

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

Par

Ossama KHARBOU

**Développement d'une méthode innovante pour l'ajustement des paramètres internes
du système de gravimétrie sous-marine GraviMob**

Soutenu le 09/09/2021

JURY

Monsieur Christophe CHARLET
Monsieur Jérôme VERDUN
Monsieur José CALI
Madame Joëlle NICOLAS-DUROY

Président du jury
Maître de stage
Maître de stage
Enseignant référent

Remerciements

Ce travail constitue une étape importante dans mon cursus universitaire, non seulement il vient clôturer ma formation à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs Géomètres et Topographes, mais aussi il m'est d'une grande aide pour m'intégrer dans le domaine de la recherche, et avoir une petite image sur le quotidien d'un chercheur. Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans l'aide des personnes que je souhaite remercier.

Mes premiers remerciements vont à ma famille, à mes parents et à mes frères, ainsi qu'à toute personne ayant aidé de près ou de loin pour l'aboutissement de ces cinq années d'études supérieures en France. Notamment, je remercie le corps enseignant du lycée Bertran de Born, où j'ai effectué mes deux années de classes préparatoires, où j'ai appris plein de choses, et à l'issue desquelles j'ai pu intégrer l'ESGT.

Je remercie tous les enseignants et le personnel administratif de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, qui font tout leur possible pour nous assurer une formation enrichissante et de qualité.

Je remercie tout le personnel du laboratoire Géomatique et Foncier (GeF), notamment Joëlle Nicolas, pour nos échanges, pour les contributions et conseils qui ont permis d'améliorer la méthode de recherche et d'entrevoir d'autres perspectives.

Mes remerciements vont également à mes maitres de stages José Cali et Jérôme Verdun du laboratoire GeF, et à Charles Poitou chercheur au Laboratoire Géosciences Océan (LGO) pour leur soutien, leur collaboration et pour les bons moments passés ensemble au cours de ce travail de recherche.

Je remercie également Marcia Maïa, chercheur au LGO et cheffe de la mission GRAVIMOB2, ainsi que Livio Ruffine du laboratoire Géosciences Marines de l'Ifremer à Plouzané, qui m'ont permis d'utiliser leur chambre climatique, élément essentiel à la réussite de cette étude.

Table des matières

Remerciements	2
Table des matières	3
Introduction	5
I INSTRUMENTATION.....	8
I.1 LE SYSTEME DE GRAVIMETRIE SOUS-MARINE GRAVIMOB2	8
I.1.1 Composition du système	8
I.1.1.1 Composants utilisés.....	9
I.1.1.2 Autres composants.....	11
I.2 LA MISSION DE MESURE EN MER	12
I.2.1 Présentation du submersible idef ^x	12
I.2.2 Déroulement de la mission.....	13
I.2.3 Ajustage des paramètres internes	16
I.3 CONSTAT DE L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE.....	18
I.3.1 Variations constatées.....	18
I.3.2 Ajustage dans une chambre climatique.....	18
I.3.2.1 La chambre climatique Binder MKT 720.....	19
I.3.2.2 Première mission d'ajustement.....	20
I.3.2.3 Deuxième mission d'ajustement.....	22
II TRAITEMENT.....	25
II.1 LA METHODE D'AJUSTEMENT DES PARAMETRES	25
II.1.1 Equations fondamentales	25
II.1.2 Programmation de la méthode	26
II.2 LES DONNEES ET LES RESULTATS.....	28
II.2.1 Description des données.....	28
II.2.1.1 Données de sortie du gravimètre	28
II.2.1.2 Données d'entrée de la fonction CaliMod.....	29
II.2.2 Etalonnage des capteurs de température	29
II.2.2.1 Température de la sphère.....	30
II.2.2.2 Capteurs internes aux accéléromètres.....	32
II.2.2.3 La prise en compte des erreurs entachant les deux paramètres	33
II.2.3 La stabilisation des mesures.....	35
II.3 MODELISATION MATHEMATIQUE.....	38
II.3.1 Premier protocole de traitement	38
II.3.1.1 Résultats de la première mission	38
II.3.1.2 Régression par moindres carrés.....	39
II.3.1.3 Résultats de la deuxième mission.....	41
II.3.2 Deuxième protocole de traitement	42
II.3.2.1 Traitement avec le serveur de calcul du laboratoire	43
II.3.2.2 Intervalles de confiance.....	45
II.3.2.3 Résultats du traitement	47
II.3.3 Modélisation.....	48
II.3.3.1 Comparaison des modèles	48
II.3.3.2 Polynôme de degré 4	50
Conclusion	55
Bibliographie	58

Liste des annexes	60
Annexe 1.....	61
Annexe 2.....	63
Annexe 3:.....	65
Annexe 4.....	66
Annexe 5.....	68
Annexe 6.....	69
Annexe 7.....	70
Annexe 8.....	71
Liste des figures.....	72
Liste des tableaux	74

Introduction

La gravimétrie est une branche de la géophysique qui s'intéresse à la mesure de la pesanteur de la Terre. C'est un outil très puissant qui consiste à mesurer l'accélération de la pesanteur sur des points du globe terrestre, l'accélération gravitationnelle étant sa principale contribution.

Parmi les applications intéressantes de la gravimétrie, on peut citer les prospections minière et pétrolière qui mettent à profit la très grande sensibilité de l'accélération de pesanteur aux changements de densités des matériaux du sous-sol [TURCOTTE 1982]. En général, c'est un outil qui apporte une aide aux géologues et géophysiciens pour mieux comprendre les structures géologiques.

Plusieurs campagnes de mesures ont été faites par le passé, dans l'objectif d'estimer les variations de la pesanteur en surface terrestre avec une grande résolution spatiale. On peut citer notamment les missions spatiales CHAMP¹, GOCE² [SEGAWA et al. 1996] et GRACE³ [CNES] qui ont une couverture globale, et qui atteignent une résolution spatiale de 100 km, des mesures d'altimétrie satellitaire comme Topex/Poseidon [SEGAWA et al. 1996], des mesures mobiles aéroportées ou marines ainsi que des mesures terrestres sur le terrain ou dans des laboratoires. Ces dernières permettent d'avoir des modèles locaux du champ de pesanteur à plus haute résolution spatiale, inférieure à 10 km, et de meilleures fidélité et justesse (les précisions peuvent atteindre quelques millièmes du mGal [RÜLKE et al., 2019]).

Les mesures habituelles de la gravimétrie sont faites par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) en surface, donc loin du fonds marin. Dans ce mémoire nous allons nous intéresser à la gravimétrie en milieu sous-marin permettant des mesures au plus proche possible des sources, là où on est plus sensible aux variations de la pesanteur. Ces mesures s'effectuent avec un système léger peu consommateur d'énergie, embarqué dans le robot sous-marin autonome idex de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (l'IFREMER), ce qui exclut ou rend difficile l'utilisation des gravimètres embarqués traditionnellement sur les navires océanographiques. On peut citer

¹ CHALLENGING Minisatellite Payload

² Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

³ Gravity Recovery And Climate Experiment

Limo-G ⁴[DE SAINT-JEAN 2008], un premier gravimètre mobile, léger, un peu semblable au système GraviMob, sauf qu'il est destiné à faire des mesures en surface et non pas au milieu sous-marin.

Le système de gravimétrie GraviMob [ROUSSEL 2017], est un système qui permet de mesurer les variations de la pesanteur, en fond de mer, en utilisant six accéléromètres capacitifs divisés en deux triades disposées l'une au-dessus de l'autre. Si on imagine un petit corps d'épreuve ne subissant aucune force extérieure, il est soumis à la seule force de pesanteur, et dans un référentiel galiléen, on peut utiliser le principe fondamental de la dynamique pour lier l'accélération de ce corps, à l'accélération de la pesanteur g [EUDARIC]. L'intégration de ce corps d'épreuve dans un composant électronique nous permet de décrire la variation de sa position et donc son accélération via des sorties en tension électrique. Nous pouvons ainsi utiliser ces dernières pour trouver l'accélération de la pesanteur, g , qui est la grandeur physique que l'on cherche à mesurer.

Or pour faire correctement ce passage entre la tension et l'accélération, il faudra prendre en compte des paramètres dits « internes » :

D'une part, la relation qui nous permet de passer de la tension à la pesanteur demande la connaissance de deux types de paramètres de correction, un facteur d'échelle et un biais par direction, et donc 6 paramètres par triade d'accéléromètres.

D'autre part, lors de la mesure, le système est embarqué dans un véhicule sous-marin, et l'accélération qu'il mesure inclut celle due au mouvant du véhicule. Or pour pouvoir extraire seulement celle de la pesanteur, les deux systèmes doivent être dans le même repère, ce qui n'est pas le cas. On devra donc calculer une matrice de passage 3x3 entre les deux repères. Cette matrice tient compte également du désalignement du repère des accéléromètres supposé orthogonal, ce qui nous fait théoriquement 9 paramètres de plus à estimer, qu'on réduit à 5 paramètres (II.1.1).

La détermination de ces 11 paramètres est essentielle pour estimer les trois composantes ou la norme de g . En effet, l'incertitude de mesure du système peut être grandement augmentée par rapport à celle des accéléromètres, de par une mauvaise estimation des paramètres internes. Une méthode pour calculer ces paramètres a été proposée par [ROUSSEL 2017], mais ceux-ci dépendent de la température. Pour espérer atteindre une

⁴ Light MOving Gravimetry system

précision comprise entre 1 et 5 mGal⁵, l'influence de la température sur le comportement du système doit être maîtrisée. L'objectif de cette étude est alors de comprendre comment les valeurs des paramètres internes du système de gravimétrie varient en fonction de la température, puis faire des modélisations mathématiques de ce comportement, et ensuite les intégrer dans un programme qui permet d'obtenir les valeurs de ces paramètres à partir de mesures d'ajustement.

Le système contient au total sept capteurs de température, une sonde de température embarquée dans l'enceinte du système de mesure, et les six capteurs de température des six accéléromètres. Ces capteurs doivent être étalonnés pour établir les relations tension/température.

Ce manuscrit est divisé en deux parties :

Une première partie d'instrumentation, où nous allons voir la description des appareils utilisés dans cette étude, notamment le système GraviMob2, le 2^e prototype de GraviMob, le véhicule porteur idef^x et l'enceinte climatique BINDER MKT 720, ainsi que le déroulement des missions de mesure en mer et d'ajustement des paramètres internes.

La deuxième partie, quant à elle, sera consacrée au traitement et l'analyse des mesures. Cette partie débute par l'exposé de la théorie sur laquelle se base cet ajustement en utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange [ROUSSEL 2017]. Puis les programmes qui ont permis le traitement des données et les résultats obtenus sont présentés. Enfin, la modélisation mathématique des lois d'ajustement et les analyses statistiques pour valider les modèles sont exposées en détail.

⁵ 1 mGal = 10⁻⁶ m.s⁻² (à peu près un millionième de g)

I Instrumentation

GraviMob était étudié lors de la thèse de Clément Roussel, au sein du laboratoire GeF. La première mission de mesure en mer était effectuée pendant sa thèse, avec le premier prototype de GraviMob en mars 2016, en Méditerranée. Ce sont les traitements des données acquises lors de cette mission qui ont montré l'influence de la température sur les résultats. Depuis, une modification a été faite sur le système, pour donner un deuxième prototype GraviMob2. Elle consistait à modifier la disposition des triades, comme nous allons le voir par la suite.

Dans cette partie instrumentation, nous allons présenter le système GraviMob, ses composants, comme nous allons exposer les missions de mesure en mer, et les missions d'ajustement dans une enceinte climatique.

I.1 Le système de gravimétrie sous-marine GraviMob2

I.1.1 Composition du système

Il est composé de deux hémisphères en verre joints par dépression, à l'intérieur desquels est mise une plaque métallique soutenue par trois arches. L'ensemble des composants électroniques sont fixés entre les arches et la plaque métallique. Sur la Figure 1 nous pouvons voir la partie supérieure, sachant qu'il y-a une autre triade d'accéléromètres au-dessous de la plaque.

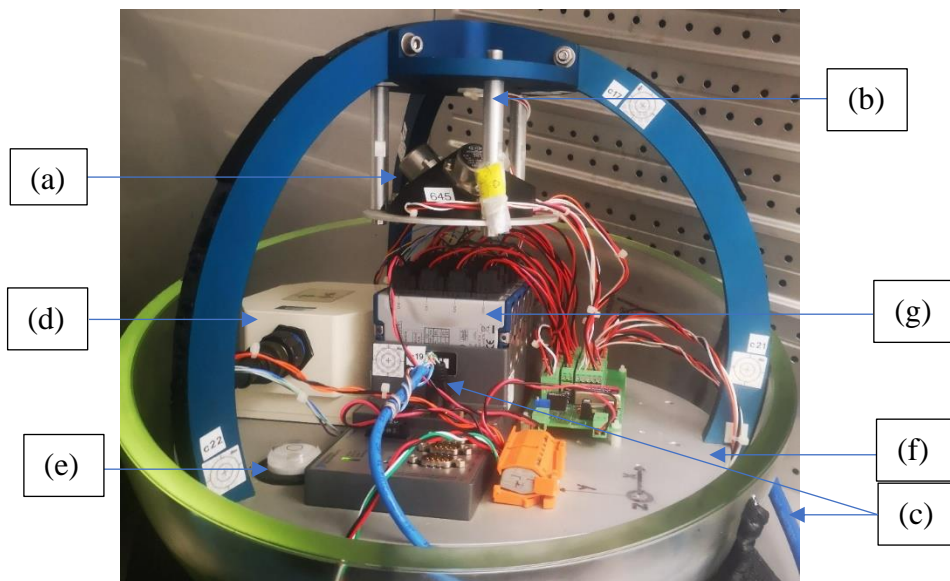


Figure 1 : Le système GraviMob2 - Photo réalisée par mes soins

I.1.1.1 Composants utilisés

GraviMob2 contient six accéléromètres de la famille Q-Flex de Honeywell, série QA3000 (Figure 2). Ce sont des accéléromètres performants de classe « Navigation » utilisés notamment dans l'aviation pour le guidage de missile. Ils ont une résolution inférieure à 1 μg , une sensibilité à la température inférieure à 15 $\mu\text{g}/^\circ\text{C}$ pour le biais, et inférieure à 120 ppm°C pour le facteur d'échelle (Annexe 1).



Figure 2: Les accéléromètres Q-Flex QA3000 de Honeywell

Source : Honeywell

Il fait suite au prototype GraviMob, la principale différence entre les deux étant la disposition des triades d'accéléromètres. Pour le premier prototype, deux axes d'accéléromètres étaient confondus avec la plaque métallique, et le troisième leur était perpendiculaire.

Si on prend par exemple le cas où la plaque est en position horizontale, avec cette disposition la composante majoritaire de l'accélération de la pesanteur est mesurée sur le seul accéléromètre vertical, vu que la direction de l'accélération de la pesanteur est la verticale du lieu. Les deux autres accéléromètres quant à eux vont mesurer des valeurs quasiment nulles. Pour le deuxième prototype, les triades étaient mises de sorte à ce que les axes des accéléromètres forment chacun un angle de 45° avec le plan horizontal. Dans un cas semblable à l'exemple précédent, l'accélération de la pesanteur aura une contribution importante sur chacun des trois accéléromètres, qui est de $\cos(45^\circ) g$.

Chaque accéléromètre (a) mesure une force spécifique selon son axe sensible et sa température interne, en délivrant un courant électrique proportionnel à la grandeur mesurée qui est converti en tension pour la numérisation. De plus, une sonde (b) en haut de la sphère permet de donner la température interne du système de mesure en degrés Celsius.

⁶ 1 ppm = 10^{-6}

Le système contient également un câble d'alimentation électrique (c), toutefois il n'a pas d'interrupteur, les mesures commencent alors dès que l'on branche le câble d'alimentation dans une prise électrique. Pour les opérations d'export de données, le système de mesure dispose d'un câble Ethernet (c) qui permet d'être connecté avec un ordinateur. Enfin, ce câble Ethernet permet également de suivre en temps réel les mesures sur une application « IHM Gravimob » (Figure 3) fournie par Mappem Geophysics.

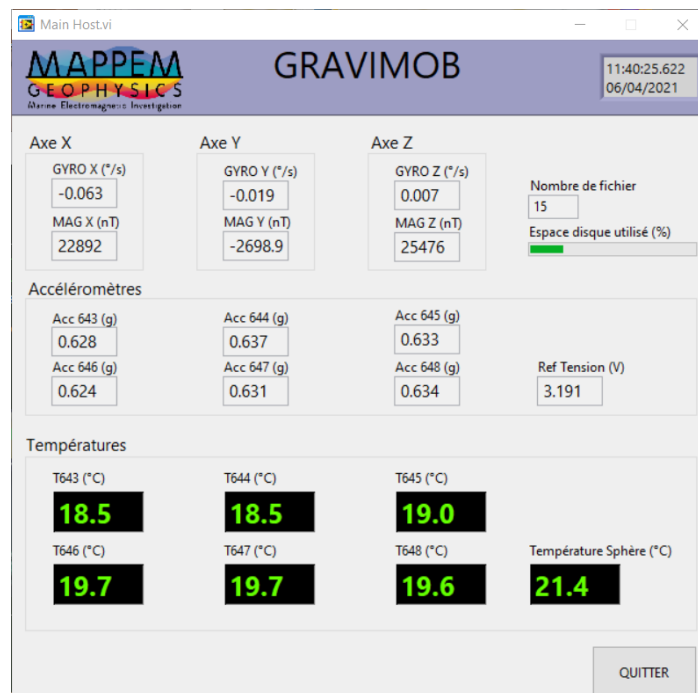


Figure 3: L'Interface Homme Machine (IHM) de visualisation des mesures en temps réel - Mappem Geophysics

Le principe de fonctionnement du système GraviMob2 est simple, il consiste à mesurer l'accélération de la pesanteur, avec des accéléromètres dits capacitifs. Avec ses deux triades d'accéléromètres, chacune des triades permet de mesurer la décomposition de l'accélération de la pesanteur selon les trois axes sensibles des accéléromètres.

Un accéléromètre capacitif est un accéléromètre qui mesure l'accélération grâce à la mesure de la capacité d'un condensateur. Il contient des tiges qui sont fixes, et une tige mobile de par le mouvement du porteur et de la pesanteur. Les deux tiges peuvent être assimilées à deux électrodes d'un condensateur, le fait qu'une électrode bouge, signifie que la distance e entre les électrodes varie, et ainsi la capacité va changer étant liée à e par la relation :

$$C = \varepsilon \frac{S}{e} \quad \mathbf{1}$$

Où ε désigne la permittivité diélectrique et S la surface des électrodes.

L'application du principe fondamental de la dynamique, nous permet de trouver facilement une relation entre cette variation et la variation de l'accélération.

L'accéléromètre pourra ainsi nous donner des sorties de courant électrique. À la sortie des accéléromètres sont placées des résistances, de 3900Ω pour les accélérations et de 10000Ω pour les températures, ce qui nous permettra de faire la conversion courant/tension. Le système enregistre alors sous des fichiers texte les mesures d'accélération en volt, et on pourra remonter à la valeur de l'accélération en utilisant une fonction affine (3) :

$$U = R \cdot I \quad \mathbf{2}$$

avec

$$I = K \cdot a + b \quad [\text{ROUSSEL 2017}] \quad \mathbf{3}$$

Où U et I désignent la tension et le courant électriques en sortie, R désigne la résistance en sortie des accéléromètres (3900Ω ou 10000Ω), K désigne le facteur d'échelle et b le biais.

I.1.1.2 Autres composants

GraviMob2 contient également trois gyromètres (d) pour la mesure des vitesses angulaires, et trois magnétomètres pour la mesure du champ magnétique, ces mesures ne sont pas utilisées dans notre étude. Il dispose également d'une nivelle sphérique (e) qui permet de mettre la plaque métallique (f) en position horizontale, et donc mettre les accéléromètres à la position initiale à 45° d'inclinaison par rapport au plan horizontal. Enfin, le numériseur (g) permet de convertir les signaux analogiques de tension électrique en sortie en valeurs numériques qui vont être stockées dans les fichiers texte.

I.2 La mission de mesure en Mer

I.2.1 Présentation du sous-marin idef^x

Pour réaliser des mesures en fond de mer, le dispositif de mesure est installé à bord du sous-marin, Idef^x, de l'Ifremer (Figure 4).

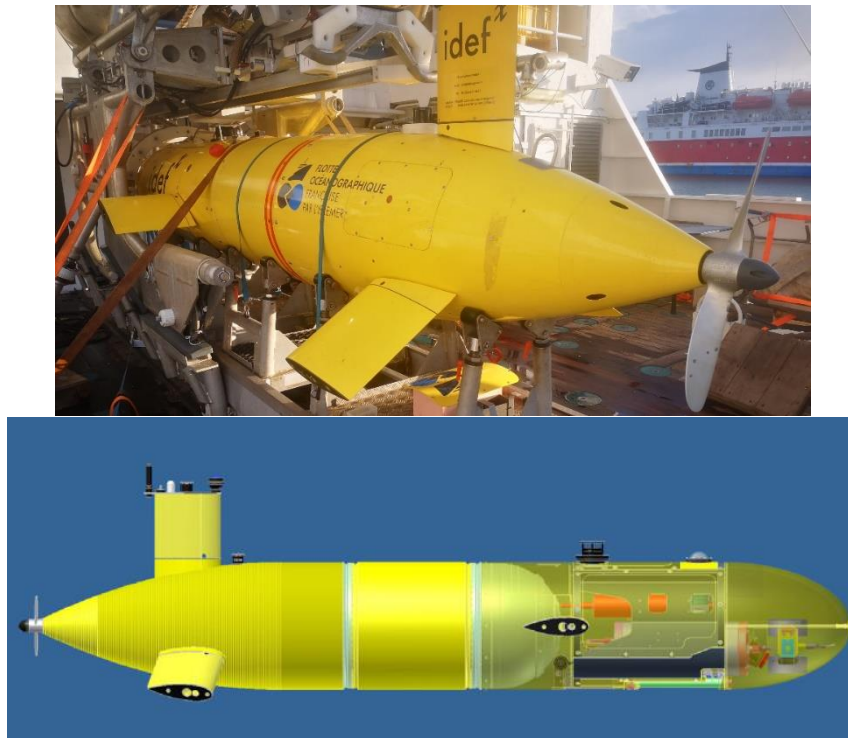


Figure 4: Le robot sous-marin idef^x de l'Ifremer

Sources : Photo réalisée par mes soins. Ifremer

C'est un robot autonome (de la famille des AUV⁷), qui atteint des immersions de 2850 m (Tableau 1), pour faire des études scientifiques dans les marges continentales.

Longueur – Diamètre - Masse	4.5 m - 0.71 m – 850 kg
Vitesse	2 à 5 nœuds ⁸
Immersion maximale	2850 m
Longueur de profil maximale	100 km

Tableau 1: Caractéristiques de l'AUV idef^x

Source : Ifremer

⁷ Autonomous Underwater Vehicle : Robot sous-marin autonome

⁸ 1 nœud = 0.51 m.s⁻¹

Ce robot dispose de plusieurs dispositifs de positionnement (Figure 5) : une centrale inertielle Phins, un système GNSS différentiel DGPS (Differential Global Positioning System) qui permet le positionnement en surface du robot, un vélocimètre Doppler qui aide au positionnement relatif du robot par rapport au fond, et un système acoustique Ultra Short BaseLine (USBL). Ce dernier permet de positionner l'AUV par rapport au navire. Un émetteur (la perche Figure 7), envoie des ondes acoustiques à l'AUV, et en fonction du calcul de temps de réception de la réponse du véhicule ainsi que l'angle de réception, on peut calculer un angle et une distance, et donc savoir la position du véhicule sous-marin par rapport au navire. Ceci est important car il ne faut pas que le robot dépasse une certaine distance du navire, sinon on risque de perdre la connexion avec le robot. Le commandant continue donc à suivre le sous-marin avec le navire, et fait en sorte de suivre le sous-marin à une distance suffisante, de l'ordre de centaines de mètres, pour ne pas perdre la communication acoustique.

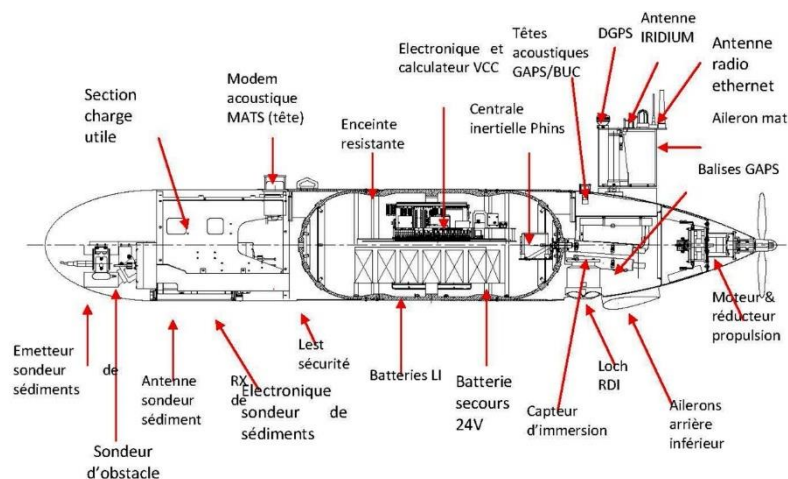


Figure 5: Conception de l'AUV idef^{cx}

Source : Ifremer

I.2.2 Déroulement de la mission

Ce submersible a servi de véhicule porteur de GraviMob2 pendant la mission GRAVIMOB2, cette mission a eu lieu du 10 au 14 mars 2021 près de Toulon, l'embarquement du submersible idef^{cx} était fait le soir du 10 mars sur le navire Océanographique *L'Europe*, dans le site de l'Ifremer (Figure 6) à la Seyne-sur-Mer.



Figure 6: Site de départ de la mission GRAVIMOB2 - Photo réalisée par mes soins.



Figure 7: Le navire *L'Europe* avec la perche acoustique en gris - Photo réalisée par mes soins.

La mission avait comme objectif principal de tester le fonctionnement du nouveau prototype du système de gravimétrie. Deux profils en Méditerranée étaient choisis (Figure 8) :

- Profil 1 - $42^{\circ} 50,35' \text{ N} - 06^{\circ} 19,20' \text{ E} / 42^{\circ} 53,15' \text{ N} - 06^{\circ} 26,20' \text{ E}$
- Profil 2 - $42^{\circ} 52,85' \text{ N} - 06^{\circ} 20,50' \text{ E} / 42^{\circ} 49,90' \text{ N} - 06^{\circ} 27,60' \text{ E}$

Ces profils étaient déjà mesurés en surface, par le SHOM en 2011 et en 2006 par des gravimètres embarqués dans des flottes océanographiques. Réaliser des mesures sur ces mêmes profils aurait permis de faire une comparaison des résultats avec des données de référence.

Malheureusement, à cause de manœuvres de la Marine Nationale, nous n'avons pas eu le droit d'effectuer les mesures sur cette zone. La météo n'était pas favorable non plus, puisque dans les zones où on aurait pu effectuer des immersions à plus de 2000 m, les vitesses du vent étaient annoncées pour 60 km/h, et il est très difficile et dangereux de mettre à l'eau le submersible idef^x dans des conditions pareilles.

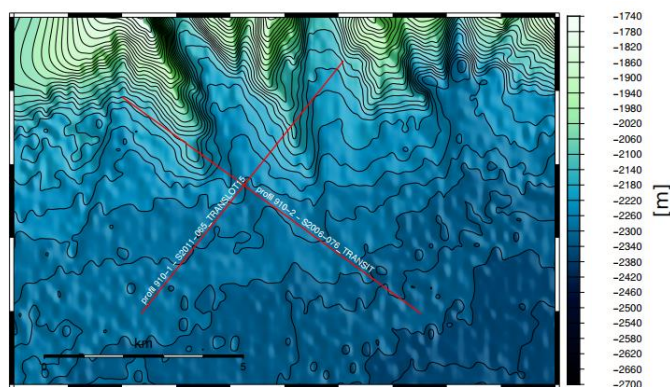


Figure 8: Les deux profils prévus pour la mission GRAVIMOB2

Source : [ROUSSEL 2017]

Nous avons donc dû nous replier vers la côte, où nous avons pu tester le nouveau prototype certes sur des profondeurs inférieures à 200 m. Le Jeudi 11 mars, nous avons programmé deux nouveaux profils en collaboration avec le personnel de Genavir. Ce dernier utilise le logiciel MIMOSA2 qui intègre une carte bathymétrique pour bien choisir les profondeurs d'immersion.

- Un premier profil NO/SE d'une longueur de 1.9 km, qui a été parcouru en deux profondeurs 180 m et 130 m avec un aller-retour pour chacune.
- De même, un deuxième profil NE/SO perpendiculaire au premier, d'une longueur de 1 km et sur deux profondeurs d'immersion 90 m et 140 m.

La vitesse du véhicule était fixée à 1.5 m/s (5.4 km/h) et la fréquence de mesure étant de 2 Hz, on effectue sur ces profils une mesure tous les 75 cm.

Après le lancement du submersible, il suit en autonomie la mission qui lui a été planifiée, or ceci n'est pas suffisant. Pendant la mission il faut veiller à prendre des notes du début jusqu'à la fin, des heures de début et de fin des profils, ainsi que l'heure de survenue des écarts éventuels du sous-marin, pour la corriger manuellement le cas échéant.

D'une part, notre système de gravimétrie, et contrairement à Limo-G [DE SAINT- JEAN 2008], ne possède pas de capteurs de position lui permettant d'enregistrer sa position tout au long de la mission. Cette fonction est assurée par le véhicule porteur. Ce qui nous permettra de faire un croisement entre les données d'accélération mesurées et les données de position, c'est qu'elles sont datées, en principe, avec la même horloge. Mais il faut faire attention, et prendre en note, le décalage d'horloge éventuel entre les deux appareils. D'autre part, l'interface du logiciel MIMOSA2 nous permet de suivre en temps réel les positions prévues et réelles du submersible. L'heure de survenue des écarts éventuels du sous-marin peut être notée au fur et à mesure de la réalisation du profil.

I.2.3 Ajustage des paramètres internes

La détermination des valeurs des paramètres internes est essentielle, car c'est grâce à ces paramètres que nous allons pouvoir faire la conversion tension/accélération. L'ajustage des paramètres peut être effectué avant ou après les mesures, c'est pareil, mais nous ne pouvons faire le traitement des mesures que si nous disposons les valeurs des paramètres internes. Plus précisément, des valeurs obtenues dans les mêmes conditions de température que celles des mesures. A l'issue de la mission de mesure en mer, nous avons fait l'ajustage des paramètres internes dans un cas statique du système de mesure. L'estimation des paramètres nécessite la mise en place d'un protocole expérimental qui consiste à faire l'acquisition des observations pour différentes orientations du dispositif de mesure. Ce protocole peut être mis en place dans n'importe quel environnement, tant que cet environnement ne limite pas les rotations du système, et qu'il permet de maintenir une certaine stabilité du système lors de chaque orientation.

Pendant l'acquisition, les forces spécifiques mesurées par une triade d'accéléromètres sont différentes d'une orientation à l'autre, mais la norme de la résultante des forces spécifiques reste constante et égale à la valeur de g mesurée sur place. L'obtention d'une série de mesures pour chaque accéléromètre nous permet d'estimer des valeurs pour ses paramètres internes.

Le dimanche 15 mars nous avons fait cette manipulation dans le hangar de l'Ifremer (Figure 10). GraviMob2 était mis à l'intérieur de l'AUV idex, et nous avons mis l'AUV dans différentes orientations selon les trois axes de rotation : tangage, roulis et lacet. Ces orientations sont données par la centrale inertielle de l'AUV (Figure 9).

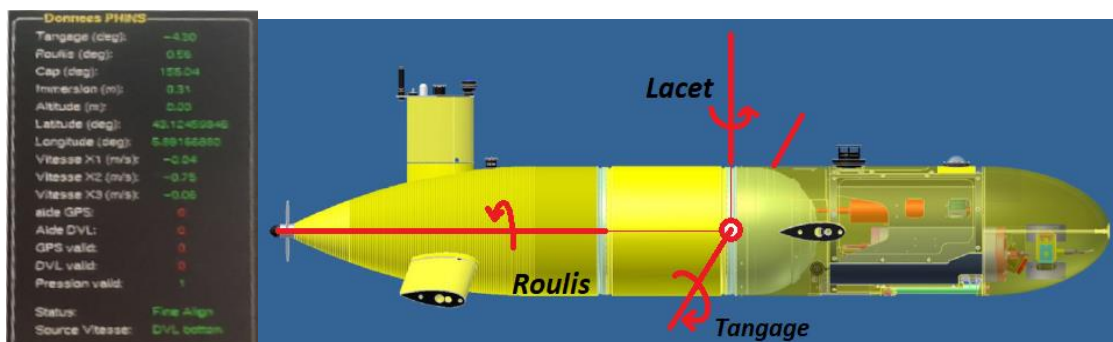


Figure 9 : Tangage Roulis et Lacet – Photo réalisée par mes soins

La connaissance des valeurs de ces orientations n'est pas indispensable pour faire l'ajustement, il faut seulement s'assurer que le système est disposé selon des orientations

différentes. Par exemple, pour faire dix orientations par axe entre -16° et 16° , nous avons choisit un pas de 3° entre les orientations. Sans les valeurs données par la centrale inertielle, il serait difficile d'estimer cet angle de rotation visuellement sur un véhicule de 5 m de longueur.



Figure 10: Ajustage dans le hangar de l'Ifremer - Photos réalisées par mes soins.

Au cours de l'expérience qui a duré toute la matinée (8h30, 12h), la température a varié de 15.9°C à 25.6°C ce qui induit de facto une variation des valeurs des paramètres internes que l'on cherche à estimer. Les résultats de cet ajustement ne peuvent donc pas être utilisés à moins de biaiser les estimations des valeurs de pesanteur.

Pour remédier à ce problème, nous avons programmé une mission d'ajustage des paramètres internes. Cette fois ci, GraviMob2 ne sera plus embarqué dans le sous-marin *idef^x*, il sera mis seul dans une enceinte climatique. Nous allons donc perdre l'information donnée par la centrale inertielle de l'AUV sur les orientations, mais cela ne changera en rien notre manipulation. Cette mission nous permettra également de confirmer ou non, le constat d'influence de la température sur les paramètres internes, que nous allons rappeler dans la partie suivante (I.3).

I.3 Constat de l'influence de la température

I.3.1 Variations constatées

C. ROUSSEL a remarqué dans son étude, l'influence de la température sur les valeurs des paramètres internes. En effet, il a utilisé des paramètres calculés pour une température T1, et il les a appliqués sur des mesures qui sont effectuées dans des conditions de température différentes comme le montre la Figure 11. On remarque un biais en moyenne égale à 60 mGal/°C.

paramètres déduits de la série n°	appliqués à la série n°	
	3	4
1	α : 63.84 mGal/°C	α : 62.23 mGal/°C
	β : 62.67 mGal/°C	β : 50.84 mGal/°C
2	α : 63.45 mGal/°C	α : 62.47 mGal/°C
	β : 62.35 mGal/°C	β : 52.38 mGal/°C

Figure 11: Test de l'influence de la température sur les paramètres internes de la triade 1 (α) et la triade 2 (β) [ROUSSEL 2017]

Ceci représente un cas où l'on fait l'ajustement des paramètres internes à une température différente de celle du fond de mer lors de l'acquisition des mesures. Lors de la mission GRAVIMOB2 par exemple, les premières mesures en mer du 11 mars étaient faites à une température d'environ 18°C, alors que l'ajustement était fait entre 15.9°C et 25.6°C. Pour éviter ce biais, il est donc important d'utiliser des paramètres qui sont estimés dans les mêmes conditions de température prévues pour les mesures en mer.

I.3.2 Ajustage dans une chambre climatique

Comme vu précédemment, il est crucial d'avoir les mêmes conditions de température lors de l'ajustement des paramètres, et les mesures en mer. Or la température de mesure peut être différente d'une mission à l'autre, et entre différentes immersions lors de la même mission. Il sera donc pratique d'avoir des valeurs des paramètres sur un large intervalle de températures.

L'objectif est d'avoir des courbes représentatives de la variation des valeurs des paramètres en fonction de la température. Ainsi, peu importe la température des mesures, on pourra utiliser les paramètres qui conviennent. Nous rappelons que chaque accéléromètre

dispose d'un capteur de température interne, et que les mesures d'accélération et de température se font au même temps. Donc, pour chaque mesure d'accélération, nous aurons une mesure de température qui nous permettra d'avoir les valeurs adéquates des paramètres.

I.3.2.1 La chambre climatique Binder MKT 720

Le laboratoire Géosciences Marines de l'Ifremer, du site de Brest, nous ont permis d'utiliser leur chambre climatique. Il s'agit d'une enceinte climatique de la société Binder, série MKT 720 (Figure 12), dont les caractéristiques [BINDER] sont présentées dans le Tableau 2.

Hauteur – Largeur – Profondeur	1020 mm – 1200 mm – 600 mm
Poids net – Volume intérieur	610 kg – 734 litres
Plage de température	-70°C – 180°C
Vitesse de chauffage moyenne	4.5 °C/min
Vitesse de refroidissement moyenne	4.0 °C/min
Temps de refroidissement de 180° à -70°	120 min
Fluctuation de température en fonction de la valeur de consigne	0.1 à 0.5 °C

Tableau 2: Caractéristiques de l'enceinte climatique BINDER MKT 720



Figure 12: Enceinte climatique BINDER MKT 720 – source : [BINDER]

I.3.2.2 Première mission d'ajustement

Cette première mission était programmée pour 4 jours, du mardi 6 au vendredi 9 avril au centre de l'Ifremer de Brest (Plouzané). La mission de mesure en mer en 2016 était faite à une température moyenne de 14.5°C. L'objectif de cette première mission d'ajustement est de faire l'ajustement sur une plage de température centrée sur 14.5°C, en plus de quelques températures extrêmes.

L'expérience dans le hangar de l'Ifremer a duré environ 3h30. Sachant que nous devons refaire la même expérience pour chaque température, nous aurons besoin d'une durée de 38h30 de mesures pour réaliser les onze températures (Tableau 3), et donc au moins 4 jours puisque nous n'avons l'accès à l'enceinte climatique que 10 heures par jour.

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
21°	18°	15.1°	14.8°	14.5°	14.2°	13.9°	13°	10°	7°	4°

Tableau 3: Températures prévues pour la première mission d'ajustement

D'abord nous avons ouvert la sphère en séparant les deux hémisphères, pour s'assurer que les capteurs de température soient dans les meilleures conditions pour atteindre la stabilité thermique. Le système a besoin de 5 à 6 heures, après la mise en tension, pour que les capteurs de température atteignent leur température d'équilibre [Roussel 2017], ce qui a pris la matinée. L'après-midi du premier jour, l'expérience a commencé à la température de $T_1=21^\circ\text{C}$.

L'idée était de faire 30 inclinaisons (10 inclinaisons pour chaque angle d'attitude), et maintenir chaque inclinaison pendant 5 minutes, ce qui est supposé durer 3h à peu près et donc pouvoir terminer T1 l'après-midi.

Le protocole suivi consistait à :

- Mettre le système dans une inclinaison M_0 ;
- Fermer la chambre et fixer une température de consigne de 21°C ;
- Attendre que la température de consigne soit atteinte ;
- Enregistrer pendant cinq minutes ;
- Ouvrir l'enceinte, et changer à une deuxième inclinaison M_1 ;
- Fermer la chambre ;

...

Le problème de ce protocole est que le temps de passage d'une inclinaison à l'autre est important (5 à 20 minutes). Cette durée correspond au temps de stabilisation de la température de la chambre après ouverture et fermeture. Clairement, dans ces conditions, il

était impossible de terminer toutes les températures prévues dans le temps imparti. La température 21°C a été abandonnée, et la température T2 = 18°C a pris la totalité de la deuxième journée.

Il ne restait que deux jours, et avec cette allure nous aurions eu seulement deux températures de plus, ce qui est insuffisant pour faire les premiers traitements. Pour résoudre ce problème deux solutions ont été mises en place par mes soins :

- La diminution du nombre d'inclinaisons, à 5 inclinaisons seulement par rotation (Figure 13), et donc 15 inclinaisons par température, ce qui est suffisant pour l'ajustement.
- Le changement du protocole, qui n'est clairement pas adéquat pour l'enceinte climatique.

Le deuxième protocole consistait à faire varier les températures pour la même inclinaison, à la place de varier les inclinaisons pour la même température.

Il consiste à :

- Mettre le système dans une inclinaison M_0 ;
- Fermer la chambre et fixer la première température de consigne ;
- Une fois la température de consigne atteinte, attendre 5 minutes pendant lesquelles l'enregistrement sera utilisé pour ce palier ;
- Fixer une nouvelle température de consigne et répéter l'opération autant de fois que de températures de consigne souhaitées ;
- Ouvrir la chambre, et mettre une deuxième inclinaison M_1 , puis recommencer, et faire cela pour les 15 inclinaisons ;

Ce protocole diminue les ouvertures de l'enceinte, et ainsi diminue la durée de la manipulation. Le protocole est d'autant meilleur que le nombre de températures est augmenté. Dans notre cas il s'agissait de cinq températures : T3 à T7. À la place d'ouvrir l'enceinte 14 fois pour chacune des températures et donc 70 fois au total, on l'ouvre seulement 14 fois. Le changement de température se fait rapidement car il est réalisé par intervalle de températures de 0,3°C.

Concernant les rotations, le système n'est plus à l'intérieur du submersible, donc on a abandonné les trois rotations (Figure 9), et elles étaient remplacées par trois rotations plus simples à manipuler, celles selon les trois arches de la sphère. Chacune s'est vue attribuer le nom de l'accéléromètre qui est en face (Figure 13).



Figure 13 : Exemple de la rotation α_{43} – Réalisée par mes soins

I.3.2.3 Deuxième mission d’ajustement

La première mission a permis d’acquérir des mesures pour six températures : 13.9°C, 14.2°C, 14.5°C, 14.8°C, 15.1°C et 18°C. Ces données se sont avérées insuffisantes, comme nous allons le voir dans la section II.3.1, pour pouvoir conclure quant au comportement des paramètres internes en fonction de la température.

Une deuxième mission était programmée dans le même lieu pour une semaine, du lundi 31 mai au vendredi 4 juin. L’objectif était de compléter la plage de températures.

T1’	T2’	T3’	T4’	T5’	T6’	T7’
4.0°	7.0°	9.0°	9.5°	10.0°	10.5°	11.0°
T8’	T9’	T10’	T11’	T12’	T13’	T14’
11.5°	12.0°	12.5°	13.0°	13.5°	16.0°	17.0°

Tableau 4: Températures prévues pour la deuxième mission d’ajustement

Dans la première mission, les expériences à 18°C et 4°C avaient nécessité, avec le protocole 1, respectivement une journée et une journée et demi de travail. Cette dernière est due notamment à la différence entre la température de consigne (4°C) et la température ambiante de l’extérieur qui était d’une vingtaine de degrés Celsius. Cela rallongeait le temps qu’il fallait pour se stabiliser. Les mesures étaient réalisées pour les températures T3’ à T12’, et puis T13’ et T14’. La température T2’ a été abandonnée par manque de temps.

Les différences par rapport à la première mission sont les suivantes :

- Utilisation du protocole 2 (gain de temps) ;
- L'intervalle de température est fixé à 0.5°C au lieu de 0.3°C et la durée de la rampe de température entre 1.5 et 2 minutes ;
- Abandon de la saisie manuelle des températures consignes, et utilisation du logiciel de programmation des profils de température de la chambre climatique, qui permettait de donner une série de températures (*W-I*), et préciser la durée souhaitée (*Time*) pour chaque température (Figure 14).

L'utilisation des programmes a également permis d'effectuer des mesures pendant les 4 premières nuits, ce qui a enrichi les mesures effectuées le matin, et pendant lesquelles les mesures d'étalonnage des capteurs étaient faites (II.2.2).

Pgm-Editor		Pgm-Name		PROG 02						
Pgm-Nr	2	ZP-Pgm-Nr	1	Abschn.	22					
No W-1	FAN	Time	Sk	No Cy	Tmin	Tmax	Pa			
1	+ 13.5	****.	00:07:00	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
2	+ 13.5	****.	00:00:01	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
3	+ 13.0	****.	00:07:00	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
4	+ 13.0	****.	00:00:01	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
5	+ 12.5	****.	00:07:00	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
6	+ 12.5	****.	00:00:01	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
7	+ 12.0	****.	00:07:00	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
8	+ 12.0	****.	00:00:01	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
9	+ 11.5	****.	00:07:00	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
10	+ 11.5	****.	00:00:01	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
11	+ 11.0	****.	00:07:00	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
12	+ 11.0	****.	00:00:01	00000000	1	0	-1999	+9999	1	
13	+ 10.5	****.	00:07:00	00000000	1	0	-1999	+9999	1	

Figure 14 : Logiciel de programmation des profils de température de l'enceinte climatique.

– Photo réalisée par soins

- Utilisation d'un thermomètre enregistreur *Tinytag* (Figure 15), et visualisation de la température à l'intérieur de la chambre avec le logiciel *Tinytag Explorer* (Figure 16).

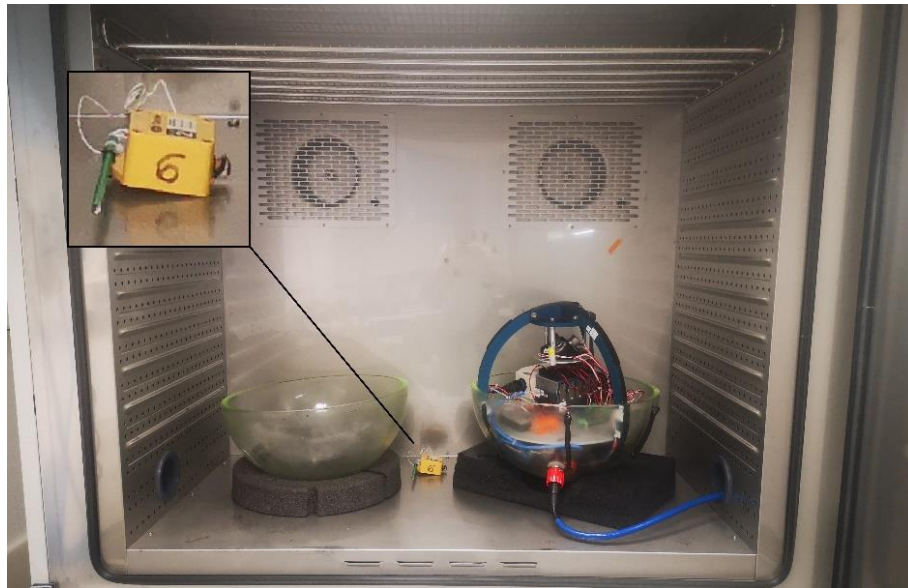


Figure 15: Tinytag, le thermomètre enregistreur, à l'intérieur de l'enceinte – Photo réalisée par mes soins

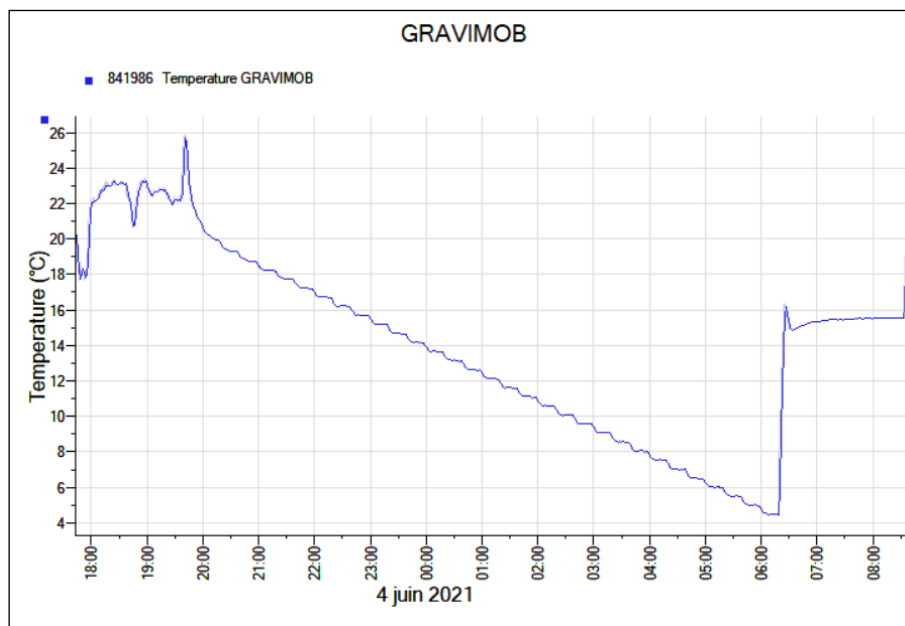


Figure 16: Capture d'écran de *Tinytag Explorer* pour la nuit du 4 juin, avec une fréquence d'acquisition de 0,5 Hz

Au final, on a réussi à avoir des mesures pour 13 températures, ce qui est très bien comparé à la première mission, et on obtient donc en totale 19 températures couvrant une plage entre 9°C et 18°C.

II Traitement

II.1 La méthode d'ajustement des paramètres

II.1.1 Equations fondamentales

La méthode utilisée pour l'ajustement des paramètres internes, est la méthode dite des multiplicateurs de Lagrange.

Si on prend :

$p_{M,i}^s = (p_{x,i} \ p_{y,i} \ p_{z,i})^T$: Le vecteur des mesures en tension en sortie du gravimètre (en V) ;

$p_0^b = (p_{ox} \ p_{oy} \ p_{oz})^T$: Le vecteur des biais en tensions (en V) ;

$a_{M,i}^b = (a_{x,i} \ a_{y,i} \ a_{z,i})^T$: Le vecteur des accélérations spécifiques, exprimées dans le repère du véhicule porteur, b (en mGal) ;

$K = \begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{pmatrix}$: La matrice des facteurs d'échelle exprimées en V.mGal⁻¹ ;

$C_{b'}^s = \begin{pmatrix} 1 & \tau_{yz} & \tau_{zy} \\ 0 & \tau_{yy} & \tau_{zx} \\ 0 & 0 & \tau_{zz} \end{pmatrix}$: Une matrice de passage entre les repère b' et le repère de la triade

accélérométrique s. Cette matrice tient compte du désalignement des axes sensibles des accéléromètres. Elle s'exprime comme suit :

La relation qui lie les mesures de tension aux accélérations spécifiques est donnée par [Roussel 2017] :

$$p_{M,i}^s = K \cdot C_{b'}^s \cdot a_{M,i}^b + p_0^s \quad 4$$

Les onze inconnues de notre problème sont :

- Les trois facteurs d'échelle : k_x , k_y et k_z , rassemblés dans la matrice K ;
- Les trois biais en tension $p_{ox,i}$, $p_{oy,i}$ et $p_{oz,i}$, rassemblés dans le vecteur p_0^b ;
- Les cinq facteurs de la matrice de passage $C_{b'}^s$, entre les repères b' et s, τ_{yz} , τ_{zy} , τ_{yy} , τ_{zx} et τ_{zz} ;

Les observations sont les mesures en tension en sortie du gravimètre $p_{x,i}$, $p_{y,i}$ et $p_{z,i}$.

Pour résoudre le problème il manque les valeurs des accélérations spécifiques, autrement dit les accélérations ressenties par chacun des accéléromètres pour chaque inclinaison.

Si nous connaissons pour chaque inclinaison, l'angle que fait l'axe sensible de chaque accéléromètre avec la verticale, et connaissant la valeur de la pesanteur locale g , nous pouvons obtenir les valeurs des trois accélérations, en décomposant et en projetant le vecteur de l'accélération de la pesanteur sur les trois axes sensibles.

Sur la Figure 17, nous avons un exemple de projection de l'accélération de la pesanteur sur l'axe sensible de l'accéléromètre 643. Si α est l'angle que fait l'axe sensible avec la verticale, l'accélération spécifique selon l'accéléromètre 643 $a_{643} = \cos(\alpha).g$. Si on prend $c = \cos(\alpha)$, l'objectif est de trouver la valeur de c , qu'on appelle cosinus directeur, pour chacun des accéléromètres, pour toute inclinaison.

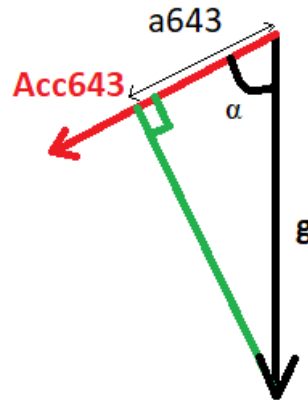


Figure 17: Projection de l'accélération de pesanteur g sur l'axe sensible de l'accéléromètre 643

II.1.2 Programmation de la méthode

Le problème se divise donc en deux parties :

- Une première partie où l'on cherche par itération les valeurs des cosinus directeurs c pour chaque inclinaison. Dès qu'on obtient ces valeurs, nous en déduisons les valeurs des accélérations spécifiques selon la formule [Roussel 2017] :

$$\forall i \in [1; n] \quad a_{M,i}^b = \|g\| \cdot \begin{pmatrix} c_{x,i} \\ c_{y,i} \\ c_{z,i} \end{pmatrix} \quad 5$$

- Dès qu'on obtient les valeurs des accélérations spécifiques, nous pourrions résoudre l'équation (4), par la méthode des moindres carrés.

La programmation de cette méthode était faite sur *python*, avec l'utilisation de la fonction *CaliMod2* (Figure 18) de la bibliothèque *gCaliTools* [ROUSSEL 2017].

```
def CaliMod2(data_file,Nb_iter,g_ref,inc):
    """Calcul des coefficients de calibration dans le cas d'un modèle Facteur d'échelle + Biais + Désalignement"""
    .. math::
        p = k \times T_{(b)}^{(a)} \times g^{(b)} + p_{(0)}
    **syntaxe**::
        CaliMod2(data_file,Nb_iter,g_ref,inc)
    **paramètres**::
        data_file - fichier des observations [V]
        Nb_iter   - nombre max d itérations (type : scalaire)
        g_ref     - norme du vecteur acc. gravi. [mGal] (type : scalaire)
        inc      - existence du fichier "inclin.hist" (type : booléen)
    **retourne**::
        params.txt - fichier des valeurs finales des paramètres
        params.hist - fichier de l historique des paramètres
        residus.txt - fichier des valeurs finales des résidus [V]
        residus.hist - fichier de l historique des résidus [V]
        ecarts_g.txt - fichier des valeurs finales des écarts à g_ref [mGal]
        ecarts_g.hist - fichier de l historique des écarts à g_ref [mGal]
    .. seealso::
        doc/exemples/CaliMod2_ex0
    """
```

Figure 18: Paramètres de la fonction *CaliMod2* de la bibliothèques *gCaliTools*

Un pré-traitement se fait sur les fichiers bruts du système, avant de pouvoir leur appliquer la fonction *CaliMod*. Un programme python *gravimob2.py* [ROUSSEL 2017] permet de faire cette opération. Il consiste à extraire les enregistrements des paliers de cinq minutes, faire les moyennes sur les mesures d'accélération, et former des fichiers dont la forme est présentée dans la Figure 20, section II.2, contenant les valeurs de ces moyennes, pour différents paliers.

Pendant les missions d'ajustement I.3.2.2 et I.3.2.3, il faut noter les heures de début et de fin de chaque palier, correspondant à une inclinaison pour une température donnée (Annexe 2).

L'idée est de pouvoir extraire du fichier global contenant 20.000 lignes (Figure 19, section II.2), les lignes correspondantes aux mesures pendant une inclinaison M_i . La durée de l'intervalle pour chaque inclinaison étant fixée à 5 minutes et la fréquence de mesure à 2 Hz, cet intervalle contiendra 600 mesures pour l'inclinaison M_i . Nous faisons la moyenne des 600 mesures pour chacun des accéléromètres, et puis on fait de même pour les autres inclinaisons.

II.2 Les données et les résultats

II.2.1 Description des données

II.2.1.1 Données de sortie du gravimètre

Le système de gravimétrie GraviMob2 génère des fichiers textes (Figure 19), de taille maximale de 20 000 mesures. Chaque fichier contient un entête précisant les grandeurs mesurées et leurs unités, il est réparti en 22 colonnes. Le nom du fichier 08-21-25_31-05-21, signifie qu'il s'agit d'un fichier produit à partir de 8h 21min 25secondes à la date 31/05/2021. Les différentes colonnes du fichier sont décrites dans le Tableau 5.

Figure 19: Extrait d'un fichier de sortie du système GraviMob2

Heure – colonne 1	L'heure de la mesure, au format hh :mm : ss
Secondes Colonne 2	Les secondes, comptées à partir de la première mesure, commençant à 0, et évoluant avec une fréquence de 2Hz.
Ref_tension Colonne 3	Les accéléromètres sont fixés dans le système, de sorte à avoir un angle de 45° par rapport au plan horizontal (Figure 1), chacun d'eux mesure donc par défaut $\cos(45^\circ)g$. Pour supprimer ceci on ajoute cette tension de référence en entrée des capteurs, et ainsi on ne mesure que les petites variations autour de la valeur de $\cos(45^\circ)g$. Comme dans la Figure 19, on voit que la mesure de l'accéléromètre 643 est de -0.12 V, alors que la tension de référence est de l'ordre de 3.6 V.
ACC_643 ACC_644 ACC645 Colonnes 4 5 6	Les accélérations des accéléromètres de la triade 1 (en V)
T_643 T_644 T_645 Colonnes 7 8 9	Les températures internes des accéléromètres de la triade 1 (en V)

ACC_646 ACC_647 ACC648 Colonnes 10 11 12	Les accélérations des accéléromètres de la triade 2 (en V)
T_646 T_647 T_648 Colonnes 13 14 15	Les températures internes des accéléromètres de la triade 2 (en V)
Gyro_X Gyro_Y Gyro_Z Colonnes 16 17 18	Les vitesses angulaires en °/s
MAG_X MAG_Y MAG_Z Colonnes 19 20 21	Les composantes du champ magnétique en nT (nano Tesla)
Température Colonne 22	La température interne de la sphère.

Tableau 5: Contenu des fichiers bruts de GraviMob2

II.2.1.2 Données d'entrée de la fonction CaliMod

Après le traitement avec le programme gravimob2.py, on obtient au final des fichiers de la forme (Figure 20). C'est un fichier texte, par triade, divisé en plusieurs groupes de 4 lignes, et d'autant de groupes que d'inclinaisons. La première ligne correspond à l'en-tête avec le numéro de l'inclinaison. Les 3 lignes restantes sont respectivement les moyennes des accélérations des trois accéléromètres de la triade. Plus précisément, pour chaque accéléromètre, on ne prend pas la valeur Acc, mais plutôt la valeur de la différence Ref_tension – Acc.

```
#-----0-----#
3.678821122984
3.651475648515
3.552174239309
#-----1-----#
3.606346478081
3.652449611221
3.625837749530
#-----2-----#
```

Figure 20: Extrait d'un fichier d'entrée de la fonction CaliMod

II.2.2 Etalonnage des capteurs de température

Dans cette partie, nous supposons que la température de la sphère est fautive, nous allons donc essayer de la corriger avec un étalon : la chambre climatique. Pour les capteurs internes de température des accéléromètres, il s'agit de chercher les lois d'ajustement pour

pouvoir passer de mesures de tension électrique, à des valeurs en degrés Celsius, là également nous allons utiliser la température de la chambre climatique comme variable explicative⁹.

II.2.2.1 Température de la sphère

La température de la sphère est donnée en degrés Celsius. Toutefois, pendant les mesures, la valeur affichée sur l'interface (Figure 3) n'était pas semblable à la température de consigne de la chambre climatique, avec des écarts autour de 1°C. Il fallait donc l'étalonner. Pour cela on s'est appuyé sur les observations de la nuit du 2 juin lors du refroidissement de la chambre climatique où sa température a varié de 21°C à 4°C par intervalle de 0.5°C toutes les 20 minutes.

Pour chaque palier de température d'une durée totale de 20 minutes, on n'a conservé que les cinq dernières minutes pour obtenir les températures moyennes sur cet intervalle dont les valeurs sont données dans le Tableau 6.

Température de consigne dans la chambre (°C)	Température de la sphère dans le système (°C)	Température de consigne dans la chambre (°C)	Température de la sphère dans le système (°C)
19.00	19.25		
18.50	18.69	11.00	11.06
18.00	18.16	10.50	10.57
17.50	17.66	10.00	10.05
17.00	17.16	9.50	9.54
16.50	16.66	9.00	9.04
16.00	16.12	8.50	8.54
15.50	15.64	8.00	8.00
15.00	15.12	7.50	7.51
14.50	14.63	7.00	7.03
14.00	14.10	6.50	6.52
13.50	13.61	6.00	5.99
13.00	13.10	5.50	5.51
12.50	12.59	5.00	4.99
12.00	12.09	4.50	4.46
11.50	11.58	4.00	3.97

Tableau 6: Etalonnage du capteur de température interne de la sphère - nuit 3. Dans les colonnes grisées sont représentées les valeurs de la température de consigne et dans les autres colonnes les températures de la sphère.

⁹ La variable en fonction de laquelle nous allons faire la régression

Une régression linéaire de ce jeu de données donne les résultats suivants :

- Facteur d'échelle (pente) : **a = 0.985**
- Biais en température de : **b = 0.093 °C**
- Coefficient de détermination¹⁰ : **R² = 0.999**

En comparant avec les estimations des deux premières nuits, avec des échantillons plus petits, on obtient les résultats indiqués dans le Tableau 7.

Nuit	Taille de l'échantillon	Facteur d'échelle	Biais (°C)	Coefficient de détermination
1	7	0.985	0.186	1.00
2	15	0.985	0.060	1.00
3	31	0.985	0.093	1.00
Moyenne		0.985	0.113	
Ecart-type		0.000	0.053	

Tableau 7 : Paramètres de l'étalonnage du capteur de température de la sphère

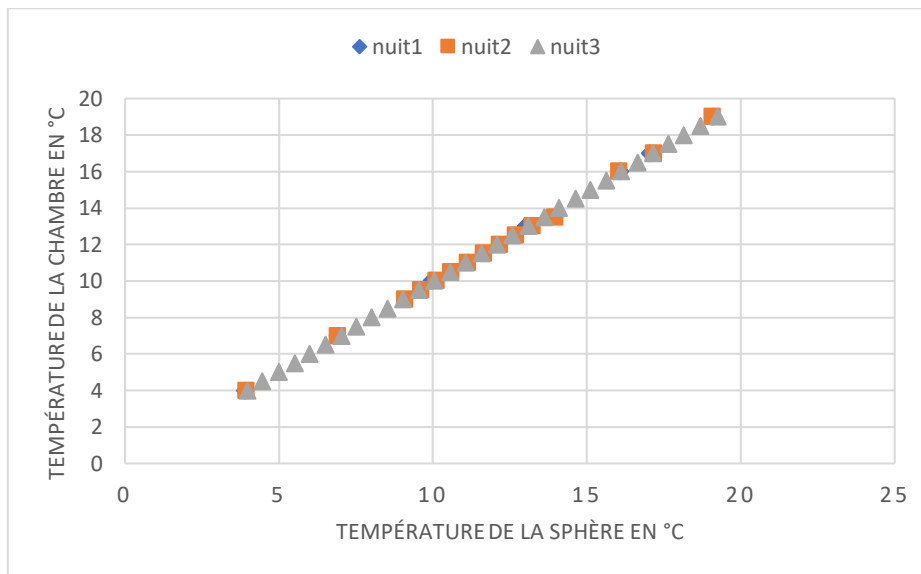


Figure 21: Evolution de la température de la sphère en fonction de celle de la chambre climatique pendant les trois nuits de mesure

Les résultats des données acquises lors des trois nuits, nous confirment la corrélation linéaire qui existe entre la température de la sphère, avec celle de l'enceinte climatique. Et

¹⁰ Le coefficient de détermination est un coefficient entre 0 et 1 qui mesure l'adéquation entre le modèle mathématique, ici une droite, et les observations. Plus il est proche de 1, plus le modèle choisit est sûr, et bien représentatif des observations. La méthode pour calculer ce coefficient sera expliquée dans la section II.3.

nous obtenons des modèles linéaires qui représentent parfaitement la variabilité des valeurs de température ($R^2 = 1$). Les facteurs d'échelle pour ces modèles sont égaux à la même valeur $a = 0.985$, quand le biais est relativement dispersé autour de la valeur $b = 0.1 \text{ °C}$ avec un écart de 0.05 °C , négligeable vu qu'il est inférieur à la précision de mesure de 0.1 °C . Ceci est confirmé également par un nuage de points représentant des droites quasiment confondues (Figure 21).

II.2.2.2 Capteurs internes aux accéléromètres

Avec le même type de traitement, on essaie de trouver la loi d'ajustement pour lier les sorties en tension, représentant les températures internes des accéléromètres, avec la température de l'enceinte climatique.

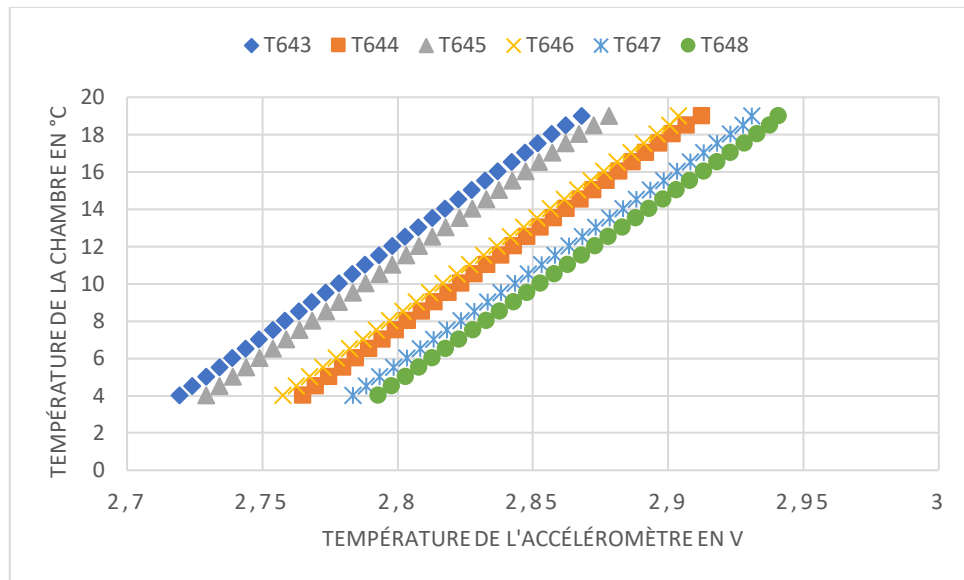


Figure 22: Evolution linéaire des températures internes des accéléromètres en fonction de la température de la chambre climatique

L'Annexe 3 présente les échantillons utilisés, et la Figure 22 montre l'évolution des températures internes des accéléromètres en fonction de la température de la chambre climatique. Nous remarquons que les températures évoluent linéairement en fonction de la température de la chambre, avec la même pente, et avec des biais différents. Les paramètres d'étalonnage obtenus pour les 6 accéléromètres sont indiqués dans le Tableau 8, ils sont de l'ordre de grandeur des valeurs des paramètres trouvées par le constructeur (**Annexe 4**).

	Triade1			Triade2		
	T_643	T_644	T_645	T_646	T_647	T_648
Pente (°C/Volt)	101.57	102.34	101.34	101.37	100.49	100.13
Biais (°C)	-272.17	-278.96	-272.57	-275.54	-275.72	-275.67
R²	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tableau 8: Paramètres de l'étalonnage des capteurs de température internes - nuit 3

II.2.2.3 La prise en compte des erreurs entachant les deux paramètres

Dans les deux parties précédentes II.2.2.1 et II.2.2.2, la régression linéaire ne prenait pas en compte les incertitudes sur les mesures de la température/tension pour les capteurs du système et pour l'enceinte climatique.

Dans cette partie on va étudier les lois d'ajustement, en prenant en compte les erreurs entachant les deux paramètres de la régression. Pour étudier ces régressions, on s'appuie sur la méthode proposée dans l'étude [BERTUZZI et al. 1987].

Nous souhaitons étudier une régression linéaire entre deux échantillons de taille $n=31$. Un échantillon Y représentant la température de la chambre climatique, comme variable régresseur, et X , représentant la température de la sphère, comme variable à régresser.

Ces échantillons sont entachés d'erreur. Pour l'échantillon Y , la fiche technique (Annexe 4) de la chambre indique qu'il y'a une dérive de 0.1 à 0.5 °C en fonction de la température de consigne. Pour nos manipulations, les variations observées étaient de 0.1 °C pendant chaque palier. Nous allons donc considérer une erreur de mesure de 0.1 °C. Pour l'échantillon X , nous n'avons pas cette information. Or chaque valeur x_i de température de la sphère, est une moyenne sur 5 minutes de mesures, nous allons donc prendre pour chaque moyenne x_i , une erreur sur la moyenne ¹¹ qui est égale à $\sigma_i / \sqrt{600}$, et nous trouvons des valeurs d'erreur très faibles à l'ordre de 0.001 °C.

Pour résoudre ce problème de régression, on utilise la méthode proposée par [BERTUZZI et al. 1987] où il construit et propose des estimateurs non biaisés des paramètres d'étalonnage, à savoir la pente et l'ordonnée à l'origine. Un programme Python qui implémente cette méthode a été développé par mes soins. Il prend en entrée l'échantillon x , les erreurs de mesures u sur x , l'échantillon y et les erreurs de mesures v sur y , et qui en utilisant les

¹¹ Supposant un échantillon aléatoire X_1, X_2, \dots, X_n de taille n suivant une loi normale (μ, σ) . La moyenne \bar{X} suit une loi normale $(\mu, \sigma/\sqrt{n})$

formules proposées par [BERTUZZI et al. 1987], voir Annexe 5, nous donne les résultats de la Figure 23.

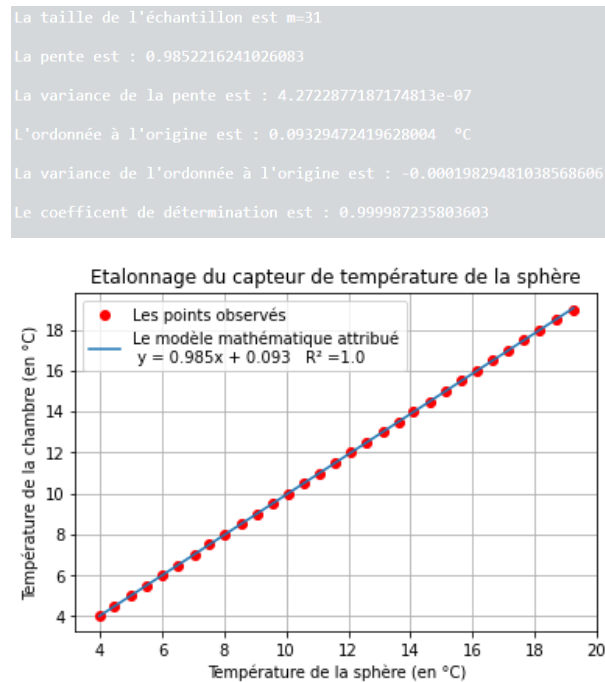


Figure 23: Sortie du programme Bertuzzi implémenté pour calculer les paramètres d'étalonnage

On remplace la variance des erreurs des mesures $V(u)$ et $V(v)$ par la valeur 0, pour simuler un cas de régression linéaire classique sans erreur, et comparer. Nous remarquons dans le Tableau 9 que les valeurs obtenues sont quasiment les mêmes, et que la différence ne vient qu'après le 9^e et le 6^e chiffre après la virgule respectivement pour la pente et l'ordonnée à l'origine.

	Cas classique par moindres carrés	Cas classique $V(u) = V(v) = 0$	$V(u) \neq 0$ et/ou $V(v) \neq 0$
Pente	0.985	0.98522162422	0.98522162410
Biais (°C)	0.0937	0.09329472278	0.09329472419

Tableau 9: Appréciation de l'influence de la prise en compte des erreurs entachant les mesures, sur la qualité de la régression linéaire

Donc, dans notre cas les erreurs des mesures n'étaient pas assez grandes pour donner un biais important à la régression linéaire. Cette méthode pourra être utile et meilleure si nous estimons avoir des erreurs de mesure importantes. Mais pour nous, les paramètres trouvés dans les deux parties précédentes sont assez suffisants, et assez précis, par rapport à la précision que nous avons sur la température (0.1°C).

Nous remarquons également que les valeurs obtenues en utilisant ces estimateurs non biaisés, et dans le cas où les erreurs de mesures sont nulles, (0.985,0.0933) sont cohérents avec ceux calculés auparavant (Tableau 7) par la méthode des moindres carrés (0.985, 0.0937).

II.2.3 La stabilisation des mesures

L'objectif de cette partie est de remettre en question la durée de 5 minutes fixée pour les mesures. Nous supposons que les mesures des capteurs de température du système sont stables pendant cette durée, mais est-ce vraiment le cas ?

Si nous revenons au principe de la manipulation d'ajustement en suivant le deuxième protocole I.3.2.3), les étapes du cycle thermique de la chambre climatique mis en place sont les suivantes :

- Atteindre la température de palier prédéfinie ;
- Se maintenir à cette température pendant une durée de 20 minutes ;
- Incrémenter de 0.5°C la température de palier.

Nous avons remarqué qu'il faut une minute trente voire deux minutes pour que la température de l'enceinte varie de 0.5°C et se stabilise à la température de consigne. Par conséquent la durée de la rampe thermique a été fixée à 2 minutes et celle du palier à 5 minutes.

Cependant, la stabilisation de la température de la chambre climatique ne garantit pas celles des capteurs de température internes des accéléromètres et également du numériseur car les inerties thermiques de ces systèmes électroniques peuvent être différentes. Donc si les capteurs du système se stabilisent moins vite, il se peut que pendant la durée du palier de 5 minutes, la température mesurée par le capteur ne corresponde pas à la température de consigne. La moyenne sur les mesures des 5 minutes donnera donc un mauvais résultat.

On va donc comparer les deux courbes de température en fonction du temps, d'une part celle de l'enceinte climatique, et d'autre part celles ressenties par les capteurs de température internes des accéléromètres. Pour ces derniers, nous ne disposons pas directement de valeurs en degrés Celsius, mais seulement de valeurs de tension. Pour pouvoir faire cette comparaison, on va donc s'appuyer sur les premiers résultats de l'étalonnage (II.2.2.2) pour convertir les tensions en degrés Celsius.

La Figure 24 montre la série des mesures de la nuit du 2 Juin 20h00 à 3 juin 4h00, pour la triade 1 à gauche et la triade 2 à droite. Nous remarquons que les températures mesurées par les capteurs internes des accéléromètres, ont une variation quasiment linéaire, qui décroît avec le temps.

La durée des paliers de température a été fixée à 20 minutes. Pour la triade 1, nous remarquons une diminution de la pente, comme si elle va commencer à se stabiliser, et puis nous ordonnons une nouvelle température de consigne, et elle reprend sa diminution.

Pour la deuxième triade, on voit moins cet effet, les courbes sont quasiment des droites. Ceci peut être expliqué par le fait que la deuxième triade est quasiment enfermée à cause de la plaque métallique au-dessus d'elle (Figure 1). Cet isolement fait que le changement de température dans l'enceinte est moins bien ressenti par les accéléromètres du bas.

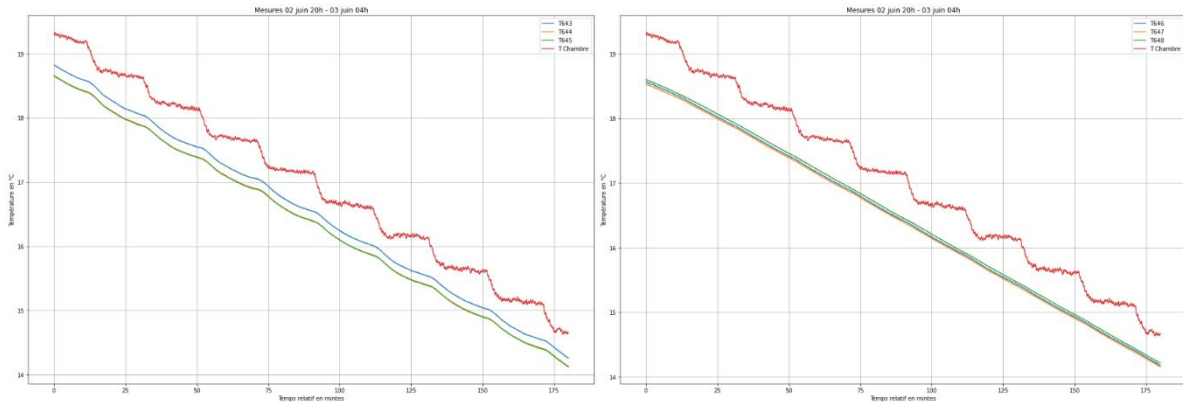


Figure 24: Comparaison des mesures de température de l'enceinte climatique et des trois capteurs de température internes de la triade 1 et la triade 2.

Ces résultats suggèrent que le palier de 20 minutes, n'est pas suffisant pour que les mesures de température des capteurs internes se stabilisent. Ceci peut rendre la mission d'ajustement très difficile à mettre en place, ou du moins qu'elle devra s'étaler sur plusieurs semaines, si nous souhaitons que les températures mesurées par les capteurs du système soient très stables pendant chaque palier.

Pour apprécier la variation de l'accélération en fonction de la température, nous utilisons les mêmes données acquises lors de la troisième nuit (nuit 3). Nous rappelons que pendant cette nuit, le système était laissé dans une même orientation, et la température diminuait de 21 °C à 4 °C avec un pas de 0.5 °C pendant toute la nuit.

Nous remarquons sur la Figure 25 que contrairement à ce qui peut être attendu, les mesures d'accélération ne sont pas constantes pendant la nuit, et qu'ils diminuent lorsque la température de l'enceinte décroît. Cette décroissance linéaire confirme donc la dépendance des mesures accélérométriques avec la température. Elle permet également d'apprécier si, pendant la durée du palier de 5 minutes, la variation de l'accélération induite par le changement de température est significative ou pas pour devoir en tenir compte.

Les accélérations (en V) en fonction des températures internes(en °C)

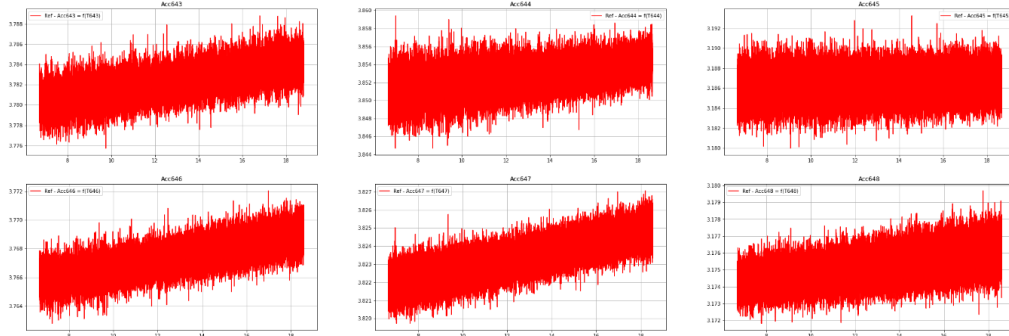


Figure 25: Accélérations en fonction des températures pendant la nuit 3

La tendance linéaire est ici remarquée puisque on est sur une grande plage de température entre 7°C et 18.5°C, équivalente à huit heures de mesure. Nous allons zoomer sur une plus petite plage de température, pour avoir une idée sur le comportement pendant une vingtaine de minutes. La Figure 26 montre un zoom de la Figure 25 pour les températures variant de 18°C à 18.5°C. Nous remarquons que les accélérations sont centrées sur une valeur constante, et qu'on ne voit plus de tendance linéaire.

Les accélérations (en V) en fonction des températures internes(en °C)

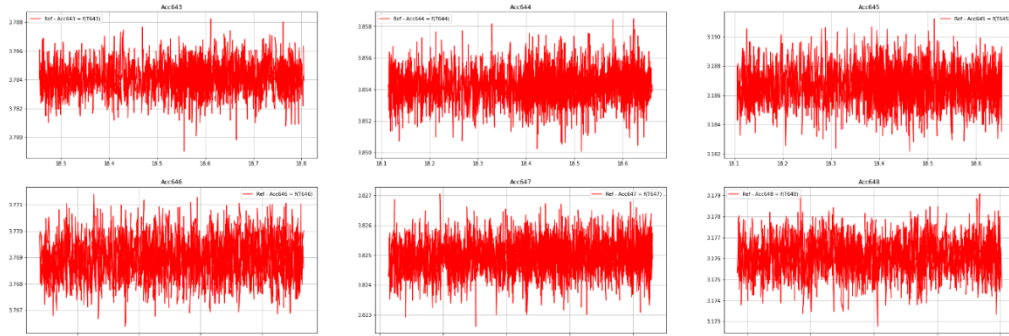


Figure 26 : Accélérations en fonction des températures internes. Zoom sur une plage de 20 minutes

D’après ces résultats, la conclusion que nous faisons est la suivante :

Bien que les capteurs internes de température de GraviMob2 aient un temps de stabilisation supérieure à 20 minutes, ces résultats semblent montrer que la variation de température de l’accéléromètre au cours du palier soit négligeable pour induire une variation significative de la réponse du capteur.

On peut donc supposer que pendant la durée d’un palier, la température et la mesure accélérométrique n’ont pas varié, aux incertitudes de mesures près. Cela sera confirmé par l’étude de la dispersion des paramètres ajustés qui sera décrite par le chapitre suivant.

II.3 Modélisation mathématique

II.3.1 Premier protocole de traitement

Comme vu dans la partie (II.1.2), le traitement des fichiers était fait par la fonction CaliMod2 implémentée par [ROUSSEL 2017]. En entrée, cette fonction reçoit les valeurs d'accélération des 3 accéléromètres dans chacune des orientations données au système Gravimob.

II.3.1.1 Résultats de la première mission

Cette partie concerne les résultats de traitements des données acquises en avril, lors de la première mission d'ajustement (I.3.2.2).

Les mesures étant effectuées pour chaque couple (orientation, température) sur une durée de cinq minutes avec une fréquence de mesure de 2 Hz, les valeurs des accélérations utilisées en entrée de la fonction représentent les moyennes des séries, comprenant chacune 600 mesures. Nous avons obtenu après le traitement des données acquises lors de la première mission d'ajustement, les graphes de la Figure 28, produits par le programme python *params_f(T).py* implémenté par mes soins.

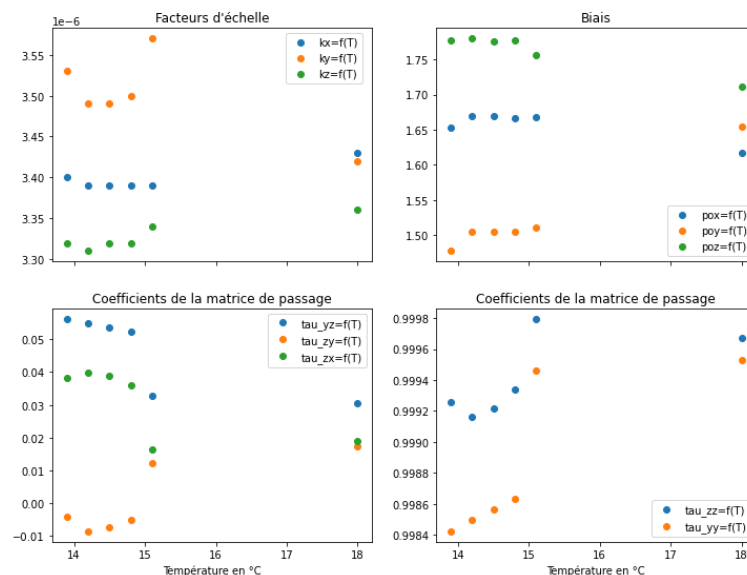


Figure 27: Résultats obtenus pour la triade 1 pour les données acquises lors de la première mission d'ajustement

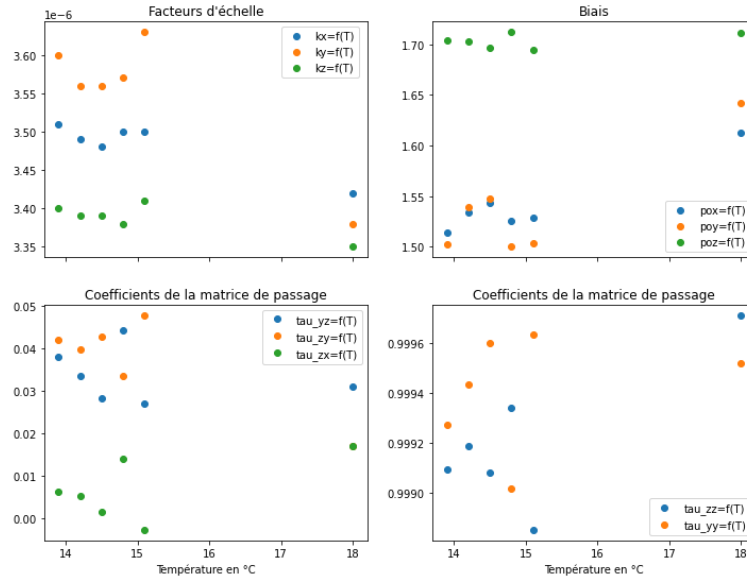


Figure 28 : Résultats obtenus pour la triade 2 pour les données acquises lors de la première mission d'ajustement

II.3.1.2 Régression par moindres carrés

Pour pouvoir modéliser l'évolution des paramètres internes en fonction de la température, différentes régressions polynomiales ont été expérimentées à l'aide d'un programme Python réalisé par mes soins. Ce programme permet l'ajustement de quatre fonctions polynômes de degrés allant de 1 à 4. La Figure 29 montre l'exemple des résultats de régression pour le facteur d'échelle k_x .

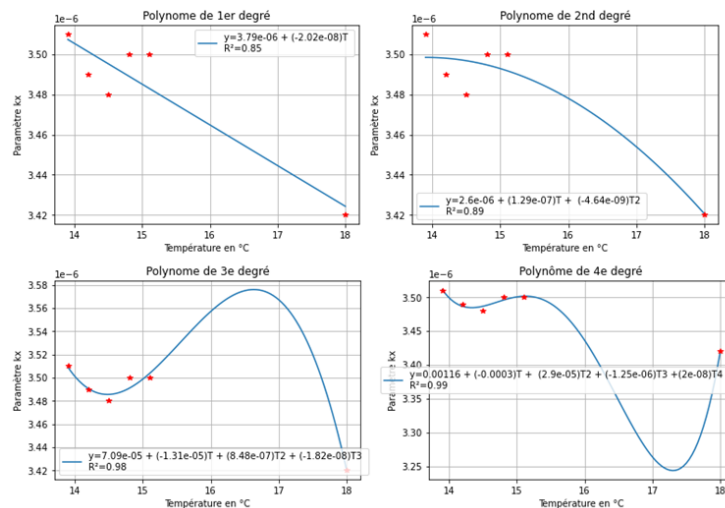


Figure 29: Régression du facteur d'échelle k_x avec des polynômes de premier, deuxième, troisième et quatrième degré

Le **coefficient de détermination R^2** [Université Paris Ouest] est calculé par la formule :

$$R = \frac{SCT - SCR}{SCT} \quad 6$$

avec **SCT** : la variabilité totale des valeurs, donnée par la formule :

$$SCT = \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2 \quad 7$$

Où les y_i sont les valeurs observées, et \bar{y} la moyenne des valeurs observées

SCR : la variabilité résiduelle, donnée par la formule :

$$SCR = \sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_1^n e_i^2 \quad 8$$

Où les y_i sont les valeurs observées, et les \hat{y}_i sont les valeurs estimées par le modèle, et e_i les résidus d'observation.

Supposons qu'on veut tester un modèle liant les températures T aux valeurs des paramètres internes y , le modèle lie ces deux valeurs par la relation. $\hat{y}_i = f(T)$.

La variable SCT, quantifie la dispersion des valeurs observées y_i autour d'une droite horizontale d'équation $Y = \bar{y}$, ceci correspond à tester un modèle polynômial où tous les coefficients sont nuls, à part la constante. Si les valeurs y_i sont alignées et toutes égales à leur moyenne \bar{y} , SCT serait nulle. La variable SCR quant à elle, quantifie la dispersion des valeurs autour du modèle testé. Obtenir une valeur de R^2 qui égale à 1, signifie que la variabilité résiduelle SCR est tellement plus petite que la variabilité totale SCT, et que le modèle est très fiable.

Nous remarquons que le meilleur coefficient de détermination R^2 entre ces quatre modèles est celui du modèle du polynôme de degré 4. On ne pouvait pas aller plus loin, puisque on ne dispose que de 6 observations, et pour un polynôme du 5^e degré, le degré de liberté serait nul. Toutefois le résultat qu'on trouve avec cet échantillon est cohérent avec l'indication du constructeur des accéléromètres (Annexe 6). Pour des tests effectués en 2013 sur un intervalle de température de $[-55.43^\circ\text{C}, 93.97^\circ\text{C}]$, les modèles de dépendance des paramètres internes de la température étaient des polynômes de degré 4.

II.3.1.3 Résultats de la deuxième mission

Après la deuxième mission d'ajustement, le même type de traitement a été appliqué sur les données dont les résultats sont présents dans la Figure 30 pour la triade1, et la Figure 31 pour la triade 2.

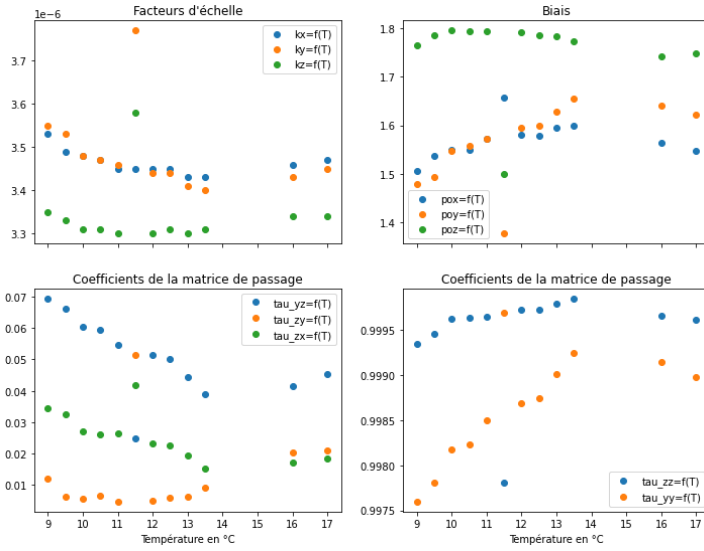


Figure 30: Résultats obtenus pour la triade 1 pour les données acquises lors de la deuxième mission d'ajustement

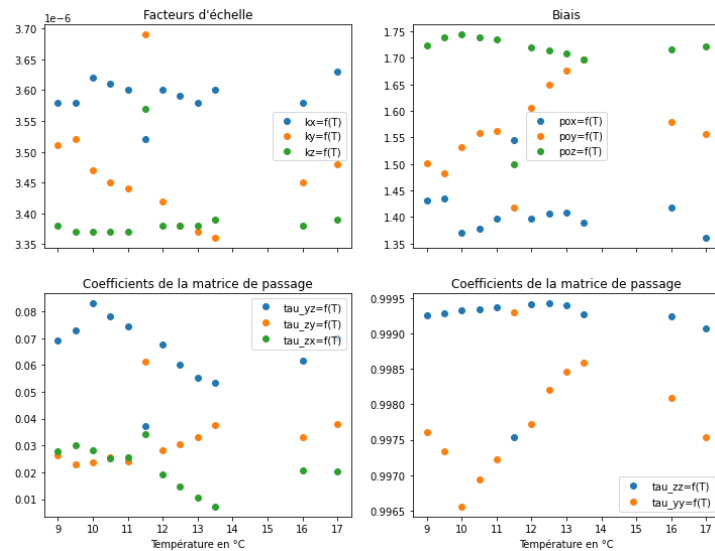


Figure 31: Résultats obtenus pour la triade 2 pour les données acquises lors de la deuxième mission d'ajustement

Nous voyons clairement la dépendance en température des valeurs des paramètres internes, ce qui semble confirmer l'hypothèse de départ de ce travail. Toutefois les différences entre les valeurs sont relativement petites, nous devons nous assurer que ces variations ne sont pas aléatoires, et sont réellement dues au changement de température.

Une manière de l'apprécier est de considérer les barres d'erreur sur des valeurs estimées en fonction de la température. Si celles-ci ne se chevauchent pas, la dépendance en température sera confirmée. Cependant, le logiciel de traitement utilisé ne permet pas d'estimer ces barres d'erreur.

La seule possibilité pour surmonter cette difficulté est de faire une étude sur les mesures brutes (II.2.1.1), puis faire une propagation des erreurs pour retrouver les erreurs commises sur les valeurs des paramètres internes. Sauf que cette possibilité s'avère être complexe, à cause de tous les traitements qui sont faits sur les mesures brutes avant d'arriver au résultat final. Nous avons ainsi choisi de suivre un deuxième protocole de traitement (II.3.2) qui nous permettra d'avoir plus facilement des barres d'erreur sur les valeurs obtenues des paramètres internes et qui sera exposé dans la partie suivante.

II.3.2 Deuxième protocole de traitement

Pour simplifier l'explication, nous allons nous restreindre à une seule triade, et une seule température. Pour un couple (triade, température), on associe 11 paramètres internes. Les explications restent valables pour le reste des couples.

Pour avoir des barres d'erreur, il faut avoir plusieurs estimations de chaque paramètre interne. On pourra ainsi, en étudiant la dispersion des valeurs, calculer une valeur moyenne du paramètre et des intervalles de confiance sur cette dernière. Il fallait donc produire plusieurs fichiers d'entrée, pour avoir autant de 11-uplet de valeurs des paramètres internes.

Nous rappelons que pour obtenir les valeurs des 11 paramètres internes, nous utilisons un fichier dont le format est illustré sur la Figure 20. Sur cette figure, il s'agit un extrait montrant les valeurs moyennes des accélérations des 3 accéléromètres dans deux orientations différentes M_0 et M_1 , mais le fichier utilisé réellement contient 14 blocs correspondants à 14 orientations différentes M_i . Si nous nous intéressons individuellement à une accélération, nous pourrions appliquer sur cette valeur un bruit gaussien, et générer un échantillon de 1000 valeurs, pour simuler comme si nous avons fait 1000 fois la même manipulation pour cette température. Si nous faisons de même pour toutes les accélérations du fichier d'entrée, nous allons donc réussir à avoir 1000 fichiers d'entrée différents. Nous

pourrons ensuite faire l'ajustement sur tous les fichiers, et ainsi obtenir 1000 valeurs pour chaque paramètre interne.

Une autre idée est de produire directement plusieurs fichiers à partir des mesures brutes Sachant que chaque valeur d'accélération est une moyenne de 600 mesures, nous pouvons effectuer l'estimation des paramètres pour chaque mesure sans avoir à considérer un quelconque bruit blanc. Nous obtenons alors pour chaque paramètre 600 estimations ce qui permet d'en déduire les paramètres de sa distribution statistique.

II.3.2.1 Traitement avec le serveur de calcul du laboratoire

L'inconvénient du deuxième protocole de traitement réside dans le grand nombre de fichiers à traiter, 600 fichiers par couple (triade, température) sachant qu'il y en a 38. La durée du traitement d'un fichier est d'environ 8 minutes, soit 127 jours de traitement au total. Il a fallu donc recourir au serveur de calcul du laboratoire pour accélérer les traitements. Ce dernier dispose de six nœuds de calculs (Annexe 7), équivalents à six ordinateurs puissants, sur lesquels on peut lancer parallèlement plusieurs traitements.

Deux programmes python étaient implémentés par mes soins, *script1.py* pour générer les fichiers d'entrée, et *script2.py* pour les traiter.

Script1.py :

Il prend en entrée les fichiers texte de données brutes (Figure 19), contenant les mesures accélérométriques de GraviMob2 pendant toute la période des manipulations. Il y'en avait trois (j1, j2, j3) pour la première mission, et neuf (j1, n1, j2, n2, j3, n3, j4, n4, j5) pour la deuxième mission correspondant à cinq jours et quatre nuits auxquels s'ajoutent des fichiers texte (Figure 32) contenant pour chaque température, l'horaire du début de chacune des quatorze orientations, sous la forme *hmmssxx*, avec xx le nom du fichier source parmi les 12 cités dessus.

Température(°C)	M1	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
T4.0	104500j1			114000j1					121600j1				124600j1	
	144500j1			151700j1					154600j1				161500j1	
	091200j2			094420j2									132100j1	141200j1
													164200j1	171000j1
T9.0	152915j2			094220j3					032444n2				115040j3	135140j3
	165802j3			022503n3					112545j4				125134j4	141945j4
	170336j4			025019n4										153710j3
														154316j4
T9.5	152300j2			181730j2					030443n2				114305j3	133300j3
	165101j3			020502n3					111645j4				124433j4	141244j4
	165635j4			023018n4										153009j3
														153615j4
T10.0	151620j2			180920j2					024442n2				113730j3	133300j3
	164400j3			014501n3					110630j4				123732j4	140543j4
	164934j4			021017n4										152308j3
														152914j4
T10.5	151000j2			180210j2					022441n2				113000j3	132530j3
	163659j3			012500n3					110020j4				123031j4	135842j4
	164233j4			015016n4										151607j3
														152213j4

Figure 32: Extrait du fichier d'entrée du programme script1.py

Les différentes étapes du script sont les suivantes :

- Lecture du fichier d'entrée comme une table *array* ;
- Pour chaque température, parcours de la table ligne par ligne ;

Pour chaque température :

- Parcourir la liste des quatorze orientations ;

Pour chaque orientation :

- Grâce à la valeur *xx* choisir le bon fichier source, et y récupérer l'heure du début d'enregistrement¹², qui correspondra alors à la ligne 1 ;
- Utiliser la valeur *hhmmss*, pour savoir quelle ligne dans le fichier correspond à la première mesure du palier des cinq minutes ;
- Une boucle *for i in range (600)*;

Pour chaque numéro *i*

- Récupérer les valeurs des accélérations des six accéléromètres dans deux fichiers, nommés sous la forme

Température_triade1_numéro du fichier.txt

Température_triade1_numéro du fichier.txt

➔ Sortie : 1200 fichiers, avec une orientation dans chacun.

➔ Sortie : 1200 fichiers, avec toutes les orientations.

➔ Sortie : Autant de répertoires que de températures. Dans chacun 1200 fichiers d'entrée du programme *script2.py*

Script2.py :

Ce programme reçoit en entrée les fichiers de sortie du premier programme, et réalise l'ajustement des paramètres pour chacun des fichiers grâce à la même fonction *CaliMod2*. Il stocke ensuite à chaque fois le 11-uplet des valeurs des paramètres dans un fichier *Température_triade.txt*.

Avec cette disposition, le *script2* permet de faire le traitement d'une seule température.

Nous pouvons l'exécuter pour les 19 températures en même temps, en les répartissant sur les cinq nœuds de calcul, ce qui réduit la durée du traitement à une dizaine de jours.

On a divisé ce script en deux, *script2_6r_triade1.py* et *script2_6r_triade2.py*, chacun fait le traitement pour une seule triade, et pour seulement 100 fichiers sur 600, ce qui multiplie

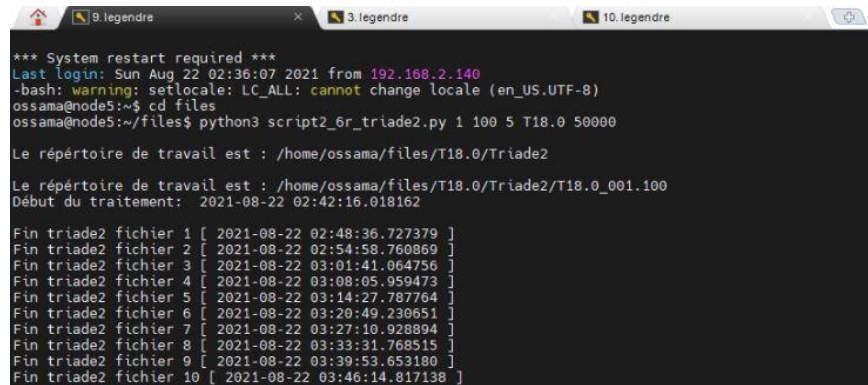
¹² Les fichiers bruts sont nommés sous la forme *hh-mm-ss_jj-mm-aa.txt* respectivement, l'heure, les minutes, les secondes, le jour, le mois et l'année du début d'enregistrement du fichier.

par douze la vitesse de traitement pour chaque température. Par conséquent la durée de traitement pour une température donnée est réduite approximativement à 11 heures.

Deux logiciels sont utilisés pour cette partie :

- WinSCP qui permet le transfert des données entre l'ordinateur physique sous Windows, et le serveur de calcul
- MobaXterm qui permet de lancer les scripts dans les différents nœuds de calcul. Il permet d'ouvrir plusieurs fenêtres dans la même interface, ce qui est pratique pour lancer plusieurs traitements à la fois.

La Figure 33 montre un exemple de l'interface MobaXterm pendant le traitement des cent premiers fichiers, de la deuxième triade, pour la température 18°C, avec le nœud de calcul 5.



```
*** System restart required ***
Last login: Sun Aug 22 02:36:07 2021 from 192.168.2.140
-bash: warning: setlocale: LC_ALL: cannot change locale (en_US.UTF-8)
ossama@node5:~$ cd files
ossama@node5:~/files$ python3 script2_6r_triade2.py 1 100 5 T18.0 50000

Le répertoire de travail est : /home/ossama/files/T18.0/Triade2
Le répertoire de travail est : /home/ossama/files/T18.0/Triade2/T18.0_001.100
Début du traitement: 2021-08-22 02:42:16.018162

Fin triade2 fichier 1 [ 2021-08-22 02:48:36.727379 ]
Fin triade2 fichier 2 [ 2021-08-22 02:54:58.760869 ]
Fin triade2 fichier 3 [ 2021-08-22 03:01:41.064756 ]
Fin triade2 fichier 4 [ 2021-08-22 03:08:05.959473 ]
Fin triade2 fichier 5 [ 2021-08-22 03:14:27.787764 ]
Fin triade2 fichier 6 [ 2021-08-22 03:20:49.230651 ]
Fin triade2 fichier 7 [ 2021-08-22 03:27:10.928894 ]
Fin triade2 fichier 8 [ 2021-08-22 03:33:31.768515 ]
Fin triade2 fichier 9 [ 2021-08-22 03:39:53.653180 ]
Fin triade2 fichier 10 [ 2021-08-22 03:46:14.817138 ]
```

Figure 33: Extrait de l'interface de MobaXterm. Exemple du traitement de la température 18°C

II.3.2.2 Intervalles de confiance

Dans ce traitement final, les résultats des deux missions d'ajustement sont fusionnés. Pour chaque température, les moyennes des paramètres internes sont calculées sur les 600 échantillons. Pour pouvoir établir des intervalles de confiance sur ces paramètres, nous devons étudier la distribution des échantillons, et voir quelle loi suivent les estimateurs des moyennes.

Les histogrammes de toutes les distributions ont été tracés. La Figure 34 montre un exemple des histogrammes des distributions des paramètres internes de la triade 1, à une température de 9°C. Nous remarquons directement que ces distributions sont cohérentes avec une distribution gaussienne.

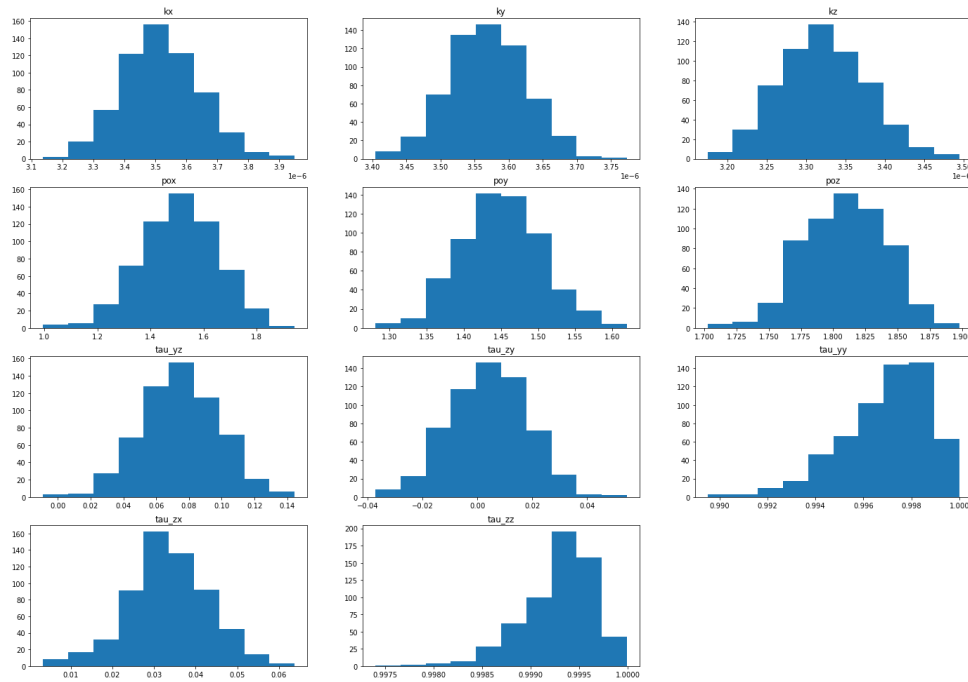


Figure 34: Distributions des paramètres internes pour la triade 1, à la température 9°C

Cette analyse graphique peut être suffisante pour supposer que les moyennes des valeurs des paramètres internes suivent une loi normale. Mais pour le confirmer, nous avons fait des tests statistiques de normalité pour étudier la compatibilité de ces distributions avec une loi normale. Plus particulièrement, nous avons appliqué le test de Shapiro-Wilk basé sur une statistique W équivalente à un coefficient de détermination entre les quantiles générés à partir d'une loi normale et ceux obtenus avec les données [RAKOTOMALALA 2008].

Pour faire ce test, nous utilisons la fonction python *shapiro* de la librairie *scipy.stats*. L'hypothèse de normalité est rejetée si $W < W_{\text{critique}}$. Pour un seuil de confiance de 5%, $W_{\text{critique}} = 0.947$ [SHAPIRO et al. 1965]. Nous remarquons dans le Tableau 10 que la statistique W est plus grande que W_{critique} pour les onze distributions, donc l'hypothèse de normalité peut être acceptée au risque¹³ de 5%. Nous pouvons accepter ou rejeter la normalité de τ_{yy} et τ_{zz} selon deux hypothèses :

- Supposer que le W n'est pas précis, puisque on a un échantillon de taille 600, et que le test est surtout puissant pour les petits échantillons ($n < 50$). Dans ce cas, nous prenons en compte plutôt la p -valeur¹⁴, qui est plus petite que 0.05. Et donc rejeter l'hypothèse de normalité au risque de 5%.

¹³ Le risque de première espèce, noté α , est le risque que nous prenons de rejeter l'hypothèse nulle d'un test statistique à tort. Dans le test de Shapiro-Wilk, l'hypothèse nulle est la normalité de la distribution.

¹⁴ La p -valeur est la probabilité critique d'un test statistique. C'est la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle de normalité. Si elle est inférieure au risque de première espèce α , on doit rejeter l'hypothèse de normalité.

- Supposer que la p-valeur n'est pas assez précise, puisque la documentation de la fonction shapiro indique que la p-valeur peut ne pas être précise pour des grands échantillons ($n > 5000$). Et nous utilisons plutôt le fait que W soit supérieure à $W_{critique}$ et accepter l'hypothèse de normalité.

Pour la suite nous choisissons d'accepter la normalité des distributions de l'ensemble des paramètres internes au risque de 5%. Autrement dit, avec 5% de chance que ce choix soit mauvais.

Distribution	Statistique W	La p-valeur	Hypothèse
K_x	0.997	0.31	Acceptée
K_y	0.999	0.91	Acceptée
K_z	0.996	0.16	Acceptée
P_{ox}	0.997	0.26	Acceptée
P_{oy}	0.999	0.99	Acceptée
P_{oz}	0.996	0.16	Acceptée
τ_{yz}	0.998	0.65	Acceptée
τ_{zy}	0.998	0.77	Acceptée
τ_{yy}	0.951	0.00	Acceptée
τ_{zx}	0.995	0.07	Acceptée
τ_{zz}	0.947	0.00	Acceptée

Tableau 10 : Résultats du test de normalité Shapiro-Wilk sur les distributions des valeurs des paramètres internes de la triade1, $T=9^\circ\text{C}$

II.3.2.3 Résultats du traitement

Nous considérons les variables $k_x, k_y, k_z, p_{ox}, p_{oy}, p_{oz}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{yy}, \tau_{zx}$ et τ_{zz} des variables qui suivent des lois normales. On calcule leurs moyennes avec des échantillons $(k_{x1}, \dots, k_{x600}), (k_{y1}, \dots, k_{y600}), \dots, (\tau_{zz1}, \dots, \tau_{zz600})$ de taille $n=600$. Les intervalles de confiances à 68% sur ces valeurs moyennes sont de la forme [Université de Poitiers 2008] :

$$\left[\hat{p}_i - \frac{\hat{\sigma}_i}{\sqrt{n}}, \hat{p}_i + \frac{\hat{\sigma}_i}{\sqrt{n}} \right]$$

Où \hat{p}_i est la moyenne estimée du paramètre i , $\hat{\sigma}_i$ l'écart type estimé sur cette moyenne et n la taille de l'échantillon.

La Figure 35 montre les résultats du traitement pour la triade 1. Nous remarquons que les intervalles de confiance sont presque disjoints entre les différentes valeurs en fonction de

la température, et notre hypothèse de départ est confirmée : la variation des valeurs est due essentiellement à la variation de la température.

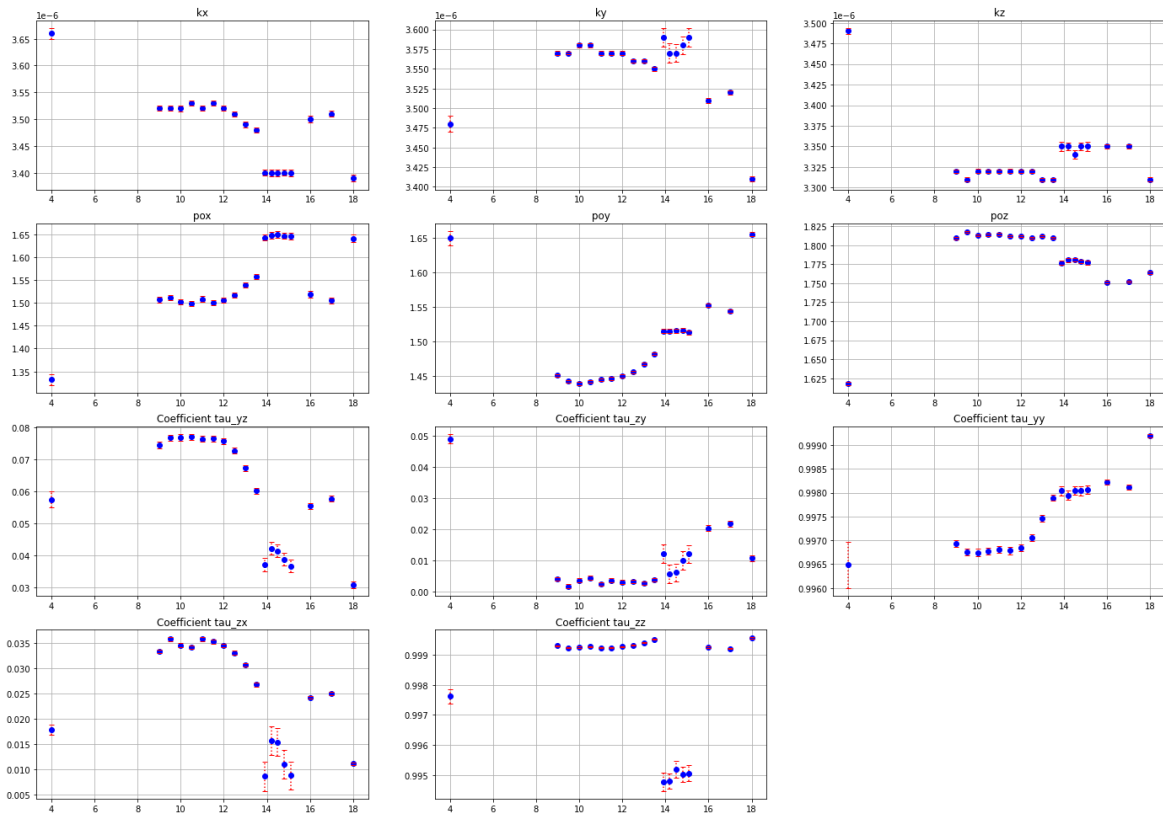


Figure 35: Résultats du traitement de la triade 1 - En bleu les moyennes calculées et en rouge les barres d'erreurs sur ces moyennes

II.3.3 Modélisation

Nous disposons à présent de 11 échantillons de taille 19. Nous allons faire des régressions par polynôme, pour comparer les modèles, confirmer la compatibilité ou non avec un modèle polynômial de degré 4 proposé par le constructeur voire trouver un meilleur modèle.

II.3.3.1 Comparaison des modèles

Pour pouvoir comparer plusieurs modèles polynomiaux, nous allons utiliser une fonction python *polyfit* de la librairie *numpy*, pour calculer les modèles, et la fonction *r2_score* de *sklearn.metrics* pour calculer le coefficient de détermination R^2 . Le Tableau 11 et le Tableau 12 montrent les résultats obtenus pour des degrés de 1 à 20. En bleu sont les coefficients pour le modèle polynôme du degré 4 qu'on cherche à valider.

Valeurs du coefficient de détermination R ² (en %)							
Degré du polynôme	K _x	K _y	K _z		P _{ox}	P _{oy}	P _{oz}
1	61.6	3.3	18.1		57.2	4.9	5.3
2	65.0	72.9	68.7		63.3	93.0	84.8
3	66.1	81.3	93.5		64.7	94.8	97.5
4	66.6	89.5	95.1		65.2	95.3	98.1
5	85.3	89.8	96.0		84.6	97.5	98.5
6	94.9	90.3	96.3		94.7	98.6	98.5
7	95.0	91.0	96.3		94.8	98.7	98.5
8	97.6	94.7	97.4		97.9	98.8	98.6
9	98.3	96.5	97.4		98.8	99.2	98.7
10	98.3	97.4	97.5		98.9	99.7	98.9
11	98.4	97.4	98.1		98.9	99.8	99.3
12	98.4	97.9	98.2		98.9	99.8	99.3
13	98.4	97.9	98.2		98.9	99.8	99.3
14	98.7	98.5	98.7		99.1	99.9	99.5
15	98.7	98.5	98.7		99.2	99.9	99.5
16	98.7	98.5	98.7		99.2	99.9	99.5
17	99.1	98.5	98.9		99.5	99.9	99.5
18	99.1	98.5	98.9		99.4	99.9	99.5
19	99.1	98.5	98.9		99.4	99.9	99.5
20	99.1	98.5	98.9		99.4	99.9	99.5

Tableau 11 : Valeurs du coefficient de détermination pour plusieurs modèles polynômiaux

Six paramètres sur les onze semblent représenter des observations assez compatibles avec ce modèle. Nous remarquons que plus on augmente le degré, plus le coefficient de détermination est grand. Dix paramètres présentent un coefficient de détermination supérieur à 80% avec le modèle pour le degré 5, et supérieur à 90% pour le degré 6.

Si nous nous basons seulement sur le coefficient de détermination, nous sommes tentés de choisir le modèle avec le plus grand coefficient, et cela peut être avec le degré 20, voire plus. Il faut faire attention parce que la valeur de R² ne doit pas être l'outil pour choisir notre modèle. Il est admis que plus le degré est élevé et plus on arrive à ajuster le modèle sur les différents points mais entre les points il peut faire n'importe quoi, et surtout ne pas être conforme à la réalité.

Vu que nous disposons déjà d'un modèle prédéfini par le constructeur, celui d'un polynôme de degré 4 (Annexe 6), nous allons essayer de calculer les coefficients dudit modèle dans la partie suivante, plus rigoureusement, avec la méthode des moindres carrés et le valider avec le test du chi².

Valeurs du coefficient de détermination R ² (en %)					
Degré du polynôme	τ_{yz}	τ_{zy}	τ_{yy}	τ_{zx}	τ_{zz}
1	35.9	5.9	78.3	21.3	4.4
2	57.1	81.0	89.1	45.7	4.5
3	69.3	91.7	89.6	63.5	41.8
4	70.2	93.5	90.0	65.0	49.2
5	85.3	97.2	97.4	79.1	58.5
6	94.4	97.5	98.4	89.5	73.6
7	94.5	97.5	98.5	89.5	74.1
8	97.1	97.5	98.5	93.2	86.2
9	97.2	97.9	99.6	93.5	90.3
10	97.3	97.9	99.7	93.5	90.6
11	97.3	97.9	99.8	93.5	91.7
12	97.6	98.2	99.9	94.4	91.8
13	97.7	98.3	99.9	94.5	91.8
14	98.2	98.6	99.9	95.8	94.0
15	98.2	98.5	99.9	95.9	94.2
16	98.3	98.5	99.9	95.9	94.3
17	98.3	98.6	99.9	95.9	95.4
18	98.3	98.6	99.9	95.9	95.4
19	98.3	98.6	99.9	95.9	95.4
20	98.3	98.6	99.9	95.9	95.3

Tableau 12: Valeurs du coefficient de détermination pour plusieurs modèles polynômiaux

II.3.3.2 Polynôme de degré 4

Dans cette partie nous allons essayer de tester, à quel point la variabilité des valeurs des paramètres internes est expliquée par un modèle polynômial de degré 4 de la forme :

$$p_i = A_i + B_i T + C_i T^2 + D_i T^3 + E_i T^4 \text{ pour } i \in [1,11] \quad 9$$

avec A_i, B_i, C_i, D_i et E_i : respectivement la constante et les coefficients d'ordre 1, 2, 3 et 4 du polynôme modélisant le paramètre interne i ;

p_i : la valeur du paramètre interne ;

T : la valeur de la température ;

Cette partie est réalisée avec le programme *MoindresCarres4.py* implémenté par mes soins. Le problème se résout avec la méthode des moindres carrés linéaires, puisque les inconnues A_i, B_i, C_i, D_i , et E_i sont exprimées linéairement en fonction des observations (p, T) . Il s'écrit sous la forme :

$$B = A.X + V \quad 10$$

avec

- B : un vecteur colonne, de taille 19, contenant les 19 valeurs du paramètre interne ;
- A : La matrice d'observation de taille (19,5), contenant pour chaque ligne k, les coefficients $1, T_k, T_k^2, T_k^3, T_k^4$;
- X : Le vecteur colonne des inconnues [A, B, C, D, E] de taille 5 ;
- V : Le vecteur des résidus ;

Les différentes étapes du programme sont les suivantes :

- Récupération des observations, ainsi que leurs incertitudes de mesure ;
- Formation des matrices A et B ;
- Formation de la matrice des poids P, une matrice diagonale, contenant dans chaque position (i,i) l'inverse du carré de l'incertitude de la mesure i ;
- Calcul de la matrice normale $N = A^T \cdot P \cdot A$ puis sa matrice inverse N^{-1} ;
- Calcul du vecteur solution $X = N^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot B$;
- Validation globale de la solution avec le test du chi2 :
 - o Calcul du vecteur des résidus d'observation V ;
 - o Calcul de l'estimateur du facteur unitaire de variance ¹⁵ $s_0^2 = (V^T \cdot P \cdot V) / \text{ddl}$;
 - o Calcul de la valeur observée de $s(r) = V^T \cdot P \cdot V$;
 - o Calcul de la région d'acceptation de $s(r)$, $[\gamma_1, \gamma_2]$, pour un seuil de confiance donné. Les valeurs de γ_1 et γ_2 sont issues de la loi inverse de chi2. On les calcule avec la fonction python *chi2.ppf* de la librairie *scipy.stats*. Le test est validé si $s(r) \in [\gamma_1, \gamma_2]$;
- Validation individuelle :
 - o Attribution de la valeur 1 à s_0^2 si le test de chi2 est rejeté ;
 - o Calcul des résidus normés w_i , et de leur région d'acceptation $[-\gamma', \gamma']$, avec une loi normale (si le test chi2 échoue) ou une loi tau (si le test chi2 est valide) ;
- Calcul des écarts types σ_i puis les intervalles de confiance sur les inconnues x_i qui s'écrivent sous la forme $[x_i - \sigma_i \cdot \gamma', x_i + \sigma_i \cdot \gamma']$;
- Calcul du coefficient de détermination R^2 de la régression.

¹⁵ ddl = n - m est le degré de liberté, avec n le nombre d'observations, et n m le nombre d'inconnus

Le Tableau 13 montre l'exemple du traitement effectué sur le paramètre interne k_x de la triade 1. Nous remarquons qu'après avoir enlevé cinq mesures aberrantes, le modèle polynômial de degré 4 (Figure 36) explique 98.73% de la variabilité des valeurs de k_x pour la triade 1.

Triade1 – facteur d'échelle k_x				
Seuil de confiance 0.95				
Taille de l'échantillon	s (r)	Région d'acceptation	Nombre d'observations validées individuellement	Coefficient de détermination
19	865.128	[5.629,26.119]	17	65.61%
On supprime les observations non validées (T = 17°C et T = 18°C)				
17	190.445	[4.404,23.337]	17	93.27%
On supprime l'observation ayant le résidu normé le plus grand relativement aux autres. (T = 4°C)				
16	76.039	[3.816,21.92]	16	95.48%
On supprime l'observation ayant le résidu normé le plus grand relativement aux autres. (T = 13.5°C)				
15	36.272	[3.247,20.483]	15	97.77%
On supprime l'observation ayant le résidu normé le plus grand relativement aux autres. (T = 13.9°C)				
14	18.908	[2.7,19.023]	14	98.73%
Test de chi2 validé				

Tableau 13: Régression linéaire par moindres carrés pour le facteur d'échelle k_x

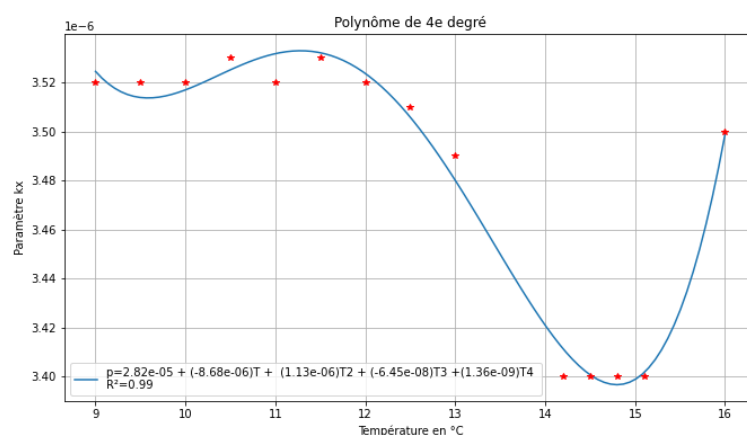


Figure 36: Modélisation de l'évolution du facteur d'échelle k_x en fonction de la température – Polynôme de degré 4

Nous effectuons le même type de traitement sur les autres paramètres internes. Les tableaux 14, 15 et 16 représentent le bilan final des résultats du traitement, à savoir, pour chaque paramètre interne, les coefficients du modèle mathématique modélisant son évolution en fonction de la température, et ce avec des intervalles de confiances au seuil de 95%.

	K_x	K_y	K_z
A : Constante (V. mGal ⁻¹)	2.82 10⁻⁵	3.99 10⁻⁶	5.32 10⁻⁷
	[2.12 10 ⁻⁵ , 3.52 10 ⁻⁵]	[3.43 10 ⁻⁶ , 4.56 10 ⁻⁶]	[-9.21 10 ⁻⁷ , 1.99 10 ⁻⁶]
B : 1^{er} degré (V. mGal ⁻¹ . °C ⁻¹)	-8.68 10⁻⁶	-3.03 10⁻⁷	9.66 10⁻⁷
	[-1.10 10 ⁻⁵ , -6.36 10 ⁻⁶]	[-5.8 10 ⁻⁷ , -2.5 10 ⁻⁸]	[5.05 10 ⁻⁷ , 1.43 10 ⁻⁶]
C : 2^e degré (V. mGal ⁻¹ . °C ⁻²)	1.13 10⁻⁶	6.03 10⁻⁸	-1.23 10⁻⁷
	[8.46 10 ⁻⁷ , 1.42 10 ⁻⁶]	[1.37 10 ⁻⁸ , 1.07 10 ⁻⁷]	[-1.77 10 ⁻⁷ , -6.94 10 ⁻⁸]
D : 3^e degré (V. mGal ⁻¹ . °C ⁻³)	-6.45 10⁻⁸	-4.68^e 10⁻⁹	6.85 10⁻⁹
	[-7.99 10 ⁻⁸ , -4.92 10 ⁻⁸]	[-7.94 10 ⁻⁹ , -1.41 10 ⁻⁹]	[4.10 10 ⁻⁹ , 9.60 10 ⁻⁹]
E : 4^e degré (V. mGal ⁻¹ . °C ⁻⁴)	1.36 10⁻⁹	1.25 10⁻¹⁰	-1.39 10⁻¹⁰
	[1.05 10 ⁻⁹ , 1.66 10 ⁻⁹]	[4.33 10 ⁻¹¹ , 2.07 10 ⁻¹⁰]	[-1.91 10 ⁻¹⁰ , -8.74 10 ⁻¹¹]
Coefficient R²	<u>98.73%</u>	<u>90.45%</u>	<u>91.36%</u>
Taille de l'échantillon	14	15	14

Tableau 14: Coefficients du modèle mathématique, pour les facteurs d'échelle - seuil de confiance 95%

	Po_x	Po_y	Po_z
A : Constante (V)	-21.80	2.87 10⁻¹	3.30
	[-30.70, -12.80]	[-2.78, 3.35]	[2.29, 4.3]
B : 1^{er} degré (V. °C ⁻¹)	8.35	4.79 10⁻¹	-5.40 10⁻¹
	[5.39, 11.30]	[-5.43 10 ⁻¹ , 1.50]	[-8.56 10 ⁻¹ , -2.24 10 ⁻¹]
C : 2^e degré (V. °C ⁻²)	-1.11	-6.99 10⁻²	7.15 10⁻²
	[-1.47, -7.45 10 ⁻¹]	[-1.96 10 ⁻¹ , 5.65 10 ⁻²]	[3.47 10 ⁻² , 1.08 10 ⁻¹]
D : 3^e degré (V. °C ⁻³)	6.43 10⁻²	4.27 10⁻³	-4.07 10⁻³
	[4.48 10 ⁻² , 8.38 10 ⁻²]	[-2.6 10 ⁻³ , 1.11 10 ⁻²]	[5.94 10 ⁻³ , -2.20 10 ⁻³]
E : 4^e degré (V. °C ⁻⁴)	-1.38 10⁻³	-9.12 10⁻⁵	8.32 10⁻⁵
	[-1.76 10 ⁻³ , -9.88 10 ⁻⁴]	[-2.3 10 ⁻⁴ , 4.71 10 ⁻⁵]	[4.81 10 ⁻⁵ , 1.18 10 ⁻⁴]
Coefficient R²	<u>99.15%</u>	<u>99.48%</u>	<u>98.71%</u>
Taille de l'échantillon	13	13	13

Tableau 15: Coefficients du modèle mathématique, pour les biais - seuil de confiance 95%

	τ_{yz}	τ_{zy}	τ_{yy}	τ_{zx}	τ_{zz}
A : Constante	10.9	-2.02	0.825	2.30	1.02
	[8.08, 13.7]	[-2.85, -1.18]	[6.72 10 ⁻¹ , 9.77 10 ⁻¹]	[9.19 10 ⁻¹ , 3.68]	[9.96 10 ⁻¹ , 1.04]
B : 1^{er} degré (°C⁻¹)	-3.61	6.45 10⁻¹	6.34 10⁻²	-7.51 10⁻¹	-6.45 10⁻³
	[-4.51, -2.72]	[3.79 10 ⁻¹ , 9.11 10 ⁻¹]	[1.13 10 ⁻² , 1.16 10 ⁻¹]	[-1.22, -2.80 10 ⁻¹]	[-1.44 10 ⁻² , 1.55 10 ⁻³]
C : 2^e degré (°C⁻²)	4.48 10⁻¹	-7.61 10⁻²	-8.61 10⁻³	9.16 10⁻²	7.26 10⁻⁴
	[3.42 10 ⁻¹ , 5.54 10 ⁻¹]	[-1.08 10 ⁻¹ , -4.47 10 ⁻²]	[-1.52 10 ⁻² , -1.99 10 ⁻³]	[3.19 10 ⁻² , 1.51 10 ⁻¹]	[-2.35 10 ⁻⁴ , 1.69 10 ⁻³]
D : 3^e degré (°C⁻³)	-2.44 10⁻²	3.92 10⁻³	5.10 10⁻⁴	-4.87 10⁻³	-3.54 10⁻⁵
	[-2.99 10 ⁻² , -1.89 10 ⁻²]	[2.28 10 ⁻³ , 5.55 10 ⁻³]	[1.40 10 ⁻⁴ , 8.80 10 ⁻⁴]	[-8.22 10 ⁻³ , -1.52 10 ⁻³]	[-8.61 10 ⁻⁵ , 1.53 10 ⁻⁵]
E : 4^e degré (°C⁻⁴)	4.93 10⁻⁴	-7.4 10⁻⁵	-1.11 10⁻⁵	9.45 10⁻⁵	6.31 10⁻⁷
	[3.86 10 ⁻⁴ , 5.99 10 ⁻⁴]	[-1.06 10 ⁻⁴ , -4.25 10 ⁻⁵]	[-1.88 10 ⁻⁵ , -3.43 10 ⁻⁶]	[2.45 10 ⁻⁵ , 1.64 10 ⁻⁴]	[-3.57 10 ⁻⁷ , 1.62 10 ⁻⁶]
Coefficient R²	<u>99.35%</u>	<u>89.85%</u>	<u>97.77%</u>	<u>98.81%</u>	<u>79.71%</u>
Taille échantillon	13	16	15	13	9

Tableau 16: Coefficients du modèle mathématique, pour les coefficients de la matrice de transformation – seuil de confiance 95%

Hormis pour τ_{zz} , nous arrivons à avoir des polynômes de degré 4 qui expliquent la quasi-totalité de la variabilité des valeurs des paramètres internes. Pour τ_{zz} nous utilisons seulement la moitié des mesures à disposition si on souhaite que le test chi-deux passe, il se peut que ce paramètre ne soit pas tout à fait compatible avec le polynôme de degré 4.

L'Annexe 8 présente les graphes d'évolution des paramètres internes en fonction de la température.

Conclusion

Cette étude a atteint la plupart des objectifs fixés au départ. Elle nous a permis dans un premier temps d'étalonner le capteur de température de la sphère, et de trouver les relations qui permettent de convertir les tensions électriques délivrées par les capteurs de température internes en valeurs de température. Nous avons pu dans un second temps valider les missions d'ajustement effectuées, en faisant une étude de la stabilité thermique des mesures accélérométriques dans une chambre climatique qui permet d'imposer des profils de température précis. Sur les paliers de température on a pu observer une décroissance linéaire des mesures accélérométriques due à une variation de température. Néanmoins cette variation peut être négligée au vu de la précision attendue. Comme perspective, il pourrait être envisagé de déterminer des modèles de correction des accélérations de l'effet de la température, pour affiner les corrections thermiques des accélérations avant de procéder à l'ajustement des paramètres. Dans un troisième temps nous avons estimé les 11 paramètres internes pour diverses températures et, à partir de ces valeurs, nous avons établi leur loi de dépendance thermique. Ces lois ont été validées par des tests statistiques.

A partir d'un fichier brut de sortie du système, nous pouvons maintenant utiliser pour chaque accéléromètre la loi d'ajustement pour convertir sa tension en température, puis en fonction de cette température calculer les paramètres internes et ensuite déduire la valeur de l'accélération. Nous pouvons également fusionner les deux modèles pour avoir un seul modélisant les valeurs des paramètres internes en fonction de la tension. Ces résultats seront ensuite utilisés comme données d'entrée dans le processus de traitement mis en place par [ROUSSEL 2017], et appliquer sur les mesures en mer, pour obtenir la variation de l'accélération de pesanteur le long des profils de mesure. Malheureusement, nous n'avons pas de mesures de référence sur nos deux profils mesurés en Méditerranée en mars dernier, pour pouvoir faire une comparaison. Mais il est possible d'utiliser nos mesures, comme une référence pour un prochain essai sur les mêmes profils.

Le processus de traitement était sujet aux erreurs, puisqu'il y a beaucoup de saisies manuelles pour lesquelles il est très facile de se tromper. C'est d'autant plus gênant, parce qu'il est difficile de reconnaître directement les erreurs commises. Mais l'attention apportée lors de l'étude, notamment la prise de note des détails pendant les manipulations, et les contrôles multiples lors des traitements, a permis de détecter et éviter les sources potentielles de quelques erreurs, et ainsi d'avoir de bons résultats à la fin comme le montre ce mémoire. En effet nous avons réussi à avoir des résultats cohérents avec la documentation technique

donnée par le constructeur, et ce avec de très bons coefficients de détermination pour les régressions avec un coefficient supérieur à 95% pour 7 paramètres sur 11 ou compris entre 80% et 90% pour les 4 restants.

Toutefois, nous proposons quelques suggestions de modification sur le processus d'ajustement pour améliorer les résultats :

Actuellement, les mesures de GraviMob2 se font en continu dès qu'il est mis sous tension. Ce mode de fonctionnement génère de grands fichiers, qu'il faut par la suite découper et/ou fusionner, et ce qui demande de noter en continu les heures de début et de fin des mesures. Ceci fait perdre beaucoup de temps, et surtout peut causer des erreurs. Par exemple, pour extraire les mesures de chaque palier de cinq minutes d'un fichier source, il faut renseigner à chaque fois la date de début de l'enregistrement, qui sera la référence t_0 , et puis la date de début et de fin du palier. Si on se trompe sur la valeur t_0 en ajoutant deux minutes par exemple, ceci va décaler tous les paliers de ce fichier par deux minutes, et on risque donc d'avoir des paliers de mesures qui ne correspondent pas du tout à ce que nous souhaitons. Il serait donc préférable d'avoir la possibilité d'arrêter l'enregistrement même si le système est en marche, et de le relancer quand on le souhaite.

Pour faire l'ajustement, on doit positionner le système dans différentes orientations. Quand le système est embarqué dans le sous-marin, on utilise les données de la centrale inertielle de ce dernier, mais lors de l'ajustement dans l'enceinte climatique, nous n'avons plus cette information sur les orientations. Avoir sur le système un inclinomètre avec un écran affichant les inclinaisons, pourra aider pendant la mission d'ajustement. Pour ces missions nous avons utilisé un inclinomètre sur un téléphone portable, mais vu qu'il n'est pas fixé sur la plaque solidaire du capteur, il peut bouger et engendrer des erreurs de mesure. En outre, pendant ce temps, la porte de l'enceinte climatique est ouverte, et plus elle reste ouverte, plus on devra attendre la stabilisation de la température après sa fermeture. Il serait plus pratique de noter les valeurs d'inclinaisons affichées puis fermer la porte directement, que de prendre la mesure avec le téléphone sur chaque axe, la noter, et puis fermer.

Pour l'utilisation de l'enceinte climatique, le deuxième protocole d'ajustement, expliqué auparavant dans cette étude, était plus rapide à mettre en œuvre, et plus efficace. Lors des derniers traitements de régression, les températures associées à de grands résidus normés, correspondent à celles où les mesures étaient faites après une ouverture/fermeture de la porte, à savoir 4°C et 18°C pour le premier protocole, ainsi que des températures de début ou de fin des séries des mesures, pour la série de mesure entre 9°C et 13.5°C, lors de la première mission, et la série de mesure entre 13.9°C et 15.1°C lors de la deuxième mission.

On pourra envisager de faire une autre mission d'ajustement en utilisant seulement le deuxième protocole, et parcourir un large intervalle, de 4°C à 21°C par exemple, en incrémentant de 0.5 degré, ceci pourra donner de meilleurs résultats. Dans notre étude, nous avons parcouru le même intervalle de température, mais pour deux missions séparées par deux mois, avec deux protocoles différents, et une utilisation différente de l'enceinte climatique, manuelle au début, et puis automatique par la suite. Les mesures ne sont donc pas effectuées dans les mêmes conditions, ce qui pourrait expliquer en partie les différents résultats.

Durant cette étude on a pu implémenter plusieurs programmes permettant d'automatiser le processus de traitement. Il faudra continuer dans ce sens pour diminuer la durée des traitements et limiter les sources d'erreurs.

Ce travail de fin d'études fut une expérience enrichissante, qui m'apportera beaucoup pour mon avenir professionnel. C'est un sujet très intéressant et très varié, qui demande des compétences pluridisciplinaires. Il nécessite des notions de géodésie, de physique, de mathématiques et des compétences en informatique et en instrumentation. Il demande également une bonne organisation pour la gestion des données, car on peut très vite se perdre entre tous les fichiers. En effet, l'étude portait sur deux triades d'accéléromètres, pour chacune 11 paramètres internes. Pour chaque température, la valeur des paramètres est calculée à partir des mesures sur 14 paliers, comptant chacun 600 mesures, et ce, pour 19 températures.

Ce travail a renforcé mon esprit critique, quant au fonctionnement des instruments de mesure, et plus généralement m'a rappelé l'importance d'être conscient de l'influence des facteurs externes sur les mesures. D'une part, le fait que l'instrument de mesure utilisé soit en développement, change de l'habitude d'avoir un instrument avec une notice d'utilisation fiable. Ici, on pouvait tout remettre en question, et c'est à nous de comprendre le fonctionnement du système, et de fournir les informations nécessaires à une bonne utilisation. D'autre part, la grandeur physique étudiée, l'accélération de pesanteur, dépend de plusieurs facteurs, la latitude, l'altitude, la topographie locale (montagnes, grands bâtiments...), la température et la dérive temporelle des accéléromètres etc. Enfin, l'objectif de ce TFE dans notre cursus universitaire est de pouvoir avoir une expérience de recherche scientifique et de l'avoir réalisé dans un laboratoire de recherche (GeF) a été une réelle chance pour profiter pleinement de cette expérience, et savourer, même un petit peu, le quotidien d'un chercheur.

Bibliographie

Ouvrages :

- DONALD L. TURCOTTE et G. SCHUBERT (1982), *Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems*, Wiley.
- J. SEGAWA, H. FUJIMOTO, S. Okubo (1996), *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, Springer.
- SHAPIRO, S., & WILK, M. (1965). *An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)*. *Biometrika*, 52(3/4), 591-611. doi:10.2307/2333709

Thèses :

- B. DE SAINT-JEAN, « Étude et développement d'un système de gravimétrie mobile », Observatoire de Paris, 2008
- C. ROUSSEL, « Expérimentation d'un gravimètre mobile léger et novateur pour la Mesure du champ de gravité en fond de mer », Laboratoire Géomatique et Foncier, 2017

Articles :

- P. BERTUZZI, L. BRUCKLER, C. GROS. « Régression linéaire avec erreur sur les variables : application à l'étalonnage d'un gammadensimètre à transmission et d'un humidimètre à neutrons ». *Agronomie*, EDP Sciences, 1987, 7 (7), pp.507-515. Hal-00885020
- R. RAKOTOMALALA, « Tests de normalité – Techniques empiriques et tests statistiques », Version 2.0, 2008.

Sites internet :

- BINDER, « Chambre d'essais climatiques avec plage étendue de basses températures MKT 720 », [en ligne]. Disponible sur : <https://www.binder-world.com/fr/produits/chambres-d%E2%80%99essais-climatiques/serie-mkt/mkt-720> (consulté en mai 2021)
- CNES, « Grace – la surveillance gravitationnelle de notre planète sur la durée », [en ligne]. Disponible sur : <https://grace.cnes.fr/fr/> (consulté en mars 2021)
- D. EUDARIC, « L'ACCÉLÉROMÈTRE », [en ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=QUEH9ZUrxEU> (consulté en mars 2021)

- ESA, « GOCE gravity mission back in action », [en ligne]. Disponible sur : http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/GOCE/GOCE_gravity_mission_back_in_action (consulté en mars 2021)
- « Estimation, intervalles de confiance de la moyenne d'une loi normale », Université de Poitiers, 2008, [en ligne]. Disponible sur : <http://www.mathlabo.univ-poitiers.fr/~phan/downloads/enseignement/2m13tp.pdf> (consulté en août 2021)
- « Régression linéaire », Université Paris Ouest Nanterre La Défense, [en ligne]. Disponible sur : <http://fermin.perso.math.cnrs.fr/Files/Chap3.pdf> (consulté en août 2021)

Support de présentation :

- A. RÜLKE et al., 2019. « The International Gravity Reference System », Buenos Aires, Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG), 22 p. [Diffusé le 17/09/2019]

Liste des annexes

Annexe 1 : Caractéristiques des accéléromètres Q-Flex QA3000 – Source : Honeywell.....	61
Annexe 2 : Exemple extrait du carnet de notes pour la température $T_2 = 18\text{ °C}$ pendant la première mission d'ajustement qui eu lieu du 6 au 9 mars 2021	63
Annexe 3 : Etalonnage des capteurs de température internes de la sphère - nuit 3. La colonne grisée représente les températures de la chambre climatique	65
Annexe 4 : Fiche technique de la chambre climatique MKT 720 (dernière colonne).....	66
Annexe 5 : Formules utilisées pour la régression linéaire en prenant en compte les erreurs de mesure	68
Annexe 6 : Résultats des tests de dépendance de la température effectués par le constructeur – Exemple : Accéléromètre 643.....	69
Annexe 7 : Fiche descriptive du serveur de calcul du laboratoire.....	70
Annexe 8 : Evolution des paramètres $k_y, k_z, p_{ox}, p_{oy}, p_{oz}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{yy}, \tau_{zx}, \tau_{zz}$ en fonction de la température	71

Q-FLEX QA-3000 ACCELEROMETER

I A cut above the rest

For the highest inertial navigation-grade performance available in today's market, Honeywell offers the QA-3000. In the same form factor as the QA-2000, Honeywell packs a lot of performance and value into this small package. Produced on the same manufacturing line as the QA-2000, the QA-3000 has the same inherent quality and reliability customers have come to know from Honeywell Q-flex accelerometers.

As with the entire Q-Flex family of accelerometers, the QA-3000 features a patented Q-Flex etched-quartz-flexure seismic system. An amorphous quartz proof-mass structure provides excellent bias, scale factor and axis alignment repeatability.

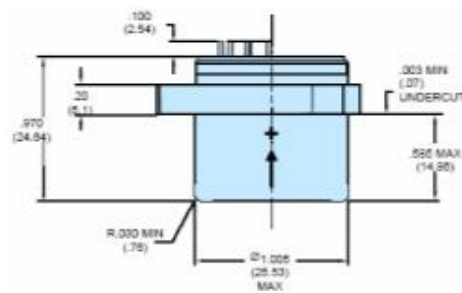
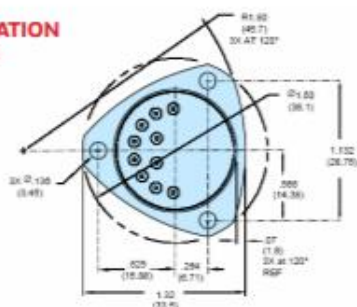
The integral electronics develops an acceleration-proportional output current providing both static and dynamic acceleration measurement. By use of customer supplied output load resistor, appropriately scaled for the acceleration range of the application, the output current can be converted into a voltage.

The QA-3000 also includes a current-output, internal temperature sensor. By applying temperature-compensating algorithms, bias, scale factor and axis misalignment performance are dramatically improved. The QA-3000 has three performance grades to best meet customer's performance requirements.

FEATURES

- Excellent turn-on repeatability performance
- Form, fit, function compatible with QA-2000, easy to upgrade for the most performance demanding applications
- Remarkably low bias and scale factor repeatability
- Environmentally rugged
- Analog output
- Field-adjustable range
- Three fastener precision mounting flange
- Internal temperature sensor for thermal compensation
- Dual built-in self-test

CONFIGURATION DRAWINGS



Q-Flex QA-3000



Honeywell

PERFORMANCE CHARACTERISTICS			
Performance	QA3000-030	QA3000-020	QA3000-010
Input Range	±60 g	±60 g	±60 g
Bias	<4 mg	<4 mg	<4 mg
- One-year Composite Repeatability	<40 µg	<80 µg	<125 µg
- Temperature Sensitivity	<15 µg/°C	<15 µg/°C	<25 µg/°C
Scale Factor	1.20 to 1.46 mA/g	1.20 to 1.46 mA/g	1.20 to 1.46 mA/g
- One-year Composite Repeatability	<80 ppm	<160 ppm	<250 ppm
- Temperature Sensitivity	<120 ppm/°C	<120 ppm/°C	<120 ppm/°C
Axis Misalignment	<1000 µrad	<1000 µrad	<1500 µrad
- One-year Composite Repeatability	<70 µrad	<80 µrad	<100 µrad
Vibration Rectification	<10 µg/g ² rms (50-500 Hz) <35 µg/g ² rms (500-2000 Hz)	<15 µg/g ² rms (50-500 Hz) <40 µg/g ² rms (500-2000 Hz)	<20 µg/g ² rms (50-500 Hz) <50 µg/g ² rms (500-2000 Hz)
Intrinsic Noise	<7 µg-rms (0-10 Hz) <70 µg-rms (10-500 Hz) <1500 µg-rms (500-10,000 Hz)	<7 µg-rms (0-10 Hz) <70 µg-rms (10-500 Hz) <1500 µg-rms (500-10,000 Hz)	<7 µg-rms (0-10 Hz) <70 µg-rms (10-500 Hz) <1500 µg-rms (500-10,000 Hz)
Environment	QA3000-030	QA3000-020	QA3000-010
Operating Temperature Range	-28 to +78 °C	-55 to +95 °C	-55 to +95 °C
Shock	100 g	150 g	150 g
Vibration Peak Sine	15 g @ 20-2000 Hz	15 g @ 20-2000 Hz	15 g @ 20-2000 Hz
Resolution/Threshold	<1 µg	<1 µg	<1 µg
Bandwidth	>300 Hz	>300 Hz	>300 Hz
Thermal Modeling	QA3000-030	QA3000-020	QA3000-010
	Yes	Yes	Yes
Electrical	QA3000-030	QA3000-020	QA3000-010
Quiescent Current per Supply	<16 mA	<16 mA	<16 mA
Quiescent Power	<480 mW @ ±15 VDC	<480 mW @ ±15 VDC	<480 mW @ ±15 VDC
Electrical Interface	Temp Sensor Voltage Self Test Current Self Test Power / Signal Ground -10 VDC Output +10 VDC Output	Temp Sensor Voltage Self Test Current Self Test Power / Signal Ground -10 VDC Output +10 VDC Output	Temp Sensor Voltage Self Test Current Self Test Power / Signal Ground -10 VDC Output +10 VDC Output
Input Voltage	±13 to ±28 VDC	±13 to ±28 VDC	±13 to ±28 VDC
Physical	QA3000-030	QA3000-020	QA3000-010
Weight	71 ±4 grams	71 ±4 grams	71 ±4 grams
Diameter below mounting surface	Ø1.005 in. Max	Ø1.005 in. Max	Ø1.005 in. Max
Height bottom to mounting surface	.585 in. Max	.585 in. Max	.585 in. Max
Case Material	300 Series Stainless Steel	300 Series Stainless Steel	300 Series Stainless Steel

Additional product specifications, outline drawings and block diagrams, and test data are available on request.

For More Information
aerospace.honeywell.com

Honeywell International, Inc.
Defense and Space Electronic
Systems Redmond
15001 N.E. 36th Street
Redmond, Washington 98073-9701
PHONE: 888 206 1667
FAX: 425 883 2104
aerospace.honeywell.com

ISO-9001 CERTIFICATION SINCE 1995

DISCLAIMER: Specifications are subject to change without notice. Honeywell reserves the right to make changes to any product or technology herein to improve reliability, function or design. Honeywell does not assume any liability arising out of the application or use of the product.

Accelerometers exported from the United States must be done in accordance with the Export Administration Regulations (EAR) and/or the International Traffic in Arms Regulations (ITAR) as applicable.

961-3509-000-000 | 08/2020
© 2020 Honeywell International Inc.

**THE
FUTURE
IS
WHAT
WE
MAKE IT**

Honeywell

Annexe 2: Exemple extrait du carnet de notes pour la température T2 = 18 °C pendant la première mission d'ajustement qui eu lieu du 6 au 9 mars 2021

$M_i^2(\alpha_{44}, \alpha_{45}, \alpha_{43})$	Fermeture chambre	Ouverture chambre	Remarques
$M_0^2(1,0,-1)$	9h31(8h47)	9h36	Il faut attendre 1h avec la chambre allumée, avant de commencer. (8h31-9h31)
Inclinaison finale (1,2,-1) (contrôle)			
$M_1^2(3,3,-5)$	9h36	9h47	9h41 la température est stable à 18°[+0.1], autrement dit il fallait 5 minutes après la fermeture, pour que la chambre revient à la température consigne.
(3,2,-5)			
$M_2^2(7,6,-11)$	9h48	9h58	L'IHM ne fonctionnait pas, car le câble se débranchait, mais Power était On. Problème résolu à 10h09m. à 10h30 la chambre reprend 18°. (20minutes d'attente)
(7,7,-11)			
$M_3^2(12,8,-14)$	10h11m20	10h36m10	10h31m10 la chambre stable à 18°. (20minutes d'attente)
(11,7,-15)			
$M_4^2(4,-5,2)$	10h38	10h45	
(6,-4,1)			
$M_5^2(4,-11,12)$	10h46m15	10h52m00	10h50m, T stable à 18. (Donc mesure de 2min seulement en 18)
$M_6^2(-6,-15,17)$	10h53	10h57m30	Problème saturation, j'ai ouvert fermé plusieurs fois.
	10h58m40	11h02	A 11h10, j'ai mis à inclinaison 0,0,0 mais le sys saturait.
$M_7^2(-1,1,0)$	11h07m30	11h30	Bulle. Saturation.
Changement d'angle de rotation à α_{45}			
$M_i^2(\alpha_{44}, \alpha_{45}, \alpha_{43})$	Fermeture chambre	Ouverture chambre	Remarques
$M_8^2(11,-14,8)$	11h42m50	12h08	11h54m30 Gravimob OFF, 12h05 ON, pour voir si le pb de la Vréf va être réglé.
(4,-2,-8)			
$M_9^2(7,-7,3)$	12h49	14h16	
(0,1,-1) (j'ai mis à H avant)			
$M_{10}^2(-4,3,-1)$	14h17m40	14h30m30	14h22m T stable à 18. (5min attente)
(-4,5,-2)			
$M_{11}^2(-6,6,-2)$	14h37	-	14h39 Gravi OFF, vérifier les fils/branchement.
$M_{11bis}^2(-6,6,-2)$	15h08		
(-6,9,-4)			
$M_{12}^2(-9,13,-6)$	15h18m	15h27m00	15h22m T à 18°.
(-7,12,-7)			
$M_{13}^2(1,-2,1)$	15h28m30	15h37m10	15h32m T à 18.
(2,-1,1)			
$M_{14}^2(5,-9,4)$	15h38m20	15h46m15	
(7,-9,5)			
$M_{15}^2(11,-14,7)$	15h47m	15h56m	~ M_8^2 , 15h51 T à 18

(12,-13,5)			
Changement d'angle de rotation à α_{44}			
$M_i^2(\alpha_{44}, \alpha_{45}, \alpha_{43})$	Fermeture chambre	Ouverture chambre	Remarques
$M_{16}^2(-13,0,8)$	15h57m45	16h08m10	16h03 T à 18.
(-14,0,8)			
$M_{17}^2(-6,-2,5)$	16h09m20	16h17m50	16h12 T à 18.
(-6,-1,4)			
$M_{18}^2(-3,-1,2)$	16h18m50	16h44m30	20min d'attente pour T à 18.
(-2,-2,3)			
$M_{19}^2(5,-2,-1)$	16h45m30	16h55m15	16h50 T à 18.
(6,-3,-1)			
$M_{20}^2(10,-5,-3)$	16h56m10	17h05m00	17h00 T à 18
(10,-2,-3)			
$M_{21}^2(12,-4,-4)$	17h06m05	17h14m10	17h9m T à 18.
(14,-3,-6)			
$M_{22}^2(3,-2,0)$	17h15m30	17h23m30	17h18 T à 18.
(4,-3,1)			
$M_{23}^2(-1,-2,-2)$	17h24m40	17h48m50	17h43 T à 18 (20min d'attente)
(1,-1,1)			

Problème :

- La tension Vréf est figée à 3.584 depuis 10h. Hier Elle était vers 3.3V, et fluctuait un peu sur l'IHM.
- L'ouverture de la chambre influe beaucoup sur la durée d'acquisition, le temps d'attente entre la fermeture de la porte, et que la température se stabilise à 18, était en moyenne de 5min, et 20min parfois.

Solutions :

- Eteindre GRAVIMOB pour 10min et relancer. Bouger les fils de branchement ou cas où c'est dû à un contact. Problème non résolu
- Pour les températures T3 à T7 (15.1° à 13.9°), et pour éviter de trop ouvrir la chambre
 - o je vais fixer plutôt l'orientation, et je vais varier la température. Ainsi j'aurai 5 mesures sans ouvrir la chambre.
 - o Ouvrir la chambre, changer orientation, et puis refaire pour les 5 températures.
 - o Si le temps de passage entre les températures est moins important, je continuerai ainsi.

Annexe 3: Etalonnage des capteurs de température internes de la sphère - nuit 3. La colonne grisée représente les températures de la chambre climatique

Nuit3						
T_ch(°C)	T_643(V)	T_644(V)	T_645(V)	T_646(V)	T_647(V)	T_648(V)
19	2.867948	2.912454	2.878187	2.903839	2.930841	2.940647
18.5	2.862181	2.906763	2.872446	2.900493	2.927605	2.937492
18	2.856878	2.901514	2.867130	2.895930	2.923063	2.932967
17.5	2.851872	2.896524	2.862118	2.891077	2.918172	2.928054
17	2.847039	2.891745	2.857252	2.886162	2.913193	2.923080
16.5	2.842103	2.886870	2.852354	2.881203	2.908214	2.918032
16	2.837057	2.881830	2.847281	2.876277	2.903243	2.913032
15.5	2.832246	2.877069	2.842434	2.871374	2.898256	2.908069
15	2.827339	2.872204	2.837530	2.866441	2.893300	2.903089
14.5	2.822514	2.867418	2.832675	2.861516	2.888326	2.898099
14	2.817532	2.862479	2.827691	2.856529	2.883283	2.893037
13.5	2.812719	2.857671	2.822858	2.851581	2.878290	2.888014
13	2.807703	2.852699	2.817859	2.846615	2.873292	2.882999
12.5	2.802799	2.847833	2.812916	2.841638	2.868261	2.877969
12	2.797922	2.842988	2.807999	2.836682	2.863264	2.872911
11.5	2.793022	2.838118	2.803095	2.831733	2.858286	2.867909
11	2.788012	2.833149	2.798125	2.826728	2.853237	2.862854
10.5	2.783154	2.828338	2.793255	2.821821	2.848277	2.857881
10	2.778213	2.823456	2.788266	2.816858	2.843271	2.852859
9.5	2.773360	2.818641	2.783463	2.811857	2.838221	2.847785
9	2.768236	2.813536	2.778310	2.806896	2.833212	2.842760
8.5	2.763518	2.808866	2.773542	2.801986	2.828254	2.837787
08	2.758438	2.803801	2.768496	2.797044	2.823294	2.832797
7.5	2.753784	2.799176	2.763767	2.792137	2.818332	2.827834
7	2.748806	2.794224	2.758812	2.787168	2.813315	2.822798
6.5	2.743802	2.789278	2.753816	2.782210	2.808311	2.817778
6	2.738947	2.784480	2.748908	2.777321	2.803379	2.812825
5.5	2.734129	2.779728	2.744089	2.772428	2.798441	2.807867
5	2.729135	2.774733	2.739079	2.767447	2.793416	2.802835
4.5	2.724083	2.769729	2.734063	2.762501	2.788418	2.797846
4	2.719299	2.764946	2.729243	2.757570	2.783458	2.792835

Annexe 4 : Fiche technique de la chambre climatique MKT 720 (dernière colonne)

19.5 Données techniques MKT (E3.1)


Dimension		115	240	720
Dimensions extérieures				
Largeur (18 mm inclus pour 1 port d'accès (MKT 115, MKT 240), 36 mm inclus pour 2 ports d'accès (MKT 720), avec bouchon)	mm	1000	1135	1615
Hauteur (roues inclus)	mm	1725	1940	2005
Profondeur (câbles et poignée de porte inclus)	mm	915	1000	1230
Profondeur (câbles et poignée de porte inclus) avec l'option séchoir à air comprimé	mm	1085	1170	1400
Profondeur (câbles et poignée de porte inclus) avec convertisseur de tension et de fréquence	mm	1530	1615	1845
Ecart de mur en arrière	mm	300	300	300
Ecart de mur en arrière avec l'option séchoir à air comprimé ou pour l'installation du convertisseur de tension et de fréquence	mm	1000	1000	1000
Ecart de mur latéral	mm	200	200	200
Largeur de fenêtre	mm	288	508	508
Hauteur de fenêtre	mm	222	300	300
Nombre de portes	pièce	1	1	1
Dimensions intérieures				
Largeur	mm	600	735	1200
Hauteur	mm	480	700	1020
Profondeur	mm	400	443	600
Volume chambre intérieure	l	115	228	734
Nombre de clayettes (régulier/max.)	pièce	1/4	1/6	1/11
Charge max. par clayette	kg	30	30	40
Charge total max. admissible	kg	60	70	160
Données de température				
Plage de température	°C	-70 à +180	-70 à +180	-70 à +180
Dérive/temps 2)	± K	0,1 à 0,6	0,1 à 0,4	0,1 à 0,5
Homogénéité spatiale 2)	± K	0,2 à 1,8	0,1 à 1,0	0,3 à 2,0
Vitesse moyenne d'échauffement selon la norme IEC 60068-3-5 3)	K/min.	5,3	5,0	4,5
Vitesse moyenne de refroidissement selon la norme IEC 60068-3-5	K/min.	4,2	4,2	4,2
Compensation max. de chaleur jusqu'à 25 °C	W	1800	3000	5500
Données électriques				
IP type de protection selon la norme EN 60529		20	20	20
Tension nominale (+/-10%) 50 Hz	V	400 3N~	400 3N~	400 3N~
Puissance nominale	kW	5,50	6,50	13,00
Consommation d'énergie à +20 °C	Wh/h	800	1400	2200
Fiche de secteur		Fiche CEE à 5 pôles, 16 A	Fiche CEE à 5 pôles, 16 A	Fiche CEE à 5 pôles, 32 A
Catégorie de surs tension selon IEC 61010-1		II	II	II
Degré de pollution selon IEC 61010-1		2	2	2
Coupe-circuit automatique catégorie B		16 A, 3x intérieur	16 A, 3x intérieur	25 A, 3x intérieur

Dimension		115	240	720
Données électriques du convertisseur de tension et de fréquence				
Système IP de protection selon EN 60529	IP	23	23	23
Tension nominale (+/-10%) 60 Hz (côté entrée)	V	480 3N~	480 3N~	480 3N~
Puissance nominale	kW	9	9	13
Catégorie de surtension selon IEC 61010-1		II	II	II
Degré de pollution selon IEC 61010-1		2	2	2
Fusible	A	16	16	25
D'autres informations				
Poids appareil vide	kg	305	380	610
Poids appareil vide avec l'option séchoir à air comprimé	kg	320	395	625
Poids de remplissage du réfrigérant R 404a (réfrigération 1 ^{er} étage, GWP 3750)	kg	1,60	2,20	5,00
Poids de remplissage du réfrigérant R23 (réfrigération 2 ^e étage)	kg	0,32	0,38	0,87
Niveau sonore	env. dB(A)	64	64	65
Niveau sonore avec l'option séchoir à air comprimé (de courte durée)	env. dB(A)	85	85	85
Niveau sonore avec convertisseur de tension et de fréquence	env. dB(A)	67	67	67

- 1) Les valeurs basses sont valables à une température ambiante jusqu'à 25 °C max.
- 2) Dépendant de la valeur de consigne
- 3) Appareils avec convertisseur de tension et de fréquence: Chaque valeur est réduite par 0,3 K/min.

Toutes les caractéristiques techniques sont valables uniquement pour les modèles standards vides à une température ambiante de +25 C et avec une variation de la tension du secteur de +/-10%. Les données de température sont déterminées conformément au standard d'usine BINDER sur le modèle de la norme DIN 12880, et s'orientent sur les distances de mur recommandés de 10% de la hauteur, largeur et profondeur de la chambre intérieure.

Toutes les indications sont des valeurs moyennes typiques pour les appareils produits en série. Tous droits de modifications techniques réservés.

	Si vous chargez l'appareil à capacité totale, des écarts des vitesses de chauffage et de refroidissement par rapport aux valeurs données sont possibles du fait de la charge.
-------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Annexe 5: Formules utilisées pour la régression linéaire en prenant en compte les erreurs de mesure

TABLEAU 3
Expressions algébriques des estimateurs « non biaisés » de la régression linéaire.
Algebraic formulae of the "unbiased" estimators of the linear regression.

Estimateurs non biaisés à l'ordre 1	(Cas ; $\hat{x} = x + u$, $\hat{y} = y + v$, avec $V(u)$ et $V(v)$ supposées connues)		
Pente	$\hat{\beta} = \frac{s(\hat{x}, \hat{y})}{s^2(\hat{x}) - \frac{m-3}{m-1} V(u)}$		
Ordonnée à l'origine	$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x}$	$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{x}_i$,	$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{y}_i$
Variance résiduelle	$s^2(e) = \frac{m-1}{m-2} [s^2(\hat{y}) - \hat{\beta}^2 s^2(\hat{x})] + \frac{V(u)}{m-2} \left[\frac{s^2(\hat{y})}{s^2(\hat{x})} + (m-5) \hat{\beta}^2 \right] - V(v)$		
Variance de la pente	$s^2(\hat{\beta}) = \frac{1}{m-2} \left[\frac{s^2(\hat{y})}{s^2(\hat{x}) - \frac{m-5}{m-1} V(u)} - \hat{\beta}^2 \right] + \frac{1}{(m-2)^2} \cdot \frac{V(u)}{s^2(\hat{x})} \cdot \left[(m-6) \frac{s^2(\hat{y})}{s^2(\hat{x})} + 4 \hat{\beta}^2 \right]$		
Variance de l'ordonnée à l'origine	$s^2(\hat{\alpha}) = \frac{m-1}{m(m-2)} [s^2(\hat{y}) - \hat{\beta}^2 s^2(\hat{x})] + \frac{\bar{x}^2}{(m-2)} \left[\frac{s^2(\hat{y})}{s^2(\hat{x}) - \frac{m-5}{m-1} V(u)} - \hat{\beta}^2 \right] + \frac{V(u)}{m-2} \left[\frac{2(m-3)}{m} \hat{\beta}^2 + \frac{1}{m-2} \frac{\bar{x}^2}{s^2(\hat{x})} \left(4 \hat{\beta}^2 + (m-6) \frac{s^2(\hat{y})}{s^2(\hat{x})} \right) \right]$		
Covariance pente-ordonnée	$s(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = -\bar{x} s^2(\hat{\beta})$		
Variance de l'erreur de prédiction	$s^2(\hat{y}_0 - y_0) = \hat{x}_0^2 s^2(\hat{\beta}) + 2 \hat{x}_0 s(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) + s^2(\hat{\alpha}) + [\hat{\beta}^2 - s^2(\hat{\beta})] s^2(u) + s^2(e)$		

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{x}_i \quad \text{et} \quad \bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{y}_i$$

$$s(\hat{x}, \hat{y}) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\hat{x}_i - \bar{x})(\hat{y}_i - \bar{y})$$

$$s^2(\hat{x}) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\hat{x}_i - \bar{x})^2$$

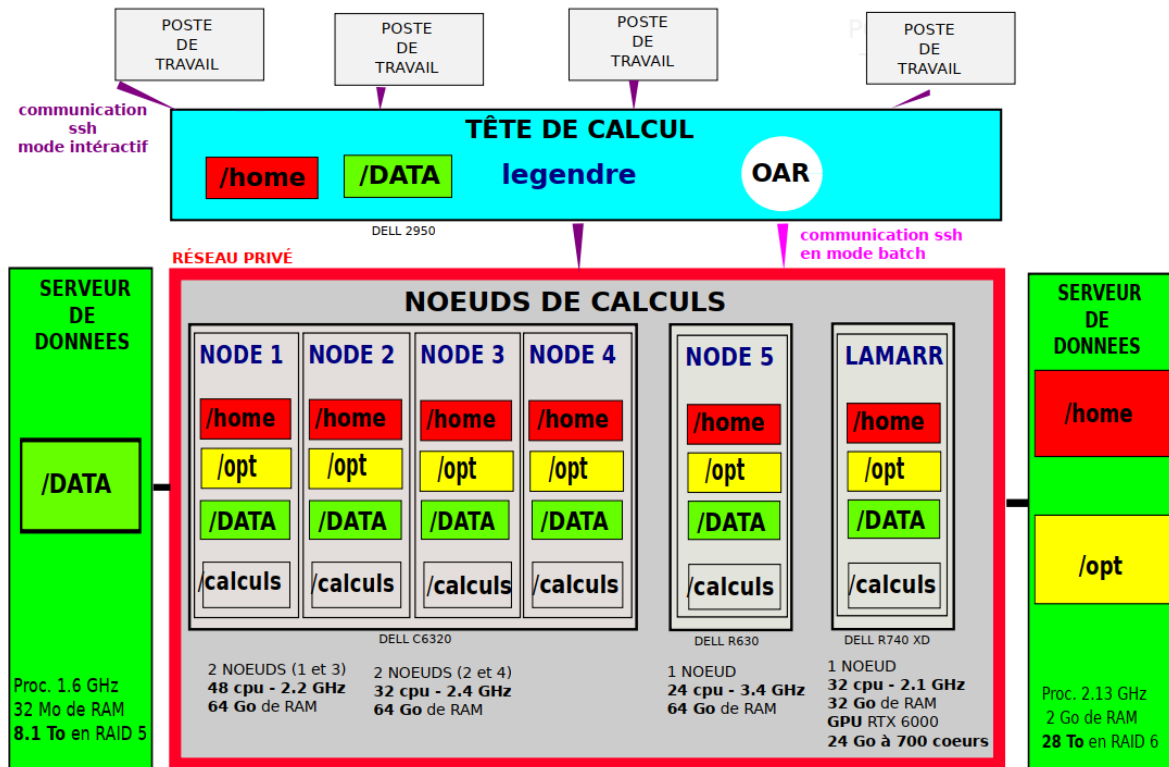
Annexe 6: Résultats des tests de dépendance de la température effectués par le constructeur – Exemple : Accéléromètre 643

QFLEX MODEL DATA SHEET				T/A S/N: 643
SENSOR S/N: A8BL1BY	RUN DATE: 12/07/2013 3:17:44 PM	LOCAL g:	980.708 cm/sec-sec	
TUMBLE DATA				
TEMPERATURE (degrees-C)	BIAS (ug)	SCALE FACTOR (mV/g)	TEMP. SENSOR (u-amp)	
T1	24.47	-1189	1.31359	294.295
T2	93.97	-1601	1.32162	362.878
T3	64.21	-1455	1.31777	333.458
T4	34.40	-1263	1.31453	304.085
T5	4.55	-1063	1.31198	274.644
T6	-25.38	-844	1.31037	245.340
T7	-55.43	-571	1.31000	215.982
T8	-25.40	-845	1.31042	245.382
T9	4.54	-1071	1.31204	274.788
T10	34.37	-1274	1.31460	304.203
T11	64.16	-1462	1.31782	333.549
T12	93.96	-1606	1.32163	362.933
T13	34.40	-1272	1.31454	304.152
MODEL COEFFICIENTS				
	BIAS (@293u-amps)	SCALE FACTOR (@293u-amps)	TEMP. SENSOR (20degrees-C)	
CONSTANT:	B0 = -1.195495E+03	C0 = 1.313512E+00	A0 =	290.03
1ST ORDER:	B1 = -6.873174E+00	C1 = 9.001900E-05	A1 =	.9841
2ND ORDER:	B2 = 6.153536E-03	C2 = 4.451198E-07		
3RD ORDER:	B3 = 4.565977E-06	C3 = -1.325533E-09		
4TH ORDER:	B4 = 1.674906E-06	C4 = 4.836500E-12		
RESIDUALS				
TEMPERATURE (degrees-C)	BIAS (ug)	SCALE FACTOR (ppm)	TEMP. SENSOR (u-amp)	
T1	24.47	15	-22	-.1
T2	93.97	3	0	-.1
T3	64.21	3	-15	-.1
T4	34.40	6	-13	-.1
T5	4.55	3	-21	-.1
T6	-25.38	1	-18	-.2
T7	-55.43	-0	-0	-.0
T8	-25.40	-0	19	.2
T9	4.54	-4	19	.0
T10	34.37	-4	28	-.0
T11	64.16	-4	14	.0
T12	93.96	-3	-0	.1
T13	34.40	-1	-12	.1
SHIFT:	-8		1	.1
HYSTERESIS (p-p):				
TEMP = -25.39	-1		37	.1
TEMP = 4.54	-7		39	.2
TEMP = 34.38	-10		41	.1
TEMP = 64.19	-6		29	.1

979-3100-701 SHEET A2

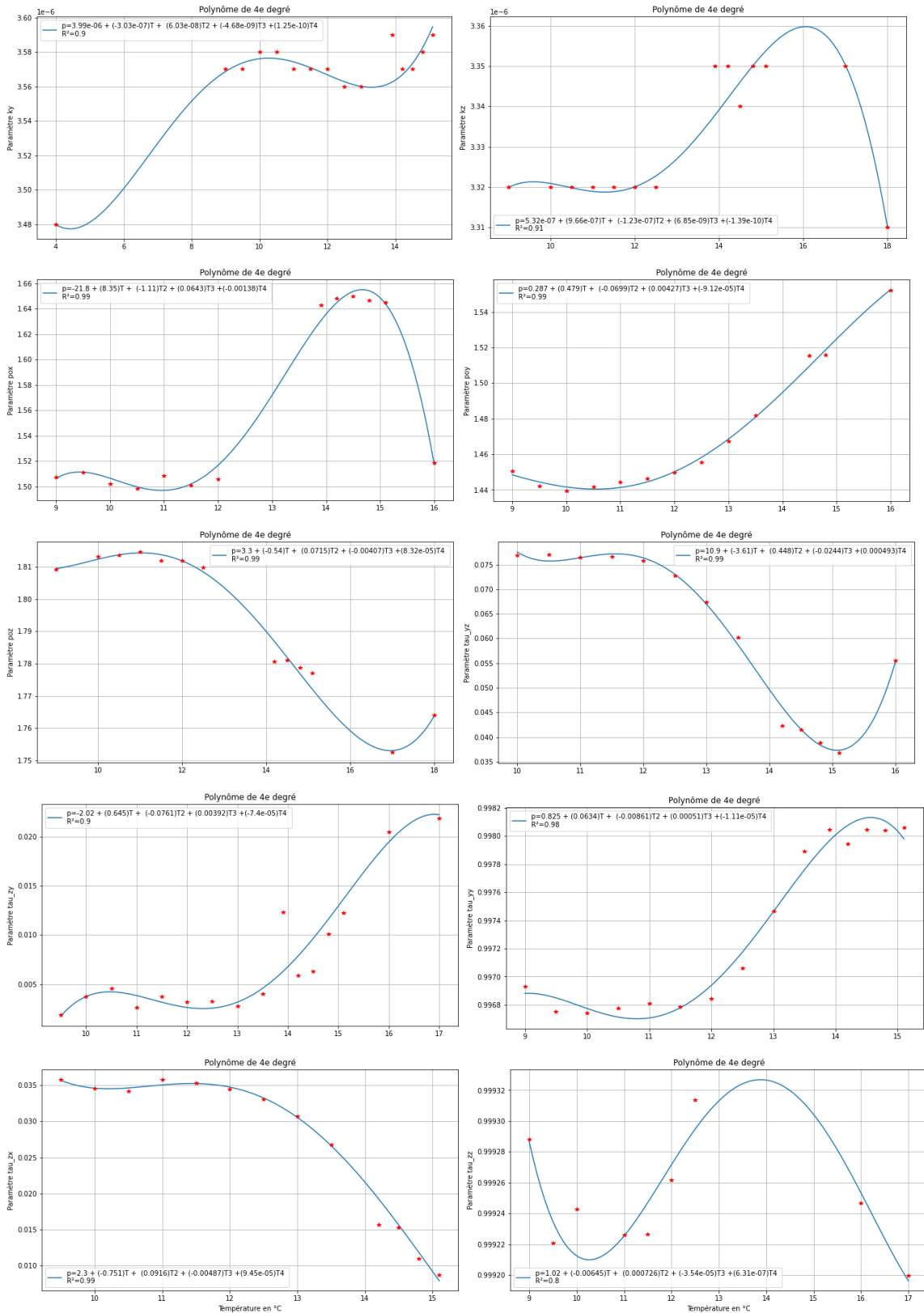
H-FT
079

Annexe 7: Fiche descriptive du serveur de calcul du laboratoire



CLUSTER GeF= 6 noeuds, 232 coeurs, 368 Go de RAM, 36.1 To de stockage

Annexe 8: Evolution des paramètres k_y , k_z , p_{ox} , p_{oy} , p_{oz} , $\tau_{y,z}$, $\tau_{z,y}$, $\tau_{y,y}$, $\tau_{z,x}$, $\tau_{z,z}$ en fonction de la température



Liste des figures

Figure 1 : Le système GraviMob2 - Photo réalisée par mes soins.....	8
Figure 2: Les accéléromètres Q-Flex QA3000 de Honeywell Source : Honeywell	9
Figure 3: L'Interface Homme Machine (IHM) de visualisation des mesures en temps réel - Mappem Geophysics	10
Figure 4: Le robot sous-marin idef ^x de l'Ifremer Sources : Photo réalisée par mes soins. Ifremer...	12
Figure 5: Conception de l'AUV idef ^x Source : Ifremer.....	13
Figure 6: Site de départ de la mission GRAVIMOB2 - Photo réalisée par mes soins.....	14
Figure 7: Le navire <i>L'Europe</i> avec la perche acoustique en gris - Photo réalisée par mes soins.....	14
Figure 8: Les deux profils prévus pour la mission GRAVIMOB2 Source : [ROUSSEL 2017]	15
Figure 9 : Tangage Roulis et Lacet – Photo réalisée par mes soins.....	16
Figure 10: Ajustage dans le hangar de l'Ifremer - Photos réalisées par mes soins.	17
Figure 11: Test de l'influence de la température sur les paramètres internes de la triade 1 (α) et la triade 2 (β) [ROUSSEL 2017].....	18
Figure 12: Enceinte climatique BINDER MKT 720 – source : [BINDER]	19
Figure 13 : Exemple de la rotation α 43 – Réalisée par mes soins	22
Figure 14 : Logiciel de programmation des profils de température de l'enceinte climatique. – Photo réalisée par soins	23
Figure 15: Tinytag, le thermomètre enregistreur, à l'intérieur de l'enceinte – Photo réalisée par mes soins.....	24
Figure 16: Capture d'écran de <i>Tinytag Explorer</i> pour la nuit du 4 juin, avec une fréquence d'acquisition de 0,5 Hz	24
Figure 17: Projection de l'accélération de pesanteur g sur l'axe sensible de l'accéléromètre 643	26
Figure 18: Paramètres de la fonction <i>CaliMod2</i> de la bibliothèques <i>gCaliTools</i>	27
Figure 19: Extrait d'un fichier de sortie du système GraviMob2.....	28
Figure 20: Extrait d'un fichier d'entrée de la fonction <i>CaliMod</i>	29
Figure 21: Evolution de la température de la sphère en fonction de celle de la chambre climatique pendant les trois nuits de mesure.....	31
Figure 22: Evolution linéaire des températures internes des accéléromètres en fonction de la température de la chambre climatique	32
Figure 23: Sortie du programme Bertuzzi implémenté pour calculer les paramètres d'étalonnage. 34	
Figure 24: Comparaison des mesures de température de l'enceinte climatique et des trois capteurs de température internes de la triade 1 et la triade2.....	36
Figure 25: Accélérations en fonction des températures pendant la nuit 3	37
Figure 26 : Accélérations en fonction des températures internes. Zoom sur une plage de 20 minutes	37
Figure 27: Résultats obtenus pour la triade 1 pour les données acquises lors de la première mission d'ajustement.....	38
Figure 28 : Résultats obtenus pour la triade 2 pour les données acquises lors de la première mission d'ajustement.....	39
Figure 29: Régression du facteur d'échelle kx avec des polynômes de premier, deuxième, troisième et quatrième degré	39
Figure 30: Résultats obtenus pour la triade 1 pour les données acquises lors de la deuxième mission d'ajustement.....	41
Figure 31: Résultats obtenus pour la triade 2 pour les données acquises lors de la deuxième mission d'ajustement.....	41
Figure 32: Extrait du fichier d'entrée du programme <i>script1.py</i>	43
Figure 33: Extrait de l'interface de MobaXterm. Exemple du traitement de la température 18°C ...	45
Figure 34: Distributions des paramètres internes pour la triade 1, à la température 9°C	46
Figure 35: Résultats du traitement de la triade 1 - En bleu les moyennes calculées et en rouge les barres d'erreurs sur ces moyennes	48

Figure 36: Modélisation de l'évolution du facteur d'échelle k_x en fonction de la température –
Polynôme de degré 4..... 52

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques de l'AUV idef ^x Source : Ifremer.....	12
Tableau 2: Caractéristiques de l'enceinte climatique BINDER MKT 720	19
Tableau 3: Températures prévues pour la première mission d'ajustement.....	20
Tableau 4: Températures prévues pour la deuxième mission d'ajustement	22
Tableau 5: Contenu des fichiers bruts de GraviMob2	29
Tableau 6: Etalonnage du capteur de température interne de la sphère - nuit 3. Dans les colonnes grisées sont représentées les valeurs de la température de consigne et dans les autres colonnes les températures de la sphère.....	30
Tableau 7 : Paramètres de l'étalonnage du capteur de température de la sphère	31
Tableau 8: Paramètres de l'étalonnage des capteurs de température internes - nuit 3	33
Tableau 9: Appréciation de l'influence de la prise en compte des erreurs entachant les mesures, sur la qualité de la régression linéaire	34
Tableau 10 : Résultats du test de normalité Shapiro-Wilk sur les distributions des valeurs des paramètres internes de la triade1, T=9°C	47
Tableau 11 : Valeurs du coefficient de détermination pour plusieurs modèles polynômiaux	49
Tableau 12: Valeurs du coefficient de détermination pour plusieurs modèles polynômiaux	50
Tableau 13: Régression linéaire par moindres carrés pour le facteur d'échelle kx	52
Tableau 14: Coefficients du modèle mathématique, pour les facteurs d'échelle - seuil de confiance 95%.....	53
Tableau 15: Coefficients du modèle mathématique, pour les biais - seuil de confiance 95%	53
Tableau 16: Coefficients du modèle mathématique, pour les coefficients de la matrice de transformation – seuil de confiance 95%	54

Développement d'une méthode innovante pour l'ajustement des paramètres internes du système de gravimétrie sous-marine GraviMob

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M, Le Mans 2021

Auteur : Ossama KHARBOU

RESUME

Le système de gravimétrie mobile GraviMob, est un système simple et innovant qui permet de mesurer les 3 composantes de l'accélération de la pesanteur, en fond de mer, en utilisant six accéléromètres capacitifs divisés en deux triades. Le traitement des mesures nécessite une connaissance de onze paramètres internes dont la détermination est essentielle pour estimer les trois composantes ou la norme de g .

Les valeurs de ces paramètres varient en fonction de la température. L'ajustement de ces paramètres internes dans une enceinte climatique, a permis de tracer leur évolution, et ainsi proposer, et valider statistiquement, des modèles polynomiaux de degré 4, permettant de déterminer la valeur de chaque paramètre en fonction de la température sur une étendue de mesure de 4°C à 18°C

Mots clés : gravimétrie mobile, géophysique marine, régressions linéaires et non linéaires

SUMMARY

The GraviMob mobile gravimetry system, is a simple and innovative system that measures the 3 components of the gravity vector on the seabed, using six capacitive accelerometers divided into two triads. The processing of the measurements requires knowledge of eleven internal parameters, the determination of which is essential to estimate the three components or the norm of g .

The values of these parameters vary depending on the temperature. The adjustment of these internal parameters in a climatic chamber, made it possible to trace their evolution, and thus to propose, and statistically validate, polynomial models of degree 4, making it possible to determine the value of each parameter as a function of the temperature over a measuring range of 4°C to 18°C .

Key words: mobile gravimetry, marine geophysics, linear and nonlinear regression