CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES



Direction des Lanceurs

Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie

CODE IDENTIFICATIO	N PROJET						
PER-RE-34-2	ZZ-8-GRF						
EDITION : 0 REVISION : 3							
Date édition ou dernière révisio	n : 08/09/2014						
Annexes Supplémentaires (piè	ces jointes) :						
Référence interne :							
Classe : 1 Catégorie : 4							

ERSEUS

Exploitation Niveau 0 de SERA-1

	Nom et le sigle	Date et signature	Liste de diffusion	Nb Nb
			C.DUPONT – BERTIN	1
	R.DELPY		S.PERNON - IPSA	1
Rédigé par	R.GRANDGUILLOT		B.HUGUES - OCTAVE	1
	GAREF		V.GUINET – SupaeroSpaceSection	1
Vérifié par	B.SCACHE			
	GAREF			
Application				
autorisée par				
Davia				
approbation				
			DLA/CQR/BT	1

CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

Siège 2 place Maurice Quentin - 75039 Paris Cedex 01 Tél. : 01 44 76 75 00 / Téléfax 01 44 76 76 76 CNES/DLA 52 rue Jacques HILLAIRET - 75012 PARIS Cedex Tél. : 01 80 97 71 11

Site Internet : http://www.cnes.fr

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 2/91	Edition : 0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

FICHE DOCUMENTAIRE

RESUME DE SYNTHESE

La fusée SERA 1 a été lancée de la base SSC en Suède le 7 MAI 2014 à 13h10min00s UTC. Cette fusée est la première fusée **supersonique** du projet PERSEUS depuis 2005. Développée en partenariat avec l'IPSA et l'association AéroIPSA, le GAREF Aérospatial, l'Université d'Evry avec l'association OCTAVE, l'ISAE - SupAéro avec l'association S3 (SupaeroSpaceSection) et Bertin Technologies, cette fusée est à présent le standard PERSEUS d'un point de vue performances mais également organisation projet et campagne.

Voici en résumé les caractéristiques de ce lancement :

- Masse au décollage : 25.75 kg
- Temps de vol : 305.7 s
- Propulseur : CESARONI Pro98-3G Green 3
- Masse de propergol embarqué : 8.64 kg
- Hauteur : 2.971 m
- Diamètre maximal (sans ailerons) : 160 mm
- Envergure des ailerons : 180 mm
- Mach max : 1.39
- Vitesse max : 450 m/s
- Angle de tir : 80°
- Centre de tir : SSC sur le pas de tir MRL (Multi Range Launcher)
- Altitude max atteinte : 5500 m (hauteur max de 5200 m)

Pour rappel, voici les différents intervenants du projet SERA 1 :

- **CNES** : Chef de projet PERSEUS / Mise en œuvre propulsion
- BERTIN TECHNOLOGIES : Chef de projet SERA 1 / Assistance à la maitrise d'œuvre
- IPSA / AEROIPSA : Responsable de la fusée Chef de projet ARES Support technique
- GAREF AEROSPATIAL / GAREF PARIS PERSEUS : Responsable des systèmes électriques / Responsable des systèmes sol (avec moyens du centre de tir SSC) / Etudes systèmes & sauvegarde.
- S3 (SupaéroSpaceSection / ISAE) : Association étudiante responsable de la réalisation de la case électronique, responsable de l'architecture mécanique générale.
- OCTAVE (Organisme de Créations Technologiques Aérospatial de la Ville d'Evry) : Association étudiante responsable du système de séparation/récupération, de la pointe anémoclinométrique, de la case « charge utile », du système d'arrachage des ombilicaux sur rampe et de manière plus générale de sous-systèmes mécaniques.
- SSC (Swedish Space Center) : Centre de lancement suédois basé à Kiruna

Nom: R.DELPY

Signature :

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 3/91	Edition : 0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

CONFIDENTIALITE ET MEDIAS DE DIFFUSION AUTORISES						
Classe du Média autorisé (pour information						
document (cochez)	Classe		Support physique	Réseau informatique Protégé		
Х	1	Grand Public	oui	non		
2 Industrie- Projet – Projet PERSEUS		oui	non			
	3 Diffusion restreinte - Projet PERSEUS		oui	oui		
	4	Confidentiel – Projet PERSEUS	oui	oui		

Contrat :

CATEGORIE					
Catégorie du document Catégorie Libellé (cochez)					
	1	Configuré pour acceptation / approbation			
2 Non configuré pour acceptation / approbation					
3 Non configuré pour acceptation					
Х	X 4 Autres				

	HISTORIQUE DES MODIFICATIONS							
Edition	Révision	Date	Chapitres ou pages modifiés / Raison / Nature de l'évolution					
0	1	07/07/2014	Création du document par RD					
0	2	24/07/2014	Ajout par RG + Diffusion pour relecture					
0	3	08/09/2014	Modifications mineures / Ajouts de caractéristiques mécanique de la fusée					

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 4/91 Edition :0	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

SOMMAIRE

1	TABLE DES FIGURES & TABLEAUX 1.1 FIGURES 1.2 TABLEAUX	6 6 7
2	REFERENCES	7
3	INTRODUCTION	8
4	PRESENTATION DE LA FUSEE SERA 1	8
5	INSTRUMENTATION SERA 1	10
6	ESTIMATION DE TRAJECTOIRE ET PERFORMANCES PRE-VOL	12
7	DONNEES METEO ET MODELE ATMOSPHERIQUE POUR RESTITUTION 7.1 MODELE ATMOSPERE 7.2 DONNEES METEO POUR LE TIR	18 18 20
8	SYSTEMES ELECTRIQUES FUSEE ET RAMPE	22
g		23
5	9.1 CHRONOLOGIE DU VOL	23
	9.2 ANALYSES DE LA TELEMESURE	24
	9.3 CORRECTIONS DES DONNEES ENREGISTREES	25
	9.3.1 CORRECTION DES ERREURS SUR LE TIME-CODE	.25
	9.3.2 CORRECTION DES ERREURS SUR LES DONNEES	. 27
	9.4 ANAL 13E3 DE3 GPIO 3 DE L'OBC	29
10	ANALYSES DES DONNEES DU VOL	31
		31
	10.2 ANGLES D'EULER ET QUATERNIUNS	31
	10.2.1 MATRICE DE PASSAGE POUR LA CENTRALE ASENS :	. ७ । २२
	10.2.3 REPRESENTATION DES MATRICES DE PASSAGE AVEC LES	
	QUATERNIONS :	.34
	10.3 ACCELERATIONS	36
	10.4 GYROMETRES ET ATTITUDES	37
	10.5 MAGNETOMETRES	40
		.40
	10.5.2 LES PERTORBATIONS MAGNETIQUES	41
	10.5.4 CALCUL DE L'ATTITUDE DE LA FUSEE	46
	10.6 VITESSES	50
	10.7 PRESSIONS	51
	10.7.1 SONDE ANEMOCLINOMETRIQUE	. 51
	10.7.2 PRESSIONS STATIQUES ET PRESSION DYNAMIQUE	. 53
	10.7.3 COEFFICIENTS DE PRESSION	. 33 57
	10.9 ALTITUDE / HAUTEUR	58
	10.10 DESCENTE SOUS PARACHUTE	59
	10.11 TRAJECTOIRE	60
	10.12 VIBRATIONS	61
	10.13 CX	63
	10.14 POUSSEE ET TRAINEE	64
	10.15 ZONE D'IMPACT	65

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 5/91 Edition :0	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

11 CON	CLUSION	66
12 ANN	EXES	68
12.1	ANNEXE 1 : GLOSSAIRE	68
12.2	ANNEXE 2 : PREDICTIONS METEO SSC	68
12.3	ANNEXE 3 : MODELE ATMOSPHERIQUE POUR LE LOGICIEL	
Α	NDROMEDE :	72
12.4	ANNEXE 4 : FICHIER ANDROMEDE IN	
12.5	ANNEXE 5 : FICHIER PROPU ANDROMEDE	
12.6	ANNEXE 6 : FICHIER AERO ANDROMEDE	78
12.7	ANNEXE 7 : COURS EXPLOITATION SONDE ANEMOCLINOMETRIQUE	
(E	EXTRAIT D'UN COURS ONERA)	79
12.8	ANNEXE 8 : ANALYSES VIBRATIONS SYSNAV PAR LUC GONIDOU /	
C	NES.	82
12.9	SCRIPT MATLAB POUR EXPLOITATION DES MAGNETOMETRES	89

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 6/91 Edition :0	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

1 TABLE DES FIGURES & TABLEAUX

1.1 FIGURES

Figure 1 : Architecture fusée SERA 1	9
Figure 2 : Implantation capteurs	10
Figure 3 : Sonde anémoclinométrique	10
Figure 4 : Coefficient de trainée SERA1	12
Figure 5 : Coefficient de portance SERA 1	12
Figure 6 : Prédiction Altitude	13
Figure 7 : Prédiction Mach	13
Figure 8 : Prédiction Vitesses	13
Figure 9 : Prédiction Pression Dynamique	14
Figure 10 : Prédiction Poussée	14
Figure 11 : Prédiction Facteur de charge	14
Figure 12 : Prédiction Trainée	15
Figure 13 : Prédiction Assiette locale	15
Figure 14 : Visualisation de la trajectoire sous Google Earth	16
Figure 15 : Prédiction vitesse de retombée Parachutes	17
Figure 16 : Pression atmosphérique en fonction de l'altitude	18
Figure 17 : Température atmosphérique en fonction de l'altitude	18
Figure 18 : Masse volumique de l'air en fonction de l'altitude	19
Figure 19 : Célérité du son dans l'air en fonction de l'altitude	19
Figure 20 : Vents en altitude (Prédictions à T0-24h)	20
Figure 21 : Sondage atmosphérique Ballon Sonde SSC	21
Figure 22 : Photos de la case électronique de SERA 1	22
Figure 23 : Chronologie évènementielle du vol SERA 1	23
Figure 24 : Courbe de TimeCode sans erreur en fonction du n° de trame	25
Figure 25 : Exemple de courbe du TimeCode reçu par télémesure en fonction du n° de trame	26
Figure 26 : Exemple de courbe du TimeCode reçu par télémesure en fonction du n° de trame	26
Figure 27 : Exemple de courbe de données présentant des erreurs	27
Figure 28 : Les mêmes courbes de données après corrections	28
Figure 29 : GPIOs de l'OBC lors du vol SERA 1	30
Figure 30 : Axe Centrale XSens	31
Figure 31 : Accélérations X, Y, Z SERA 1	36
Figure 32 : Gyromètres X, Y, et Z de SERA 1	37
Figure 33 : Position en roulis de SERA 1	37
Figure 34 : Position en Lacet de SERA 1	38
Figure 35 : Lacet en sortie de rampe	39
Figure 36 : Position en Tangage de SERA 1	39
Figure 37 : Attitudes et angles d'Euler d'une fusée	40
Figure 38 : Champ magnétique terrestre	40
Figure 39 : Sphère du champ magnétique mesuré (Bx, By, Bz)	40
Figure 40 : Effet de biais par les perturbations de type « fer durs »	41
Figure 41 : Effet de déformation par les perturbations de type « fer doux »	42
Figure 42 : Principe de calibration des mesures des magnétomètres	43
Figure 43 : Ellipsoïde partielle du champ magnétique mesuré pendant tout le vol de SERA 1 (Bx, By, Bz)	44
Figure 44 : Approximation de l'ellipsoïde (en vert) et calibration (en rouge)	44
Figure 45 : Norme du champ magnétique avant et après calibration en fonction du temps	45
Figure 46 : Parcours du champ magnétique mesuré pendant le vol jusqu'à culmination (Bx, By, Bz)	46
Figure 47 : Méthode de calcul du roulis à partir des données du magnétomètre	46
Figure 48 : Champ magnétique (Bx, By) en fonction du temps	47
Figure 49 : Comparaison du roulis (degré) calculé à partir des magnétomètres et des gyromètres	48
Figure 50 : Méthode de calcul du tangage à partir des données du magnétomètre	48

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 7/91 Edition :0	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

Figure 51 : Tangage de SERA 1 (degré) en fonction du temps
Figure 52 : Vitesse relative SERA 1
Figure 53 : Sonde anémoclinométrique 51 Figure 54 : Vue en coupe de la sonde anémoclinométrique 51 Figure 55 : Pressions statiques différentielles sonde anémoclinométrique SERA1 52 Figure 56 : Pressions statiques SERA 1 53 Figure 57 : Pressions dynamiques SERA 1 54
Figure 54 : Vue en coupe de la sonde anémoclinométrique 51 Figure 55 : Pressions statiques différentielles sonde anémoclinométrique SERA1 52 Figure 56 : Pressions statiques SERA 1 53 Figure 57 : Pressions dynamiques SERA 1 54
Figure 55 : Pressions statiques différentielles sonde anémoclinométrique SERA1 52 Figure 56 : Pressions statiques SERA 1 53 Figure 57 : Pressions dynamiques SERA 1 54
Figure 56 : Pressions statiques SERA 1
Figure 57 · Pressions dynamiques SERA 1 54
1 Guie 57 . 1 respinse dynamigues official i
Figure 58 : Tube pitot
Figure 59 : Coefficients de pression SERA 1
Figure 60 : Coefficients de pression zoom SERA 1
Figure 61 : Coefficients de pression en fonction du Mach SERA 1
Figure 62 : Mach SERA 1
Figure 63 : Hauteur SERA 1
Figure 64 : Trajectoire SERA 1
Figure 65 : Test trajectoire 3D SERA 1
Figure 66 : Vibrations X, Y, Z sous coiffe SERA 1
Figure 67 : DSP filtre HANNING, 256 points, recouvrement de 0.5s (SERA1 bleu, MasterLeia Turquoise)
Figure 68 : Cx balistique subsonique SERA 1
Figure 69 : Force de poussée SERA 1
Figure 70 : Force de trainée SERA 1
Figure 71 : Zone d'impact et trajectoire estimée SERA 1

1.2 TABLEAUX

Tableau 1 : Dimensions et paramètres de SERA 1	9
Tableau 2 : Récapitulatif des prédictions de performances et trajectoires	
Tableau 3 : Récapitulatif du nombre d'erreurs par module	
Tableau 4 : Calcul du taux d'erreur de la télémesure	
Tableau 5 : Récapitulatif des statuts des GPIOs de l'OBC	
Tableau 6 : Récapitulatif coefficient de pression	
Tableau 7 : Récapitulatif descente sous parachute	
Tableau 8 : Récapitulatif des données de performances et trajectoires SERA 1	

2 **REFERENCES**

- [R2] PER-RE-34-ZZ-8-GRF_Exploitation niveau 0 des fusées expérimentales PERSEUS lors du C'SPACE 2013-E0R2-RD
- [R3] GP1421D103-1.1- Rapport problème détection de mise à feu (Rapport GAREF Aérospatial)

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
PER-RE-34-ZZ-8-GRF				F	
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 8/91 Edition :0	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

3 INTRODUCTION

La fusée SERA 1 est la première fusée **supersonique** réalisée par le projet PERSEUS. Les objectifs étaient multiples :

- Atteindre une vitesse supérieure à Mach =1.3 (au-dessus de la frontière transsonique)
- Atteindre une culmination supérieure à 5 km
- Mettre en place pour la première fois, une campagne dédiée à ce lancement, de plus sur un site étranger (SSC – Kiruna - Suède)
- Impliquer des étudiants du projet PERSEUS dans la conception, réalisation, mise en œuvre et exploitations de ce projet.
- Utilisation d'un nouveau moteur à poudre (CESARONI PRO 98-3G Green 3)

Ce document ne traitera que des aspects performances, prédictions de trajectoire, analyses des données de vol et retombée sous parachute.

Le tir a eu lieu le Mercredi 7 MAI 2014 à 13h10min00s UTC (ce temps correspond au T0 pour toutes les exploitations de mesures figurant dans ce document). L'azimut de tir était de 360° (plein Nord). L'inclinaison de la rampe était de 80° (0° étant l'horizontale locale).

4 PRESENTATION DE LA FUSEE SERA 1

La fusée SERA 1 (SERA pour Supersonic Experimental Rocket ARES) est une fusée développée au sein du projet PERSEUS de 2012 à 2014. Son développement fût réalisé grâce aux précédents démonstrateurs de fusée ARES. En effet, ceux-ci permettent de valider des concepts ou technologies réutilisables pour des démonstrateurs type SERA 1. Par exemple, le système de récupération utilisé sur SERA 1 est un système développé au sein de l'association OCTAVE pour les démonstrateurs ARES. Il en va de même pour l'architecture électrique de ce démonstrateur qui a fait l'objet de multiples ajustements et réorganisation lors des vols des démonstrateurs ARES afin d'obtenir une version standard. Nous reviendrons dessus dans le chapitre 8.

Cette fusée est également la première fusée PERSEUS à utiliser le moteur CESARONI PRO98-3G Green 3 comme moyen de propulsion. Ce moteur à l'avantage de garantir une courbe de poussée nous permettant de rester en dessous de la barre des 10g d'accélération que le projet s'est fixé et également d'obtenir des performances intéressantes (Mach >1, Culmination > 5km).

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
PER-RE-34-ZZ-8-GRF				F	
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 9/91 Edition :0	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

L'architecture générale de la fusée SERA 1 est détaillée sur la Figure 1 ci-dessous.



Figure 1 : Architecture fusée SERA 1

Pour rappel, les paramètres dimensionnels et de performances de la fusée sont les suivants :

Masse au décollage :	25.75	kg	
Masse de propergol embarqué :	8.64	kg	
Longueur de guidage sur rampe :	6	m	
Altitude du pas de tir :	303	m	
Diamètre petit parachute :	0.57	m	
Diamètre grand parachute :	1.94	m	
Diamètre du tube :	160	mm	
Surface de référence :	0.20106	m^2	
Longueur tube bas :	1.231	m	
Longueur tube intermédiaire :	1.05	m	
Longueur tube haut :	0.22	m	
Longueur de la coiffe :	0.467	m	
L/D de la coiffe :	2.91	-	
Dimensions des ailerons :			
	Emplanture (GC):	0.35	m
	Envergure (B) :	0.18	m
	Saumon (PC) :	0.194	m
	Centrage (Xr) :		

Tableau 1 : Dimensions et paramètres de SERA 1



Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 10/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

5 INSTRUMENTATION SERA 1

La fusée SERA 1 comportait au total 31 capteurs + 2 caméras. Leur implantation est décrite sur la Figure 2 cidessous.



Figure 2 : Implantation capteurs

L'expérience « passager » incluse dans SERA 1 est l'expérience de l'Université suédoise de LULEA. Elle avait comme objectif la détermination des attitudes et trajectoire du lanceur utilisant les magnétomètres de sa centrale. Malheureusement, suite à des problèmes encore en cours d'investigation qui a empêcher la détection au sol de l'impulsion de mise à feu (cf document GAREF GP1421D103-1.1), celle-ci n'a pas déclenchée l'enregistrement des données au moment du décollage.

La pointe anémoclinométrique comporte 5 trous. 1 trou dans l'axe longitudinal de la fusée permettant la mesure de pression totale. 4 trous situés sur la peau répartis uniformément permettent de mesurer la pression statique. Le montage effectué ici comporte 2 capteurs de pression différentielle. La Figure 3 ci-dessous indique l'architecture du montage.



Figure 3 : Sonde anémoclinométrique

Nous renvoyons le lecteur au dossier de définition en référence [R1] pour de plus amples informations sur les capteurs et leur emplacement dans la fusée.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 11/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

Implantation des centrales inertielles SYSNAV et XSENS dans la fusée :



Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 12/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

6 ESTIMATION DE TRAJECTOIRE ET PERFORMANCES PRE-VOL

Ces estimations de trajectoire et retombées sous parachute ont été réalisés la veille du tir en utilisant les prédictions météorologiques fournies par le centre de tir SSC que vous pouvez retrouver en 12.2 ainsi que la courbe de poussée moyenne provenant des tirs du moteur CESARONI PRO 98-3G Green 3 sur le banc d'essai du DMAE de l'ONERA Toulouse.

Le modèle d'atmosphère utilisé dans le logiciel Andromède est détaillé en 12.3.

En respectant la géométrie du démonstrateur, AéroPerseus (outil d'avant-projet de détermination de coefficients aérodynamiques pour les lanceurs) nous indique un coefficient de trainée (Cx ou C α en considérant α proche de 0°) de l'ordre de 0.49 en subsonique et de l'ordre de 0.55 – 0.6 en supersonique. Le coefficient de portance est principalement lié directement à la géométrie des ailerons mais aussi à la géométrie de la pointe. SERA 1 était composée de 3 ailerons. Le coefficient de portance ainsi déterminé par AéroPerseus varie de 15 (à Mach 0.2) à 23 (à Mach 1.2).



Figure 4 : Coefficient de trainée SERA1



Figure 5 : Coefficient de portance SERA 1

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 13/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

Ci-dessous les figures 6 à 13 récapitulent les paramètres de la trajectoire prévue la veille du tir. Ces critères ont également permit de prédire les temps nécessaires à la programmation du séquenceur inclus dans la fusée pour la séparation et l'ouverture du parachute.



Figure 6 : Prédiction Altitude



Figure 7 : Prédiction Mach



Figure 8 : Prédiction Vitesses





Figure 9 : Prédiction Pression Dynamique



Figure 10 : Prédiction Poussée



Figure 11 : Prédiction Facteur de charge









Figure 13 : Prédiction Assiette locale

Ci-dessous la visualisation de la trajectoire de vol de la fusée SERA 1 dans le logiciel Google Earth utilisant les paramètres calculés par le logiciel Andromède. En rouge, est modélisé la trajectoire en phase propulsée. En vert, la trajectoire balistique. L'ouverture du système de récupération doit s'effectuer à la culmination. La projection du point de culmination permet de calculer le déport latéral sous parachute en fonction de la direction et la force du vent par tranche d'altitude. La zone grisée correspond à l'estimation de zone de retombée sous parachute calculée la veille du tir soit le 6 MAI 2014 avec les prédictions météorologiques de SSC.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 16/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014



Figure 14 : Visualisation de la trajectoire sous Google Earth

Voici un tableau récapitulatif des différents paramètres de trajectoire et performances de la fusée SERA 1 :

Altitude (m)	5500
Culmination (m)	5200
Mach max (-)	1.39
Vitesse relative max (m/s)	445
Pression dynamique max (kPa)	121
Poussée max (kN)	2.5
Facteur de charge longitudinal max (g)	10.4
Force de trainée aérodynamique max (kN)	1.08

Tableau 2 : Récapitulatif des prédictions de performances et trajectoires

Ci-dessous le tableau permettant de calculer le déport latéral sous parachute. Le modèle par tranche d'altitude est suffisant pour calculer des zones de retombées à plus ou moins 250 m dans notre cas (environ 20% du déport total). La plus grande problématique dans ces estimations est la vitesse de descente. En effet, comme le montre les précédentes expériences sur ARES (C'SPACE), le calcul du Cx parachute est assez empirique. Mais une erreur de 10% par exemple sur le Cx, peut induire une erreur de plus de 50% sur le déport en fonction de la vitesse du vent et de l'altitude de culmination. Ces valeurs ont également permis de calculer les temps d'ouverture pour le séquenceur (2 dernières colonnes).

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
PER-RE-34			-34-ZZ-8-GRF	
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 17/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

Hauteu	ır (m)]					
De	а	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de descente (ms/)	Déport (m)	Temps pour parcourir la distance (s)	Tculmi +	T0 +
5400	5000	10.7	41.5	104	9.6	9.6	38.6
5000	4000	10.2	40.1	250	24.9	34.6	63.6
4000	3000	7.7	38.7	195	25.8	60.4	89.4
3000	2000	5.8	37.3	153	26.8	87.2	116.2
2000	1000	3.7	35.9	101	27.9	115.1	144.1
1000	500	3.5	34.8	51	14.4	129.4	158.4
500	0	3.5	10	171	50.0	179.4	208.4

Figure 15 : Prédiction vitesse de retombée Parachutes

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 18/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

7 DONNEES METEO ET MODELE ATMOSPHERIQUE POUR RESTITUTION

7.1 MODELE ATMOSPERE

Le modèle d'atmosphère utilisé dans tous nos calculs de trajectoire, retombée et performances est défini par l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale, norme ISO 2533-1975).

Pour mémoire, nous rappelons les formules :

$$h = \frac{288 - 288(\frac{P_{stat}}{P_0})^{\frac{1}{5.255}}}{0.0065}$$

Cette équation prend en compte la décroissance linéaire de la température en fonction de l'altitude également définie par l'OACI, c'est-à-dire :

$$T_{alt} = -0.0065 * h + T_0$$

avec T0 la température au sol au moment du tir en °C et h, l'altitude en m La détermination de la masse volumique de l'air en fonction de l'altitude se fait par la loi des gaz parfaits :

$$\rho = \frac{Pstat}{R^*T}$$

Ci-dessous en recalant les paramètres d'atmosphère initiaux (Température au sol à T0 = 1.7 °C, Pression atmosphérique au sol à T0 = 986 hPa), nous indiquons l'évolution de la pression, température, masse volumique et vitesse du son de l'air en fonction de l'altitude.



Figure 16 : Pression atmosphérique en fonction de l'altitude



Figure 17 : Température atmosphérique en fonction de l'altitude





Figure 18 : Masse volumique de l'air en fonction de l'altitude



Figure 19 : Célérité du son dans l'air en fonction de l'altitude

Pour de plus amples informations sur les modèles utilisés de manière générale lors de la restitution des trajectoires et performances des fusées PERSEUS, nous vous renvoyons vers la référence [R2].

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
PER-RE-34-ZZ-8-				-GRF	
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 20/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

7.2 DONNEES METEO POUR LE TIR

SSC nous a fournit une prédiction des vents en altitude la veille du tir (6 Mai 2014). Ci-dessous un graphique indiquant l'orientation et la force du vent pour ces prédictions.



Figure 20 : Vents en altitude (Prédictions à T0-24h)

Nous pouvons constater que de 100 m à 1000 m d'altitude (et non pas hauteur), les vents proviennent majoritairement du 40° (Nord/Nord-Est) pour une intensité d'environ 4 m/s.

Ensuite de 1000 m à 2000 m, le vent provient majoritairement de plein Nord (360°) pour une intensité de l'ordre de 2.5 m/s.

De 2000 m à 5500 m, les vents proviennent majoritairement du 40° pour une force de l'ordre de 7 m/s.

Ces valeurs nous ont permis de calculer la zone de retombée sous parachute estimée.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
PER-RE-34-ZZ-8-GRF				F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 21/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

A la suite du tir (T0+20min), SSC a envoyé un ballon sonde afin d'obtenir les données de vents les plus précises possibles pour les restitutions. Le graphique ci-dessous nous indique les résultats de ce sondage atmosphérique :



Figure 21 : Sondage atmosphérique Ballon Sonde SSC

Ces données nous montrent que les estimations de conditions atmosphériques de la veille sont quelques peu différentes de celles réellement rencontrées par la fusée. Le vent provenait principalement de 10° Nord et s'échelonne entre 0 m/s (au sol à 300m d'altitude) et 11 m/s (à 5000 m d'altitude). Ces différences peuvent donc induire une mauvaise estimation de la zone de retombée. De plus, les indications de force du vent étaient un peu sous-estimées surtout dans la tranche 3000 - 5000 m.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 22/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

8 SYSTEMES ELECTRIQUES FUSEE ET RAMPE

La case électronique de SERA 1 est un grand succès, non seulement pour son fonctionnement nominal mais également par le fait qu'il s'agisse de la 1^{ère} version du cœur électrique standard des fusées ARES de PERSEUS. Il s'agit de la première case électronique ayant passé (et avec succès) des essais de qualification avant vol en centrifugeuse et en vibrations, ainsi qu'une calibration des capteurs de pression.

La seule anomalie de fonctionnement a été la non détection au sol du signal de mise à feu (MAF) (cf [R3]).

L'avionique de SERA 1 comporte :

- 11 modules électriques
- 7 modules de mesures connectées en USB avec l'OBC (dont 4 en daisy chaining)
- 1 charge utile suédoise (MADS)





Figure 22 : Photos de la case électronique de SERA 1

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 23/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

T0: 2014/05/07 - 13h10:00:00 (TU)

9 ANALYSE GLOBAL DU VOL

9.1 CHRONOLOGIE DU VOL



Figure 23 : Chronologie évènementielle du vol SERA 1

La figure ci-dessus représente de manière schématique la chronologie des évènements marquants lors du vol de SERA 1.

D'un point de vu enregistrement de mesures, nous pouvons indiquer que lorsqu'un module USB se déconnecte de l'OBC (ce qui est le cas lors de l'ouverture du système de séparation), nous avons une perte d'enregistrement des mesures sur XSens et Sysnav puisque l'OBC cherche constamment à reconnecter le module déconnecté. Il se met alors pendant environ 30 secondes en surcharge.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
PER-RE-34-ZZ-8-GRF				F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 24/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

9.2 ANALYSES DE LA TELEMESURE

Le signal de télémesure n'a pas été excellent pour SERA 1, bien que deux antennes du site d'ESRANGE étaient utilisées pour suivre la fusée. L'une d'entre elles a perdu le suivi au moment de la culmination, l'autre a bien reçu le signal durant tout le vol jusqu'à atterrissage. Ce constat s'est fait ressentir sur la station sol à l'affichage des données et sur le signal de la porteuse que l'on visualise à l'oscilloscope.

Le recensement des erreurs présenté dans le tableau ci-dessous ne prend en compte que les données utiles à partir du T0 et jusqu'à la retombée au sol.

Module	Fréquence d'acquisition	Pertes et erreurs sur trames télémesure	Total données
Pression coiffe absolue	100 Hz	39	20 Ko
Pression coiffe différentielle	100 Hz	41	20 Ko
Vibration coiffe	1600 Hz (OX, OY) 500 Hz (OZ)	208	175 Ko
XSens	100 Hz	565	1819 Ko
GPIOs OBC	100 Hz	703	1827 Ko
Sysnav	819 Hz	463	1733 Ko
Pression flanc	100 Hz	519	191 Ko
Pression culot	100 Hz	609	191 Ko

Tableau 3 : Récapitulatif du nombre d'erreurs par module

A partir de ces renseignements on peut estimer le taux d'erreur de la télémesure :

Total des erreurs et des pertes	Taille totale des données	Bande passante utilisée	Taux d'erreur
3 147	5 976 Ko	15.8 %	5,3*10-4

Tableau 4 : Calcul du taux d'erreur de la télémesure

Le taux d'erreur de 5.3*10-4 est acceptable, il se trouve dans les gammes « normales » de taux d'erreurs pour de telles télémesures.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie									
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF								
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 25/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014					

9.3 CORRECTIONS DES DONNEES ENREGISTREES

Les données reçues par la télémesure présentant des erreurs (bits manquants ou transformés) induisent des valeurs aberrantes lors du décodage des trames. Ces erreurs peuvent apparaitre :

- Soit sur le TimeCode
- Soit sur une donnée
- Soit sur des bits de remplissage (ne contenant aucune donnée utile)

Le dernier cas n'a pas d'influence sur la restitution des données de vol, cependant les deux premiers peuvent fausser les calculs d'exploitation par la suite. Il est donc nécessaire de filtrer ces erreurs et de les corriger. Ce travail présenté dans cette partie a été fait en post traitement.

9.3.1 CORRECTION DES ERREURS SUR LE TIME-CODE

Le TimeCode est la base de temps de toutes les mesures effectuées dans la fusée. Il est essentiel que cette donnée soit restituée sans erreur si l'on veut exploiter correctement les mesures. Une courbe sans erreurs représentant le TimeCode en fonction du numéro de trame est une droite affine dont le coefficient directeur est égal à la fréquence d'envoi de la trame (voir figure ci-dessous).



Figure 24 : Courbe de TimeCode sans erreur en fonction du n° de trame

Les sauts constatés sont liés au fait que les numéros de trame ne s'incrémentent pas alors que le temps continu. Des sauts peuvent apparaître sur ces courbes qui sont dues généralement à des pertes de trame ou au problème sur l'OBC lors des déconnexions de modules USB.

En pratique, pendant le vol, les valeurs du TimeCode que l'on reçoit par la télémesure ne représentent pas une droite parfaite, mais plutôt une courbe en escalier avec des pics de valeurs aberrantes :



Figure 25 : Exemple de courbe du TimeCode reçu par télémesure en fonction du n° de trame

Des erreurs peuvent modifier de manière aberrante le TimeCode, d'autres provoquer des erreurs minimes qui peuvent être confondues avec des pertes de trame.

Un script automatique permet de corriger ces erreurs pour retrouver le TimeCode originel par interpolation, en remplaçant simplement la valeur erronée par la valeur du TimeCode précédent en y ajoutant le pas temporel correspondant. Le résultat de ces corrections est présenté sur la figure ci-dessous :



Figure 26 : Exemple de courbe du TimeCode reçu par télémesure en fonction du n° de trame

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie									
-	PER-RE-34-ZZ-8-GRF								
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 27/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014					

9.3.2 CORRECTION DES ERREURS SUR LES DONNEES

Les erreurs sur les données qui sont ponctuelles peuvent être corrigées simplement en remplaçant la valeur erronée par la moyenne locale des points aux alentours. Pour détecter les points présentant des erreurs, et ne pas les confondre avec de vrais pics physiques, on définit arbitrairement un coefficient de détection d'erreur (celui-ci peut être différent en fonction de la nature de la donnée), que l'on nommera « *coeff_erreur* », et on applique l'algorithme suivant :

Si :

$|valeur(i-1) + valeur(i+1)| / 2 - valeur(i) > coeff_erreur$

(Si la différence entre la valeur en i et la moyenne des valeurs en i-1 et i+1 est supérieure à coeff_erreur, c'est-àdire si l'on rencontre un pic ponctuel)

Et :

|valeur(i-1) - valeur(i+1)| / 2 < coeff_erreur

(Si la moyenne entre les valeurs i-1 et i+1 est inférieure en valeur absolue à coeff_erreur, c'est-à-dire s'il ne s'agit pas d'une variation physique)

Alors :

$$valeur(i) = (valeur(i-1) + valeur(i+)) / 2$$

(On remplace la valeur en i par la moyenne des points en i-1 et i+1)

Plus le coefficient d'erreur est élevé, moins on détectera les erreurs. Cependant, plus le coefficient est petit, plus on risque de confondre des variations physiques avec des erreurs. Pour les données de SERA 1, les coefficients d'erreurs choisis sont les suivants :

- Données de pression (mbar) : 10
- Données inertiels (m/s-2, rad/s, Gauss) : 1
- Données de vibrations (m/s-2) : 0.5
- Données de température (°C) : 2

Les figures ci-dessous présentent un exemple de données contenant de multiples erreurs qui ont été corrigées par l'algorithme.



Figure 27 : Exemple de courbe de données présentant des erreurs

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie								
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF							
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 28/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014				

Après l'application de l'algorithme, les données sont corrigées :



Figure 28 : Les mêmes courbes de données après corrections

Nous voyons donc que tous les pics non physiques ont bien été éliminés.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie									
_	PER-RE-34-ZZ-8-GRF								
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 29/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014					

ANALYSES DES GPIO'S DE L'OBC 9.4

Sur les 8 entrées numériques disponibles sur l'OBC, 7 étaient utilisées sur SERA 1. Les statuts que chacune recevaient sont listés ci-dessous :

N° GPIO	Statut
GPIO 0	MAF
GPIO 1	Statut séquenceur
GPIO 2	Statut camera n°2
GPIO 3	Statut camera n°1
GPIO 4	Statut verrouillage n°2 système séparation
GPIO 5	Statut verrouillage n°1 système séparation
GPIO 6	Statut MADS
GPIO 7	Non utilisé

Tableau 5 : Récapitulatif des statuts des GPIOs de l'OBC

Le statut peut avoir un niveau logique de '0' (qui signifie état actif) ou de '1' (qui signifie état non actif). L'analyse des GPIOs du vol de SERA 1 nous montre que :

- Les caméras embarquées étaient en bon fonctionnement
- -La charge utile MADS était connectée et prête pour les mesures
- Le verrouillage n°1 a bien détecté la séparation à T0 + 30.84s

Cependant, certains statuts n'ont pas fonctionnés, ce sont :

- Le signal de mise à feu (MAF) car non reçu par l'OBC
- Le statut du séquenceur. Il s'agit en fait d'une erreur dans le câblage découverte lors de la RAV de SERA 1 le 26-03-2014. Il a été décidé en toute connaissance de cause de ne pas corriger ce problème pour ne pas modifier le câblage.
- Le statut du verrouillage n°2 qui n'a pas détecté la séparation. Il s'agit très probablement d'un problème mécanique au niveau du capteur et du verrouillage du système de séparation. Ce problème avait déjà été rencontré lors de précédents tests.





Figure 29 : GPIOs de l'OBC lors du vol SERA 1

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie									
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF								
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 31/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014					

10 ANALYSES DES DONNEES DU VOL

10.1 INFORMATIONS

Les barres verticales sur les graphiques indiqueront toujours dans le même ordre de gauche à droite :

- Le début de la phase transsonique (bien visible sur les graphiques au chapitre 10.7) à T0+5.38s
- La fin de propulsion à T0+8.39 s
- La fin de la phase transsonique à T0+10.69 s
- L'ouverture du système de séparation à T0+31.05s
- L'ouverture du petit parachute à T0+31.72s

10.2 ANGLES D'EULER ET QUATERNIONS

Les changements d'état et hypothèses de travail ci-dessous sont extraits du rapport de stage de N.NAYEF (Stagiaire M2 de l'UEVE 2013-2014).

Les données venant des centrales inertielles (accélérations, angles d'attitude, magnétomètre) sont exprimées directement dans le repère mobile (m). Afin de pouvoir estimer la vitesse du lanceur, sa position et son attitude, on doit les exprimer par rapport au repère local fixe (appelé aussi NED), c'est pour cela que nous avons besoin d'expliciter la matrice de passage entre ces deux repères.

L'orientation du repère mobile (donc du mobile) par rapport au repère local est défini par les 3 angles d'Euler (angle de lacet Ψ , angle de tangage Θ , angle de roulis $\boldsymbol{\varphi}$) selon les trois axes $(\vec{Z}, \vec{Y}, \vec{X})$ respectivement de manière générale.

Il a donc fallu mettre en place une matrice de passage du repère mobile vers repère local NED (appelée **DCM**) afin de faire les changements de repère pour les accélérations, et une autre matrice de passage qui relie les données du gyromètre et les vitesses angulaires exprimées dans le repère local NED.

Pour représenter les orientations, deux modèles ont été utilisés. Une représentation utilisant les angles d'Euler et une autre utilisant les quaternions.

10.2.1 MATRICE DE PASSAGE POUR LA CENTRALE XSENS :

Sur les démonstrateurs qui ont déjà été lancés, la centrale Xsens a été montée dans la fusée de telle sorte que :

- l'axe \vec{Z} soit l'axe suivant l'axe de la fusée donc l'axe du roulis,
- l'axe \vec{Y} soit perpendiculaire à l'axe \vec{Z} représentant l'axe du tangage,
- Et l'axe \vec{X} complète le trièdre et qui représente l'axe du lacet.

Il faut noter que pour les fusées et lanceurs, la différence entre axe de lacet et axe de tangage parait souvent ambigüe pour les personnes plus habituées au domaine aéronautique, en raison de la forme symétrique de ces engins. Il suffit alors de raisonner rapport à la trajectoire du mobile pour retrouver l'équivalence avec les axes de rotation des avions.



Figure 30 : Axe Centrale XSens

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie									
-	PER-RE-34-ZZ-8-GRF								
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 32/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014					

10.2.1.1 CALCUL DE LA DCM_{XSENS}

La rotation doit toujours suivre la séquence d'Euler (axe roulis - axe de tangage - axe de lacet), pour la centrale Xsens, on utilise donc la séquence d'Euler (3, 2,1) et on pose donc :

-Rotation autour de \vec{Z} : roulis φ

$$R_{\varphi} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0\\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (1.1)$$

-Rotation autour de \vec{Y} : tangage Θ

$$R_{\Theta} = \begin{pmatrix} \cos(\Theta) & 0 & -\sin(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Theta) & 0 & \cos(\Theta) \end{pmatrix} (1.2)$$

-Rotation autour de \vec{X} : lacet Ψ

 $R_{\Psi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Psi) & \sin(\Psi) \\ 0 & -\sin(\Psi) & \cos(\Psi) \end{pmatrix} (1.3)$

En navigation, la matrice de passage du repère local NED vers le repère mobile est donnée par la relation suivante : $R(\varphi, \Theta, \Psi) = R_{\varphi} * R_{\Theta} * R_{\Psi}$

On a donc pour Xsens :

 $R = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\theta & \sin\varphi\cos\Psi + \cos\varphi\sin\Psi\sin\theta & \sin\varphi\sin\Psi - \cos\varphi\cos\Psi\sin\theta \\ -\sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\Psi - \sin\varphi\sin\Psi\sin\theta & \cos\varphi\sin\Psi + \sin\varphi\sin\theta\cos\Psi \\ \sin\theta & -\cos\theta\sin\Psi & \cos\theta\cos\Psi \end{bmatrix} (1.4)$

Si on se base sur [1] et [2], la matrice de passage du repère mobile vers le repère local NED (matrice qui nous intéresse) est donnée par la relation $DCM = R^t$ d'où :

$$DCM_{xsens} = \begin{bmatrix} cos\varphi cos\theta & -sin\varphi cos\theta & sin\theta \\ sin\varphi cos\Psi + cos\varphi sin\Psi sin\theta & cos\varphi cos\Psi - sin\varphi sin\Psi sin\theta & -cos\theta sin\Psi \\ sin\rho sin\Psi - cos\varphi cos\Psi sin\theta & cos\varphi sin\Psi + sin\varphi sin\theta cos\Psi & cos\theta cos\Psi \end{bmatrix} (1.5)$$

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie									
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF								
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 33/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014					

10.2.1.2 CALCUL DE LA RELATION ENTRE LES DONNEES DU GYROMETRE TRIAXIAL ET LES VITESSES ANGULAIRES POUR XSENS

Afin de calculer les attitudes φ , Θ , Ψ de la fusée, on utilise la relation entres les données gyrométriques et les vitesses angulaires $\dot{\Psi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\varphi}$. Le gyromètre triaxial donne 3 vitesses angulaires p, q et r, respectivement selon les 3 axes (\vec{X} , \vec{Y} , \vec{Z}). En se basant sur [1] et [3], on a la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + R_{\phi} * \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R_{\phi} * R_{\Theta} * \begin{bmatrix} \dot{\Psi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (1.6)$$

Ce qui donne :

p_{xsens} q_{xsens} r_{xsens}	=	0 0 1	sinφ cosφ 0	cosφcosθ –sinφcosθ sinθ		$\left \dot{P} \right = 2$	> [Ψ 	=	[—tanθcosφ sinφ <u>cosφ</u>	tanθsinφ cosφ sinφ	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ q_{xsens} \\ r_{rsens} \end{bmatrix}$	(1.7)
T _{xsens}		L1	0	sinθ	1[6	ρ́]	φ			cost	$0] [T_{xsens}]$	

10.2.2 MATRICE DE PASSAGE POUR LA CENTRALE SYSNAV:

Sur les démonstrateurs qui ont déjà été lancés, la centrale Sysnav, elle, a été montée dans la fusée de telle sorte que :

- L'axe \vec{z} soit l'axe suivant l'axe longitudinal de la fusée donc l'axe de roulis,
- L'axe \vec{X} soit perpendiculaire à l'axe \vec{Z} et représente l'axe de tangage,
- Et l'axe \vec{Y} complète le trièdre et représente l'axe de lacet.

10.2.2.1 CALCUL DE LA DCM SYSNAV

Comme précédemment, en se basant sur [1] et [2] et sachant que la rotation doit toujours suivre la séquence d'Euler (axe roulis - axe de tangage - axe de lacet), pour **Sysnav** on utilise la séquence d'Euler (3, 1, 2) soit : -Rotation autour de \vec{Z} : roulis φ

 R_{ϕ} reste le même que celui de l'équation 1.1.

-Rotation autour de \vec{Y} : lacet

$$R_{\Theta} = \begin{pmatrix} \cos(\Psi) & 0 & -\sin(\Psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Psi) & 0 & \cos(\Psi) \end{pmatrix}$$

-Rotation autour de \vec{X} : tangage Θ

$$R_{\theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie									
		PER-RE	-34-ZZ-8-GR	F					
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 34/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014					

En conduisant les mêmes calculs que précédemment, on obtient :

1	$OCM_{sysnav} =$			
ſ	$\cos\varphi\cos\theta \cos\varphi\cos\Psi + \sin\varphi\sin\Psi\sin\theta$	$-sin\varphi cos\Psi + cos\varphi sin\Psi sin\theta$	<i>cosθsin</i> Ψ ן	
	sinφcosθ	<i>cosφcosθ</i>	$-sin\theta$	
l	$-cos\varphi sin\Psi + sin\varphi sin\theta cos\Psi$	$sin ho sin\Psi + \cos \varphi \cos \Psi \sin \theta$	cosθcosΨ	(1.8)

10.2.2.2 CALCUL DE LA RELATION ENTRE LES DONNEES DU GYROMETRE TRIAXIAL ET LES VITESSES ANGULAIRES POUR SYSNAV

Pour Sysnav, en utilisant la même relation que l'équation 1.5, on obtient:

[personan]		0	<u>cos</u> @	sinacost	۱ĺψ́	1	ĺψ		[tanθsinφ	tanθcosφ	ן1	[p _{evenau}]	
a	_	0	-sinco	coscoso	١Ĺ	=>	à	_	cosφ	$-sin\varphi$	0	a	(1.9)
r		1	0	cospcoso 					$sin \varphi$	cosφ		r	(1.7)
L'sysnav J		-1	0	-sino	ιψ		ĮΨ		L cost	cost	٧J	L'sysnav 1	

10.2.3 REPRESENTATION DES MATRICES DE PASSAGE AVEC LES QUATERNIONS :

Les quaternions permettent de représenter efficacement l'attitude d'un objet et ses rotations. Le quaternion est un nombre hypercomplexe de dimension 4. Il est composé d'un scalaire et d'un vecteur unité imaginaire. Il est défini de la façon suivante :

q = q0 + q1 * i + q2 * j + q3 * k

où q0, q1, q2, q3 sont des nombres réels et i, j, et k sont des coefficients imaginaires satisfaisant les conditions suivantes : $i^2 = j^2 = k^2 = -1$;

On peut poser les deux relations suivantes entre quaternions et angles d'Euler :

Relation de passage des angles d'Euler aux quaternions, pour les centrales Xsens et Sysnav :

$$\begin{aligned} q_{xsens} &= \begin{bmatrix} q0\\ q1\\ q2\\ q3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\varphi/2.\sin\theta/2.\sin\Psi/2 + \cos\varphi/2.\cos\theta/2.\cos\Psi/2\\ -\cos\varphi/2.\sin\theta/2.\sin\Psi/2 + \sin\varphi/2.\cos\theta/2.\cos\Psi/2\\ \sin\varphi/2.\cos\theta/2.\sin\Psi/2 + \cos\varphi/2.\sin\theta/2.\cos\Psi/2\\ -\sin\varphi/2.\sin\theta/2.\cos\Psi/2 + \cos\varphi/2.\sin\theta/2.\cos\Psi/2 \end{bmatrix} (1.10) \\ q_{sysnav} &= \begin{bmatrix} q0\\ q1\\ q2\\ q3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\varphi/2.\sin\theta/2.\cos\Psi/2 + \cos\varphi/2.\cos\theta/2.\sin\Psi/2\\ -\cos\varphi/2.\sin\theta/2.\sin\Psi/2 + \sin\varphi/2.\cos\theta/2.\cos\Psi/2\\ -\sin\varphi/2.\sin\theta/2.\sin\Psi/2 + \cos\varphi/2.\sin\theta/2.\cos\Psi/2\\ -\sin\varphi/2.\sin\theta/2.\cos\Psi/2 + \cos\varphi/2.\sin\theta/2.\cos\Psi/2\\ -\sin\varphi/2.\sin\theta/2.\cos\Psi/2 + \cos\varphi/2.\sin\theta/2.\cos\Psi/2 \end{bmatrix} (1.11) \end{aligned}$$

Du coup en utilisant les relations 1.10 et 1.11, les matrices de rotation DCM deviennent :

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie								
Exploitation Niveau 0 de SERA-1		PER-RE-34-ZZ-8-GRF						
		Page : 35/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014			
$\mathbf{DCM}_{\mathbf{xsens}} = \begin{bmatrix} q0^2 - q1^2 - q2^2 + q3^2 & 2(q0q2 - q1q3) & 2(q0q1 + q2q3) \\ 2(q0q1 - q2q3) & -q0^2 - q1^2 + q2^2 + q3^2 & 2(q1q2 - q0q3) \\ 2(q0q1 - q2q3) & 2(q1q2 + q0q3) & -q0^2 + q1^2 - q2^2 + q3^2 \end{bmatrix} (1.12)$								
DCM _{sysnav} =	$q0^{2} - q1^{2} + q2^{2} - q3^{2}$ 2(q2q3 + q0q1) 2(q1q2 - q0q3)	$2(q2q3 - q0^2 - q1^2 - 2(q1q3 + q0^2 - q1^2 - q1^$	(-q0q1) $q2^2 + q3^2$ (-q0q2)	$2(q1q2 + 2(q1q3 - q0^2 + q1^2 - q1^2))$	$ \begin{array}{c} q0q3) \\ q0q2) \\ q2^2 - q3^2 \end{array} \right] (1.13) $			

Les relations qui permettent de calculer des angles d'Euler à partir des quaternions sont données par : - Pour Sysnav :

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2(q0q2-q1q3)}{q0^2-q1^2-q2^2+q3^2} \right)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(2(q0q1+q3q2) \right)$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left(\frac{-2(q1q2-q0q3)}{q0^2+q1^2-q2^2-q3^2} \right) (1.14)$$

-Pour Xsens :

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2(q2q3+q0q1)}{q0^2-q1^2-q2^2+q3^2} \right)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(-2(q1q3-q0q2) \right)$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left(\frac{2(q1q2-q0q3)}{-q0^2+q1^2-q2^2+q3^2} \right) (1.15)$$

Sachant que les fonctions tan^{-1} et sin^{-1} sont toutes les deux des fonctions bijectives, utiliser les équations 1.14 et 1.15 peut fausser le calcul d'angle. Les quaternions sont alors plus adaptés, et c'est la méthode que nous avons choisi pour faire le changement de repère.

Initialisation des paramètres d'attitudes:

Roulis = 0° , Tangage = 80° , Lacet = 0°

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie							
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF						
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 36/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014			

10.3 ACCELERATIONS



Figure 31 : Accélérations X, Y, Z SERA 1

Le graphique ci-dessus représente les accélérations sur les 3 axes des centrales XSENS et SYSNAV embarquées dans la fusée. Nous pouvons constater un écart de niveau d'accélération sur les 2 centrales sur l'axe X. Cet écart (présent depuis le départ) peut être lié au positionnement des 2 centrales dans la case électronique. Les 2 autres axes ont un comportement similaire sur l'intégralité du vol jusqu'à l'ouverture du système de séparation. La seule différence entre ces 2 centrales concerne leur fréquence d'acquisition. En effet, XSENS ne transmet ses informations à l'OBC qu'à 100Hz contrairement à SYSNAV qui enregistre en interne à une fréquence de 800Hz mais également à 100Hz par la télémesure. Il faut donc récupérer la fusée pour utiliser les données de SYSNAV à 800Hz.

La première constatation concerne le temps d'allumage du moteur CESARONI PRO 98-3G Green 3. En effet, plusieurs tirs au banc ont été réalisés à l'ONERA Toulouse avant cette campagne de vol. Le temps moyen d'allumage était de 1.6 s. Ici nous avons un temps de montée en pression de l'ordre de 1.59s, ce qui correspond parfaitement aux différents essais réalisés. Ce qui conduit à dire que le stockage (température, hygrométrie) et la mise en œuvre de ce moteur n'ont pas modifié le comportement de la poudre lors de l'allumage.

L'accélération longitudinale max que la fusée a rencontré est de l'ordre de 10.6 g pour 10.4 g prévu par le logiciel Andromède. Nous pouvons donc considérer que ces valeurs sont identiques et que la prédiction du logiciel Andromède est correcte sur ce paramètre.

Nous pouvons également remarquer sur ce graphique l'instant de sortie de rampe (d'une longueur de 6m). En effet, jusqu'à T0 + 2.2 s, les axes X et Y des 2 centrales sont très bruités. A partir de T0+2.2s, ce n'est plus le cas. On considère donc que la fusée a mis 0.61 s à parcourir les 6 m de la rampe.
Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 37/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.4 GYROMETRES ET ATTITUDES



Figure 32 : Gyromètres X, Y, et Z de SERA 1

Le graphique ci-dessus trace l'évolution des vitesses angulaires sur les 3 axes pour les centrales XSENS et SYSNAV.

Nous pouvons contaster que sur l'axe Z des 2 centrales (l'axe longitudinal de la fusée) qui correspond donc à l'axe de roulis, il y a eu une inversion du sens de rotation au moment du passage dans la zone transsonique. La principale explication pourrait être liée à l'onde de choc sur les ailerons stabilisateurs qui diminuerait l'efficacité de ceux-ci. Cette analyse est à poursuivre par des calculs de mécanique des fluides (Computationnal Fluid Dynamics) ou autres afin de valider cette hypothèse et surtout de quantifier les efforts sur les ailerons au passage du transsonique et supersonique.



Figure 33 : Position en roulis de SERA 1

L'analyse précédente se vérifie avec le graphique ci-dessus. En effet, l'exploitation montre précisément l'évolution du roulis sur la phase de vol propulsé et balistique avant ouverture du système de séparation. Avant le passage du

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 38/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

transsonique, la fusée a effectué une rotation de -100° . Au moment du passage du transsonique, la fusée change de sens de rotation et perd donc 50° dans le sens opposé. A 8.39s, nous avons la fin de combustion, ce qui induit une diminution de la vitesse et donc une descente dans le domaine transsonique pour repasser en dessous de Mach 0.8 à environ T0+10s. Nous constatons à cette instant un autre changement de sens de rotation qui va perdurer jusqu'à l'ouverture du système de séparation. Au total, la fusée aura efféctué une rotation d'environ 1.25 tours.



Figure 34 : Position en Lacet de SERA 1

Le graphique ci-dessus nous indique la position en lacet de la fusée jusqu'à l'ouverture du système de séparation. En sortie de rampe, à environ T0+3s, la fusée a effectué une rotation sur l'axe de lacet d'environ 20° (visible sur les 2 centrales). Cette variation de la position en lacet peut-être liée à la prise d'incidence en sortie de rampe sachant que le vent provenant d'environ 20° Nord (cf Figure 20)et que le tir s'est effectué plein Nord (360°). Cet angle entre l'axe de tir et l'axe de provenance du vent a engendré une incidence en sortie de rampe. La fusée étant aérodynamiquement stable, celle-ci s'est donc orientée dans le « lit du vent » soit 20° Est. L'écart en lacet entre XSENS (en rouge sur la courbe ci-dessus) et SYSNAV (en bleu sur la courbe ci-dessus) à T0+6s, n'est, à l'écriture de ce document, pas encore expliqué. Des analyses plus poussées devront être entreprises pour expliquer ces évolutions différentes qui pourraient être liées aux méthodes d'exploitations ou encore aux différences de position des 2 centrales inertielles au sein du démonstrateur SERA 1.





Figure 35 : Lacet en sortie de rampe



Figure 36 : Position en Tangage de SERA 1

Le graphique ci-dessus indique la position en tangage de la fusée SERA 1. Nous constatons que pendant la phase propulsée la fusée garde un angle de tangage moyen quasi constant (oscillant entre 80° et 78° pour XSENS et entre 80° et 76° pour SYSNAV). Le décalage entre ces 2 courbes à partir d'environ 4s reste encore à expliquer. A l'ouverture du système de séparation (T0+31.05s), le tangage de la fusée était d'environ -3° (il faut également ajouter à cela les incertitudes de mesures et des modèles d'exploitation). Nous pouvons donc indiquer que le système de séparation s'est déclenché alors que la fusée était dans une position quasi-horizontale. Ceci montre que les calculs de prédictions de trajectoire (logiciel Andromède) étaient corrects.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 40/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.5 MAGNETOMETRES

10.5.1 INTRODUCTION

Le script MATLAB d'analyses des données des magnétomètres est disponible en Annexe 12.9

La mesure du champ magnétique par les magnétomètres (que l'on notera Bx, By, Bz) et son exploitation ont un grand intérêt car ils permettent une estimation directe de l'attitude (roulis, tangage, lacet) de la fusée, c'est-à-dire sans dérive temporelle comme c'est le cas en exploitant les données des gyromètres (car il s'agit du résultat d'une intégration temporelle).

Les capteurs présents dans la fusée mesurent la force et la direction du champ magnétique local, autour de la fusée. Le champ magnétique mesuré est une combinaison du champ magnétique terrestre et du champ magnétique crée par les objets métalliques aux alentours. Celui-ci peut être définit par :



Champ magnétique local = Champ magnétique terrestre + Perturbations

Le champ magnétique terrestre est composé de lignes de champs circulant du pôle magnétique sud au pôle

magnétique nord (voir figure ci-contre). L'orientation et la force de la ligne de champ en un point de la surface du globe dépendent donc de sa position (latitude et longitude). L'intensité varie habituellement entre 0.3 Gauss et 0.6 Gauss.

Le champ magnétique terrestre est relativement stable dans le temps, bien que des petites variations journalières apparaissent (de l'ordre de 0.25 mGauss) en fonction de l'activité solaire et des courants électriques dans l'ionosphère. Le champ magnétique varie également en fonction de l'altitude (variation de l'ordre de 1 mGauss tous les 10 km).



Figure 38 : Champ magnétique terrestre

Dans notre application spécifique de vol de fusée expérimentale, les échelles de temps (30s jusqu'à culmination) et d'espace (culmination à 5.5 km) nous permettent d'émettre une hypothèse fondamentale :

Le champ magnétique terrestre est constant (en intensité et en orientation) pendant tout le vol de la fusée SERA 1.

Cela signifie que chaque point de donnée du champ magnétique mesuré se situe sur la surface d'une sphère centrée en 0, comme le montre l'exemple de la figure ci-dessous :



Figure 39 : Sphère du champ magnétique mesuré (Bx, By, Bz)

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 41/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.5.2 LES PERTURBATIONS MAGNETIQUES

Les perturbations magnétiques sont de deux types : les perturbations de champ de type « fer doux » et les perturbations de type « fer durs ».

Pour rappel, on appelle :

- Fer dur : un matériau ferromagnétique caractérisé par le fait qu'il est susceptible d'acquérir un magnétisme permanent.
- Fer doux : un matériau ferromagnétique caractérisé par le fait qu'il est susceptible d'acquérir des propriétés • magnétiques transitoires quand il est placé dans un champ magnétique.

Ci-dessous une présentation de la nature et de l'influence de ces deux perturbations.

10.5.2.1 LES PERTURBATIONS DE TYPE « FER DURS »

Les perturbations du champ de type « fer durs » sont dues aux champs permanents des structures ferromagnétiques aimantées de la fusée. Elles sont liées à la fusée et tournent avec elle pendant son vol. Ce type de perturbation induit un décalage du centre de la sphère (biais permanent), comme présenté (en 2D) dans

la figure ci-dessous :



Figure 40 : Effet de biais par les perturbations de type « fer durs »

Ces perturbations sont causées par des éléments ferromagnétiques à l'intérieur de la fusée.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 42/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.5.2.2 LES PERTURBATIONS DE TYPE « FER DOUX »

Les perturbations du champ de type « fer doux » sont dues aux champs induits par l'action du champ magnétique terrestre. Ces champs ne tournent pas avec la fusée mais leurs polarités et leurs amplitudes varient en fonction de la direction et de l'amplitude du champ magnétique terrestre par rapport à la fusée.

Ce type de perturbation induit une déformation de la sphère en ellipsoïde comme présenté (en 2D) sur la figure cidessous :



Figure 41 : Effet de déformation par les perturbations de type « fer doux »

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 43/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.5.3 LA CALIBRATION DES MAGNETOMETRES

Les mesures effectuées sont donc une combinaison du champ magnétique terrestre, supposé constant, et des perturbations de type « fer durs » et « fer doux ». Elles se trouvent en surface d'un ellipsoïde non centrée en 0. Le principe de calibration des mesures consiste à trouver la transformation H de l'espace qui va amener chaque point de l'ellipsoïde sur une sphère centrée en 0.



Figure 42 : Principe de calibration des mesures des magnétomètres

Mathématiquement cela se traduit par l'équation suivante :

 $Mag_calibrées = H * (Mag_brutes - X0)$

Où :

Mag_calibrées = Données calibrées Mag_brutes = Données brutes du capteur X0 = centre de l'ellipsoïde H = matrice de transformation de l'ellipsoïde en sphère

Il faut donc trouver les caractéristiques de l'ellipsoïde, à savoir : la position de son centre et la longueur et la direction de ses trois diagonales.

On comprend alors bien l'intérêt d'effectuer la procédure de calibration des magnétomètres, qui consiste à faire des mesures dans toutes les directions, avec la fusée entière, en fonctionnement, et sans éléments susceptibles de perturber à proximité. Plus on a de points pour compléter l'ellipsoïde, plus les paramètres de celui-ci seront définis avec précision, et donc plus la restitution des attitudes sera précise.

Sur SERA 1, la calibration a été effectuée à partir des données de vol uniquement et principalement à partir des points de la descente sous parachute. Les points mesurés ne parcourent pas l'intégralité de l'ellipsoïde car la fusée ne s'est jamais retrouvée en position avec sa pointe vers le bas. On le remarque sur la figure ci-dessous, il manque la partie supérieure de l'ellipsoïde.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 44/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

Champ magnétique X, Y, Z mesuré pendant le vol SERA 1



Figure 43 : Ellipsoïde partielle du champ magnétique mesuré pendant tout le vol de SERA 1 (Bx, By, Bz)

Ces points sont cependant suffisants pour obtenir une bonne estimation des caractéristiques de l'ellipsoïde comme le montre la figure ci-dessous :





Figure 44 : Approximation de l'ellipsoïde (en vert) et calibration (en rouge)

On remarque par cette étape de calibration que les mesures du champ magnétique dans la fusée sont fortement perturbées par des perturbations de type « fers durs » (biais) mais très peu par des perturbations de type « fers doux » (déformation de la sphère).

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
PER-RE-34-ZZ-8-GRF				F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 45/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

La fiabilité de la calibration s'observe sur la courbe présentant la norme du champ magnétique en fonction du temps. En effet, plus la calibration est précise, plus la norme du champ magnétique sera constante dans le temps. La figure ci-dessous présente une comparaison entre les courbes de la norme du champ magnétique mesuré en fonction du temps, pour les données brutes et les données après calibration.



Figure 45 : Norme du champ magnétique avant et après calibration en fonction du temps

On remarque que les données après calibration présentent une norme proche d'une constante en comparaison des données brutes. Cependant la calibration n'est pas parfaite et cela s'explique par le fait que :

- L'ellipsoïde obtenu par les données brutes n'est pas complet
- La calibration s'est faite à partir des données de vol et pendant la phase de descente sous parachute avec la coiffe séparée et ballottant autour

On remarque l'influence non négligeable de la rampe peu après le T0, modifiant la valeur de la norme du champ magnétique.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
PER-RE-34-ZZ-8-GRF				F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 46/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.5.4 CALCUL DE L'ATTITUDE DE LA FUSEE

A partir des données calibrées de mesure du champ magnétique pendant le vol, on peut retrouver directement les attitudes de la fusée : roulis, tangage, lacet. Les méthodes sont décrites dans les paragraphes suivants.

Sur la figure ci-dessous, la surface de la sphère bleue correspond à tous les points du champ magnétique dans toutes les directions. La portion de trait rouge correspond à tous les points mesurés du champ magnétique pendant le vol de la fusée, à partir de la sortie de rampe (T0 + 2.27s) et jusqu'à culmination (T0 + 31.54s).





Figure 46 : Parcours du champ magnétique mesuré pendant le vol jusqu'à culmination (Bx, By, Bz)

10.5.4.1 CALCUL DU ROULIS

Le roulis se calcul en mesurant la rotation du champ magnétique autour de l'axe OZ comme présenté sur la figure ci-dessous :



Figure 47 : Méthode de calcul du roulis à partir des données du magnétomètre

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 47/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

On remarque que les seuls cas où l'on ne peut pas restituer le roulis est quand l'axe de la fusée est colinéaire avec la ligne de champ. Dans ce cas, le champ magnétique mesuré n'a alors qu'une composante sur 0Z et il est invariant avec le roulis. Ce cas ne s'est pas produit pour le vol de SERA 1.

La courbe présentant le champ magnétique Bx en fonction de By et en fonction du temps est intéressante car elle permet de visualiser clairement la rotation de la fusée pendant le vol. On voit bien sur la figure ci-dessous les deux nets changements de sens du roulis.



Champ magnétique calibré X, Y en fonction du temps pendant le vol SERA 1

Figure 48 : Champ magnétique (Bx, By) en fonction du temps

La courbe du roulis est calculée à partir de la formule suivante :

Roulis = $Arctan (MAG_X/MAG_Y)$

Sur le graphique ci-dessous on peut voir les courbes du roulis calculés à partir des magnétomètres par la formule cidessus et à partir des gyromètres par intégration, ainsi que la courbe du gyromètre Z.





Comparaison du roulis calculé à partir des magnétomètres et des gyroscopes

Figure 49 : Comparaison du roulis (degré) calculé à partir des magnétomètres et des gyromètres

On peut remarquer que les courbes de roulis, calculées par les deux méthodes distinctes, sont très semblables et sont en cohérence par rapport aux mesures du gyromètre sur l'axe 0Z (100*rad/s sur le graphique). Une légère différence, qui va en s'accentuant, apparait à partir de T0+20s ; celle-ci peut s'expliquer par la dérive temporelle due aux intégrations successives du calcul à partir des gyromètres. Le calcul par les magnétomètres est quant à lui direct et ne souffre d'aucune dérive temporelle.

L'allure de ces courbes a été confirmée par les vidéos des caméras embarquées.

10.5.4.2 CALCUL DU TANGAGE

Le tangage de la fusée se calcule en chaque point « t » en mesurant l'angle entre l'axe -0Z et le vecteur (0Bx(t), 0By(t), 0Bz(t)), comme présenté sur la figure ci-dessous :



Figure 50 : Méthode de calcul du tangage à partir des données du magnétomètre

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 49/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

On comprend donc que le tangage est directement lié à la valeur de Bz. Le tangage est calculé à partir de la formule suivante :

 $Tangage = Tangage_Initial - Arctan (MAG_Z / sqrt(MAG_X + MAG_Y)) - Offset$

Où :

Tangage_Initial = Inclinaison de la rampe (soit 80° pour SERA 1) Sqrt = Racine carré Offset = offset lié à l'angle que forme la ligne du champ magnétique au point géographique concerné avec l'axe vertical

Le graphique ci-dessous présente la courbe du tangage par rapport au temps, calculée à partir de la formule précédente. L'allure de la courbe correspond bien à l'inclinaison de la fusée pendant son vol. D'après ce calcul, on remarque que la fusée avait une inclinaison négative (c'est-à-dire avec la pointe orientée vers le bas) d'environ -6° au moment de la séparation.



Figure 51 : Tangage de SERA 1 (degré) en fonction du temps

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
PER-RE-34-ZZ-8-GRF				F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 50/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.6 VITESSES



Figure 52 : Vitesse relative SERA 1

Ce graphique représente les vitesses relatives après exploitations des centrales inertielles (module des vitesses X, Y et Z). Nous constatons que les écarts entre nos prédictions (logiciel Andromède – en bleu sur le graphique cidessus) et les intégrations de centrales (utilisant les hypothèses décrites en 10.2) sont très limités (+/-10 m/s – ordre de grandeur des incertitudes de mesures et des modèles de post-traitements). Nous pouvons donc dire que les hypothèses de calculs pour les prédictions de trajectoire (atmosphère, masse, courbe de poussée, coefficients aérodynamiques) sont correctes.

La fusée a donc atteint une vitesse relative maximale d'environ 450 m/s.

La vitesse en sortie de rampe est de l'ordre 48 m/s pour Sysnav et 49 m/s pour Xsens.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 51/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.7 PRESSIONS

La fusée SERA 1 était équipée de plusieurs capteurs de pression (cf chapitre 5). Ce chapitre traitera des résultats provenant de ces capteurs :

- 1 capteur de pression totale (dans la pointe anémoclinométrique)
- 2 capteurs de pression différentielle (dans la pointe anémoclinométrique)
- 2 capteurs de pression statique pariétale au milieu de la fusée
- 1 capteur de pression statique pariétale entre 2 ailerons en bas de la fusée (au dessus du culot)
- 1 capteur de pression différentielle entre le culot et le capteur de pression statique pariétale bas.

10.7.1 SONDE ANEMOCLINOMETRIQUE



Figure 53 : Sonde anémoclinométrique

Ci-dessous, une vue en coupe de la sonde anémoclinométrique qui fait apparaître à gauche les trous pariétaux et à droite, le trou central pour la mesure de pression totale.



Figure 54 : Vue en coupe de la sonde anémoclinométrique

La sonde anémoclinométrique était composée de 5 trous :

- 1 trou dans l'axe longitudinal de la fusée pour la mesure de pression totale
- 4 trous pariétaux pour les mesures de pression statique dans 4 directions.

Les capteurs montés (2 au total) sur les cartes CPA et CPD (cf Référence [R1] pour la signification de ces cartes) étaient des capteurs de pression différentielle. Voici comment étaient répartis ces capteurs (cf Figure 3 pour de plus amples informations quant au montage des capteurs sur la sonde anémoclinométrique):

 $\Delta P1 = PPE1 - PPE3$ $\Delta P2 = PPE4 - PPE2$





Le graphique ci-dessus représente les pressions différentielles $\Delta P1$ et $\Delta P2$ comme définit précédemment. Afin de corréler ces données avec la position de la fusée, nous avons également ajouté la position en roulis et le taux de roulis.

Il est très difficile d'analyser ces courbes. En effet, ce type de moyen de mesure doit au préalable être étalonné en soufflerie ou par calcul afin d'obtenir les coefficients de chaque point de mesure. Afin de poursuivre les analyses sur la sonde, nous indiquons les équations qui régissent l'exploitation des ces mesures dans l'annexe 12.7.





10.7.2 PRESSIONS STATIQUES ET PRESSION DYNAMIQUE

Figure 56 : Pressions statiques SERA 1

Le graphique ci-dessus représente les mesures de pressions statiques effectuées au cours du vol de SERA 1. L'écart entre les mesures pariétales (en marron et bleu foncé) avec la mesure de pression Sysnav (mesure s'effectuant sur la carte, donc dans le boitier) peut s'expliquer par le phénomène de vidange. En effet, lorsque la vitesse de la fusée augmente l'air contenu dans la fusée s'accélère pour être évacuée par le culot (phénomène d'aspiration type tube de venturi) se qui donc engendre une dépression. Cette dépression est visible dans la première partie du vol (accélération de la fusée) et est de l'ordre de 20 hPa. Plus la vitesse de la fusée diminue moins cette dépression est importante.

La courbe rouge représente la mesure de pression statique pariétale au culot. Sur la première phase (avant Mach 0.9) nous constatons que la pression statique est bien inférieure à la pression statique pariétale au milieu de la fusée. En effet, cette mesure de pression se situe entre 2 ailerons (cf Figure 2). Les phénomènes aérodynamiques dans cette zone sont assez complexes mais nous savons que du fait de la présence des ailerons, l'air accélère (phénomène de portance sur une aile) ce qui induit une dépression que nous voyons apparaître à partir de T0+3s.





L'analyse du graphique ci-dessus indique que la pression dynamique estimée par le logiciel Andromède est inférieure de 10kPa par rapport à ce que la fusée aurait subi. Cela pourrait s'expliquer par la prise en compte d'une pression statique infinie égale à la pression statique du flanc différente de la pression statique de l'atmosphère sans perturbation aérodynamique. Du fait de la vitesse de la fusée, cette pression (pression statique flanc) est inférieure à la pression atmosphérique infinie, nous avons donc une surestimation de la pression dynamique. Un autre phénomène pourrait aussi expliquer cet écart. En effet, la sonde anémoclinométrique ne mesure pas exactement une pression d'arrêt totale comme le ferait un tube Pitot. Comme le montre la Figure 54, la prise de pression n'est pas perpendiculaire à l'écoulement comme elle pourrait l'être sur un tube Pitot (cf Figure 58), cela induit donc une surestimation de la pression totale rencontrée par la fusée. Il faut donc soit déterminer par calcul cette surestimation soit à l'avenir modifier la sonde anémoclinométrique afin d'obtenir un canal perpendiculaire à l'écoulement dans le but de mesurer une pression d'arrêt totale. Nous considérons donc aux vues des analyses précédentes que les estimations de trajectoire fournies par le logiciel Andromède sont proches de la réalité et que la **pression dynamique maximale rencontrée par SERA 1 est de l'ordre de 140 kPa**.



Figure 58 : Tube pitot

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 55/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.7.3 COEFFICIENTS DE PRESSION

Les coefficients de pression sont calculés à partir des mesures de pression statique disponibles sur la fusée. Nous disposons au total de 5 mesures (rappelées dans la légende de la Figure 59 ci-dessous). La coefficient de pression est défini comme suit, avec P la pression mesurée, Pstat la pression atmosphérique infinie et Pdyn la pression dynamique :

$$Kp = \frac{P - Pstat}{Pdyn}$$

Notas :

- Le Mach affiché sur ces courbes n'est pas le Mach présenté dans le chapitre 10.8 car plusieurs analyses ont été réalisées. Cette version d'analyses est la moins évoluée (provenant uniquement des intégrations simples de la centrale SYSNAV).
- Les mesures en dessous de Mach 0.3 ne sont pas exploitables (limitation du modèle)





Figure 61 : Coefficients de pression en fonction du Mach SERA 1

Les Figure 59, Figure 60 et Figure 61 représentent l'évolution des coefficients de pression à différents emplacements sur la fusée SERA 1 au cours du temps pour ces 2 premières figurent puis en fonction du Mach. Le plus marquant après analyses de ces graphiques est la mise en évidence indiscutable de la zone transsonique. En effet, la Figure 61 montre qu'à partir de Mach 0.9, le coefficient de pression sur le flanc et au culot est perturbé et cela jusqu'à Mach 1.1 - 1.2 (rappelons que la Mach utilisé ici n'est pas celui discuté dans le chapitre suivant). Le coefficient de pression Pointe est extrait de la mesure de pression totale et comme indiqué en 10.7.2, celui-ci pourrait être quelque peu surestimé.

Nous pouvons également constater la différence de coefficient de pression engendré par la propulsion. En effet sur la mesure Culot (en vert clair sur la Figure 60) avant T0+6s et après T0+12 s, le coefficient de pression culot moyen est différent. Avant T0+6s, la propulsion est toujours active. Après T0+12s, le moteur ne pousse plus.

Desition		Кр	
Position	Bas	Haut	Moyen
Flanc 1	-0.03	0.05	0.01
Flanc 2	-0.03	0.05	0.01
Culot	-0.27	-0.02	-0.15 -0.1
Paroi Culot	-0.35	-0.1	-0.12
Pointe	1	1.5	1.3

Récapitulatif des valeurs de coefficient de pression (entre Mach 0.3 et 1.3):

Tableau 6 : Récapitulatif coefficient de pression

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
PER-RE-34-ZZ-				GRF	
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 57/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

10.8 MACH



Figure 62 : Mach SERA 1

Le graphique ci-dessus est extrait des analyses réalisées par N.NAYEF (étudiant à l'UEVE en stage de fin d'étude sur l'analyse des données vol – ref PER-RST- ??- ??-UEVE). L'évolution du Mach extrait des centrales XSENS et SYSNAV est identique à celle prédit par le logiciel Andromède. Les écarts que nous constatons sont principalement liés aux hypothèses de travail mais également aux incertitudes de mesures des centrales inertielles.

Mach maximum atteint par SERA 1 = 1.39

Ce résultat contribue à valider toutes les hypothèses de travail utilisées pour l'avant-projet SERA 1. En effet, l'objectif principal de ce projet était d'effectuer un vol avec un Mach supérieur à 1.2. C'est le cas ici.

D'autres analyses seront lancées par la suite afin d'utiliser les mesures de pression de la sonde anémoclinométrique pour redéterminer le Mach et le comparer aux mesures des centrales décrites ci-dessus.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 58/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.9 ALTITUDE / HAUTEUR



Figure 63 : Hauteur SERA 1

La hauteur maximale (également appelée culmination) atteinte par SERA 1 est de 5200 m. A l'instar des résultats précédents, nous constatons que l'évolution de la hauteur en fonction du temps est semblable à celle prédite par le logiciel Andromède. D'autres analyses utilisant les mesures de pression disponibles pourraient valider ces résultats.

Nota : la forme en « marche d'escalier » de la courbe du logiciel Andromède est liée à la méthode d'interpolation. Nota 2 :

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 59/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.10 DESCENTE SOUS PARACHUTE

Pour rappel, la fusée SERA 1 était équipée de 2 parachutes. Un petit parachute de 0.4572 m de diamètre (soit une surface de 0.1642 m²) ayant un Cx estimé de 1.5 qui correspond initialement au parachute utilisé entre les altitudes 5400 m et 500 m. Le second parachute (grand parachute) de 1.524 m de diamètre (soit une surface de 1.8241 m²) devait permettre une vitesse d'impact de l'ordre de 10 m/s et s'ouvrait à 500 m de hauteur. Le Cx estimé de ce second parachute était également de 1.5. Ces valeurs de Cx proviennent de la feuille de calcul fournie par le fabricant (cad FruityChutes).

Altitu	de (m)	Vitesse prévue (m/s)	Vitesse réelle mesurée	Temps de descente	Temps réel (s)	T0 + Telem
De	А	P	(m/s)	prévu (s)	(2)	(s)
5400	5000	41.5	31.4	9.6	-	-
5000	4000	40.1	30.16	24.9	-	-
4000	3000	38.7	29.01	25.8	34.63	108.46
3000	2000	37.3	26.77	26.8	36.42	144.48
2000	1500	35.9	23.23	27.9	34.1	178.77
1500	1000	35.3	11.22	27.9	34.08	213.07
1000	500	34.8	10.92	14.4	46.01	259.08
500	0	10	11.03	50	46.37	305.45

Tableau 7 : Récapitulatif descente sous parachute

Le tableau ci-dessus récapitule les différents paramètres de descente sous parachute. En analysant ce tableau, nous pouvons constater les écarts significatifs entre les vitesses de descente prévues et celles réellement constatées lors du vol. La vitesse de descente sous petit parachute était bien inférieure à celle préalablement estimée. Cela s'explique principalement par une mauvaise estimation du Cx. En effet après analyses, nous obtenons un Cx réel de 2.4 pour le petit parachute. Nous estimons que cet écart est lié à la faible surface du petit parachute. En effet, lorsque la fusée est séparée, nous obtenons 3 surfaces trainantes (tube principale, l'ogive et le parachute). Ces surfaces n'étaient pas prises en compte dans les calculs de descente sous parachute. La somme des surfaces trainantes fusée (cad tube principal + ogive) correspond à environ 25% de la surface du parachute par ces surfaces trainantes, soit au contraire une augmentation de la surface trainante globale. De façon empirique, nous pouvons dire que lorsque la surface du parachute est inférieure ou égale à 4 fois celle des autres surfaces trainantes (valeur à réajuster en fonction des prochains vols), nous devons prendre en compte ces surfaces trainantes dans les calculs de prédiction de vitesse de descente soit une surface trainante totale égale à :

Surface totale = Surface parachute + Surface tube principal + Surface ogive

Ces erreurs d'estimations ont donc conduit à une altitude d'ouverture du grand parachute de 1000 m supérieure à celle que nous avions estimée.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 60/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

Elévation (m) R.DELPY 19/05/2014 **Trajectoire SERA 1** Pstat (hPa) Mach Pdyn (hPa) Elévation Sysnav (m) 6000 2 Elévation Flanc (m) Pstat SYSNAV (hPa) 1.8 Pdyn SYSNAV (hPa) Mach SYSNAV 5000 1.6 1.4 4000 1.2 3000 1 0.8 2000 0.6 0.4 1000 0.2 0 0 5 0 10 15 20 25 30 t0+.... (s) 35 Figure 64 : Trajectoire SERA 1

10.11 TRAJECTOIRE

Le graphique ci-dessus représente les paramètres permettant d'analyser une trajectoire de lanceur. Comme précédemment la valeur de Mach présentée ici n'est qu'une valeur sous-estimée du fait de la différence de modèle d'exploitation utilisé (cf 10.8 pour de plus amples explications à ce propos).



Figure 65 : Test trajectoire 3D SERA 1

A titre indicatif, le graphique ci-dessous représente une première restitution de trajectoire 3D du démonstrateur SERA 1. Les analyses se poursuivent afin d'améliorer cette restitution. A terme, des moyens de restitution de trajectoire sol seront nécessaires afin de valider ou non ces restitutions.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
PER-RE-34-ZZ-8-GRF				F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 61/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.12 VIBRATIONS

La fusée SERA 1 était également équipée d'un capteur de vibration sous coiffe. Les fréquences d'acquisition sont reportées dans le chapitre 5.



Figure 66 : Vibrations X, Y, Z sous coiffe SERA 1

Pour le moment, aucune analyse poussée n'a pu être réalisée sur ces mesures. Cependant, une première estimation fréquentielle des modes de vibration de la fusée fût accomplie par l'intermédiaire de CNES/DLA/SDT. Vous pouvez retrouver cette analyse en 12.8 (Annexe 8). Nous indiquons ici le bilan de celle-ci.



Figure 67 : DSP filtre HANNING, 256 points, recouvrement de 0.5s (SERA1 bleu, MasterLeia Turquoise)

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 62/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

Le graphique ci-dessus représente le spectre fréquentielle provenant de la centrale SYSNAV sur l'axe X avec une fréquence d'acquisition de 800Hz.

La principale analyse que nous pouvons réaliser à la lumière de ces résultats est que nous avons des premiers modes de vibrations sur l'axe X de la fusée aux alentours des fréquences suivantes :

- 10 Hz
- 30 Hz
- 59 Hz

Ces analyses seront à poursuivre sur les autres axes de la fusée et à compléter par des études dynamiques plus approfondies sur la structure de la fusée.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
PER-RE-34-ZZ-8-GRF				F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 63/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.13 CX



Figure 68 : Cx balistique subsonique SERA 1

Afin d'obtenir des détails concernant les méthodes de reconstitution du Cx, nous vous renvoyons vers la référence [R2].

Le Cx représente sur le graphique ci-dessus est un Cx balistique (sans propulsion) et subsonique (correspondant environ à un Mach de 0.85). En moyennant celui-ci sur 3 secondes, nous obtenons une valeur de **0.47**.

La Figure 4 représente les valeurs de coefficients aérodynamiques utilisés pour les estimations de trajectoire et nous constatons que ces 2 valeurs sont identiques soit un Cx balistique subsonique de 0.47.

Malheureusement, le modèle de restitution de Cx n'est utilisable que dans cette gamme de vitesse et Mach. Dans la suite des restitutions (Poussée et trainée), nous considérerons cette valeur comme constante sur l'intégralité du vol. Même si cette hypothèse est minorante vis à vis des performances globales, nous ne connaissons pas de moyens analytiques (utilisant les mesures d'accélérations des centrales inertielles) permettant de déterminer le Cx pour les autres instants du vol (en phase propulsée ou supersonique).

Ne retenons donc que l'estimation de Cx=0.47 pour Mach 0.85-0.9 est correcte. Nous pouvons également émettre l'hypothèse que les valeurs de Cx estimés en Figure 4 sont correctes pour l'intégralité du vol. A l'écriture de ce document, cette hypothèse n'a pas été prise en compte pour la suite des analyses.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 64/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

10.14 POUSSEE ET TRAINEE



Comme indiqué dans le chapitre précédent (10.13), la restitution de la poussée se base sur un coefficient de trainée constant sur l'intégralité du vol et qui correspond au coefficient de trainée balistique subsonique. Nous constatons donc que dans la première phase de poussée du moteur (jusqu'à environ T0+5.5s), le moteur a fourni les performances attendues (quelque peut sous estimée du fait d'un Cx plus grand en réalité). En revanche à partir de T0+5.5s, la restitution de la poussée est très incomplète. En effet, nous sommes passés supersonique à T0+6s environ, ce qui induit donc une augmentation sensible du Cx à cet instant (on passe de 0.46 à 0.6 entre Mach 0.9 et Mach 1). Malgré nos incertitudes vis-à-vis de cette restitution, nous concluons que le moteur PRO98-3G Green 3 a fonctionné de façon nominale par rapport à la courbe de poussée résultant des essais réalisés à l'ONERA.



A l'instar de la restitution de la poussée, la force de trainée est à analyser attentivement. En effet, le fait de sousestimer le Cx dans la phase supersonique induit une force de trainée bien moindre dans cette gamme de Mach. En revanche, et comme l'indique le graphique ci-dessus, en dehors de la gamme de Mach comprise entre 0.9 et 1.4 (correspondant à une fourchette de temps allant de T0+5.5s et T0+11s), la restitution de la trainée correspond approximativement à ce qui était estimé au préalable (environ -10% entre la trainée à Cx constant et celle estimée dans le logiciel Andromède sur la phase balistique subsonique). Nous considérons donc que la force de trainée SERA 1 complète correspond à celle du logiciel Andromède.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 65/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

10.15 ZONE D'IMPACT

La visualisation ci-dessous représente l'estimation de trajectoire balistique à la veille du tir. La zone grise représente la prédiction de zone de retombée sous parachute.

Comme nous pouvons le constater, le point de chute (indiqué avec une punaise jaune sur l'image) se situe dans la zone prédite. Mais ceci n'est pas forcément révélateur de la véracité du modèle de prédiction. En effet, comme démontré dans le chapitre 10.10, les vitesses de descente obtenues n'étaient pas celles envisagées. Nous avons donc eu probablement des vents plus faibles que prévu ce qui a permi de retomber dans la zone prédéfini. Nous estimons que ce vol (SERA 1) ne permet pas de valider ou non le modèle de prédiction de trajectoire lors de la descente sous parachute.



Figure 71 : Zone d'impact et trajectoire estimée SERA 1

Coordonnées de la récupération :

67°54'23.72'' N 21°4'10.41'' E

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 66/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

11 CONCLUSION

SERA 1 est un succès. Tant d'un point de vue objectifs/résultats que d'un point de vue implications étudiantes et organisation.

D'un point de vue performances, l'objectif prioritaire était d'effectuer un vol supersonique. Nous avons démontré que cela a été le cas (Mach max = 1.39). Nous avons également atteint une culmination de plus de 5 km ce qui en fait la fusée PERSEUS ayant la plus haute culmination (le record était détenu par ARES01H Amidala à propulsion hybride lancée en 2011). La fusée est redescendue sous parachute ce qui confirme que le système de récupération est opérationnel pour ce type de lancement. Malheureusement, une mauvaise estimation de la vitesse de descente n'a pas permis d'obtenir l'altitude d'ouverture estimée pour le grand parachute. Néanmoins, nous avons expliqué cette erreur (cf chapitre 10.10) et nous pourrons capitaliser sur cette expérience pour les prochaines campagnes. Cependant plusieurs points de restitution sont encore à approfondir, nous en faisons le listing ci-dessous :

- la sonde anémoclinométrique (cf 10.7.1)
- attitude en lacet (cf 10.4)
- attitude en tangage (cf 10.4)
- les mesures du capteur de vibration sous coiffe (10.12)
- la restitution du Cx en phase subsonique et supersonique (cf 10.13)
- la restitution de la poussée et la trainée dans la phase supersonique (10.14)
- la restitution de la trajectoire 3D (cf 10.11)
- coefficients de pression (cf 10.7.3 tenter de redémontrer numériquement les valeurs expérimentales)

Ces analyses plus poussées pourront faire l'objet de projets au sein des écoles et universités partenaires du projet PERSEUS.

Ci-dessous un récapitulatif des paramètres globaux du vol avec leurs prédictions avant-vol :

	Mes	Drádictions	
	XSens	Sysnav	Predictions
Accélération max (g)	10.68	10.68	10.32
Vmax relative (m/s)	452	453	463
Mach	1.383	1.385	1.392
Apogée à TO+ (s)	31.02	31.03	31.034
Culmination	5143	5142	5168
Vitesse de descente petit parachute (m/s)	-27.99	-27.23	De -37 à -41
Vitesse de descente grand parachute (m/s)	-11.63	-11.23	-10

Tableau 8 : Récapitulatif des données de performances et trajectoires SERA 1

Le tableau ci-dessus nous permet, hormis pour le calcul de descente sous parachute, de valider les hypothèses de calcul utilisées pour la prédiction de trajectoire (aérodynamique lanceur, modèle atmosphérique, masse, propulsion, incidence nulle sur le vol). Il faut tout de même rappeler que le logiciel Andromède (notre outil de calculs de performances et trajectoire) ne prend pas en compte l'influence du vent sur la trajectoire. Hors sur le tir SERA 1, la vitesse du vent était assez faible ce qui a conduit à de bonnes prédictions. Si le vent était amené à être plus important pour de prochains tirs, les prédictions de trajectoire pourraient bien être moins précises.

Le seul point négatif à apporter à cette analyse concerne l'expérience passager MADS. En effet, pour des problèmes de détection de signal de mise à feu , l'expérience suédoise de l'université de LULEA n'a pas lancé l'acquisition et l'enregistrement de ces mesures lors du vol. Cette coopération a tout de même été bénéfique et enrichissante pour PERSEUS car ce fût la première fois que le projet devait prendre en compte une charge utile expérimentale au sein de son démonstrateur.

D'un point de vue organisation et implication étudiante, même si cela ne concerne pas directement le propos de ce document, en 3 ans, PERSEUS a réussi à mettre sur pied un projet de lancement de fusée supersonique de l'avant-

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 67/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

projet sommaire jusqu'à l'analyse des données de vol. Cela est un grand pas en avant qui n'a pu être réalisé que grâce à l'expérience acquise lors des précédents lancements de fusées expérimentales. C'est également la première coopération inter-associations et partenaires du projet PERSEUS.

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 68/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

12 ANNEXES

12.1 ANNEXE 1 : GLOSSAIRE

Andromède	Outil de calculs de trajectoires et performances développé au sein du projet PER SEUS
cad	C'est à dire
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
DCM	Direct Cosine Matrix - Matrice de changement de repère entre repère mobile (m) et le repère local fixe (NED)
GAREF Aérospatial	Club scientifique de jeunes de la ville de Paris
GPIO	General Purpose Input/Output – Entrée/sortie à utilisation multiple
IPSA	Institut Polytechnique des Sciences Avancées – Ecole d'ingénieurs basée à Ivry sur Seine
ISAE	Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace
MADS	Magnetic Attitude Determination System
MAF	Mise à Feu
MATLAB	Langage de programmation pour calculs numériques matriciels
NED	North East Down - Repère local fixe
OBC	On Board Computer – Ordinateur de bord
OCTAVE	Organisme de Création Technologique Aérospatiale de la Ville d'Evry / Association étudiante de l'UEVE
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
Pdyn	Pression dynamique
Pstat	Pression statique
Ptot	Pression totale
S3	SupaeroSpaceSection – Association étudiante de l'ISAE
SERA	Supersonic Experimental Rocket ARES
SSC	Swedish Space Corporation – Site de lancement suèdois basé à Kiruna
UEVE	Université d'Evry Val d'Essonne

12.2 ANNEXE 2 : PREDICTIONS METEO SSC

- z = Altitude (m)
- p = Pression (hPa)
- t = Température (°C)
- td = ??

ddd= Azimut de provenance du vent (°)

ff = Force du vent (m/s)

ECMWF verden 2014050312 +096h latitud, longitud: 67.90 21.10 Rutans h^{*}jd ^{*}ver havet: 442m z p t td ddd ff 73629 0 -88.0 -99.0 100 16.1 71246 0 -70.8 -99.0 120 16.7 68874 0 -61.7 -99.0 122 14.5 66549 0 -50.5 -99.0 122 14.5 66549 0 -50.5 -99.0 134 9.6 64257 0 -38.8 -99.0 119 7.2 62007 0 -29.2 -99.0 112 7.3 59810 0 -20.7 -99.0 125 5.1 57681 0 -15.2 -99.0 150 5.0 55638 0 -11.8 -99.0 165 6.1

	PER-RE-34-ZZ-8-GRF					
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 69/91	Edition :	0 Révision : 3	Date : 30/09/2014		
536	82 0 -9.0 -9	99.0 170 5	5.8			
518	18 1 -8.1 -9	99.0 151 5	5.8			
500-	43 1 -7.2 -9	99.0 132 8	3.2			
483:	03 1 -6.4 -9 12 1 66 0	9.0 129 11	1./			
4072	+3 1 -0.0 -9)9 1 -61 -9	9.0 128 13	0.5			
437	43 2 -5.4 -9	9.0 129 10 99.0 134 9	9.1			
4234	41 2 -5.3 -9	9.0 125 10	0.7			
4101	10 2 -8.8 -9	9.0 106 11	1.6			
3975	54 3 -12.8 -9	99.0 94 10	0.7			
385	65 3 -15.3 -	99.0 94 9	9.2			
3/4.	36 4 -17.6 -17	99.0 83 8	3.0			
303 252	53 5 -20.3 -	99.0 80 6 08.5 106 4	0.0 6 2			
3333	+/ 3-24.9-3 84 6_277_0	98.3 100 0 98.0 113 <i>6</i>	5.5 5.9			
3340	54 7 -286 -964	974 109 f	5.7			
3258	35 8 -31.3 -	96.9 123	5.0			
3174	46 9 -33.6 -9	96.3 130	7.2			
3094	1 10 -34.2 -	95.7 125	7.7			
3016	7 11 -35.5 -	95.1 121	7.7			
2942	4 12 -37.6 -	94.5 120	8.6			
2871	1 14 -38.7 -9	93.9 114 1	0.0			
2802	3 15 -39.3 -	93.4 106	9.5 9.1			
2730	0 18 -418 -	95.0 100	6.1 6.4			
2612	3 20 -42.6 -	92.3 115	7.4			
2550	6 22 -42.9 -	91.8 100	8.5			
2492	28 24 -43.9 -	91.4 82 8	8.8			
2437	70 26 -44.8 -	-90.9 71 8	8.3			
2382	28 28 -45.4 -	-90.4 64 8	8.2			
2330)3 30 -45.9 -	-89.8 46 8	8.2			
2279	94 33 -47.0 -	·89.3 25 (5.2			
2230)1 33 -48.1 -)3 38 -48.4 -	·88.3 /0 2	+.U 3 8			
2132	57 41 -483 -	88.0 51	39			
2090)3 43 -48.4 -	.87.6 42 3	3.7			
2046	61 46 -48.7 -	.87.3 31 3	3.7			
2003	31 50 -49.1 -	87.0 31 3	3.7			
1961	3 53 -49.4 -	-86.8 37 4	4.1			
1920)6 56 -49.6 -	-86.6 39 4	4.6			
1880)9 60 -49.5 -	-86.4 38 4	4.8			
1842	22 63 -49.6 -	·80.2 35 4 861 27 7	+./ 15			
180-	+4 07 -49.8 - 73 71 -500 -	-80.1 27 2	+. <i>3</i> 3 Q			
1730	9 75 -50 2 -	85.7 360	3.3			
1695	0 79 -50.2 -	85.5 358	2.8			
1659	96 84 -50.1 -	85.3 10 2	2.9			
1624	46 89 -50.1 -	-85.0 22 3	3.5			
		010 26	11			
1589	98 93 -50.4 -	-84.8 20 2	T. 1			
1589 1555	98 93 -50.4 - 55 98 -51.1 -	-84.8 26 2 -84.6 26 2	4.4			
1589 1555 1521	98 93 -50.4 - 55 98 -51.1 - 6 104 -52.0 -	-84.8 26 2 -84.6 26 2 -84.3 23 4	4.4 4.1			
1589 1555 1521 1488	$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	-84.8 26 2 -84.6 26 4 -84.3 23 4 -84.1 24 1	4.4 4.1 3.7			
1589 1555 1521 1488 1454	$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	-84.8 26 2 -84.6 26 4 -84.3 23 4 -84.1 24 4 -83.8 35 4 -83.5 42	4.4 4.1 3.7 4.1			

Direction des Lanceurs - Sous Di	PER-RE-34-ZZ-8-GRF					
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 70/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014		
135	69 134 -52.3 -	83.0 43 5.4				
132	49 141 -52.4 - 32 148 -523 -	-82.7 41 5.3 -82.4 38 5.2				
126	18 155 -52.0 -	·82.1 38 5.1				
123	06 163 -51.8 -	81.8 41 5.1				
119	97 171 -51.8 -	81.4 40 4.9				
110	88 187 -51.7 -	80.7 66 3.9				
110	87 196 -52.0 -	80.0 84 5.0				
107	91 206 -52.3 -	79.0 86 6.1				
104	97 215 -52.6 - 06 225 53.0	78.1 92 6.9				
991	9 235 -536 -	74 9 94 8.0				
963	35 246 -54.7 -	72.8 95 9.1				
935	6 257 -56.0 -7	70.4 101 9.5				
908	0 268 -57.2 -6	67.2 105 10.5				
880	8 280 -57.5 -0 9 292 -57.5 -6	50.4 130 11 1				
827	2 305 -57.0 -5	59.9 139 12.2				
800	5 318 -55.4 -5	8.8 143 12.7				
773	9 332 -53.1 -5	6.5 140 13.3				
747.	2 346 -30.3 -3 4 360 -48 1 -5	51.8 130 13.0 51.3 131 13.6				
693	5 375 -45.8 -4	9.0 124 13.2				
666	6 390 -43.5 -4	6.6 117 13.3				
639	7 406 -41.2 -4	4.4 113 13.9				
612	/ 423 -39.1 -4 8 439 -371 -4	2.2 108 14.3				
558	8 457 -35.1 -3	8.1 104 13.5				
531	8 475 -33.3 -3	6.0 102 13.2				
504	8 493 -31.2 -3	5.6 102 13.6				
478	0 512 -29.1 -3 5 532 -275 -/	12 0 99 14 2				
425	4 551 -26.6 -4	42.8 95 14.0				
400	0 571 -25.7 -4	41.1 95 13.4				
375	3 591 -24.4 -3	38.8 96 12.4				
351	5 610 -23.0 -2 1 630 -21 4 2	30.8 97 11.5 353 99 10 6				
328	8 649 -19.9 -3	34.6 101 9.8				
284	3 669 -18.4 -3	34.5 103 9.0				
263	7 687 -17.1 -3	35.0 106 8.4				
244 225	1 705 - 15.8 - 3 4 723 - 148 - 3	35.3 108 8.0 34 7 109 7 8				
223	7 740 -13.9 -3	33.4 109 7.6				
191	0 757 -13.2 -3	31.7 108 7.3				
175	3 772 -12.5 -3	30.0 105 6.9 8 4 102 6 6				
160 1 <i>4</i> 4	0 /8/ -11.9 -2 57 802 -113 -	20.4 103 6.6 271 99 61				
133	88 815 -10.6 -2	26.3 98 5.7				
12	17 828 -9.8 -2	26.1 98 5.4				
110	05 840 -10.7 -	19.6 94 6.0				
100 00	01 852 -12.3 - 6 863 - 11 8 -1	14.5 /5 5.0 2.8 69 5.4				
81	7 873 -11.0 -1	2.0 70 5.5				
73	4 882 -10.4 -1	1.3 69 5.4				

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 71/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	
65 58 52 46 40 35 31 26 22 19 15 12 10	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$			
74 5 29 9	4 960 -3.4 -9 1 963 -3.1 -9 9 966 -2.9 -9 9 968 -2.6 -9	0.7 65 4.3 0.6 65 4.2 0.5 65 3.9 .4 65 3.6			

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 72/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

12.3 ANNEXE 3 : MODELE ATMOSPHERIQUE POUR LE LOGICIEL ANDROMEDE :

Atmosphère standard recalée avec les paramètres de prédiction

	Masse		Pression		
Altitude (m)	volumique de	Vitesse du son (m/s)	atmosphérique	Température (°C)	
	l'air (kg/m3)		(kPa)		
300	1.261	331.3	98900	0	
350	1.227	329.9	95431	-2.275	
400	1.221	329.7	94863	-2.6	
450	1.216	329.5	94297	-2.925	
500	1.210	329.3	93734	-3.25	
550	1.204	329.1	93174	-3.575	
600	1.198	328.9	92617	-3.9	
650	1.193	328.7	92062	-4.225	
700	1.187	328.5	91510	-4.55	
750	1.181	328.3	90960	-4.875	
800	1.175	328.1	90414	-5.2	
850	1.170	327.9	89870	-5.525	
900	1.164	327.7	89328	-5.85	
950	1.159	327.5	88789	-6.175	
1000	1.153	327.3	88253	-6.5	
1050	1.147	327.1	87720	-6.825	
1100	1.142	326.9	87189	-7.15	
1150	1.136	326.7	86661	-7.475	
1200	1.131	326.5	86135	-7.8	
1250	1.125	326.3	85612	-8.125	
1300	1.120	326.1	85091	-8.45	
1350	1.114	325.9	84573	-8.775	
1400	1.109	325.7	84058	-9.1	
1450	1.104	325.5	83545	-9.425	
1500	1.098	325.3	83035	-9.75	
1550	1.093	325.1	82527	-10.075	
1600	1.087	324.9	82022	-10.4	
1650	1.082	324.7	81519	-10.725	
1700	1.077	324.5	81019	-11.05	
1750	1.072	324.3	80521	-11.375	
1800	1.066	324.1	80025	-11.7	
1850	1.061	323.9	79533	-12.025	
1900	1.056	323.7	79042	-12.35	
1950	1.051	323.5	78554	-12.675	
2000	1.045	323.3	78069	-13	
2050	1.040	323.1	77586	-13.325	
2100	1.035	322.9	77105	-13.65	
2150	1.030	322.7	76627	-13.975	
2200	1.025	322.5	76151	-14.3	
2250	1.020	322.3	75678	-14.625	
2300	1.015	322.1	75207	-14.95	
2350	1.010	321.9	74738	-15.275	
2400	1.005	321.7	74272	-15.6	
Direction des	Lanceurs - Sous Di	rection Prépara	tion du Futur	, Recherche et	Technologie
-------------------	--------------------	-----------------	---------------	----------------	-------------------
			PER-RE	-34-ZZ-8-GR	F
Exploitation Nive	eau 0 de SERA-1	Page : 73/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014
2450	1 000	321.5	73	808	-15 925
2500	0.995	321.3	73	346	-16.25
2550	0.990	321.1	72	887	-16.575
2600	0.985	320.9	72	430	-16.9
2650	0.980	320.7	71	975	-17.225
2700	0.975	320.5	71	523	-17.55
2750	0.970	320.3	71	073	-17.875
2800	0.965	320.1	70	626	-18.2
2850	0.960	319.9	70	180	-18.525
2900	0.955	319.7	69	737	-18.85
2950	0.951	319.4	69	296	-19.175
3000	0.946	319.2	68	858	-19.5
3050	0.941	319.0	68-	421	-19.825
3100	0.936	318.8	67	987	-20.15
3150	0.931	318.6	67	555	-20.475
3200	0.927	318.4	67	126	-20.8
3250	0.922	318.2	66	698	-21.125
3300	0.917	318.0	66	273	-21.45
3350	0.913	317.8	65850		-21.775
3400	0.908	317.6	65429		-22.1
3450	0.903	317.4	65011		-22.425
3500	0.899	317.2	64594		-22.75
3550	0.894	317.0	64180		-23.075
3600	0.889	316.8	63	768	-23.4
3650	0.885	316.6	63	358	-23.725
3700	0.880	316.4	62	950	-24.05
3750	0.876	316.2	62	544	-24.375
3800	0.871	316.0	62	140	-24.7
3850	0.867	315.7	61	739	-25.025
3900	0.862	315.5	61	339	-25.35
3950	0.858	315.3	60	942	-25.675
4000	0.853	315.1	60.	547	-26
4050	0.849	314.9	60	154	-26.325
4100	0.845	314.7	59	763	-26.65
4150	0.840	314.5	59	374	-26.975
4200	0.836	314.3	58	987	-27.3
4250	0.831	314.1	58	602	-27.625
4300	0.827	313.9	58	219	-27.95
4350	0.823	313.7	57	838	-28.275
4400	0.819	313.5	57	459	-28.6
4450	0.814	313.3	57	082	-28.925
4500	0.800	313.U	50	/U/ 22E	-29.25
4550	U.8UD 0 901	212.0 212.6	50	333 961	-23.373
4000	0.001	512.0 212 A	55	504	-23.3
4000	0.797	512.4 217 7	55. E F	090 110	-30.223
4700	0.795	312.2	55	220 863	-30.33
4730	0.705	312.U 311 Q	54	500	-31.2
4000	0.781	311.6	54.	139	-31 525
4900 4900	0.776	311 4	54	780	-31.85
7000	0.770	J T T T	55		51.05

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie						
			PER-RE	-34-ZZ-8-GR	F	
Exploitation Nive	au 0 de SERA-1	Page : 74/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	
4950	0.772	311.2	53	423	-32.175	
5000	0.768	311.0	53	068	-32.5	
5050	0.764	310.7	52	714	-32.825	
5100	0.760	310.5	52	363	-33.15	
5150	0.756	310.3	52	013	-33.475	
5200	0.752	310.1	51	666	-33.8	
5250	0.748	309.9	51	320	-34.125	
5300	0.744	309.7	50	976	-34.45	
5350	0.740	309.5	50	634	-34.775	
5400	0.736	309.3	50	294	-35.1	
5450	0.732	309.1	49	956	-35.425	
5500	0.728	308.8	49	619	-35.75	
5550	0.724	308.6	49	285	-36.075	
5600	0.720	308.4	48	952	-36.4	
5650	0.716	308.2	48	621	-36.725	
5700	0.713	308.0	48	292	-37.05	
5750	0.709	307.8	47	964	-37.375	
5800	0.705	307.6	47639		-37.7	
5850	0.701	307.4	47315		-38.025	
5900	0.697	307.2	46993		-38.35	
5950	0.693	306.9	46673		-38.675	
6000	0.690	306.7	46355		-39	
6050	0.686	306.5	46038		-39.325	
6100	0.682	306.3	45	723	-39.65	
6150	0.678	306.1	45	410	-39.975	
6200	0.675	305.9	45	099	-40.3	
6250	0.671	305.7	44	789	-40.625	
6300	0.667	305.4	44	481	-40.95	
6350	0.664	305.2	44	175	-41.275	
6400	0.660	305.0	43	870	-41.6	
6450	0.656	304.8	43.	567	-41.925	
6500	0.653	304.6	43	266	-42.25	
6550	0.649	304.4	42	967	-42.575	
6600	0.646	304.2	42	669	-42.9	
6650	0.642	303.9	42	373	-43.225	
6700	0.638	303.7	42	078	-43.55	
6750	0.635	303.5	41	786	-43.875	
6800	0.631	303.3	41	495	-44.2	
6850	0.628	303.1	41	205	-44.525	
6900	0.624	302.9	40	917	-44.85	
6950	0.621	302.7	40	631	-45.175	
7000	0.617	302.4	40	346	-45.5	
7050	0.614	302.2	40	064	-45.825	
7100	0.611	302.0	39	782	-46.15	
7150	0.607	301.8	39	502	-46.475	
7200	0.604	301.6	39	224	-46.8	
7250	0.600	301.4	38	948	-47.125	
7300	0.597	301.1	38	673	-47.45	
7350	0.594	300.9	38	399	-47.775	
7400	0.590	300.7	38	127	-48.1	

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie						
			PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Nive	eau 0 de SERA-1	Page : 75/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	
7450	0 587	300 5	37	857	-48 425	
7500	0 584	300.3	37	588	-48 75	
7550	0.580	300.1	37	321	-49 075	
7600	0.577	299.8	37	056	-49.4	
7650	0.574	299.6	36	791	-49,725	
7700	0.570	299.4	36	529	-50.05	
7750	0.567	299.2	36	268	-50.375	
7800	0.564	299.0	36	008	-50.7	
7850	0.561	298.7	35	750	-51.025	
7900	0.557	298.5	35	494	-51.35	
7950	0.554	298.3	35	239	-51.675	
8000	0.551	298.1	34	985	-52	
8050	0.548	297.9	34	733	-52.325	
8100	0.545	297.7	34	482	-52.65	
8150	0.542	297.4	34	233	-52.975	
8200	0.539	297.2	33	985	-53.3	
8250	0.535	297.0	33	739	-53.625	
8300	0.532	296.8	33494		-53.95	
8350	0.529	296.6	33251		-54.275	
8400	0.526	296.3	33009		-54.6	
8450	0.523	296.1	32769		-54.925	
8500	0.520	295.9	32530		-55.25	
8550	0.517	295.7	32292		-55.575	
8600	0.514	295.5	32	056	-55.9	
8650	0.511	295.2	31	821	-56.225	
8700	0.508	295.0	31	587	-56.55	
8750	0.505	294.8	31	355	-56.875	
8800	0.502	294.6	31	125	-57.2	
8850	0.499	294.3	30	895	-57.525	
8900	0.496	294.1	30	667	-57.85	
8950	0.493	293.9	30	441	-58.175	
9000	0.490	293.7	30	216	-58.5	
9050	0.487	293.5	29	992	-58.825	
9100	0.485	293.2	29	769	-59.15	
9150	0.482	293.0	29	548	-59.475	
9200	0.479	292.8	29	328	-59.8	
9250	0.476	292.6	29	110	-60.125	
9300	0.473	292.3	28	892	-60.45	
9350	0.470	292.1	28	677	-60.775	
9400	0.468	291.9	28	462	-61.1	
9450	0.465	291.7	28	249	-61.425	
9500	0.462	291.4	28	037	-61.75	
9550	0.459	291.2	27	826	-62.075	
9600	0.457	291.0	27	617	-62.4	
9650	0.454	290.8	27	409	-62.725	
9700	0.451	290.5	27	202	-63.05	
9750	0.448	290.3	26	996	-63.375	
9800	0.446	290.1	26	792	-63.7	
9850	0.443	289.9	26	589	-64.025	
9900	0.440	289.6	26	387	-64.35	

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
			PER-RE	-34-ZZ-8-GR	F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1		Page : 76/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014
9950	0.438	289.4	26186		-64.675
10000	0.435	289.2	25987		-65
10050	0.432	289.0	25789		-65.325
10100	0.430	288.7	25592		-65.65
10150	0.427	288.5	25396		-65.975
10200	0.424	288.3	25202		-66.3
10250	0.422	288.1	25008		-66.625
10300	0.419	287.8	24816		-66.95

12.4 ANNEXE 4 : FICHIER ANDROMEDE IN

%%% Parame	tres	princip	aux	du	calcul	
MenuPrincipal	Nom	SERA1	-v2			
MenuPrincipal	ChoixP	rincipal	0			
MenuPrincipal	Google	Earth K	mz			
MenuPrincipal	CalculF	Retombe	e			
MenuPrincipal	Fichier	Atmosp	here atm	oSERA	1-14-05-	-07.txt
%MenuPrincipa	al Form	natListir	ig Label			
%%% Parame	tres	d'integr	ation			
Integration	InitialS	tep	0.1			
Integration	RelTol	1.00E-0)8			
Integration	AbsTol	1.00E-0)8			
Integration	MaxSte	ep	0.5			
%%% Lanceu	r					
Lanceur	Etage	SERA				
EtageSERA Pro	ppFile p	ro98-6G	_nomina	al.txt		
EtageSERA	Ms	17.15				
EtageSERA	Sref	0.0201	06193			
EtageSERA	CadCno	diFile	aero-SE	ERA1.tx	t	
EtageSERA	DebutB	alistiqu	e	100		
EtageSERA	DureeB	alistiqu	e	1000		
EtageSERA Ev	enement	tSupplei	nentaire	FinBali	stiqueSo	ol
%%% Sequen	tiel					
ConditionInitia	le	Latitud	e	67.8934	401	
ConditionInitia	le	Longitu	ıde	21.1052	239	
ConditionInitia	le	Altitud	e	0.3034		
Sequentiel	Phase	Montee	•			
PhaseMontee	CapInit	ial 10				
PhaseMontee	Azimut	Initial	360			
PhaseMontee	Evenen	nent Dis	tanceSuj	р	6	
Sequentiel	Phase	Inulle				
PhaseInulle	Туре	Inciden	ceRelati	veStrict	ementN	ulle

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 77/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

12.5 ANNEXE 5 : FICHIER PROPU ANDROMEDE

Tps (s) / Poussée (kN) / ISP (s) / Débit (kg/s)

0	0	0	0
0.1	1.207	0	2.218
0.2	1.296	0	2.48
0.6	1.323	0	2.55
0.7	1.327	0	2.47
1.1	1.334	0	2.511
1.3	1.33	0	2.4
1.5	1.333	0	2.49
1.9	1.337	0	2.426
2.5	1.336	0	2.429
3.8	1.262	0	2.258
4.1	1.236	0	2.166
4.5	1.211	0	2.113
4.7	1.198	0	2.16
4.9	1.178	0	2.038
5.1	1.163	0	2.073
6.3	1.048	0	1.858
6.4	1.025	0	1.766
6.5	1.008	0	1.78
6.8	0.896	0	1.343
7	0.732	0	0.792
7.14	0.452	0	0.485
7.2	0.145	0	0.271
7.35	0	0	0

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 78/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

12.6 ANNEXE 6 : FICHIER AERO ANDROMEDE

Mach /		
0.2	0.51	15.25
0.4	0.51	15.62
0.5	0.50	16.09
0.6	0.49	16.74
0.7	0.48	17.58
0.8	0.47	18.61
0.9	0.46	19.83
0.95	0.46	20.51
1	0.46	21.23
1.05	0.55	22.00
1.1	0.58	22.82
1.15	0.59	22.87
1.2	0.59	22.91
1.25	0.57	22.91
1.3	0.56	22.42
1.4	0.51	21.68
1.5	0.48	21.16
1.65	0.44	20.61
1.8	0.41	20.21
2	0.37	18.60
2.25	0.33	17.06
2.5	0.30	15.90
3	0.27	13.76
3.5	0.26	12.21
4	0.25	11.02
4.5	0.25	10.09
5	0.24	9.32

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 79/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

12.7 ANNEXE 7 : COURS EXPLOITATION SONDE ANEMOCLINOMETRIQUE (EXTRAIT D'UN COURS ONERA)

4.3 Sonde clinométrique

4.3.1 Principe

Sonde directionnelle à 3 trous (2C) ou 5 trous (3C) :

- une prise de pression centrale p₁
- deux prises dans le plan de lacet ou de dérapage p₂, p₃
- deux prises dans le plan de tangage ou d'incidence p₄, p₅







Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 80/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

On définit les coefficients :

· coefficient de dérapage

$$C_{p,d} = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p_m}$$

coefficient d'incidence

$$C_{p,i} = \frac{p_4 - p_5}{p_1 - p_m}$$

· coefficient de pression totale

$$C_{p,t} = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - p_m}$$

· coefficient de pression statique

$$C_{\rho,s} = \frac{p_m - p_s}{p_1 - p_m}$$

avec :

$$p_m = \frac{p_2 + p_3 + p_4 + p_5}{4}$$

En écoulement incompressible ces coefficients ne dépendent que des angles d'incidence α et de dérapage β .

4.3.2 Étalonnage

La sonde est placée dans un écoulement connu uniforme et laminaire, souvent le cône à potentiel d'un jet. On relève les cinq pressions p_1 à p_5 pour différents angles α et β .

Les courbes d'étalonnage correspondent à la variation des coefficients de pression en fonction des angles.



courbes d'étalonnage V = 80 m·s⁻¹

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie					
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF				
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 81/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014	

4.3.3 Mesure

Lors de la mesure, connaissant $C_{p,d}$ et $C_{p,i}$ il est possible d'obtenir :

- les angles α et β à partir de la grille d'étalonnage,
 - puis la pression totale p_t et la pression statique p_s,
 - on en déduit la vitesse :

$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}}$$



Les composantes de la vitesse sont obtenues par projection :

$$V_x = V \cos \beta \cos \alpha$$
$$V_r = V \cos \beta \sin \alpha$$
$$V_{\theta} = V \sin \beta$$

Inconvénients :

- difficulté de réalisation des sondes (5 tubes dans un volume de 1 mm³)
- air dépoussiéré (risque d'obturation)
- orientation précise, gamme de mesure angulaire ±20°
- les coefficients sont indépendants de Re pour Re > 2000
- mesures instationnaires impossibles ⇒ vitesses moyennes
- · mesures proches des parois : sondes plates à 3 trous

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 82/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

12.8 ANNEXE 8 : ANALYSES VIBRATIONS SYSNAV PAR LUC GONIDOU / CNES/DLA/SDT

ANALYSE DES MESURES DYNAMIQUES « SYSNAV » DU VOL SERA 1

Mesure : SERA 1 Données accélérations Sysnav Fréquence d'acquisition : 819 Hz Echantillons avec la même abscisse aux instants : 392.593 ; 402.586 ; 412.580 ; 422.575 ; 432.569s. Les doublons ont été supprimés. Unité : g

SIGNAUX BRUTS

Mesure X entre 390 et 440 s



Mesure Y entre 390 et 440 s



Mesure Z entre 390 et 440 s

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 83/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014



RETRAIT DE LA MOYENNE DU SIGNAL

X entre 398.7 et 429.5s

X – moyenne glissante sur 0.05 s



Y entre 398.7 et 429.5s Y – moyenne glissante sur 0.05 s



Z entre 398.7 et 429.5s Z – moyenne glissante sur 0.05 s

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 84/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014



RMS X Rms glissante sur 1s



Rms glissante sur 0.5s





Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 85/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014











Rms glissante sur 0.5s



Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 86/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

En calculant un maximum latéral $(\sqrt{x^2 + y^2})$

Il y a un rapport d'environ 1.5 sur les valeurs rms entre les 2 vols.

Superposition des rms sur 0.5s pour les 2 vols en décalant les abscisses (H0 de 52.91s pour MasterLeia et H0 de 398.77 pour SERA 1) :





Rms sur 0.5s Longitudinal (SERA1 bleu, MasterLeia Turquoise)

Rms sur 0.5s Latéral (SERA1 bleu, MasterLeia Turquoise)

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 87/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

Signal X brut entre 60 et 62 s



DSP filtre HANNING, 256 points, recouvrement de 0.5s



SERA 1 Signal X brut entre 405 et 407 s



DSP filtre HANNING, 256 points, recouvrement de 0.5s

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 88/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014



DSP filtre HANNING, 256 points, recouvrement de 0.5s (SERA1 bleu, MasterLeia Turquoise)



DSP filtre HANNING, 256 points, recouvrement de 0.5s (SERA1 bleu, MasterLeia Turquoise) ZOOM

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 89/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

12.9 SCRIPT MATLAB POUR EXPLOITATION DES MAGNETOMETRES

```
%%% Exploitattion des données : 06-2014 - SERA 1 %%%
%%% R.Grandguillot - GAREF
% Définition du TO
T_0 = 398.765:
% Chargement des données inertielles de vitesse de rotation GyroX, GyroY, GyroZ
file = fopen('MAG_X_corrige.txt');
MAG_X = fscanf(file, '%f', inf);
fclose(file);
file = fopen('MAG_Y_corrige.txt');
MAG_Y = fscanf(file, '%f', inf);
fclose(file);
file = fopen('MAG_Z_corrige.txt');
MAG_Z = fscanf(file, '%f', inf);
fclose(file);
file = fopen('GYR_Z_corrige.txt');
GYRO_Z = fscanf(file, '%f', inf);
fclose(file);
% Chargement des données de temps
file = fopen('TPS.txt');
Time = fscanf(file, '%f', inf);
fclose(file);
% Recalage du temps par rapport à TO
Time = Time - T_0;
% Période du vol juste après sortie de rampe jusqu'à ~30s
t_30s =7900:31700;
% Période juste après sortie de rampe jusqu'à TO + 208.55s ([2.26s - 208.55s])
t=7900:183500;
% Filtre sur le GYRO_X
b = [1 \ 0.9 \ 0.9 \ 0.9];
a = \overline{1} - 0.92 \ 0.1 - \overline{0}.121:
GYRO_Z_FILTRE = filter(b, a, GYRO_Z);
GYR0_Z_FILTRE = GYR0_Z_FILTRE * mean(GYR0_Z(1:1000))/mean(GYR0_Z_FILTRE(1:1000));
GYRO_Z_FILTRE = GYRO_Z_FILTRE - mean(GYRO_Z_FILTRE(1:1000));
% Calcul du roulis par intégration du Gyro_Z
Roulis_Gyro = zeros(1, length(t_30s));
for i=1:length(t_30s)-1
    Roulis_Gyro(i+1) = Roulis_Gyro(i) + rad2deg(GYRO_Z(t_30s(i))) * (Time(t_30s(i+1)) -
Time(t_30s(i)));
end
% Calcul des valeurs calibrées des magnétos par corrections des Soft et Hard Iron
Distrotions
% Calcul des paramètres de l'ellipsoid
[center, radii, evecs, v] = ellipsoid_fit([MAG_X(t), MAG_Y(t), MAG_Z(t)], 3);
[x, y, z] = ellipsoid(center(1), center(2), center(3), radii(1), radii(2), radii(3),
100):
% Corrections des biais (Hard Iron Distrotions)
MAG_X_CORRIGE = MAG_X - center(1);
MAG_Y_CORRIGE = MAG_Y - center(2);
MAG_Z_CORRIGE = MAG_Z - center(3);
% Corrections des déformations (Soft Iron Distortions)
MAG_X_CORRIGE = evecs(1,1)*MAG_X_CORRIGE + evecs(1,2)*MAG_Y_CORRIGE +
evecs(1,3)*MAG_Z_CORRIGE;
MAG_Y_CORRIGE = evecs(3,1)*MAG_X_CORRIGE + evecs(2,2)*MAG_Y_CORRIGE +
evecs(2,3)*MAG_Z_CORRIGE;
MAG_Z_CORRIGE = evecs(2,1)*MAG_X_CORRIGE + evecs(3,2)*MAG_Y_CORRIGE +
evecs(3,3)*MAG_Z_CORRIGE;
% Calcul de la norme du champ magnétique
Norme_Mag = sqrt(MAG_X.*MAG_X + MAG_Y.*MAG_Y + MAG_Z.*MAG_Z);
Norme_Mag_corrige = sqrt(MAG_X_CORRIGE.*MAG_X_CORRIGE + MAG_Y_CORRIGE.*MAG_Y_CORRIGE +
MAG_Z_CORRIGE.*MAG_Z_CORRIGE);
```

```
Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie
                                                                PER-RE-34-ZZ-8-GRF
Exploitation Niveau 0 de SERA-1
                                             Page : 90/91
                                                              Edition :0
                                                                            Révision: 3
                                                                                            Date : 30/09/2014
    Tangage = 80 - (65+rad2deg(atan2(MAG_Z_CORRIGE(t_30s),
    sqrt(MAG_X_CORRIGE(t_30s).*MAG_X_CORRIGE(t_30s)+MAG_Y_CORRIGE(t_30s).*MAG_Y_CORRIGE(t_3
     0s)))));
    %Tangage = 10 + 80 * (MAG_Z_CORRIGE(t_30s) - min(MAG_Z_CORRIGE(t_30s))) /
     (max(MAG_Z_CORRIGE(t_30s)) - min(MAG_Z_CORRIGE(t_30s)));
    % Calcul du roulis à partir de MAG_X et MAG_Y
Roulis = 360*atan2(MAG_X_CORRIGE(t_30s)-MAG_X_CORRIGE(1), MAG_Y_CORRIGE(t_30s))/(2*pi);
    % Elimination des discontinuitées dues à la fonction atan2
    for i=1:length(t_30s)-1
    if (abs(Roulis(i+1)-Roulis(i)) > 50)
               Roulis(i+1) = Roulis(i+1) - 360;
          end
    end
    %%% Affichage 3D de l'ellipsoïde non calibrée
    % figure;
    % hold on;
    % plot3(MAG_X(t), MAG_Y(t), MAG_Z(t), 'b')
% plot3(x, y, z, 'g')
    % plot3(MAG_X_CORRIGE(t), MAG_Y_CORRIGE(t), MAG_Z_CORRIGE(t), 'r')
    % title('Champ magnétique X, Y, Z mesuré pendant le vol SERA 1');
    % xlabel('Bx (Gauss)');
    % Xlabel('Bx (Gauss)');
% ylabel('By (Gauss)');
% zlabel('Bz (Gauss)');
% l = legend('Mesures brutes du champ magnétique', 'Ellipsoïde approximée', 'Mesures
    caibrées du champ magnétique');
    %%% Affichage du parcours de la sphère pendant le vol jusqu'à culmination
    % figure;
    % hold on;
    % %plot3(MAG_X_CORRIGE(t), MAG_Y_CORRIGE(t), MAG_Z_CORRIGE(t), 'b')
    % plot3(x-center(1), y-center(2), z-center(3), 'b')
% plot3(x-center(1), y-center(2), z-center(3), 'b')
% plot3(MAG_X_CORRIGE(t_30s), MAG_Y_CORRIGE(t_30s), MAG_Z_CORRIGE(t_30s), 'r+')
% title('Champ magnétique X, Y, Z mesuré pendant le vol SERA 1 jusqu"à culmination');
    % xlabel('Bx (Gauss)');
% ylabel('By (Gauss)');
    % zlabel('Bz (Gauss)')
    % axis([-0.5 0.5 -0.5 0.5 -0.5 0.5])
    %%% Affichage de la norme du champ magnétique
    % figure
    % plot(Time, Norme_Mag, Time, Norme_Mag_corrige, 'r')
    % title('Norme du champ magnétique');
    % xlabel('Temps (s)');
% ylabel('Norme |Mxyz|');
% legend('Mesures brutes', 'Mesures calibrées');
    % figure
    % plot3(Time(t_30s), MAG_X_CORRIGE(t_30s), MAG_Y_CORRIGE(t_30s))
% title('Champ magnétique calibré X, Y en fonction du temps pendant le vol SERA 1');
    % xlabel('Temps (s)');
% ylabel('Bx (Gauss)');
% zlabel('By (Gauss)');
    % figure
    % plot(Time(t_30s), MAG_Z_CORRIGE(t_30s), Time(t_30s), MAG_Z(t_30s))
% title('Champ magnétique calibré Z - vol SERA 1 entre [2.26s - 31.54s]');
    % xlabel('Temps (s)');
% ylabel('BZ');
    % figure
    % plot3(MAG_X_CORRIGE(t_30s), MAG_Y_CORRIGE(t_30s), MAG_Z_CORRIGE(t_30s))
    % title('champ magnétique calibré X, Y, Z pendant le vol SERA 1 entre [2.26s -
31.54s]');
% xlabel('Bx');
% ylabel('By');
% zlabel('Bz');
    % figure
    % plot(Time(t_30s), MAG_Z_CORRIGE(t_30s))
    % title('Champ magnétique calibré Y en fonction de X pendant le vol SERA 1 entre [2.26s
     - 31.54sl'):
```

```
% xlabel('Bx');
```

Direction des Lanceurs - Sous Direction Préparation du Futur, Recherche et Technologie				
	PER-RE-34-ZZ-8-GRF			F
Exploitation Niveau 0 de SERA-1	Page : 91/91	Edition :0	Révision : 3	Date : 30/09/2014

% ylabel('By');

```
figure
plot(sqrt(MAG_X_CORRIGE(t_30s).*MAG_X_CORRIGE(t_30s)+MAG_Y_CORRIGE(t_30s).*MAG_Y_CORRIG
E(t_30s)), MAG_Z_CORRIGE(t_30s))
title('Champ magnétique Z en fonction de sqrt(X^2+Y^2) pendant le vol SERA 1');
xlabel('sqrt(Bx<sup>2</sup>+By<sup>2</sup>) (Gauss)');
ylabel('Bz (Gauss)');
axis([-0.5 0.5 -0.5 0.5])
%%%%% Affichage du roulis calculé à partir des Magnétos et des Gyros
% figure
% plot(Time(t_30s), Roulis, Time(t_30s), Roulis_Gyro, Time(t_30s),
100*GYRO_Z_FILTRE(t_30s))
% title('Comparaison du roulis calculé à partir des magnétomètres et des gyroscopes');
% title('Comparaison du fouris carcare a pareir des magnetemes
% xlabel('Temps (s)');
% ylabel('Roulis (degrée)');
% l = legend('Roulis (magnétos)', 'Roulis (gyros)', 'Gyro_Z');
%%% Affichage du tangage
figure
plot(Time(t_30s), Tangage)
title('Tangage calculé à partir du champ magnétique');
xlabel('Temps (s)');
ylabel('Tangage (degrée)');
% figure
% %subplot(1,3,1)
% hold on
% plot(MAG_X(t), MAG_Y(t), 'b')
% plot(x, y, 'g')
% %plot(MAG_X_CORRIGE(t), MAG_Y_CORRIGE(t), 'r')
% xlabel('Bx');
% ylabel('By');
% figure
% %subplot(1,3,2)
% hold on
% plot(MAG_X(t), MAG_Z(t), 'b')
% plot(x, z, 'g')
% %plot(MAG_X_CORRIGE(t), MAG_Z_CORRIGE(t), 'r')
% xlabel('Bx');
% ylabel('Bz');
% figure
% %subplot(1,3,3)
% hold on
% plot(MAG_Y(t), MAG_Z(t), 'b')
% plot(y, z, 'g')
% %plot(MAG_Y_CORRIGE(t), MAG_Z_CORRIGE(t), 'r')
% xlabel('By');
% ylabel('Bz');
```