ENSTA – Campus de Brest

Service d'accueil : Lab-STICC

Rapport de stage assistant-ingénieur

Étude et cartographie du champ magnétique au bassin d'expérimentation air-mer à l'aide de robots de surface DDBoat

Sujet de stage : préparation des DDBoat pour l'enseignement 2026–2027

Luíza Diesel Chesani

Cycle ingénieur – deuxième année
Double diplôme avec l'Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Tuteur de stage	Luc Jaulin
Enseignant référent	Luc Jaulin
Période du stage	Du 26 mai au 26 juillet 2026
Année universitaire	2025–2026

Remerciements

Je remercie Luc Jaulin, tuteur de stage et enseignant référent, pour l'encadrement de ce travail à l'ENSTA Bretagne.

Je remercie également la professeure Natacha Caouren pour son aide dans la réalisation des essais et le développement des programmes, ainsi que pour ses conseils et son accompagnement sur les aspects théoriques du travail.

Résumé

Réalisé à l'ENSTA au sein du STICC, sous l'encadrement de Luc Jaulin, ce stage s'inscrit dans la préparation des DDBoat pour l'enseignement 2026–2027. Il porte notamment sur l'utilisation de robots de surface DDBoat pour étudier les perturbations du champ magnétique au bassin d'expérimentation air-mer. L'objectif est de préparer une cartographie exploitable pour mieux comprendre les limites de l'estimation du cap et envisager une détection des zones proches des parois. Le travail comprend la préparation des plateformes, la calibration des magnétomètres, le développement de programmes de commande et d'acquisition, des passages télécommandés suivant deux directions et le traitement des mesures GPS et magnétiques. Les représentations obtenues révèlent des variations spatiales et des différences entre passages, mais la précision du GPS et le recalage des trajectoires limitent la localisation des anomalies. La carte constitue donc une première exploration, à consolider par des mesures de position plus précises et des essais répétés.
Mots-clés : robot de surface, magnétomètre, calibration, cartographie, GPS, localisation.

Abstract

Conducted at ENSTA within STICC under the supervision of Luc Jaulin, this internship contributed to preparing DDBoats for teaching in 2026–2027. It investigated magnetic field variations at the Air-Sea Experimental Basin using DDBoat surface robots. The work included platform preparation, magnetometer calibration, development of control and logging software, remotely controlled traverses in two directions, and processing of GPS and magnetic measurements. The resulting plots show spatial variations and differences between passes. However, GPS accuracy and trajectory adjustment limit the localization of anomalies. The resulting map is therefore an exploratory product that requires more accurate positioning and repeated measurements before it can support reliable navigation.
Keywords: surface robot, magnetometer, calibration, mapping, GPS, localization.

Table des matières

Remerciements **i**

Résumé **ii**

Abstract **iii**

Nomenclature **vi**

1 Introduction **1**
1.1 Contexte et problématique 1
1.2 Objectifs et démarche 1
1.3 Structure d'accueil 1

2 Principes théoriques **2**
2.1 Robot de surface et propulsion différentielle 2
2.2 Champ magnétique et orientation 2
2.3 Calibration du magnétomètre 3
2.4 Positionnement et repères 3

3 Matériel et préparation **4**
3.1 Plateformes et capteurs 4
3.2 Calibration expérimentale 4

4 Acquisition et protocole **6**
4.1 Environnement expérimental 6
4.2 Enregistrement 6
4.3 Commande du cap et essais de direction 6

5 Traitement et résultats **8**
5.1 Trajectoires et limites du GPS 8
5.2 Recalage et profils magnétiques 8
5.3 Première carte magnétique 10
5.4 Bilan et limites 10

6 Conclusion et perspectives **13**

A Ressources complémentaires **15**
A.1 Dépôt des documents et vidéos 15
A.2 Extraits de programmes 15
A.2.1 Acquisition et calibration – `take_measurements.py` 15
A.2.2 Calcul du cap – `heading_test.py` 15
A.2.3 Correction de cap – `choose_heading.py` 16
A.3 Comparaisons des passages magnétiques 17

Table des figures

3.1 Mesures magnétiques du bateau 14 et ellipsoïde ajusté à partir des données de calibration. 5

5.1 Trajectoires nord–sud du bateau 3 représentées par rapport au bassin. Le contour et les positions sont issus des traitements fournis. 8
5.2 Trajectoires est–ouest du bateau 14 dans le repère du bassin. 9
5.3 Norme du champ magnétique en fonction du décalage de latitude pour cinq paires de passages nord–sud du bateau 3. 9
5.4 Exemple de profils magnétiques est–ouest pour le bateau 14, passage 9. 10
5.5 Grille interpolée de la norme du champ magnétique à partir des données des bateaux 3 et 14. 11
5.6 Vecteurs tridimensionnels associés à l'inclinaison magnétique, colorés selon l'angle calculé. La figure indique une inclinaison moyenne de $-55{,}68^\circ$ et une valeur de référence de $-63{,}62^\circ$. 12

A.1 Comparaison des passages nord–sud (en haut) et ouest–est (en bas) du bateau 3. 17
A.2 Comparaison des passages nord–sud (en haut) et ouest–est (en bas) du bateau 14. 18

Nomenclature

DDBoat	plateforme robotique de surface à propulsion différentielle
GNSS / GPS	système mondial / américain de positionnement par satellites
IMU	centrale de mesure inertielle
RTK	positionnement cinématique en temps réel avec corrections GNSS
UTM	projection cartographique Universal Transverse Mercator
$\mathbf{m}$	mesure magnétique brute sur trois axes
$\mathbf{b}$	décalage du magnétomètre
Q	matrice symétrique décrivant un ellipsoïde de calibration
ψ	cap du bateau dans une convention de repère donnée

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte et problématique

Les robots de surface autonomes doivent estimer leur position et leur orientation pour suivre une trajectoire et interagir avec leur environnement. Le GPS fournit une position absolue, tandis que le magnétomètre peut contribuer à l'estimation du cap. Cependant, en présence de matériaux ferromagnétiques ou de courants électriques, le champ mesuré peut différer du champ terrestre. Une orientation calculée à partir de cette mesure peut alors être biaisée.

Ce stage, réalisé à Brest à l'ENSTA, s'intéresse aux mesures magnétiques obtenues au bassin d'expérimentation air-mer à l'aide de DDBoats. Cet environnement constitue un cadre d'expérimentation contrôlé pour étudier les liens entre position, orientation et champ magnétique. Une question guide le travail : *dans quelle mesure les variations magnétiques observées peuvent-elles être représentées spatialement et utilisées pour une future navigation ?*

1.2 Objectifs et démarche

Les objectifs sont de préparer les bateaux et leurs capteurs, de calibrer les magnétomètres, d'acquérir des mesures géolocalisées, de réaliser des trajets dans deux directions et d'étudier la répartition des mesures. Une piste complémentaire est l'utilisation d'une anomalie magnétique comme indicateur de proximité d'une paroi. Les scripts de commande et de détection développés restent au stade de prototypes.

1.3 Structure d'accueil

Le stage s'inscrit dans la deuxième année du cycle ingénieur de l'ENSTA, dans le cadre d'un double diplôme avec l'Universidade Federal do Rio Grande do Sul. L'organisme d'accueil est l'ENSTA, sur le campus de Brest, au sein du service STICC indiqué dans la convention. Luc Jaulin assure à la fois le rôle de tuteur au sein de l'organisme d'accueil et celui d'enseignant référent.

La professeure Natacha Caouren a également été l'une des principales personnes de soutien pendant le stage, en accompagnant notamment la réalisation des essais, le développement des codes et la compréhension des aspects théoriques.

La convention fixe la période du 26 mai au 26 juillet 2026 et indique une durée de neuf semaines, soit 308 heures de présence effective, avec une durée hebdomadaire de 35 heures. Le sujet officiel est « Préparation DDBoat pour enseignement 2026/2027 » ; l'activité confiée est la préparation de matériel pour les projets avec DDBoat.

La préparation des plateformes, la calibration et les essais au bassin d'expérimentation air-mer s'inscrivent dans cette mission. L'étude magnétique présentée ici permet d'identifier des difficultés de mesure et de traitement à prendre en compte lors de l'utilisation des bateaux.

Chapitre 2

Principes théoriques

2.1 Robot de surface et propulsion différentielle

Le DDBoat est une plateforme de surface équipée de deux propulseurs. En première approximation, une action commune produit une translation et une différence de commande produit une rotation. Pour une position (x, y), un cap ψ, une vitesse longitudinale v et une vitesse de lacet ω, un modèle cinématique simplifié est

$$\dot{x} = v\cos\psi, \qquad \dot{y} = v\sin\psi, \qquad \dot{\psi} = \omega. \tag{2.1}$$

Ce modèle facilite la compréhension du guidage mais ne décrit pas les courants, l'inertie, le glissement ni les détails de la dynamique des moteurs. Les principes de modélisation et de guidage sont présentés dans les supports de Jaulin [1, 2].

2.2 Champ magnétique et orientation

Un magnétomètre fournit trois composantes du champ dans son repère propre. Le champ terrestre possède une composante horizontale et une composante verticale. La déclinaison correspond à l'angle horizontal entre les directions du nord géographique et du nord magnétique ; l'inclinaison décrit l'angle du champ avec le plan horizontal. Les signes dépendent des conventions employées.

À plat et dans un repère horizontal convenablement défini, un angle peut être obtenu par une fonction à deux arguments, $\psi_m = \mathrm{atan2}(m_y, m_x)$. Les axes, le signe, le décalage et la déclinaison doivent être adaptés à la convention choisie. Lorsque le bateau roule ou tangue, il faut d'abord compenser l'inclinaison à partir de l'attitude estimée. Une anomalie locale modifie les composantes du champ et peut donc biaiser le cap, même après une bonne calibration du capteur.

Pour représenter l'inclinaison du champ à partir des mesures calibrées, le script `plot_mapping_3d_inclination.py` réoriente d'abord le vecteur magnétique selon la direction du trajet. Pour un angle de cap α, cette rotation autour de l'axe vertical s'écrit

$$\begin{pmatrix} m'_x \\ m'_y \\ m'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix}. \tag{2.2}$$

La composante verticale reste inchangée par cette rotation. L'inclinaison I, définie comme l'angle du champ avec le plan horizontal, est ensuite calculée par

$$I = \mathrm{atan2}\Big(m'_z, \sqrt{(m'_x)^2 + (m'_y)^2}\Big). \tag{2.3}$$

Le script exprime cet angle en degrés. La normalisation préalable du vecteur ne change pas l'angle, car elle divise ses composantes par une même norme positive. Cette méthode suppose que les

directions cardinales associées aux trajets et les axes des mesures suivent la même convention de repère ; elle ne compense pas à elle seule le roulis ou le tangage du bateau. Pour l'affichage, le script reconstruit des flèches dans un plan vertical afin d'illustrer l'inclinaison : elles ne représentent donc pas l'azimut complet du champ mesuré. La définition de l'inclinaison magnétique et les outils de changement de repère par matrice de rotation sont présentés dans les supports de cours [1, p. 41] [3, pp. 7–8].

2.3 Calibration du magnétomètre

Lorsqu'un capteur est orienté dans de nombreuses directions au sein d'un champ approximativement constant, les mesures idéales décrivent une sphère. Les biais et les déformations liés au capteur et à son environnement embarqué conduisent à un nuage décentré et déformé. Les perturbations dites *hard iron* peuvent être représentées par un décalage ; les effets *soft iron*, les gains et les défauts d'axes peuvent être représentés par une transformation linéaire.

Une écriture générique est

$$\mathbf{m} = A\mathbf{h} + \mathbf{b} + \boldsymbol{\epsilon}, \qquad \mathbf{h}_c = C(\mathbf{m} - \mathbf{b}), \tag{2.4}$$

où C corrige la déformation estimée. Un ajustement ellipsoïdal peut être formulé par

$$(\mathbf{m} - \mathbf{b})^T Q (\mathbf{m} - \mathbf{b}) = 1. \tag{2.5}$$

Si Q est définie positive, sa racine matricielle permet de transformer l'ellipsoïde en sphère unité. L'échelle de la sphère et l'orientation vers le nord doivent être définies séparément : une norme proche de 1 ne signifie pas automatiquement une mesure en microteslas ni une orientation correcte. La qualité de la calibration dépend notamment de la diversité des orientations et de l'absence de perturbations variables pendant l'acquisition. La distinction entre biais magnétique et déformation du champ, ainsi que leur correction par décalage et transformation matricielle, est également décrite dans le support de cours consacré aux DDBoat [1, pp. 45–46].

2.4 Positionnement et repères

Le GPS fournit latitude et longitude. Les phrases NMEA GLL peuvent encoder les coordonnées en degrés et minutes : une valeur $ddmm.mmmm$ se convertit en degrés décimaux par $d + m/60$, avec le signe de l'hémisphère. Une projection UTM transforme ensuite les coordonnées en mètres. Un repère local peut être construit à partir d'une origine (E_0, N_0) et d'une rotation R :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} E - E_0 \\ N - N_0 \end{pmatrix}. \tag{2.6}$$

La projection ne corrige pas l'erreur du GPS. Dans le bassin d'expérimentation air-mer, d'environ 12×20 m, une erreur de plusieurs mètres peut déplacer une mesure d'une partie importante du bassin et compromettre sa comparaison avec une paroi ou avec un autre passage.

Chapitre 3

Matériel et préparation

3.1 Plateformes et capteurs

Les archives [4] comprenant les données de calibration, ainsi que les essais présentés dans les figures fournies, concernent les bateaux 3 et 14. Les DDBoats utilisent une commande de propulsion et des capteurs dont un GPS et une centrale incluant un magnétomètre ; les programmes utilisent les pilotes `gps_driver_v2`, `imu9_driver_v2` et `arduino_driver_v2`. La préparation a compris la vérification des composants et des batteries, puis l'installation et l'essai des programmes.

Dans le cadre de la préparation du cours de drones, des vidéos explicatives ont également été réalisées. Elles présentent la manière de se connecter au DDBoat, de le calibrer et de réaliser des essais afin de vérifier son fonctionnement. Ce travail s'est accompagné de la reprise et de la finalisation de programmes déjà disponibles pour le cours, afin de faciliter leur utilisation lors des activités pédagogiques.

Table 3.1: Éléments de la chaîne expérimentale

Élément	Fonction
DDBoat	Déplacement de la charge utile sur l'eau
GPS	Mesure de position géographique
IMU / magnétomètre	Mesures utiles à l'orientation et à l'étude du champ
Calculateur et pilotes	Lecture des capteurs, commande et enregistrement
Télécommande	Conduite des passages expérimentaux
Scripts Python	Calibration, acquisition, traitement et visualisation

La table 3.1 résume les fonctions des principaux éléments de la chaîne expérimentale. Elle présente leur rôle dans le dispositif utilisé, sans détailler leurs caractéristiques techniques.

3.2 Calibration expérimentale

Les archives du stage [4] contiennent des fichiers `magdata.csv` et `magNorthWest.csv` par bateau, ainsi que les programmes `10_magdata.py` et `10__magcalib.py`. La démarche consiste à acquérir des mesures dans différentes orientations, ajuster le modèle de calibration, puis utiliser des directions de référence nord et ouest pour orienter les données. Une calibration doit être propre à la configuration du bateau : déplacer une batterie ou modifier le câblage peut changer les perturbations embarquées.

Un script expérimental `sphere_correction.py` ajuste les termes quadratiques et linéaires par moindres carrés, calcule le centre et une racine matricielle. La positivité de la matrice et la forme du nuage corrigé constituent des critères de cohérence géométrique de la calibration. Ils ne

suffisent cependant pas à prouver que le cap est juste : celui-ci dépend également des références directionnelles et des conventions de repère.

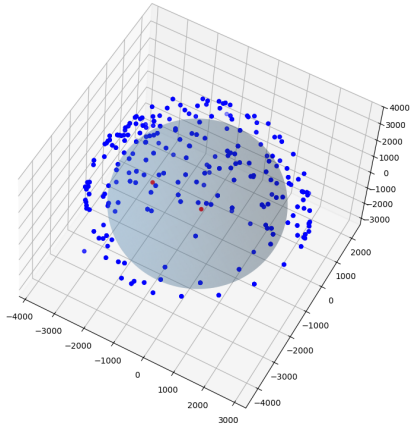


Figure 3.1: Mesures magnétiques du bateau 14 et ellipsoïde ajusté à partir des données de calibration.

La méthode suit le principe présenté dans le support *Drones* : corriger le décalage et la déformation du magnétomètre, puis orienter le repère corrigé à l'aide de mesures de référence Nord et Ouest [1, pp. 45–46, 52–53]. La figure 3.1 présente les mesures du fichier `magdata.csv` du bateau 14 (points bleus), les références Nord et Ouest de `magNorthWest.csv` (points rouges) et l'ellipsoïde ajusté. Pour cet ajustement, le centre estimé est $\mathbf{b} = (-451{,}34,\ -1060{,}84,\ 242{,}23)^T$ (unités brutes du capteur). La matrice affichée par le script sous le nom $\widehat{A}$ est

$$\widehat{A} = \begin{pmatrix} -1958{,}43 & -1785{,}19 & -53{,}26 \\ -1665{,}24 & 2059{,}43 & 737{,}10 \\ -323{,}93 & 64{,}18 & -3195{,}10 \end{pmatrix}.$$

Les trois valeurs propres de la matrice Q de l'ellipsoïde sont positives (8,864, 9,267 et 9,958) $\times 10^{-8}$. Les normes des vecteurs de référence après correction valent 0,974 (Nord) et 1,013 (Ouest). Cette calibration a été utilisée lors des essais du bateau 14, qui se sont déroulés correctement. Les coefficients sont exprimés dans les unités brutes des fichiers.

Chapitre 4

Acquisition et protocole

4.1 Environnement expérimental

Les essais de cartographie ont été réalisés sur deux journées distinctes au bassin d'expérimentation air-mer. Lors de la première journée, le bateau 3 a effectué un nombre plus limité de passages télécommandés suivant les deux axes du bassin : x (12 m) et y (20 m). Lors de la seconde journée, le bateau 14 a suivi le même protocole sur les deux axes, avec des trajets aller et retour. Cette seconde séance a fourni la plus grande quantité de données. Les mesures des deux bateaux ont été utilisées dans le travail présenté.

Les graphiques disponibles pour les deux bateaux présentent des passages nord–sud et est–ouest. Pour le bateau 14, les fichiers regroupent neuf paires de passages nord–sud et dix-sept paires est–ouest ; ce décompte décrit les fichiers disponibles.

Dans la suite, les parcours sont désignés selon les directions consignées dans les fichiers et les figures : nord–sud et est–ouest.

4.2 Enregistrement

Le programme `take_measurements.py` acquiert la position GPS et les mesures du magnétomètre, applique la calibration pour calculer les composantes magnétiques corrigées et le cap, puis enregistre les données dans un fichier CSV. Les fichiers disponibles contiennent notamment le temps, la validité GPS, la latitude, la longitude, le cap, les composantes magnétiques brutes et calibrées et leurs normes. Selon la version du programme, les champs enregistrés et la fréquence d'acquisition peuvent différer ; il ne faut donc pas supposer une fréquence unique pour tous les essais.

Les étapes du traitement sont : lecture et vérification des données, conversion des coordonnées, calibration magnétique, association des mesures à une position, puis tracés par passage et par direction. Les mesures GPS et magnétiques peuvent avoir des cadences différentes, et les positions GPS peuvent se répéter ; ces phénomènes limitent leur synchronisation directe et l'analyse fine de la correspondance entre position et mesure magnétique.

4.3 Commande du cap et essais de direction

Le script `heading_test.py` lit les mesures du magnétomètre, applique les paramètres de calibration du bateau et affiche en continu le cap estimé. Il a été utilisé avec une boussole afin de comparer le cap calculé et une référence indépendante.

Le script `choose_heading.py` permet à l'utilisateur de saisir un cap cible en degrés. À chaque itération, le programme calcule l'erreur angulaire entre le cap demandé et celui estimé par le magnétomètre, applique une correction proportionnelle limitée, puis modifie différentiellement la commande des deux propulseurs. Cette logique de retour sur l'erreur d'orientation est apparentée

au principe de commande d'orientation présenté dans le support *Mobile Robotics: Inertial*, sans en reprendre le modèle complet [3, pp. 69–72]. Le test s'exécute pendant une durée définie et les moteurs sont arrêtés à la fin ou en cas d'interruption.

Lors des essais, le bateau ne suivait pas toujours le cap demandé : le cap estimé variait notamment à proximité des parois et d'autres objets métalliques présents dans le bassin. Ces observations sont compatibles avec une perturbation locale du champ magnétique, phénomène décrit dans le support *Drones* [1, pp. 55–56]. Elles suggèrent que la variation du champ a influencé le cap utilisé par la commande, sans exclure d'autres facteurs tels que la calibration, les moteurs ou les conditions de navigation. Ces essais portent sur le maintien d'une direction choisie. Les essais de cartographie ont été réalisés à la télécommande.

Chapitre 5

Traitement et résultats

5.1 Trajectoires et limites du GPS

Les trajectoires projetées sont comparées au contour du bassin. Sur la figure 5.1, certains points se trouvent en dehors du rectangle : cela peut résulter d'une erreur GPS, d'une origine ou d'une orientation imparfaite du repère, ou de l'incertitude sur les dimensions (voir section 5.4).

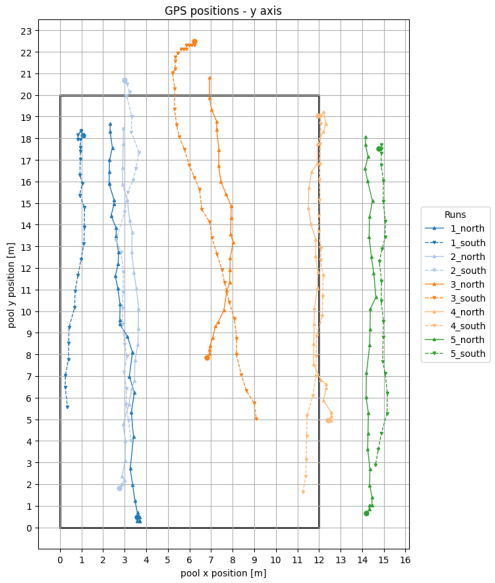


Figure 5.1: Trajectoires nord–sud du bateau 3 représentées par rapport au bassin. Le contour et les positions sont issus des traitements fournis.

La figure 5.2 montre le deuxième ensemble de trajectoires (bateau 14, seconde journée). Les graphiques étant issus de deux essais et de deux plateformes, leurs différences ne peuvent pas être attribuées au bateau seul sans contrôler les conditions et le traitement.

5.2 Recalage et profils magnétiques

Pour représenter les trajectoires dans le repère du bassin, les scripts `plot_gps_pool_SN.py` et `plot_gps_pool_WE.py` projettent d'abord latitude et longitude en coordonnées UTM, puis soustraient les coordonnées UTM de l'origine mesurée au coin inférieur gauche du bassin. Pour les profils magnétiques, `plot_rescaled_SN.py` et `plot_rescaled_WE.py` utilisent les coordonnées GPS valides le long de l'axe du passage. Le début et la fin sont estimés par la médiane des quatre premières et des quatre dernières mesures. Après prise en compte du décalage d'un mètre

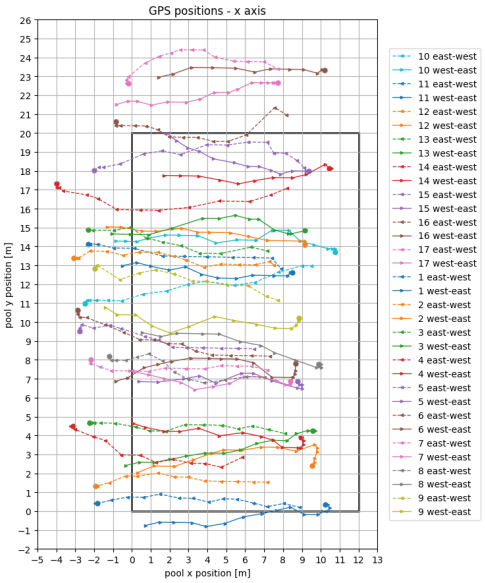


Figure 5.2: Trajectoires est–ouest du bateau 14 dans le repère du bassin.

entre le GPS et le magnétomètre, le progrès relatif est ramené à l'intervalle $[0, 1]$, limité à cet intervalle et rendu monotone, puis multiplié par la longueur connue du bassin (20 m pour l'axe y et 12 m pour l'axe x). Le sens inverse est représenté en inversant ce progrès. Les différentes lignes sont ensuite réparties uniformément sur l'axe transversal du bassin. Ce recalage facilite la comparaison visuelle des passages (limites en section 5.4).

La figure 5.3 compare les profils de norme magnétique de cinq paires de passages nord–sud du bateau 3, en fonction du décalage de latitude par rapport au milieu de chaque parcours. La figure 5.4 présente le profil du neuvième passage est–ouest du bateau 14. Les profils montrent une variabilité entre les trajets et les sens de parcours, dont l'interprétation est discutée dans la section 5.4.

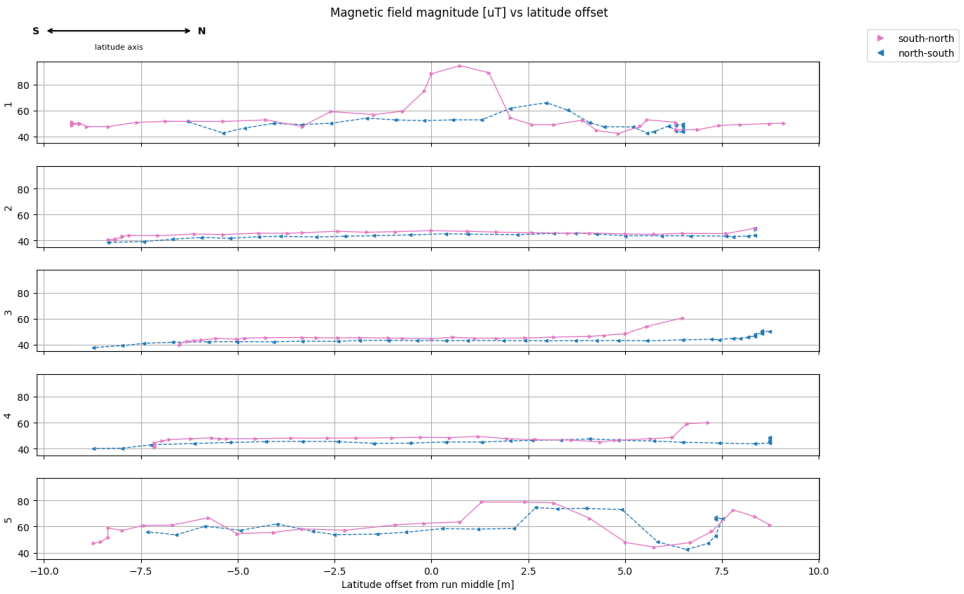


Figure 5.3: Norme du champ magnétique en fonction du décalage de latitude pour cinq paires de passages nord–sud du bateau 3.

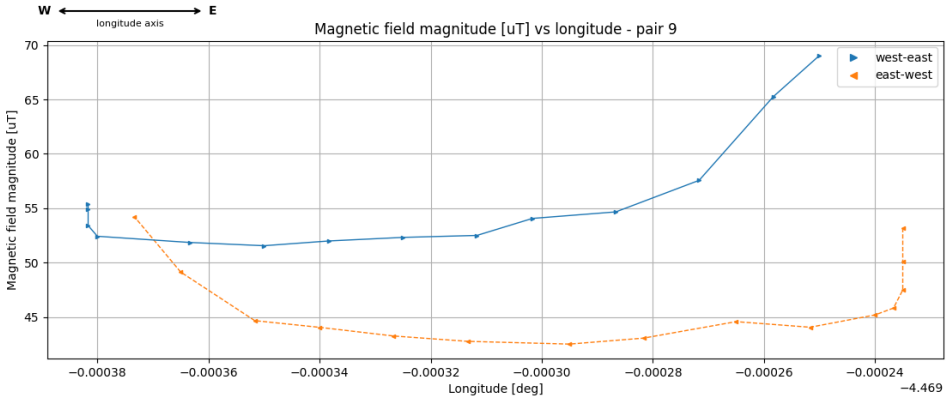


Figure 5.4: Exemple de profils magnétiques est–ouest pour le bateau 14, passage 9.

Dans les scripts de tracé, la norme du vecteur magnétique après calibration est d'abord normalisée : elle devient une grandeur sans unité, dont une valeur proche de 1 représente la norme de référence. Pour exprimer cette grandeur en microteslas, le script la multiplie par 48 μT, valeur de référence retenue car elle est représentative du champ magnétique terrestre dans la ville où se trouve le bassin (constante `REFERENCE_FIELD_UT`=48) [5]. Ainsi, une norme normalisée de 1 correspond à 48 μT, et une valeur de 0,9 correspond à 43,2 μT. Cette opération fixe l'échelle des profils et de la grille à partir de la référence choisie ; les valeurs en µT dépendent donc de cette hypothèse (voir section 5.4).

5.3 Première carte magnétique

La figure 5.5 présente la grille de norme magnétique construite à partir des données des bateaux 3 et 14, recueillies lors des passages dans les deux directions. Les scripts réunissent les mesures géolocalisées, regroupent les positions proches et interpolent entre les points pour produire une représentation continue sur l'ensemble du bassin. Cette grille représente la norme du champ magnétique et met en évidence des variations spatiales, notamment dans certaines zones proches des bords. La comparaison des mesures aux croisements des trajets horizontaux et verticaux constitue une piste complémentaire pour étudier la cohérence spatiale de la carte et la répétabilité des mesures. Indépendamment de cette grille, le script `plot_mapping_3d_inclination.py` produit une visualisation exploratoire de l'inclinaison magnétique à partir des données acquises avec le bateau 14. Dans `read_mapping_vectors`, les composantes calibrées sont tournées par une matrice de rotation choisie selon la direction du passage, puis l'angle est calculé à partir des composantes verticale et horizontale du champ, comme décrit aux équations 2.2 et 2.3. Les flèches de cette visualisation schématisent l'inclinaison et ne conservent pas la direction horizontale complète du vecteur. La valeur moyenne calculée dans le bassin s'écarte donc de 7,94° de la valeur de référence (−63,62°) [5]. Cet écart est compatible avec une perturbation du champ dans le bassin ; son origine ne peut toutefois pas être précisée (voir section 5.4).

5.4 Bilan et limites

Le travail a abouti à une chaîne complète allant de la calibration à la représentation des données, ainsi qu'à des prototypes de commande. Les résultats mettent en évidence la nécessité d'examiner conjointement cap, norme du champ et position. Les limites suivantes s'appliquent à l'ensemble des résultats des sections 5.1 à 5.3 :

- **Position.** L'incertitude du GPS, de plusieurs mètres, est grande devant les dimensions du bassin (12 × 20 m). Sans référence indépendante, l'écart entre les trajectoires et le contour

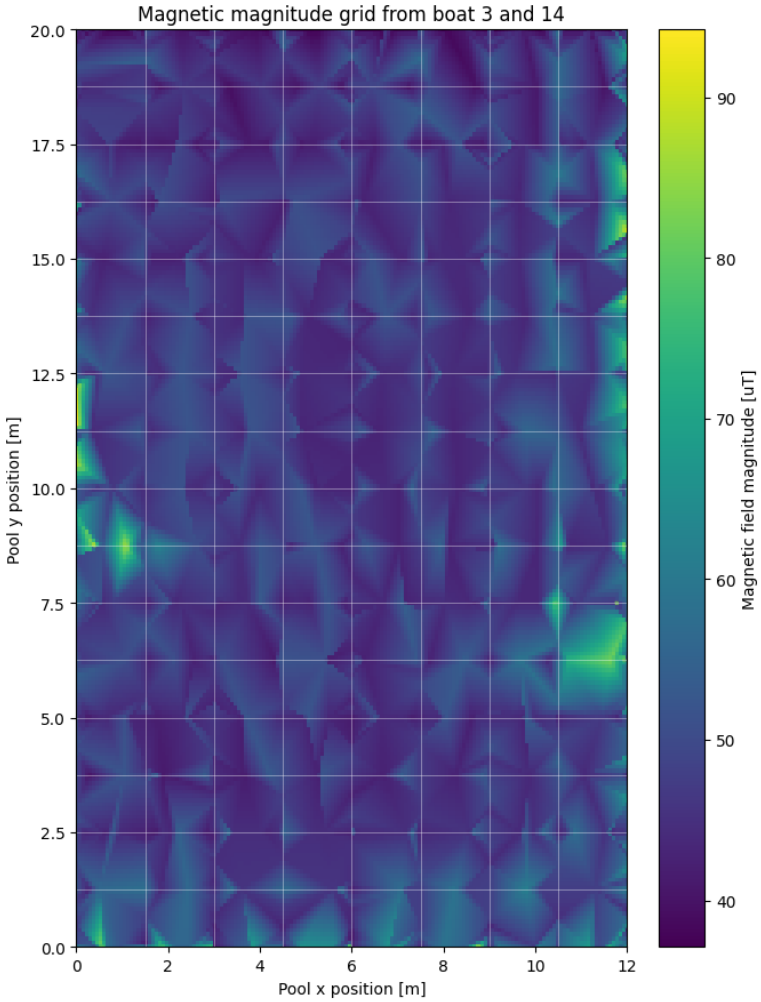


Figure 5.5: Grille interpolée de la norme du champ magnétique à partir des données des bateaux 3 et 14.

ne peut être attribué à une cause unique (erreur GPS, origine ou orientation du repère, dimensions), et il peut varier au cours d'une même séance.

- **Recalage.** Le recalage impose des hypothèses sur la géométrie des trajets (progression monotone, répartition uniforme des lignes sur l'axe transversal). Il facilite la comparaison visuelle, mais ne corrige pas la position réelle ni les variations de vitesse ; les trajectoires aller et retour ne passent pas nécessairement aux mêmes endroits.
- **Échelle et calibration.** Les valeurs en µT résultent de la normalisation par une référence de 48 µT et non d'une mesure absolue indépendante. La calibration, la convention des axes et l'orientation du bateau influencent également la norme et l'inclinaison calculées.
- **Effets non isolés.** Les effets de l'orientation, de la propulsion, des conditions d'essai et de la plateforme (bateaux 3 et 14, deux journées distinctes) ne sont pas séparés.

En conséquence, les écarts observés entre passages, sens de parcours ou bateaux, ainsi que l'écart de 7,94° sur l'inclinaison, sont compatibles avec une perturbation magnétique du bassin, mais ne permettent pas, à eux seuls, d'en établir l'origine ni la reproductibilité à une position donnée.

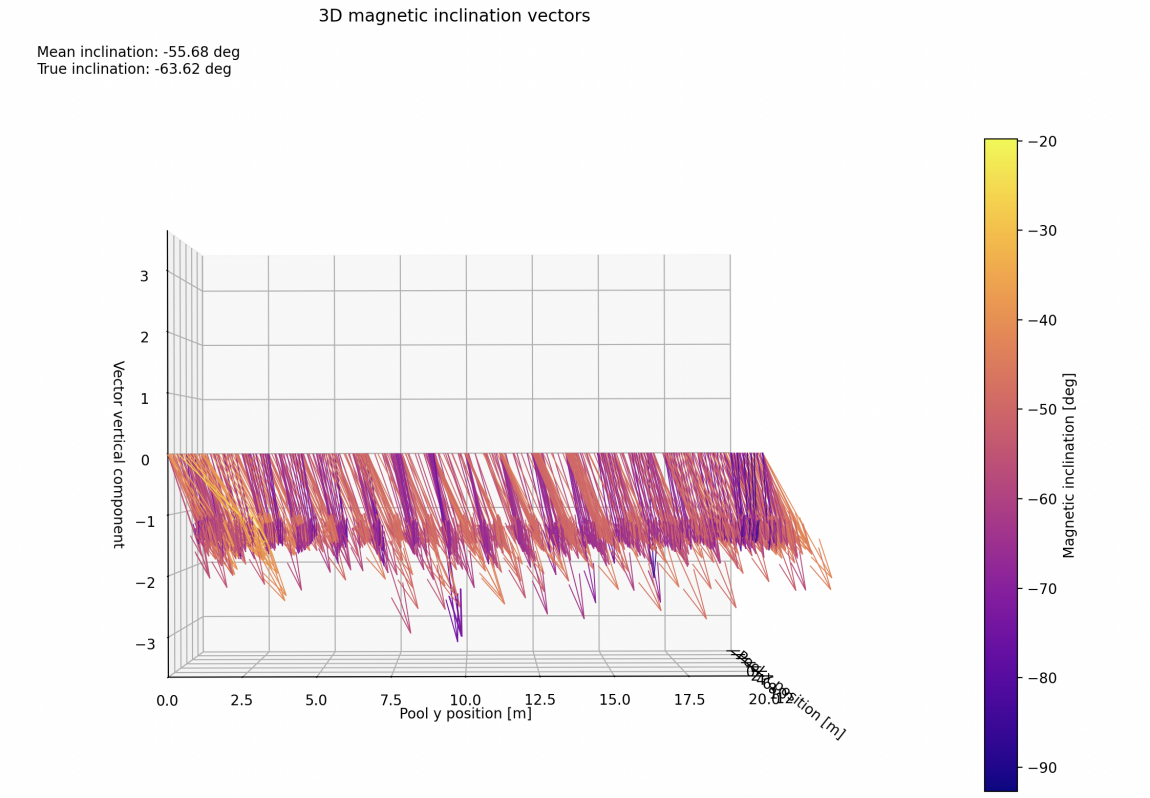


Figure 5.6: Vecteurs tridimensionnels associés à l'inclinaison magnétique, colorés selon l'angle calculé. La figure indique une inclinaison moyenne de $-55{,}68°$ et une valeur de référence de $-63{,}62°$.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Ce stage a permis de préparer des plateformes DDBoat, d'utiliser et d'adapter des outils de calibration et d'acquisition, puis de produire des représentations des trajectoires et du champ magnétique au bassin d'expérimentation air-mer. Les graphiques montrent que les mesures varient et que leur interprétation dépend fortement de la position et du traitement. La carte obtenue est une base d'exploration, mais les données disponibles ne permettent pas encore de valider une localisation précise des anomalies ni une détection fiable des parois.

Les essais de maintien d'un cap ont également souligné la nécessité d'évaluer la robustesse de l'estimation de l'orientation dans cet environnement. Enfin, les vidéos explicatives et la finalisation des programmes destinés au cours de drones fournissent des supports pédagogiques réutilisables pour la prise en main, la calibration et les essais des DDBoat.

La priorité serait d'acquérir des positions de référence plus précises, par exemple à l'aide d'un système GNSS RTK si la réception et l'environnement s'y prêtent, ou d'un système local adapté. Il serait ensuite utile de répéter des trajets connus dans les deux sens, tester plusieurs orientations et régimes moteurs, vérifier l'échelle magnétique et quantifier les écarts aux croisements. Une carte assortie d'incertitudes pourrait alors servir à étudier la compensation des perturbations et à évaluer une stratégie de navigation sur des données indépendantes.

Sur le plan personnel, ce travail a mobilisé la programmation Python, la manipulation de capteurs, l'expérimentation robotique et l'analyse critique de mesures. La réalisation de vidéos explicatives et l'adaptation de codes pour le cours m'ont également permis de développer mes compétences pédagogiques, en apprenant à rendre des procédures techniques accessibles et réutilisables.

Bibliographie

[1] L. Jaulin, *Drones: From Theory to Navigation*, support de cours, ENSTA Bretagne, 11 mai 2026.

[2] L. Jaulin, *Mobile Robotics: Guidance*, support de cours, ENSTA Bretagne, 24 avril 2025.

[3] L. Jaulin, *Mobile Robotics: Inertial*, support de cours, ENSTA Bretagne, 6 septembre 2026.

[4] L. Diesel Chesani, *Données et scripts expérimentaux du stage*, archives fournies, 2026. Documents internes de travail.

[5] NCEI Geomagnetic Modeling Team. Magnetic Field Calculator. NOAA National Centers for Environmental Information. Disponibles sur : https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml.

Annexe A

Ressources complémentaires

A.1 Dépôt des documents et vidéos

Les documents et fichiers complets du stage [4] sont accessibles dans les espaces SharePoint privés suivants :

- Vidéos de prise en main des DDBoat : ouvrir le dossier SharePoint ;
- Données acquises pendant les essais : ouvrir le dossier SharePoint ;
- Programmes de test et scripts : ouvrir le dossier SharePoint.

L'accès dépend des autorisations accordées par l'ENSTA. Les extraits de code et les graphiques ci-dessous illustrent les principaux outils et résultats ; ils ne remplacent pas les fichiers complets déposés sur SharePoint.

A.2 Extraits de programmes

A.2.1 Acquisition et calibration – `take_measurements.py`

Le programme d'acquisition corrige les mesures du magnétomètre, calcule le cap et enregistre les données avec leur position GPS dans un fichier CSV.

```
mag_calibrated = invA @ (data_mag - b_M)

mag_x_cal = float(mag_calibrated[0, 0])
mag_y_cal = float(mag_calibrated[1, 0])
mag_z_cal = float(mag_calibrated[2, 0])

if LOG_HEADING:
        heading = get_heading_from_mag(mag_x, mag_y, mag_z)
else:
        heading = ""

writer.writerow([
        time_s, int(gps_valid), gps_lat, gps_lon, heading,
        mag_x, mag_y, mag_z, mag_magnitude_raw,
        mag_x_cal, mag_y_cal, mag_z_cal, mag_magnitude_cal,
])
```

A.2.2 Calcul du cap – `heading_test.py`

Après calibration, le vecteur magnétique est projeté sur le plan horizontal pour calculer l'angle de cap.

```
Y_cor = invA @ (data_mag - b_M)
a = np.array([[0], [0], [1]])
aux = Y_cor - (Y_cor.T @ a) * a
mod = np.linalg.norm(aux)

if mod < 1e-12:
        return None

col1 = aux / mod
col2 = np.cross(a.flatten(), col1.flatten()).reshape(3, 1)
col3 = a
R_cor = np.c_[col1, col2, col3].T
psi = np.arctan2(R_cor[1, 0], R_cor[0, 0]) * 180 / np.pi
return -psi
```

A.2.3 Correction de cap – `choose_heading.py`

La commande différentielle des moteurs est ajustée proportionnellement à l'erreur entre le cap demandé et le cap mesuré.

```
error = normalize_angle(target_heading - current_heading)
correction = kp * error
correction = clamp(correction, -max_correction, max_correction)

motor_right = BASE_SPEED - correction
motor_left = BASE_SPEED + correction
motor_left = clamp(motor_left, 0, 255)
motor_right = clamp(motor_right, 0, 255)

DDBoat7.send_arduino_cmd_motor(motor_left, motor_right)
time.sleep(0.05)
```

A.3 Comparaisons des passages magnétiques

Les figures présentent les profils mesurés dans les deux sens sur les axes nord–sud et ouest–est. Elles permettent de comparer les répétitions d'une même ligne pour chaque bateau.

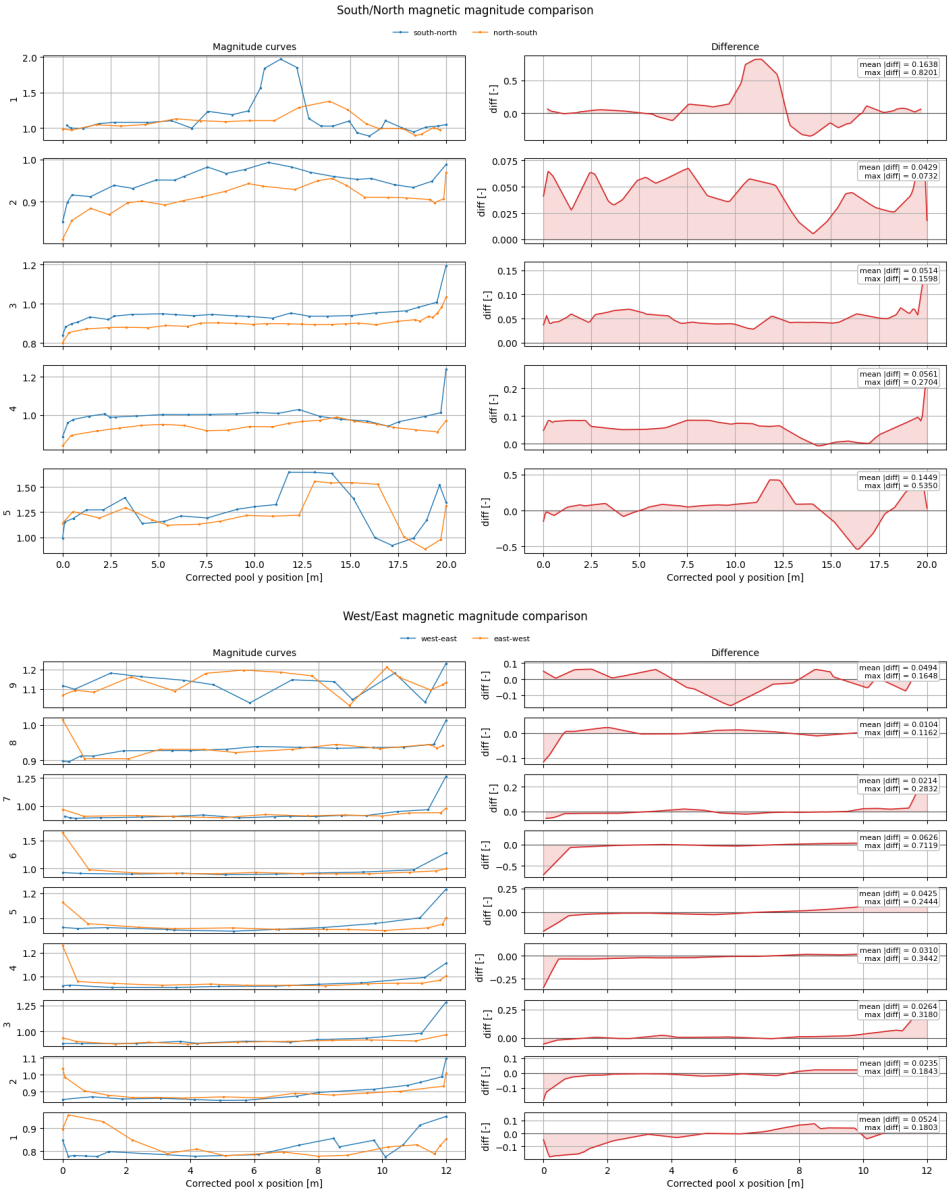


Figure A.1: Comparaison des passages nord–sud (en haut) et ouest–est (en bas) du bateau 3.

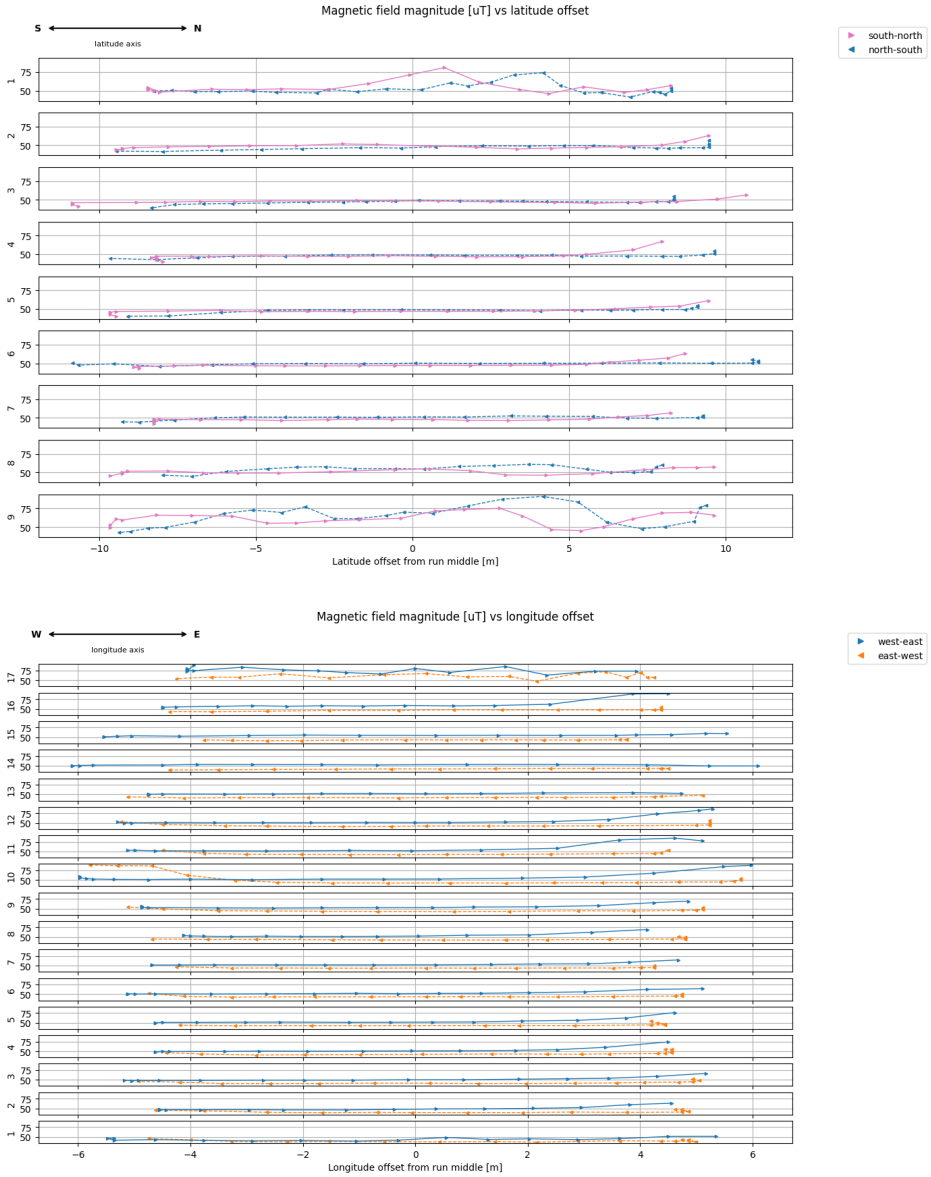


Figure A.2: Comparaison des passages nord–sud (en haut) et ouest–est (en bas) du bateau 14.