU LSM9DS1) et MAG3 (dans le dispositif de suivi des mouvements MPU9250); voir la section **Error! Reference source not found.** pour plus de détails. La présente section fournit des données enregistrées en vol par les deux capteurs.

5.2 DONNÉES DU MAGNÉTOMÈTRE (MAG1) PROVENANT DE L'IMU 3DM-GX5-45

Les composantes et l'amplitude des mesures du MAG1 sont présentées dans le graphique ci-dessous, dans lequel les composantes X/Y/Z sont exprimées dans le système de coordonnées de la nacelle. L'amplitude du vecteur de champ magnétique mesuré par MAG1 est aussi comparée à l'amplitude du vecteur de champ magnétique terrestre calculé selon le modèle magnétique mondial (WMM). Les perturbations magnétiques ambiantes des mesures par MAG1 sont apparentes dans le graphique des amplitudes pour les MAG.

Remarque : 1) Les valeurs WMM ont été fournies par le capteur 3DM-GX5-45. 2) L'amplitude d'un vecteur de champ magnétique est indépendante de l'attitude du capteur. Par conséquent, on peut bien constater l'amplitude des perturbations magnétiques ambiantes en comparant les amplitudes du vecteur de champ magnétique mesuré et celles du vecteur WMM calculé.



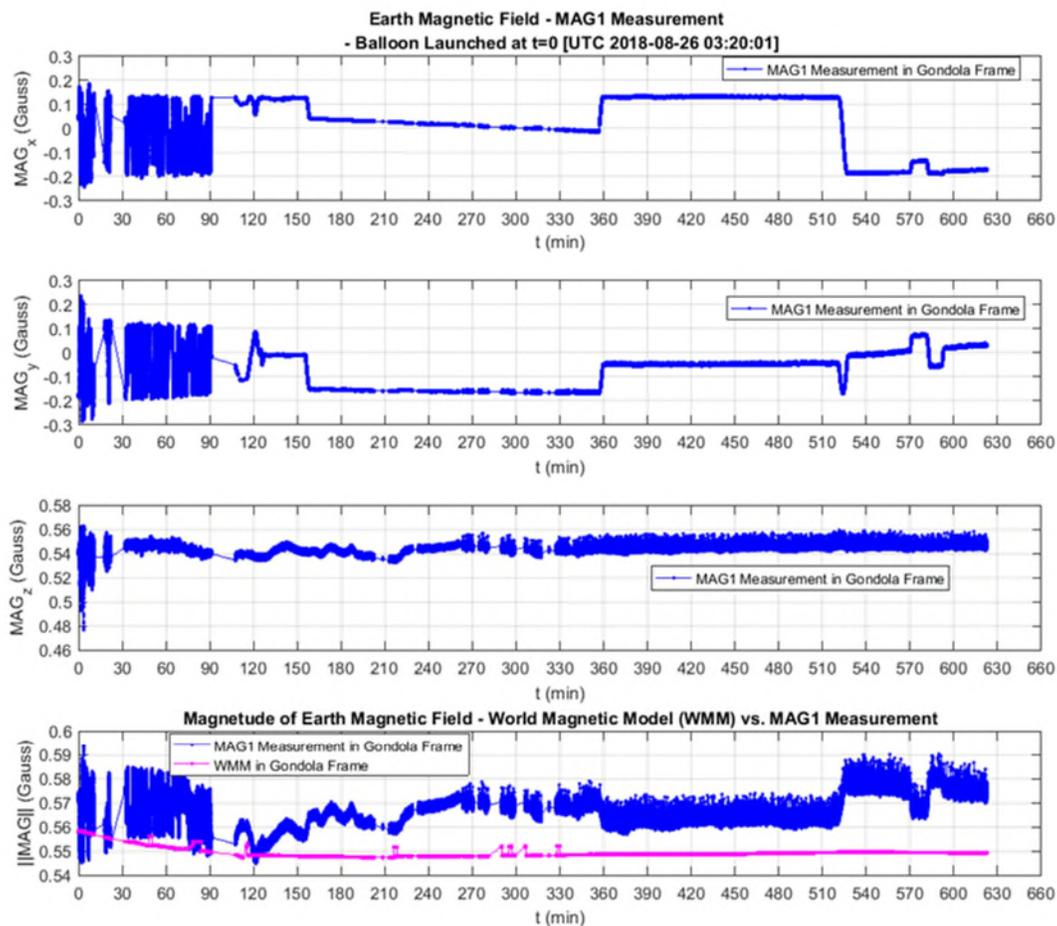


Figure 37 : Amplitude du champ magnétique mesuré par MAG1 et du champ magnétique calculé selon le WMM

5.3 DONNÉES DU MAGNÉTOMÈTRE (MAG2) PROVENANT DE L'IMU LSM9DS1

Le graphique ci-dessous présente le vecteur de champ magnétique mesuré par MAG2, dans lequel les composantes X/Y/Z désignent les axes du capteur. Dans ce cas, les axes du capteur MAG2 n'étaient pas alignés avec les axes correspondants du système de coordonnées de la nacelle. De plus, on voit que l'amplitude du vecteur magnétique mesuré par MAG2 se situe entre 60 et 77 μT , ce qui est très supérieur à l'amplitude du vecteur du champ magnétique terrestre calculé selon le WMM (entre 54,8 et 56 μT). Cette grande différence d'amplitude indique soit que les mesures du MAG2 étaient incorrectes, soit que le MAG2 était perturbé par une source magnétique très forte à proximité. Une étude plus approfondie est nécessaire pour tirer des conclusions.



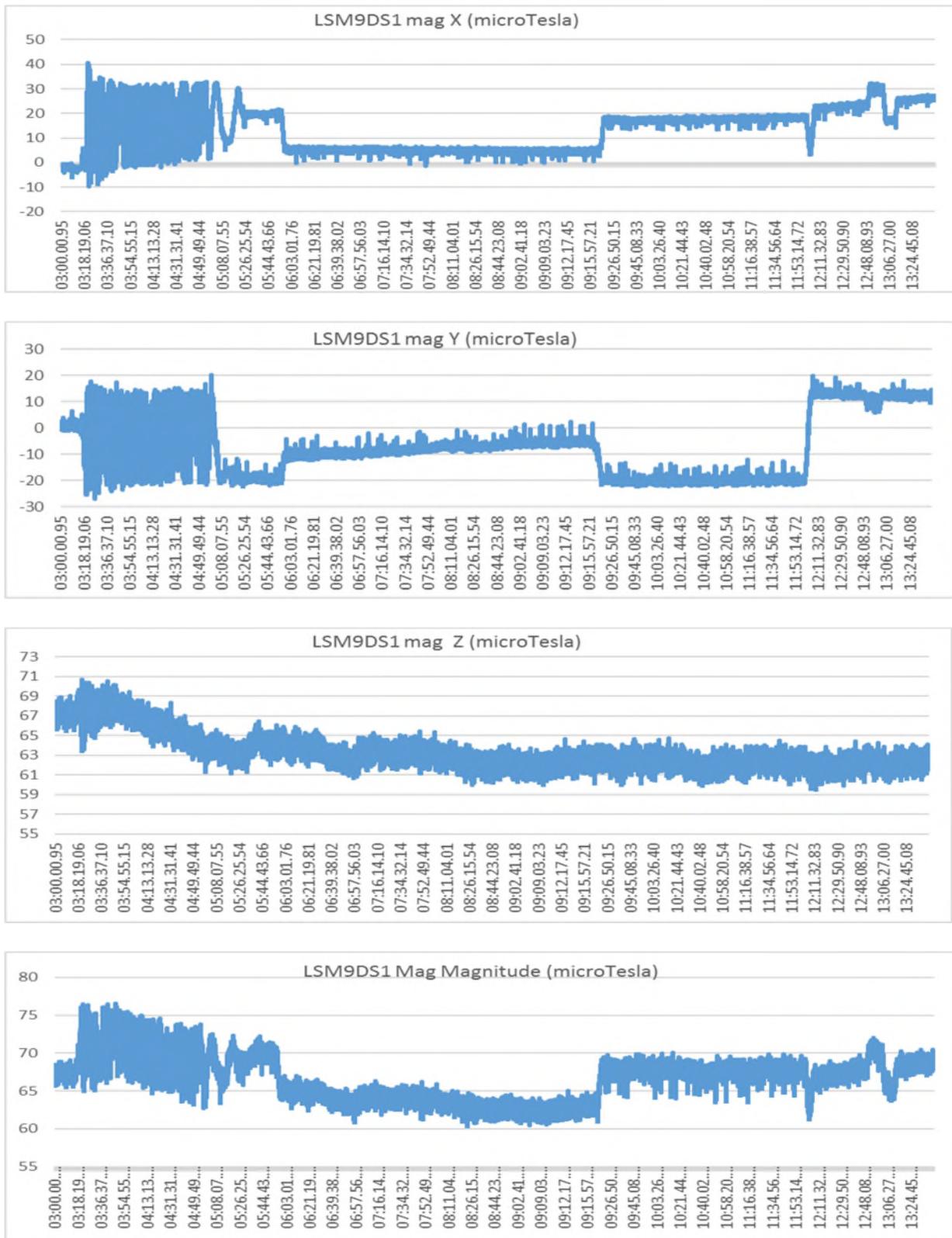
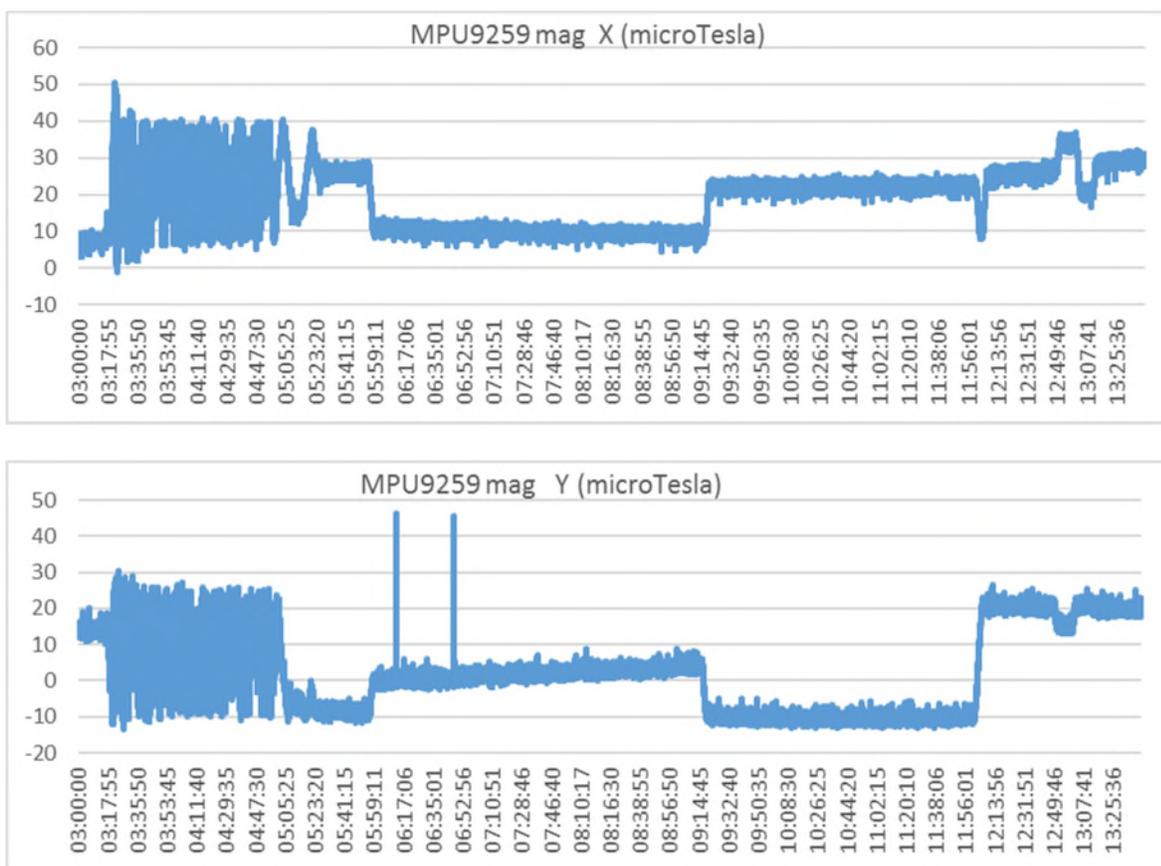


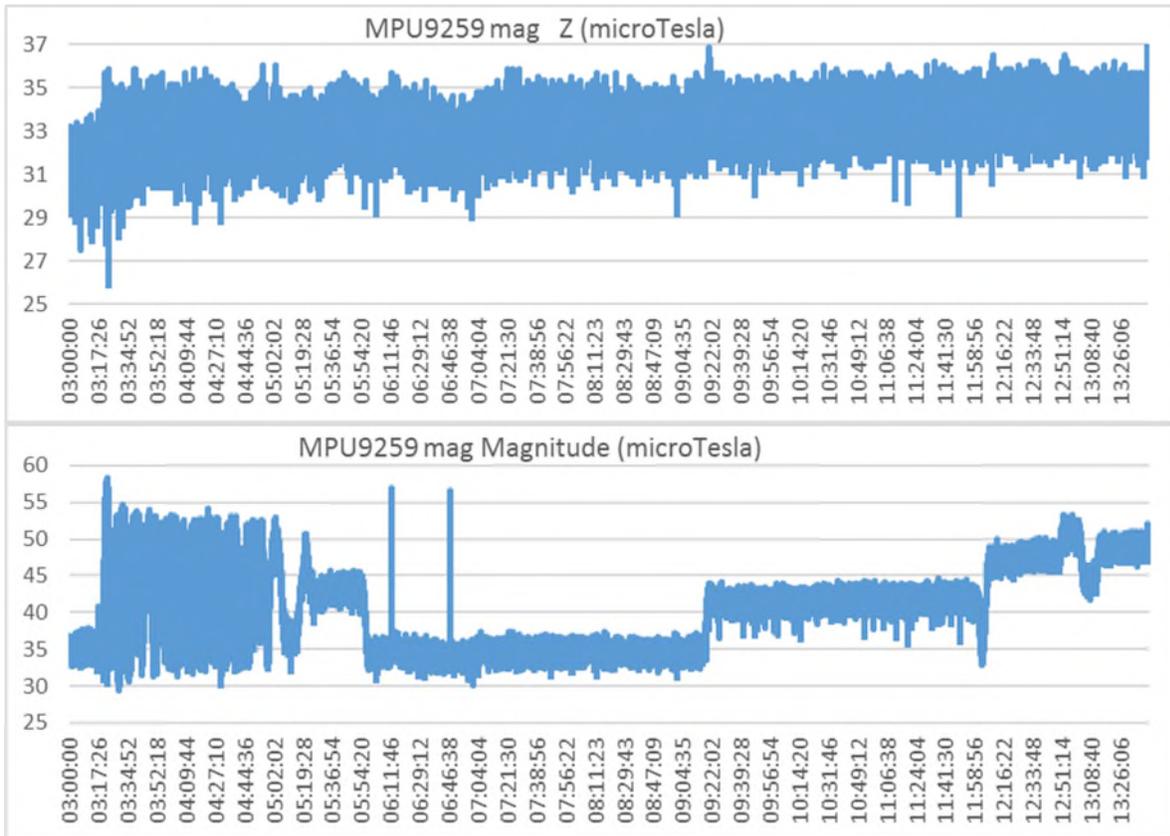
Figure 38 : Champ magnétique mesuré par MAG2



5.4 DONNÉES DU MAGNÉTOMÈTRE MPU9250

Le graphique ci-dessous montre le vecteur de champ magnétique mesuré par MAG3, dans lequel les composantes X/Y/Z correspondent aux axes du capteur. Dans ce cas, les axes du capteur MAG3 n'étaient pas alignés avec les axes correspondants au système de coordonnées de la nacelle. De plus, on constate que l'amplitude du vecteur magnétique mesuré par MAG3 se situe entre 29 et 58 μT , où la plupart des échantillons sont considérablement plus petits que l'amplitude du vecteur du champ magnétique terrestre calculé selon le WMM (entre 54,8 et 56 μT). De nouveau, la grande différence d'amplitude indique soit que les mesures du MAG3 étaient incorrectes, soit que le MAG3 était perturbé par une très forte source magnétique à proximité. Une étude plus approfondie est nécessaire pour tirer des conclusions.





6 SOUS-SYSTÈME DU CONTRÔLEUR E/S

6.1 INTRODUCTION

Le sous-système du contrôleur d'entrée-sortie (IOCTL) est un ordinateur monocarte de Rabbit. Il comporte des convertisseurs analogique-numérique utilisés pour surveiller la tension interne du PRISM.

6.2 EMBLACEMENT DES DONNÉES

- Données de servitude de SWNAV :
 - Fichier Flight/IOCTL/ioctl_hkp.txt
 - Onglet IOCTL_IOCTLRL_HKP dans le fichier Flight/FlightData.xlsx

6.3 DONNÉES DE SURVEILLANCE DE L'ALIMENTATION EMBARQUÉE

Surveillance de la tension interne : À partir des données recueillies, nous pouvons voir que les sorties de tension des convertisseurs c.c./c.c. dans le PRISM ont été très stables pendant tout le vol.

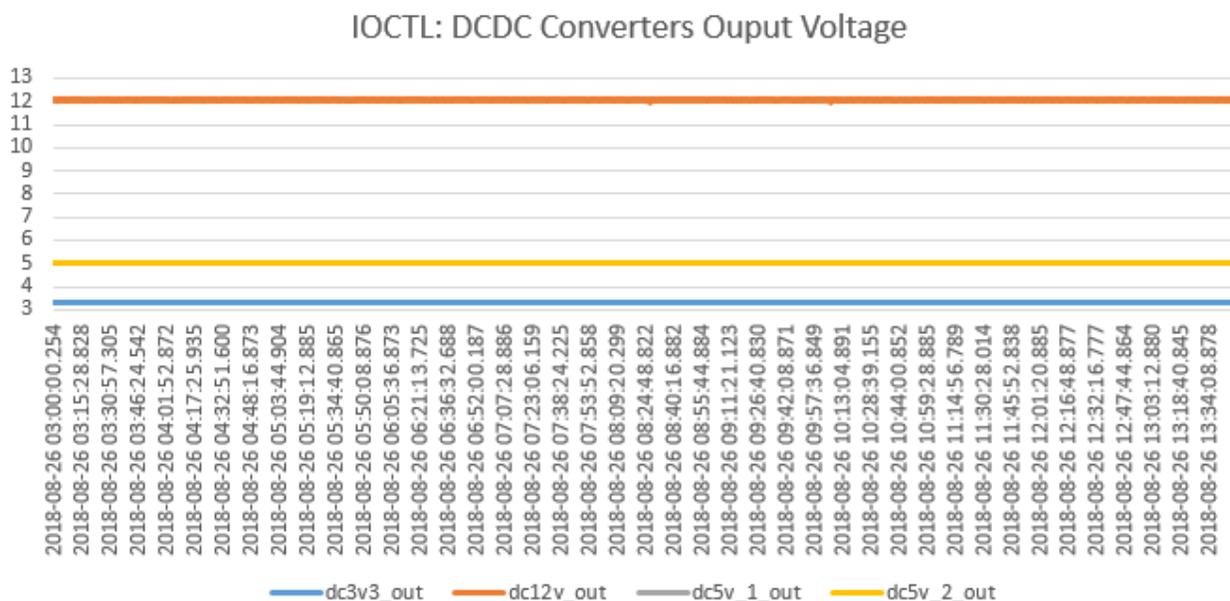


Figure 39 : IOCTL : Surveillance de la tension de sortie des convertisseurs c.c./c.c. – durée complète

- Fin du document -

