



## **THESE**

**Pour obtenir le grade de  
DOCTEUR DE L'INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS**

**Présentée et soutenue publiquement par**

**Florent Szitkar**

**Le 30 Mai 2013**

**Signature magnétique des sites hydrothermaux dans  
différents environnements : contribution des données  
de haute résolution**

### **Jury de Thèse :**

**Présidente : Dr. Mathilde Cannat<sup>(1)</sup>**

**Directeur de thèse : Dr. Jérôme Dymont<sup>(1)</sup>**

**Co-Directeur : Dr. Yves Fouquet<sup>(2)</sup>**

**Rapporteurs : Dr. Maurice Tivey<sup>(3)</sup>**

**Dr. Fabio Caratori-Tontini<sup>(4)</sup>**

**Invité : Louis Géli<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Équipe de Géosciences Marines, Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, UMR 7154 CNRS, F-75005, Paris, France.

<sup>(2)</sup> Ifremer, Brest, Département de Géosciences Marines, F-29280, Plouzane, France.

<sup>(3)</sup> Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA02543, USA.

<sup>(4)</sup> GNS Science, 1 Fairway Drive, Avalon 5010 PO Box 30-368, Lower Hutt 5040 New Zealand.



## Résumé

L'exploration sous-marine a révélé l'existence de variations en termes de géologie, minéralisations, fluides et biologie des sites hydrothermaux océaniques. Des levés magnétiques de haute résolution ont été réalisés avec un magnétomètre vectoriel fixé à la structure du sous-marin Nautille, du robot télé-opéré Victor ou du drone sous-marin AsterX d'Ifremer. Ils montrent l'existence de différentes signatures magnétiques, suivant les caractéristiques des sites hydrothermaux.

(1) Les sites à substrat basaltique se caractérisent par une anomalie magnétique (au pôle) négative, traduisant un défaut d'aimantation. Deux hypothèses sont avancées pour expliquer cette observation : la désaimantation thermique ou l'altération des minéraux magnétiques du substrat basaltique sous l'action des fluides hydrothermaux. L'étude du site inactif Krasnov suggère que la signature magnétique des sites hydrothermaux basaltiques demeure après la fin de l'activité, l'altération étant donc le phénomène dominant.

(2) Les sites haute température à substrat ultramafique se caractérisent par une anomalie magnétique positive pour les sites les plus importants, ou par l'absence de signature particulière pour les sites plus petits. Des mesures effectuées sur échantillons suggèrent que la magnétite est porteuse de l'aimantation et qu'elle demeure inaltérée dans les péridotites serpentinisées imprégnées de sulfures.

Les levés magnétiques de haute résolution peuvent ainsi jouer un rôle important pour détecter et caractériser les sites hydrothermaux actifs ou fossiles, et évaluer leur potentiel minier.

## **Abstract**

Detailed submarine exploration shows a diversity of hydrothermal sites in terms of geology, minerals, fluids and biology. High-resolution, near-seafloor magnetic surveys have been undertaken on various basalt-hosted or ultramafic-hosted hydrothermal sites using a vector magnetometer mounted on deep-sea submersible Nautilie, remotely operated vehicle (ROV) Victor, and autonomous underwater vehicle (AUV) AsterX of Ifremer. These surveys reveal different magnetic signatures, depending the characteristics of the hydrothermal sites.

- (1) Basalt-hosted sites are characterized by a negative (reduced to the pole) anomaly indicating a reduced magnetization. Two processes are often considered to explain this observation: thermal demagnetization or alteration of the magnetic minerals of the basaltic crust by the high temperature hydrothermal fluid circulation. The study of inactive hydrothermal site Krasnov suggests that the observed magnetic signature survives the cessation of hydrothermal activity and therefore alteration plays the dominant role.
- (2) High-temperature ultramafic-hosted hydrothermal sites are characterized by either a positive magnetic anomaly, indicating a stronger magnetization, at the larger sites, or a lack of significant magnetic signature at the smaller sites. Some measurements performed on rock samples suggest that the magnetic bearer is magnetite, which remains unaltered within sulfur-impregnated serpentinized peridotites.

High-resolution magnetic surveys may therefore play an important role to detect and characterize active and fossil hydrothermal sites, and to evaluate their mining potential as well.

# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	p. 7
<b>Première partie : État des Lieux</b> .....	p. 9
<b>I) Éléments de magnétisme</b> .....	p. 10
<b>II) Dorsales</b> .....	p. 12
1) Dorsales rapides.....	p. 13
2) Dorsales lentes.....	p. 14
3) Bassins d'arrière-arc.....	p. 15
<b>III) Les sites hydrothermaux</b> .....	p. 17
1) Historique.....	p. 17
2) Fonctionnement.....	p. 18
3) Élévation des cheminées.....	p. 19
4) Localisation des sites.....	p. 20
a) Hydrothermalisme sur les basaltes de dorsale.....	p. 21
b) Hydrothermalisme sur substrat ultramafique.....	p. 22
→ Zonation.....	p. 25
→ Composition des fluides dans les environnements ultramafiques.....	p. 25
→ Composition chimique des dépôts hydrothermaux ultramafiques.....	p. 26
c) Hydrothermalisme dans les bassins d'arrière-arc.....	p. 26
5) Variabilité des sites.....	p. 27
a) Lost City.....	p. 27
b) Rainbow.....	p. 28
6) Minéralisations des sites.....	p. 30

a) Cas des sites basaltiques.....	p. 30
b) Cas des sites ultramafiques.....	p. 33
→ <i>Éléments natifs</i> .....	p. 34
→ <i>Éléments de gangue</i> .....	p. 34
<b>7) Sites actifs et inactifs.....</b>	<b>p. 36</b>
a) Difficultés techniques liées à l'exploitation.....	p. 36
b) Problèmes de la localisation des sites inactifs.....	p. 37
→ <i>Nature du panache</i> .....	p. 37
→ <i>Comment les trouve-t-on ?</i> .....	p. 37
→ <i>Quels instruments utilise-t-on ?</i> .....	p. 38
c) Méthodes de détection des sites inactifs.....	p. 38
→ <i>Cartographie et contrôle géologiques des minéralisations</i> .....	p. 38
→ <i>Cartographie géophysique de surface</i> .....	p. 39
→ <i>Cartographie géophysique de fond de mer</i> .....	p. 39
d) Analogies avec la géophysique aéroportée.....	p. 40
→ <i>Description des techniques utilisées</i> .....	p. 40
→ <i>Comparaison avec la géophysique de fond de mer</i> .....	p. 40
<b>8) Signature magnétique des sites hydrothermaux.....</b>	<b>p. 42</b>
a) Cas du site TAG.....	p. 42
b) Cas des sites du segment Endeavour.....	p. 44
c) Autres cas.....	p. 46
<b>9) Conclusions.....</b>	<b>p. 47</b>

## **Deuxième Partie : Méthodologie..... p. 49**

<b>I) Outils d'acquisition.....</b>	<b>p. 50</b>
1) Le ROV Victor.....	p. 50
2) Les AUV.....	p. 52
3) Le submersible.....	p. 53
4) Magnétomètre vectoriel.....	p. 54

<b>II) Méthodes d'acquisition.....</b>	<b>p. 57</b>
<b>III) Calcul des anomalies.....</b>	<b>p. 59</b>
<b>1) Données brutes.....</b>	<b>p. 59</b>
<b>2) Correction des effets d'attitude et du sous-marin.....</b>	<b>p. 61</b>
a) Principe de correction du champ de l'engin sous-marin.....	p. 61
b) « Boucles de calibration » .....	p. 63
c) Choix du facteur d'amortissement.....	p. 68
d) Méthode alternative.....	p. 71
e) Réduction au pôle.....	p. 72
<b>IV) Calcul de l'aimantation.....</b>	<b>p. 74</b>
<b>1) Les méthodes existantes.....</b>	<b>p. 74</b>
a) Méthode de Parker et Huestis (1974) .....	p. 74
b) Méthode de Hussenoder et al. (1992) .....	p. 75
<b>2) Inversion par comparaison à un modèle direct (Honsho et al.,</b>	
<b>2009) .....</b>	<b>p. 77</b>
a) Méthode.....	p. 77
b) Limites de la méthode.....	p. 78
c) Une amélioration.....	p. 79
d) Limitations.....	p. 82
<b>3) Méthode de Honsho et al. (2012) .....</b>	<b>p. 85</b>

**Troisième Partie : Signature magnétique des sites hydrothermaux de la dorsale médio-Atlantique.....** p. 87

<b>I) Introduction.....</b>	<b>p. 88</b>
<b>II) Site Krasnov.....</b>	<b>p. 90</b>

<b>1) Observations</b> .....	<b>p. 90</b>
<b>2) Résultats</b> .....	<b>p. 94</b>
<b>a) Zone hydrothermale</b> .....	<b>p. 94</b>
<b>b) Modélisation directe</b> .....	<b>p. 95</b>
→ <i>1<sup>ère</sup> étape : Influence de la bathymétrie</i> .....	<b>p. 96</b>
→ <i>2<sup>nd</sup>e étape : Estimation de l'épaisseur de la couche non aimantée</i> .....	<b>p. 96</b>
→ <i>3<sup>ème</sup> étape : Estimation de l'épaisseur de la couche aimantée</i> .....	<b>p. 100</b>
→ <i>4<sup>ème</sup> étape : Variations latérales de l'aimantation</i> .....	<b>p. 102</b>
→ <i>5<sup>ème</sup> étape : Ajout d'une désaimantation au niveau du site actif</i> .....	<b>p. 105</b>
→ <i>6<sup>ème</sup> étape : Estimation des dimensions du conduit hydrothermal</i> .....	<b>p. 108</b>
→ <i>Conclusions</i> .....	<b>p. 111</b>
 <b>III) Site Rainbow</b> .....	 <b>p. 112</b>
<b>1) Observations</b> .....	<b>p. 112</b>
<b>2) Résultats</b> .....	<b>p. 114</b>
<b>3) Inversion bayésienne</b> .....	<b>p. 119</b>
<b>4) Modélisation directe</b> .....	<b>p. 123</b>
<b>5) Ghost City</b> .....	<b>p. 127</b>
 <b>IV) Site Ashadze</b> .....	 <b>p. 129</b>
<b>1) Observations</b> .....	<b>p. 129</b>
<b>2) Résultats</b> .....	<b>p. 132</b>
<b>a) Levé à 50m</b> .....	<b>p. 132</b>
<b>b) Levés à 20m et 10m</b> .....	<b>p. 133</b>
<b>c) Inversion bayésienne</b> .....	<b>p. 136</b>
<b>d) Modélisation directe</b> .....	<b>p. 140</b>
<b>e) Ashadze 2</b> .....	<b>p. 142</b>
 <b>V) Site Logachev</b> .....	 <b>p. 144</b>



1) Observations.....	p. 144
2) Résultats.....	p. 147
a) Levé à 50m.....	p. 147
b) Levé à 20m.....	p. 149
c) Modélisation directe.....	p. 151
VI) Interprétations.....	p. 154
VII) Conclusions.....	p. 156

## **Quatrième Partie : Exploration minérale dans l’Océan Pacifique Occidental**..... p. 157

I) Introduction.....	p. 158
II) Contexte.....	p. 159
1) Géologie.....	p. 160
2) Cartographie régionale.....	p. 161
III) Campagne Futuna 1.....	p. 162
1) Introduction.....	p. 162
2) Ride volcanique.....	p. 163
a) Données de l’AUV.....	p. 163
b) Estimation de l’épaisseur des formations pyroclastiques.....	p. 165
c) Données du Nautilé.....	p. 168
→ Anomalies.....	p. 168
→ Aimantations.....	p. 170
3) Caldeira A.....	p. 173
a) Données de l’AUV.....	p. 173
b) Données du Nautilé.....	p. 176

→ <i>Anomalies</i> .....	p. 176
→ <i>Aimantations</i> .....	p. 178
<b>4) Caldeira B</b> .....	<b>p. 181</b>
a) <b>Résultats</b> .....	<b>p. 181</b>
b) <b>Aimantations</b> .....	<b>p. 183</b>
<b>5) Plongées isolées</b> .....	<b>p. 185</b>
<b>6) Conclusions</b> .....	<b>p. 189</b>
<b>IV) Campagne Futuna 3</b> .....	<b>p. 190</b>
<b>1) Introduction</b> .....	<b>p. 190</b>
<b>2) Zone 1</b> .....	<b>p. 191</b>
a) <b>Données de l'AUV</b> .....	<b>p. 191</b>
b) <b>Données du Nautilé</b> .....	<b>p. 193</b>
<b>3) Zone 2</b> .....	<b>p. 206</b>
a) <b>Données de l'AUV</b> .....	<b>p. 206</b>
b) <b>Données du Nautilé</b> .....	<b>p. 208</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>p. 212</b>
<b>General conclusion</b> .....	<b>p. 214</b>
<b>Travaux à venir</b> .....	<b>p. 216</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>p. 218</b>
<b>Références</b> .....	<b>p. 220</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>p. 240</b>

# Introduction

Depuis la découverte des sources hydrothermales à l'axe des dorsales océaniques à la fin des années 70, la communauté scientifique a étendu l'exploration sous-marine régionale ainsi que les études détaillées sur site, révélant une grande variété de sites hydrothermaux en termes de substrat géologique, de minéralisations, de fluides émis et d'écosystèmes. Ces efforts ont mis en évidence des dépôts de sulfures métalliques importants. Leurs teneurs élevées en métaux et minéraux et les cours croissants des matières premières, conjugués aux avancées des technologies sous-marines ont rendu réaliste l'exploitation de ces gisements.

Le but de cette étude est d'étudier la signature magnétique des différents types de sites hydrothermaux et de l'utiliser comme outil pour localiser les sites inactifs et caractériser l'importance des dépôts hydrothermaux. Le travail effectué est divisé en deux grandes parties. La première est axée sur plusieurs sites hydrothermaux de la dorsale Médio-Atlantique ayant fait l'objet de deux campagnes océanographiques (Serpentine en Mars 2007 et Momar Dream en Août 2008) (Fouquet et al., 2008). Certains de ces sites ont la particularité de se trouver sur un substrat ultramafique, et non pas basaltique, comme celui de la plupart des systèmes hydrothermaux connus. L'étude des données magnétiques de haute résolution fournies par le magnétomètre vectoriel de l'IPGP monté sur le ROV Victor 6000 de l'Ifremer a montré que la signature magnétique de ces sites hydrothermaux est différente de celle des sites à substrat basaltique.

Le site hydrothermal inactif Krasnov, situé également le long de la dorsale Médio-Atlantique mais sur un substrat basaltique, est un site fossile (Fouquet et al., 2008) qui conserve la signature magnétique typique des sites actifs à substrat basaltique. Ce constat est utile pour comprendre l'origine de cette signature.

La seconde grande partie est consacrée à la présentation de deux campagnes d'exploration entreprises par l'Ifremer dans l'Océan Pacifique Occidental, dont l'objectif est de localiser et de caractériser des indices minéralisés dans les ZEE françaises. Les outils développés au cours des travaux antérieurs ont permis de traiter les données des

engins sous-marins en temps réel pour aider, en complément des études physico-chimiques des panaches hydrothermaux et des données géologiques, à définir la stratégie d'exploration de la campagne. Nous soulignons à cet égard la complémentarité des deux engins mis en œuvre (AUV et Nautilie) et l'intérêt du magnétisme dans l'élaboration des stratégies d'exploration des systèmes hydrothermaux sous-marins.

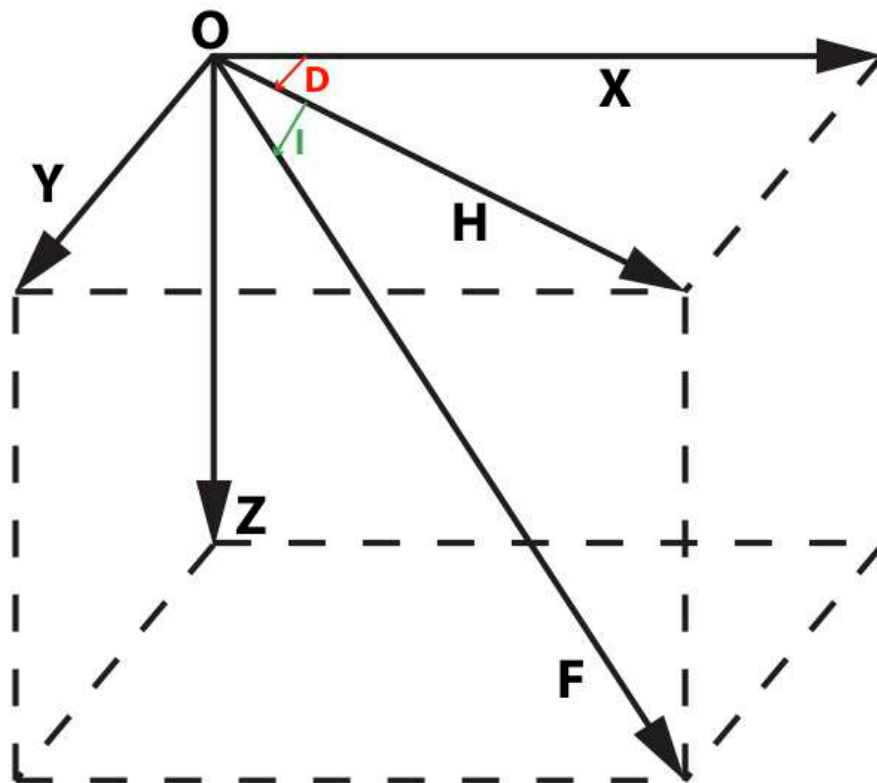
# 1<sup>ère</sup> Partie

## État des Lieux

# I) Éléments de magnétisme

Le champ magnétique terrestre est une superposition de plusieurs champs d'origines variables. Le champ principal trouve son origine dans les mouvements de convection du noyau externe fluide et rend compte des grandes longueurs d'onde avec des intensités moyennes de l'ordre de 30 à 60 $\mu$ T. Les champs lithosphérique et crustal trouvent leurs sources dans des corps de petites dimensions de la lithosphère et de la croûte. On parle alors d'anomalies magnétiques car leur contraste est faible.

Le champ magnétique se caractérise par ses trois composantes, son intensité totale  $F$ , son inclinaison  $I$  et sa déclinaison  $D$  (Figure 1). Il connaît des variations d'intensité géographiques et temporelles.



**Fig. 1 :** Principaux éléments du champ magnétique terrestre. Les composantes  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  sont par convention comptées positivement vers le Nord, l'Est et le bas respectivement. Elles forment un trièdre direct et le champ total est égal à leur moyenne quadratique. La déviation  $D$  par rapport au Nord vrai est appelée déclinaison et est comptée positivement vers l'Est. L'angle formé par le vecteur  $F$  et le plan horizontal est l'inclinaison. Elle est comptée positivement vers le bas.

Le champ magnétique actuel peut être mesuré directement grâce à des magnétomètres installés dans des observatoires, portés par des satellites, fixés aux ailes d'un avion ou tractés par un bateau. Il peut également être mesuré de manière indirecte car, lorsque certaines roches se mettent en place, elles acquièrent une aimantation permanente caractéristique du champ terrestre à ce moment. Cette aimantation est connue sous le nom d'aimantation rémanente primaire (Merrill and McFadden, 1995).

Une aimantation thermorémanente est acquise lors du refroidissement des roches volcaniques contenant des minéraux magnétiques. Dans le cas des basaltes océaniques refroidis au contact de l'eau de mer, cette acquisition est quasi-instantanée. L'aimantation ainsi acquise reflète les caractéristiques du champ magnétique au moment et à l'endroit de l'éruption. Ainsi, le plancher océanique est un bon enregistreur de la polarité du champ magnétique.

L'information contenue dans le signal magnétique dépend de l'éloignement entre le magnétomètre et les sources. Lorsque la distance augmente, la longueur d'onde des phénomènes étudiés s'accroît et l'influence d'un niveau profond se fait sentir. Les mesures réalisées à partir des navires à la surface des océans se situent à plusieurs kilomètres au dessus des sources et mettent donc en évidence des phénomènes régionaux et/ou profonds, ce qui a permis aux anomalies magnétiques océaniques de jouer un rôle majeur dans l'élaboration de la tectonique des plaques.

À l'inverse, les mesures effectuées près du fond traduisent des phénomènes de plus courte longueur d'onde et sont liés à des objets non détectés depuis le navire en surface. Ces mesures de haute résolution concernent une couche superficielle du plancher océanique et sont adaptées à l'étude de l'activité hydrothermale.

## II) Dorsales

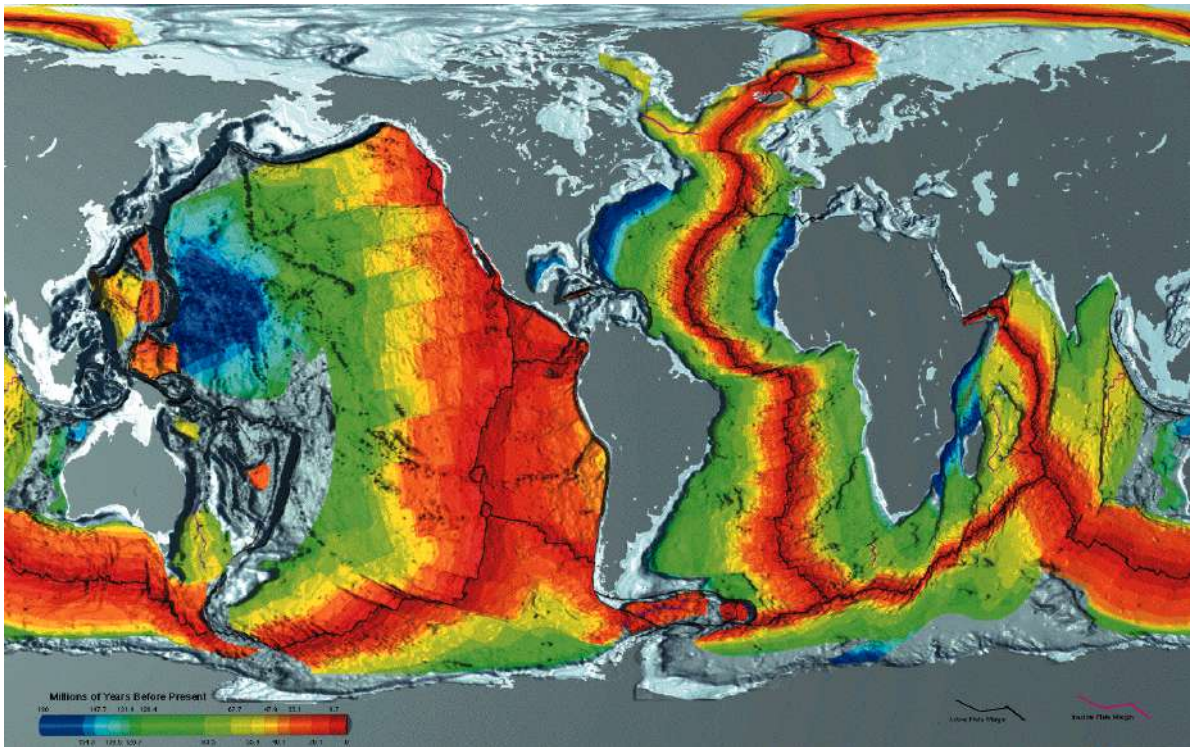
Une dorsale (ou ride médio-océanique) est une frontière divergente entre deux plaques tectoniques, lieu de création de lithosphère océanique. Ce nom est attribué en référence à la topographie de la lithosphère récente, plus chaude et donc plus légère, qui forme un relief par isostasie. Avec l'âge et l'éloignement de la dorsale, la lithosphère océanique se refroidit, s'alourdit et son toit, qui constitue le fond océanique, s'approfondit progressivement. La présence de nombreuses failles normales et d'une sismicité importante atteste de la tectonique divergente de la région.

À la surface du globe, les dorsales s'étendent sur plus de 64 000km, ce qui en fait le massif montagneux le plus important de la planète et leurs reliefs culminent généralement entre 2000m et 3000m sous le niveau de la mer.

La vitesse d'écartement varie de manière importante d'une dorsale à l'autre. Elle est comprise entre 1.5cm/an dans les cas de la dorsale Médio-Atlantique ou de la Mer Rouge et atteint 18cm/an pour la dorsale Est-Pacifique. La morphologie de la dorsale est directement dépendante de son taux d'expansion et de la température du manteau sous-jacent. Dans le cas des dorsales lentes, l'essentiel de l'activité volcanique se concentre dans le rift axial, large de 25 à 30km et pouvant atteindre 1km de profondeur, alors que les dorsales rapides présentent une structure en forme de dôme étroit (<1km de large) haut de quelques centaines de mètres avec un axe moins marqué.

La figure 2 met en évidence le réseau des dorsales océaniques dans le monde.





**Fig. 2 :** Carte des fonds océaniques à l'échelle mondiale présentant l'âge de la lithosphère océanique selon sa position par rapport aux dorsales. Les parties les plus jeunes sont clairement associées aux axes d'accrétion. Elles sont nettement plus étendues dans le cas de la dorsale Est-Pacifique que dans celui de la dorsale Médio-Atlantique ou de la Sud-Ouest Indienne. Cette observation est à mettre en relation avec le taux d'expansion variable des dorsales. L'aspect discontinu du rift met en évidence le jeu des failles transformantes (Muller, 2008).

## 1) Dorsales rapides

Les dorsales rapides ont des taux d'expansion de 100 à 200mm/an. Parmi elles, la dorsale Est-Pacifique, ou EPR, est la mieux documentée. Elle marque la limite entre les plaques Pacifique et de Nazca et son taux d'écartement moyen atteint 150mm par an.

La topographie des dorsales rapides est relativement peu marquée. En effet, l'afflux de chaleur et de magma joue un rôle important dans la morphologie et le comportement des dorsales. Dans le cas des dorsales rapides, cet approvisionnement est suffisant pour maintenir les deux plaques tectoniques à une température élevée. Leur densité reste donc assez faible pour empêcher la subsidence. L'axe actif est ainsi caractérisé par un « haut axial » doté d'un petit graben sommital (Carbotte et al., 2003).

Le volcanisme au niveau de ces dorsales est caractérisé par la présence d'éruptions fissurales. Ces éruptions sont alimentées par des chambres magmatiques pouvant se situer à seulement 500m de profondeur et s'étirant sur des dizaines de kilomètres le long de l'axe.

## **2) Dorsales lentes**

Au niveau des dorsales lentes et ultra-lentes, l'activité volcanique est souvent discontinue et préférentiellement localisée au centre des segments. Aux extrémités des segments, des failles de détachement portent fréquemment à l'affleurement les péridotites serpentinisées issues du manteau (Cannat, 1993 ; Cannat and Casey, 1995 ; Dick, 1989 ; Dick et al., 2003).

L'anomalie résiduelle négative de gravité constatée au niveau de la partie centrale des segments de dorsale suggère l'existence d'une croûte volcanique relativement épaisse et d'un manteau doté d'une température élevée en profondeur. À contrario, les extrémités de segments sont caractérisées par une anomalie résiduelle positive, démontrant l'existence d'une fine croûte basaltique ou de serpentines (Cannat and Casey, 1995 ; Escartin and Lin, 1998 ; Escartin and Cannat, 1999). Les roches ultramafiques sont fréquemment observées le long des murs de la vallée axiale, à proximité des discontinuités (Gracia et al., 1997). Dans certaines portions des dorsales lentes et ultra-lentes, la présence de péridotites est également attestée sur le fond de la vallée centrale (Dick et al., 2003 ; Michael et al., 2003 ; Sauter et al., 2004). Ces péridotites sont constituées à partir de roches du manteau, localement injectées d'intrusions basaltiques visibles sous forme de petits corps gabbroïques (Cannat and Casey, 1995 ; Dick, 1989 ; Hellebrand et al., 2000 ; Johnson and Dick, 1992 ; Seyler et al., 2003).

En raison du faible taux d'approvisionnement en magma le long des dorsales lentes, l'extension océanique est principalement accommodée par le jeu de la tectonique (Bougault et al., 1993 ; Cannat et al., 1997 ; Lagabrielle et al., 1998 ; Rona et al., 1987). Ce phénomène conduit à la formation d'un substrat principalement constitué de roches

ultramafiques issues du manteau et associées à des intrusions gabbroïques. Ces structures sont le résultat de l'action sur le long terme (plusieurs millions d'années) de failles de détachement dotées d'un angle faible et d'un déplacement important (Cannat et al., 1997 ; Karson and Rona, 1990 ; Tucholke et al., 1998), susceptibles d'exposer les roches issues de la croûte inférieure et du manteau supérieur au niveau des dorsales océaniques.

En tant que dorsale lente, la dorsale Médio-Atlantique est ainsi constituée de nombreuses structures exposant les roches ultramafiques et gabbroïques le long de failles de détachement (Cann et al., 1997 ; Escartin et al., 2008 ; Searle et al., 2007 ; Smith et al., 2006). Ces zones de domaine mantellique sont associées à une asymétrie de la dorsale (Escartin et al., 2008). Les failles de détachement constituent le processus principal permettant d'amener les roches ultramafiques à la surface de la lithosphère océanique (Escartin et al., 2008).

### **3) Bassins d'arrière-arc**

Les bassins d'arrière-arc sont des structures géologiques sous-marines associées aux zones de subduction et se situent donc à proximité des frontières de convergence entre plaques tectoniques. Les bassins les plus connus se situent dans l'Océan Pacifique Occidental.

Les bassins d'arrière-arc sont généralement caractérisés par une longueur importante (comprise entre plusieurs centaines et quelques milliers de kilomètres) mais une relative étroitesse (quelques centaines de kilomètres). Cette largeur limitée est à mettre en relation avec le fait que l'activité magmatique dépend des phénomènes de convection dans le manteau, eux-mêmes concentrés à proximité des zones de subduction mais également avec l'âge de ces bassins, qui sont beaucoup plus jeunes et éphémères que les grandes structures océaniques.

Comme pour les dorsales, les taux d'écartement varient de quelques centimètres par an pour les plus lents (Bassin des Mariannes) à 15cm/an dans le cas du Bassin de Lau (Pacifique Occidental). Certains d'entre eux sont également caractérisés par leur

taux d'expansion asymétrique. Dans le cas du Bassin des Mariannes, le taux d'expansion est ainsi de 2 à 3 fois plus rapide dans sa partie Ouest que dans sa partie Est (Deschamps et Fujiwara, 2003), alors qu'à son extrémité Sud, la position du rift à proximité immédiate du front volcanique suggère que la quasi-totalité de l'accrétion crustale a été asymétrique (Martinez et al., 2000). Cette situation trouve son équivalent dans la partie Nord du Bassin, dans laquelle une asymétrie marquée a également été constatée (Yamazaki et al., 2003).

Les principaux bassins d'arrière-arc sont situés dans la zone des Mariannes, des Tonga-Kermadec, de la mer du Scotia, de Manus, de Brunfield (Antarctique), des Sandwich, dans le Nord des Fidji et dans la mer Tyrrhénienne. Les subductions continentales ne génèrent pas de bassins d'arrière-arc (exemple de la subduction des Andes). Il est également possible de citer des exemples de bassins fossiles tels que la mer du Japon ou le Bassin des Kouriles.

L'une des grandes différences entre les bassins arrière-arc et les dorsales est la nature des laves. Les dorsales sont presque exclusivement constituées de basaltes alors que dans les bassins d'arrière-arc, en particulier les plus jeunes, le volcanisme, souvent bimodal, associe basaltes, andésites et rhyolites.

# III) Les sites hydrothermaux

## 1) Historique

La mise en place de cellules de convection hydrothermales implique une source de chaleur peu profonde, généralement constituée d'une chambre magmatique. Les circulations hydrothermales sont ainsi une conséquence indirecte des mouvements des plaques tectoniques et permettent d'évacuer par convection une partie importante de la chaleur interne de la Terre.

Les systèmes hydrothermaux sous-marins furent découverts en 1977 par le sous-marin américain Alvin. Lors d'une plongée à l'axe de la dorsale des Galápagos, d'importantes structures minérales ressemblant à des termitières furent observées par 2630m de fond (Malahoff et al. 1983). Les mesures montrèrent qu'un fluide chargé en métaux, méthane et sulfure d'hydrogène s'en échappait à des températures de quelques dizaines de degrés.

Lors d'une plongée postérieure, menée en 1979 sur la même zone et avec le même submersible, des biologistes découvrirent un écosystème inconnu, profitant des fluides minéralisés et de la chaleur émise par les monts hydrothermaux pour former une chaîne alimentaire reposant sur la chimiosynthèse, à partir de composés tels que H<sub>2</sub>S et CH<sub>4</sub> contenus dans le fluide hydrothermal. Cette oasis de vie, dans un milieu pourtant hostile, est riche et varié. Les chercheurs y ont identifié des espèces de bivalves, de poissons, de crustacés et de poulpes. En 1978 les premiers fumeurs noirs de haute température (350°C) ont été découverts sur la dorsale du Pacifique Est à la latitude de 21°N au large du Mexique (Corliss et al., 1979 ; Edmond et al., 1979). De nouvelles campagnes permirent par la suite de mener une étude approfondie de ces environnements atypiques. Ainsi, entre 1982 et 1999, neuf campagnes furent réalisées par des scientifiques français sur les sites hydrothermaux de 13°N sur la dorsale du Pacifique Est, au large des côtes de la Californie et du Mexique.

## 2) Fonctionnement

L'hydrothermalisme océanique est une conséquence indirecte de l'extension et de l'accrétion observées au niveau des dorsales. Le magma s'accumule dans des chambres magmatiques situées à quelques kilomètres de profondeur. L'écartement des plaques océaniques génère des failles d'extension qui permettent la circulation de l'eau de mer en profondeur. Le refroidissement des laves augmente également la porosité de la croûte océanique. L'eau de mer froide (environ 2°C) peut alors s'y infiltrer et se réchauffer à proximité du magma chaud (près de 1200°C). La diminution de la densité de l'eau lors de son réchauffement à des températures voisines de 400°C permet la remontée des fluides et l'installation de cellules de convection hydrothermale. En raison de la pression et de la température, les roches traversées par ces fluides sont fortement altérées et lessivées. Au cours de ces échanges, l'eau s'acidifie et s'enrichit en éléments métalliques.

La composition du fluide hydrothermal émis varie avec la température et la nature des roches rencontrées lors de la remontée vers le plancher océanique et diffère de celle de l'eau de mer, oxygénée et faiblement alcaline. À sa sortie, le fluide est caractérisé par sa température élevée (entre 350 et 400°C), un pH acide (autour de 3), de fortes concentrations en gaz dissous ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) et en ions métalliques ( $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) ainsi que par une anoxie (absence d'oxygène) marquée. Il se caractérise en revanche par de faibles concentrations en ions phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). La salinité est en général proche de celle de l'eau de mer, mais la décompression des fluides lors de leur remontée vers le plancher océanique conduit à des séparations de phase qui génèrent de fluides de faible salinité et des saumures. La salinité est très variable et peut aller de 0.1 à 2 fois celle de l'eau de mer.

Lors de la découverte des sources hydrothermales, il était admis que la composition du fluide demeurait relativement constante et stable. Grâce à la découverte de nouveaux sites, sa variabilité est désormais démontrée. La composition des fluides peut être influencée par le degré de mélange du fluide hydrothermal avec l'eau de mer avant son émergence sur le plancher océanique. Dans certains contextes, en particulier

les bassins d'arrière-arc, des fluides magmatiques peuvent également être injectés dans les circulations hydrothermales. Avec le temps, le fluide peut conserver une même composition ou évoluer selon des rythmes plus ou moins rapides.

En fonction de la composition du fluide hydrothermal, on distingue deux principaux types de fumeurs : les fumeurs noirs, dotés d'un fluide hydrothermal chaud et riche en soufre, et les fumeurs blancs, dont le fluide est moins chaud et contient peu de particules. Dans les couches supérieures du plancher océanique, les basaltes, gabbros et péridotites présentent des minéraux altérés par un lessivage systématique et la dissolution par l'eau de mer. Ainsi, les plagioclases sont transformés en argiles, les pyroxènes et les olivines en serpentines. Ces minéraux sont hydratés, ce qui leur apporte des radicaux hydroxyle ( $\text{HO}\cdot$ ) fournis par l'eau.

### **3) Élévation des cheminées**

Lors de son émission, le fluide chaud rencontre de l'eau de mer froide, provoquant une précipitation successive des minéraux selon leur stabilité dans les conditions physico-chimiques rencontrées. Une cheminée hydrothermale se forme alors au niveau de la source et s'élève en structures concentriques. Cette formation se déroule en plusieurs étapes :

Dans un premier temps, une matrice poreuse d'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) se forme à partir des ions sulfate de l'eau de mer. L'édifice croît verticalement en s'enrichissant par l'intérieur en dépôts métalliques sulfurés (fer, cuivre et zinc). Petit à petit, ce dépôt entraîne le colmatage des matrices poreuses initiales et une barrière étanche se crée entre le fluide et l'eau environnante (Tivey, 2004).

Dans un second temps, l'isolation du cœur de la cheminée provoque une augmentation de la température. Des sulfures de fer et de cuivre (pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, isocubanite) précipitent à l'intérieur de la cheminée pour former le conduit central. Progressivement, la structure croît latéralement avec le remplacement de l'anhydrite par des sulfures, plus stables dans les nouvelles conditions de température de la cheminée.

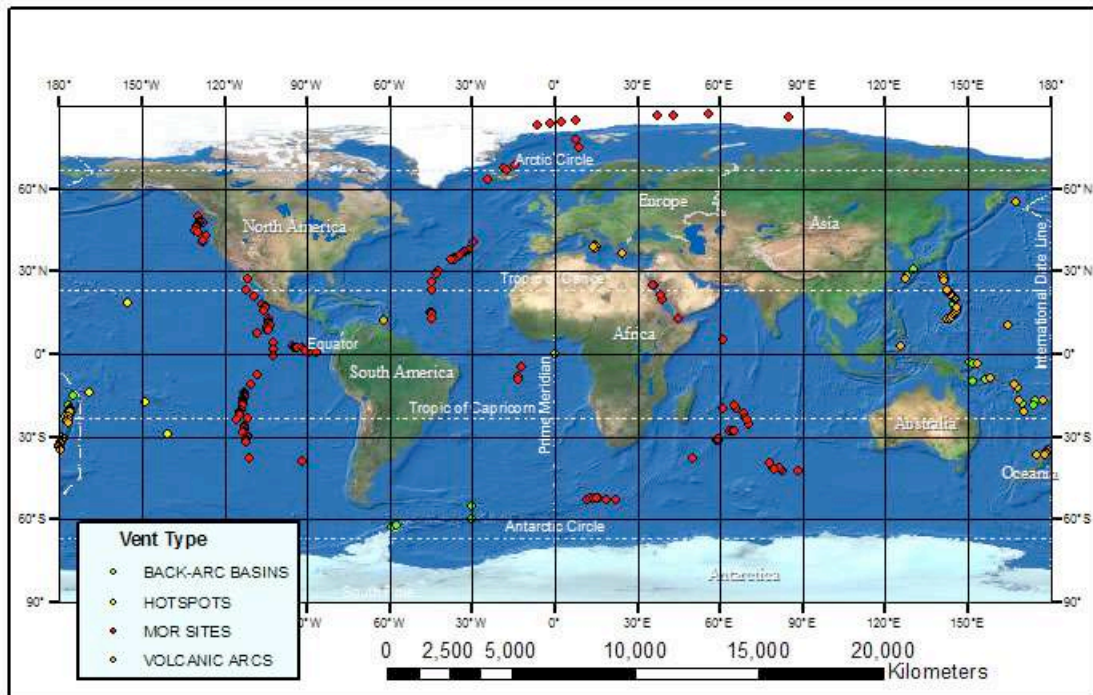
Au cours de la période d'activité du fumeur, le chemin emprunté par le fluide hydrothermal peut varier, utilisant une multitude de cavités et de canaux. Cette multiplicité peut conduire à la formation d'extensions latérales. Les dimensions d'un fumeur varient de quelques cm à 50m de hauteur, pour un diamètre à la base pouvant atteindre une dizaine de mètres.

Les structures évoluent au cours du temps et les fumeurs sont éphémères : ils ont une durée de vie moyenne de 10 à 10 000 ans mais les cheminées peuvent s'écrouler ou le conduit se colmater par précipitation des minéraux. La zone active le long de la dorsale peut également se déplacer et entraîner la formation de nouveaux fumeurs et la disparition des anciens. Un site repéré lors d'une mission peut ainsi avoir cessé de fonctionner avant qu'une autre n'y retourne. Sur les dorsales lentes, un champ hydrothermal peut être actif pendant plusieurs dizaines de milliers d'années, ce qui permet par accumulation de cheminées la formation d'un mont hydrothermal sulfuré qui s'agrandit également par des précipitations internes et par un remplacement progressif du substratum altéré par des sulfures.

## **4) Localisation des sites**

Des systèmes hydrothermaux ont été découverts jusqu'à des profondeurs de 5000m. Ils sont généralement situés dans des zones de forte activité tectonique et volcanique, comme le long de la dorsale Médio-Atlantique, de la dorsale Est-Pacifique ou des bassins d'arrière-arc du Pacifique Occidental. La figure 3 ci-dessous résume les emplacements des principaux sites connus selon le contexte tectonique dans lequel ils se trouvent.





**Fig. 3 :** Localisation des principaux sites ou panaches hydrothermaux connus selon les grands types d'environnements géodynamiques.

### a) Hydrothermalisme sur les basaltes de dorsale

Les environnements basaltiques présents le long de l'axe des dorsales abritent la plupart des sites hydrothermaux connus, actifs ou inactifs. Certains ont été explorés lors de campagnes océanographiques. Parmi les plus étudiés figurent les sites du segment Endeavour et TAG, situés respectivement sur la dorsale Juan de Fuca, à l'Ouest du Canada et sur la dorsale Médio-Atlantique.

Le premier, découvert en 1982, se situe à environ 200km au Sud-Ouest de l'île de Vancouver. Il se trouve à une profondeur de 2200m et couvre une surface approximative de 82km<sup>2</sup> pour un total de 5 zones actives incluant des fumeurs noirs mais également des zones de diffusion plus froide. Les températures des fumeurs noirs sont généralement proches de 300°C. La formation de larges cheminées polymétalliques survient lorsque les minéraux dissous et les ions métalliques transportés par les fluides hydrothermaux précipitent au contact de l'eau de mer. Les flancs des cheminées et l'environnement immédiat du site abritent une faune abondante dont la composition

évolue constamment, en réponse aux fluctuations des températures et des conditions physico-chimiques.

Le site TAG (Trans Atlantic Geotraverse) se situe au pied du mur Est de la vallée axiale de la dorsale Médio-Atlantique. Il est localisé à proximité de sources de chaleur sous-jacentes accroissant le gradient thermique (Thompson et al., 1988), à une distance de 11.9km de l'axe central de la vallée. Compte tenu du taux d'expansion évalué à 1.3cm/an, l'âge de la croûte au niveau du site hydrothermal est compris entre 284 000 et 912 000 ans (Lattimore et al. 1974 ; McGregor et al., 1977). Cependant l'âge des minéralisations et sans doute des laves près du site hydrothermal est inférieur à 40 000 ans (Lalou et al., 1990). Les dépôts hydrothermaux consistent principalement en des oxydes de manganèse disposés en strates.

Les dépôts hydrothermaux sur substrat basaltique présentent une zonation verticale relativement bien définie (Fouquet et al., 2010). La plupart des dépôts de surface ou subsurface sont riches en zinc, alors que ceux situés à plus grande profondeur présentent des teneurs en cuivre élevées. Cette zonation traduit le remplacement successif à basse température d'un assemblage de pyrite et sphalérite par un autre, à plus haute température, composé de chalcopyrite et pyrite ou pyrrhotite (Sangster and Scott, 1976). Cette transformation s'accompagne d'un enrichissement du zinc et de ses éléments associés (plomb, arsenic, cadmium, argent, antimoine) à la surface des dépôts (Fouquet et al., 1998b ; Hannington et al., 1998 ; Humphris et al. 1995). Ces phénomènes de dissolution et reprécipitation successives ont été clairement mis en évidence par les forages ODP effectués sur le mont hydrothermal TAG. Les fumeurs de haute température y sont répartis sur une petite zone au niveau du sommet. Il s'agit d'un site de dimensions restreintes, alors que les émissions sur les sites ultrabasiques sont nettement plus dispersées et diffuses.

## **b) Hydrothermalisme sur substrat ultramafique**

Plusieurs sites sur substrat ultramafique ont été découverts le long des dorsales lentes. Quatre types de dépôts hydrothermaux associés à ce substrat ont pu être identifiés le long de la dorsale Médio-Atlantique (Fouquet et al., 2010). Il s'agit des dépôts de sulfure de haute température, des cheminées de carbonates de basse

température, des altérations pervasives avec silicification des roches ultramafiques et précipités d'oxyde de manganèse, et enfin des veines profondes de sulfure de quartz.

Les structures ultramafiques en forme de dôme situées dans le coin interne des intersections entre la dorsale et les failles transformantes sont des zones privilégiées pour le dégazage du méthane (Charlou et al., 1997 ; Charlou et al., 1998), ainsi que pour la création de systèmes hydrothermaux carbonatés de faible température (Kelley et al., 2001). Le méthane est un sous-produit de la réaction de serpentinisation (Charlou et al., 1991). Les processus hydrothermaux associés à la serpentinisation sont par conséquent assez variables en termes de température et de types de dépôts.

Quatre sites hydrothermaux sont situés sur un dôme de roches ultramafiques dans les coins internes de l'intersection entre la dorsale Médio-Atlantique avec une faille transformante. Il s'agit des sites Lost City, Saldanha, Menez Hom et 15°05'N. Deux autres sites (Rainbow et Nibelungen) sont situés dans la partie centrale d'un décalage non transformant. Enfin, quatre sites (Logachev 1 & 2 et Ashadze 1 & 2) sont contrôlés par des failles de détachement profondes sur les flancs de la vallée axiale (Fouquet et al., 2010).

Comme dans le cas des champs hydrothermaux sur substrat basaltique, la morphologie des dépôts sulfurés sur substrat ultramafique est contrôlée par différents facteurs locaux tels que la profondeur, la séparation de phase, la fracturation hydraulique et la perméabilité (Fouquet, 1997). Dans les environnements de haute température comme à Rainbow, Ashadze ou Logachev, la décharge semble moins focalisée que dans le cas des sites basaltiques. Cette décharge relativement diffuse, créée par les fumeurs noirs, est à l'origine de dépôts assez plats, sans monts clairement organisés, ce qui constitue une différence notable par rapport à l'environnement basaltique. À cette observation s'ajoute une circulation pervasive de fluides de haute température à proximité de la surface, créant des zones de très forte altération et accélérant les processus de précipitation des sulfures en surface ou subsurface. Elle permet également un remplacement complet des roches ultramafiques par des sulfures massifs, ainsi que l'apparition de larges dépôts minéralisés. Un remplacement total des serpentines par des sulfures de cuivre massifs a en effet été observé dans les échantillons prélevés sur Rainbow (Fouquet et al., 1997a ; Marques et al., 2006 ; Marques et al., 2007).

La silicification des roches hôtes ainsi que la précipitation des silicates à l'intérieur des conduits de circulation des fluides hydrothermaux contribuent à générer une surpression de fluide conduisant à une fragmentation explosive des dépôts. Ce phénomène est décrit pour de nombreux dépôts anciens (Gibson et al., 1999), mais il n'est toutefois pas démontré de manière claire dans le cas des dépôts plus récents. Un épisode explosif a pu être observé au niveau du champ hydrothermal de Snake Pit durant la mission Microsmoke (1995), au cours de laquelle des instruments de mesure ont été totalement détruits. La principale explication est qu'une explosion serait survenue suite à une surpression en fluide (Humphris et al., 1995). Il semble donc que la fragmentation des monts hydrothermaux ne soit pas uniquement due à l'écroulement des structures en raison de la solubilité rétrograde de l'anhydrite, mais qu'elle puisse également être une conséquence de la fragmentation hydraulique.

Dans un environnement à dominante ultramafique, ce processus peut être très actif. La forte diversité des roches basaltiques, gabbroïques et ultramafiques altérées constatée au niveau du site hydrothermal de Saldanha peut ainsi être interprétée comme le résultat d'une fracturation hydraulique survenant à proximité de la surface de la lithosphère. Ce phénomène peut être la résultante d'une silicification des roches altérées, créant une sorte de couvercle étanche favorisant l'apparition d'une surpression en dessous (Fouquet et al., 2010).

Dans le cas de Logachev, les nombreux groupes de fumeurs noirs se trouvent dans la partie la plus profonde de structures en forme de cratères circulaires mesurant jusqu'à 10m de diamètre pour quelques mètres de profondeur. Les fumeurs noirs apparaissent depuis le fond de ces dépressions, où aucune cheminée n'est pourtant observée. Dix années d'observation ont permis de confirmer le caractère pérenne de cette activité ainsi que l'absence durable de formation de cheminées. Une hypothèse permettant d'interpréter ce phénomène serait d'envisager l'apparition régulière de surpressions similaires à celles observées au niveau de Snake Pit. De tels événements pourraient en effet maintenir un cratère en place, tout en interdisant la formation de cheminées. Ce type de cratère peut également être observé sur le site Ashadze 2 (Fouquet et al., 2008 ; Ondréas et al., 2007 ; Ondreas et al., 2012) ainsi qu'au site Nibelungen, dans l'Atlantique Sud, également sur substrat ultramafique (Koschinsky et al., 2006 ; Melchert et al., 2008).

Au niveau d'Ashadze 2, de nombreuses petites cheminées actives de sulfures tapissent le fond de ces « smoking craters ». D'autres petites cheminées riches en oxydes de cuivre ont également pu être échantillonnées sur les flancs extérieurs des cratères. Toutefois, l'absence totale de diffusion dans les zones environnantes tend à prouver que les cheminées sont régulièrement détruites par des épisodes explosifs permettant de maintenir la structure du cratère en place. Il semble donc que ces « smoking craters » soient des structures communes au niveau des dépôts de sulfure sur substrat ultramafique.

### ***Zonation***

Au niveau des sites ultramafiques tels que Rainbow, Ashadze ou Logachev, la zonation verticale est moins claire que dans le cas des sites basaltiques. Les échantillons prélevés en surface indiquent un fort enrichissement en cuivre comparativement à ceux prélevés sur substrat basaltique. Cette observation est probablement à mettre en relation avec la géométrie moins nette de la décharge (Fouquet et al., 2010). Sur ces sites, les fumeurs noirs et les sulfures riches en cuivre de haute température se répartissent sur toute la surface du site et pas uniquement au sommet du mont hydrothermal, comme cela peut être le cas au niveau de TAG. La décharge de haute température sera par conséquent plus diffuse et permettra aux dépôts de sulfure de cuivre de se répandre sur une zone beaucoup plus étendue (Fouquet et al., 2010). Ceci pourrait expliquer les taux très élevés de cuivre observés sur toute la surface recouverte de dépôts de sulfure ultramafique de haute température. À ce phénomène vient s'ajouter la circulation pervasive de subsurface contribuant à créer cette zone fortement enrichie en cuivre. Les dépôts hydrothermaux sur substrat ultramafique ont ainsi une zonation minéralogique et chimique moins bien organisée que celle des sites basaltiques.

### ***Composition des fluides dans les environnements ultramafiques***

Deux principaux processus jouent un rôle prépondérant dans la composition des fluides hydrothermaux en milieu ultramafique : la séparation des phases et la composition du substrat.

Pour un même site situé sur un substrat ultramafique, tous les fluides se caractérisent par une composition relativement constante, traduisant une source unique en profondeur (Fouquet et al., 2010). Les calculs théoriques prédisent que les interactions entre les péridotites et l'eau de mer devraient conduire à la génération de fluides hydrothermaux dotés d'un pH nettement plus élevé, d'une teneur en silice plus faible, de concentrations en potassium directement dépendantes du ratio eau/roche et d'une teneur en H<sub>2</sub> beaucoup plus forte que dans le cas des sites basaltiques (Wetzel and Shock, 2000). La composition des fluides de Rainbow semble en accord avec ces prédictions, mis à part un pH plus faible que prévu. Nous reviendrons plus tard sur les caractéristiques exactes des sites étudiés (Logachev, Ashadze et Rainbow).

### ***Composition chimique des dépôts hydrothermaux ultramafiques***

Par opposition aux dépôts basaltiques dominés par la présence de sulfures de fer, les dépôts sur substrat ultramafique se définissent par leur abondance en cuivre et en zinc (Fouquet et al., 2010). Cette abondance est toutefois difficilement explicable par un enrichissement des roches du manteau, qui sont relativement pauvres en cuivre (31ppm) (Anderson, 1989 ; Taylor and McLennan, 1985 ; Wolf and Anders, 1980). Cependant, les échantillons de serpentines collectés sur la dorsale de Rainbow à une distance relativement importante du site hydrothermal montrent un taux élevé en cuivre et zinc (respectivement 248 et 273ppm), qui pourraient constituer une source pour ces éléments (Fouquet et al., 2010).

## **c) Hydrothermalisme dans les bassins d'arrière-arc**

À la fin des années 1980, les bassins d'arrière-arc ont attiré l'attention des métallogénistes, car une grande majorité des gisements présents à terre se sont formés dans ce type de contexte. En effet, de par leur localisation à proximité des continents, ils s'incorporent préférentiellement à ces derniers lors de leur collision. Ces contextes sont favorables à l'installation de cellules de convection hydrothermales et abritent de nombreux champs actifs ou non.

Les exemples des Bassins de Lau, de Manus et Nord-Fidjien montrent une intense activité hydrothermale le long des rides d'arrière-arc et des volcans de l'arc insulaire des

Tonga-Kermadec depuis la Nouvelle-Zélande (Fouquet, 1993 ; Binns, 1993 ; de Ronde 2007). L'instabilité des bassins d'arrière-arc ainsi que la grande variabilité de la nature des roches volcaniques qui leur est associée génèrent des sites hydrothermaux extrêmement variés quant à la composition des fluides et des minéralisations (Fouquet et al., 2010).

Les bassins jeunes peuvent s'ouvrir en domaine de croûte continentale (Bassin d'Okinawa, Bassin de Woodlark) ou de croûte d'arc insulaire (Bassins de Lau et de Manus). Dans ce dernier cas, l'influence des produits de fusion issus de la zone de subduction se fait sentir jusque dans la composition des dépôts hydrothermaux associés (Fouquet et Marcoux, 1995). Il est ainsi possible de voir la marque de phénomènes globaux tels que la subduction dans les phénomènes locaux et la formation de dépôts minéraux.

## **5) Variabilité des sites**

Même dans les cas où les substrats sont identiques, les sites hydrothermaux présentent souvent de fortes différences les uns par rapport aux autres. Bien que peu nombreux, les sites actifs en milieu ultramafique présentent ainsi des contrastes importants. Lost City et Rainbow sont des cas typiques illustrant ces variations, dans la mesure où les températures d'émission et les compositions des fluides sont très différentes.

### **a) Lost City**

Le site hydrothermal Lost City est un site sur substrat ultramafique situé à 30°N, à proximité de la partie orientale de l'intersection entre la dorsale Médio-Atlantique et la zone de fracture Atlantis (Fruh Green et al., 2003 ; Kelley et al., 2001). Les cheminées actives sont situées sur un dôme massif marquant le coin interne de l'intersection de la dorsale avec la faille transformante. Le flanc Sud du massif hydrothermal est composé d'escarpements relativement raides et la partie supérieure du dôme est la trace d'une

faille de détachement ayant exposé des péridotites et des gabbros. Les forages effectués sur site, juste au Nord de la zone active de Lost City, ont montré la prédominance des gabbros et la présence limitée de péridotites serpentinisées (Ildefonse et al., 2007).

Les dépôts hydrothermaux sont dominés par des cheminées de carbonates. La température de sortie des fluides est relativement basse (environ 90°C) et ceux-ci sont assez alcalins (pH = 9.8) (Fruh Green et al., 2003 ; Kelley et al., 2001). Les datations au radiocarbone montrent une activité hydrothermale sur les derniers 30 000 ans au moins (Fruh Green et al., 2003).

## **b) Rainbow**

Le site Rainbow (33°54.20'W, 36°13.80'N) est situé au Sud de l'archipel des Açores (Aballea et al., 1998 ; German and Parson, 1998 ; Parson et al., 1997 ; Parson et al., 1999). Des fluides de haute température y sont observés dans un environnement composé de roches ultramafiques. Son contexte géographique et géologique sera détaillé en Partie 3.III.

Les concentrations des métaux de transition à Rainbow (Fe, Mn, Cu et Zn) sont parmi les plus fortes connues le long de la dorsale Médio-Atlantique (Fouquet et al., 2010). Cette abondance est favorisée par la chlorinité du fluide et la présence de complexes à base de chlore, un faible pH et une température des fluides élevée. La meilleure explication pour justifier cet enrichissement se base sur les propriétés des fluides (salinité, température, faible pH), plus que sur l'enrichissement par l'intermédiaire de roches sources (Fouquet et al., 2010 ; Charlou et al., 2010).

D'autre part, les fortes teneurs en H<sub>2</sub> mesurées démontrent l'intensité du processus de serpentinisation dans les zones profondes du système hydrothermal et indiquent la présence de conditions extrêmement réductrices en subsurface (Fouquet et al., 2010 ; Charlou et al., 2010 ; Douville et al. 2002).



***Résumé : comparaison entre Rainbow et Lost City***

	<b><u>Rainbow</u></b>	<b><u>Lost City</u></b>
<b>Latitude</b>	36°14'N	30°10'N
<b>Longitude</b>	33°54'W	42°10'W
<b>Profondeur</b>	2400m	700m
<b>Substrat</b>	Harzburgite	Harzburgite + Gabbro
<b>Contrôle géologique</b>	Centre d'un décalage non transformant. Dôme ultramafique.	Sommet d'un massif et failles de détachement.
<b>Distance à l'axe</b>	6km	15km
<b>Minéralisations</b>	Champ de cheminées et sulfures métalliques massifs.	Vaste champ de cheminées carbonatées.
<b>Taille</b>	400m*100m	400m*400m
<b>Température max</b>	365°C	90°C
<b>Activité</b>	Actif	Actif
<b>Minéraux majeurs</b>	Isocubanite, Chalcopyrite, Sphalérite, Pyrrhotite, Pyrite, Pentlandite	Calcite, Brucite

## **6) Minéralisations des sites**

En liaison avec la durée de l'activité hydrothermale, les dépôts hydrothermaux ont des tailles variables. Les compositions des minéralisations sont influencées par la nature du substrat rocheux (basaltique ou ultramafique) et par les processus physiques et chimiques affectant les fluides.

### **a) Cas des sites basaltiques**

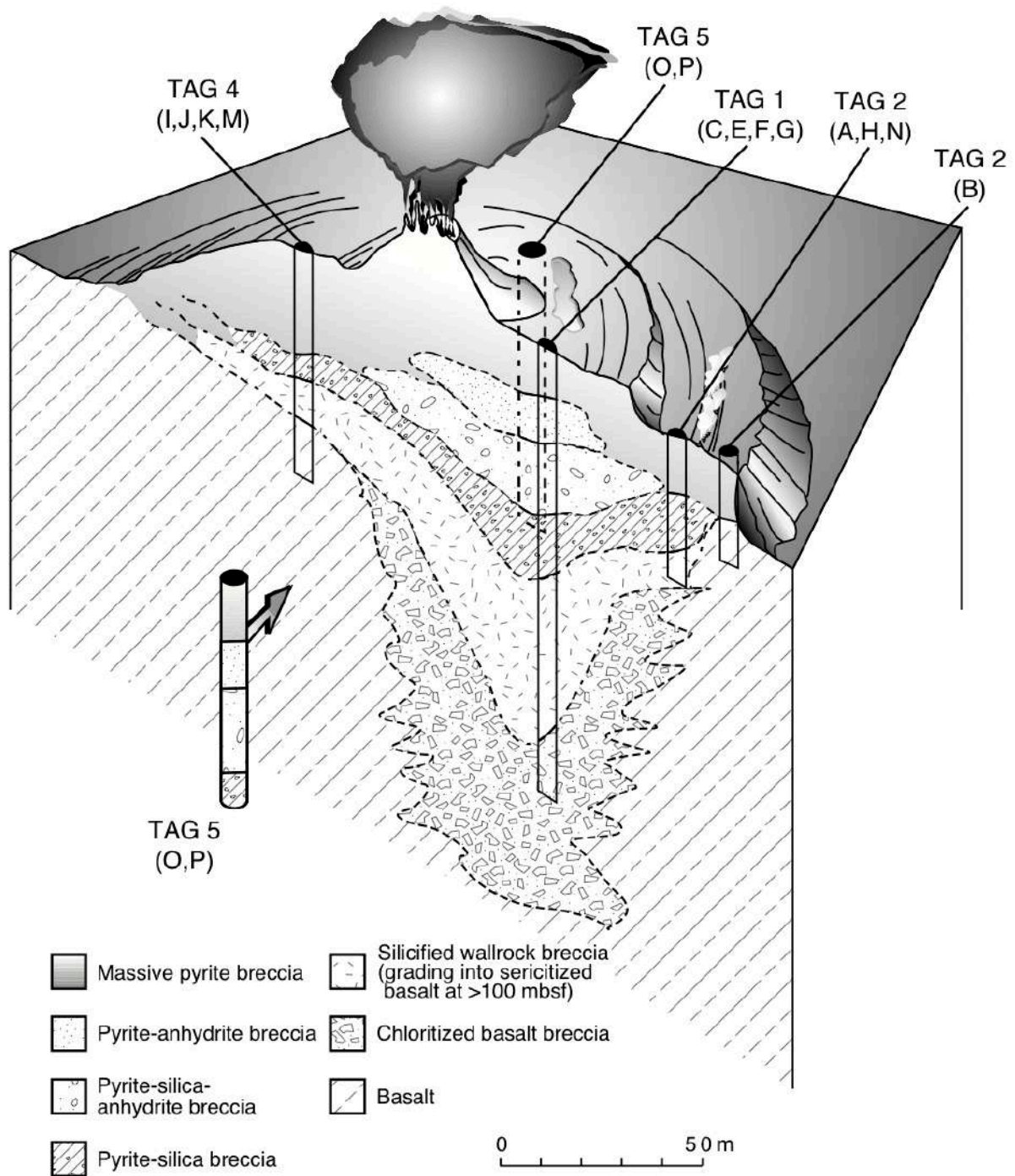
Les minéralisations observées sur les sites hydrothermaux basaltiques présentent des variations selon la nature des basaltes : E-MORB (Enriched Mid-Oceanic Ridge Basalt) ou N-MORB (Normal Mid-Oceanic Ridge Basalt). Ce dernier est le plus commun des basaltes rencontrés le long des dorsales. Il est appauvri en éléments légers et lithophiles tels que le césium, le rubidium, le baryum, le thorium et l'uranium.

Les échantillons prélevés en surface des minéralisations situées sur substrat basaltique sont constitués principalement de pyrite, marcasite ( $\text{FeS}_2$ ), de silice amorphe (Fouquet et al., 2010) et plus localement de sulfure de zinc (Sphalérite). En profondeur le mont est généralement enrichi en cuivre et dépourvu de zinc, qui passe en solution et se redépose en surface lors de la maturation du mont hydrothermal. Dans le cas du site hydrothermal TAG, suite aux campagnes de plongées et de forages, quatre lithologies principales ont été identifiées. Il s'agit des oxyhydroxydes Si-Fe, des sulfures massifs, de l'association sulfure-anhydrite et enfin de l'assemblage sulfures-quartz remplaçant des basaltes altérés en profondeur (Knott et al., 1998).

Les sulfures massifs peuvent être subdivisés selon une base texturale entre les sulfures poreux et les sulfures bréchiés. Les sulfures poreux sont généralement composés de grains de sulfure fin présentant une porosité importante (supérieure à 10%). Deux associations de minéraux sont présentes : les sulfures de Fe-Zn sont principalement composés de pyrite et marcasite, auxquels s'ajoutent la sphalérite, la silice et des traces de chalcopryrite en proportions variables. Les sulfures de Fe-Cu poreux sont composés de pyrite avec localement de fortes proportions de chalcopryrite (Knott et al., 1998).

Les minéralisations sulfure-anhydrite apparaissent principalement dans les cheminées des zones actives au sommet du mont. En profondeur les forages ont montré que l'association anhydrite-sulfures formait des brèches et des veines au sein du mont hydrothermal. Les brèches d'anhydrite-pyrite sont composées de clastes de pyrites cimentés par une matrice d'anhydrite dans laquelle une proportion variable (de 5 à 50%) de grains fins de pyrite et de chalcopyrite sont disséminés. Les veines d'anhydrite apparaissent dans les brèches de pyrite-anhydrite, de pyrite-quartz et de basalte silicifié. Leur largeur varie de 1mm à 0.4m. Autour de ces veines, la pyrite peut également former des halos sur une largeur de 50 mm. Les sulfures de cuivre et de fer représentent moins de 15% des minéraux à l'intérieur des veines (Knott et al., 1998).

Les minéralisations de sulfures et de quartz sont principalement composées de brèches de quartz et pyrite contenant des clastes isolés de basalte silicifié. Les brèches ont une minéralogie relativement simple dominée par la pyrite ou le quartz, mais elles présentent une forte hétérogénéité au niveau des textures. Cette hétérogénéité est principalement liée à la taille variable des grains et à la morphologie des agrégats de quartz et pyrite, mais également à la présence de basaltes altérés, de veines d'anhydrite et des minéralisations de sulfures Fe-Cu (Knott et al., 1998).



**Fig. 4:** Coupe transversale schématique du mont hydrothermal TAG indiquant les zonations verticales correspondant à la lithologie : une zone de sulfures massifs (pyrite bréchique) suivie d'une zone sulfure-anhydrite, une zone sulfures-quartz puis des basaltes altérés (Humphris et al., 1995).

## **b) Cas des sites ultramafiques**

En raison de la nature fortement réductrice des fluides, la pyrrhotite et l'isocubanite sont les deux principaux sulfures de fer et de cuivre présents dans les minéralisations de Rainbow, Ashadze et Logachev 1. La chalcopyrite associée à l'isocubanite est également présente dans plusieurs échantillons. Par opposition aux échantillons issus des sites basaltiques, les prélèvements effectués en surface contiennent des concentrations importantes de sphalérite, de pyrrhotite et d'isocubanite qui sont en proportion largement supérieure à celle de la pyrite et de la marcasite. Les dépôts de Logachev 2 sont dominés par la chalcopyrite, la sphalérite et la wurtzite. Quelques traces de pyrite ont également été détectées, mais la pyrrhotite semble totalement absente. Ceci indique probablement que les fluides y ont un pouvoir oxydant supérieur à ceux de Rainbow, Logachev 1 ou Ashadze (Fouquet et al., 2010).

En général, la diversité des minéraux secondaires est bien plus importante en environnement ultramafique que basaltique. Une caractéristique propre aux sites ultramafiques est d'abriter des minéraux à base de cobalt. Les plus communs sont ceux comportant du cobalt et du nickel, tels que la Co-pentlandite ( $(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ ), qui se logent à l'intérieur des assemblages de chalcopyrite-isocubanite situés au cœur des cheminées de fumeurs noirs (Fouquet et al., 2010). Dans certains cas, l'hématite et la magnétite sont abondantes et associées à des cheminées riches en cuivre et en fer. Il s'agit de minéraux primaires formés à haute température. On rencontre également la magnétite dans les zones profondes où les sulfures remplacent, parfois totalement, les roches ultrabasiqes serpentinisées.

Les oxyhydroxydes de fer générés par l'oxydation des sulfures apparaissent à la surface des monts dans les zones anciennes et inactives. La goethite en est l'un des représentants les plus abondants. Dans certains cas, l'hématite et la magnétite sont abondantes et associées à des cheminées riches en cuivre et en fer. Il s'agit de minéraux primaires formés à haute température.

Les oxydes de manganèse, formés par diffusion hydrothermale à basse température, consistent en des dépôts distaux situés à la périphérie des fumeurs noirs (dans le cas de Rainbow) ou forment des champs de cheminées à une distance importante de la zone de haute température (Logachev et Saldanha). Les oxydes de

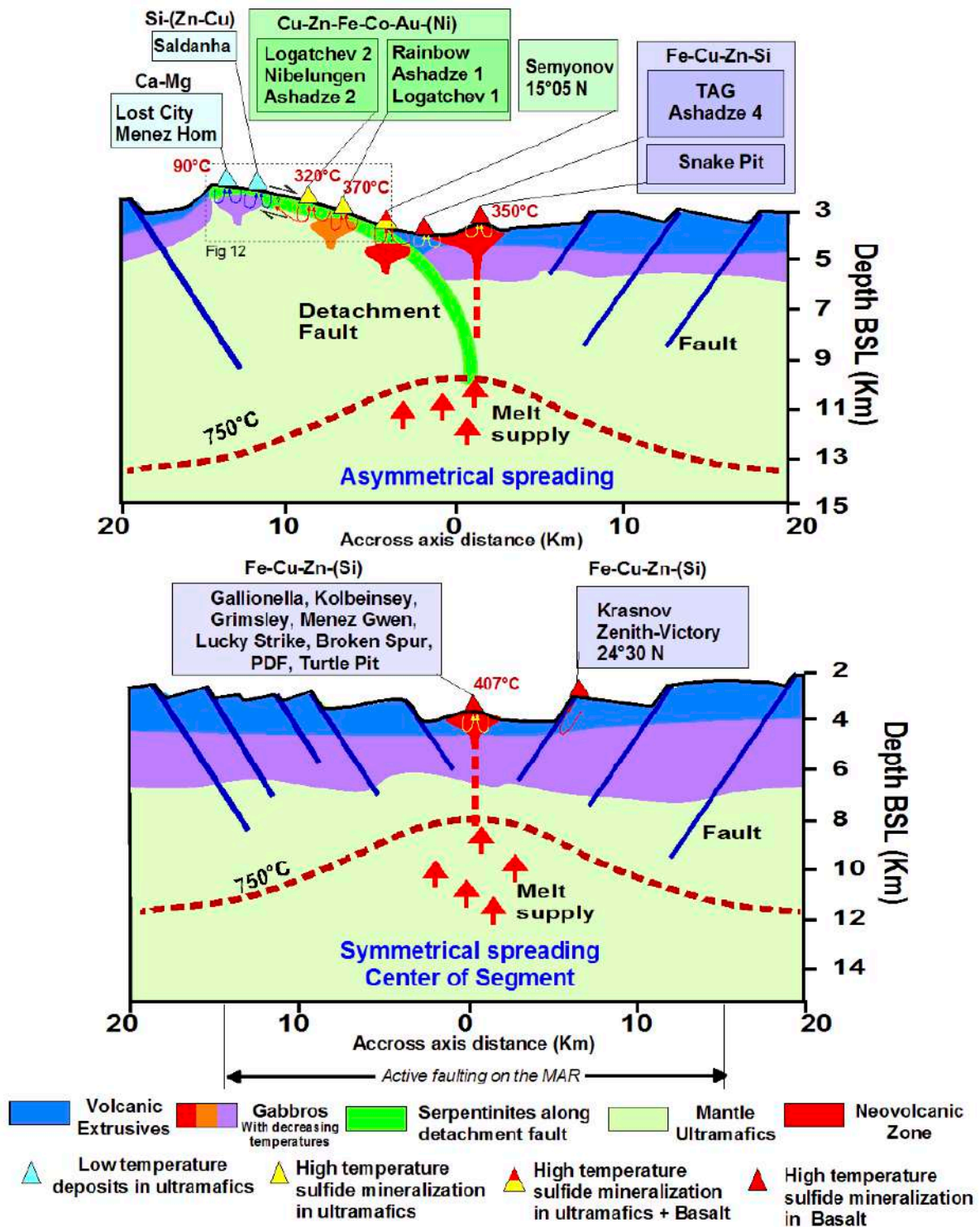
manganèse hydrothermaux peuvent également jouer un rôle de ciment entre les brèches basaltiques et ultramafiques (Fouquet et al., 2010).

### ***Éléments natifs***

Le cuivre natif ainsi que le soufre sont des éléments abondants (ce dernier étant régulièrement associé à la lepidocrocite en tant que produit d'oxydation de la pyrrhotite). La présence de cadmium a été signalée au niveau de Rainbow (Lein et al., 2003). L'or est le plus commun des éléments natifs et peut être observé dans une large variété d'assemblages minéralogiques, traduisant des températures de formation différentes. Ainsi, des grains d'or ont été trouvés dans les fumeurs noirs actifs, riches en cuivre et de haute température présents à Rainbow. Sur Logachev, il est observé à la fois dans les sulfures de cuivre de haute température et en association avec les sulfures de zinc, de température plus faible. D'autres éléments tels que l'arsenic, le platine ou l'argent, ont également été identifiés sur Logachev et Rainbow (Lein et al., 2003).

### ***Éléments de gangue***

L'anhydrite est le minéral de gangue le plus commun collecté dans les échantillons prélevés directement sur les cheminées. La barytine est également observée mais de manière plus rare, sauf au niveau du site inactif de Ghost City. Les carbonates, qui sont largement présents sur le site de Lost City, ne sont pas très communs dans le cas des champs hydrothermaux ultramafiques de plus haute température et générés par des fluides acides (Fouquet et al., 2010). Ces différentes caractéristiques sont résumées dans la figure 5 ci-dessous.



**Fig. 5 :** Résumé des principaux types de minéralisations découverts sur les sites de la dorsale Médio-Atlantique, selon la nature du substrat mais également du type d'écartement (symétrique ou non) (Fouquet et al., 2010).

## 7) Sites actifs et inactifs

### a) Difficultés techniques liées à l'exploitation

Les sites actifs comme inactifs peuvent abriter des gisements de minerais potentiellement intéressants. Il existe toutefois des différences rendant les sites inactifs plus intéressants en termes d'exploitation. Ces différences se résument de la manière suivante :

	<b><u>Sites actifs</u></b>	<b><u>Sites inactifs</u></b>
<b>Température</b>	Potentiellement très élevée (Pouvant aller jusqu'à 400°C) => L'exploitation par l'intermédiaire de ROVs industriels devient délicate en raison de la chaleur susceptible de dégrader les outils.	Froide car aucune source de chaleur ne vient plus l'alimenter. Elle est donc proche de celle de l'eau de mer environnante (environ 2°C). Le risque lié à la température excessive disparaît.
<b>Écosystèmes</b>	Très riches. La faune hydrothermale constitue un ensemble basé sur la chimiosynthèse. Il s'agit d'un groupe biologique protégé et faisant l'objet de recherches.	Limités à la microbiologie. L'arrêt de la diffusion des fluides à haute température fait disparaître les écosystèmes associés. Une exploitation minière ne devrait créer que des dégâts mineurs sur la faune endémique.
<b>Taille des dépôts</b>	Variable selon l'âge du site, les dépôts peuvent être plus ou moins étendus. Dans le cas d'un site jeune, l'activité n'aura pas eu le temps de créer des dépôts suffisamment vastes pour être intéressants.	L'activité étant terminée, le dépôt a atteint sa taille maximale.



## **b) Problèmes de la localisation des sites inactifs**

Les sites actifs sont caractérisés par l'émission de fluides hydrothermaux générant un panache de turbidité et chimique dans l'eau de mer. Selon les sites et les composants chimiques, ce panache peut atteindre des altitudes de quelques centaines de mètres. Les anomalies de la colonne d'eau qui en résultent peuvent alors être détectées à des distances de plusieurs dizaines de kilomètres depuis un navire en surface par le biais de bathysondes pour les anomalies physiques et par l'analyse à bord ( $\text{CH}_4$ , Mn) de l'eau prélevée par un système de rosettes.

### ***Nature du panache***

Les panaches hydrothermaux sont le résultat du mélange et de la dilution progressive des fluides hydrothermaux avec l'eau de mer. La source de chaleur profonde et la perméabilité de la croûte océanique contrôlent la circulation hydrothermale qui se manifeste, au niveau du plancher océanique, par la genèse des cheminées mais également par la formation dans la colonne d'eau de panaches enrichies en He,  $\text{CH}_4$ , Mn et  $\text{H}_2\text{S}$ . Par équilibre de densité, ces panaches montent jusqu'à une certaine altitude puis se stabilisent et restent stationnaires.

### ***Comment les trouve-t-on ?***

Les panaches hydrothermaux présentent des caractéristiques physiques et géochimiques très différentes de celles de l'eau de mer. Plusieurs traceurs physiques (température, néphélogéométrie) et géochimiques (Mn,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , He, Ra...) sont utilisés pour cartographier les panaches hydrothermaux. Ces traceurs sont par conséquent d'excellents indices de la présence ou non d'activité hydrothermale potentielle (Konn et al., 2011).

### ***Quelle instrumentation utilise-t-on ?***

Après l'établissement d'une carte bathymétrique la plus précise possible, on recherche dans la colonne d'eau les différentes anomalies physiques et géochimiques associées aux émissions hydrothermales.

Dès l'arrêt de l'activité hydrothermale, le panache disparaît et les techniques précédemment citées deviennent inopérantes. Il faut par conséquent envisager d'autres méthodes pour localiser les sites inactifs.

## **c) Méthodes de détection des sites inactifs**

### ***Cartographie et contrôle géologiques des minéralisations***

Un moyen de détecter les sites hydrothermaux inactifs consiste à utiliser la cartographie géologique par le biais de prélèvements systématiques. Cette technique présente toutefois de nombreux inconvénients qui la rendent contraignante dans le cadre d'une exploration sous-marine. Les prélèvements sont effectués « à l'aveugle » et risquent de passer à proximité de sites hydrothermaux sans les remarquer en raison de leur taille restreinte. Il s'agit donc d'une technique lente et onéreuse nécessitant la présence en surface d'un navire capable de prélever un nombre important d'échantillons.

Il existe cependant des cas où des découvertes de sites ont été réalisées par ce biais. Ainsi, le site hydrothermal de Menez Gwen a été localisé en 1997 en se basant sur des critères géologiques. Il en va de même pour le premier site hydrothermal inactif repéré au large de Futuna grâce à une bonne connaissance des processus géologiques contrôlant les minéralisations.

Dans tous les cas, la cartographie géologique de surface devient indispensable une fois les sites découverts, afin de les caractériser et d'en évaluer le potentiel minier.

## ***Cartographie géophysique de surface***

→ Bathymétrie : La bathymétrie est réalisée à l'aide de sondeurs multifaisceaux installés sur les navires océanographiques. En mode d'acquisition cartographique, le navire balaye une zone en suivant des profils parallèles suffisamment proches pour que les fauchées se recouvrent et permettent d'obtenir une carte continue. La résolution dépend de la profondeur d'eau et de la vitesse du navire : si celle-ci est trop élevée, la résolution sera dégradée. Cette technique permet d'apprécier les structures et donc les processus tectoniques locaux. Elle guide la stratégie de campagne et les progrès technologiques des sondeurs permettent d'envisager la détection de structures telles que les plus grands monts hydrothermaux.

→ Magnétisme de surface : Cette technique consiste à remorquer un magnétomètre à l'extrémité d'un câble suffisamment long pour s'affranchir de l'influence magnétique du navire. Il s'agit généralement d'un magnétomètre scalaire mesurant uniquement l'intensité du champ ambiant. Le champ magnétique décroissant selon l'inverse de la distance au cube, il est très difficile, voire impossible, d'obtenir à environ 2000m au dessus des sources, une information fiable sur la présence de sites hydrothermaux, actifs ou non, du fait de leur petite taille et de la faible épaisseur des dépôts. Les anomalies mesurées sont bien adaptées pour la compréhension tectonique de la région et permettent notamment de dater la croûte océanique.

Les techniques de cartographie géophysique à partir du navire ne sont donc pas non plus adaptées à la recherche de sites hydrothermaux actifs ou inactifs. Il est toutefois possible depuis quelques années d'utiliser des engins sous-marins afin de se rapprocher du fond et de réaliser des cartes de précision métrique, compatibles avec la dimension des monts hydrothermaux.

## ***Cartographie géophysique de fond de mer***

→ Champs potentiels : Lorsque l'on se rapproche des sources (anomalies de densité ou d'aimantation), la résolution des données potentielles augmente et permet d'obtenir des informations inaccessibles au dessus d'une certaine altitude par rapport à la source. Nous reviendrons sur l'utilisation du magnétisme de fond de mer dans la 2<sup>nd</sup>e partie.

→ Sismique : Des ingénieurs de l'Ifremer ont développé une technique de mesures sismiques de fond, qui a été utilisée au cours de la mission Futuna 2 afin d'évaluer l'épaisseur d'un dépôt sédimentaire.

→ Les méthodes électromagnétiques et gravimétriques sont utilisées mais restent délicates à mettre en œuvre en raison du problème de stabilisation de l'engin porteur.

## **d) Analogies avec la géophysique aéroportée**

### ***Description des techniques utilisées***

Les techniques utilisées en cartographie géophysique grand fond peuvent être comparées aux méthodes aéroportées à faible altitude, notamment utilisées au Canada, en Australie ou en Russie dans le cadre de la prospection minière. Les données obtenues par cette méthode sont classiquement utilisées pour construire des cartes de surface et restituer une description tridimensionnelle du sous-sol par modélisation directe ou inversion. Différents paramètres naturels des roches tels que l'aimantation, la conductivité électrique, la densité ou la radioactivité peuvent être mesurés.

Les mesures sont réalisées à l'aide d'instruments embarqués à bord d'un avion. Les levés se font le long de lignes de vol parallèles avec quelques lignes de contrôle perpendiculaires. L'espacement des lignes dépend de la résolution attendue et donc de la taille des objets que l'on souhaite décrire. L'enregistrement simultané de plusieurs paramètres est généralement mis en œuvre, de manière à optimiser les coûts d'acquisition. L'avion évolue à basse altitude, typiquement entre 50 et 120m, et les données acquises sont positionnées à l'aide de récepteurs GPS à précision métrique.

### ***Comparaison avec la géophysique de fond de mer***

De la même manière que pour les mesures de géophysique aéroportée, celles de fond de mer permettent :

→ Un levé rapide et efficace d'un territoire par un AUV et parfois un ROV.

→ D'évaluer la variété des paramètres physico-chimiques de la zone considérée.

→ D'étudier des couches allant de quelques centimètres jusqu'à la croûte inférieure, selon les techniques mises en œuvre.

→ D'effectuer des recherches de manière non invasive, en utilisant des techniques non destructrices (sans perturbations pour l'environnement).

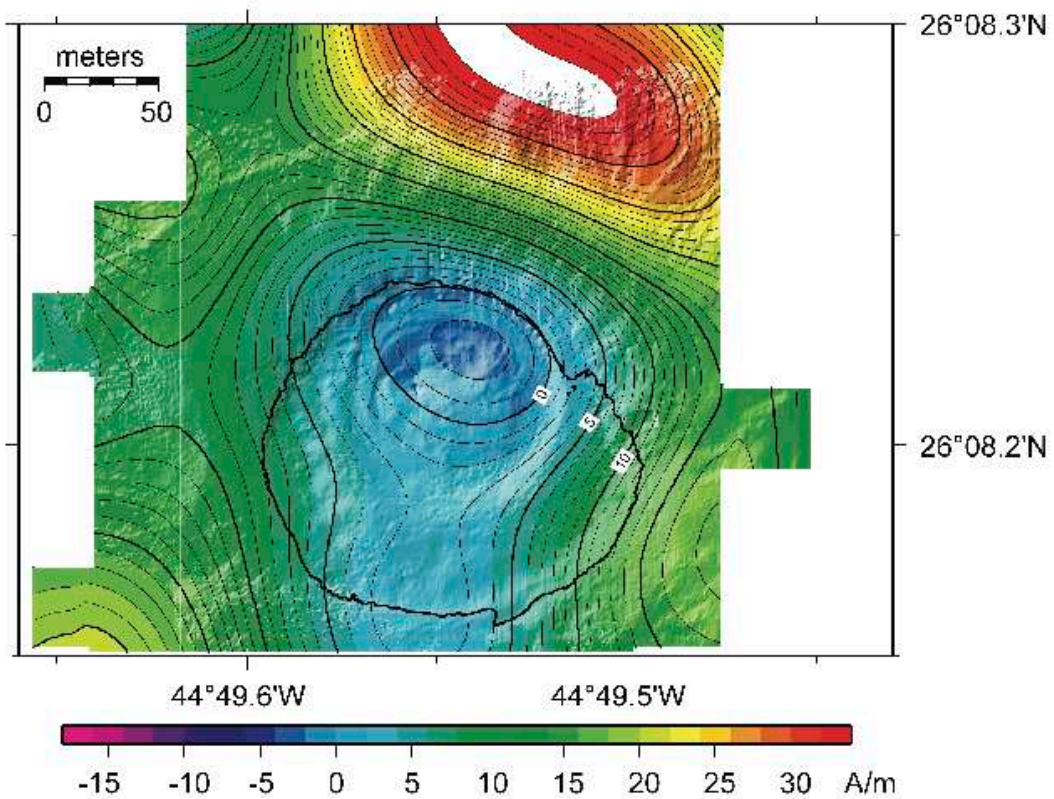
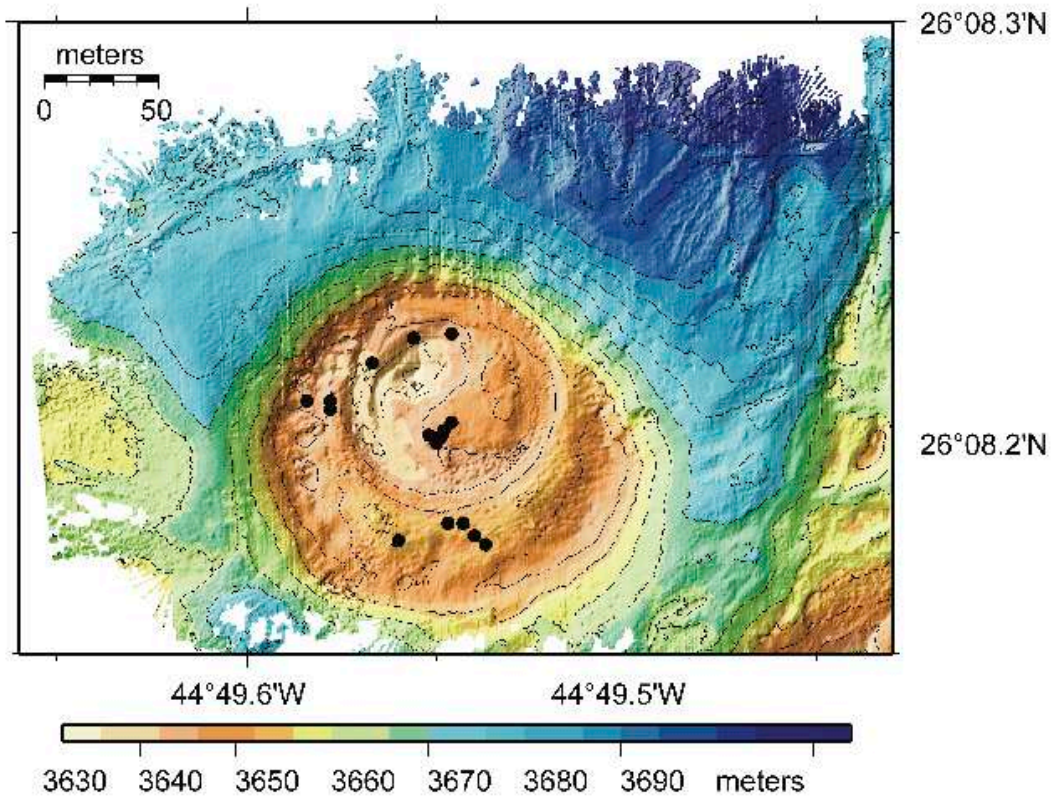
→ D'accéder à des zones difficilement atteignables par d'autres moyens.

## **8) Signature magnétique des sites hydrothermaux**

Différentes études magnétiques ont été entreprises sur des sites hydrothermaux à substrat basaltique. Nous présentons ici les exemples de TAG et des sites du segment Endeavour.

### **a) Cas du site TAG**

La découverte d'anomalies magnétiques de plus faible amplitude à l'aplomb de la zone TAG remonte à 1973 (Rona, 1973), soit 12 ans avant celle des cheminées hydrothermales actives sur le site (Rona, 1985 ; Rona et al., 1986). Les premières informations fiables quant à la signature magnétique de ce site hydrothermal ont été obtenues grâce à des levés de fond menés par le sous-marin Alvin en 1990 (Tivey et al., 1993). Une zone présentant un défaut d'aimantation a été clairement mise en évidence à partir des données collectées par ce submersible à une altitude de 20m au dessus du mont hydrothermal. Les cartes obtenues suggèrent la présence d'un conduit hydrothermal d'environ 100m de rayon et de 500m de profondeur. Le contraste d'aimantation de l'ordre de 12A/m est explicable par une quasi-absence de matériaux aimantés dans le conduit et une aimantation d'une dizaine d'ampères par mètre pour les basaltes récents de l'anomalie magnétique axiale (Tivey and Dymant, 2010). Les résultats sont présentés en figure 6.



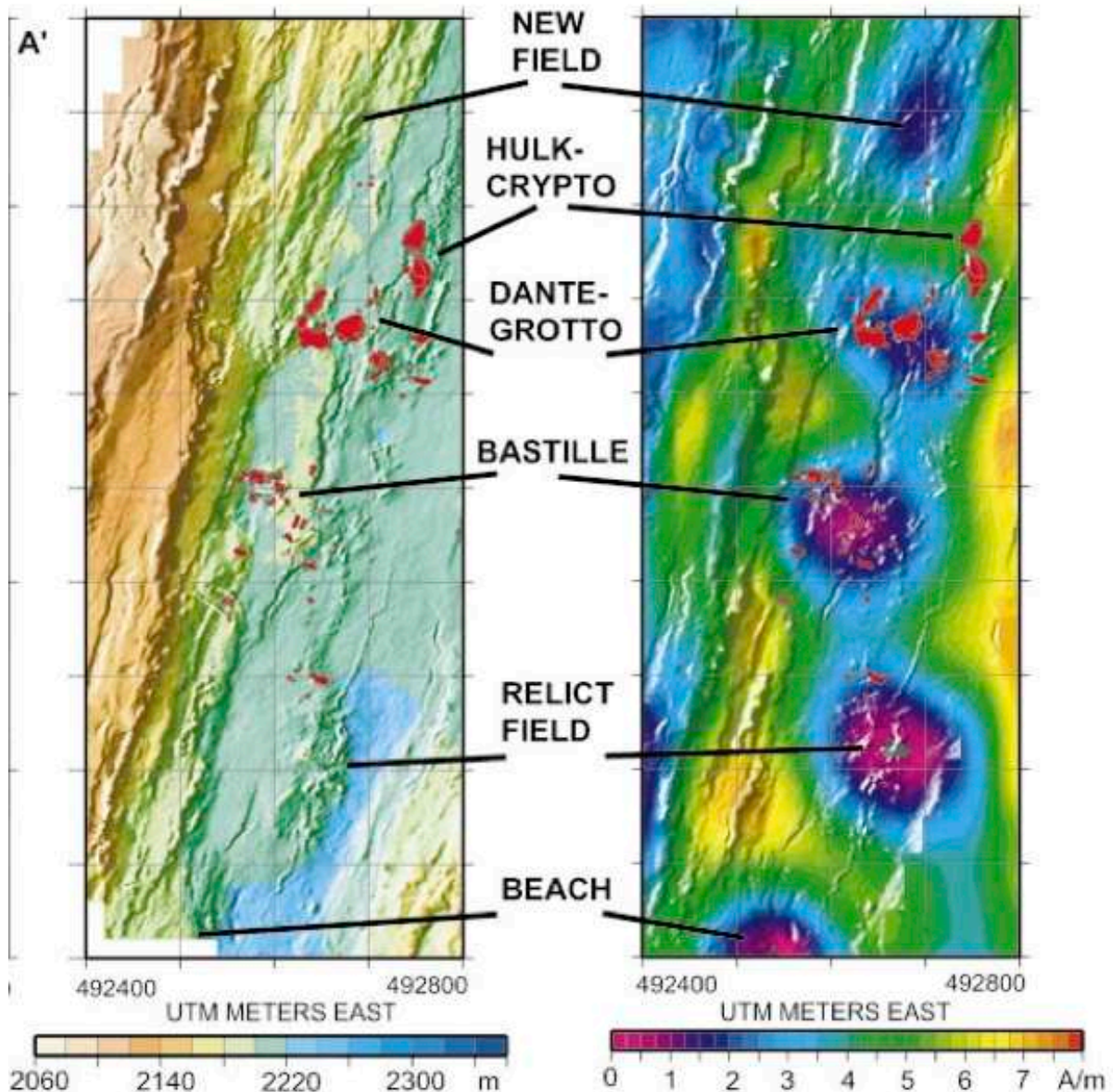
**Fig. 6 :** Bathymétrie (en haut) et aimantation (en bas) du mont hydrothermal TAG. La bathymétrie a été obtenue par le sondeur multifaisceaux du ROV Jason. Les données magnétiques de haute résolution ont été acquises par l'Alvin (Tivey et al., 1993).

## **b) Cas des sites du segment Endeavour**

Un levé géophysique de haute résolution a été réalisé au niveau du rift axial du segment Endeavour, situé dans la partie Nord de la dorsale Juan de Fuca (Tivey and Johnson, 2002). Ces données ont été collectées par le ROV Jason équipé d'un magnétomètre 3 composantes. Le levé inclut le principal champ hydrothermal d'Endeavour (Delaney et al., 1992 ; Robigou et al., 1993 ; Tivey and Delaney, 1986) ainsi que des zones de diffusion hydrothermales situées à environ 2.5km au Nord (Robigou et al., 1993).

Les données ont été acquises le long de lignes parallèles espacées de 40m les unes des autres, à une altitude moyenne de 20m au dessus du fond. L'anomalie magnétique affranchie des effets du submersible a ensuite été interpolée de manière à obtenir une grille avec un pas de 20m, prolongée vers le haut grâce à la méthode de Guspi (1987), puis inversée par la méthode de Parker et Huestis (1974) de manière à obtenir une aimantation équivalente sous l'hypothèse d'un niveau aimanté de 500m sous la topographie. Les résultats sont présentés en figure 7.





**Fig. 7 :** Carte bathymétrique du segment Endeavour (à gauche) obtenue avec le ROV Jason. La carte d'aimantation équivalente est présentée à droite. Les sites actifs sont indiqués par les flèches noires. Ils correspondent à des zones de défaut d'aimantation (Tivey and Johnson, 1992).

On constate que les sites hydrothermaux situés en domaine basaltique sont caractérisés par un défaut d'aimantation. Il semble par ailleurs que le site les plus ancien et inactif (Relict field) présente un défaut d'aimantation plus marqué que le site le plus récent (New Field) découvert lors de l'expérience. Le défaut d'aimantation paraît donc s'accroître avec l'âge du site hydrothermal.

Les exemples des sites Endeavour et TAG donnent des résultats concordants l'un avec l'autre. Ces mesures permettent donc de supposer que les sites hydrothermaux sur substrat basaltique se caractérisent par un défaut d'aimantation.

### **c) Autres cas**

Plusieurs autres études ont confirmé cette signature magnétique des sites hydrothermaux à substrat basaltique. Elles ont été réalisées à l'axe de la dorsale Sud-Ouest Indienne (Zhu et al., 2010), dans le bassin d'arrière-arc des Mariannes (Nakamura et al., 2013), sur le volcan Brothers, dans l'arc des Kermadec (Caratori-Tontini et al., 2012) et sur les sites Lucky Strike (Miranda et al., 2005 ; Tivey et Dymont, 2010) et Menez Gwen, sur la dorsale Médio-Atlantique au Sud des Açores (Tivey et Dymont, 2010).

Tous les résultats obtenus s'accordent à dire que les sites hydrothermaux actifs à substrat basaltique se caractérisent par une anomalie magnétique négative liée à un défaut d'aimantation. Ces études ne donnent cependant aucune indication sur l'évolution de cette signature magnétique dans le temps après l'arrêt de l'activité hydrothermale. Seule l'étude d'un site inactif permettra de résoudre cette question.

## 9) Conclusions

Les travaux menés sur les sites hydrothermaux à substrat basaltique indiquent une signature magnétique caractérisée par un défaut d'aimantation. Les sites étudiés sont cependant, pour l'essentiel, des sites actifs ou inactifs depuis peu (par exemple Relict Field) et il n'est pas certain que cette signature se maintienne durablement après l'arrêt de l'activité hydrothermale. Ce n'est que dans ces conditions que l'on pourrait envisager l'utilisation du magnétisme comme outil de détection des sites inactifs.

Par ailleurs, nous avons évoqué l'existence de plusieurs types de sites hydrothermaux, notamment selon la nature de la roche sous-jacente (basaltique ou ultramafique). À l'exception du travail de Nakase (2008) repris par Tivey et Dymant (2010), aucune étude sur la signature magnétique des sites à substrat ultramafique n'est apparue dans la littérature.

Après avoir décrit la méthodologie d'acquisition et de traitement des données, nous nous attacherons à étudier un site inactif sur substrat basaltique d'une part et plusieurs sites à substrat ultramafique d'autre part, de manière à compléter notre connaissance de la signature magnétique des sites hydrothermaux.



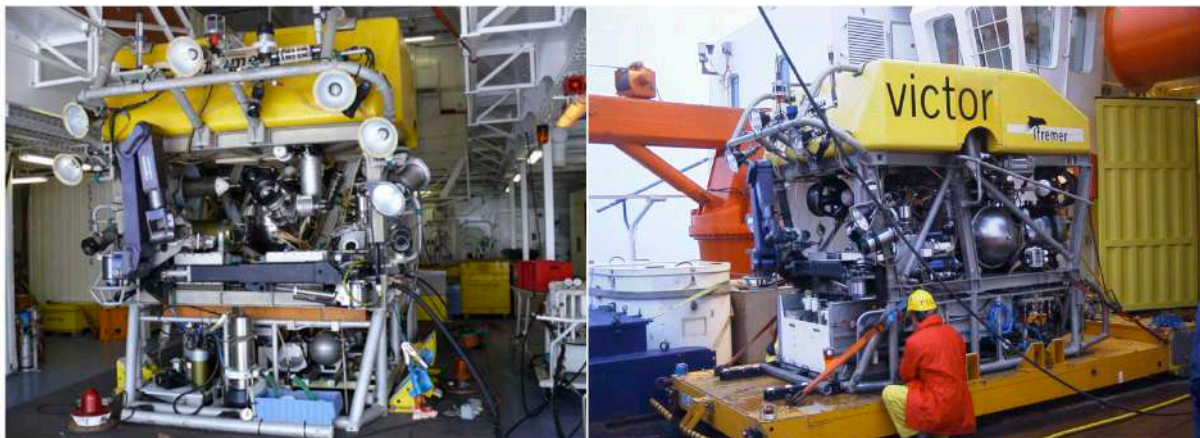
# 2<sup>nde</sup> Partie

## Méthodologie

# I) Outils d'acquisition

## 1) Le ROV Victor

Le terme ROV est un acronyme pour « Remote Operated Vehicle » et désigne un véhicule semi-autonome téléopéré grâce à une « laisse » le rattachant au navire porteur. Le ROV Victor est en mesure d'accéder à des profondeurs de 6000m et de naviguer à une allure de 1.5 nœud. La figure 8 présente deux vues du ROV Victor, de l'avant et de profil.



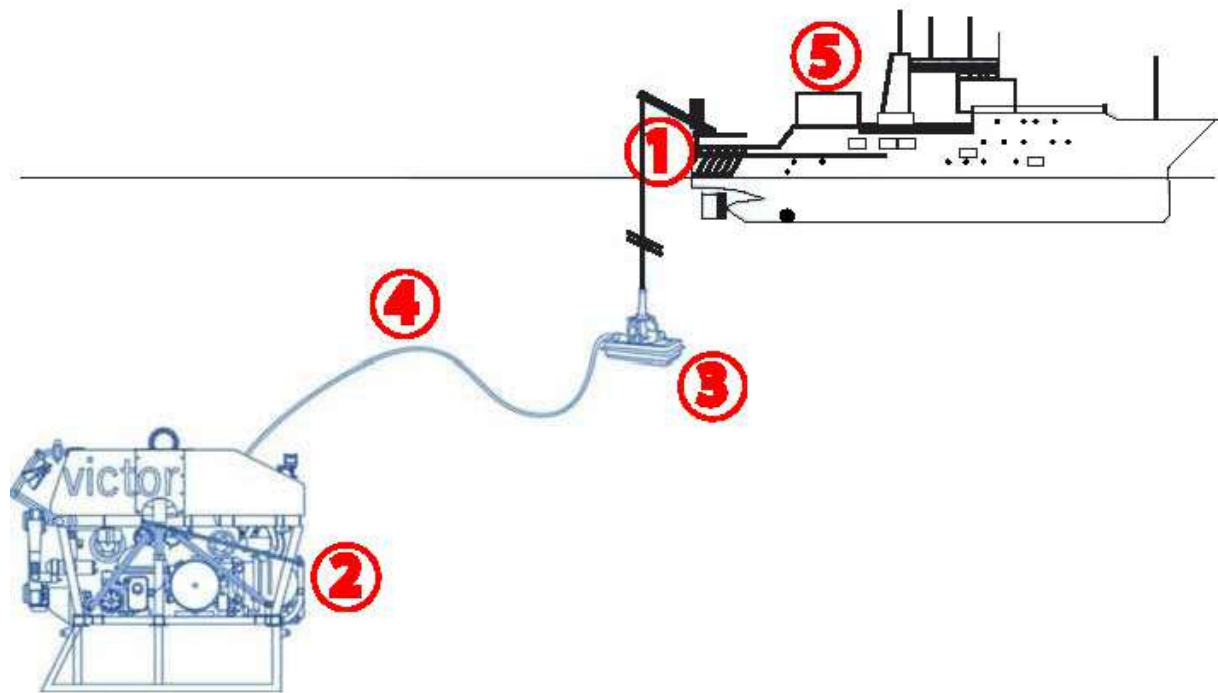
**Fig. 8:** Vues de l'avant et de profil du ROV Victor 6000 de l'Ifremer (Copyright, Ifremer).

La partie supérieure (sous la flottabilité) comprend les modules nécessaires à la navigation de l'engin. La partie inférieure est le module scientifique qui peut être :

→ Un module de prélèvement permettant le travail en chantier et la collecte de données d'environnement, d'échantillons de roches, de fluides, d'animaux et de micro-organismes.

→ Un module de mesures en route équipé d'un sondeur multifaisceaux de haute résolution, d'une caméra verticale noir et blanc de haute résolution et d'autres instruments géophysiques. Des appareils photos et caméras complètent cet équipement.

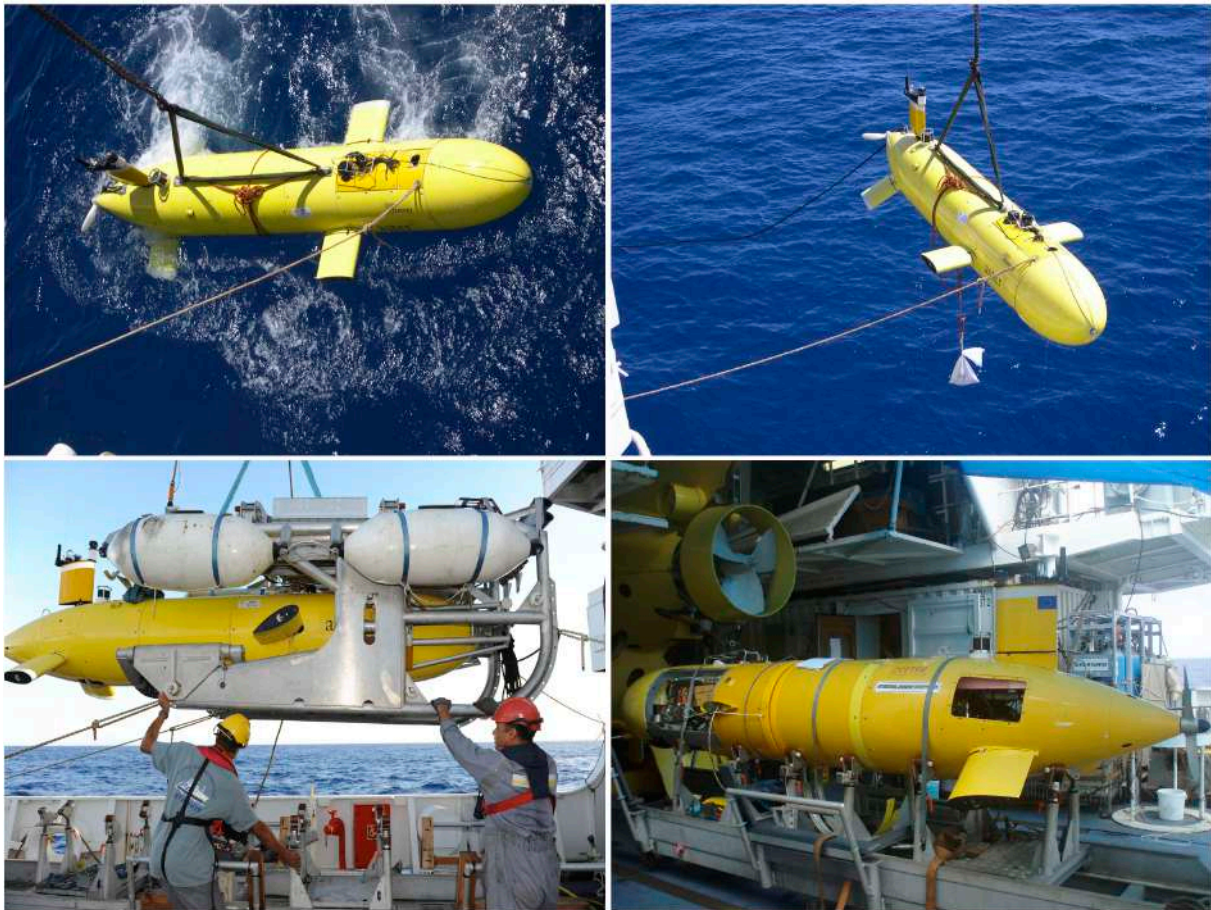
Les senseurs de base comportent une centrale d'attitude (mesurant le cap, le tangage et le roulis), un capteur de pression, un sonar et un capteur d'altitude. Il possède en outre 2 bras manipulateurs capables de soulever chacun 100kg. Sa masse totale est d'environ 4 tonnes et son principe de fonctionnement est illustré par la figure 9 ci-dessous :



**Fig. 9 :** Principe de fonctionnement du ROV Victor 6000 de l'Ifremer. L'engin est mis à l'eau à partir d'un navire porteur (Atalante, Pourquoi pas ?, Thalassa) puis maintenu au contact grâce à sa « laisse ». Il dispose ainsi d'une autonomie de plongée de plusieurs jours. **1 :** Laisse mesurant jusqu'à 8500m de longueur. **2 :** ROV. **3 :** Ballast de 1.2 tonnes. **4 :** Longe de 35mm de diamètre et mesurant de 100 à 300m. **5 :** Navire porteur (Copyright, Ifremer).

## 2) Les AUV

L'Ifremer dispose à ce jour de deux AUVs (Autonomous Underwater Vehicle) ou drones sous-marins baptisés respectivement Aster-X et Idef-X. Ces engins sous-marins sont capables de plonger jusqu'à 2700m de profondeur pendant une dizaine d'heures à la vitesse moyenne de 5 nœuds. Leur autonomie, stabilité, vitesse et faible effet magnétique en font un outil idéal pour effectuer des levés magnétiques de vastes zones. Les photos ci-dessous présentent les AUV de l'Ifremer.



**Fig. 10:** Différentes vues des AUV Aster-X et Idef-X. De gauche à droite et de haut en bas : sortie de l'eau, remontée, arrivée sur le pont dans le calliste (support de protection dans lequel l'AUV est logé lorsqu'il n'est pas en plongée afin de faciliter sa manipulation), phase de maintenance à l'arrière du hangar du Nautilus (Copyright, Ifremer).



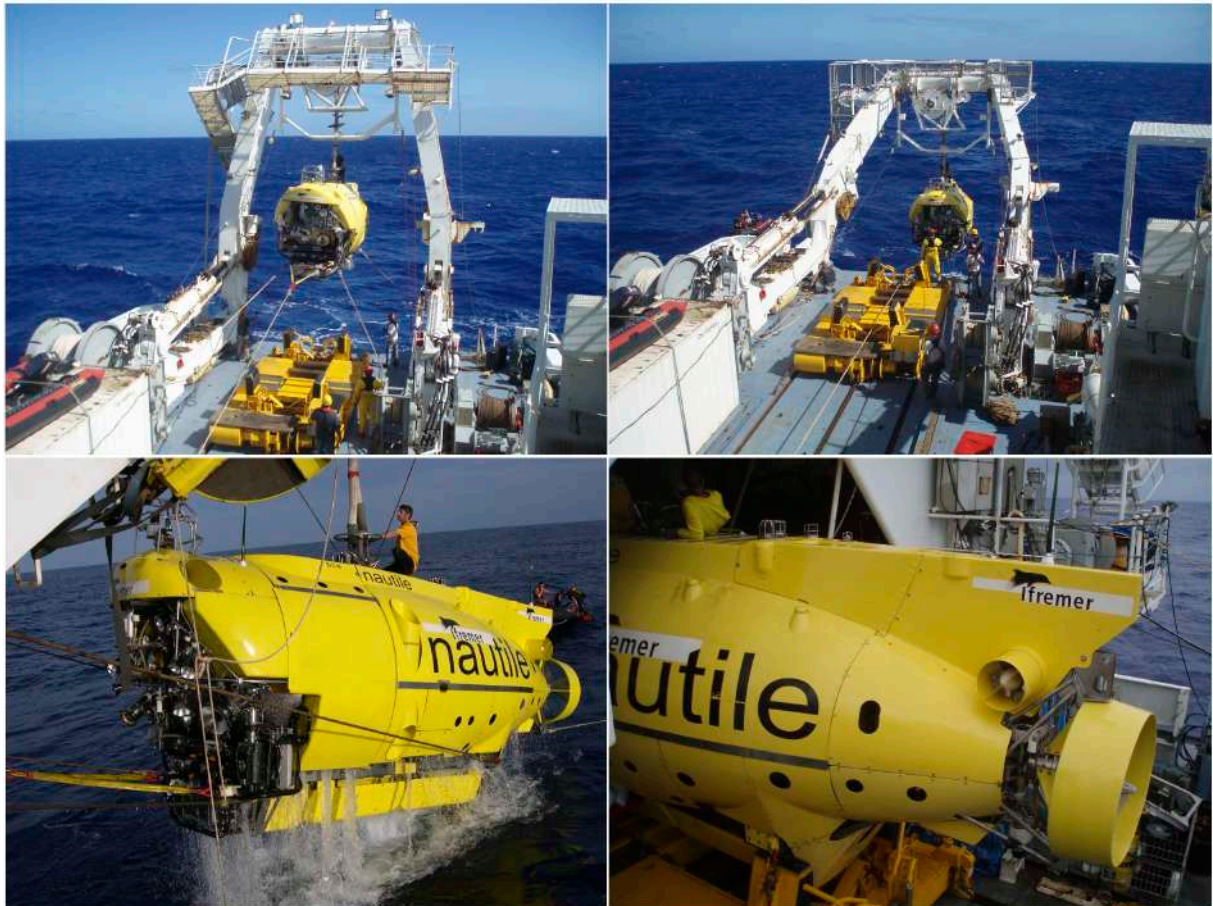
### **3) Le submersible**

Construit par la Direction des Constructions Navales (DCN), le Nautille fait partie des quelques submersibles habités capables de plonger jusqu'à 6000m de profondeur, ce qui lui donne un accès à environ 95% des fonds océaniques. Il a été mis en service en 1984 et compte en 2012 environ 1700 plongées à son actif depuis des navires océanographiques tels que le Nadir, l'Atalante ou le Pourquoi Pas ?.

Le Nautille est apte à effectuer différents types de plongées. Celles-ci peuvent être dédiées à l'exploration, à la collecte d'échantillons, à l'inspection de travaux sous-marins, à l'assistance à des sous-marins en détresse, à la recherche d'épaves ou aux opérations de dépollution. Parmi ses missions les plus notables, on compte ainsi de nombreuses plongées sur l'épave du Titanic ainsi que des travaux de colmatage de l'épave du Prestige afin d'éviter les écoulements de pétrole dans l'océan.

L'observation directe se fait par trois hublots épais. Ils sont percés directement dans la sphère en titane de 2.10m de diamètre servant d'habitacle. Le sous-marin dispose également de projecteurs, de caméras, d'un sonar panoramique lui permettant de détecter les obstacles, de deux bras manipulateurs, d'un panier de collecte d'échantillons et d'une centrale d'attitude mesurant en permanence son assiette, son cap et sa gîte.

Son rayon d'action à une vitesse moyenne de 1.5 nœud est de 7.5km et son équipage se compose de 3 membres (un pilote, un copilote et un scientifique). Il est mis à l'eau par l'intermédiaire d'un portique basculant installé à la poupe des navires océanographiques et doté d'un câble à même de supporter sa masse de 19.5 tonnes.



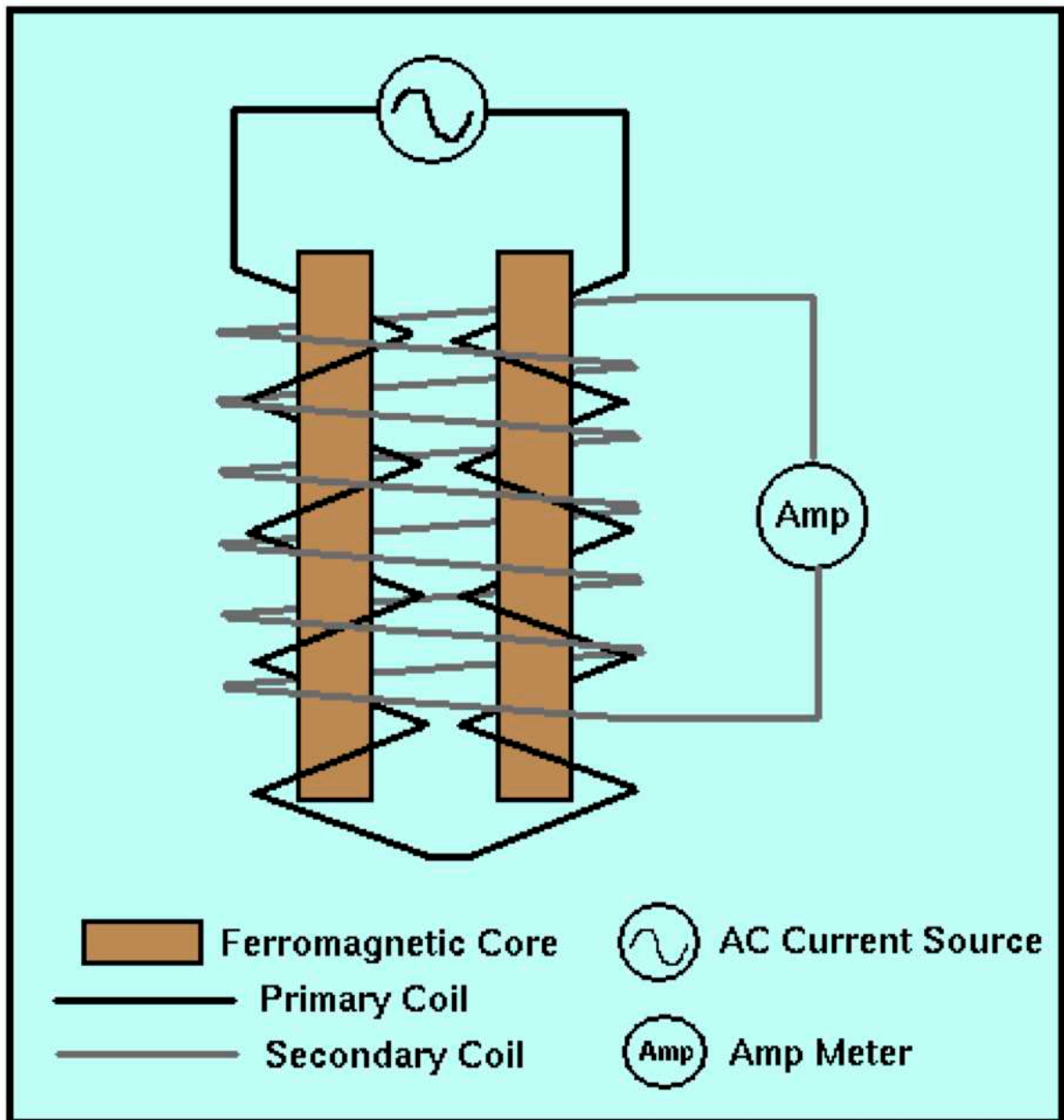
**Fig. 11** : Différentes vues du Nautilie. De gauche à droite et de haut en bas : Basculement du portique de l'Atalante lors de la mise à l'eau. Atterrissage dans l'eau. Récupération. Retour au hangar (Copyright Ifremer).

## 4) Magnétomètre vectoriel

Un magnétomètre vectoriel, ou trois composantes, est constitué de trois magnétomètres disposés de manière orthogonale. Le principe de fonctionnement de ces magnétomètres est basé sur un circuit de saturation magnétique. Deux barres de matériau ferromagnétique sont placées à proximité l'une de l'autre. Leur susceptibilité est choisie de telle manière à ce que le champ magnétique terrestre, pourtant faible, puisse y produire une saturation. Chaque barre est entourée par une bobine, dite primaire, dont le sens d'enroulement est inversé. Sous l'effet d'un champ, un courant alternatif circule dans ces bobines, générant un fort champ magnétique. Ce champ magnétique crée à son tour un champ induit dans chacune des bobines primaires.

Une bobine secondaire entoure les deux barres ferromagnétiques ainsi que les deux bobines primaires. Les champs magnétiques induits produits par le courant alternatif génèrent à leur tour un potentiel électrique dans la bobine secondaire. En l'absence de tout champ externe (ce qui pourrait se produire si la Terre était dénuée de champ magnétique), le potentiel électrique généré dans la bobine secondaire devrait être égal à 0, dans la mesure où les deux bobines créent des champs magnétiques d'intensités égales mais de directions opposées.

Si au contraire les deux noyaux ferromagnétiques sont alignés avec la composante, même faible, d'un champ magnétique externe (tel que le champ magnétique terrestre), l'un des deux noyaux va produire un champ magnétique dans la même direction que le champ externe et le renforcer. Le second sera en opposition avec celui-ci et produira un champ magnétique plus faible. La différence entre les deux est suffisante pour que l'on puisse mesurer une différence de potentiel proportionnelle à cette variation. Ces magnétomètres, dits à vanne de flux, peuvent ainsi mesurer n'importe quelle composante du champ magnétique terrestre. Ces composantes pouvant être dans n'importe quel référentiel, il suffit de ne pas mesurer deux fois la même chose et donc d'avoir des magnétomètres orthogonaux les uns aux autres. Ils sont capables de mesurer des variations de champ magnétique à partir de 0.2nT. Leur principe de fonctionnement est illustré en figure 12.



**Fig. 12** : Schéma d'un magnétomètre à vanne de flux. Les bobines primaires sont enroulées dans des sens opposés autour des noyaux ferromagnétiques. La bobine secondaire vient s'enrouler par dessus.

## II) Méthodes d'acquisition

Dans le cas des levés de surface, on traîne un magnétomètre scalaire (et non vectoriel) à l'extrémité d'un câble suffisamment long pour s'affranchir de la signature du navire. Dans le cas de mesures de fond, cette option devient inadaptée pour deux raisons.

→ La vitesse de l'engin sous-marin est trop faible pour envisager de le tracter.

→ La proximité du fond accroît le risque que le magnétomètre heurte une aspérité, générant des dégâts sur l'appareil de mesure ou le câble.

Il est par conséquent indispensable de fixer directement le magnétomètre sur la structure de l'engin porteur. En ce qui concerne le Nautil, l'emplacement généralement choisi est une barre horizontale située à l'avant de l'engin et bien adaptée pour recevoir le capteur. Sur l'AUV, le magnétomètre est installé à l'intérieur du fuselage, à distance du moteur. Cette technique pose toutefois le problème de la quantification de l'influence magnétique du véhicule porteur, car les mesures seront inévitablement affectées par sa proximité avec la masse métallique du sous-marin. C'est pour cette raison qu'il est impératif de collecter des données magnétiques vectorielles, seules à même de quantifier l'effet magnétique de l'engin et de le corriger efficacement.

L'AUV effectue la quasi-totalité de ses plongées en suivant un itinéraire préprogrammé et régulier. Ces itinéraires sont composés de profils parallèles régulièrement espacés, à une altitude fixe de 70m au-dessus du fond de la mer. Lorsque plusieurs plongées sont entreprises les unes à la suite des autres, il devient ainsi possible de couvrir une vaste zone. Outre les données du magnétomètre vectoriel, l'AUV fournit également une bathymétrie de très haute résolution grâce à son sondeur multifaisceaux embarqué. Il permet aussi de réaliser des mesures d'imagerie acoustique. Il s'agit donc d'un outil de grande valeur grâce auquel il devient possible de localiser les zones caractérisées par un défaut d'aimantation et donc susceptibles d'abriter des sites hydrothermaux.

En raison de son autonomie importante, le ROV Victor peut rester immergé pendant plusieurs jours sans jamais remonter à la surface. Grâce à ses caractéristiques, il peut évoluer beaucoup plus près du fond que l'AUV, voire même s'y poser afin de prélever des échantillons. Le reste du temps, il effectue des levés à des altitudes quasi-constantes de 10, 20 ou 50m. Une stratégie d'approche peut consister à balayer une vaste zone à 50m en suivant des profils à la manière d'un AUV, puis descendre à 20m pour obtenir des données de plus haute résolution sur une zone réduite et terminer à 10m sur les cibles repérées.

Enfin, le Nautille effectue des plongées à une altitude comprise entre 3 et 10m (limite de la visée directe du fond). Les profils de ses plongées sont les plus complexes, car les trajectoires ne sont pas établies en vue de « couvrir » une zone entière mais plutôt pour effectuer différentes tâches, telles que l'observation directe. Certaines plongées d'exploration peuvent ainsi présenter un profil relativement rectiligne alors que d'autres, comme les plongées à vocation biologique, sont centrées sur un site d'observation, duquel le sous-marin ne bouge pratiquement pas. L'intérêt et l'exploitabilité des données magnétiques dépendent donc beaucoup de l'objectif de ces plongées.

# III) Calcul des anomalies

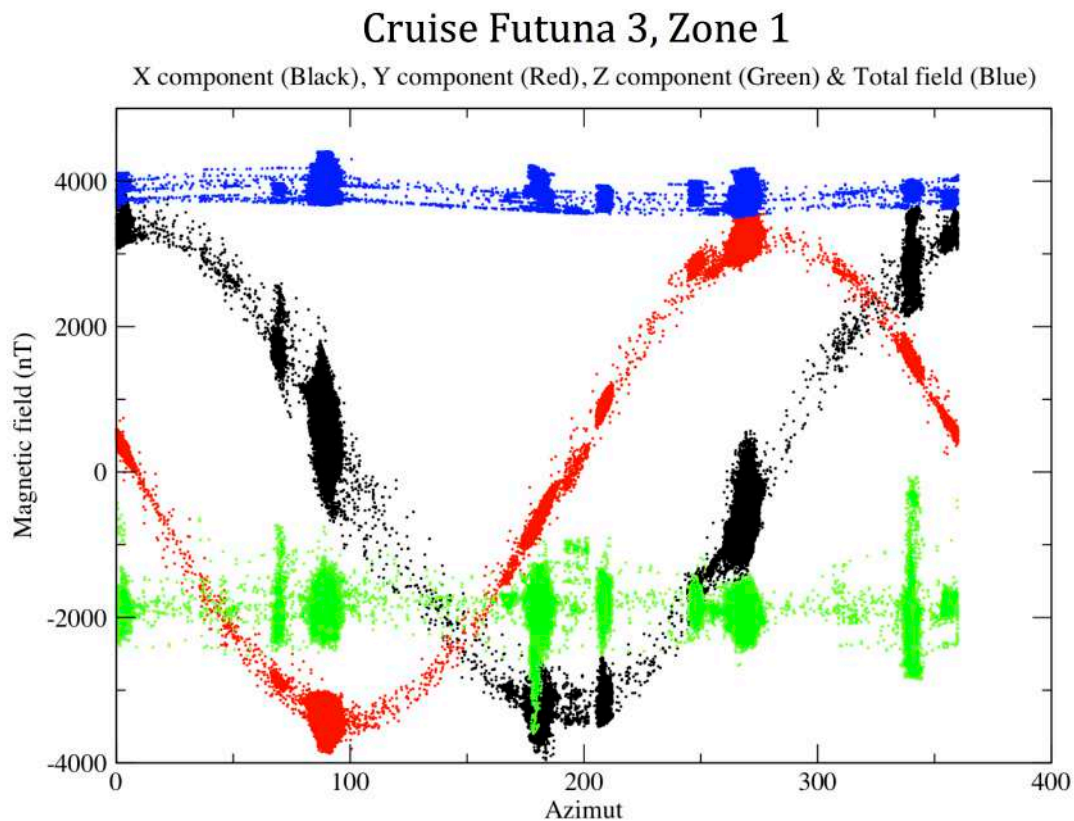
## 1) Données brutes

Le champ magnétique est une grandeur vectorielle, ce qui implique qu'il se définit par son orientation et sa norme. Lorsqu'un engin sous-marin (par exemple un AUV) effectue le levé systématique d'une zone en suivant des profils Est-Ouest puis Ouest-Est, il passera l'essentiel de son temps de plongée en suivant un cap proche de  $90^\circ$  (dans le sens Ouest-Est), ou de  $270^\circ$  (sens Est-Ouest). À cela s'ajouteront les petits profils de jonction Nord-Sud ou Sud-Nord permettant de relier les profils principaux. Ces petits profils seront par conséquent effectués suivant un cap proche de  $0^\circ$  (ou  $360^\circ$ ) pour le sens Sud-Nord ou de  $180^\circ$  pour le sens Nord-Sud.

Lorsque le sous-marin effectue un levé en suivant un profil Est-Ouest, le magnétomètre mesurera la contribution de son champ rémanent de façon opposée à celle mesurée sur un profil Ouest-Est. Il en résultera un décalage entre les mesures effectuées suivant les deux sens opposés principaux. De même, les mesures effectuées sur les profils de raccord seront décalées suivant le sens de parcours de ce profil.

Ce résultat est illustré de manière simple avec l'exemple d'un jeu de données brutes (Figure 13). Les trois composantes et le champ total ont été représentés en fonction du cap de l'AUV pour l'ensemble des plongées effectuées sur l'une des cibles de la campagne Futuna 3 (Sur laquelle nous reviendrons plus tard). Les deux composantes horizontales (respectivement en noir et rouge) varient naturellement avec le cap alors que la composante verticale (verte) ou le champ total varient moins. Sans effet du sous-marin, la composante Z ne devrait pas du tout être affectée par ces rotations. On remarque par ailleurs que la majorité des points apparaissent pour des caps proches de  $90^\circ$  et  $270^\circ$ , les profils étant principalement orientés Est-Ouest et Ouest-Est. Les autres points correspondent aux valeurs « intermédiaires », mesurées alors que l'AUV rejoignait un nouveau profil.

En l'absence de tout traitement, ces « blocs » de points concentrés à proximité des caps majoritaires et dotés de valeurs moyennes différentes en raison de l'orientation du champ créeront des effets de « rails » sur les cartes magnétiques si on les représente sans y appliquer de traitement algorithmique approprié. Elles sont donc totalement inexploitable en tant que telles (Figure 17).



**Fig. 13 :** Représentation des 3 composantes et du champ total en fonction du cap pour l'ensemble des données mesurées par le magnétomètre de l'AUV sur l'une des cibles de la campagne Futuna 3, menée en Mai et Juin 2012. L'effet du cap apparaît sous la forme de 2 sinusoïdes décalées de 90° l'une par rapport à l'autre sur les composantes horizontales, car elles sont les plus affectées par les rotations.



## 2) Correction des effets d'attitude et du sous-marin

Afin de séparer les champs magnétiques de la Terre et du sous-marin, ce dernier doit être quantifié. L'estimation du champ magnétique issu du véhicule porteur est dérivée d'une méthode développée par Isezaki (1986), Korenaga (1995) et adaptée aux engins sous-marins par Honsho (1999).

Cette partie est dédiée à la description de la méthode utilisée pour s'affranchir de la signature magnétique de l'engin porteur et obtenir des anomalies magnétiques exploitables.

### a) Principe de correction du champ de l'engin sous-marin

Le champ magnétique mesuré, noté  $\overrightarrow{H_{obs}}$ , correspond à la superposition du champ géomagnétique ambiant  $\vec{F}$ , du champ magnétique induit par le champ géomagnétique sur le véhicule porteur  $\overrightarrow{H_i}$ , et du champ magnétique rémanent de ce véhicule porteur  $\overrightarrow{H_p}$ . Cette relation vectorielle peut s'écrire sous la forme :

$$\overrightarrow{H_{obs}} = \vec{F} + \overrightarrow{H_i} + \overrightarrow{H_p} \quad (1)$$

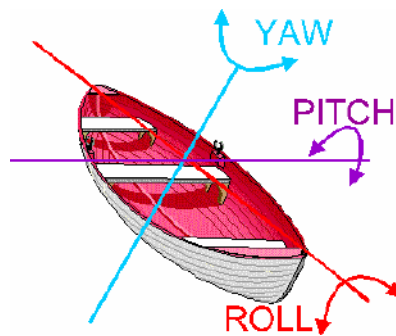
Des méthodes ont été développées afin de déterminer les caractéristiques de  $\overrightarrow{H_i}$  et  $\overrightarrow{H_p}$  et de corriger leurs effets (Isezaki, 1986 ; Korenaga, 1995 ; Lesur, 2004).

Le champ magnétique rémanent du véhicule porteur  $\overrightarrow{H_p}$  est constant en amplitude et reste attaché au sous-marin, ce qui implique qu'il demeure constant dans le repère qui lui est lié. Le champ magnétique induit  $\overrightarrow{H_i}$  est dépendant de  $\vec{F}$  et de l'assiette du submersible. Il est décrit comme le produit du tenseur de susceptibilité magnétique et du vecteur champ inducteur  $\vec{F}$ . La matrice de rotation M permet de passer des coordonnées géographiques à celles de la base liée au sous-marin. Les coefficients de

cette matrice de rotation sont calculés en considérant le fait que le sous-marin dispose de 3 degrés de liberté (angles d'Euler : cap, roulis et tangage), et qu'il y a donc trois rotations successives. Le résultat final de cette matrice est le suivant :

$$M = \begin{pmatrix} \cos(h) \cdot \cos(p) & -\cos(h) \cdot \sin(p) \cdot \sin(r) - \sin(h) \cdot \cos(r) & \cos(h) \cdot \sin(p) \cdot \cos(r) - \sin(h) \cdot \sin(r) \\ \sin(h) \cdot \cos(p) & -\sin(h) \cdot \sin(p) \cdot \sin(r) - \cos(h) \cdot \cos(r) & \sin(h) \cdot \sin(p) \cdot \cos(r) + \cos(h) \cdot \sin(r) \\ -\sin(p) & \cos(p) \cdot \sin(r) & \cos(p) \cdot \cos(r) \end{pmatrix}$$

« h » correspond au cap (heading) , « r » au roulis (roll) et « p » au tangage (pitch).



**Fig. 14 :** Illustration des différents degrés de liberté d'un navire.

Dans le repère lié au sous-marin, le champ géomagnétique  $\vec{F}$  peut donc s'écrire sous la forme :

$$\vec{F} = M.\vec{F} \quad (2)$$

Le champ induit  $\vec{H}_i$  est:

$$\vec{H}_i = A.M.\vec{F} \quad (3)$$

« A » est une matrice 3\*3 correspondant au tenseur de susceptibilité magnétique du sous-marin. Il s'agit de l'un des paramètres que l'on souhaite calculer.

On peut donc remplacer  $\vec{F}$  et  $\vec{H}_i$  par leurs expressions respectives dans l'équation (1). On obtient alors :

$$\vec{H}_{obs} = (I + A).M.\vec{F} + \vec{H}_p \quad (4)$$

« I » correspond à la matrice identité 3\*3.

Si l'on suppose que  $A$  et  $\vec{H}_p$  sont connus, il devient possible d'utiliser l'équation (4) pour déterminer les caractéristiques du champ géomagnétique  $\vec{F}$  à partir du champ mesuré  $\vec{H}_{obs}$ .

## **b) « Boucles de calibration »**

On appelle « boucles de calibration » les rotations effectuées naturellement (dans le cas du Nautille) ou sur commande (ROV et AUV) en début et fin de plongées. Il s'agit des figures effectuées lorsque le sous-marin est suffisamment éloigné à la fois du navire porteur et du fond pour que les mesures acquises par le magnétomètre ne soient pas perturbées par une influence extérieure. Au cours de ces boucles, le champ mesuré est donc supposé identique à celui prédit par l'IGRF et tout écart par rapport à cette hypothèse pourra être attribué à l'influence magnétique du submersible.

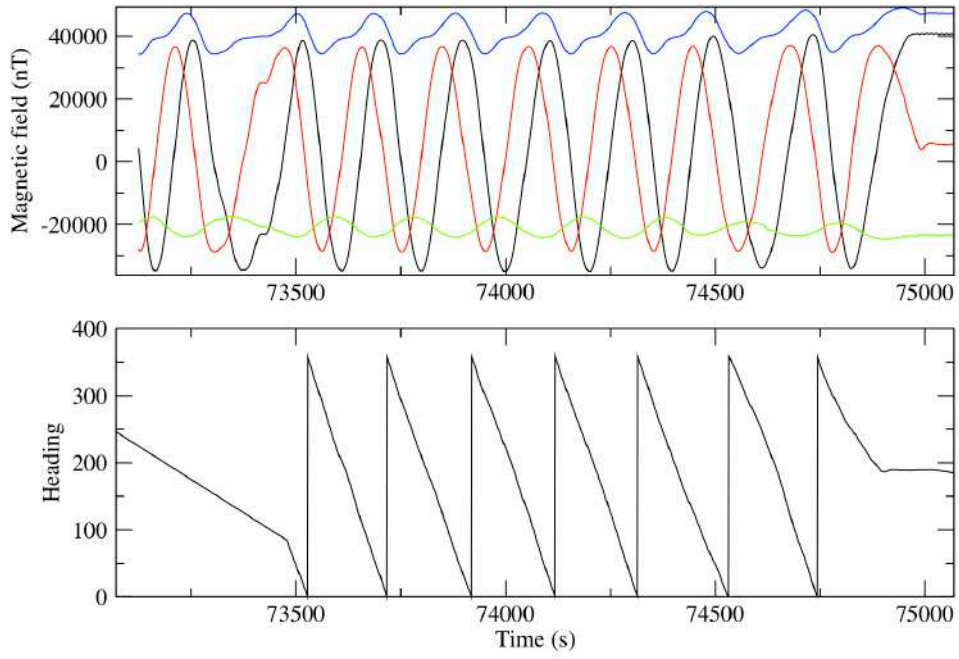
Les boucles de calibration varient d'un submersible à l'autre :

→ Dans le cas du Nautille, l'absence d'équilibre du sous-marin le met spontanément en rotation lors de la descente. Ces rotations se font au rythme d'une toutes les 2 minutes environ et s'effectuent alors que le sous-marin se laisse descendre sous l'effet de ses lests (et peut donc conserver une assiette et un roulis proches de 0). Leur nombre est donc lié à la profondeur d'immersion.

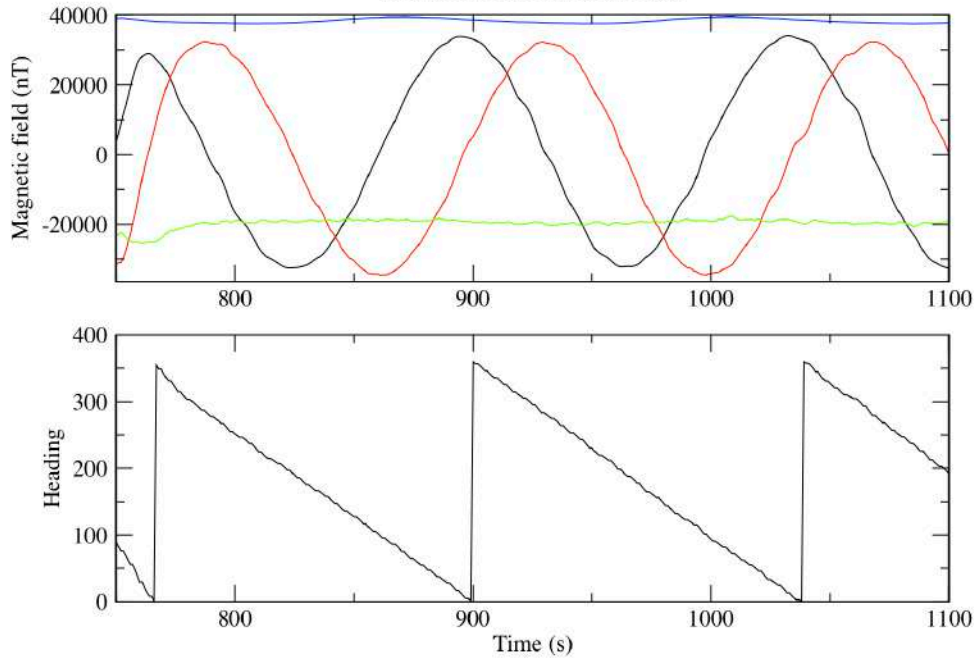
→ Dans le cas du ROV, les boucles de calibration ne se font pas au cours de la descente mais une fois parvenu à proximité du fond. Il n'accomplit pas de rotations successives comme le Nautille en raison de sa « laisse » qui le relie au navire et qui risquerait de rompre sous l'effet de la torsion. Le ROV effectue par conséquent un tour sur lui-même avant de revenir à sa position initiale grâce à une rotation dans l'autre sens. Ces boucles sont commandées depuis la surface par l'opérateur en charge du pilotage de l'engin.

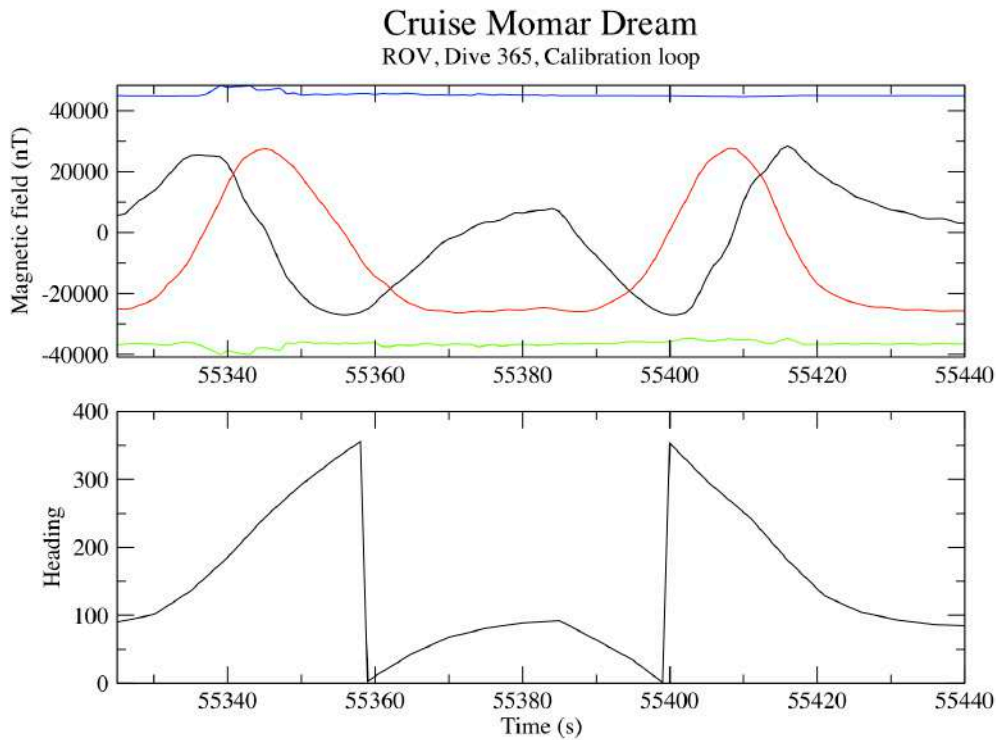
→ Enfin, dans le cas de l'AUV, les boucles de calibration sont effectuées en surface, à distance du navire, avant le début de la descente. Lors de la descente, l'engin est affecté par une forte assiette négative, que l'on ne retrouve plus au cours de la plongée. La situation du sous-marin par rapport au vecteur magnétique n'est donc plus la même et des boucles effectuées lors de la descente seraient inexploitable.

### Cruise Futuna 1 Nautilie, Dive 9, Calibration loops



### Cruise Futuna 3 AUV, Dive 2, Calibration loops





**Fig. 15 :** Illustration des boucles de calibration effectuées par le Nautilus, l'AUV et le ROV. Les composantes X, Y et Z sont représentées en noir, rouge et vert (respectivement) et le champ total est en bleu. Dans le cas du Nautilus, le nombre de boucles de calibration est élevé car le sous-marin entre en rotation dès le début de la descente et ne s'interrompt qu'une fois arrivé au fond. Pour l'AUV, les 3 boucles sont réalisées en surface. Enfin, dans le cas du ROV, une seule boucle est présentée ici mais d'autres sont effectuées à différents paliers de profondeur, sur commande de l'opérateur. Elles diffèrent de celles de l'AUV et du Nautilus car elles sont composées d'une rotation dans un sens puis d'une autre dans le sens opposé afin de garantir la sécurité de la « laisse ».

Le tenseur de susceptibilité magnétique  $A$  et le vecteur champ  $\vec{H}_p$  causé par l'aimantation rémanente de l'engin sont déterminés par la méthode des moindres carrés sur les données des boucles de calibration. Le champ induit du submersible  $\vec{H}_i$  varie en amplitude et en direction dans le repère lié au sous-marin. Le champ magnétique rémanent  $\vec{H}_p$  reste invariant.

Le champ magnétique généré par le sous-marin est la somme des deux termes précédents:

$$\vec{H}_{shup} = \vec{H}_i + \vec{H}_p \quad (5)$$

Le champ magnétique lié au sous-marin peut être séparé en un terme induit et un autre rémanent. Si l'on suppose que le champ ambiant  $\vec{F}$  est connu, alors le tenseur de susceptibilité magnétique  $A$  et le vecteur  $\vec{H}_p$  peuvent être calculés. En pratique, le champ ambiant  $\vec{F}$  est considéré comme étant égal à l'IGRF au lieu considéré. Si l'on développe l'équation (4), on obtient 12 équations indépendantes permettant de déterminer les 12 coefficients inconnus (9 pour la matrice 3\*3 du tenseur de susceptibilité et 3 pour le vecteur champ rémanent) (Isezaki, 1986 ; Lesur, 2004). Afin d'améliorer la précision sur les coefficients  $A_{ij}$  du tenseur, en particulier sur la colonne  $A_{i3}$ , il est possible de décrire des figures en 8 plutôt que des boucles de calibration simples (Korenaga, 1995).

L'équation (4) dans son ensemble donne la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} H_{obs1} \\ H_{obs2} \\ H_{obs3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & 1 + A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & 1 + A_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H_{p1} \\ H_{p2} \\ H_{p3} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Si  $A$ ,  $\vec{H}_p$  et  $\vec{F}$  sont connus, le terme de droite de l'équation (6) peut être considéré comme un champ magnétique théorique. La déviation  $R^2$  entre le champ magnétique observé  $\vec{H}_{obs}$  et le champ magnétique théorique s'exprime par:

$$R^2 = \sum_{k=1}^N \left( \vec{H}_{obs}^k - [(I + A) \cdot M^k \cdot \vec{F} + \vec{H}_p] \right)^2 \quad (7)$$

Et donc

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{pmatrix}^2 = \sum_{k=1}^N \left[ \begin{pmatrix} H_{obs1}^k \\ H_{obs2}^k \\ H_{obs3}^k \end{pmatrix} - \left\{ \begin{pmatrix} 1 + A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & 1 + A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & 1 + A_{33} \end{pmatrix} \cdot M^k \cdot \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H_{p1} \\ H_{p2} \\ H_{p3} \end{pmatrix} \right\} \right]^2 \quad (8)$$

« N » est le nombre de mesures effectuées au cours d'une plongée et « k » est le numéro de la k-ième mesure.

$R^2$  donne une estimation de la fiabilité des valeurs de  $A$ ,  $\vec{H}_p$  et  $\vec{F}$ .

Le tenseur de susceptibilité magnétique  $A$  et le vecteur d'aimantation rémanente  $H_p$  sont déterminés par minimisation de la quantité  $R^2$ . Les équations suivantes doivent par conséquent être vérifiées (Honsho, 1999) :

$$\frac{\partial(R_i^2)}{\partial A_{ij} \quad j=1,2,3} = 0 \text{ et } \frac{\partial(R_i^2)}{\partial H_{pi} \quad j=1,2,3} = 0 \quad (9)$$

Dans la mesure où les boucles de calibration des engins sous-marins ne décrivent pas des figures en 8, la détermination du coefficient  $A_{i3}$  est moins robuste que les éléments verticaux  $A_{i1}$  et  $A_{i2}$  (Isezaki, 1986 ; Lesur, 2004). Afin de contourner ce problème et d'obtenir malgré tout une estimation stable du coefficient  $A_{i3}$ , Honsho (1999) a introduit une condition a priori selon laquelle le champ magnétique induit par le sous-marin doit être faible par comparaison avec le champ géomagnétique ambiant. Cette hypothèse s'exprime par :

$$\vec{F} + A.\vec{F} \cong \vec{F} \quad (10)$$

Cette hypothèse est acceptable dans la mesure où  $\det(A)$  est généralement inférieur à 1. On peut par conséquent considérer que  $A$  est « petite » par comparaison avec la matrice identité. La quantité  $N.\alpha^2.A$  est introduite dans la relation (7) et on obtient une nouvelle déviation  $R'^2$  à minimiser. Cette nouvelle déviation s'écrit sous la forme :

$$R'^2 = \sum_{k=1}^N \left( \overrightarrow{H_{obs}^k} - [(I + A).M^k.\vec{F} + \overrightarrow{H_p}] \right)^2 + N.\alpha^2.tr(A) \quad (11)$$

$\alpha^2$  est un paramètre choisi de manière arbitraire et baptisé facteur d'amortissement (Honsho, 1999). Le premier terme de la relation est celui de la méthode des moindres carrés alors que le second régit le « poids » donné à la condition a priori. Si le facteur d'amortissement est choisi égal à 0, alors les équations (7) et (11) sont identiques. Aucune condition supplémentaire n'est prise en compte et le champ magnétique du sous-marin est estimé à partir des seules données. Si  $\alpha^2$  augmente, le second terme acquiert de l'importance et confère un « poids » plus conséquent à cette condition. Le facteur d'amortissement doit ainsi être choisi avec prudence : s'il est trop petit, alors l'estimation de  $A_{ij}$  ne sera pas suffisamment robuste et stable. A contrario, s'il est trop important, l'hypothèse selon laquelle le champ magnétique du sous-marin

reste faible comparativement au champ ambiant introduira une erreur non négligeable exprimée sous la forme :

$$\sigma_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N \left[ H_{obs_i}^k - \sum_{j=1,2,3} (A_{ij} \cdot M^k \cdot F_j) - H_{p_i} \right]^2 \quad (12)$$

### c) Choix du facteur d'amortissement

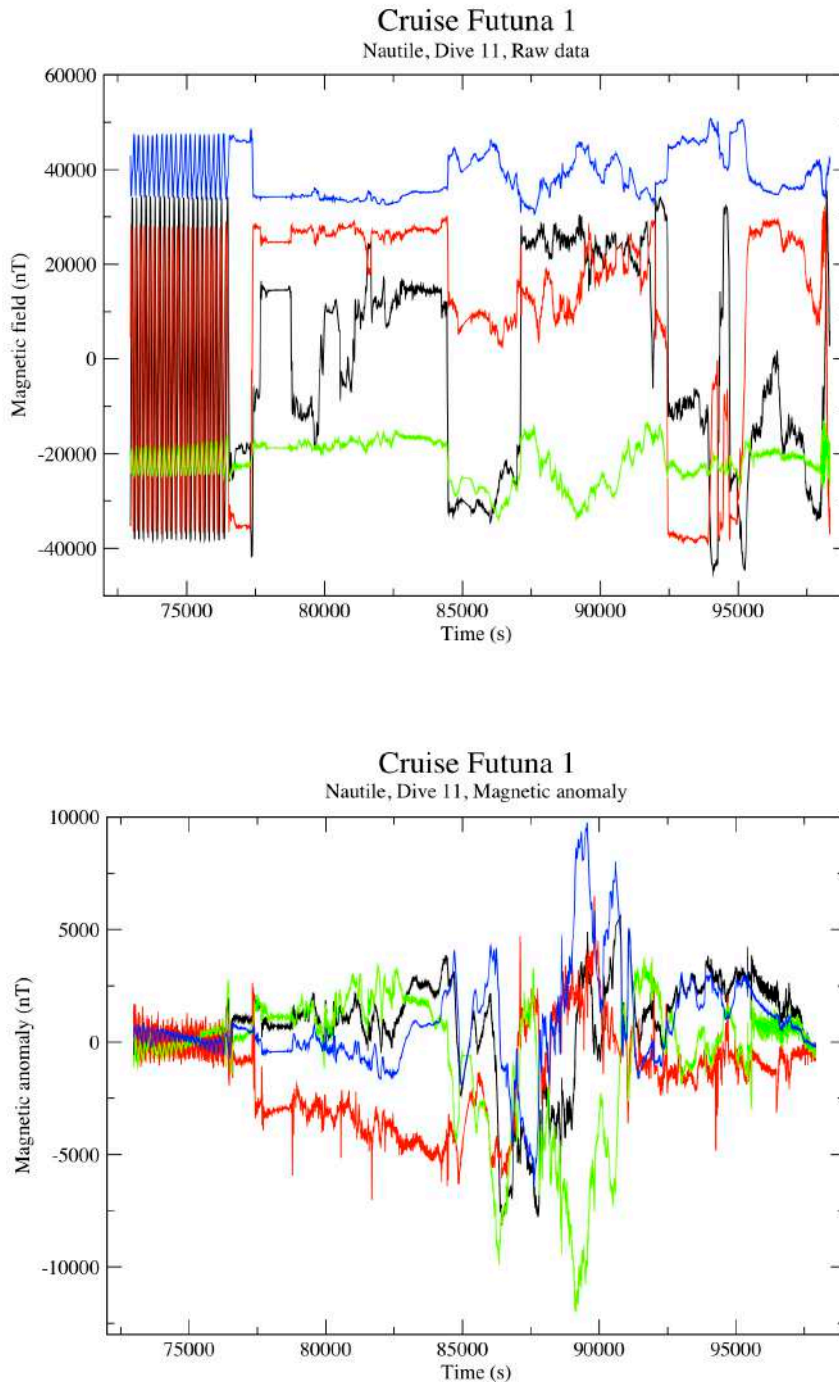
Comme indiqué ci-dessus, le choix du facteur d'amortissement est délicat et doit être effectué avec prudence pour optimiser les résultats. Le facteur  $\alpha^2$  est défini comme étant égal à  $10^p$ , ou « p » varie de 1 à 10. Comme Honsho (1999) le remarquait, 3 domaines distincts peuvent être définis :

Domaine	Valeur de p	Caractéristiques
I	[0,3[	$\sigma_i$ est faible => Les données sont davantage prises en compte que la condition a priori. $A_{i3}$ est instable et très différent de 0.
II	[3,7[	$\sigma_i$ reste proche des valeurs initiales. $A_{i3}$ converge rapidement vers 0.
III	[7,10[	$\sigma_i$ diverge => La condition a priori est plus importante que les données, qui sont mal représentées. Tous les $A_{ij}$ convergent vers 0.



La valeur de  $p$  doit être choisie de telle manière à ce que les coefficients  $A_{i3}$  tendent vers 0 et que les déviations  $\sigma_i$  causées par la condition a priori restent faibles. Ces conditions sont vérifiées dans le domaine II. Pour  $p = 6$  ou  $7$ , les éléments  $A_{i3}$  sont proches de 0 et  $\sigma_i$  reste faible. La valeur de  $p$  choisie a donc été établie à 6.5.

Une illustration de l'efficacité du traitement algorithmique est proposée en figure 16.



**Fig. 16** : Comparaison d'un même jeu de données issu d'une plongée du Nautilus. L'image du haut correspond aux données brutes. Les boucles de calibration sont clairement visibles en début de plongée. Il est par ailleurs possible de voir des « sauts » dans les deux composantes horizontales (respectivement en noir et rouge) au moment où le sous-marin pivote. Sur le graphe du dessous, les données ont été inversées à partir des boucles de calibration. L'amplitude de celles-ci est passée de presque 80 000nT à environ 2000nT. Par ailleurs, les « sauts » dans les composantes horizontales ont totalement disparu, ce qui prouve que le processus a été bien effectué. Il est donc possible de considérer que le graphe du dessous correspond à des anomalies magnétiques affranchies de la signature magnétique du sous-marin.

## **d) Méthode alternative**

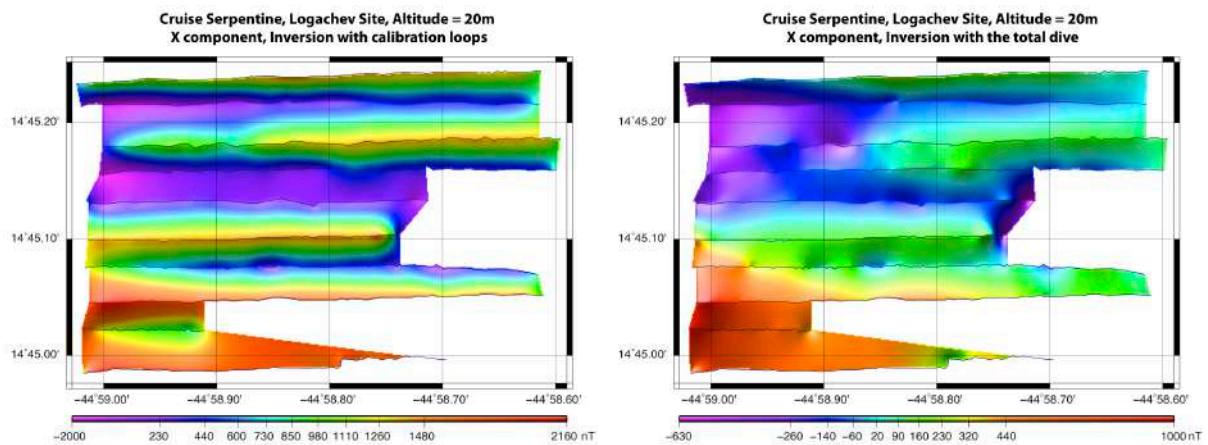
Les conditions d'acquisition n'étant jamais idéales, les boucles de calibration de certaines plongées sont parfois insuffisantes ou de mauvaise qualité. Les rotations peuvent ne pas être régulières ou la géométrie du sous-marin peut varier légèrement pendant la descente etc... Dès lors, les données des boucles peuvent devenir inexploitable. Les données de la plongée ne seront pas corrigées de manière satisfaisante, conduisant à la persistance de « rails » le long des routes.

Afin de remédier à ce problème, je me suis basé sur le fait que lors des plongées, toutes les valeurs de cap sont représentées. Certains le sont davantage que d'autres mais le nombre de mesures est très largement supérieur à celui des seules boucles. Alors que l'utilisation des boucles de calibration est basée sur un raisonnement déterministe, on suppose désormais que d'un point de vue statistique, compte tenu du grand nombre de mesures, les anomalies sont à moyenne nulle et qu'aucun biais systématique n'existe entre l'anomalie et le cap. J'ai donc considéré l'ensemble d'une plongée ROV ou AUV comme étant l'équivalent d'une grande boucle de calibration, en partant du principe que les anomalies que l'on recherche seraient moyennées par le nombre de mesures. Une estimation du tenseur de susceptibilité magnétique du sous-marin a été établie par ce biais.

Cette méthode présente par ailleurs l'avantage par rapport aux boucles de calibration de pouvoir prendre en compte un éventuel changement de géométrie du submersible au cours de la plongée (par exemple liée à un bras manipulateur mal remis en place après une collecte d'échantillon). L'expérience démontre que les résultats de cette méthode sont très satisfaisants dans le cas du ROV et qu'il est parfois préférable de l'utiliser plutôt que des boucles de calibration difficilement exploitables. Dans le cas de l'AUV cependant, les boucles de calibration donnent généralement d'excellents résultats et il n'est pas utile d'y recourir. Elle peut néanmoins constituer une méthode de substitution en cas de besoin.

Dans le cas du Nautile, cette méthode alternative devient inexploitable en raison de la nature de la plongée. La grande richesse spectrale ne permet pas de considérer qu'il n'y a pas de biais entre anomalie et cap, ce dernier étant peu variable. Les plongées du Nautile suivant généralement un cheminement prédéterminé, tous les caps ne sont pas forcément représentés. L'estimation d'un tenseur de susceptibilité donne donc des

résultats aberrants. La seule option pour le Nautilé consiste donc à se baser sur les boucles de calibration.



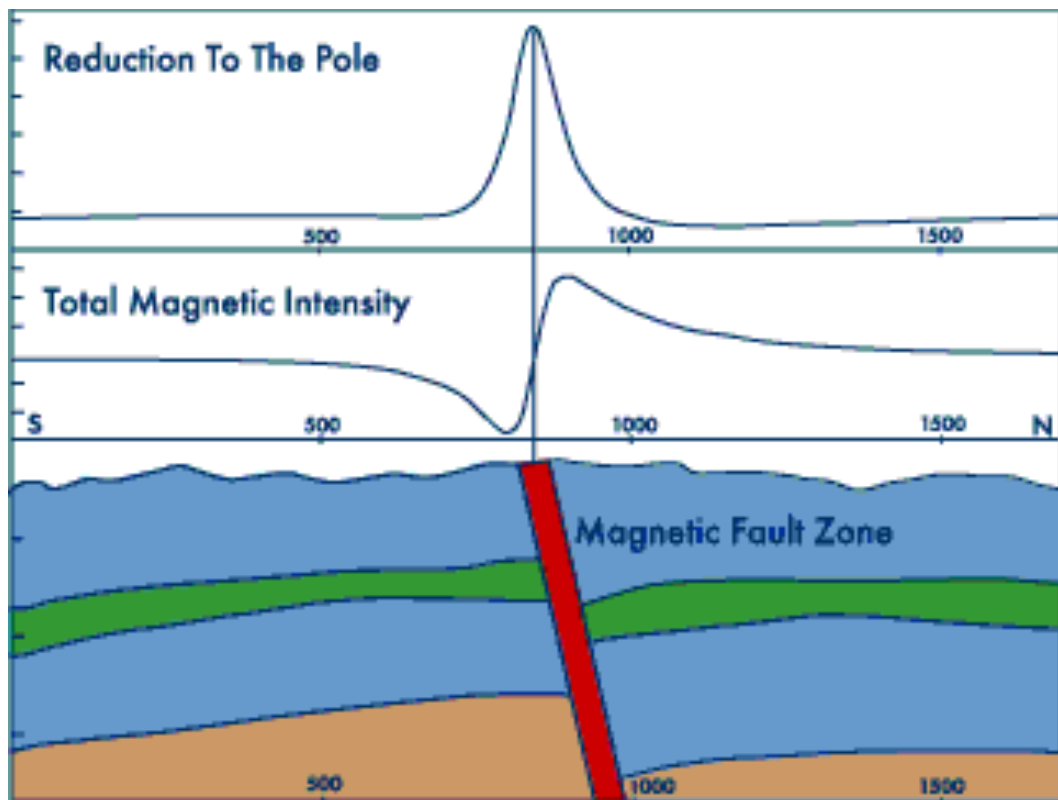
**Fig. 17 :** Exemple de correction des données magnétiques sur la composante Nord en utilisant les boucles de calibration (gauche) et la plongée complète (droite) pour déterminer l'effet magnétique du submersible. La carte de gauche laisse clairement apparaître des « rails » le long des routes du ROV, signe d'une mauvaise inversion. La carte de droite est nettement mieux corrigée, ce qui montre l'efficacité de la méthode.

## e) Réduction au pôle

Les anomalies magnétiques enregistrées aux latitudes moyennes présentent généralement deux lobes excentrés par rapport à la position du corps aimanté à l'origine de cette anomalie. La figure 18 ci-dessous illustre ce phénomène, en montrant l'anomalie telle qu'elle est mesurée avec ses deux lobes. La raison est que le vecteur aimantation et le vecteur champ magnétique terrestre ne sont pas verticaux mais inclinés. Ramener l'anomalie au droit des sources est une opération appelée réduction au pôle. On se place dans des conditions où les deux vecteurs sont verticaux, c'est à dire au pôle magnétique.

Dans notre cas, les régions considérées sont jeunes. On fait donc l'hypothèse simplificatrice selon laquelle le vecteur aimantation rémanente est parallèle au champ magnétique terrestre actuel. Ceci est bien entendu vérifié dans le cas de roches ne possédant qu'une aimantation induite.

La réduction au pôle est une transformation mathématiquement stable dans la majorité des cas, sauf à proximité de l'équateur magnétique (distance angulaire inférieure à  $10^\circ$ ), car il y a alors une divergence mathématique.



**Fig. 18 :** Effet de la réduction au pôle sur les anomalies magnétiques. L'anomalie observée est causée par le corps représenté en rouge. La courbe du bas correspond à l'anomalie mesurée avant réduction. Les deux lobes de signes opposés apparaissent clairement. L'anomalie réduite au pôle est représentée sur le graphe supérieur. Elle est désormais centrée sur la source, ce qui rend l'interprétation géologique plus aisée. (Source de l'image : <http://gravmag.ou.edu/readings/reduction%20to%20pole.htm>)

# **IV) Calcul de l'aimantation**

## **1) Les méthodes existantes**

Obtenir des anomalies magnétiques exploitables ne constitue que la première étape du processus de traitement des données. Une seconde étape consiste à en déduire un modèle d'aimantation de la croûte dont on tirera une interprétation géologique. Différentes méthodes d'inversion ont été développées pour parvenir à ce résultat.

### **a) Méthode de Parker et Huestis (1974)**

Cette méthode consiste à inverser les anomalies magnétiques en aimantation équivalente en présence d'une topographie. Elle fait l'hypothèse forte d'une couche aimantée d'épaisseur constante suivant la topographie et exclut les possibilités de variations verticales d'aimantation (Parker and Huestis, 1974).

Un calcul itératif en domaine de Fourier permet d'obtenir rapidement des solutions. Un annihilateur (distribution d'aimantation qui, dans les conditions de l'expérience, génère une anomalie nulle) peut être obtenu et la solution retenue pourra, sur la base de contraintes géologiques, ajouter une proportion de cet annihilateur au résultat du calcul.

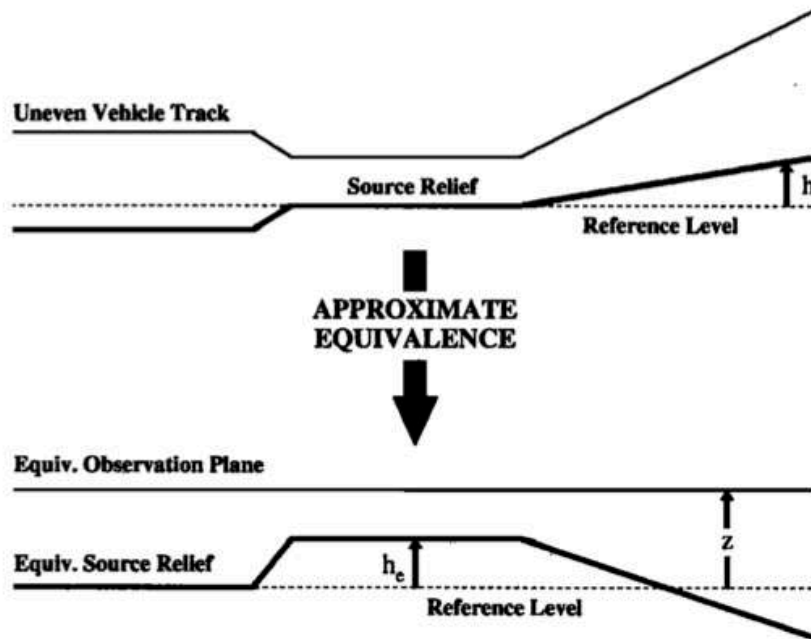
Cette méthode a dans un premier temps été utilisée pour des profils de surface, au cours desquels l'altitude de mesure est constante. Elle a ensuite été généralisée pour des cartes par McDonald et al. (1980). Dans le cas de levés effectués par sous-marin, l'altitude du magnétomètre au dessus du fond varie. Pour que la méthode fonctionne, il est indispensable de se ramener à un plan d'altitude constante (Guspi, 1987), ce qui impose d'effectuer un prolongement vers le haut des données. Ce prolongement doit permettre de se ramener à un plan dont l'altitude sera supérieure au point le plus haut de la zone d'étude afin de rester en dehors des sources. Ce prolongement conduit

toutefois à une augmentation du bruit généré par les approximations. Il peut être supprimé en ayant recours à un filtre passe-bas, mais ce processus conduit inévitablement à une perte de résolution, ce qui peut constituer un problème majeur car les zones de désaimantation peuvent être très locales et passer inaperçues.

## **b) Méthode de Hussenoeder et al. (1992)**

Cette méthode a été développée en 1992 pour des profils à profondeur variable afin de palier aux problèmes de perte de résolution entraînés par la méthode d'inversion de Parker et Huestis (1974) couplée au prolongement vers le haut visant à ramener les données sur un plan horizontal (Guspi, 1987). Cela se justifiait particulièrement dans le cas de mesures effectuées dans un environnement à la topographie marquée.

Le principe consiste à considérer des mesures effectuées au cours d'une plongée pendant laquelle l'altitude du véhicule porteur au dessus du fond varie. Pour n'importe quelle géométrie de plongée, il existe une géométrie approximative équivalente permettant de représenter les variations d'altitude du sous-marin tout en considérant un niveau d'observation horizontal (Figure 19). C'est cette équivalence qui forme la base de la technique de réduction de Pilkington & Urquhart (1990), dans laquelle une distribution des sources est calculée en partant du principe que les variations d'altitude du véhicule se produisent autour d'une altitude constante et que la topographie joue le rôle de miroir de ces variations. Un champ réduit est ensuite calculé à partir de cette distribution.



**Fig. 19 :** À partir d'une géométrie connue du profil de la plongée, on introduit une géométrie miroir que l'on applique à la topographie du fond de la mer de manière à ramener la trajectoire du sous-marin à un plan (Hussenoeder et al., 1995).

Afin d'utiliser la méthode d'Hussenoeder, il convient donc d'introduire au préalable une « image miroir » des variations d'altitude du sous-marin de manière à le ramener à une altitude constante. Cette étape ne génère aucune modification sur les données et se contente d'introduire une géométrie plus facilement exploitable. En conservant la même hypothèse de couche aimantée d'épaisseur constante que celle formulée par Parker et Huestis (1974), une solution peut alors être trouvée. Les erreurs peuvent devenir importantes dans le cas d'une topographie marquée (exemple du sous-marin habité dans une zone volcanique), mais elles peuvent toutefois être quantifiées et corrigées.

La première étape des corrections consiste à calculer la valeur du champ qu'une couche d'épaisseur constante aimantée à  $1A/m$  génère le long de la trajectoire du sous-marin dans sa géométrie initiale. Ceci peut être facilement accompli grâce aux techniques de Talwani & Heirtzler (1964) et Won & Bevis (1987). Une inversion est par la suite appliquée au champ. Cette méthode améliore donc celle de Parker et Huestis (1974), mais demeure approximative en raison des corrections à apporter aux solutions obtenues.



## **2) Inversion par comparaison à un modèle direct (Honsoho et al., 2009)**

### **a) Méthode**

Les méthodes présentées précédemment consistent à inverser le signal d'anomalie magnétique en aimantation équivalente (c'est à dire à un annihilateur près) par une méthode mathématique (par exemple la méthode itérative en domaine spectral de Parker et Huestis, 1974). Dans ce type de méthode, le fait que les mesures soient effectuées à des altitudes et des profondeurs variables constitue donc une difficulté. Une manière différente d'aborder le problème consiste à tirer avantage de cette difficulté : en effet, lorsque les effets conjugués de la bathymétrie et des variations d'altitude du magnétomètre sont suffisamment importants pour générer des anomalies significatives, on peut tenter de déterminer l'aimantation du fond océanique (ou du moins de sa partie la plus superficielle) à partir de ces anomalies. C'est notamment le cas des mesures effectuées par le submersible grand fond Nautille.

Cette méthode, basée sur la comparaison des données avec un modèle direct calculé dans les conditions d'acquisition pour une aimantation constante et unitaire (Honsoho et al., 2009), a été utilisée pour déterminer les aimantations le long des plongées Nautille effectuées au cours des deux missions Futuna 1 et 3. Contrairement aux méthodes d'inversion précédentes, elle présente l'avantage de fournir des valeurs d'aimantation théoriquement absolues et non pas équivalentes.

Lors des plongées du Nautille, l'immersion et l'altitude par rapport au fond sont collectées à raison d'une mesure par seconde. On dispose donc de la géométrie précise de la plongée. En considérant une couche d'épaisseur constante aimantée à  $1A/m$  suivant la topographie de la plongée, et en supposant des sources infinies perpendiculairement à la route du submersible, on calcule un profil d'anomalie magnétique théorique.

Ce profil est ensuite comparé au profil mesuré, en suivant des fenêtres glissantes. Pour chacune de ces fenêtres, une cohérence est déterminée en domaine spectral entre

les signaux synthétique et observé. Cette cohérence est comprise entre 0 (signaux totalement différents) et 1 (signaux identiques). Si elle est « suffisamment élevée » (la borne inférieure du critère de choix a été fixée à 0.3), on considère que le signal synthétique est raisonnablement représentatif de ce qui est observé. Le rapport entre signal observé et signal synthétique (calculé pour une aimantation unitaire) donne ainsi une estimation de l'aimantation absolue des roches dans la fenêtre considérée.

Cette méthode permet également d'obtenir des informations sur la polarité magnétique des roches. Si les signaux synthétique et observé présentent une bonne cohérence mais une phase opposée (c'est à dire proche de  $180^\circ$ ), cela signifie que la polarité est inverse. Par contre, si ces signaux sont en phase, la polarité est normale. La polarité est une information importante permettant de donner une estimation de l'âge des structures volcaniques observées à proximité de l'axe des dorsales. En effet, lorsque celles-ci se mettent en place, elles acquièrent une aimantation rémanente qui reflète l'orientation du champ à cette époque. La polarité est inverse si les structures sont antérieures à la dernière inversion (780 000 ans) et normale si elles sont plus récentes. Des phases normales ou inverses peuvent également traduire des époques de mise en place antérieures à la dernière période inverse. Cependant, les zones hydrothermales sur lesquelles ce travail se concentre sont suffisamment proches de l'axe des dorsales actives pour que cette hypothèse soit prise en compte.

## **b) Limites de la méthode**

Cette méthode a été mise au point et appliquée par Honsho (1999) sur des plongées pour lesquelles les seules données bathymétriques de haute résolution étaient celles fournies par l'immersion et l'altitude du submersible le long de la trajectoire de la plongée. La topographie des environs n'était connue que par les mesures de surface du sondeur multifaisceaux du navire et la résolution, de l'ordre de la centaine de mètres, était largement insuffisante. Il était donc impossible de prendre en compte l'influence magnétique des structures 3D latérales, dont les caractéristiques bathymétriques n'étaient pas connues. J'ai donc envisagé une méthodologie permettant de résoudre ce problème, en prenant avantage des nouveaux outils disponibles aujourd'hui.

### **c) Une amélioration**

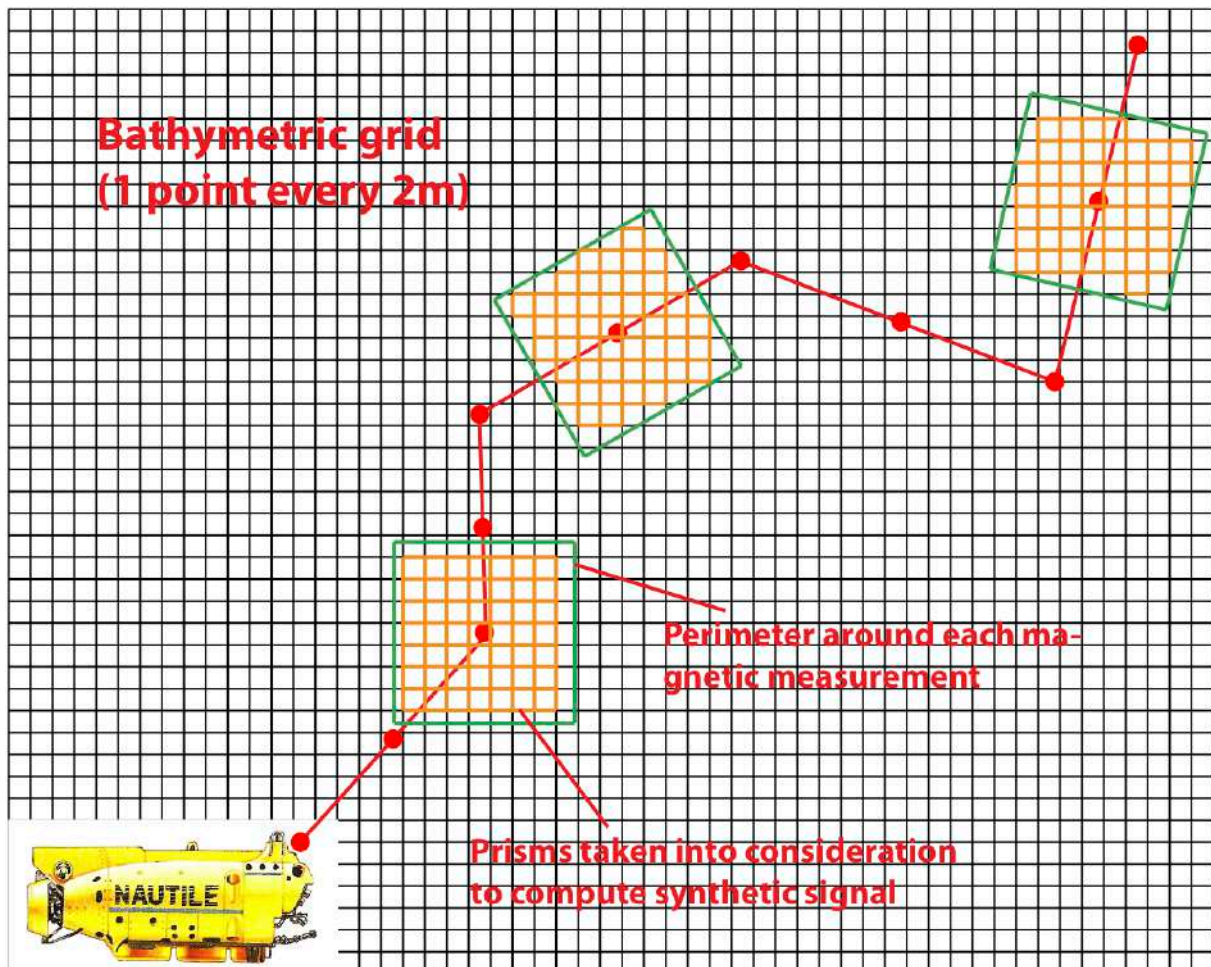
La méthode de Honsho et al. (1999) est applicable dans le cas où l'hypothèse des structures 2D est acceptable, comme pour les profils perpendiculaires à l'axe des dorsales. Elle devient discutable dans les environnements 3D tels que les zones volcaniques complexes.

La généralisation des sondeurs multifaisceaux sur les engins sous-marins d'exploration profonde tels que les ROV et les AUV permet l'acquisition de données bathymétriques de haute résolution à un pas métrique (environ 1.80m pour l'AUV lorsque l'altitude de navigation est de 70m au dessus du fond). Les levés sont réalisés de manière à couvrir de vastes surfaces dans lesquelles sont ensuite effectuées les plongées du Nautille. Nous disposons donc de données bathymétriques précises dans les zones entourant les plongées, et les caractéristiques des reliefs situés à une distance suffisamment proche pour présenter une influence magnétique non négligeable sont connues. Munis de ces informations, nous améliorons la méthode de Honsho (1999) en considérant un modèle direct plus réaliste à trois dimensions basé sur les données bathymétriques de haute résolution acquises autour des sites des plongées.

On considère que chaque mesure bathymétrique fournie par l'AUV constitue le centre de la face supérieure d'un prisme de section carrée, de profondeur infinie et dont le sommet se situe à la profondeur indiquée par la mesure. La longueur des côtés de chaque prisme est égale au pas de la grille et on fixe un périmètre autour de chaque point de mesure magnétique du Nautille (ou de n'importe quel autre engin) à l'intérieur duquel les prismes ont une influence magnétique sur cette mesure. On calcule ainsi un signal synthétique prenant en compte la bathymétrie environnante. La discrétisation de la bathymétrie ne pose pas de problème majeur, car les prismes choisis sont de faibles dimensions (2m de côté) et les éventuels signaux de haute fréquence générés par le passage discontinu d'un prisme à l'autre ne sont pas pris en compte lors du calcul de la cohérence, de la phase et de l'aimantation.

La distance latérale maximale entre les prismes utilisés pour le calcul et le Nautille est fixée à 70m. Sachant que le sous-marin évolue à des altitudes comprises entre 0 et une dizaine de mètres au dessus du plancher océanique, il s'agit d'un compromis optimal entre temps de calcul et influence réelle des prismes sur le signal synthétique.

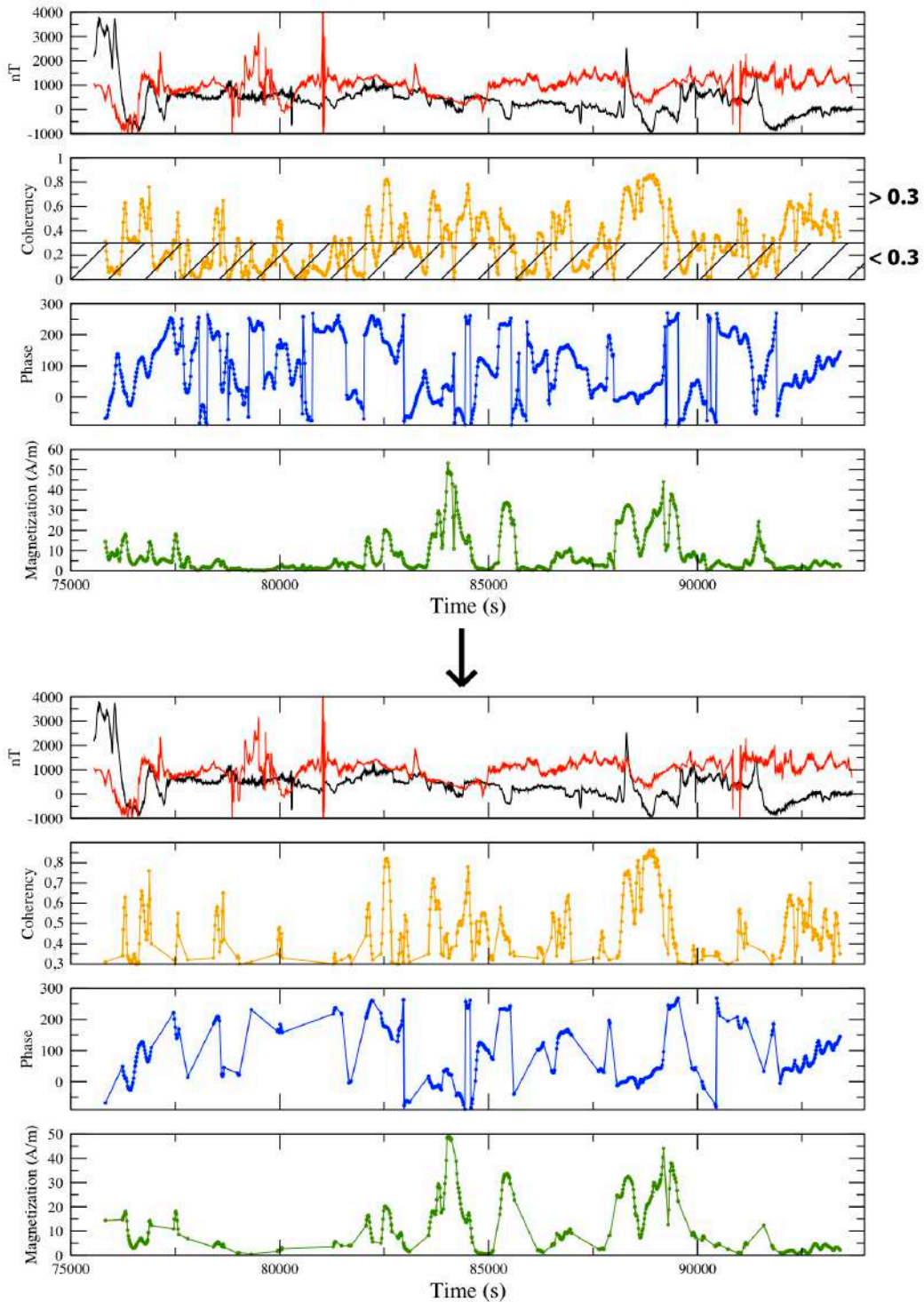
La figure 20 ci-dessous présente de manière schématique la façon dont les prismes sont pris en compte au cours d'une plongée.



**Fig. 20 :** Schéma de principe du fonctionnement du modèle direct 3D de génération du signal synthétique. Le sous-marin évolue selon la trajectoire de la plongée, représentée en rouge, et effectue une mesure magnétique au niveau de chaque point. Ces points sont considérés comme les centres de carrés à l'intérieur desquels les prismes définis par la bathymétrie de l'AUV sont pris en compte dans le calcul du modèle direct 3D.

## Cruise Futuna 1

Nautile, Dive 9, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



**Fig. 21 :** Exemples de résultats obtenus par les méthodes 2D et 3D. Le graphe supérieur correspond à la superposition des signaux observé et synthétique (respectivement en noir et rouge). Le second représente la cohérence, comprise entre 0 et 1. La phase est représentée en bleu et l'aimantation en vert. La partie inférieure reprend les données après élimination des cohérences inférieures à 0.3, qui sont considérées comme insuffisantes pour être représentatives. Chaque point correspond au centre d'une fenêtre glissante. Par souci de clarté, les signaux synthétiques ont été multipliés par 10, afin de pouvoir les comparer plus facilement avec le signal observé.

Comme dans le cas de la méthode en 2 dimensions, l'aimantation de chaque prisme est prise égale à  $1A/m$  et les inclinaison et déclinaison sont considérées comme égales à celles de l'IGRF local. Le signal synthétique est par la suite comparé au signal observé de manière à obtenir une cohérence, une phase et une aimantation.

À l'issue de cette seconde phase du traitement des données, on représente les points correspondant au centre des fenêtres glissantes sur la carte bathymétrique (Figure 22). La couleur représente l'aimantation et les points de couleur noire ou blanche représentent la polarité.

## **d) Limitations**

Qu'il s'agisse de la méthode de Honscho et al. (1999) ou de son amélioration en 3 dimensions, des limitations existent. Elles peuvent être communes aux deux approches ou spécifiques à l'une d'entre elles.

Dans le cas de la méthode 2D, nous avons établi que le principal problème concerne le manque d'informations sur les éventuelles structures 3D situées à proximité de la route de la plongée. L'approximation consistant à supposer que les sources sont perpendiculaires au profil et infinies peut, lorsque les conditions ne sont pas réunies, conduire à des aimantations déraisonnablement élevées et par conséquent irréalistes.

Dans le cas de la méthode 3D, cette difficulté disparaît grâce à l'utilisation de la bathymétrie haute résolution environnante. Cependant, cette méthode nécessite de connaître les variations d'immersion du Nautilé mais également les valeurs de bathymétrie fournies par exemple par le sondeur multifaisceaux de l'AUV. L'expérience démontre que ces deux informations ne sont pas toujours parfaitement corrélées et que de légers décalages peuvent subsister. Lorsque le Nautilé évolue à proximité du fond, son capteur d'immersion indique parfois une valeur plus importante que celle de la bathymétrie. Dans ce cas, le sous-marin passe virtuellement « sous » le plancher océanique pendant quelques instants, générant des valeurs aberrantes sur le signal synthétique. Un tel exemple peut être observé en figure 21, aux alentours de 81 000s dans le référentiel temporel du sous-marin. Pendant un court laps de temps, le signal rouge connaît des fluctuations erratiques traduisant ces problèmes. Au-delà de cet exemple anecdotique et facilement éliminable, cela souligne les difficultés liées à la

précision des mesures (bathymétrie, immersion, altitude) et des instruments dans l'estimation de l'aimantation.

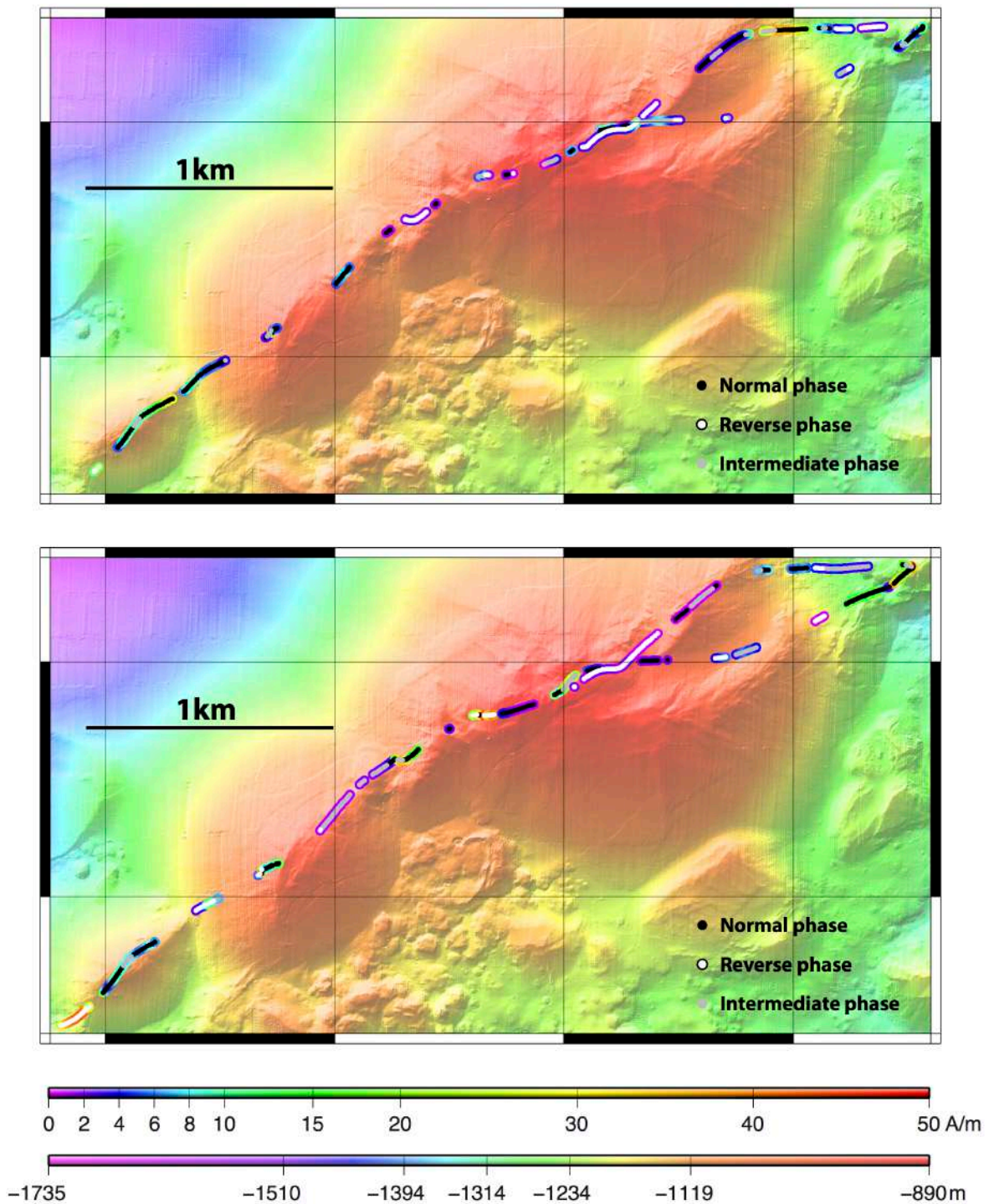
La principale limite commune aux deux approches concerne les problèmes de précision sur les données de navigation. En effet, les coordonnées ne sont précises qu'à une dizaine de mètres près. Cette approximation n'est pas gênante d'un point de vue géologique mais elle peut générer des perturbations importantes dans le calcul des aimantations. Ainsi, lorsque le Nautille évolue en longeant la base d'un relief, l'influence de ce dernier sera très différente si la navigation l'éloigne ou le rapproche de 10m.

Afin d'illustrer ce point, la trajectoire d'une plongée de la campagne Futuna 1 a été décalée de 10m de part et d'autre de la navigation de référence (Figure 22). Dans les deux cas, des variations non négligeables d'aimantations et de polarités sont constatées. Cet exemple souligne la sensibilité des valeurs d'aimantations obtenues grâce aux données de navigation. Il convient toutefois de noter que, même si les aimantations atteignent parfois des valeurs trop élevées, la comparaison entre les deux cartes indique que les zones d'aimantations forte et faible restent globalement les mêmes. Les valeurs d'aimantation doivent donc, jusqu'à l'obtention d'une meilleure navigation, être considérées comme une estimation et interprétées de manière relative.

Il en résulte que l'utilisation de ces méthodes pour l'estimation des aimantations doit être entreprise avec prudence et qu'une amélioration de la précision sur les données de navigation serait souhaitable afin de pouvoir y recourir avec plus de facilité.

Cruise Futuna 1, Volcanic Ridge

Bathymetry & Absolute magnetization from the Nautilie shifted 10m westward (top) & 10m eastward (bottom)



**Fig. 22 :** Variations relatives de l'aimantation absolue calculée par la méthode 3D selon la position du sous-marin. La trajectoire a été décalée de 10m vers l'Ouest (en haut) et de 10m vers l'Est (en bas) par rapport à la navigation de référence. Les valeurs d'aimantation et de polarité ne sont pas identiques et les cohérences variables imposent de conserver des fenêtres glissantes différentes.



### **3) Méthode de Honsho et al. (2012)**

Cette méthode consiste à effectuer une inversion en domaine spatial en utilisant le critère d'information bayésien d'Akaike. Les variations horizontales d'intensité de l'aimantation sont représentées par une combinaison linéaire de splines bicubiques et le problème consiste à déterminer leurs coefficients d'expansion. Une contrainte préalable destinée à réduire les fortes variations de l'aimantation est incorporée afin de supprimer les problèmes d'instabilité numérique. Le critère d'Akaike donne une estimation optimale de cette contrainte afin d'être parfaitement cohérent avec les données. Cette contrainte est déterminée statistiquement à partir de la quantité et de la qualité des données, en se basant sur le principe de maximisation de l'entropie.

Les solutions obtenues ne sont pas pénalisées par le filtrage haute fréquence inévitable dans le cas des méthodes d'inversion antérieures, ni par une perte de résolution liée à un prolongement vers le haut afin de se ramener à un plan d'épaisseur constante. Elle est particulièrement efficace dans le cas de données collectées dans des zones à forte topographie et sur une surface réduite.

Notons néanmoins que cette méthode, apparue récemment, reste délicate à mettre en œuvre de par ses exigences de puissance informatique et parce qu'elle n'a été évaluée que dans un nombre restreint de cas. Les efforts que nous avons faits dans ce sens tiennent davantage du développement méthodologique que de l'exploitation des données.



# 3<sup>ème</sup> Partie

## Signature magnétique des sites hydrothermaux de la dorsale médio-Atlantique

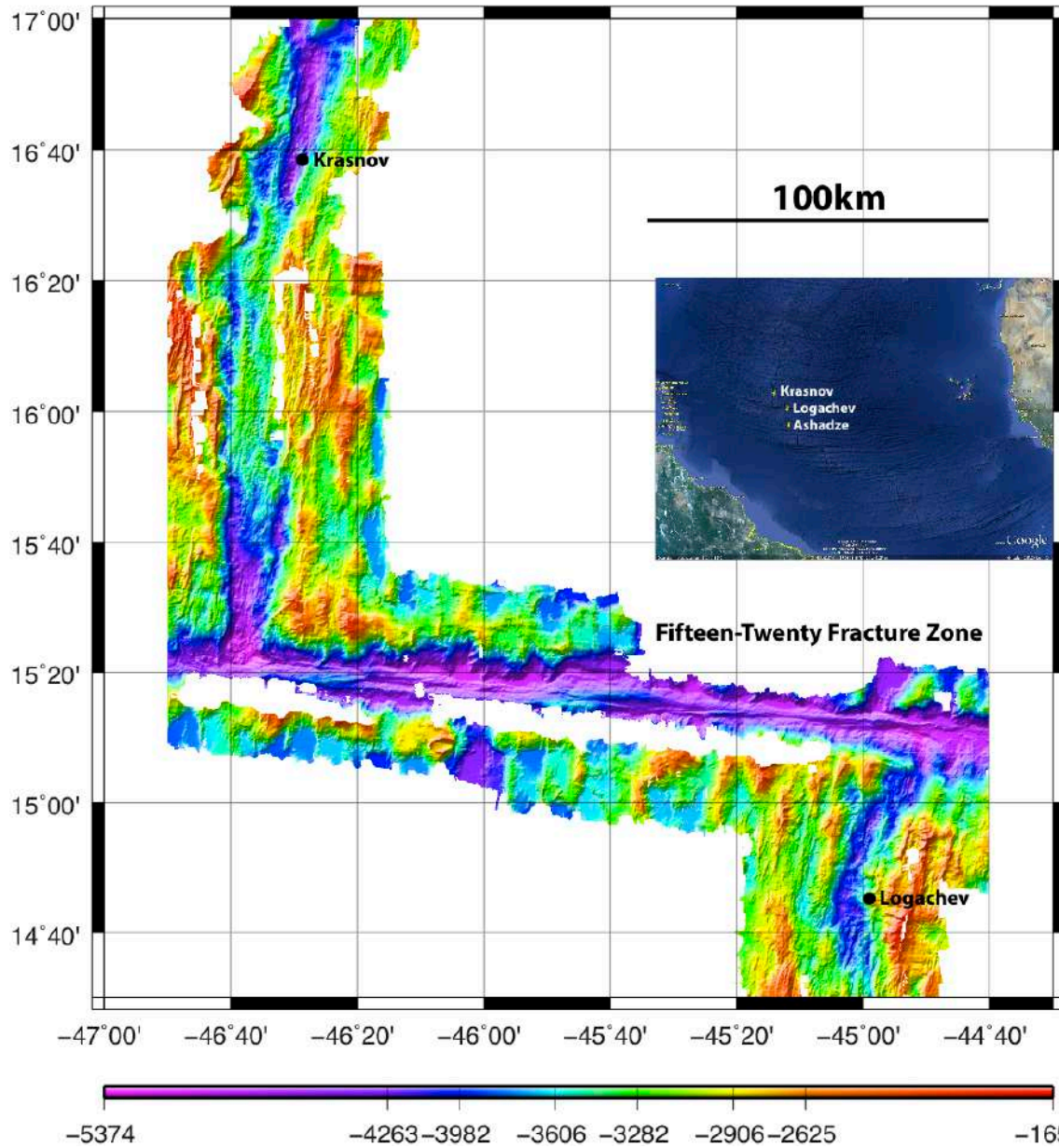
# I) Introduction

Les missions Serpentine et Momar Dream, entreprises respectivement en Mars 2007 et Août 2008 à bord des navires océanographiques N/O Pourquoi Pas ? et N/O L'Atalante avec le ROV Victor de l'Ifremer, ont permis d'étudier plusieurs sites hydrothermaux de la dorsale Médio-Atlantique. Ceux-ci se trouvent sur substrat ultramafique (Ashadze, Logachev et Rainbow) ou basaltique (Krasnov). Dans tous les cas, un magnétomètre vectoriel avait été fixé sur le ROV afin d'obtenir des cartes magnétiques de haute résolution. Les mesures magnétiques étaient effectuées à la fréquence d'un hertz. Des levés bathymétriques ont été acquis conjointement.

Au cours de cette partie, nous nous intéresserons d'abord au site hydrothermal inactif Krasnov, afin de vérifier et de compléter les travaux antérieurs obtenus dans ce type d'environnement. Nous étudierons ensuite des sites sur substrat ultramafique pour en déterminer la signature magnétique.

La figure 23 présente la bathymétrie de la dorsale Médio-Atlantique dans la région des sites Krasnov et Logachev. Ces données ont été acquises par des levés de surface lors de campagnes antérieures à la mission Serpentine (campagne Faranaute).

Mid-Atlantic Ridge, between 14°N and 17°N  
Bathymetry



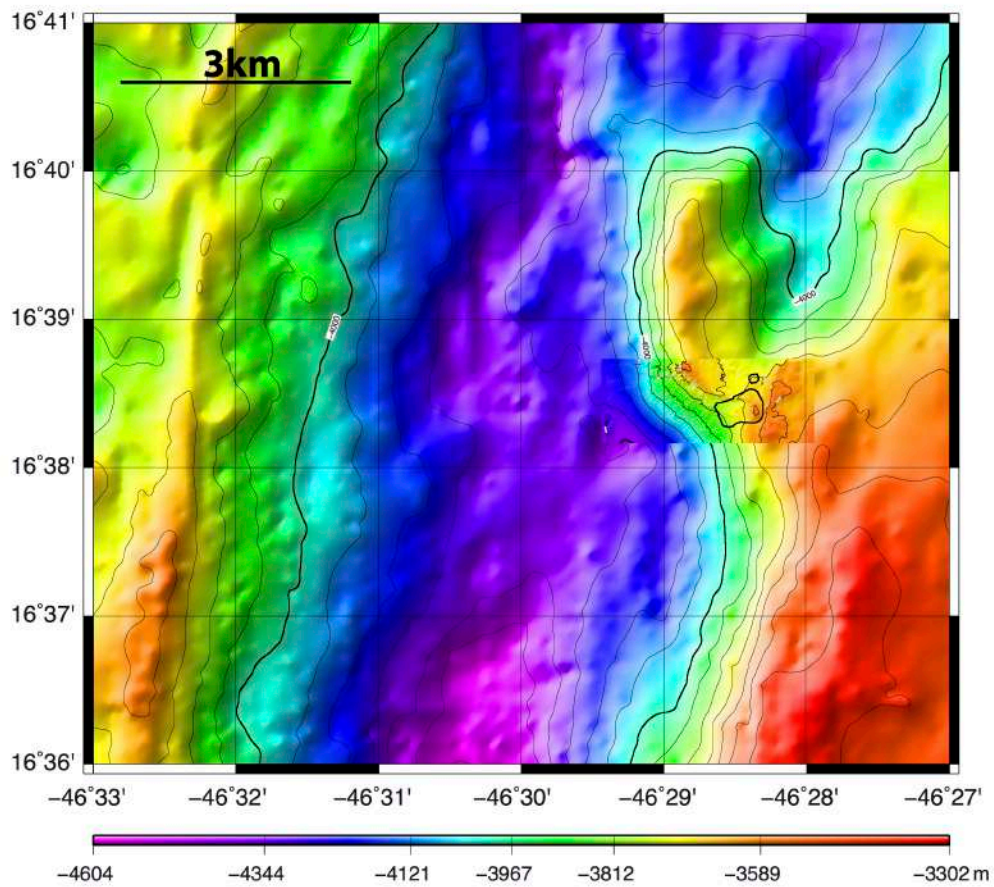
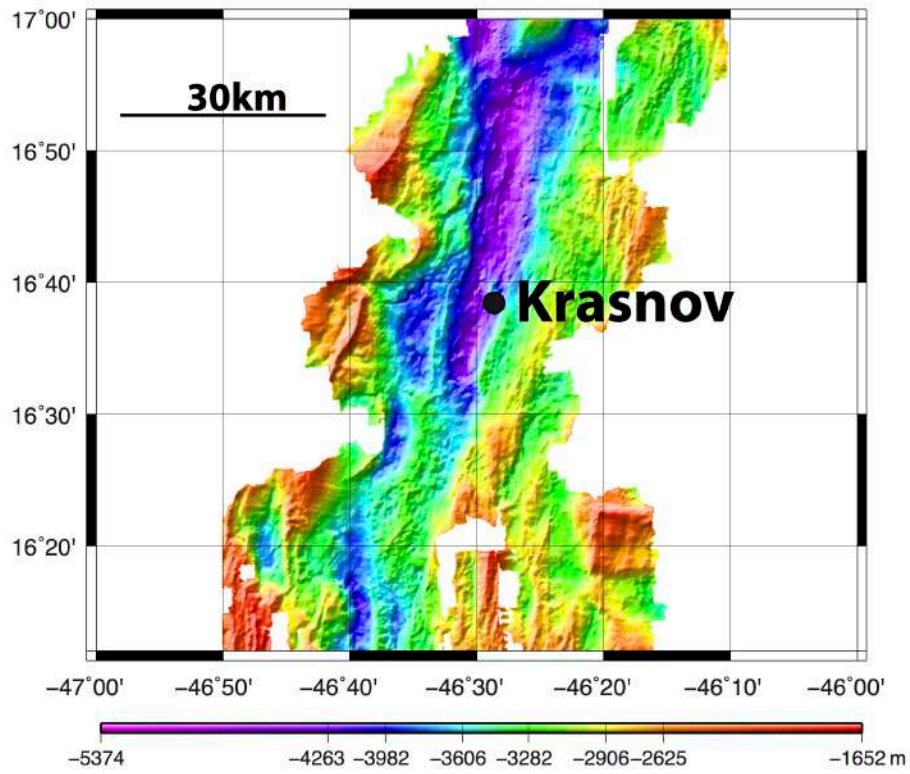
**Fig. 23** : Carte de la dorsale Médio-Atlantique dans la région des sites Krasnov et Logachev. La zone de fracture Quinze-Vingt sépare les deux segments abritant les sites hydrothermaux.

## II) Site Krasnov

### 1) Observations

Le site Krasnov se situe sur la dorsale Médio-Atlantique, à la latitude de 16°38'N. Il est l'un des plus profonds sites hydrothermaux connus (environ 3800m) et s'étend sur une longueur de 800m pour une largeur de 300m, selon une orientation NE-SO. Il est l'un des plus gros amas de sulfures découverts dans les océans et se compose principalement de sulfure de fer, avec localement des enrichissements en cuivre et en zinc (Fouquet et al., 2008).

Le site ne se situe pas au centre de la vallée axiale mais est localisé sur son mur Est, à quelques centaines de mètres au Sud-Est d'un volcan. Il s'agit désormais d'un site hydrothermal fossile sur substrat basaltique. La figure 24 présente la bathymétrie de la zone. Elle est constituée d'un assemblage entre une bathymétrie de plus faible résolution obtenue à partir de données de surface et de la carte de haute résolution fournie par le sondeur multifaisceaux du ROV Victor à une altitude de 50m. Les structures globalement orientées selon une direction moyenne N20° et l'effondrement observé du mont pourrait être contrôlé par les failles orientées N20° du rift axial. La forme en loupe d'arrachement d'une partie du mont suggère également une forte composante d'effondrement gravitaire (Cannat et al., 2013), sans doute renforcée par le positionnement en haut des failles du mur du rift (Fouquet et al., 2008). Le site est représenté par un contour rouge et le volcan est clairement visible à proximité.



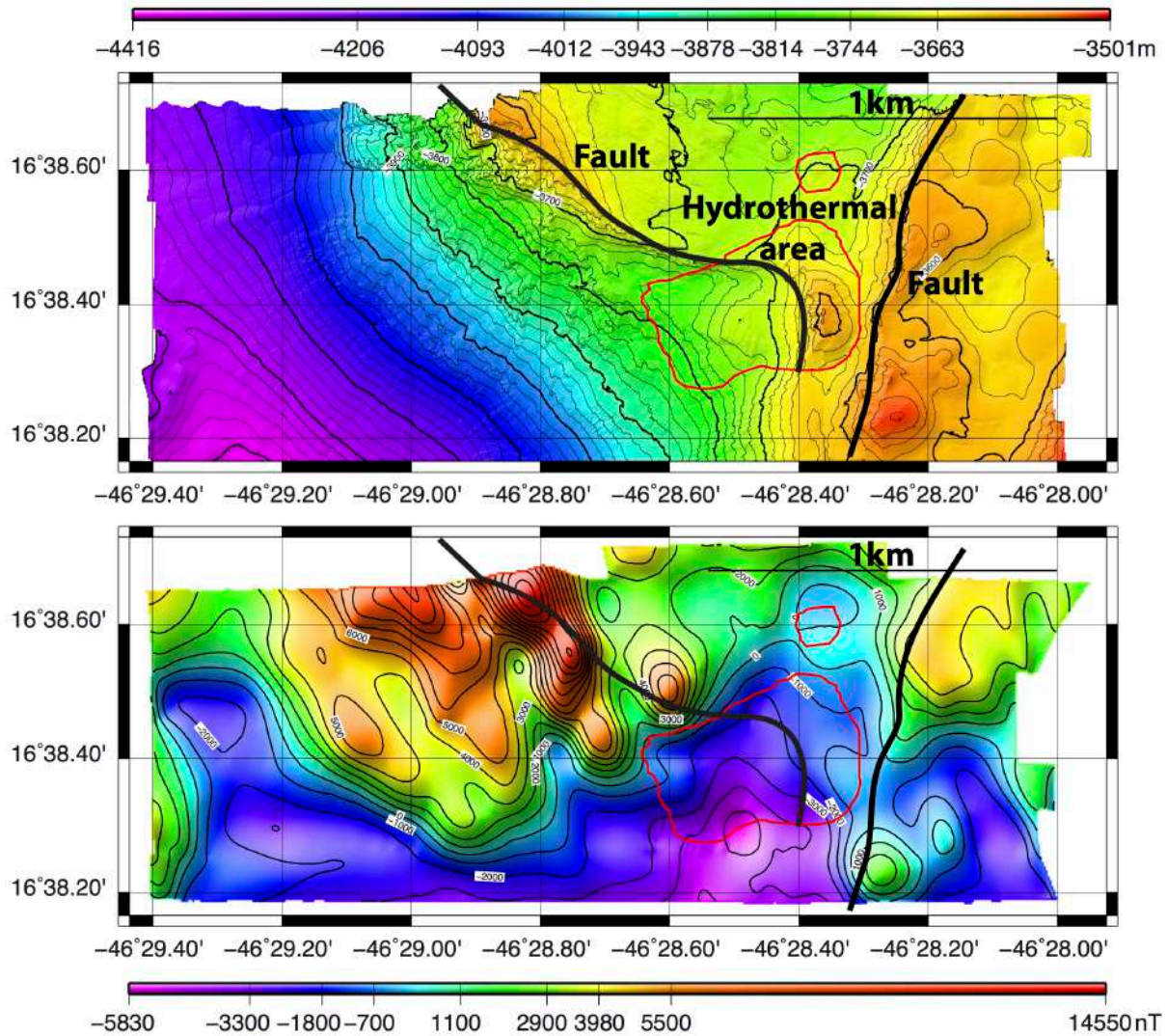
**Fig. 24** : Bathymétrie de la dorsale Médio-Atlantique dans le secteur du site hydrothermal Krasnov. Le volcan apparaît au Nord-Ouest du site hydrothermal.

La microbathymétrie à 50m acquise par le Victor révèle la présence de plusieurs glissements de terrain, dont le principal situé dans la zone recouverte de sulfures (Figure 25). Sa trace prend la forme d'un demi-cercle s'étendant sur environ 500m de longueur. Plus au Sud-Ouest, dans la direction de l'axe actif, le plancher océanique semble relativement plat. Entre ces deux régions, le fond présente une topographie assez chaotique. Enfin, au Nord-Est, au sommet du mont de sulfures, la topographie devient plus vallonnée (Fouquet et al., 2008).

À proximité de la limite des dépôts hydrothermaux, plusieurs sections montrent que les sédiments pélagiques recouvrent les sulfures et des sédiments hydrothermaux de couleur brune et riches en oxydes. Les sulfures sont présents sur toute la surface du mont et la principale coupe de l'amas de sulfures se trouve le long du grand escarpement, au niveau duquel la présence d'atacamite verte (chlorure secondaire de cuivre) démontre l'enrichissement en cuivre. Les talus deviennent ensuite plus abondants lorsque l'on se déplace vers l'Est, au-delà de la principale zone du dépôt, et vers l'Ouest le long de l'escarpement de faille. Ils en viennent progressivement à représenter la totalité des affleurements et sont tous très frais, comme le montre l'absence de sédiments pélagiques. Au sommet de la faille, des sulfures hydrothermaux couverts de sédiments pélagiques blancs ont également été découverts.



**Cruise Serpentine, Krasnov Site, Altitude = 50m  
Bathymetry (Top) & Anomaly RTP (Bottom)**



**Fig. 25 :** Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle (en bas) du site hydrothermal Krasnov. Les données ont été collectées par le ROV lors de son levé à une altitude de 50m. Les contours du site fossile sont délimités par une ligne rouge (elle-même définie par les observations). Sur la carte magnétique, la forte anomalie négative correspond au site inactif et l'anomalie positive correspond à des morphologies en hummocks liées à des constructions volcaniques.

## 2) Résultats

### a) Zone hydrothermale

Sur la carte des anomalies magnétiques réduites au pôle (Figure 25), le site inactif (dont les limites géologiques sont marquées par un contour rouge), est caractérisé par une forte anomalie négative, qui correspond aux valeurs les plus basses enregistrées dans cette zone. Cette anomalie fait partie d'un ensemble d'anomalies négatives orientées selon une direction approximative Nord 30°.

Sans information complémentaire, l'anomalie réduite au pôle ne permet pas de conclure quant au signe de l'aimantation du plancher océanique. En effet, une zone de faible aimantation entourée de fortes aimantations pourrait avoir la même signature qu'une zone de polarité inverse entourée par des aimantations de polarité normale. Elle peut également être le résultat de la présence d'éboulis orientés de manière aléatoire. Cependant, dans le cas de Krasnov, les dépôts ont été datés à 119 000 ans (Cherkashev et al., 2008). De par sa localisation, le site Krasnov est plus jeune que l'inversion de Brunhes-Matuyama (780 000 ans) et il s'est donc formé alors que le champ magnétique possédait la même orientation qu'aujourd'hui. Les roches qui s'y trouvent présentent donc une aimantation de polarité normale. Dans ce cas, la forte anomalie magnétique négative observée sur le site correspond à un défaut d'aimantation. Cette observation va dans le sens des résultats obtenus sur la signature magnétique des sites hydrothermaux basaltiques (Tivey et al., 1993 ; Tivey and Johnson, 2002 ; Zhu et al. 2010 ; Nakamura et al., 2013 ; Caratori-Tontini et al., 2012 ; Tivey and Dyment, 2010 ; Miranda et al., 2005).

Il existe toutefois une différence majeure entre les sites étudiés précédemment et celui-ci : Krasnov est un site hydrothermal inactif dont le démantèlement, par la faille majeure qui le traverse, montre qu'il n'a pas fonctionné depuis longtemps. Des deux hypothèses proposées dans la littérature afin d'expliquer le défaut d'aimantation observé au niveau des sites actifs (désaimantation thermique ou altération de la titanomagnétite en titanomagnhémite), la première ne semble pas valide.

Le site n'étant plus alimenté par des fluides chauds, et si l'on considère le flux de chaleur normal d'une dorsale, sa température sera largement en dessous de la

température de Curie de la titanomagnétite (quelques centaines de degrés). La désaimantation thermique ne peut donc plus avoir lieu. Cette constatation laisse deux possibilités pour expliquer la désaimantation observée : l'altération de la titanomagnétite en titanomaghémite ou la présence d'une importante couche peu ou pas aimantée (dépôts hydrothermaux) jouant le rôle d'écran et éloignant le substrat basaltique de la mesure.

Ces deux hypothèses sont testées par modélisation directe afin de quantifier leurs influences respectives.

## **b) Modélisation directe**

Le recours au modèle direct permet de contraindre les caractéristiques du site hydrothermal fossile. Son principe consiste à discrétiser la bathymétrie sous forme de prismes de section carrée et de hauteur finie puis de leur attribuer des aimantations afin de calculer des anomalies magnétiques synthétiques. Ces anomalies sont ensuite comparées aux données.

Dans le cas de Krasnov, les seules informations disponibles sont celles issues des anomalies magnétiques et de la bathymétrie. Contrairement à Rainbow ou Ashadze (cf. Parties 3.III et 3.IV), aucun échantillon de lave n'a été prélevé et la carte géologique est moins précise.

Il existe une infinité de combinaisons permettant d'expliquer les anomalies observées. Les paramètres susceptibles de varier sont : l'aimantation des prismes, l'épaisseur de la couche aimantée et la présence éventuelle de dépôts hydrothermaux non magnétiques (pyrite) faisant écran par dessus cette couche. Dans tous les cas, l'inclinaison et la déclinaison de l'aimantation des prismes sont égales à  $90^\circ$  et  $0^\circ$  (respectivement) pour obtenir un résultat comparable à l'anomalie réduite au pôle. Afin d'optimiser le rapport entre précision des résultats et temps de calcul, tous les modèles sont calculés en utilisant des prismes de 2m de côté avec un périmètre carré de  $200\text{m} \times 200\text{m}$  autour du ROV. Pour supprimer les effets de bord, les cartes sont calculées à partir de la bathymétrie qui s'étend au-delà des profils extérieurs en raison des fauchées. Un masque est ensuite appliqué à l'anomalie synthétique afin de ne pas conserver les extrapolations en dehors des limites de ces profils.



dans les modèles ont des contours délimités par les courbes isomagnétiques de l'anomalie réduite au pôle. Par ailleurs, une coupe visuelle effectuée par le ROV lors de sa plongée laisse penser que l'épaisseur de sulfures pourrait être d'environ 120m.

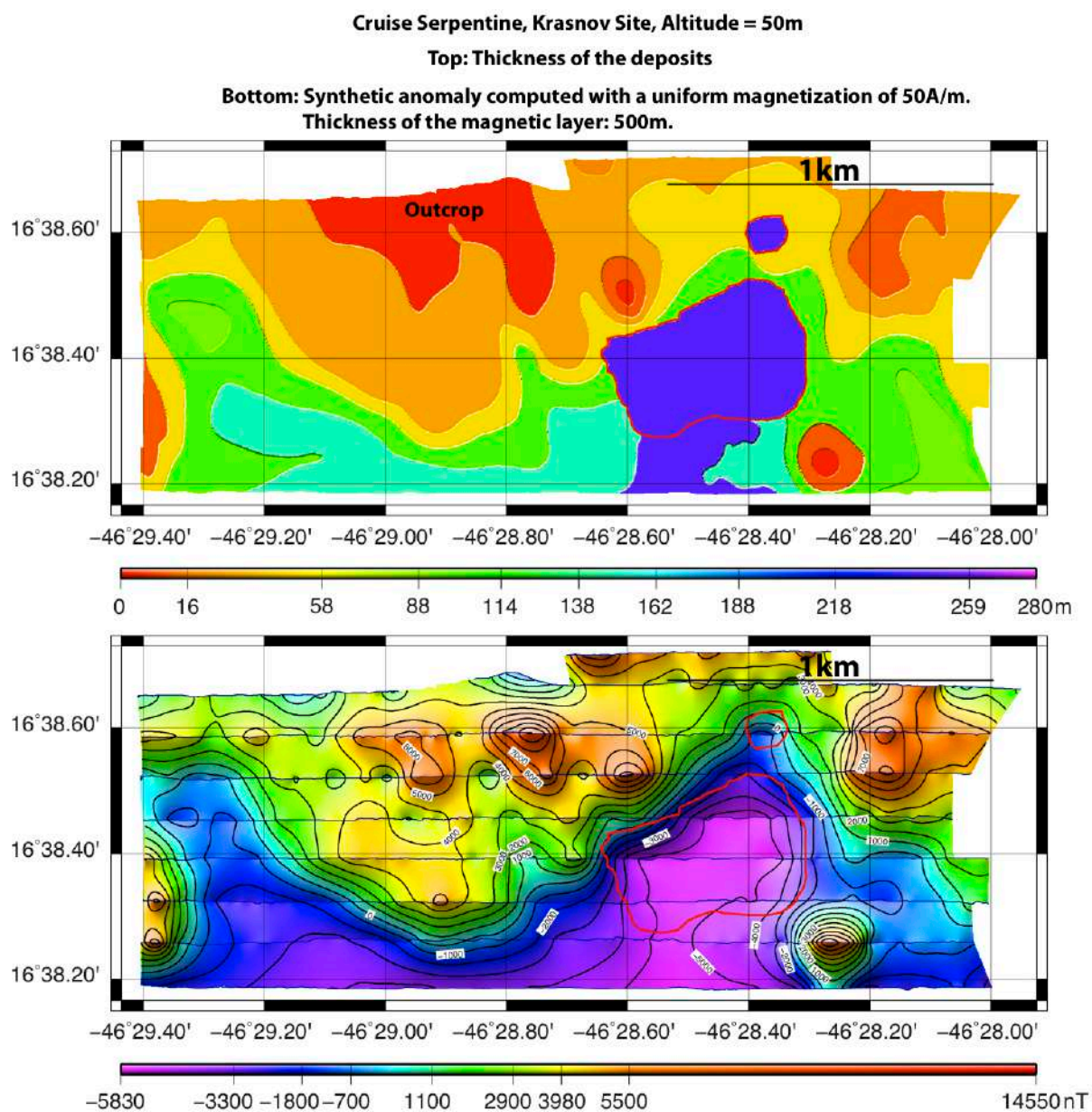
L'Ouest de la zone d'étude se situe en pied de pente et des éboulis ont donc pu s'y amasser. Cette hypothèse est confirmée par la morphologie lisse de la bathymétrie à cet endroit et les observations in situ à l'Ouest du dépôt hydrothermal. Il est donc probable qu'une couche non aimantée ou tout du moins magnétiquement incohérente (éboulis) s'y soit superposée au socle. Au niveau de la zone hydrothermale, les dépôts hydrothermaux de nature pyriteuse (Cannat et al., 2013) et non magnétique constituent également une telle couche. Cette couche pourrait être constituée de trois ensembles non aimantés : les éboulis, les sulfures massifs constitués de pyrite et la zone d'altération hydrothermale sous les sulfures. Par contre, la bathymétrie rugueuse de la zone Nord, où se trouvent les valeurs les plus fortes d'anomalie magnétique, traduit des affleurements du socle basaltique.

Deux hypothèses sont envisagées pour estimer l'épaisseur maximale de ces dépôts :

→ Le site hydrothermal est coupé par une faille, qui a fait s'écrouler une partie du dépôt et placé le reste à l'affleurement. La bathymétrie montre une variation d'environ 200m entre les parties Nord et Sud du site. Cette observation permet d'estimer une épaisseur de dépôts de 200m à cet endroit (La coupe de 120m de sulfure le long de la faille ne constitue pas l'épaisseur maximale de sulfures observées de part et d'autre de cette faille).

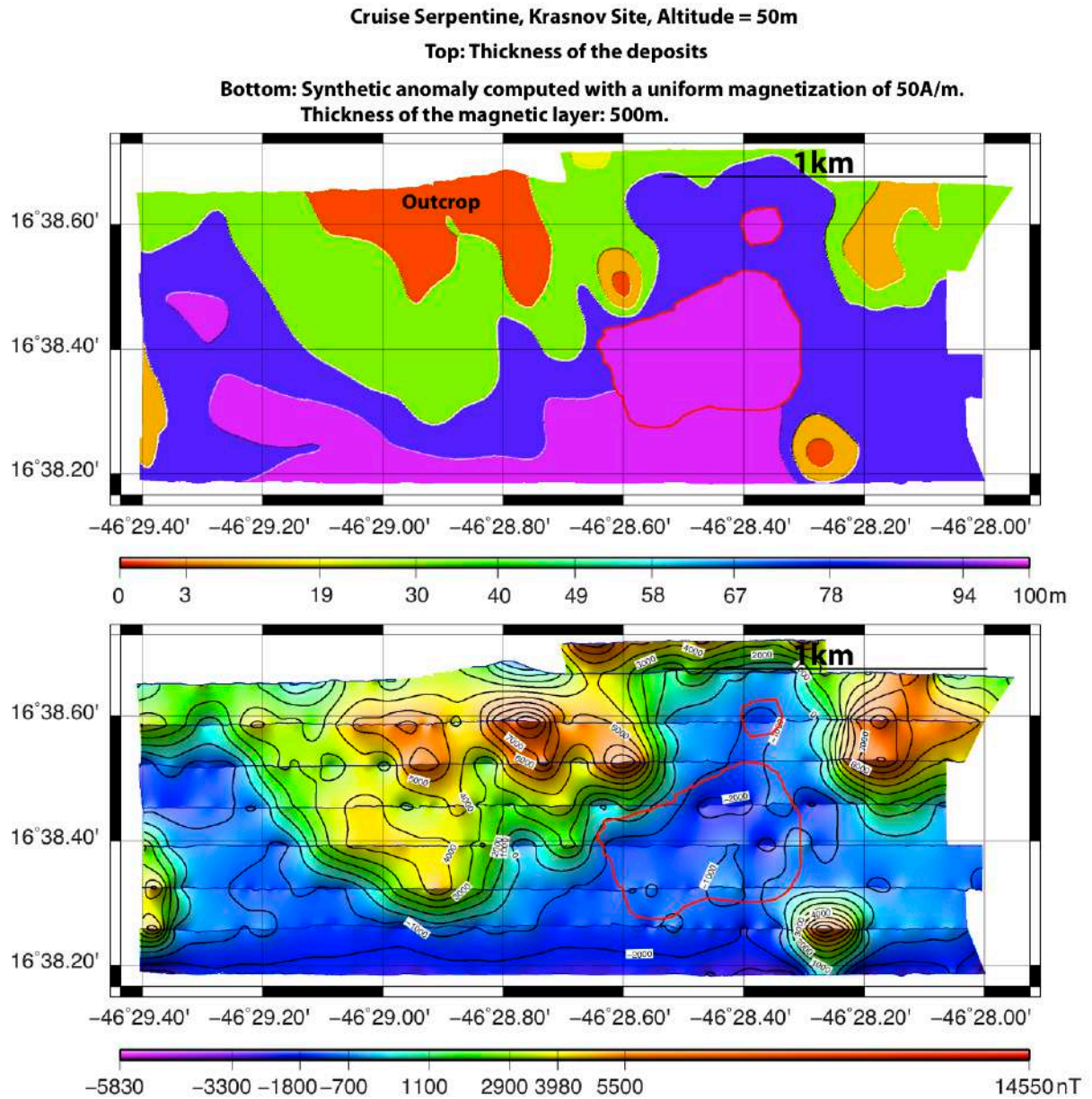
→ Si l'on suppose que la structure du site hydrothermal est comparable à celle du site hydrothermal TAG, bien contraint grâce à des forages ODP, alors le dépôt aurait une épaisseur maximale de l'ordre de 100m (Alt and Teagle, 1998).

Afin de tester l'effet d'écran des dépôts hydrothermaux, on attribue au socle basaltique une aimantation constante de 50A/m (nécessaire pour atteindre les amplitudes constatées au niveau du volcan et considérée au pôle. Sans réduction, cette aimantation aurait une valeur de l'ordre de 30A/m) et on calcule une anomalie synthétique. Les résultats des hypothèses 1 et 2 sont présentées en figures 27 et 28, respectivement.



**Fig. 27 :** (a, en haut) Première hypothèse sur les « écrans » constitués d'éboulis et de sulfures pyriteux massifs. Le volcan est à l'affleurement et la zone hydrothermale est recouverte par 200m de dépôts non aimantés.

(b, en bas) Anomalie synthétique calculée avec une aimantation constante du socle de 50A/m et les dépôts précédents.



**Fig. 28:** (a, en haut) Seconde hypothèse sur les « écrans » constitués d'éboulis et de sulfures pyriteux massifs. Le volcan est à l'affleurement et la zone hydrothermale est recouverte par 100m de dépôts non aimantés.

(b, en bas) Anomalie synthétique calculée avec une aimantation constante du socle de 50A/m et les dépôts précédents.

Sur la figure 27b, l'amplitude crête à crête entre le volcan et le site est comparable à celle des données observées. Ce contraste s'explique par l'épaisseur de l'écran au niveau du site hydrothermal fossile. L'anomalie reste toutefois globalement trop faible au niveau du volcan.

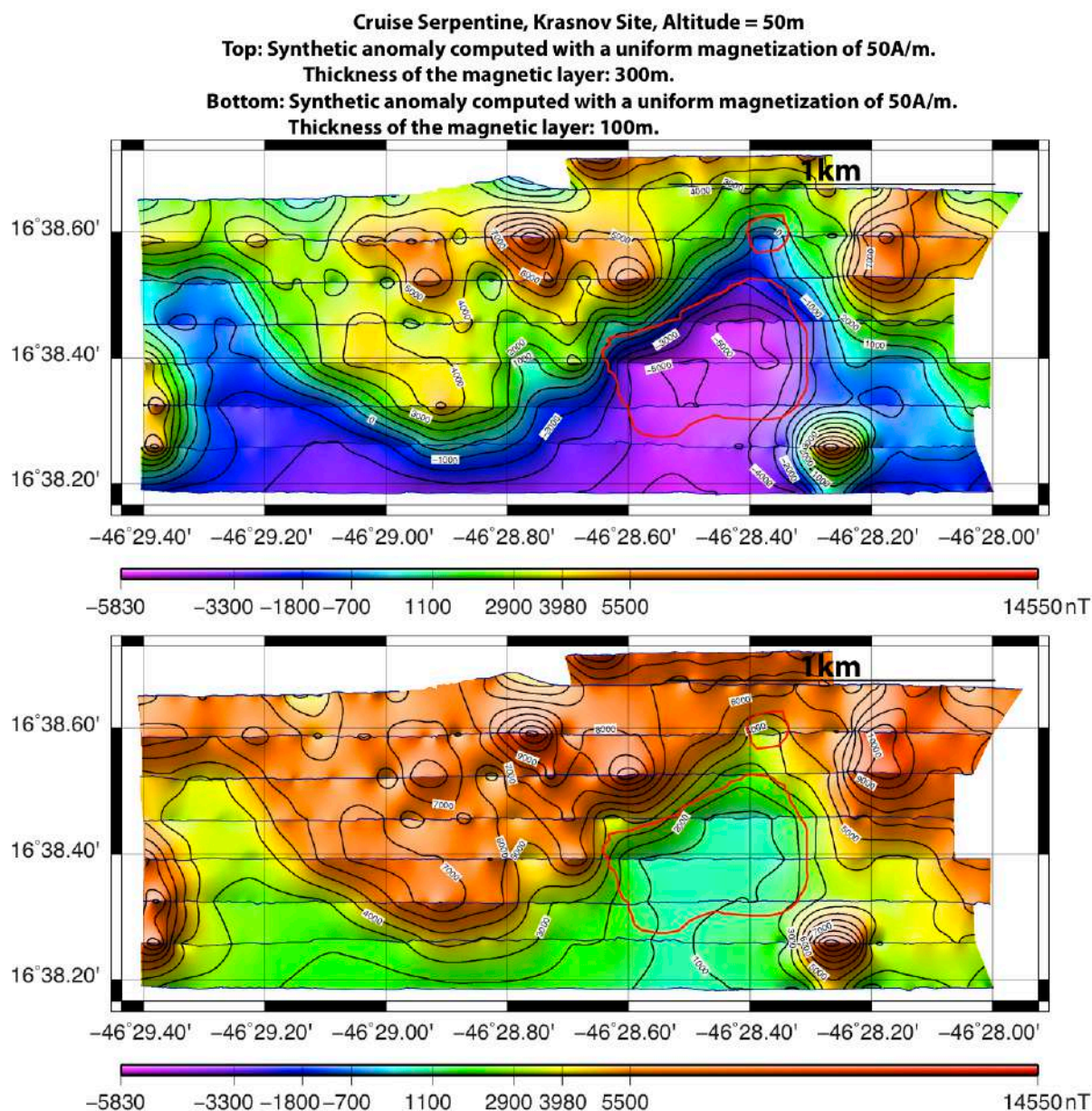
Sur la figure 28b, l'amplitude crête à crête entre le volcan et le site est plus faible et ne permet pas d'expliquer les données car le site hydrothermal devient indiscernable des éboulis et des sulfures massifs constitués de pyrite.

Ces deux tests ne permettent pas de trancher de manière définitive en faveur de l'une des hypothèses. Il faut donc envisager des variations d'autres paramètres.

### ***3<sup>ème</sup> étape : Estimation de l'épaisseur de la couche aimantée***

On teste la validité de l'hypothèse d'une épaisseur de la couche basaltique aimantée de 500m. Pour cela, on reprend le modèle proposé en figure 27a et on réduit graduellement l'épaisseur de la couche aimantée à 300m puis 100m. Les résultats sont présentés en figures 29a et b (respectivement).





**Fig. 29 :** (a, en haut) Anomalie synthétique produite par les dépôts de la Fig. 28a, une aimantation constante de 50A/m et une couche aimantée de 300m d'épaisseur.

(b, en bas) Anomalie synthétique produite dans les mêmes conditions qu'en Fig. 30a mais avec une couche aimantée de 100m d'épaisseur. Les amplitudes sont trop faibles et la base de la couche commence à jouer un rôle.

La figure 29b montre qu'une couche aimantée de 100m d'épaisseur est insuffisante car l'amplitude de l'anomalie synthétique est plus faible que celle des données observées. La base de la couche commence à jouer un rôle alors qu'il est négligeable pour 300m et 500m. Ce modèle n'est donc pas représentatif du site Krasnov. L'épaisseur de 300m prête davantage à discussion mais elle semble également insuffisante car l'anomalie négative reste légèrement plus faible (en valeur absolue) que

celle observée sur les données. Pour les modèles suivants, on considèrera donc qu'une couche aimantée de 500m d'épaisseur est réaliste.

#### ***4<sup>ème</sup> étape : Variations latérales de l'aimantation***

Les variations d'anomalie magnétique modélisées au niveau du volcan sont insuffisantes en regard des données. On envisage donc des variations latérales d'aimantation de la couche aimantée.

On suppose que le sommet du volcan à l'affleurement est constitué de basaltes jeunes et très fortement aimantés. La valeur maximale des aimantations y est localement fixée à 50A/m (au pôle), décroissant à 30A/m sur les flancs. Le reste de la zone est doté d'une aimantation moyenne (20A/m). En raison du facteur multiplicatif lié à la réduction au pôle, la valeur de 50A/m correspond à une aimantation d'environ 30A/m, cohérente avec les aimantations observés sur des basaltes frais et fortement aimantés.

Ces différentes zones sont elles mêmes recouvertes par des dépôts non magnétiques d'épaisseurs variables. On teste l'effet de ces variations d'aimantation avec les deux hypothèses de dépôts superposés présentées en figures 27a et 28a. Les résultats sont reportés en figures 30c et 31c (respectivement).

Dans le cas de l'hypothèse de dépôts épais (Figure 30c), une anomalie négative apparaît au niveau de la zone hydrothermale mais elle reste légèrement inférieure, en valeur absolue, à celle constatée sur les données. Dans le cas de l'hypothèse basse (Figure 31c), la zone hydrothermale est totalement indiscernable du reste de la zone de dépôts.

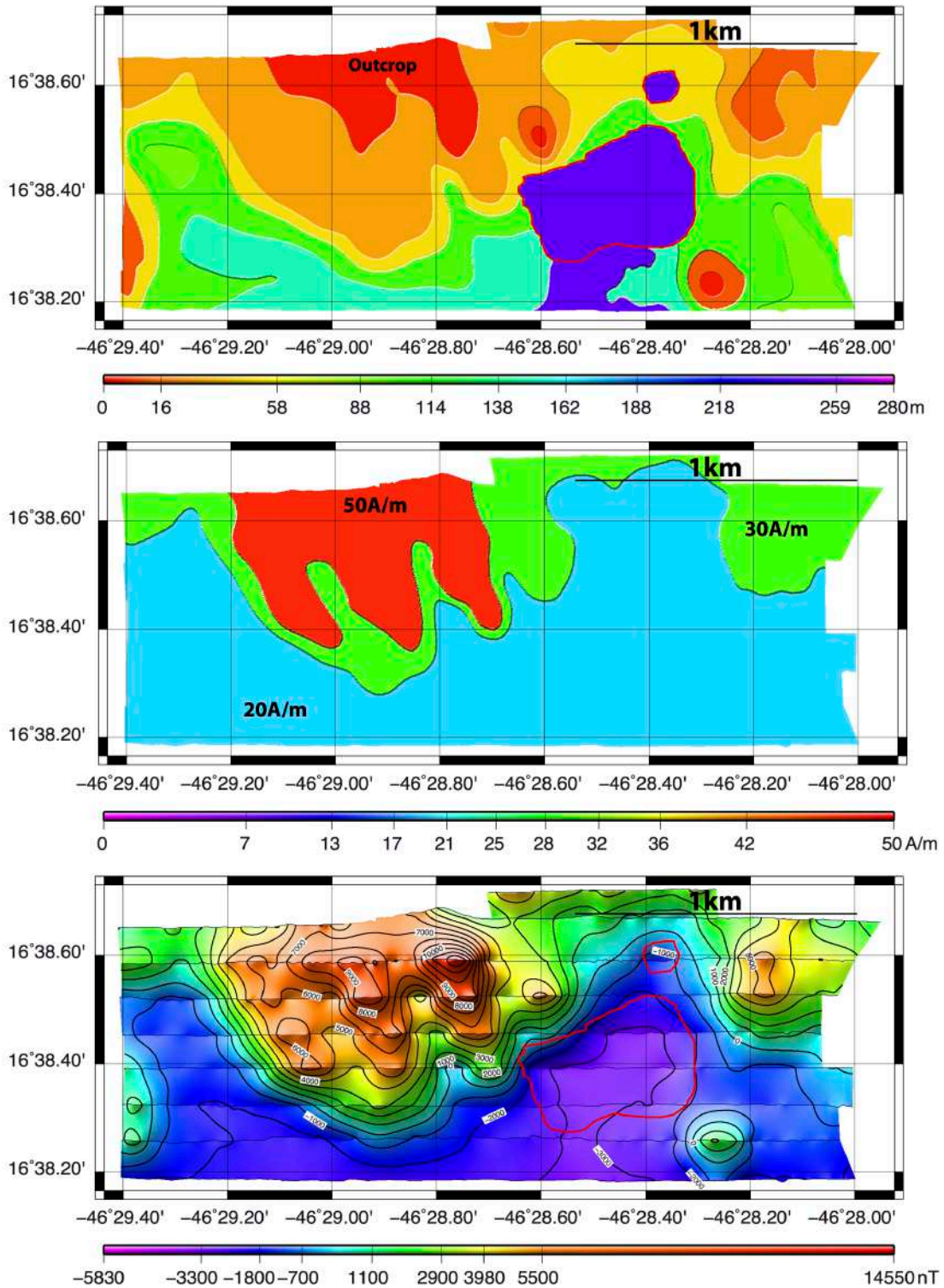
Ces modèles intermédiaires confirment donc qu'il faut envisager une désaimantation totale au niveau du site hydrothermal inactif (sous la couche de sulfures pyriteux massifs) afin de se rapprocher de ce que l'on observe sur les données.

Cruise Serpentine, Krasnov Site, Altitude = 50m

1) Thickness of the deposits

2) Magnetization distribution

3) Synthetic anomaly computed with different magnetizations. Thickness of the magnetic layer: 500m



**Fig. 30 :** (a, en haut) Épaisseur des dépôts constitués d'éboulis et de sulfures pyriteux massifs faisant écran selon l'hypothèse haute.

(b, au milieu) Distribution d'aimantation.

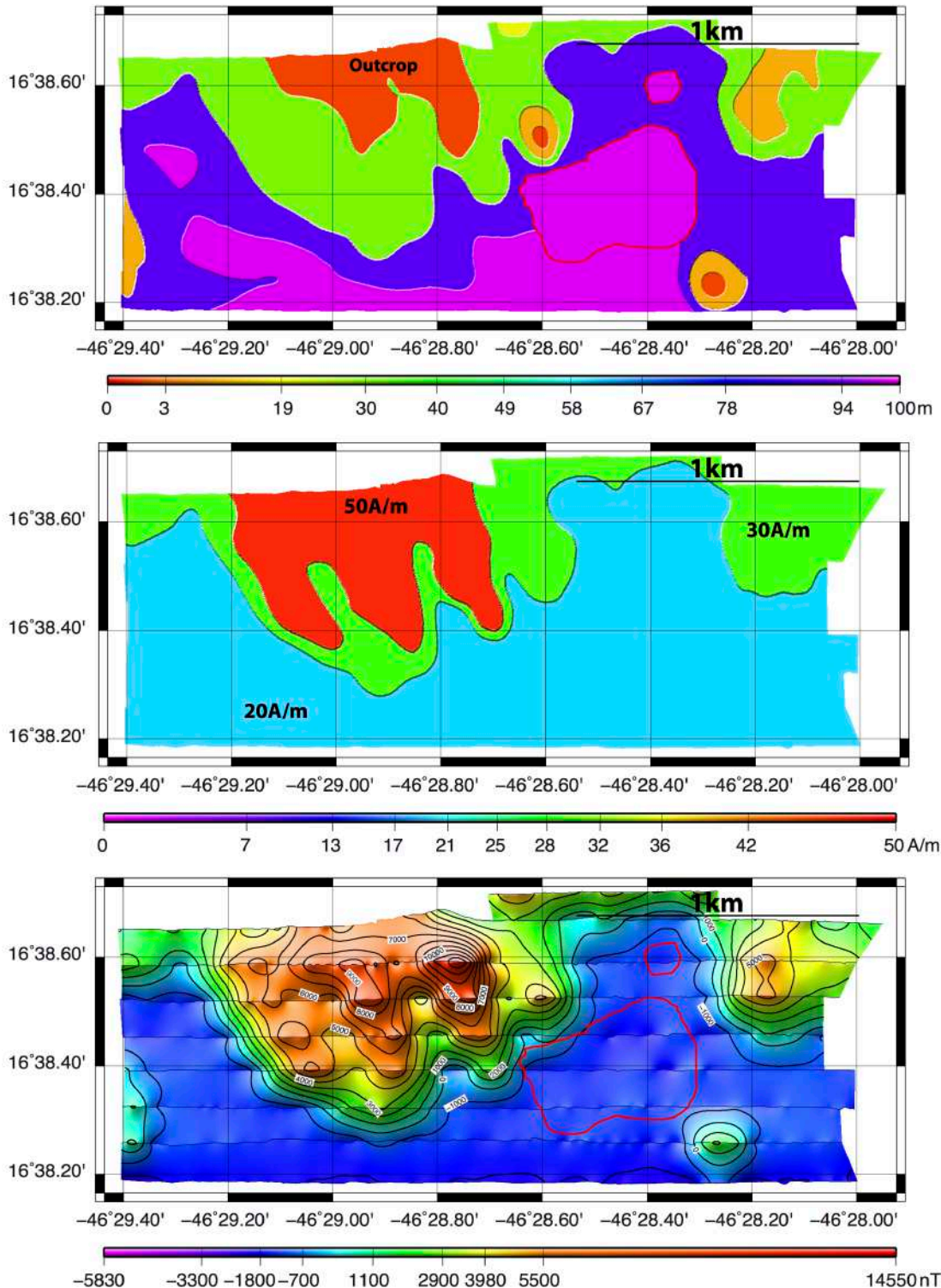
(c, en bas) Anomalie synthétique calculée avec ces dépôts et cette distribution d'aimantation.

Cruise Serpentine, Krasnov Site, Altitude = 50m

1) Thickness of the deposits

2) Magnetization distribution

3) Synthetic anomaly computed with different magnetizations. Thickness of the magnetic layer: 500m



**Fig. 31 :** (a, en haut) Épaisseur des dépôts constitués d'éboulis et de sulfures pyriteux massifs faisant écran selon l'hypothèse haute.

(b, au milieu) Distribution d'aimantation.

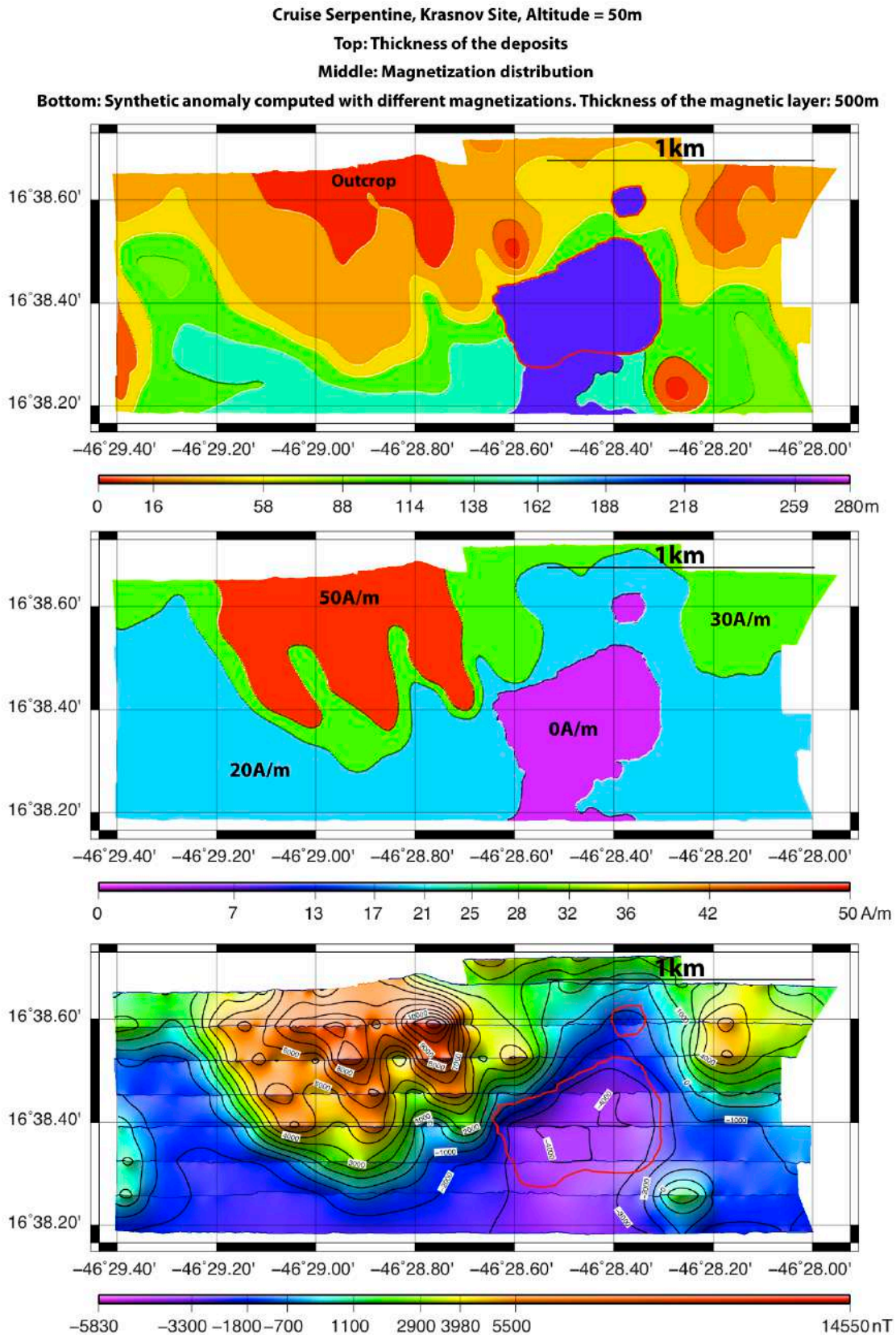
(c en bas) Anomalie synthétique calculée avec ces dépôts et cette distribution d'aimantation.

### ***5<sup>ème</sup> étape : Ajout d'une désaimantation au niveau du site inactif***

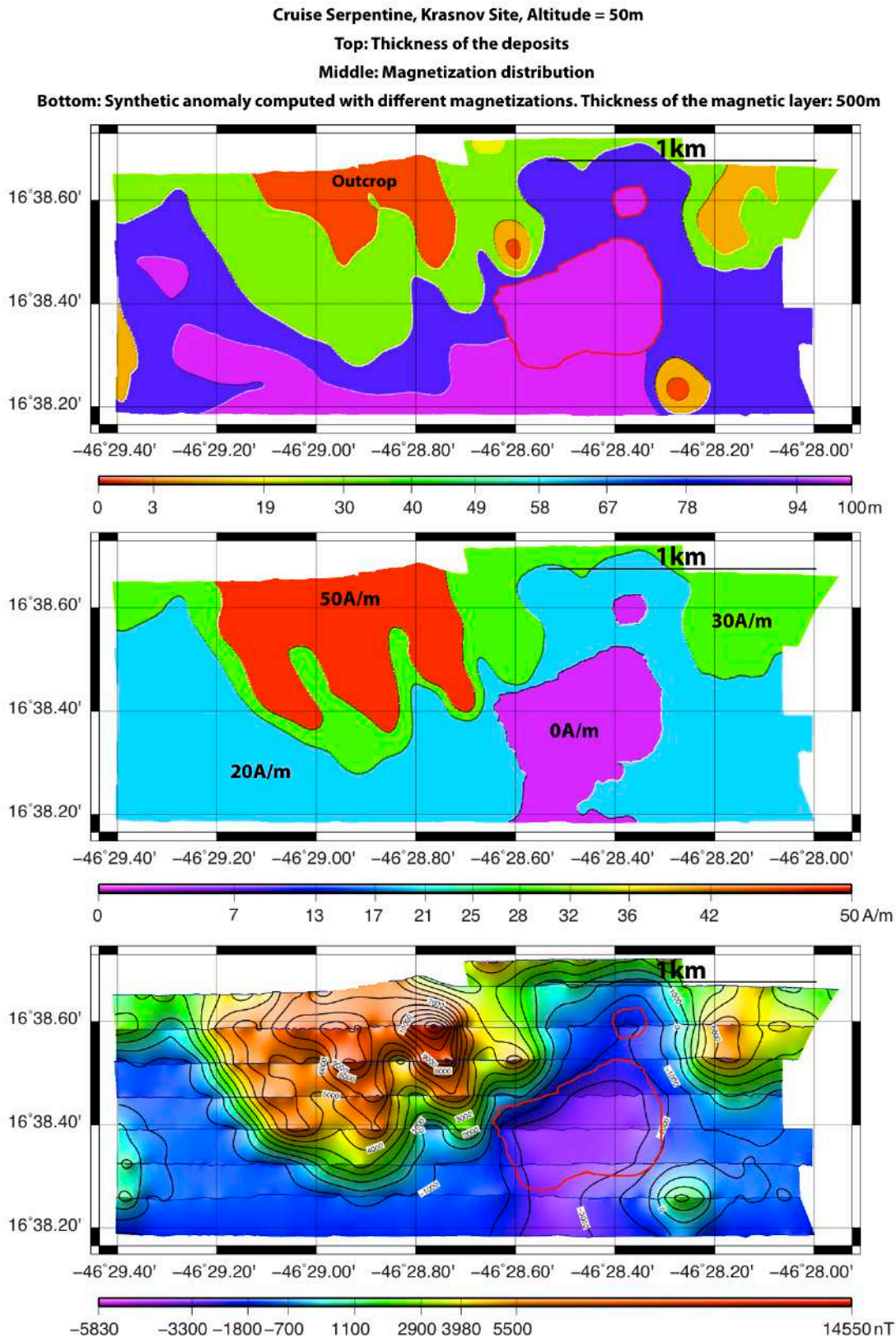
Les modèles présentés en figures 32 et 33 sont en grande partie similaires à ceux présentés en figures 30 et 31 respectivement. L'unique différence est qu'une désaimantation totale a été ajoutée au niveau de la zone hydrothermale inactive.

Dans le cas de la figure 32, l'effet de l'écran est dominant dans la signature mais la désaimantation permet néanmoins d'accentuer l'anomalie négative par rapport à celle présentée en figure 30c. Dans le cas de la figure 33, l'écran seul ne suffit plus et il faut ajouter une désaimantation locale pour expliquer les données. Si on fait l'hypothèse que les dépôts de sulfures massifs ont des épaisseurs proches de celles de TAG, le modèle direct permet de démontrer que la signature magnétique des sites hydrothermaux sur substrat basaltique demeure après la fin de l'activité hydrothermale. Dans ce cas, l'altération est le processus dominant dans la signature magnétique des sites hydrothermaux.

Si le dépôt de sulfures massifs a une épaisseur de 200m, cette conclusion reste valide mais davantage sujette à discussion. Seule une campagne de forage sur le site permettrait de trancher définitivement en faveur de l'une ou l'autre de ces hypothèses.



**Fig. 32 :** (a en haut) Épaisseur des dépôts constitués d'éboulis et de sulfures pyriteux massifs faisant écran selon l'hypothèse haute.  
 (b au milieu) Distribution d'aimantation.  
 (c en bas) Anomalie synthétique calculée avec ces dépôts et cette distribution d'aimantation.



**Fig. 33 :** (a en haut) Épaisseur des dépôts constitués d'éboulis et de sulfures pyriteux massifs faisant écran selon l'hypothèse basse.

(b au milieu) Distribution d'aimantation. Elle est identique à celle de la Fig 30b.

(c en bas) Anomalie synthétique calculée avec ces dépôts et cette distribution d'aimantation.

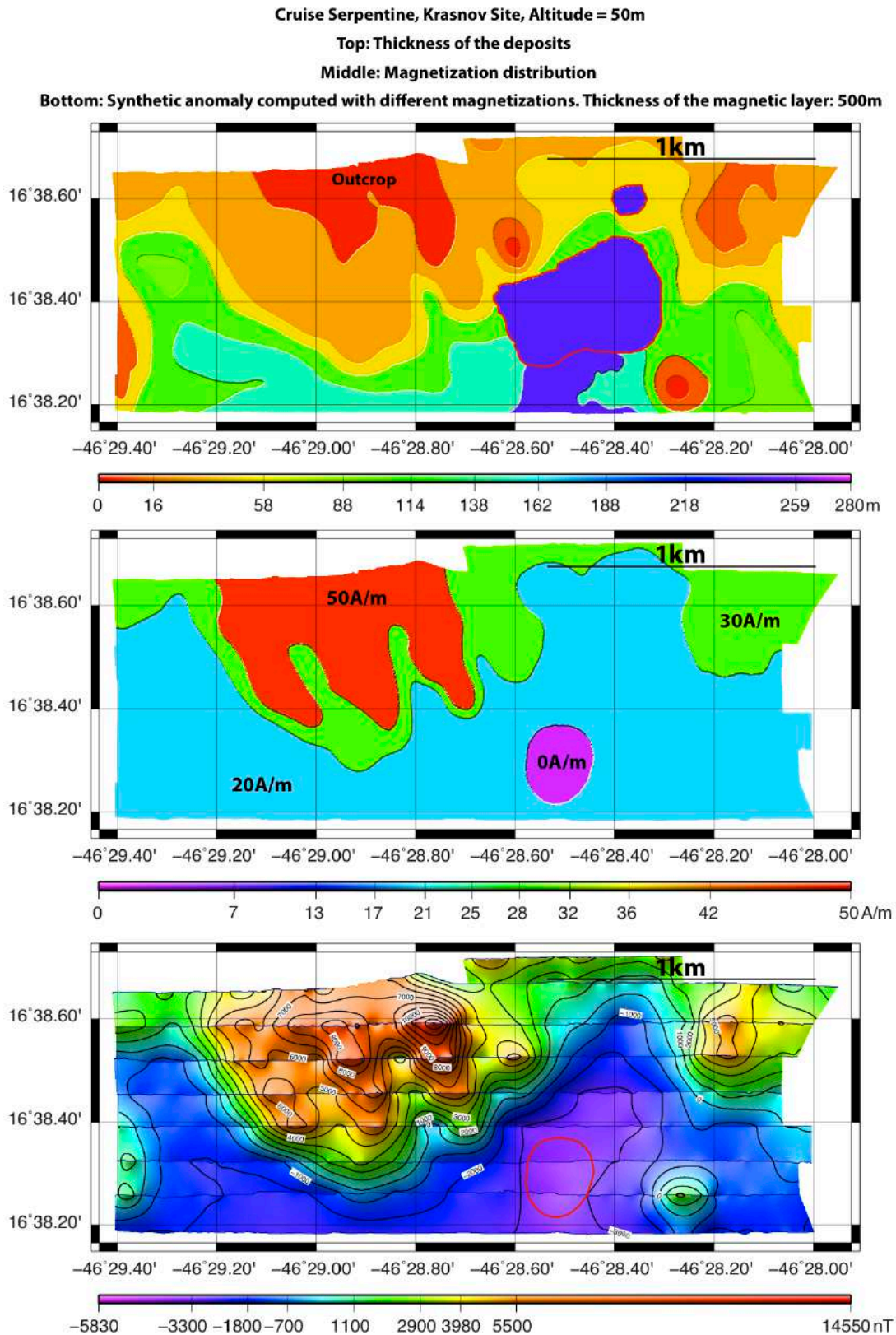
### ***6<sup>ème</sup> étape : Estimation des dimensions du conduit hydrothermal***

On a montré que l'altération est le processus principal dans la signature magnétique des sites hydrothermaux à substrat basaltique. Cette sixième étape doit permettre d'estimer les caractéristiques du conduit hydrothermal désaimanté.

Les données observées présentent la plus forte anomalie négative juste au Sud du principal dépôt hydrothermal. Cette anomalie pourrait être liée à la présence d'un conduit totalement altéré ayant approvisionné le site en fluides hydrothermaux. On construit deux modèles en imposant une zone désaimantée de forme circulaire créant une anomalie locale similaire à celle des données. Ces modèles diffèrent par l'épaisseur des dépôts de sulfures massifs utilisés. La figure 34c correspond à l'anomalie avec une épaisseur maximale de dépôts de 200m. La figure 35c reprend l'hypothèse « basse » des dépôts avec une épaisseur maximale de 100m.

On remarque que le conduit ne se trouve pas exactement à la verticale du site tel qu'il est défini par le contour rouge. Ce décalage peut s'expliquer de deux manières : le contour a été établi par les observations lors des plongées du ROV mais il reste approximatif. Par ailleurs, une partie du site a pu s'effondrer suite à l'action de failles. Dans ce cas, la partie Nord du dépôt serait restée en place alors que la zone Sud serait à présent éboulée.

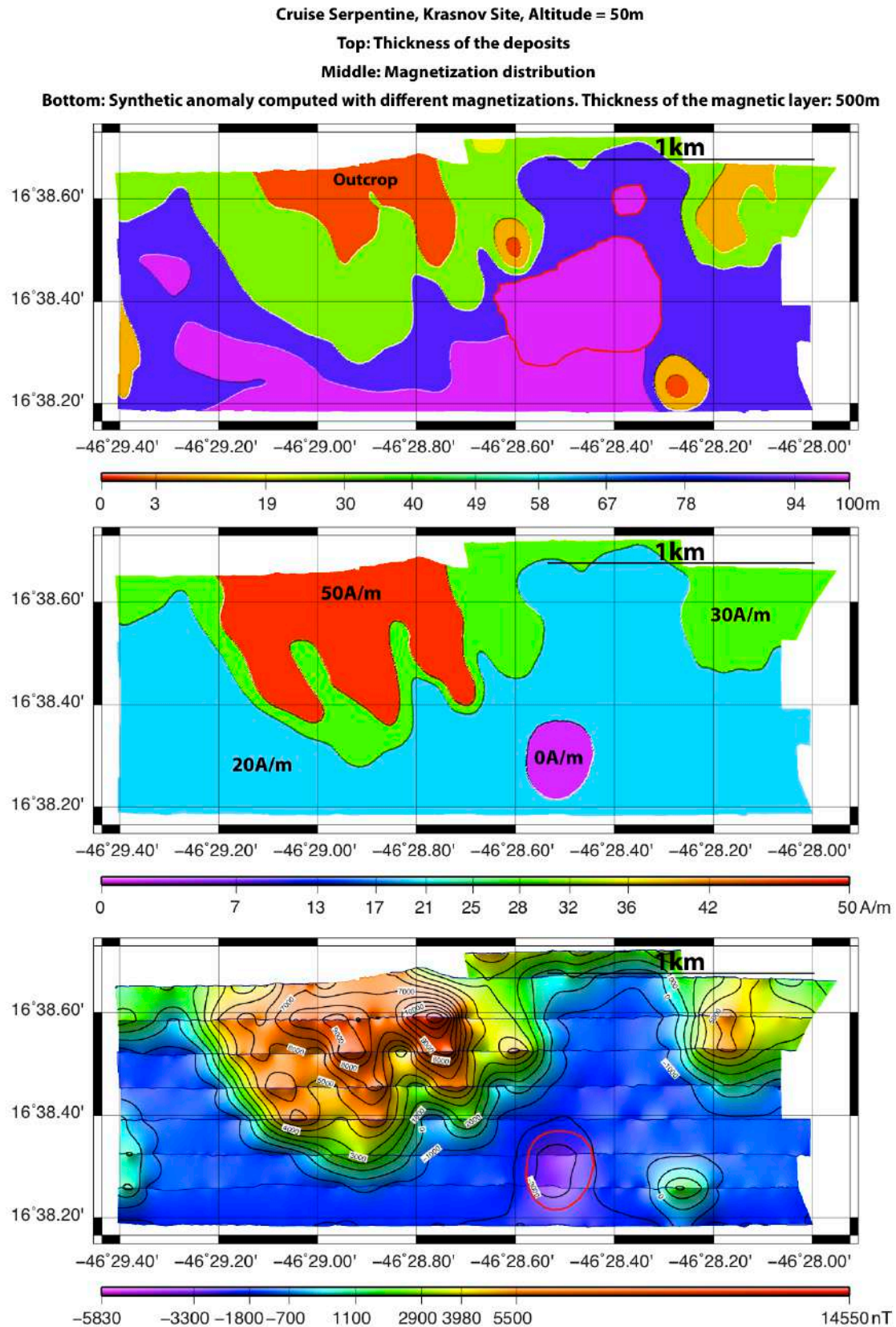




**Fig. 34 :** (a en haut) Épaisseur des dépôts constitués d'éboulis et de sulfures pyriteux massifs faisant écran selon l'hypothèse haute.

(b au milieu) Distribution d'aimantation. Elle est identique à celle de la Fig 30b.

(c en bas) Anomalie synthétique calculée avec ces dépôts et cette distribution d'aimantation.



**Fig. 35 :** (a en haut) Épaisseur des dépôts constitués d'éboulis et de sulfures pyriteux massifs faisant écran selon l'hypothèse basse.  
 (b au milieu) Distribution d'aimantation. Elle est identique à celle de la Fig 30b.  
 (c en bas) Anomalie synthétique calculée avec ces dépôts et cette distribution d'aimantation.

Dans le cas de dépôts de 200m d'épaisseur, la présence du conduit désaimanté n'apporte qu'une contribution mineure à l'anomalie.

Dans le cas d'une épaisseur maximale de dépôts sulfurés de 100m, un conduit de 200m de diamètre et 500m de profondeur génère une anomalie compatible avec les observations. Il est donc possible qu'un tel conduit ait alimenté le site hydrothermal lorsqu'il était en fonctionnement.

### ***Conclusions***

Sur le site hydrothermal fossile Krasnov, les données conduisent à penser que l'altération est le processus physique dominant dans la signature magnétique négative des sites hydrothermaux à substrat basaltique. Cette signature serait pérenne, et donc maintenue après l'arrêt de l'activité hydrothermale. Bien que l'on ne puisse conclure de manière définitive en raison de l'incertitude sur l'épaisseur de la couche non aimantée, cette hypothèse est suffisamment probante pour servir de base à nos travaux ultérieurs sur les sites à substrat basaltique découverts au cours des missions à Futuna.

# III) Site Rainbow

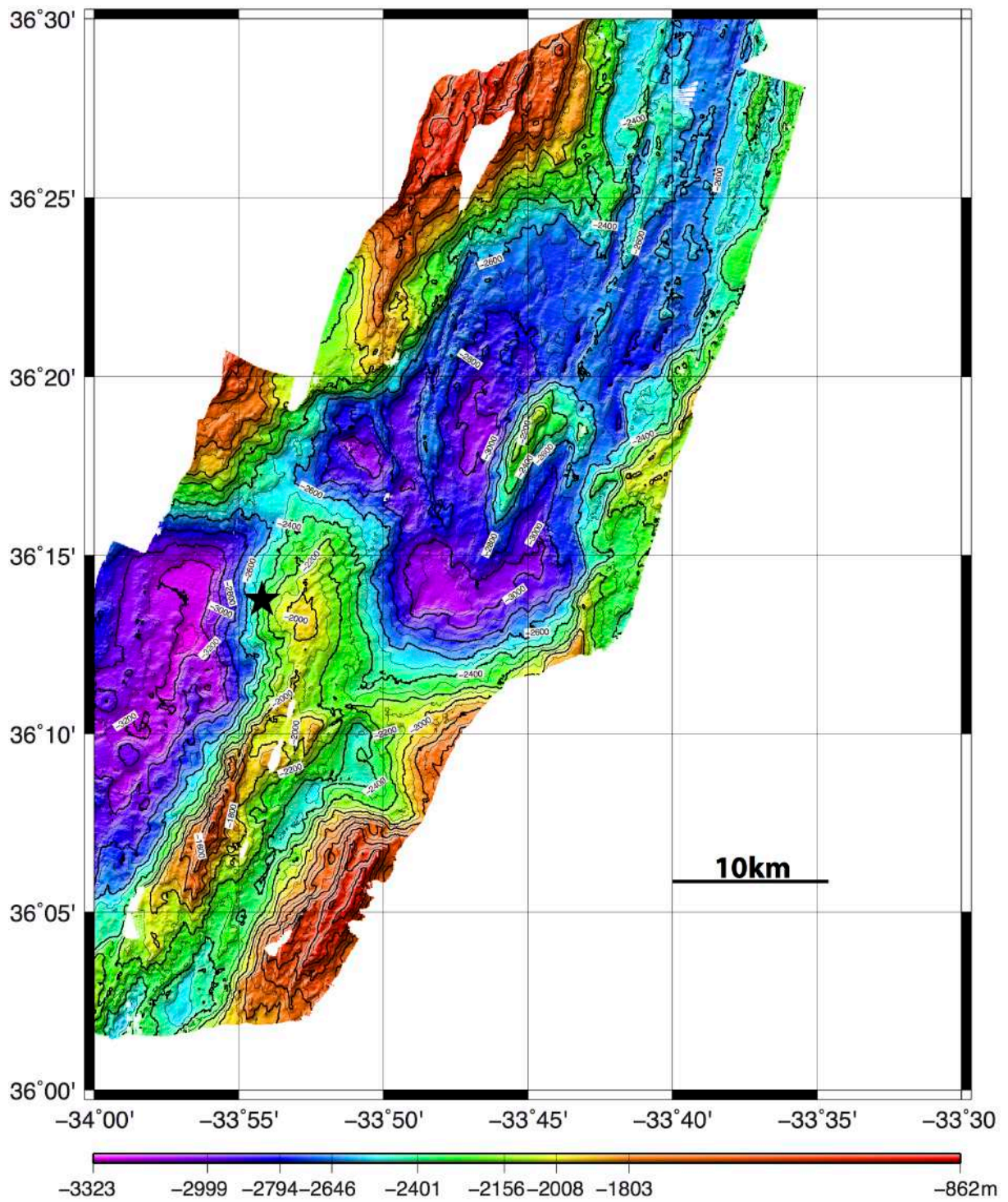
## 1) Observations

Le site Rainbow est situé dans une discontinuité de second ordre de la dorsale Médio-Atlantique, au Sud de l'archipel des Açores (Aballea et al., 1998 ; German and Parson, 1998 ; Parson et al., 1999 ; Parson et al., 1997 ; Gracia et al., 1997) (Figure 36). Des fluides de haute température sont émis sur un site de 300m\*200m situé sur le flanc occidental d'une colline principalement constituée de roches ultramafiques. Cette colline est elle-même coupée par une série de failles orientées majoritairement suivant les directions Nord/Sud et Nord-Est/Sud-Ouest (Fouquet et al., 2010).

La partie Ouest du champ hydrothermal est constituée d'un escarpement de 25m de hauteur au niveau duquel se trouvent d'importantes minéralisations. Le remplacement des roches ultramafiques par les sulfures y est fréquent (Marques et al., 2006 ; Marques et al., 2007). Le champ hydrothermal est entièrement supporté par un socle de roches ultramafiques et seule une petite coulée de basalte ancien apparaît au sommet de la ride de Rainbow, à environ 1km à l'Est des zones actives (Fouquet et al., 2010).

Un second site inactif possédant des cheminées de 2 à 3m de hauteur et nommé Ghost City est situé à proximité du sommet de la dorsale de Rainbow. La lithification des sédiments, conjuguée à la présence de colonies de moules mortes (Lartaud et al., 2010), peuvent être liées à la diffusion à basse température de fluides riches en méthane à travers le sédiment. Des processus similaires ont été envisagés, notamment sur les sites de Saldanha, Menez Hom et Lost City (Ribeiro da Costa et al., 2008 ; Schroeder et al., 2002).

### Rainbow area, Bathymetry



**Fig. 36 :** Bathymétrie générale de la zone de Rainbow. Le site hydrothermal est symbolisé par une étoile noire.

## 2) Résultats

Les mesures magnétiques utilisées ont été effectuées au cours de la mission Momar Dream, en Août 2008. Le ROV Victor a effectué plusieurs plongées sur le site principal, à l'Ouest et sur le site fossile Ghost City, à l'Est. Un levé à 50m couvre la totalité de la zone d'un point de vue magnétique et bathymétrique. Il a été complété par deux autres levés, à 10m d'altitude, et centrés sur le site principal et sur Ghost City. La bathymétrie à 10m n'a cependant pas été traitée. Les cartes bathymétriques correspondant aux levés à 10m sont donc extraites du levé à 50m.

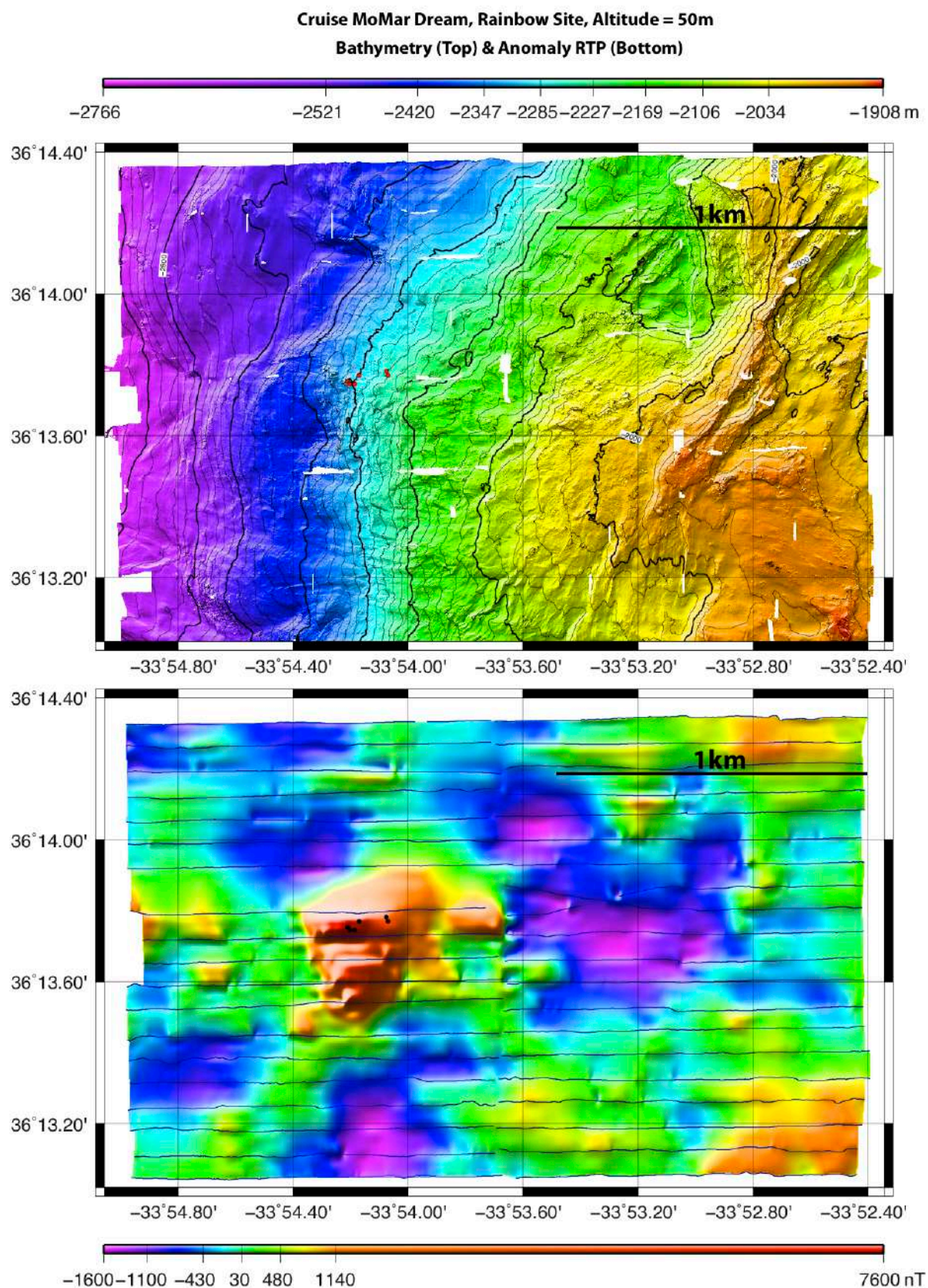
La carte bathymétrique montre une pente orientée vers le centre de la vallée axiale, située à l'Ouest. Les zones hydrothermales actives sont représentées sous la forme de points rouges (respectivement noirs) sur les cartes bathymétrique et magnétique (Figure 37). La carte des anomalies réduites au pôle de l'ensemble du site laisse clairement apparaître une anomalie positive au droit du site actif. Ce premier levé global à 50m permet donc de supposer que ce site hydrothermal est doté d'une signature magnétique particulièrement claire et qu'il s'agit d'une anomalie positive correspondant à une zone de plus forte aimantation.

La bathymétrie du site (Figure 38) montre deux structures topographiques marquées au niveau du site hydrothermal. Ces collines hydrothermales apparaissent de manière encore plus nette sur une perspective en 3 dimensions (Figure 39). Si l'on compare la bathymétrie à l'anomalie réduite au pôle, on constate que la plus forte anomalie positive se situe à la verticale du site hydrothermal. On peut également noter que l'amplitude crête à crête des anomalies magnétiques mesurées à cet endroit atteint 26 600nT. Sachant que l'intensité de l'IGRF local est de 43 150nT, on en conclut que les anomalies générées par le site atteignent 60% de l'intensité de l'IGRF. Cette anomalie extrêmement forte est liée à la proximité entre les sources et la mesure (10m) et justifie que le site reste détectable à une altitude de 50m.

Les plongées du ROV Victor ont révélé que la partie la plus à l'Ouest du site hydrothermal n'était plus active alors que sa partie orientale montrait une forte activité. On peut également noter que, comme pour Krasnov, la signature magnétique de la partie fossile de Rainbow semble perdurer malgré l'arrêt de l'activité hydrothermale. Il est

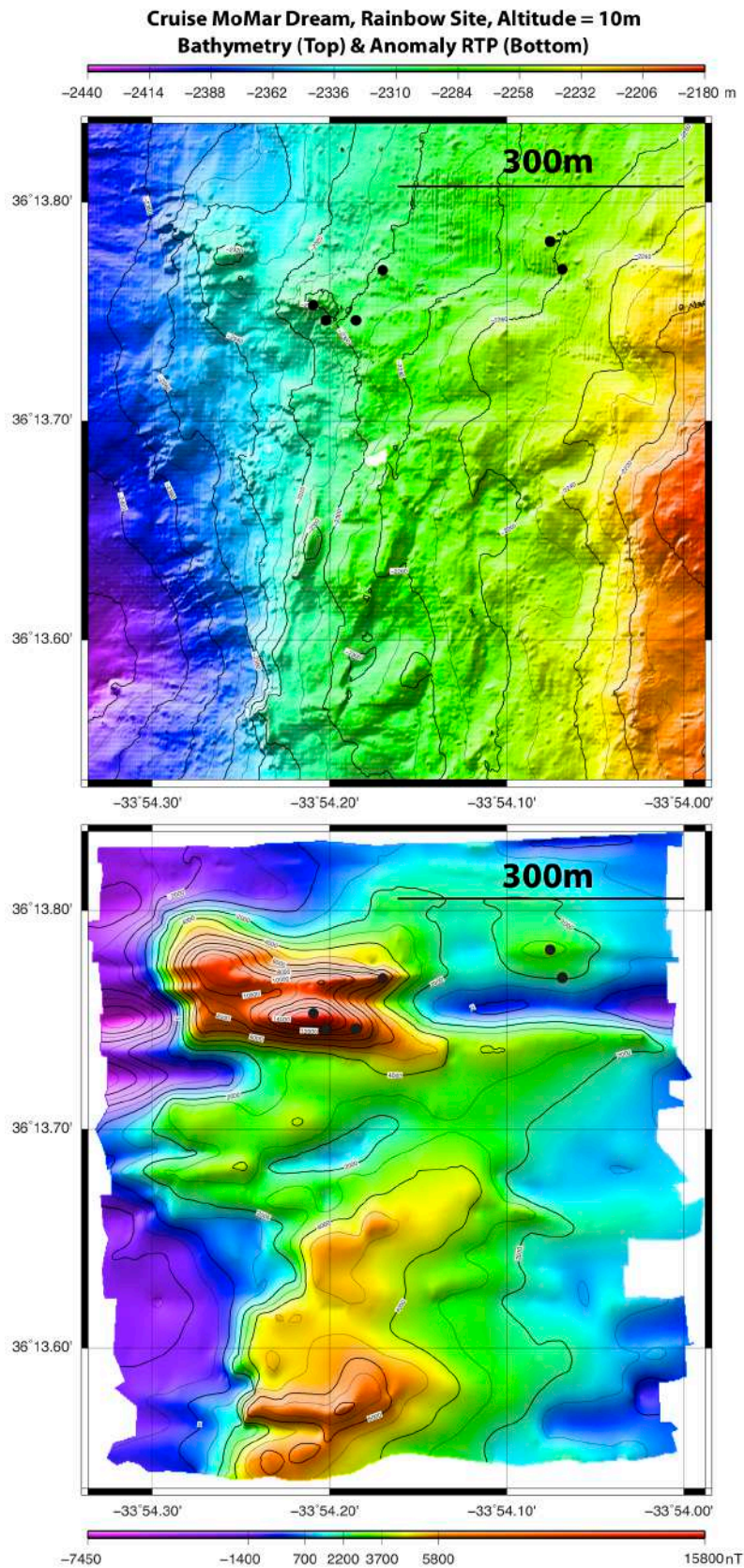
possible que, comme dans le cas des sites hydrothermaux basaltiques, ceux sur ultramafiques conservent leur signature magnétique même après la fin de leur cycle d'activité et que cette signature ne soit pas un phénomène transitoire uniquement lié à l'activité. Cette observation demande cependant à être confirmée sur un site totalement inactif et sur une plus grande durée.

Dans la partie Est du levé à 10m, deux cheminées actives isolées du reste des fumeurs ont été localisées (Rapport de campagne Momar Dream). L'une d'elles se trouve au centre d'une zone dotée d'une faible anomalie positive qui semble indiquer qu'il s'agit d'une zone où l'activité hydrothermale est récente, suggérant une migration progressive de cette activité d'Ouest en Est.

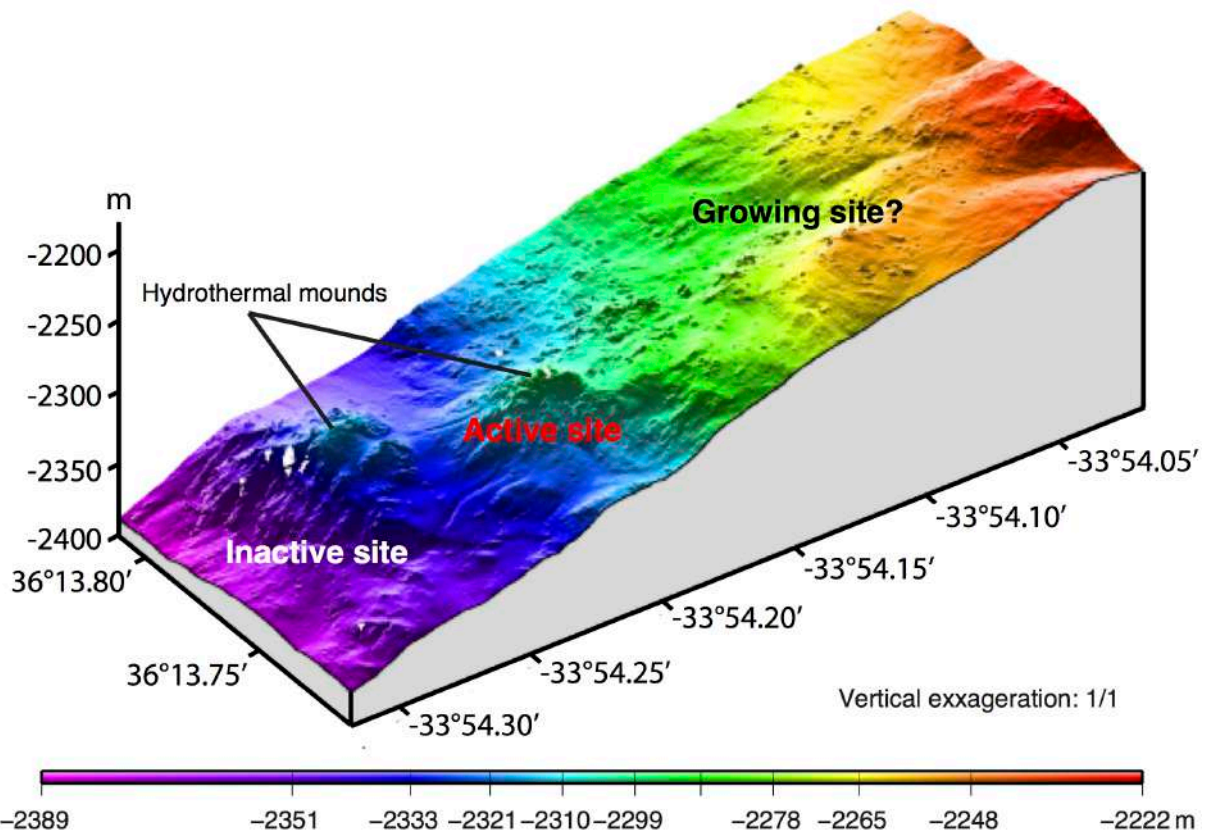


**Fig. 37 :** Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle (en bas) de la zone de Rainbow. Les sites actifs sont identifiés par des points rouges et noirs respectivement. Ce levé global montre une forte anomalie magnétique positive à la verticale du site hydrothermal.





**Fig. 38 :** Bathymétrie à 50m (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle à 10m (en bas) du levé à 10m sur le site Rainbow. Les points noirs correspondent aux sites actifs. Ils se concentrent dans la zone dotée de la plus forte anomalie positive.

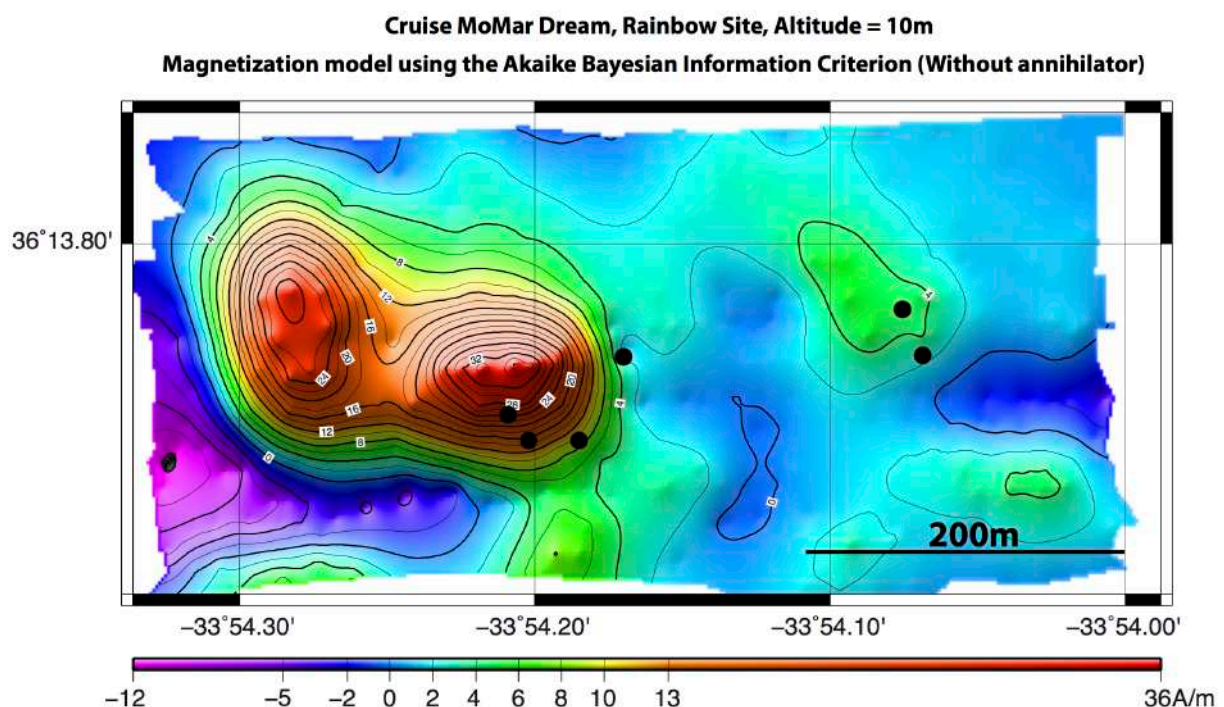


**Fig. 39 :** Bathymétrie en 3 dimensions de la zone de Rainbow Ouest. Les deux collines hydrothermales apparaissent dans la partie basse de la carte, à côté du principal groupe actif. La pente orientée vers le centre de la vallée axiale apparaît de manière claire.

### 3) Inversion bayésienne

Nous utilisons la méthode développée par Honsho et al. (2012) afin d'inverser l'anomalie magnétique en aimantation équivalente. La forte amplitude du signal nous conduit à faire l'hypothèse d'une épaisseur de couche aimantée de 100m. Les résultats de l'inversion sont présentés en figure 40. Les principales cheminées actives sont symbolisées par des points noirs. En raison de la puissance de calcul nécessaire pour effectuer cette inversion, seule la zone hydrothermale a été considérée.

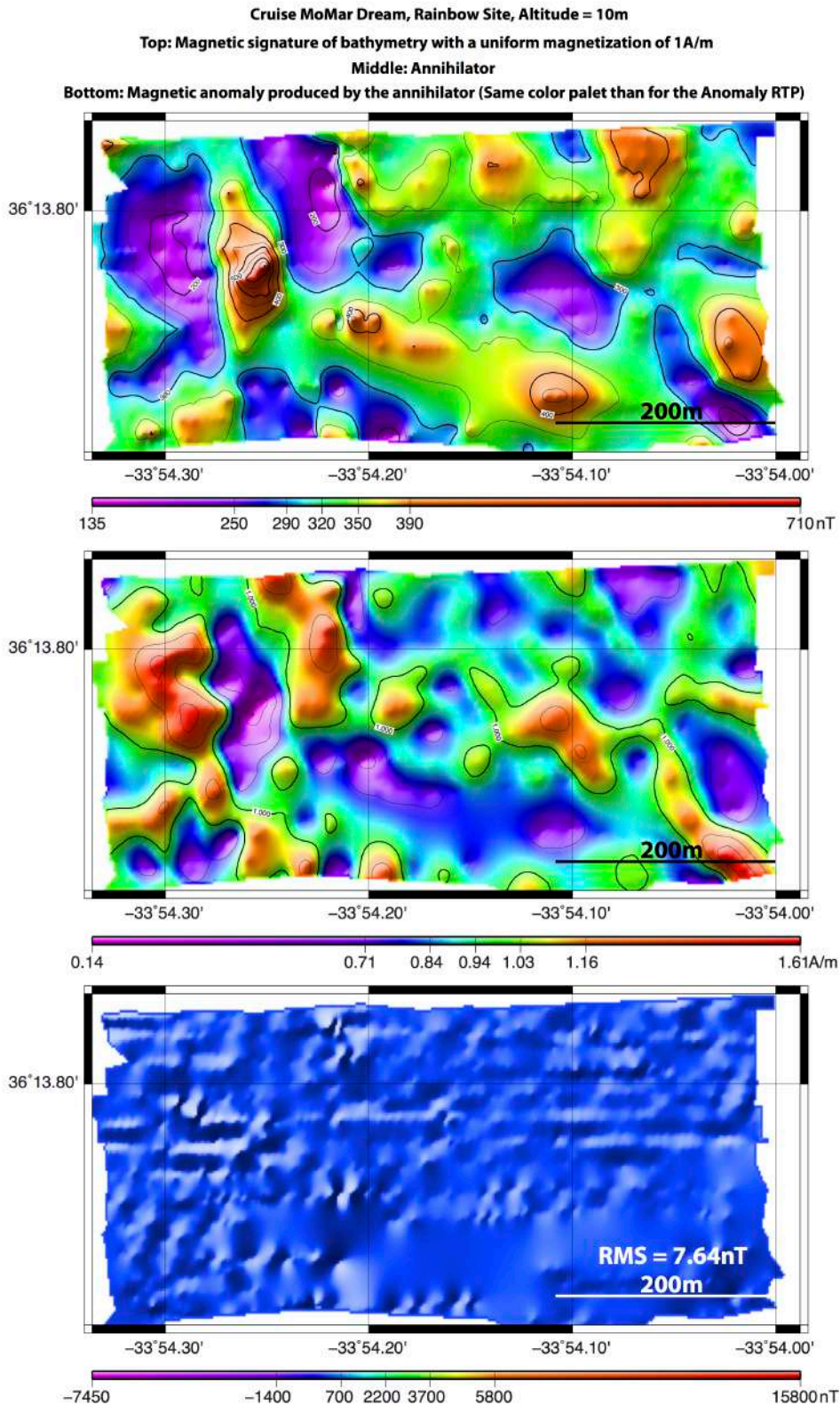
On remarque que l'échelle de valeurs s'étend de -12A/m à 36A/m, ce qui est incompatible avec la position du site, au sein de l'anomalie axiale de polarité normale. Ce résultat illustre la non unicité des solutions lors des inversions. Nous faisons donc l'hypothèse simple que l'aimantation minimale d'une croûte de polarité normale est de 0A/m et nous recherchons un annihilateur nous permettant de ne conserver que des aimantations positives.



**Fig. 40 :** Inversion du signal magnétique de la zone hydrothermale active de Rainbow en utilisant la méthode de Honsho et al. (2012) basée sur le critère d'information bayésien d'Akaike. L'existence de valeurs négatives dans une croûte située dans l'anomalie axiale de polarité normale est une illustration de la non unicité des solutions lors de l'inversion (Solutions qui sont définies à un annihilateur près).

Un annihilateur est une distribution d'aimantation générant une anomalie magnétique nulle dans la géométrie de l'expérience. Il peut donc être ajouté ou soustrait aux solutions autant de fois que nécessaire pour produire de nouvelles solutions. Nous l'ajoutons un nombre minimal de fois de manière à ce que la plus petite valeur d'aimantation soit de  $0A/m$ .

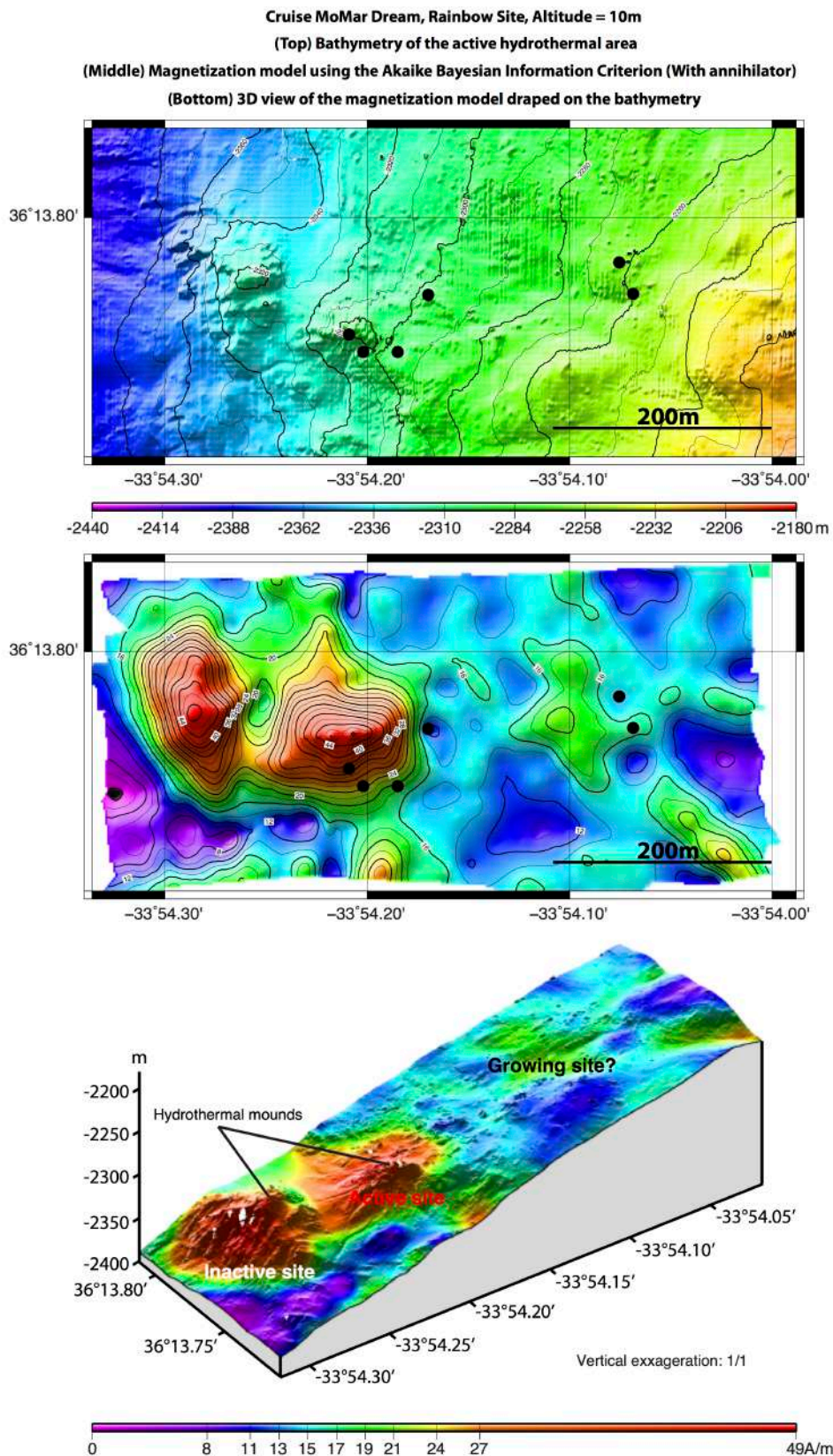
La recherche d'un tel annihilateur s'effectue en deux étapes. La première consiste à calculer l'anomalie magnétique synthétique générée par la géométrie de l'expérience, en considérant des sources aimantées à  $1A/m$ . Pour cela, on utilise le même type de modélisation directe que dans le cas de Krasnov. Le résultat de ce modèle est présenté en figure 41a. La seconde étape consiste à inverser ce modèle en aimantation équivalente en réutilisant la méthode de Honsho et al. (2012). Le résultat de cette nouvelle inversion (présenté en figure 41b) est l'annihilateur recherché. Enfin, nous testons la validité de cet annihilateur en calculant l'anomalie magnétique qu'il génère dans les conditions topographiques de l'expérience. Le résultat (tracé en utilisant la même palette de couleur que l'anomalie magnétique réduite au pôle) est présenté en figure 41c.



**Fig. 41:** (en haut) Anomalie magnétique synthétique calculée en considérant une bathymétrie dotée d'une aimantation uniforme et unitaire.

(au milieu) Annihilateur obtenu en inversant cette anomalie magnétique synthétique par la méthode de Honsho et al. (2012).

(en bas) Anomalie magnétique produite par l'annihilateur en conservant la même palette de couleurs que sur l'anomalie réduite au pôle. L'amplitude est négligeable et montre que l'annihilateur a été correctement calculé.



**Fig. 42 :** (en haut) Bathymétrie centrée sur la zone hydrothermale.  
 (milieu) Résultat final de l'inversion bayésienne après ajout de l'annihilateur. Les principales cheminées sont représentées par des points noirs.  
 (en bas) Drapage de l'inversion sur une vue 3D de la bathymétrie. Le contraste d'aimantation positif est clairement associé aux collines hydrothermales.

L'annihilateur a été rajouté 14.1 fois afin de ramener la valeur minimale de l'aimantation à 0A/m. Le résultat final est présenté en figure 42b. Les deux parties du site hydrothermal (inactif à l'Ouest et actif à l'Est) apparaissent de manière évidente et confirment que ce site hydrothermal sur substrat ultramafique se caractérise par un contraste d'aimantation fort.

L'échelle des valeurs est désormais comprise entre 0A/m et 49A/m, mais il s'agit de valeurs calculées au pôle. La valeur de 49A/m est donc équivalente à 30 – 35 A/m avant le processus de réduction. Cette valeur est cohérente avec celles obtenues par Kaori Nakase lors de son travail sur la zone dans le cadre d'un master à l'IPGP (2008). Nous allons la considérer pour réaliser une approche de la zone par modélisation directe afin de mieux contraindre les caractéristiques des dépôts.

## **4) Modélisation directe**

Le modèle direct établi dans le cas de Rainbow a été réalisé afin de contraindre les caractéristiques des dépôts hydrothermaux générés par les sites actifs. Il a été établi en se basant sur deux sources d'informations distinctes. La première est la carte géologique du site établie par Yves Fouquet (Communication personnelle). La seconde concerne les mesures expérimentales réalisées par Kaori Nakase et qui a obtenu des valeurs moyennes d'aimantation de 35A/m pour les serpentines du site. Il ne s'agit cependant que d'un modèle sommaire car nous ne disposons pas d'informations aussi précises qu'à Ashadze (Figure 53).

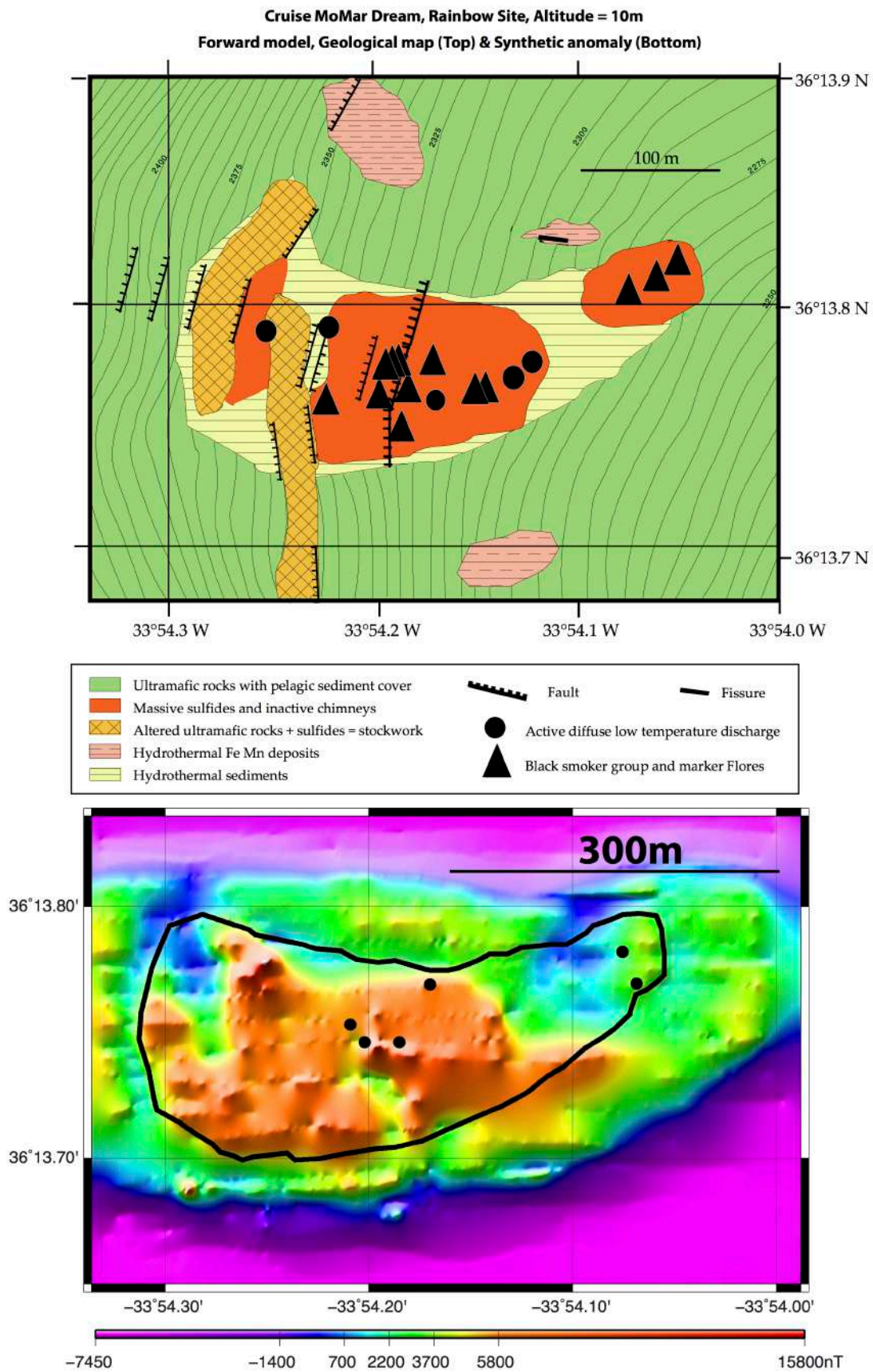
Le résultat de l'anomalie synthétique est indiqué en figure 43b et la carte géologique en figure 43a. La comparaison avec l'anomalie réduite au pôle démontre que la carte géologique (réalisée à partir d'une navigation de base longue alors que la carte ROV est réalisée à partir de la base ultracourte plus précise) ne correspond pas exactement aux données observées et qu'il faut la décaler légèrement vers le Sud-Ouest. Par ailleurs, certaines formations géologiques ont été ôtées du modèle car elles étaient jugées peu réalistes. C'est par exemple le cas de l'excroissance de roches ultramafiques altérées orientée Nord-Sud et située au milieu de la zone de roches ultramafiques

couvertes par une couche de sédiments pélagiques (indiquée en ocre sur la carte géologique).

Comme nous l'avons précédemment mentionné, le site Rainbow peut être divisé en trois parties. La première correspond à la zone désormais inactive située à l'Ouest. La seconde est centrée sur la partie active contrôlée par des failles normales. Enfin, la troisième correspond aux deux petites cheminées en cours de développement dans un domaine non encore tectonisé et suggérant une migration progressive de l'activité hydrothermale vers l'Est (Fouquet et al. 2010). Sur la carte d'anomalies réduites au pôle (Figure 38b), on constate d'autre part que la zone située entre le site actif principal et le nouveau site à l'Est est caractérisée par une anomalie d'environ 2200nT.

Afin d'établir le modèle, nous faisons l'hypothèse que la zone dans son ensemble est composée de serpentines aimantées à 35A/m. Nous avons ensuite ajusté l'épaisseur des dépôts aimantés de manière à obtenir un signal doté d'une amplitude crête à crête similaire à celle constatée sur l'anomalie réduite au pôle.

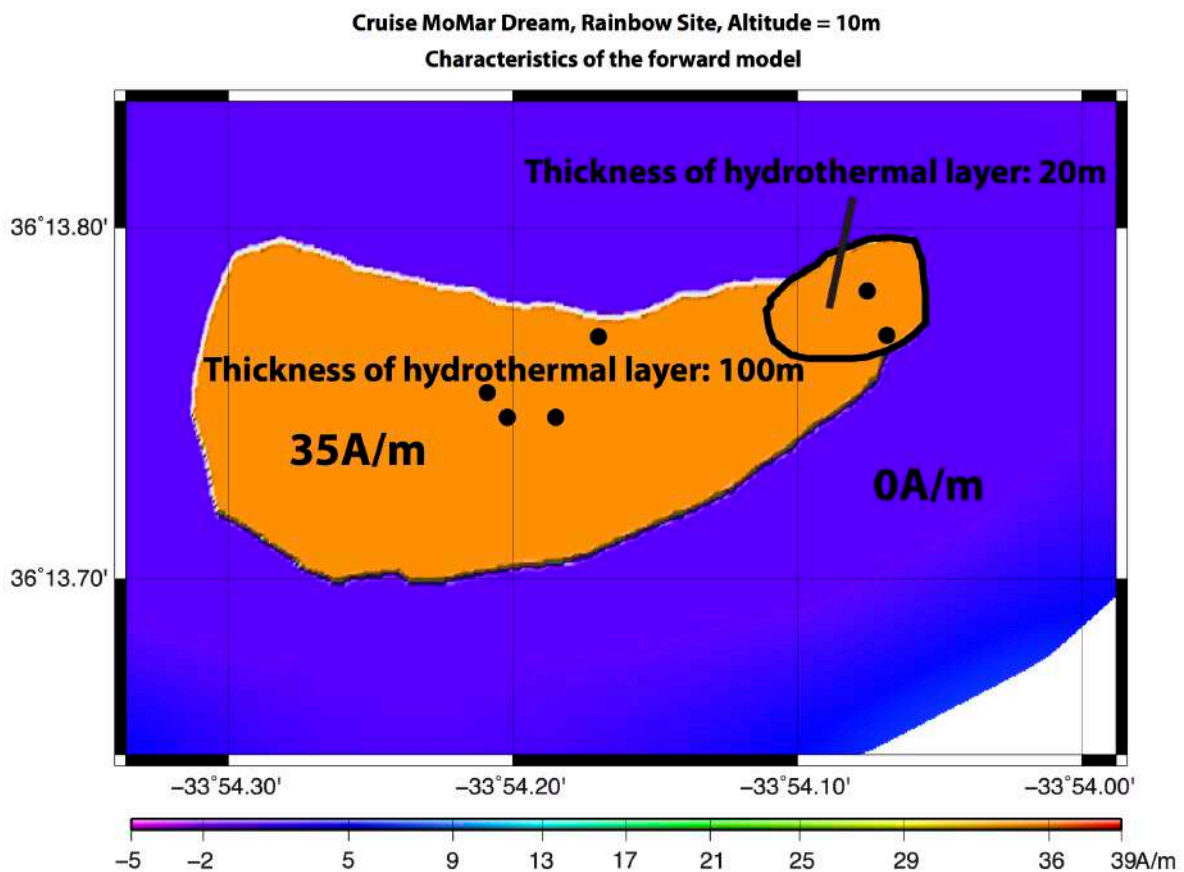




**Fig. 43 :** (a, en haut), carte géologique du site Rainbow établie par Yves Fouquet et (b, en bas), anomalie magnétique synthétique obtenue par l'utilisation du modèle direct. L'échelle de couleurs est identique à celle de la figure 40.

L'épaisseur de la couche aimantée à 35A/m est fixée à 100m dans les parties centrale et Ouest de la zone hydrothermale. Dans la partie Est, actuellement en phase de croissance, la faiblesse du signal observé sur l'anomalie magnétique réduite au pôle confirme qu'il faut envisager un dépôt de taille plus restreinte. Son épaisseur est fixée à 20m, ce qui permet d'obtenir un signal comparable à celui observé. Enfin, entre les zones centrale et Est, la couche aimantée à 35A/m est établie avec une couverture de dépôts non aimantés de 10m, suggérée par la carte géologique. L'épaisseur de la couche aimantée y est également fixée à 100m.

Les caractéristiques de ce modèle sont résumées en figure 44.

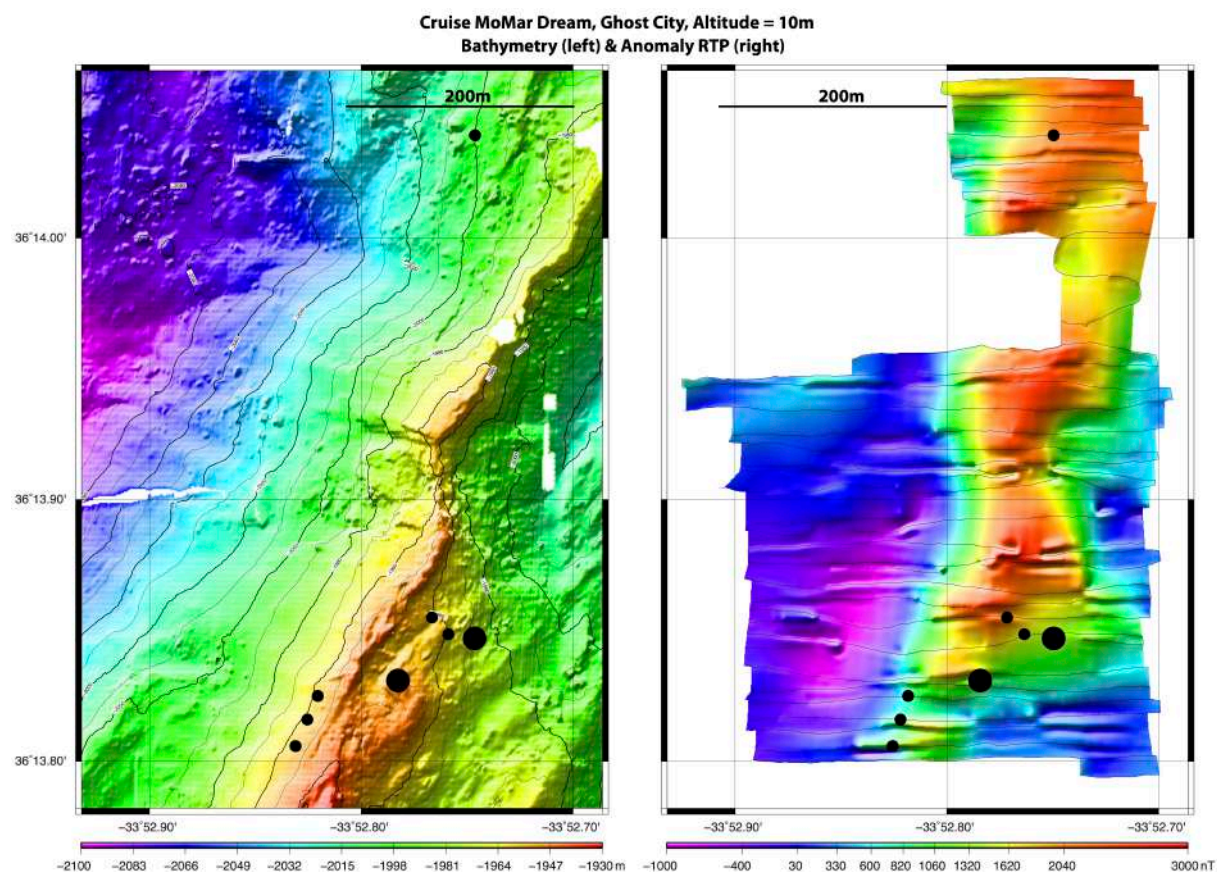


**Fig. 44 :** Caractéristiques du modèle direct du site Rainbow. Le substrat est doté d'une aimantation constante de 35A/m et les épaisseurs des dépôts sont comprises entre 20 et 100m, avec une couverture sédimentaire de 10m entre les deux sites actifs.

## 5) Ghost City

Le site fossile Ghost City se situe à 2.5km à l'Est du site actif Rainbow. Il est essentiellement constitué de carbonates (non magnétiques), et correspond à des circulations de basse température. Il a fait l'objet d'une unique plongée d'exploration du ROV. La trajectoire du ROV a suivi des profils Est-Ouest qui coupent l'axe de la crête.

Plusieurs colonies de bivalves y ont été détectées (Lartaud et al., 2010). Ces animaux se regroupent dans les zones où la température de l'eau est plus élevée, ce qui permet également de détecter l'activité hydrothermale. Ces colonies ont été reportées sous la forme de points noirs de tailles variables selon leur importance sur la figure 45.



**Fig. 45 :** Bathymétrie (à gauche) et anomalie magnétique réduite au pôle (à droite) de la zone de Ghost City à une altitude de 10m. La bathymétrie laisse apparaître la crête orientée Nord 20° sur laquelle les colonies de bivalves (symbolisées par des points noirs de diamètres proportionnels à leurs tailles) ont été observées.

Comme dans le cas de Rainbow, l'hydrothermalisme, dont dépendent les colonies de bivalves, se trouve principalement dans la zone présentant une forte anomalie positive. Cette anomalie est portée par les serpentines altérées et pas par les sulfures, même si la dominance de pyrrhotite et la présence de magnétite indiquent des corps minéralisés plus magnétiques que ceux de type Krasnov, dominés par la pyrite.

Sachant que ce site hydrothermal se trouve également sur substrat ultramafique, nous avons donc là une confirmation supplémentaire que les sites hydrothermaux ultramafiques sont dotés d'une signature magnétique opposée à celle des sites sur substrat basaltique et que celle-ci se caractérise par une forte aimantation.

# IV) Site Ashadze

## 1) Observations

Les deux sites hydrothermaux à fumeurs noirs Ashadze 1 et 2 (situés respectivement à 4100 et 3260m de profondeur), sont situés sur le flanc Ouest de la vallée axiale de la dorsale Médio-Atlantique (Bel'tenev et al., 2003 ; Cherkashev et al., 2008 ; Sudarikov et al., 2001 ; Fouquet et al., 2008 ; Fouquet et al., 2010). À cet endroit, la vallée est très asymétrique, avec un relief nettement plus marqué dans sa partie Ouest. L'asymétrie s'inverse immédiatement au Sud, où l'anomalie magnétique axiale apparaît décalée de quelques kilomètres vers l'Ouest (Cannat et al., 2007) (Figure 46).

Les sites ont été visités pour la première fois par un engin sous-marin lors de la mission Serpentine en 2007 (Fouquet et al., 2008 ; Ondreas et al., 2012)). Les sites Ashadze 1 et 2 sont distants de 5km l'un de l'autre, à respectivement 4 et 9km de la dorsale. Le sommet des murs de la vallée axiale, à 2300m de profondeur, correspond à l'extrémité d'une large surface irrégulière. Les roches que l'on y trouve sont majoritairement des péridotites serpentinisées avec des corps gabbroïques intercalés, très fréquents le long des pentes de la vallée axiale dans ce segment de la dorsale Médio-Atlantique.

Les cheminées hydrothermales d'Ashadze sont globalement alignées au Nord d'une pente irrégulière orientée vers le Sud, qui est vue comme la conséquence en surface d'une petite discontinuité axiale (Cannat et al., 2007 ; Fouquet et al., 2008). Des cheminées de sulfures éteintes ont également été échantillonnées à proximité de la base des murs de la vallée, à 4530m de profondeur (Ondreas et al., 2012) (Ashadze 4). Ce dernier est un site sur substrat basaltique alors que les sites Ashadze 1 et 2 sont à substrat ultramafique.

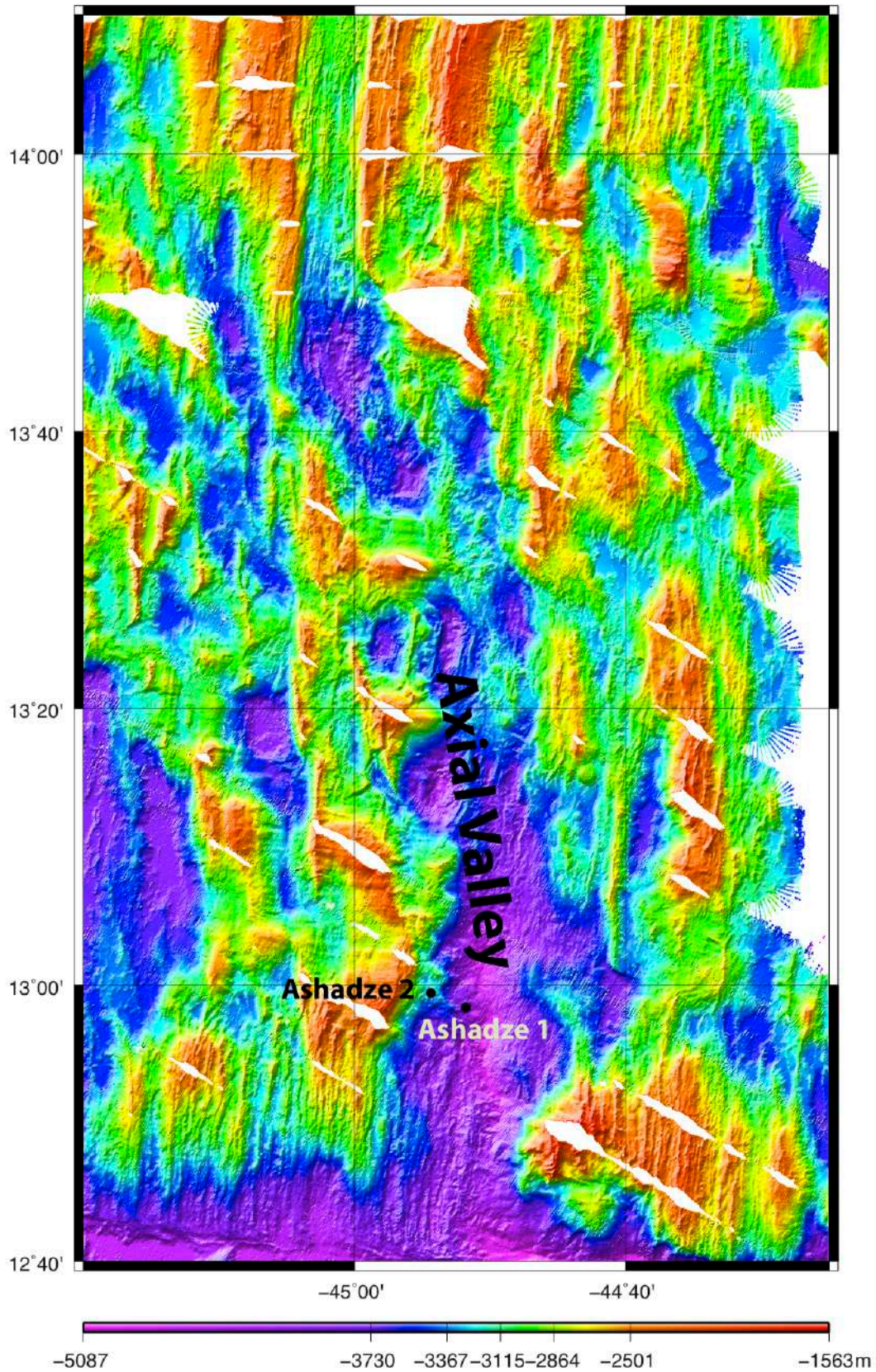
Les cheminées actives d'Ashadze 1 se répartissent sur une zone de 150m de longueur (Figures 48 & 49). À faible distance des cheminées, la topographie semble

dominée par une rupture de pente avec des glissements de terrain importants (Ondreas et al., 2012 ; Cannat et al., 2013). Les fumeurs noirs d'Ashadze 2 sont répartis dans une zone relativement étroite (70m) orientée Nord-Sud (Ondreas et al., 2007 ; Ondreas et al., 2012), délimitée à l'Est par un corps gabbroïque. Plus à l'Ouest, la zone est limitée par une petite ride de 20 à 50m de hauteur également orientée Nord-Sud, sur laquelle se trouvent de nombreuses cheminées hydrothermales éteintes. Sur le site Ashadze 2, un large groupe de fumeurs se trouve dans une dépression s'apparentant à un cratère d'environ 25m de diamètre, au pied du graben. La construction de la structure pourrait indiquer que des émissions explosives de fluides hydrothermaux ont pu survenir par intermittence (Fouquet et al., 2008 ; Fouquet et al., 2010 ; Ondreas et al., 2012).

Cruise Serpentine, Ashadze Area

Bathymetry

40km

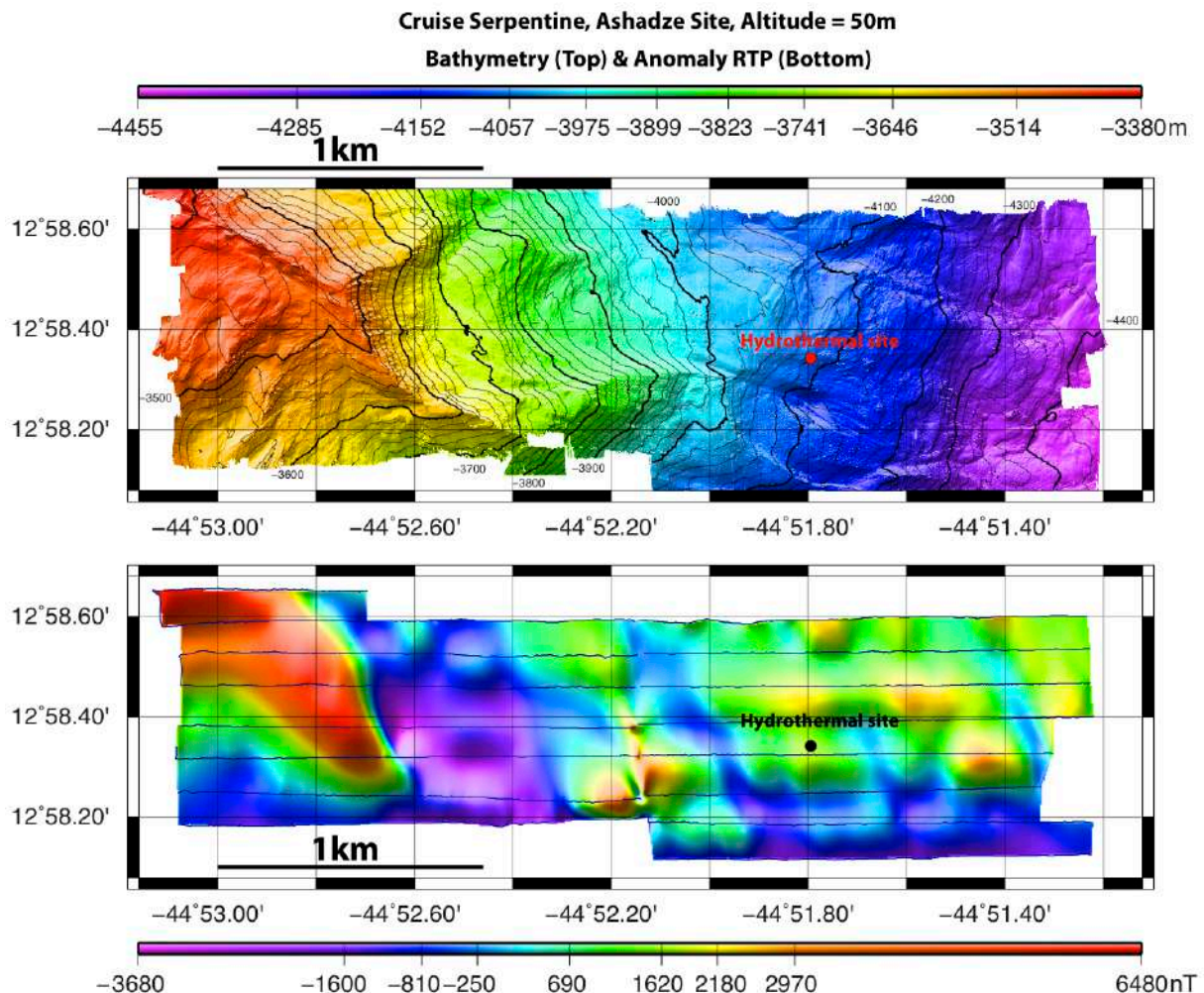


**Fig. 46 :** Bathymétrie régionale au niveau des sites hydrothermaux Ashadze 1 et 2. La vallée axiale se trouve immédiatement à l'Est du site Ashadze 1 (Smith et al., 2006).

## 2) Résultats

La plongée du ROV Victor sur le site Ashadze durant la campagne Serpentine a permis d'effectuer des mesures magnétiques à trois altitudes différentes (respectivement 50m, 20m et 10m). Elle a ensuite été complétée par un levé à 20m d'altitude sur le site Ashadze 2.

### a) Levé à 50m



**Fig. 47 :** Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle (en bas) du site Ashadze 1 à une altitude de 50m. La très forte anomalie magnétique à l'Ouest de la carte semble associée au relief visible en bathymétrie. Le site hydrothermal a été positionné mais reste impossible à localiser sans informations complémentaires.

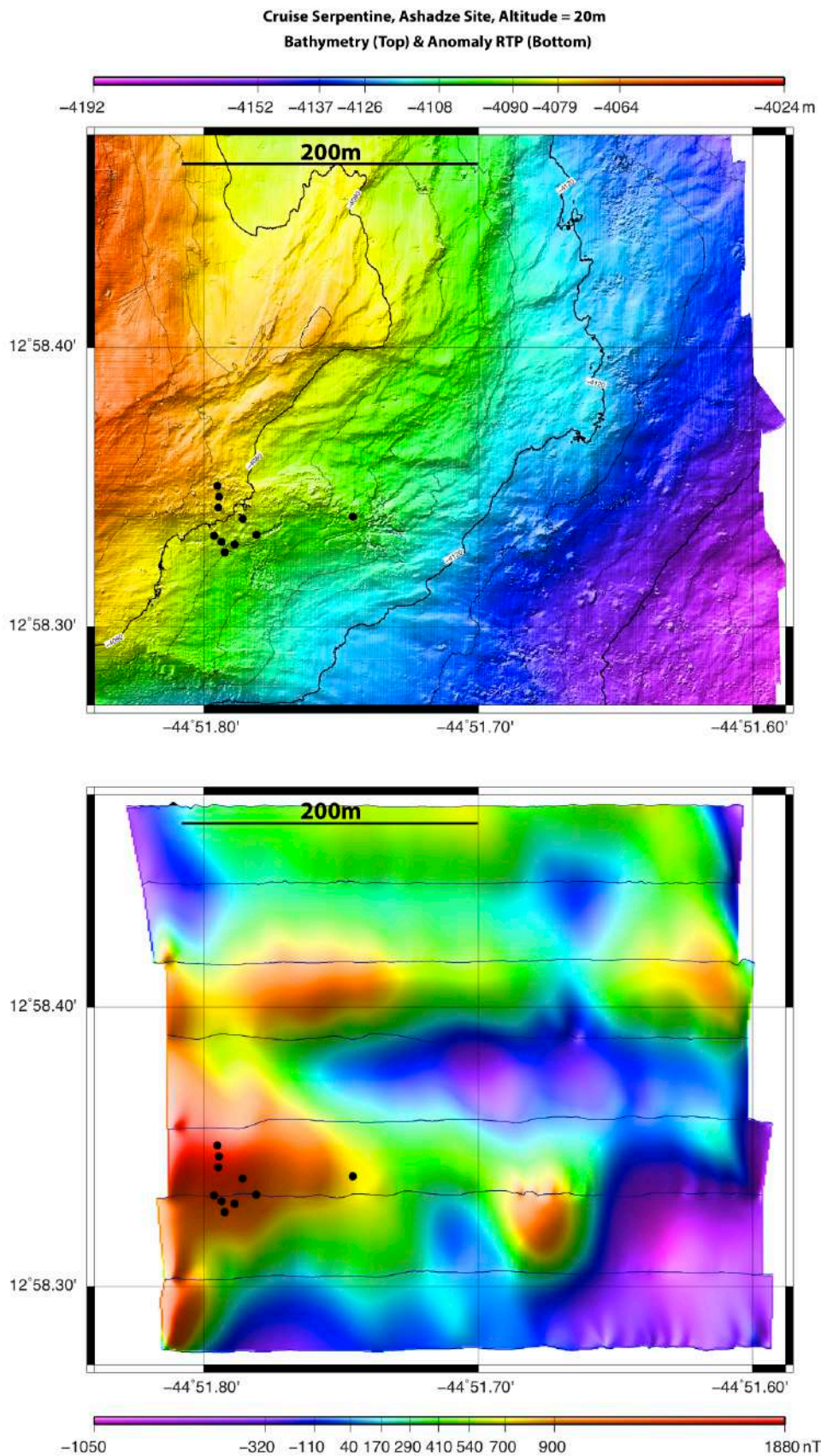


Sur la carte des anomalies magnétiques réduites au pôle du levé à 50m (Figure 47), une anomalie beaucoup plus forte que les autres apparaît dans la partie Ouest de la zone de recherches. Elle est associée au relief visible sur la bathymétrie, qui est une colline dénuée d'activité hydrothermale. Dans la partie Est, d'autres anomalies de plus faible amplitude apparaissent et le site hydrothermal est situé au centre d'une petite zone dotée d'une anomalie positive légèrement plus forte que le milieu environnant. Ce résultat pourrait sembler cohérent avec la signature magnétique observée sur Rainbow mais il doit être précisé en utilisant les données des levés à 20m et 10m.

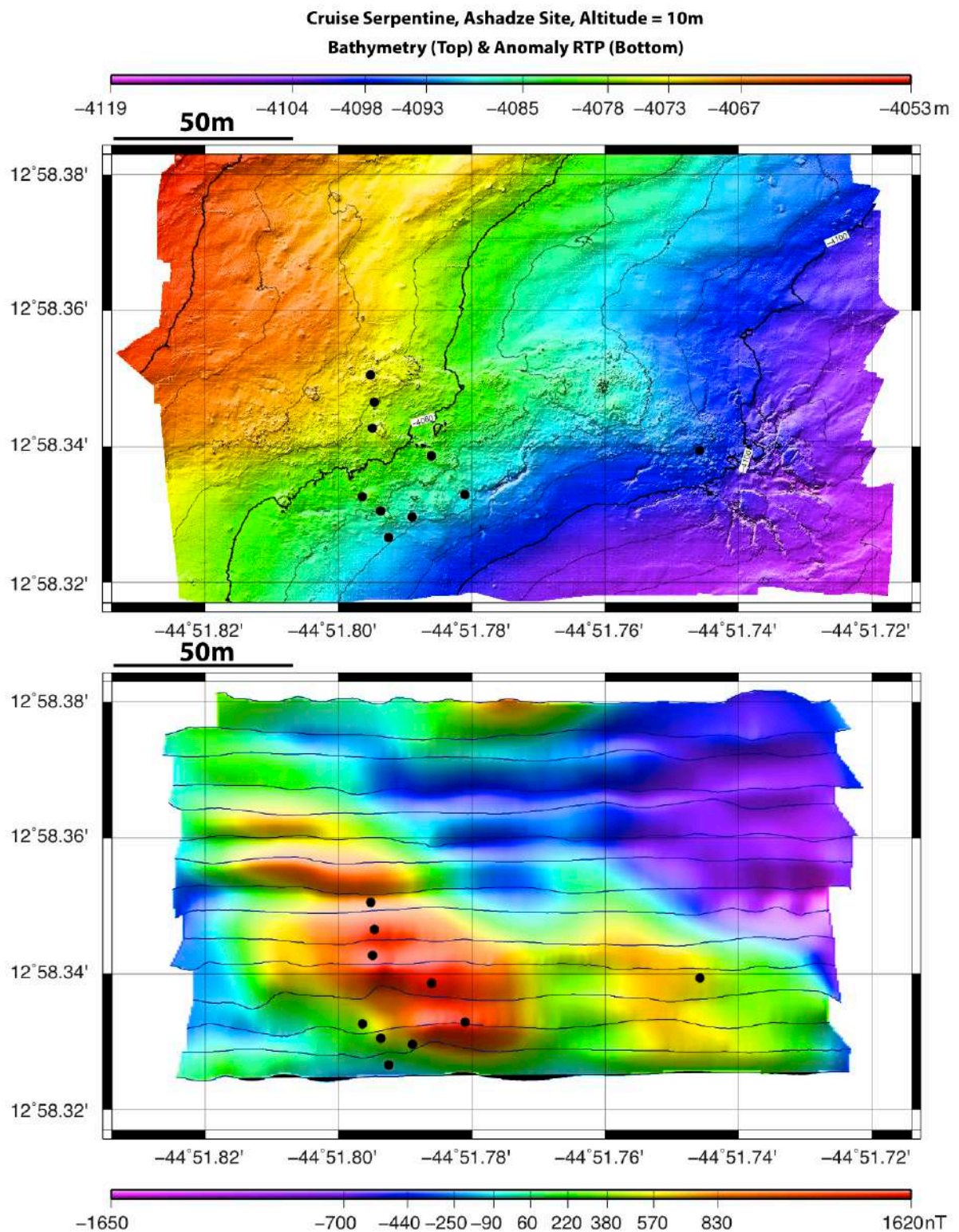
## **b) Levés à 20m et 10m**

Le levé à 20m couvre une zone plus petite que celui à 50m et se focalise sur la zone hydrothermale active. L'altitude de 20m est adéquate pour détecter la signature magnétique des sites hydrothermaux (Figure 48). Les points noirs correspondent aux cheminées et traces d'activité hydrothermale détectées lors des plongées.

Les résultats sont en accord avec la signature magnétique de Rainbow (bien que l'amplitude crête à crête des anomalies soit nettement plus faible). En effet, l'activité hydrothermale se concentre dans une zone présentant une forte anomalie positive associée à une forte aimantation (car le site est situé au sein de l'anomalie magnétique axiale de polarité normale).



**Fig. 48 :** Bathymétrie (en haut) et anomalie réduite au pôle (en bas) du levé à 20m d'altitude du site hydrothermal Ashadze 1. Les points noirs correspondent aux endroits où une activité hydrothermale a été observée. Ils se concentrent dans la zone de plus forte anomalie positive.



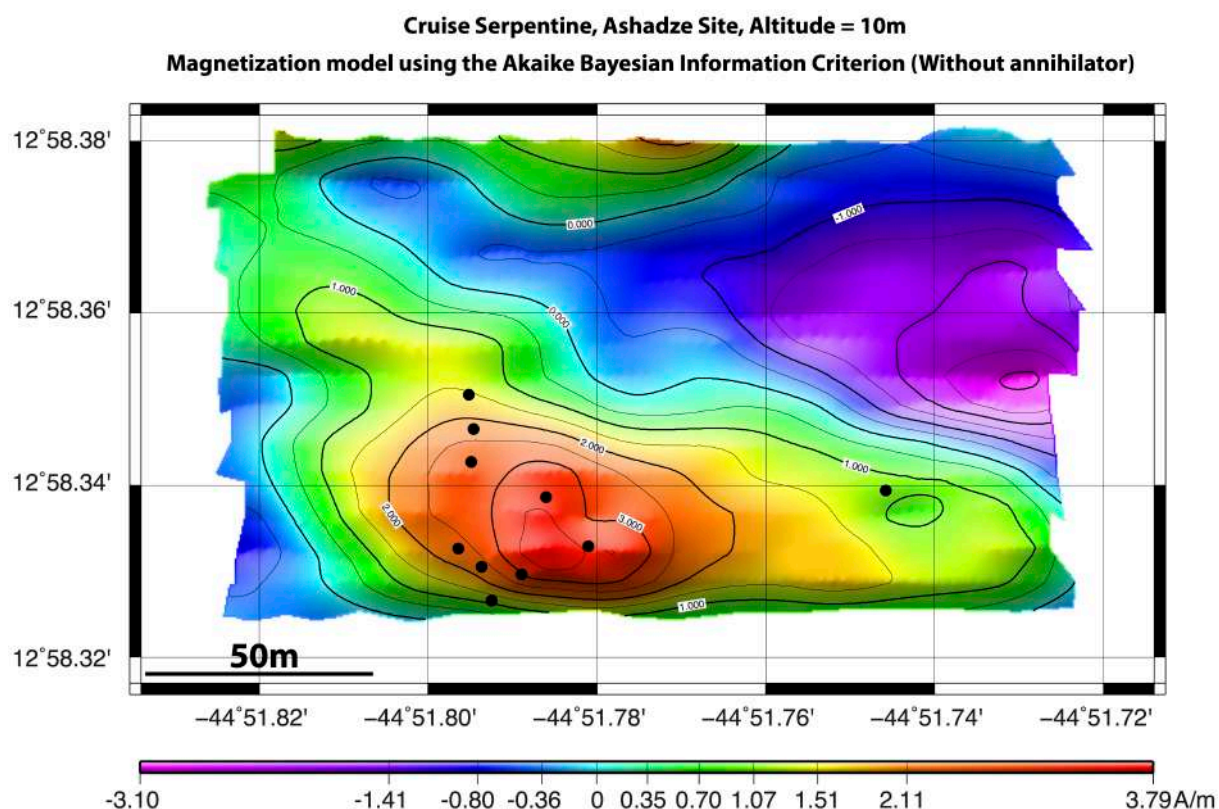
**Fig. 49 :** Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle (en bas) du levé à 10m d'altitude du site hydrothermal Ashadze. Les zones d'activité hydrothermale sont concentrées à l'intérieur de la zone dotée de la plus forte anomalie positive. Elles correspondent donc aux zones de plus forte aimantation.

Sur la carte bathymétrique du levé à 10m (Figure 49a), le plancher océanique présente un grain particulier au niveau de la zone hydrothermale active. Dans la partie Est de la carte, une zone de fissures en éventail apparaît également (Ondreas et al., 2012) et une cheminée active y a été découverte. Elle se trouve au milieu d'une anomalie magnétique positive plus faible. Ces levés à 20m et 10m sont donc parfaitement en accord avec la signature magnétique observée à Rainbow et confirment que les sites hydrothermaux sur substrat ultramafique se caractérisent par une signature magnétique opposée à celle des sites sur substrat basaltique.

### **c) Inversion bayésienne**

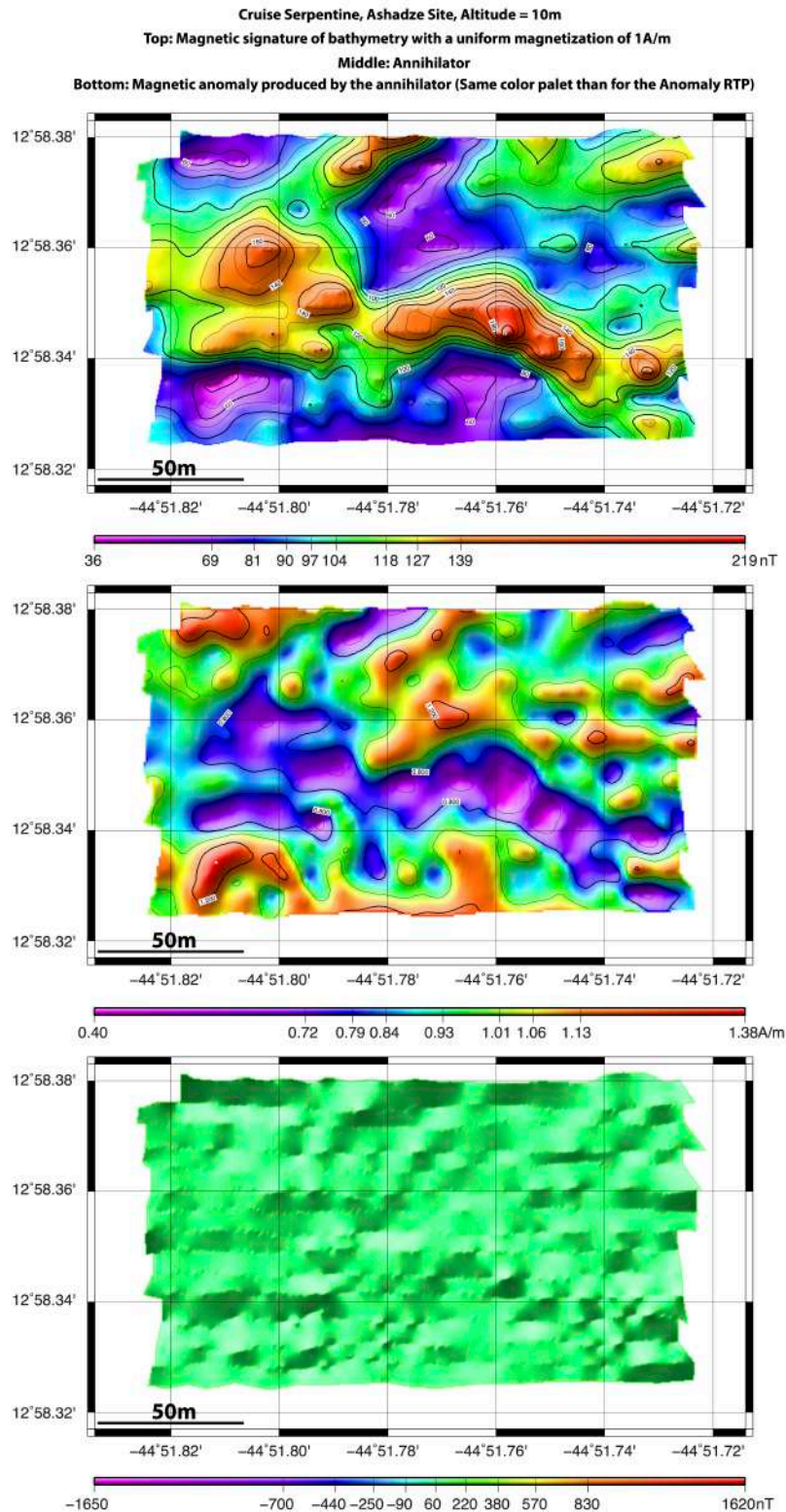
Comme dans le cas de Rainbow, nous utilisons la méthode développée par Honsho et al. (2012) afin d'inverser les données d'Ashadze en aimantation équivalente. En raison de la petite taille du site et de l'amplitude limitée de l'anomalie magnétique, nous faisons l'hypothèse que l'épaisseur de la couche aimantée est de 10m. Le résultat de cette première inversion est présenté en figure 50.

La carte confirme que le site hydrothermal actif (symbolisé par un ensemble de points noirs) se trouve bien dans la zone de forte aimantation. Cependant, en raison des problèmes de non unicité de la solution évoqués en Partie 2.IV.1.a, on constate que l'échelle de valeurs est comprise entre -3.10 et 3.79A/m, ce qui est incompatible avec la position du site dans l'anomalie axiale de polarité normale. Nous devons donc chercher un annihilateur permettant de résoudre ce problème.



**Fig. 50 :** *Inversion des données en aimantation équivalente en utilisant la méthode de Honsho et al. (2012) basée sur le critère d'information bayésien d'Akaike. En raison de la non-unicité des solutions lors des inversions, une partie des valeurs d'aimantation est négative, ce qui est en contradiction avec un socle doté d'une aimantation de polarité normale.*

Comme dans le cas de Rainbow, la recherche de l'annihilateur se fait en plusieurs étapes. Le résultat de l'anomalie magnétique synthétique calculée en attribuant une aimantation unitaire et uniforme à la bathymétrie est présenté en figure 51a. Ce résultat est inversé par la méthode de Honsho et al. (2012). Le résultat de cette nouvelle inversion (présenté en figure 51b) est l'annihilateur recherché. Enfin, la figure 51c présente le résultat de l'anomalie magnétique produite par cet annihilateur en conservant la même palette de couleurs que pour l'anomalie réduite au pôle. L'amplitude ne dépasse pas celle du bruit et confirme la validité de cet annihilateur.

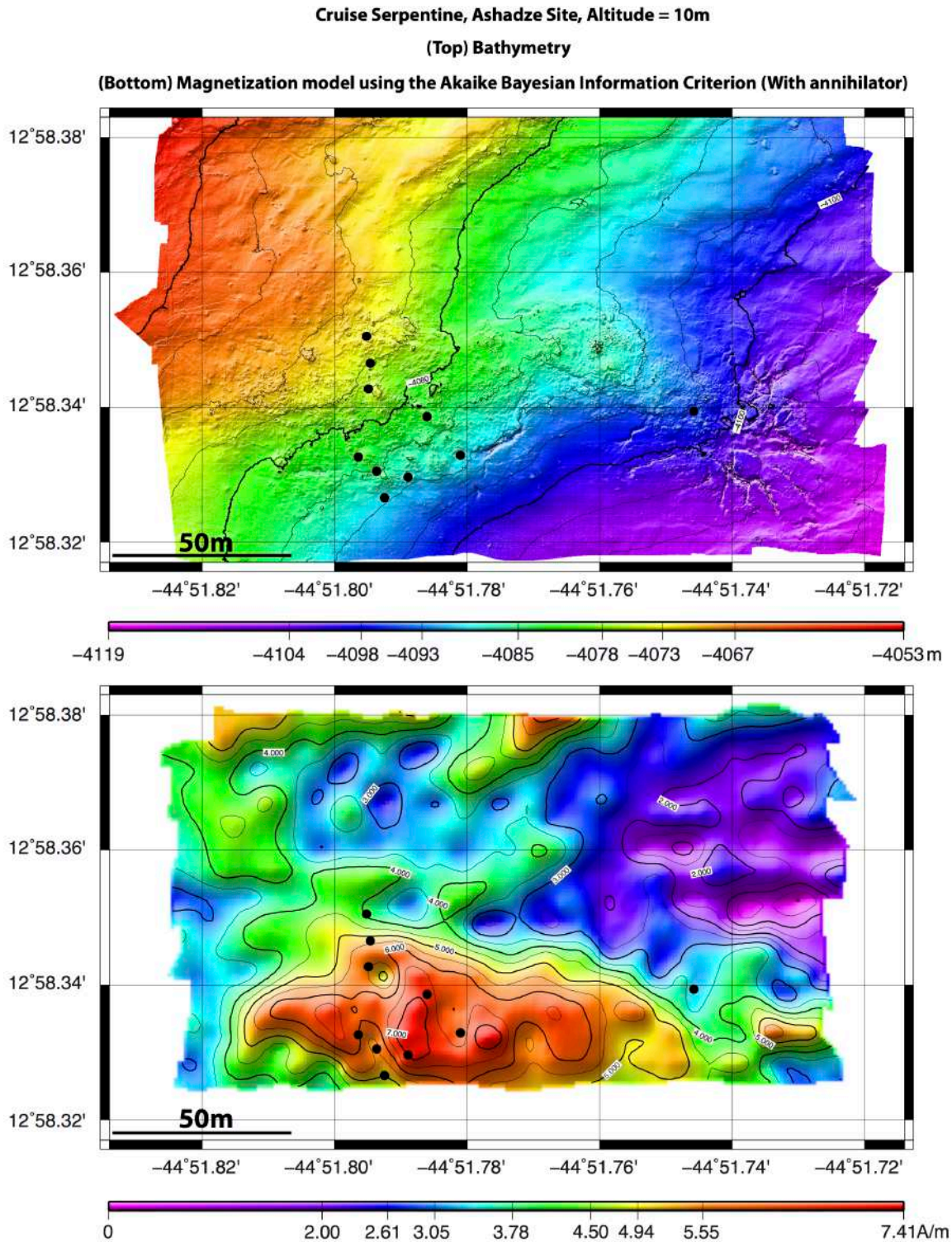


**Fig. 51 :** (a, en haut) Signature magnétique de la bathymétrie avec une aimantation uniforme de 1A/m obtenue par modélisation directe.

(b, au milieu) Annihilateur obtenu en inversant les données de la modélisation directe par la méthode de Honsho et al., (2012).

(c, en bas) Anomalie magnétique produite par l'annihilateur. La palette de couleurs utilisée est identique à celle de l'anomalie magnétique réduite au pôle. Son amplitude (de l'ordre de 30nT), ne dépasse pas le niveau du bruit.

L'anomalie produite par cet annihilateur ne dépasse pas le niveau de bruit (de l'ordre de 30nT) et est donc parfaitement acceptable. Cet annihilateur peut donc être ajouté aux données pour obtenir une aimantation de polarité normale (Il a été ajouté 3.7 fois). Le résultat final de l'inversion bayésienne est présenté en figure 52.



**Fig. 52** : Résultat de l'inversion bayésienne après ajout de l'annihilateur, ce qui a permis de contraindre les aimantations en fixant une valeur minimale à 0A/m. Les cheminées hydrothermales actives sont symbolisées par des points noirs.

Le résultat final de l'inversion bayésienne confirme donc que le site hydrothermal Ashadze se trouve au centre d'une zone de plus forte aimantation que le milieu environnant.

## **d) Modélisation directe**

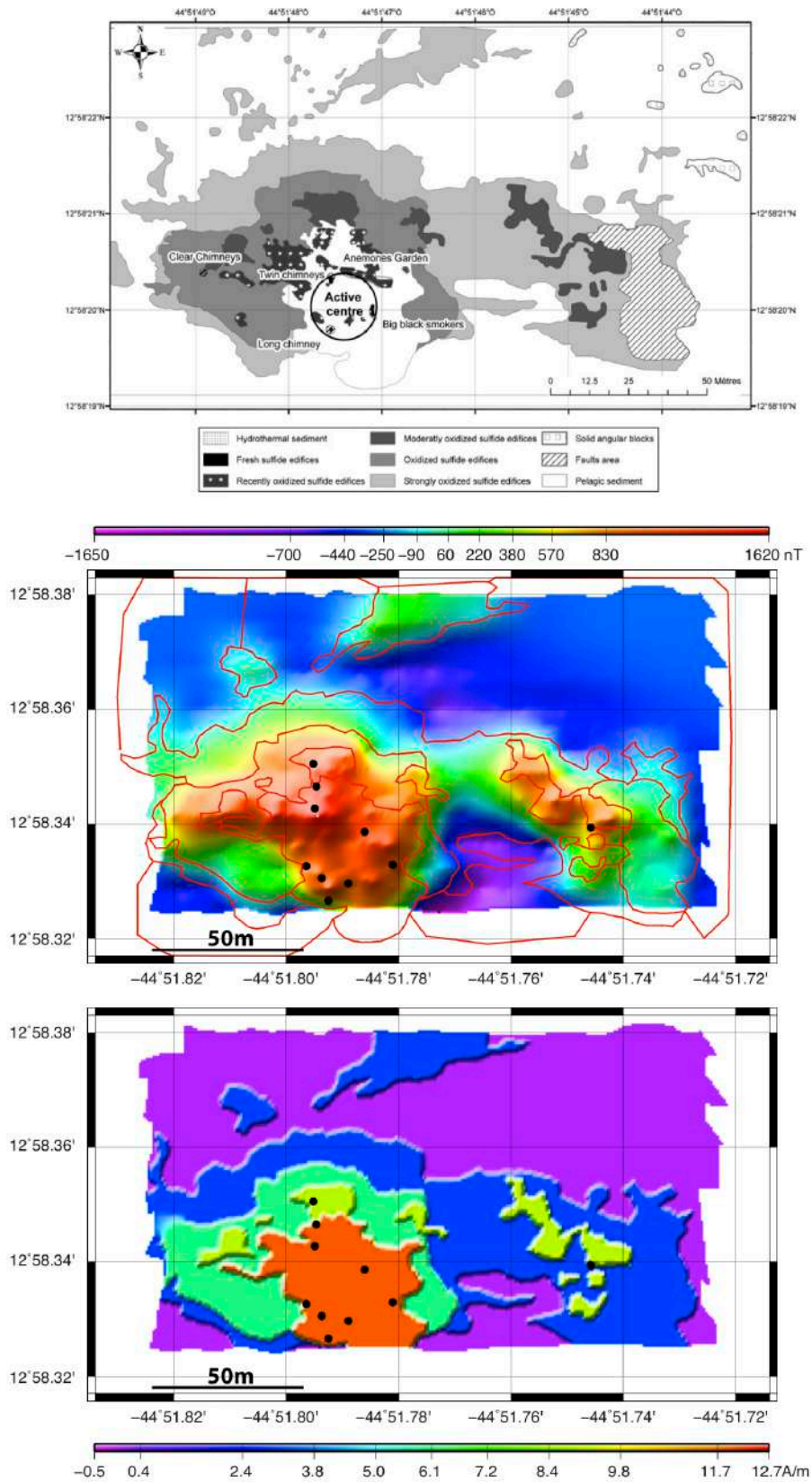
La carte géologique d'Ashadze proposée par Fabri (2010) permet de calculer un modèle direct dont les résultats sont reportés en figure 53. La délimitation des zones dotées de différentes aimantations suit les contours de la carte géologique. Des mesures effectuées par Hélène Horen sur Rainbow ont montré que les péridotites portent une aimantation rémanente de 12A/m. Cette valeur a été retenue par analogie pour la zone située au niveau du site actif. Il ne faut pas la confondre avec les valeurs de 35A/m obtenues par Kaori Nakase et correspondant à la somme des aimantations induite et rémanente des échantillons. Cependant, en considérant l'amplitude des anomalies observées sur Ashadze, cette valeur ne pouvait pas être considérée.

Une estimation de l'épaisseur de la couche aimantée a ensuite été effectuée de manière à obtenir une anomalie d'amplitude similaire à celle observée expérimentalement. Les aimantations des autres zones ont été estimées par décroissance progressive jusqu'à 0A/m dans le cas des sédiments des zones non hydrothermales. Les inclinaison et déclinaison des aimantations des prismes sont prises égales à 90° et 0° respectivement et leur section est de 0.5\*0.5m. Un périmètre d'influence de 40\*40m autour de chaque point de mesure a été considéré et l'épaisseur de la couche aimantée a été maintenue à 10m afin de rester cohérent avec les hypothèses de l'inversion bayésienne.

La carte du modèle synthétique final est présentée en figure 53b et celle des aimantations en figure 53c. L'échelle des couleurs est la même que sur la carte d'anomalies réduites au pôle. La principale anomalie positive apparaît au niveau du site actif mais une autre, plus faible, se trouve dans la partie Est de la carte, à l'endroit où une cheminée active a été repérée (point noir isolé). Cette zone d'aimantation plus forte est également observée sur la carte d'anomalies magnétiques réduites au pôle, confirmant une bonne corrélation entre observation et modèle. Par ailleurs, la faiblesse de l'épaisseur de la couche aimantée confirme que le site Ashadze est de petite taille et que les dépôts hydrothermaux engendrés y sont limités.



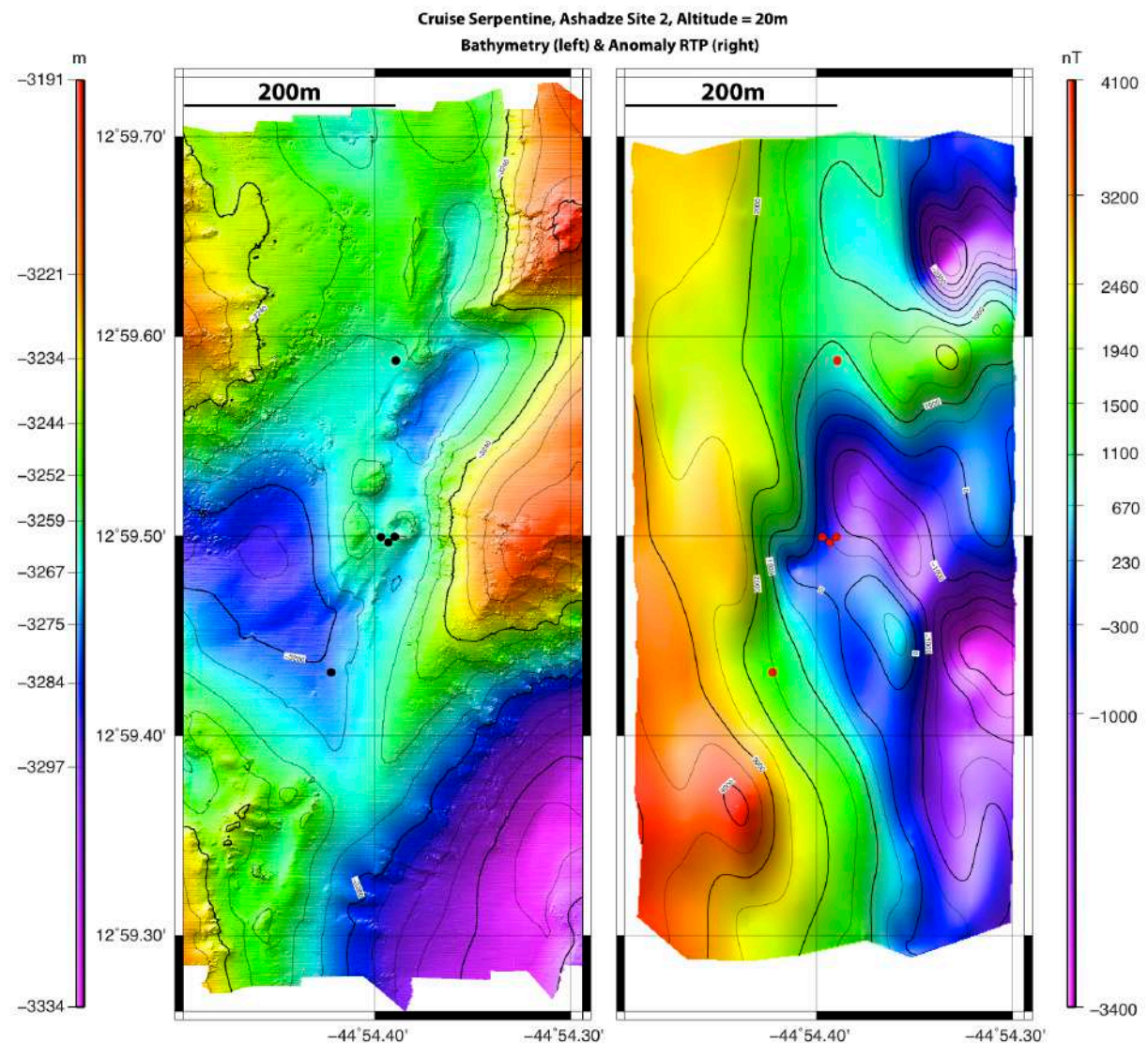
Cruise Serpentine, Ashadze Site, Altitude = 10m  
 Forward model, Thickness of the magnetic layer: 10m



**Fig. 53 :** (a, en haut), carte géologique du site Ashadze (Fabri et al., 2010), (b, milieu), modèle synthétique d'anomalies magnétiques et (c, en bas), distribution d'aimantation utilisée dans ce modèle.

## e) Ashadze 2

Comme mentionné précédemment, le site Ashadze 2 se situe à environ 5km au Nord-Ouest de la principale zone d'étude. La figure 54 présente les résultats obtenus dans le cadre de l'exploration magnétique du site.



**Fig. 54 :** Bathymétrie (à gauche) et anomalie magnétique réduite au pôle (à droite) du site Ashadze 2. Les zones d'activité hydrothermale sont représentées par des points noirs et rouges respectivement.

Les sites hydrothermaux de haute température associés à des sulfures (principalement de cuivre) sont observés à l'intérieur de la structure en forme de cratère au centre de la zone de travail. Des minéralisations de basse température (nontronite, oxydes de fer, aragonite et atacamite) ont également été trouvées au niveau

des monts hydrothermaux et au sommet de la ride hydrothermale située au Nord du champ principal (Fouquet et al., 2010).

La zone située au Sud-Ouest de la carte est marquée par une forte anomalie magnétique positive. Il est possible qu'il s'agisse d'une colline de basaltes fortement aimantés. Le cratère étant le siège d'éruptions phréatiques, les dépôts générés adoptent des orientations quelconques, ce qui les rend magnétiquement incohérents. Cette hypothèse et la petite taille de la zone minéralisée permettent de justifier l'absence de signature magnétique spécifique de ce site hydrothermal.

# V) Site Logachev

## 1) Observations

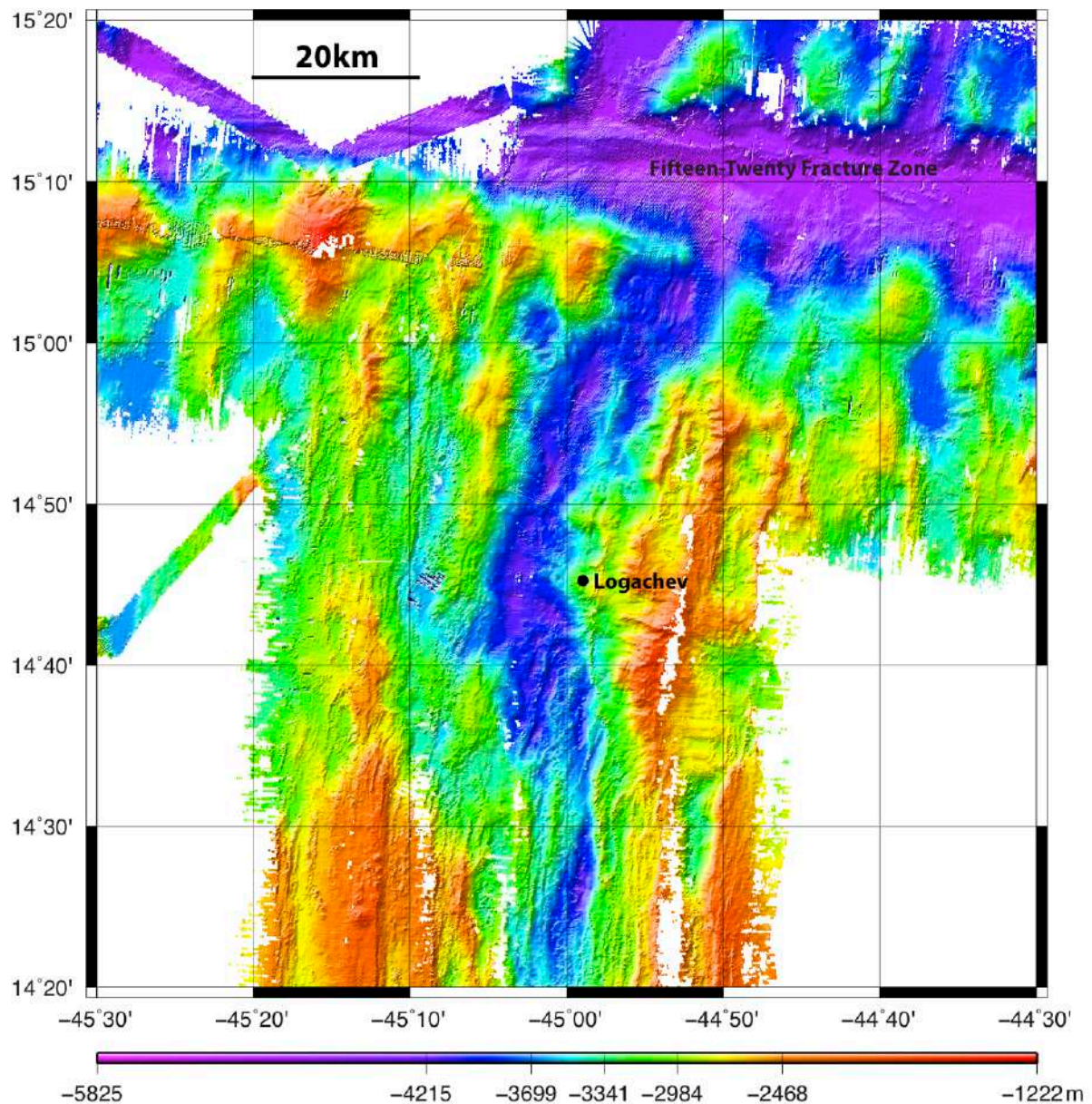
Le site Logachev a été découvert en 1993 au cours d'une mission Russe (Batuev et al., 1994). L'activité hydrothermale y est associée à des cratères connus sous le nom de « smoking craters » (Krasnov et al. ; 1995 ; Gebruk et al., 2000), que l'on retrouve également au niveau des sites Ashadze (Fouquet et al., 2008 ; Fouquet et al, 2010) et Nibelungen (Melchert et al., 2008).

Le segment de dorsale situé à 15°N est caractérisé par des bassins profonds (entre 3500 et 4300m de profondeur) répartis le long de l'axe (Fujiwara et al., 2003) (Figure 55). Dans cette région, l'accrétion tectonique est dominante par rapport au magmatisme, ce qui se traduit par la mise à l'affleurement des roches de la croûte profonde et du manteau (principalement des gabbros et des péridotites) sur le plancher océanique (Cannat et al., 1997). Ce soulèvement se produit principalement le long de larges failles de détachement (Escartin and Cannat, 1999 ; Fujiwara et al., 2003 ; Smith et al., 2008).

Le site hydrothermal Logachev se situe au Sud de la zone de fracture Quinze-Vingt (Batuev et al., 1994) (Figure 23). Les roches ultramafiques y sont principalement composées de harzburgites serpentinitées. Les gabbros sont également présents en quantités importantes et forment des corps intrusifs irréguliers et des filons dans les roches ultramafiques (Cannat and Casey, 1995).

Entre 14°40'N et 15°40'N, le plancher océanique présente entre 20% et 40% de roches gabbroïques (Kelemen et al., 2004). La composition chimique des fluides hydrothermaux montre des teneurs élevées en H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> (Cherkashev et al., 2000 ; Douville et al., 2002 ; Charlou et al., 2002 ; Lein et al., 2003 ; Schmidt et al., 2007 ; Fouquet et al., 2008).

Cruise Serpentine, Logachev Area  
Bathymetry



**Fig. 55 :** Bathymétrie régionale de la région de Logachev. Le site hydrothermal est situé sur le mur Est de la vallée axiale, au Sud de la zone de fracture Quinze-Vingt (Batuev et al., 2004).

Profond de 3900 à 4200m de profondeur, le fond de la vallée axiale est peu sédimenté. Quelques structures volcaniques isolées forment de petits monts avec des affleurements résultant de l'action des failles. Les affleurements basaltiques dominent au-delà de 3900m de profondeur.

La zone moins profonde située à 44°54'W sur le flanc Est de la vallée axiale est caractérisée par des escarpements raides culminant au niveau d'un plateau océanique à

2900m de profondeur. Certains de ces escarpements présentent des affleurements de roches ultramafiques ou mafiques intrusives alternant avec des coulées basaltiques (Petersen et al., 2009).

Les roches composant le substrat au niveau du site actif sont constituées à 80% de péridotites serpentinisées et à 20% de roches mafiques. Les roches ultramafiques sont composées d'éléments de taille moyenne à grande constitués de péridotites serpentinisées (harzburgite et dunité). Les minéraux des serpentines sont fréquemment associés à de la magnétite en raison du processus de serpentinitisation (Petersen et al., 2009).

Le site hydrothermal Logachev est situé entre 3060 et 2910m de profondeur, au pied d'une falaise haute de 350m. La zone est couverte de sédiments pélagiques avec quelques ondulations, traduisant la présence de forts courants océaniques de fond. On y trouve de larges blocs de roches ultramafiques ou mafiques mais il n'est pas établi avec certitude s'ils appartiennent aux affleurements ou s'il s'agit de débris (Petersen et al., 2009).

Les sites actifs de haute température s'étendent sur une zone de 400m de longueur orientée NO-SE et 200m de largeur. Sept sites sont dispersés le long d'une pente inclinée vers l'Ouest. Des températures de 360°C ont été mesurées au niveau des fumeurs noirs (Fouquet et al., 2008 ; Fouquet et al., 2010), et ceux-ci présentent des morphologies variées (cheminées classiques ou « smoking craters »).

Les « smoking craters » consistent principalement en des sulfures oxydés (chalcopyrite ou isocubanite). Les roches restantes sont composées de serpentinites altérées avec des veines d'hématite.

Le site « Barad-Dûr » est constitué d'un mont d'environ 5m de hauteur qui, jusqu'en 2007, était coiffé d'un fumeur noir de 4m de hauteur avec de multiples événements près de son sommet. La base de la cheminée et la surface du mont hydrothermal sont recouvertes d'un talus riche en chalcopyrite provenant de la cheminée elle-même. La nature du substrat sous-jacent n'est pas connue. Le fumeur « Barad-Dûr » s'est effondré entre Janvier et Décembre 2007. La température de sortie des fluides y était de 330°C en 2007 (Borowski et al., 2007).

La présence de sulfures massifs est cantonnée à proximité des zones hydrothermales. Lorsque la distance au site augmente, les roches ultramafiques et les gabbro-norites redeviennent dominantes (Petersen et al., 2009).

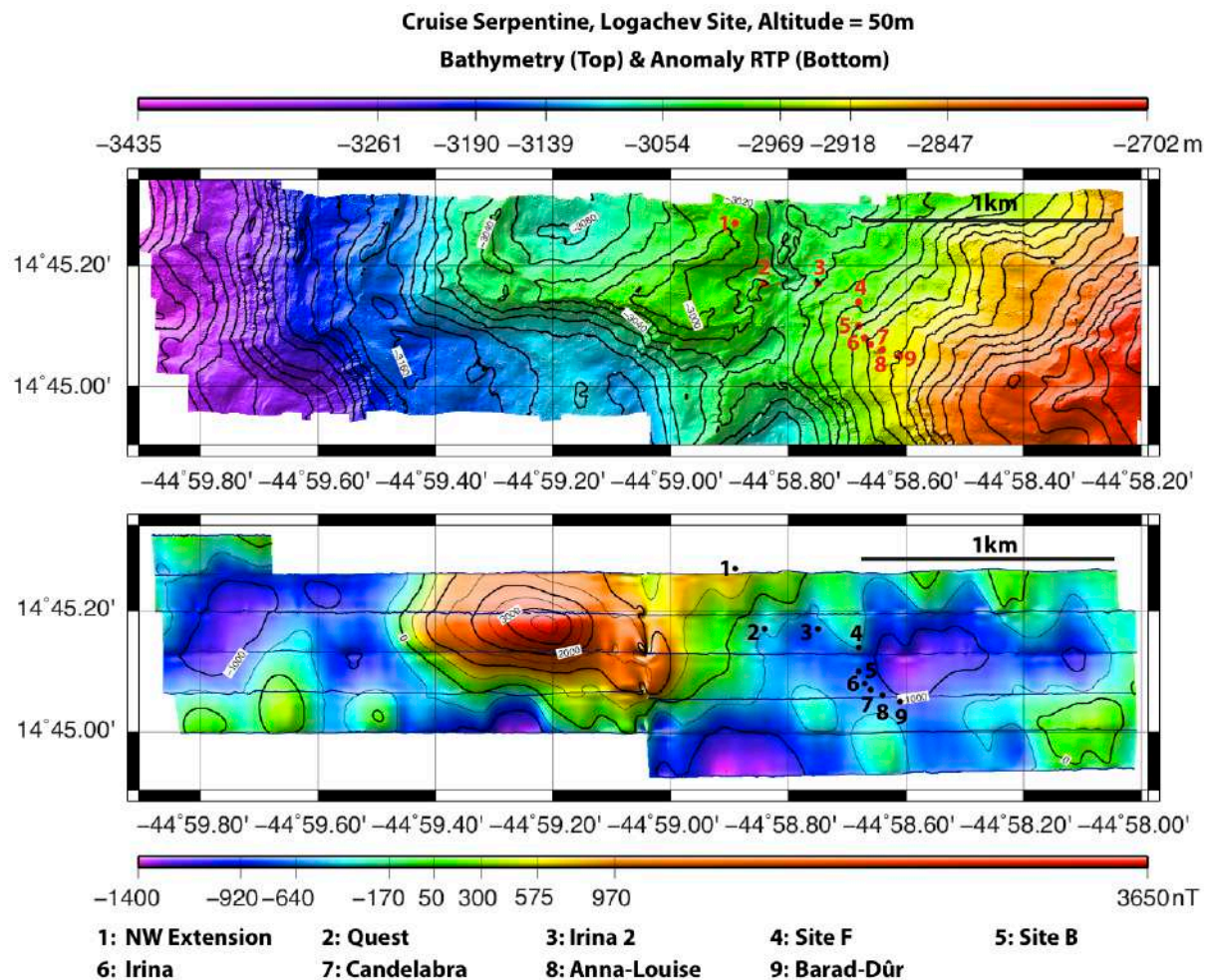
## 2) Résultats

La plongée du ROV Victor sur le site Logachev durant la campagne Serpentine a été divisée en deux parties. La première a consisté en un « survol » de la zone à 50m pour repérer les sites actifs, puis une autre série de mesures a été effectuée à 20m afin d'accroître la résolution sur les données.

Malheureusement, les données magnétiques acquises à 20m présentent des « trous », dans lesquels aucune mesure n'a été réalisée en raison de problèmes sur l'instrument. Les résultats sont donc fragmentaires et peu conclusifs.

### **a) Levé à 50m**

Les levés à 50m et 20m ont été réalisés en suivant des profils orientés Est-Ouest et Ouest-Est reliés par des petits profils de jonction. Des données bathymétriques de haute résolution ont été acquises conjointement aux données magnétiques. Les résultats du levé à 50m sont présentés en figure 56. L'anomalie magnétique a été réduite au pôle et les différents sites actifs ont également été reportés.



**Fig. 56 :** Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle à 50m d'altitude (en bas) sur le site Logachev. Les sites actifs y ont été reportés. Une très forte anomalie corrélée au relief domine. Il est difficile de tirer une conclusion fiable de ces données.

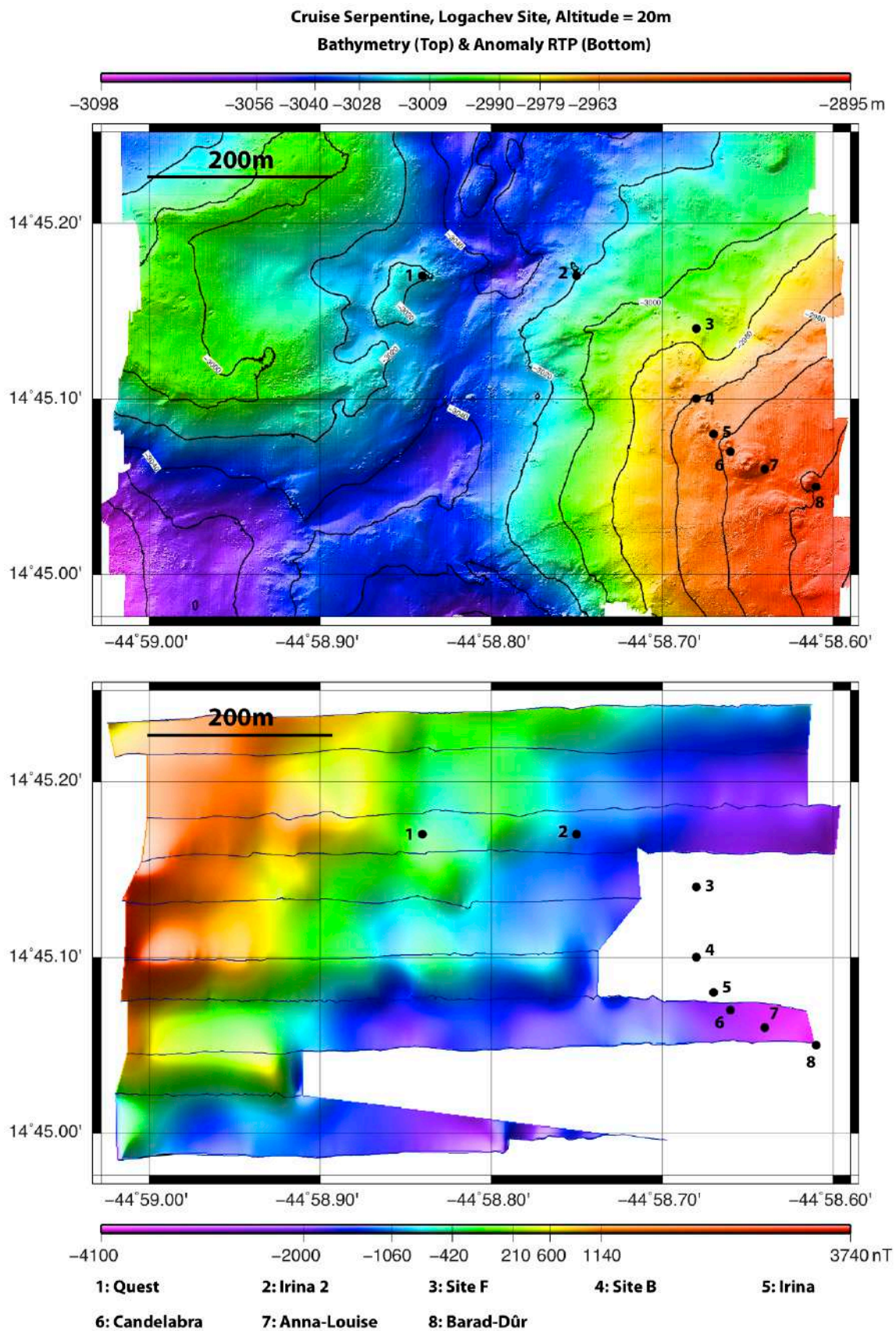
La carte bathymétrique indique la présence d'un relief orienté Est-Ouest et surplombant la dépression créée par la vallée axiale. Ce relief présente une anomalie magnétique très forte qui domine la carte. Des plongées du Nautilé pendant la campagne Microsmoke ont montré qu'il était composé de basaltes jeunes et très aimantés. Les sites hydrothermaux sont situés dans une zone de faible anomalie qui, pour les mêmes raisons qu'à Krasnov (polarité normale de l'aimantation du socle), peut être associée à une aimantation limitée.



## **b) Levé à 20m**

En raison de pannes, le levé à 20m présente des zones sans mesures qui créent des problèmes d'interprétation, car plusieurs sites actifs se situent dans les secteurs non couverts d'un point de vue magnétique. La figure 57 présente la carte bathymétrique de haute résolution ainsi que l'anomalie magnétique réduite au pôle. Les reliefs associés aux sites hydrothermaux apparaissent sur la bathymétrie mais leur signature magnétique demeure peu claire. Seuls les sites Quest et Irina 2 sont couverts par le magnétisme mais ils semblent caractérisés par des signatures variables et faibles, différentes de celles observées sur Rainbow et Ashadze. Les sites Candelabra et Anna-Louise se trouvent également entre deux profils consécutifs du ROV mais le décalage généré par la réduction au pôle implique que les valeurs calculées à cet endroit sont issues de zones non couvertes et qu'elles ne correspondent à rien de réel.

Cette variabilité au niveau de Quest et Irina 2 ne permet donc pas d'étayer les résultats obtenus sur Rainbow et Ashadze.



**Fig. 57 :** Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle (en bas) du site Logachev à 20m d'altitude. Certains sites ne sont pas couverts par les mesures magnétiques. La signature magnétique d'Irina 2 et Quest n'est pas claire et ne permet pas de conclure.

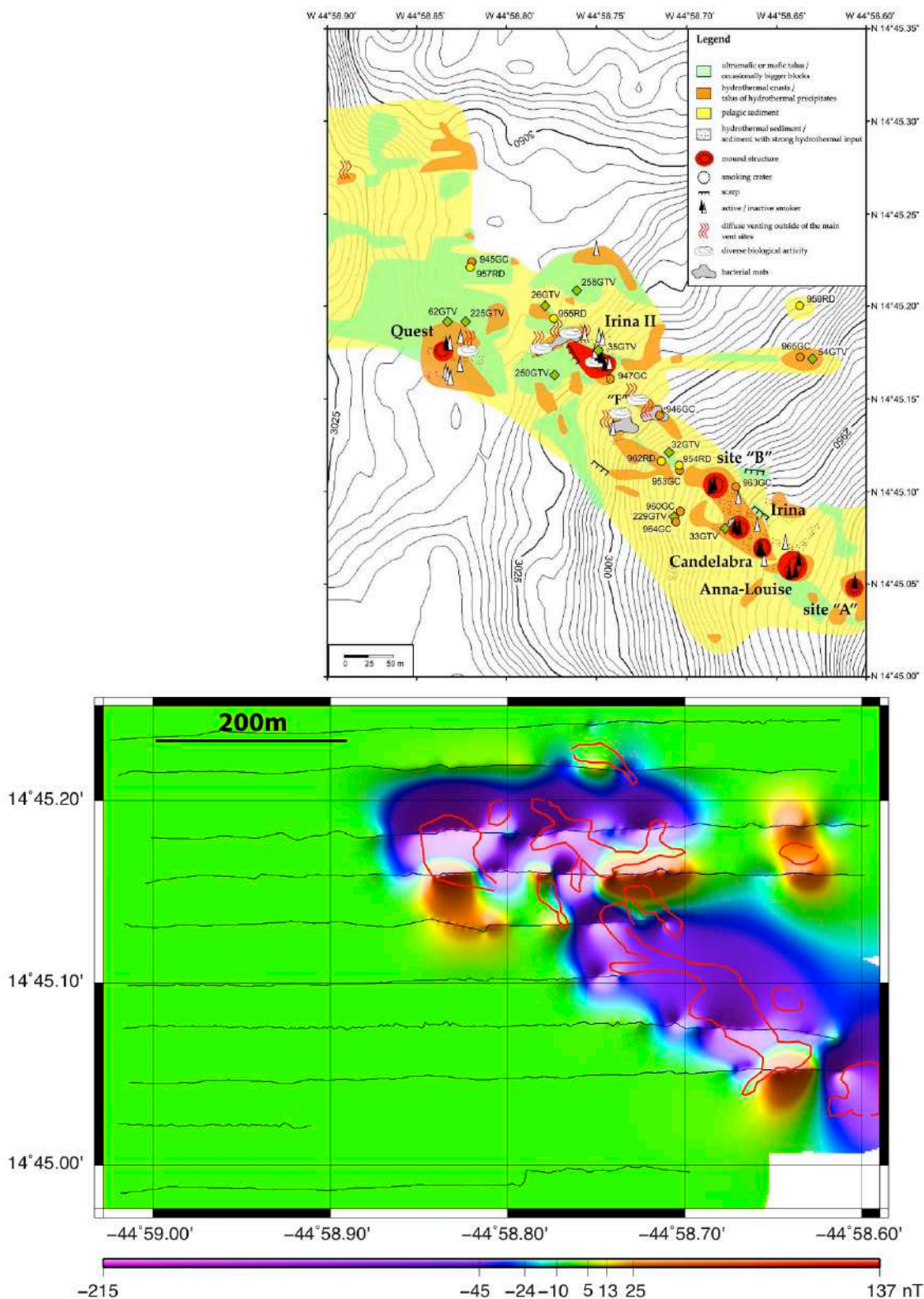
### **c) Modélisation directe**

Sur Logachev, le recours au modèle direct a pour objectif de démontrer notre incapacité à conclure de manière fiable quant à la signature magnétique de ce site. On se replace dans les conditions exactes de l'expérience (altitude de 20m du ROV) et on utilise la carte géologique fournie par Petersen et al. (2009) afin de délimiter les contours des zones hydrothermales actives (Figure 58a).

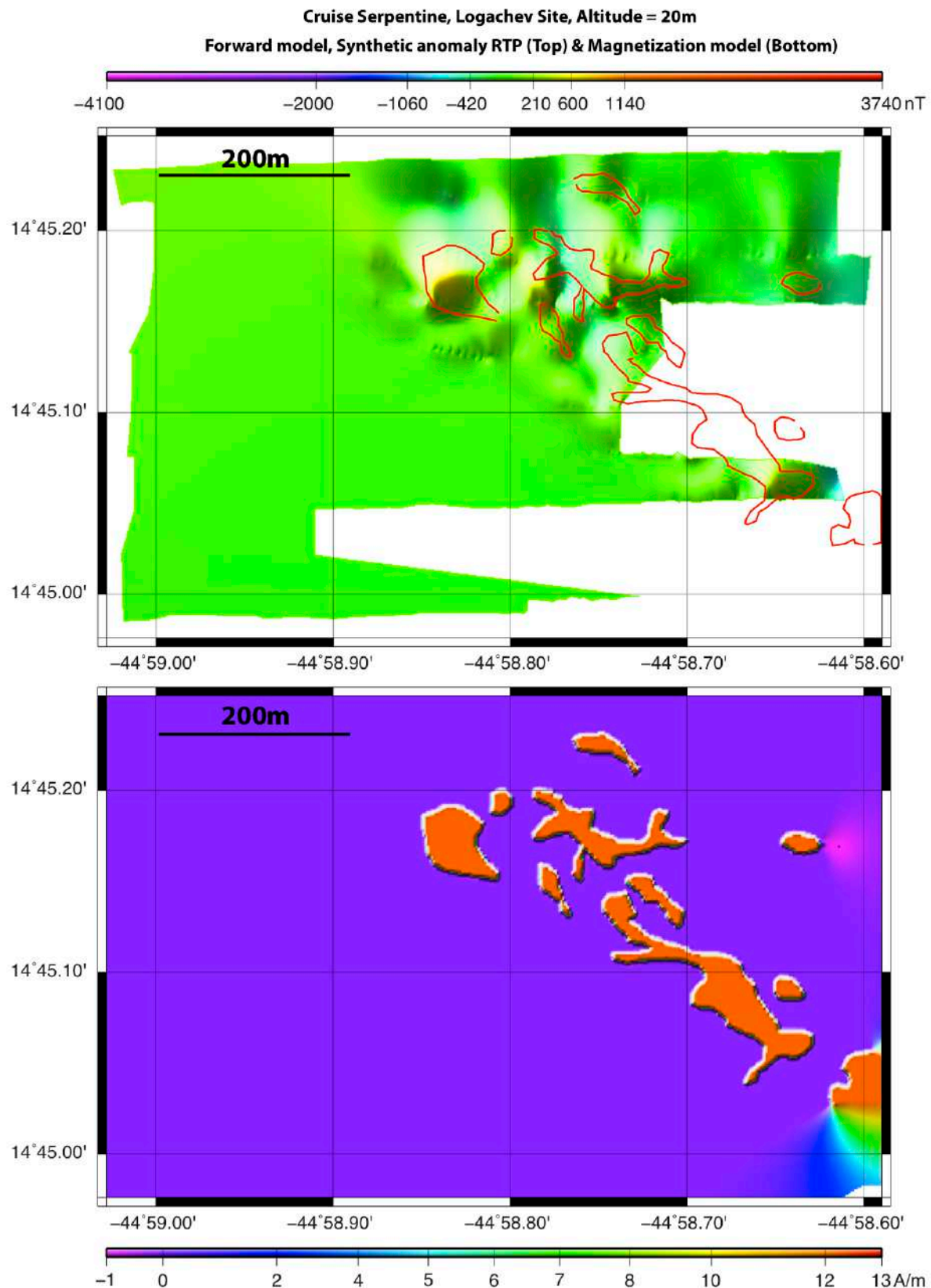
Afin de se rapprocher le plus possible des conditions expérimentales, le modèle a d'abord été calculé le long des routes du ROV en adoptant l'inclinaison et la déclinaison de l'IGRF local (Figure 58b), puis il a été réduit au pôle (Figure 59a). Sur la carte d'anomalies synthétiques réduites au pôle, le masque utilisé sur les données a été conservé afin de quantifier la perte d'information générée par les interruptions dans les valeurs. La palette de couleurs est identique à celle de l'anomalie observée afin de pouvoir établir une comparaison.

En attribuant une aimantation moyenne de 12A/m pour les péridotites du site actif (valeurs estimées par Horen sur le site Rainbow), la carte réduite au pôle montre que les anomalies sont très faibles et non conclusives. Cette observation est néanmoins cohérente avec la taille très faible des sites (de l'ordre de quelques mètres pour Quest) (Petersen et al., 2009). Comme dans le cas d'Ashadze 2, une autre explication possible est que les éruptions phréatiques des « smoking craters » créent des dépôts magnétiquement incohérents. Avec ce modèle, nous apportons la preuve que les résultats sur Logachev ne peuvent en aucun cas être considérés comme décisifs et que la nature même du site (« smoking craters ») l'empêche d'avoir une signature magnétique propre.

**Cruise Serpentine, Logachev Site, Altitude = 20m**  
**Forward model, Geological map (Top) & Synthetic anomaly (Bottom)**



**Fig. 58 :** (a, en haut) carte géologique du situe Logachev (Petersen et al., 2009) et (b, en bas) carte d'anomalies magnétiques synthétiques non réduites au pôle calculées le long des routes du ROV. Aucun masque n'a été appliqué sur cette carte afin de mettre en évidence les lobes des anomalies magnétiques.



**Fig. 59 :** (a, en haut) Carte d'anomalies synthétiques après réduction au pôle et utilisation du même masque que sur les données observées. (b, en bas) Distribution d'aimantation utilisée. Les valeurs diminuant progressivement dans le coin Sud-Est sont un artefact généré par une extrapolation du logiciel GMT et ne correspondent à rien de réel.

# VI) Interprétations

Au terme de cette étude, il apparaît que les 3 sites hydrothermaux sur substrat ultramafique étudiés (Rainbow, Ashadze et Logachev) présentent tous une signature magnétique différente de celle observée sur des sites à substrat basaltique. Une anomalie de forte amplitude est observée à Rainbow, une anomalie plus modérée est observée à Ashadze. Aucune signature n'est observée sur Ashadze 2 et sur Logachev, ce dernier étant pénalisé par la qualité des mesures. Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées afin d'expliquer ces observations.

Les dorsales lentes présentent fréquemment des roches ultramafiques à l'affleurement, résultat d'un magmatisme limité et/ou d'une tectonique plus importante. Ces roches ont spontanément tendance à se serpentiniser au contact de l'eau de mer. Par ailleurs, la circulation des fluides hydrothermaux induit également des réactions de serpentinisation. Différentes réactions de serpentinisation sont observées :

Olivine + Eau + Acide carbonique → Serpentine + Magnétite + Méthane, soit :



Olivine + Eau + Acide carbonique → Serpentine + Magnétite + Magnésite + Silice, soit :



Dans ces deux cas, il s'agit de réactions exothermiques générant de la serpentine ainsi que de la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Même si certaines réactions de serpentinisation ne produisent pas de magnétite, il convient surtout de remarquer que toute magnétite ne porte pas de forte aimantation. En effet, l'efficacité magnétique de ce minéral dépend de la taille des grains aimantés.

Les domaines magnétiques (Weiss, 1906) correspondent aux plus petits domaines microscopiques continus d'un matériau ferromagnétique contenant une aimantation homogène, c'est à dire pour laquelle les spins sont orientés dans une direction donnée, avec des sens parallèles ou antiparallèles. Si les cristaux de magnétite

considérés sont dotés d'une taille suffisamment grande, plusieurs domaines de Weiss y coexistent et leur aimantation globale diminue (grains multi-domaines). Par contre, si ces cristaux sont de petite taille, ils seront principalement mono-domaines avec une aimantation plus forte. L'organisation de ces cristaux dans la matrice serpentinisée joue donc un rôle majeur dans l'aimantation résultante.

Il semble que des expériences effectuées en autoclave par Hélène Horen (communication personnelle) aient montré que la nature et la température de la serpentinsation (eau de mer salée et froide ou fluide hydrothermal minéralisé et chaud) jouent un rôle majeur dans la création de magnétite aimantée, ou pas, et dans le type d'aimantation, induite ou rémanente. Ces éléments suggèrent que les serpentines formées par l'interaction des péridotites affleurantes avec l'eau de mer à basse température seraient par nature moins aimantées que celles formées par l'interaction de ces péridotites avec les fluides hydrothermaux de haute température.

Il est également possible que les péridotites se trouvent dans un milieu traversé par des circulations de fluides chargés en métaux, qui leur confèrent des propriétés réductrices très fortes (partie 1.III.6.b). Dans ce cas, leur magnétite serait protégée de l'oxydation, ce qui permettrait à la roche de conserver son aimantation. Ainsi, l'activité hydrothermale en environnement ultramafique ne créerait pas d'aimantation plus importante mais permettrait au contraire de ralentir l'altération des magnétites, ce qui se traduirait par l'apparition d'une zone moins désaimantée. Enfin, il est également possible, sous certaines conditions, de produire de la magnétite hydrothermale.

D'autres paramètres doivent également être considérés afin d'expliquer les différences observées entre les sites, voire entre les différentes zones d'un même site. Dans le cas de Rainbow, la partie orientale du site, récente, ne correspond qu'à une faible anomalie positive qui reflète probablement une épaisseur de zone hydrothermalisée moindre. Dans les cas d'Ashadze 2 et de Logachev, où les sites hydrothermaux sont des « smoking craters », il semble que la petite taille des zones hydrothermalisées, mais également leur mode de fonctionnement, empêchent la formation d'une anomalie significative : les explosions à l'origine de ces cratères dispersent les roches hydrothermalisées autour de ces cratères en suivant des orientations aléatoires. La somme vectorielle de leurs aimantations est par conséquent nulle ou très faible, expliquant l'absence de signature magnétique spécifique (Fouquet et al, 2010 ; Ondreas et al., 2012).

## VII) Conclusions

Deux questions ont été soulevées au début de cette étude :

→ Tous les sites hydrothermaux présentent-ils la même signature magnétique ?

→ Est-il possible de détecter les sites hydrothermaux par le biais de leur signature magnétique ?

À la première, la réponse est non. La signature magnétique des sites hydrothermaux dépend de la nature du substrat sous-jacent. Dans le cas de sites hydrothermaux sur substrat basaltique, cette étude confirme les travaux antérieurs selon lesquels les sites hydrothermaux se caractérisent par une anomalie négative et un défaut d'aimantation. Elle démontre par ailleurs que cette signature subsiste après l'arrêt de l'activité hydrothermale. Dans le cas de sites de haute température sur substrat ultramafique, la signature magnétique est une anomalie positive générée par une aimantation des roches du site plus forte que celle du milieu environnant, pour les sites de taille suffisante (Rainbow et Ashadze 1). Cette signature devient faible ou inexistante pour les sites plus petits, notamment les « smoking craters » rencontrés à Logachev.

La réponse à la seconde question est oui, sous réserve de quelques précautions. Les sites hydrothermaux peuvent être détectés à condition de connaître le substrat sous-jacent (basaltique ou ultramafique). Il faut également que le véhicule porteur du magnétomètre soit « suffisamment » proche du fond de la mer pour que l'anomalie générée par ces sites soit discernable. Par ailleurs, d'autres sources d'anomalie existantes (coulées basaltiques dans un environnement ultramafique) ont des effets susceptibles de masquer les anomalies recherchées.



# 4<sup>ème</sup> Partie

## Exploration minérale dans l'Océan Pacifique Occidental

# I) Introduction

L'expérience acquise dans l'Atlantique a été utilisée lors des phases d'exploration de la zone de Wallis et Futuna, dans le Sud-Ouest Pacifique. Cette zone appartient à la Zone Économique Exclusive Française du Pacifique Sud et se trouve entre les Îles Samoa et les Fidji. Cette vaste zone était largement inconnue et non cartographiée. Une ride volcanique active signalée en 2000 à l'Ouest de Futuna (Pelletier et al., 2001) constituait une cible favorable à la formation de minéralisations hydrothermales. Sa profondeur moyenne est comprise entre 1500 et 2000m, ce qui rend son exploration relativement aisée avec les outils sous-marins disponibles.

Sous l'impulsion des ministères, un consortium public/privé a été créé pour explorer la ZEE de Futuna et rechercher des indices minéralisés. Ces campagnes ont eu lieu sur le navire océanographique N/O L'Atalante. La première s'est déroulée en Août et Septembre 2010 et comportait 2 legs successifs, respectivement destinés à mener une exploration de surface (cartographie et recherche de panaches hydrothermaux) puis à effectuer les premières plongées à l'aide de l'AUV Aster-X et du Nautil. La seconde campagne s'est déroulée entre Novembre et Décembre 2011 et n'a comporté que des levés de surface ainsi qu'un court leg de sismique. Enfin, la troisième campagne a eu lieu en Mai et Juin 2012 sur les cibles localisées durant les explorations régionales par les anomalies chimiques, physiques et acoustiques dans la colonne d'eau. Cette partie se consacre à la description des opérations de magnétisme menées durant ces campagnes ainsi qu'aux résultats obtenus.

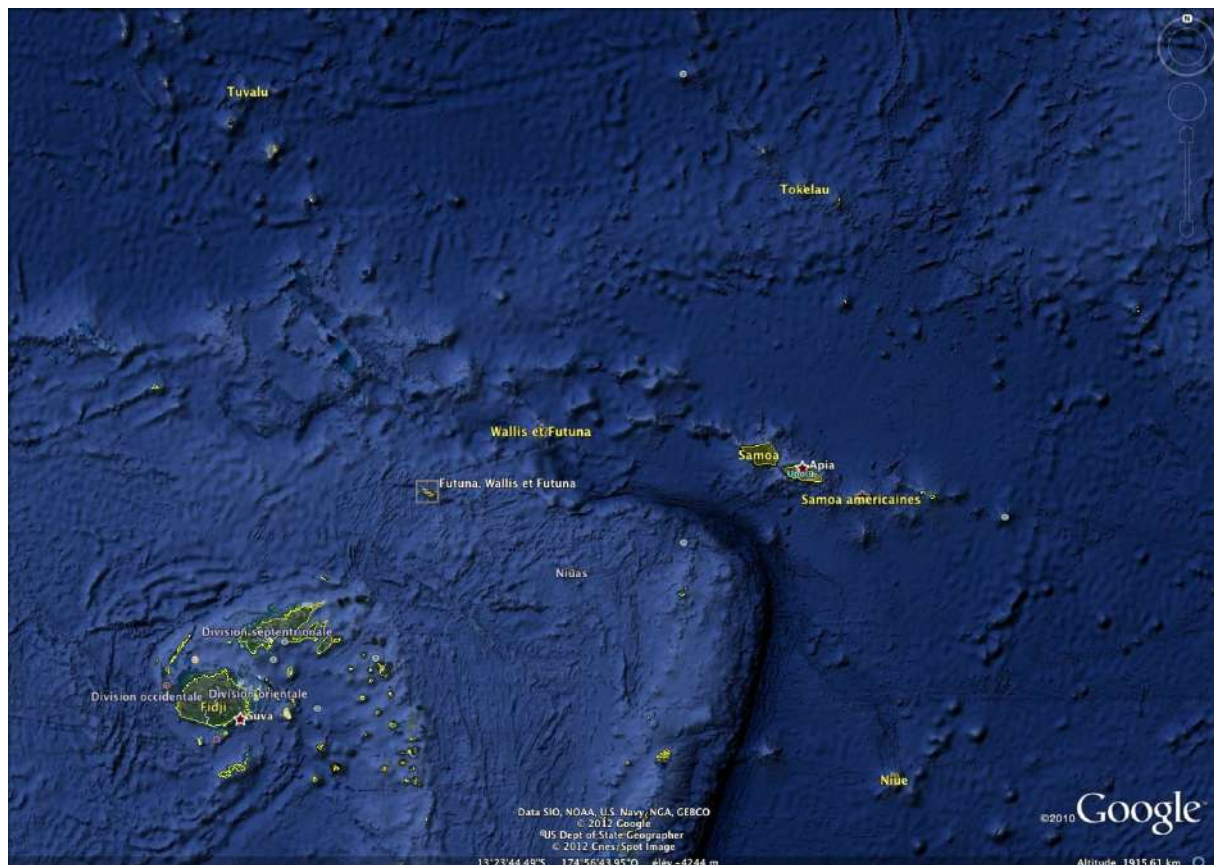
## II) Contexte

Les archipels de Wallis et Futuna sont des territoires d'outre mer Français situés dans l'Océan Pacifique Sud-Ouest (176 à 178° de longitude Ouest et 14° de latitude Sud). Les îles se trouvent au Nord-Est des Fidji, au Nord de la terminaison septentrionale de l'arc insulaire actif des Tonga. Elles sont également encadrées à l'Est par la zone économique exclusive des Samoa, au Nord-Est par celle de Tokelau et au Nord-Ouest par celle de Tuvalu.

Ces deux archipels sont distants d'environ 250km mais seule Wallis se trouve sur la plaque Pacifique. L'appellation « archipel de Wallis et Futuna » est donc impropre car les deux îles ont des histoires géologiques très différentes. Elles sont en effet situées de part et d'autre d'une zone de subduction fossile et sont séparées par une succession de fossés dont la profondeur excède 4500m soulignant, dans le prolongement direct de la fosse des Tonga, la terminaison orientale du linéament fossile de Vitiaz (Brocher, 1985) (Figure 60).

Ce linéament fossile est un élément fondamental de l'évolution géologique du Pacifique Sud-Ouest puisqu'il sépare la croûte Pacifique, d'âge Crétacé, au Nord, des bassins Nord-Fidjien et de Lau, d'âge cénozoïque récent au Sud. Dans la plupart des reconstitutions, ce linéament est considéré comme une zone de convergence entre les plaques Pacifique et Australienne avant le Miocène supérieur et le développement du bassin Nord-Fidjien (Fouquet, Rapport de campagne Futuna 2). L'île de Wallis fait quant à elle partie d'une chaîne de monts sous-marins, de bancs et d'îles appelée « Northern Melanesian Borderland » et bordant le linéament de Vitiaz au Nord. Elle se situe le long de la chaîne des Samoa, d'âge Miocène moyen, et issue d'un point chaud situé actuellement à l'Est des îles Samoa (Fouquet, Rapport de campagne Futuna 2).

L'archipel de Futuna (comprenant les îles Futuna et Alofi) est situé au Sud de la subduction fossile de Vitiaz, dans la zone de jonction entre les bassins de Lau et Nord-Fidjien. Il se trouve à proximité de la zone de faille transformante Nord-Fidjienne, caractérisant l'un des segments de la frontière entre les plaques Pacifique et Australienne (Fouquet et Pelletier, Rapport de campagne Futuna 2).



**Fig. 60 :** Cartographie régionale de la zone de Wallis et Futuna. Les îles Fidji apparaissent au Sud-Ouest et les Samoa à l'Est. Les petits archipels de Tokelau et des Tuvalu se situent respectivement au Nord-Est et Nord-Ouest. L'extrémité Nord de la fosse des Tonga et son coude vers l'Ouest apparaissent également, délimitant la zone de subduction de la plaque Pacifique.

## 1) Géologie

Les travaux menés à Wallis (Price et al., 1991), indiquent que les îles de Wallis et Futuna sont constituées de coulées basaltiques et de dépôts pyroclastiques récents, (moins de 0.5 million d'années). Les roches éruptives les plus récentes sont de nature tholéitique alors que les plus anciennes sont de nature alcaline.

Les travaux menés sur les îles de Futuna et Alofi entre 1987 et 1991 (Grzesczyk et al., 1987 ; Grzesczyk et al., 1991a ; Grzesczyk et al., 1991b ; Grzesczyk et al., 1988), ont permis d'identifier trois formations volcaniques sous-marines superposées, d'âge

Pliocène supérieur et constituées pour l'essentiel de pillow-lavas, de brèches de pillows, de hyaloclastites et de quelques coulées massives prismées.

Le long de la côte Sud de Futuna, et sur la quasi-totalité de l'île d'Alofi, ces séries volcaniques sont recouvertes par des terrasses récifales étagées culminant à une altitude de 300m (dans le cas d'Alofi). La modification du volcanisme vers la fin du Pliocène est interprétée comme le marqueur du passage d'un régime convergent (subduction du Vitiaz-Tonga) à un régime transformant (zone de fracture Nord-Fidjienne) (Fouquet, Rapport de campagne Futuna 2).

## **2) Cartographie régionale**

En Mars 2000, la campagne ALAUF1 (Pelletier et al., 2001) a découvert la dorsale de Futuna. Cette dorsale est dotée d'une orientation moyenne NNE-SSO et s'étend sur plus de 200km depuis le Nord des îles Fidji jusqu'au Nord-Ouest de Futuna. Son segment le plus au Nord présente une ride axiale marquée et culmine à seulement 400m de profondeur, 1300m au dessus du plancher océanique.

La campagne ALAUF1 a aussi permis d'identifier, à l'Ouest et au Nord-Ouest de Futuna, des zones de failles orientées Est-Ouest et se raccordant perpendiculairement à la dorsale. La principale, marquée par de profonds sillons, passe par Futuna et Alofi. Baptisée « faille transformante de Futuna », elle est responsable de la structuration, du soulèvement et des tremblements de terre affectant régulièrement l'archipel (Fouquet, Rapport de campagne Futuna 2).

À l'Est et au Sud-Est de Futuna, une zone de 30km de largeur orientée OSO-ENE entre 176°30'W et 177°25'W et centrée à 14°45'S se caractérise par une bathymétrie légèrement positive et de nombreux volcans. Elle se définit par des linéations orientées 80°-90° dans la partie Nord et 50° dans la partie Sud-Ouest. La bathymétrie et l'imagerie montrent que cette zone, appelée South-East Futuna Volcanic Zone (SEFVZ), est volcaniquement active (Pelletier et al., 2001). La SEFVZ est interprétée comme une zone d'extension active. Toutefois, le manque de linéaments topographiques clairs suggère un magmatisme diffus plutôt que focalisé sur une ride d'accrétion (Pelletier et al., 2001).

# III) Campagne Futuna 1

## 1) Introduction

La campagne Futuna 1 s'est déroulée en 2 legs à bord du navire océanographique N/O L'Atalante de début Août à fin Septembre 2010. Le premier a réalisé l'exploration régionale de la zone avec des levés bathymétriques et géophysiques de surface, des mesures de colonne d'eau par bathysonde rosette et des dragues de roches, afin de détecter d'éventuels panaches hydrothermaux. Il a permis d'identifier plusieurs cibles pour les études de détail. Les contraintes industrielles qui régissent ce projet ne nous permettent cependant pas de les décrire ni de les localiser. Les cartes seront par conséquent présentées sans coordonnées géographiques.

Le second leg était destiné à étudier ces cibles grâce aux engins sous-marins embarqués (AUV Aster-X et Nautille). Ces cibles seront désignées par les noms « Caldeira A », (6 plongées AUV, 6 plongées Nautille), « Caldeira B » (1 plongée AUV, 1 plongée Nautille) et « Ride volcanique » (2 plongées AUV, 2 plongées Nautille). Trois cibles isolées supplémentaires ont par ailleurs fait l'objet d'une plongée Nautille chacune. L'AUV, qui plongeait la nuit, a pu effectuer des levés bathymétriques de haute résolution et de magnétisme vectoriel sur les cibles identifiées. Les plongées Nautille étaient dédiées à la reconnaissance : exploration visuelle (photos et vidéos), collecte d'échantillons de roches, de fluides et parfois de biologie et bien sûr de magnétisme vectoriel. Au cours de cette partie, nous présenterons les données obtenues par l'AUV et le Nautille, en soulignant la complémentarité de ces deux outils d'exploration.

## **2) Ride volcanique**

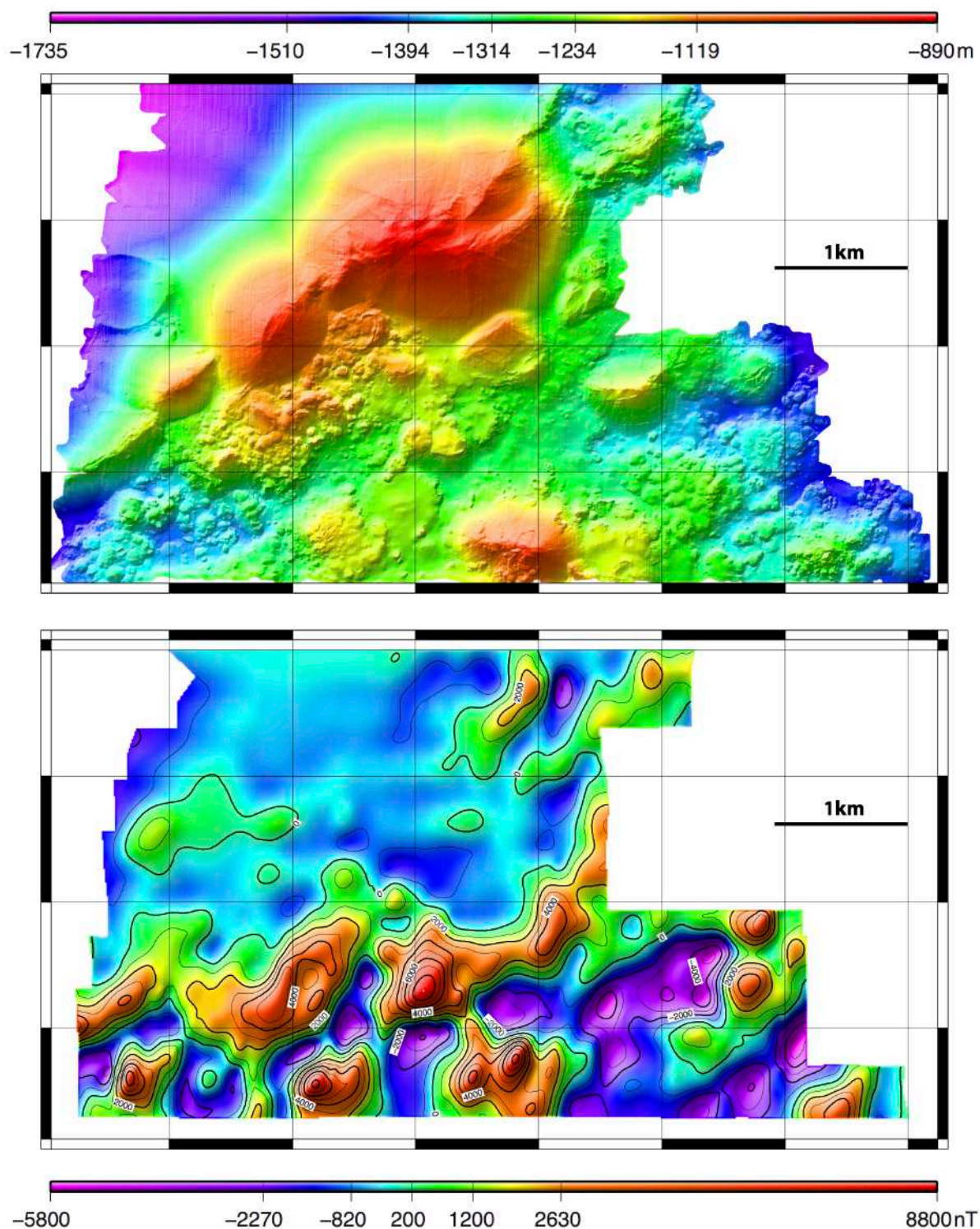
### **a) Données de l'AUV**

L'une des trois principales cibles de la campagne Futuna 1 est une ride volcanique orientée selon une direction N60°. Sa longueur est d'environ 5km et sa largeur de 2km. Les données acquises par l'AUV ont permis d'obtenir une carte bathymétrique de très haute résolution, complétée par la carte d'anomalies magnétiques réduites au pôle. Les résultats sont présentés en figure 61.

La carte bathymétrique présente trois parties distinctes. La première correspond à la ride volcanique située en son centre et qui culmine à seulement 890m sous la surface de l'océan. La seconde correspond à la zone morphologiquement lisse située au Nord-Ouest. Enfin, la troisième partie couvre la moitié Sud-Est de la carte et présente un relief plus chaotique, marqué par la présence de nombreux édifices volcaniques.

Le contraste entre la topographie rugueuse du Sud-Est et la zone lisse au Nord-Ouest s'accompagne d'un contraste similaire des anomalies magnétiques, très faible à quasi-nul sur la ride volcanique centrale et dans la zone Nord-Ouest et beaucoup plus marqué dans la zone Sud-Est. L'association d'édifices volcaniques de différentes tailles et d'anomalies magnétiques au Sud-Est est typique d'un fond océanique jeune, constitué de laves fortement aimantées. La position de la dorsale laisse supposer une mise en place postérieure à la dernière inversion du champ magnétique et donc une aimantation de polarité normale. Des variations de distance entre les sources aimantées et le véhicule mais également des différences d'intensité magnétique expliquent les anomalies. La superposition de la bathymétrie et de l'anomalie magnétique réduite au pôle permet de constater que les anomalies semblent suivre les reliefs (Figure 62).

**Cruise Futuna 1, Volcanic Ridge, Altitude = 70m  
Bathymetry (Top) & Anomaly RTP (Bottom)**



**Fig. 61** : Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle (en bas) de la ride volcanique.

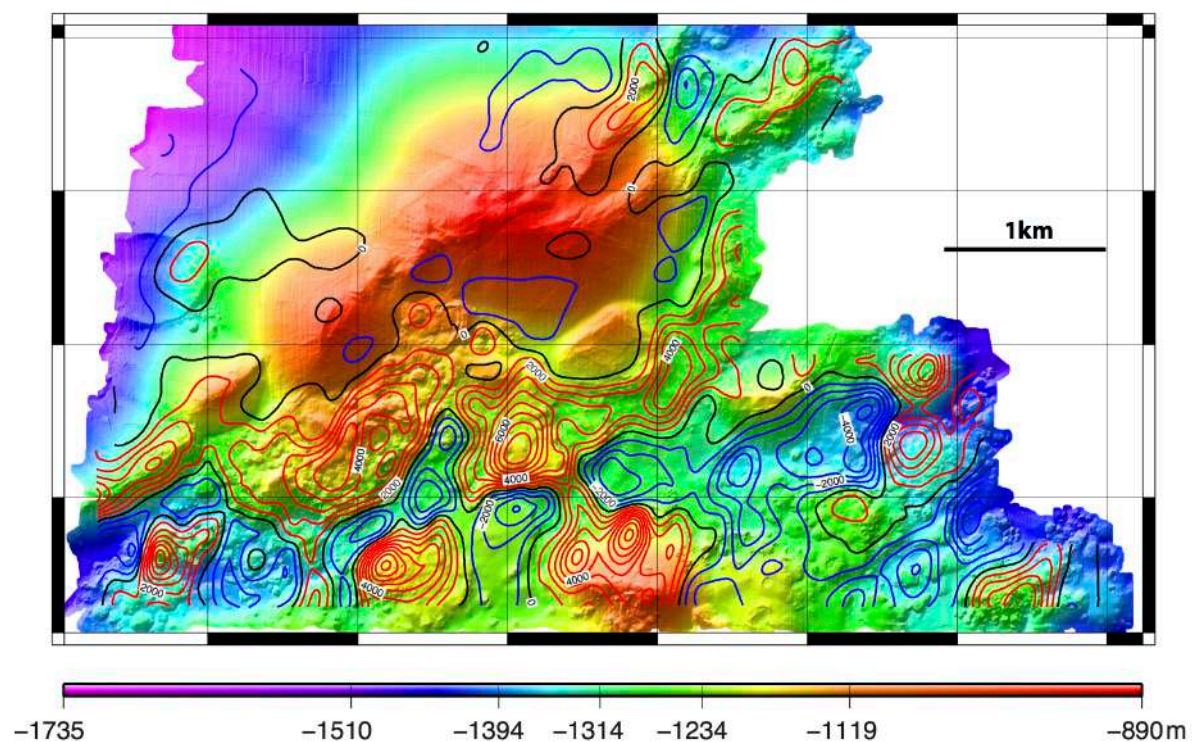


Dans la partie Sud de la carte, les anomalies suivent généralement les courbes de niveau bathymétriques. La zone est marquée par une alternance d'anomalies positives et négatives de forte amplitude orientées suivant une direction principale N80°, légèrement oblique par rapport à celle des structures géologiques.

La topographie très lisse et l'anomalie magnétique faible de la ride volcanique et de son flanc Nord-Ouest confirme la présence de dépôts de formations volcanoclastiques litées observées lors des plongées et dans les échantillons de dragues. Dans ce type de formation, les particules s'orientent selon des directions quelconques. La somme vectorielle des aimantations sera globalement nulle, entraînant une faible anomalie magnétique. Un tel dépôt de sédiments pyroclastiques peut recouvrir une topographie volcanique plus marquée, constituée de coulées, et éloignerait les laves aimantées du magnétomètre.

La présence de ces sédiments pyroclastiques sur la ride volcanique s'explique par la faible profondeur (890m sous le niveau de la mer). À cette profondeur, la pression hydrostatique est limitée et permet l'occurrence d'explosions pyroclastiques et hydrovolcaniques sous-marines lors des éruptions. Ces éruptions auraient ainsi projeté un nuage de débris volcaniques qui, sous l'action de courants orientés du Sud-Est vers le Nord-Ouest, se serait ensuite déposé sur la ride et sur son flanc Nord-Ouest. La nature pyroclastique de ces dépôts a été confirmée par l'observation et des prélèvements lors de la campagne Futuna 2 (Novembre 2011). La combinaison des données magnétiques vectorielles et bathymétriques de haute résolution a ainsi permis de comprendre le fonctionnement de cette ride volcanique.

**Cruise Futuna 1, Volcanic Ridge, Altitude = 70m  
Bathymetry & Anomaly RTP**

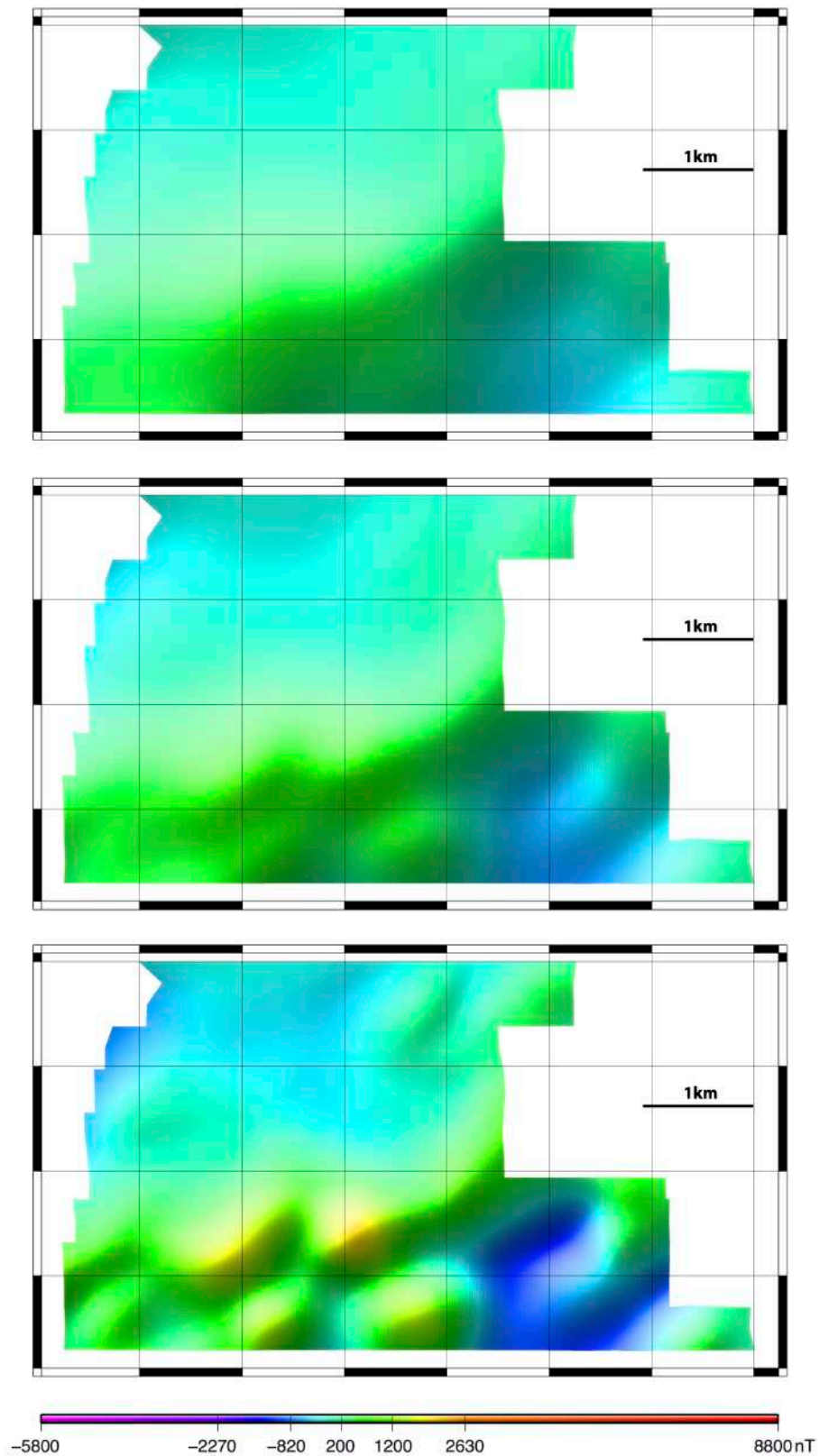


**Fig. 62 :** Bathymétrie de la ride volcanique. Les contours de la carte d'anomalies magnétiques réduites au pôle ont été reportés. Les bleus correspondent aux anomalies négatives, les rouges aux positives et le noir à l'isocourbe 0.

## **b) Estimation de l'épaisseur des formations pyroclastiques**

Les données magnétiques permettent d'estimer l'épaisseur des dépôts pyroclastiques. Si le substrat volcanique se trouvant sous la couche sédimentaire est semblable à celui qui affleure au Sud-Est de la zone, sa signature magnétique devrait être similaire si il était possible de la mesurer à 70m d'altitude (Niveau de référence de l'AUV en plongée).

Cruise Futuna 1, Volcanic Ridge  
Anomaly RTP, Upward continuation: 150m (Top), 100m (Middle) & 50m (Bottom)



**Fig. 63 :** Prolongements vers le haut des anomalies magnétiques réduites au pôle sur la ride volcanique. Les valeurs des prolongements sont de 50m (en bas), 100m (au milieu) et 150m (en haut). Les contrastes disparaissent totalement aux environs de 150m.

Les données magnétiques mesurées par l'AUV (Figure 61) montrent que la partie Nord-Ouest de la zone est caractérisée par son absence de signal. Cette observation suggère que la signature magnétique générée par le substrat est indiscernable en raison de l'altitude trop élevée de l'AUV (qui sera égale à l'altitude de l'AUV plus l'épaisseur des sédiments pyroclastiques).

En effectuant un prolongement vers le haut de la carte d'anomalies magnétiques, on simule le signal tel qu'il serait observé à une altitude supérieure à celle à laquelle il est mesuré. On réitère cette opération en accroissant l'altitude du prolongement (Figure 63) et on observe une disparition progressive du signal lié à la rugosité du socle volcanique dans la zone Sud-Est. L'altitude à laquelle ce signal aura disparu correspondra donc à l'épaisseur minimale de la couche de sédiments pyroclastiques déposés au Nord-Ouest du volcan.

Les prolongements vers le haut successifs sont présentés en figure 63. Ils ont été effectués à 50, 100 et 150m au dessus de l'altitude de mesure de 70m. La comparaison avec la carte d'anomalies réduites au pôle (Figure 61) montre que le prolongement à 50m laisse apparaître des anomalies trop importantes. Elles restent discernables à 100m mais disparaissent à 150m. On en déduit que l'épaisseur minimale de sédiments nécessaire pour que le signal magnétique généré par ce type de plancher océanique disparaisse est d'environ 150m. Cette valeur correspond ainsi à l'épaisseur minimale de sédiments pyroclastiques à cet endroit.

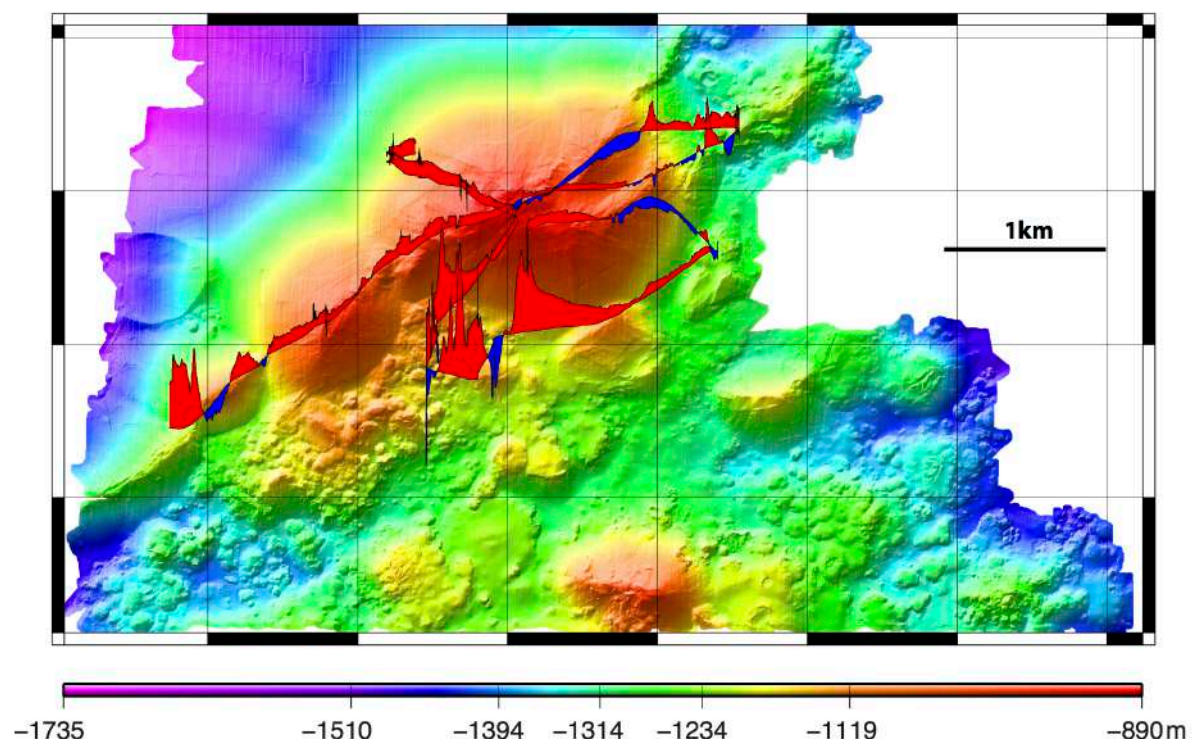
## **c) Données du Nautille**

### ***Anomalies***

Le traitement des données du Nautille a été effectué en suivant les deux étapes indiquées dans les Parties 2.III et 2.IV. L'anomalie a tout d'abord été calculée à partir des données brutes, puis l'aimantation a été estimée en ayant recours à la méthode 3D.

Deux plongées ont été effectuées sur la ride volcanique, la première coupant celle-ci d'Ouest en Est et la seconde la suivant selon une direction principale SO-NE. Leurs trajectoires sont reportées en figure 64:

**Cruise Futuna 1, Volcanic Ridge, Altitude = 70m**  
**Bathymetry & Nautilé tracks**



**Fig. 64 :** Bathymétrie de la ride volcanique sur laquelle ont été reportées les routes des deux plongées du Nautilé. Les anomalies sont projetées le long des trajectoires. Les zones d'anomalies positives sont indiquées en rouge et celles d'anomalies négatives en bleu.

La carte ci-dessus montre les anomalies projetées le long des trajectoires des plongées, après avoir quantifié puis supprimé l'influence magnétique du sous-marin grâce aux boucles de calibration.

Les anomalies mesurées sont faibles dans la zone située au Nord-Ouest du volcan mais également le long de son axe principal. Cette observation est cohérente avec les données de l'AUV (Figure 61) et compatible avec l'interprétation qui en est proposée, i.e. la présence de sédiments pyroclastiques.

La zone située au pied de la ride volcanique au Sud-Est se caractérise par un signal beaucoup plus marqué, traduisant des sources proches et d'aimantation plus forte. De nouveau, cette observation est cohérente avec les données de l'AUV et l'interprétation d'un fond océanique jeune constitué de basaltes à l'affleurement.

## ***Aimantations***

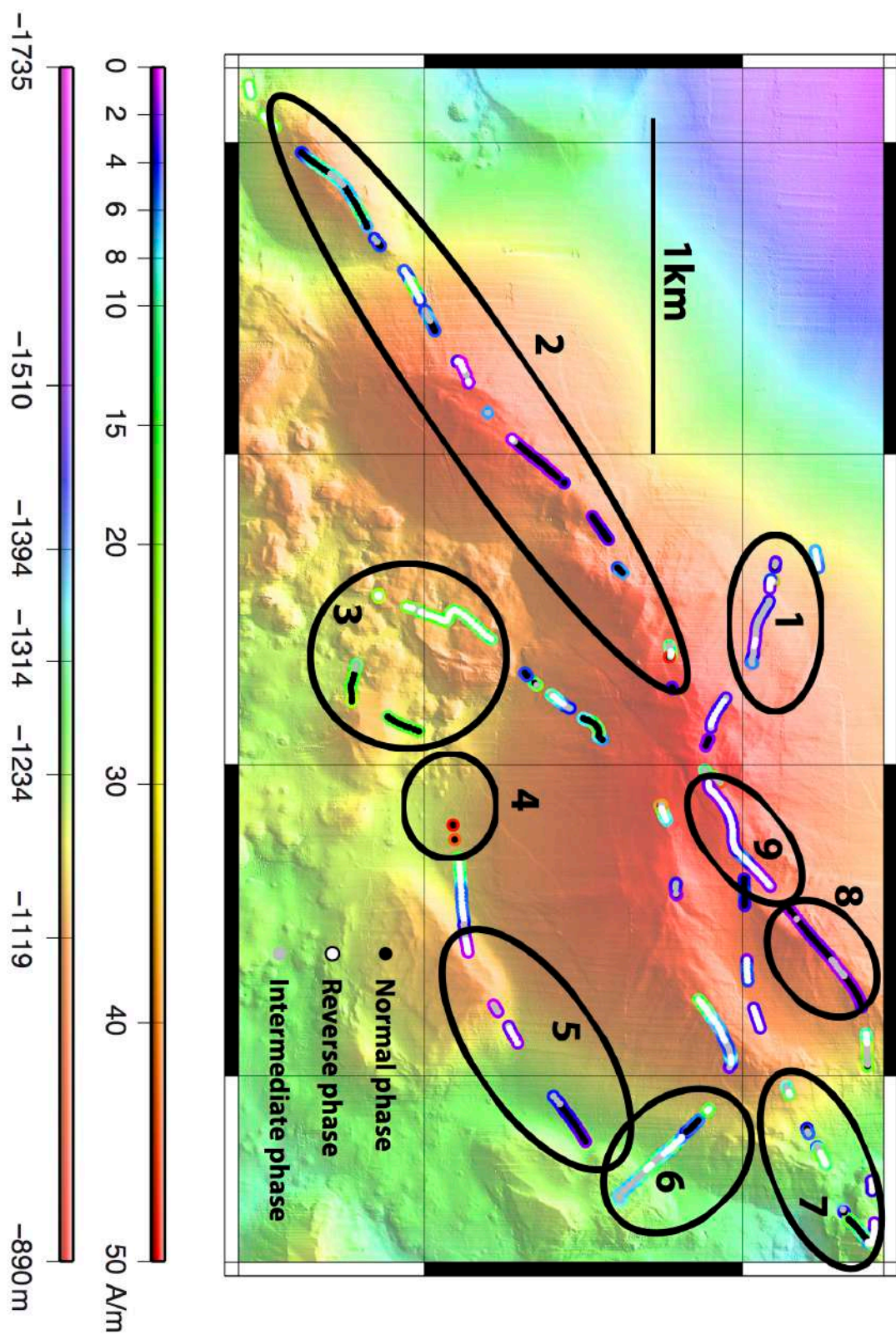
La carte des aimantations absolues calculées à partir des anomalies magnétiques est présentée en figure 65. Comme expliqué en Partie 2.IV.2, les aimantations sont estimées en comparant dans des fenêtres glissantes les anomalies observées à une anomalie synthétique calculée dans la géométrie de l'expérience en attribuant une aimantation unitaire au fond océanique. Dans ce travail, les fenêtres glissantes comptent 512 mesures et leurs centres sont décalés de 16 mesures par rapport au précédent. Ce recouvrement important permet d'apprécier statistiquement la fiabilité des résultats. L'espacement entre les données est d'environ 1m.

Représenter ces aimantations sur une carte n'a pas été aisé. Sur la figure 65, chaque disque représente le résultat d'une fenêtre glissante dotée d'une cohérence au moins égale à 0.3. La couleur de la couronne traduit l'intensité de l'aimantation et le point noir, gris ou blanc correspond à la polarité. Cette dernière donne une indication concernant la période de mise en place de la structure.

Pour les raisons exposées en Partie 2.IV.2.c, les aimantations obtenues prennent parfois des valeurs trop fortes, même si la cohérence par rapport au signal synthétique est bonne. Afin de pallier à ce problème, les aimantations supérieures à 50A/m (au pôle) n'ont pas été prises en compte.

Les aimantations présentent des valeurs faibles le long de la ride volcanique NE-SO (Zones 2 et 9) (Figure 65), ce qui pourrait s'expliquer par la présence des minéralisations hydrothermales de basse température observées de manière extensive à cet endroit. Les quelques valeurs estimées dans la zone Nord-Ouest couverte par les sédiments pyroclastiques confirment également les résultats obtenus par le magnétisme de l'AUV (Zone 1). Cela pourrait être lié à l'altération hydrothermale de ces formations pyroclastiques. À l'extrémité Nord-Est du volcan, la zone d'aimantation plus élevée (Zone 7) est cohérente avec les observations in situ qui ont révélé la présence de basaltes récents.

**Cruise Futuna 1, Volcanic Ridge**  
**Bathymetry & Absolute magnetization from the Nautilé**



*Fig. 65 : Carte d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des routes du Nautilé sur la ride volcanique.*

Les aimantations les plus fortes sont observées au Sud-Est (Zones 3 et 4), là où la bathymétrie de l'AUV révèle la présence de nombreux volcans récents.

En termes de polarités, la zone 3 présente une polarité inverse dans sa portion Ouest, proche de la ride volcanique et normale dans sa partie Est. La présence de polarités inverses dans des zones de forte aimantation peut s'expliquer par un taux d'expansion très lent ou une grande instabilité de l'axe d'expansion.

La méthode utilisée pour le calcul des aimantations présente toutefois une limite lorsque les aimantations sont faibles. En effet, le calcul de la cohérence lorsque l'anomalie magnétique est limitée peut conduire à des erreurs lors du calcul numérique. Dans ce cas, l'estimation de la polarité est incertaine et les polarités sont mal contraintes. Il faut donc considérer avec précautions toutes les zones présentant de telles caractéristiques.



### **3) Caldeira A**

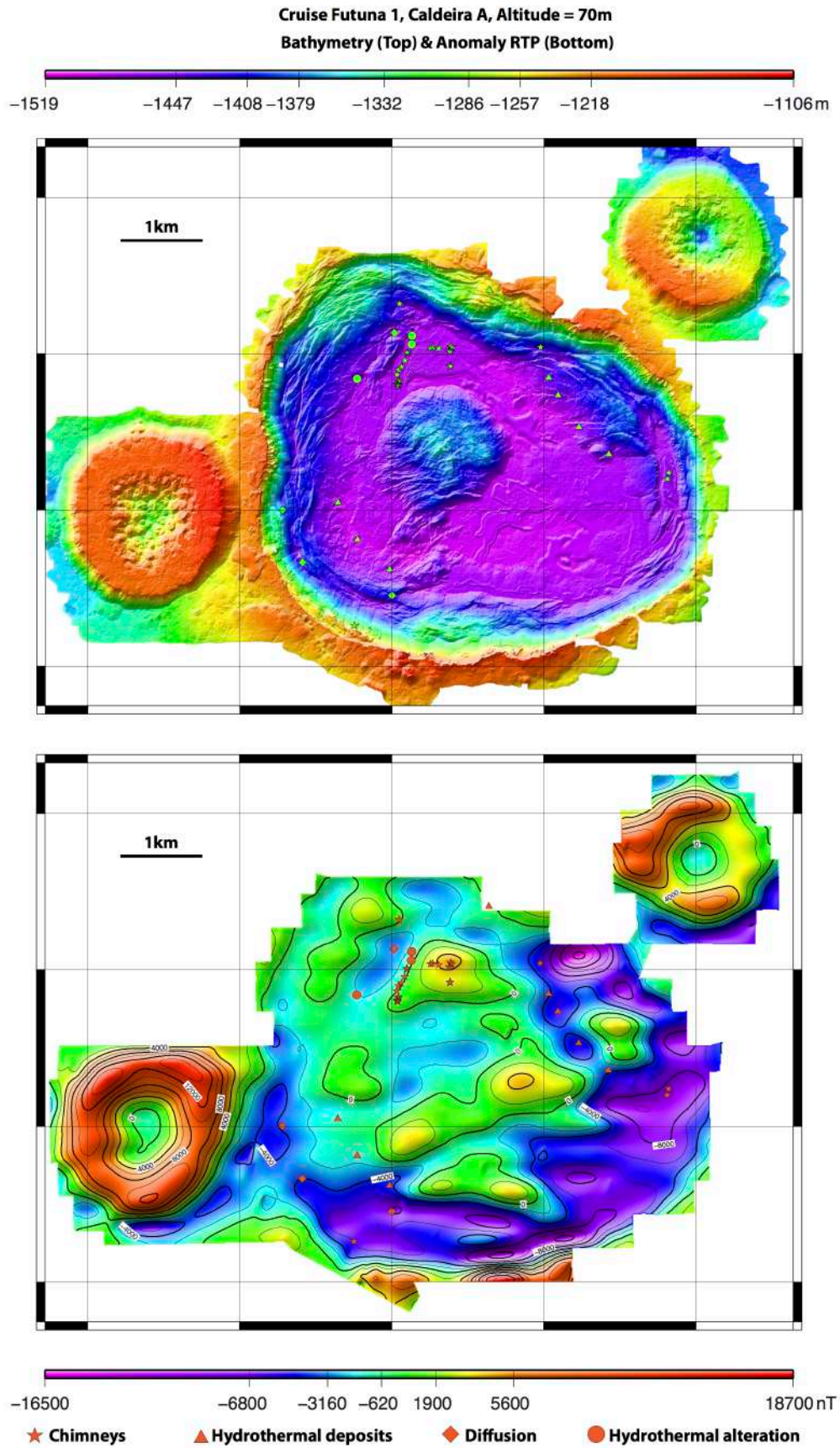
La caldeira A est de forme globalement circulaire avec un diamètre moyen de 6km. Elle est entourée par deux petits volcans au sommet aplati et est associée à une activité hydrothermale.

#### **a) Données de l'AUV**

La caldeira A a été entièrement levée par l'AUV, qui était équipé d'un sondeur multifaisceaux et d'un magnétomètre vectoriel. La bathymétrie et l'anomalie magnétique réduite au pôle sont présentées en figure 66.

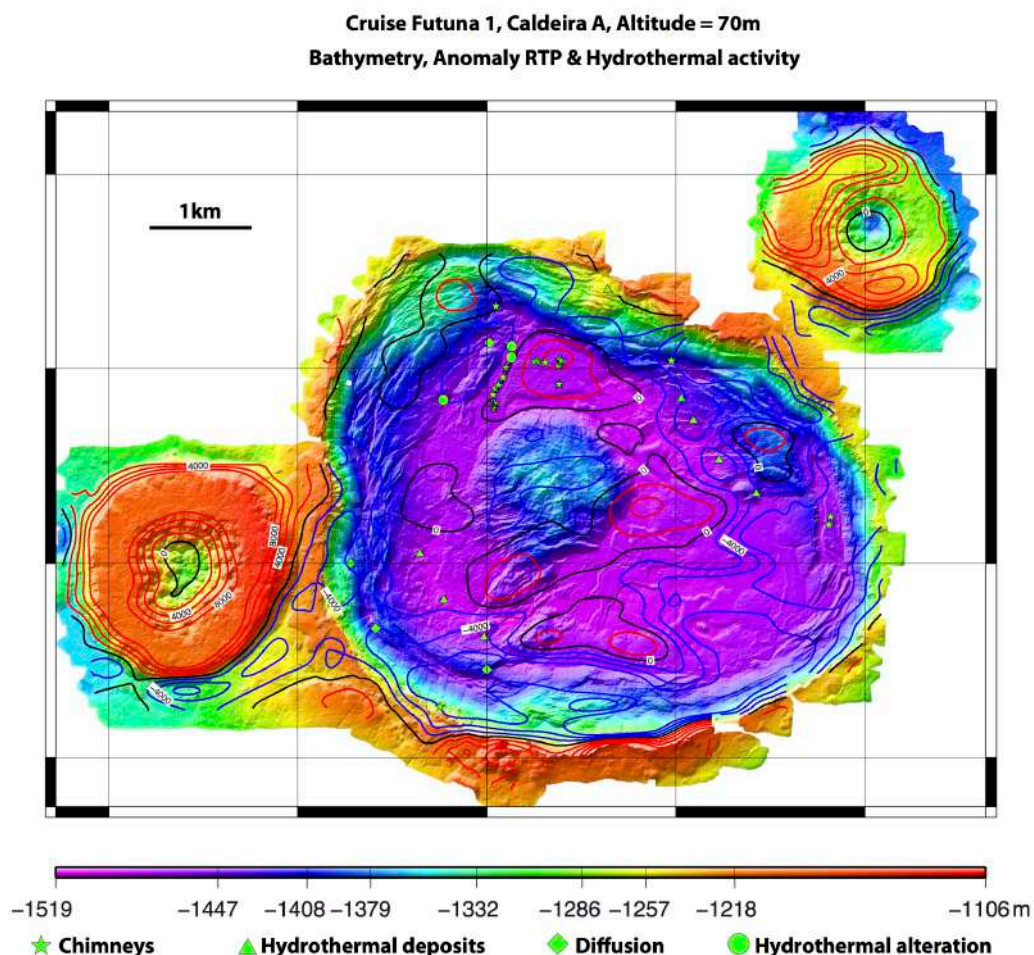
Les zones d'activité hydrothermale ont été reportées en vert (bathymétrie) et orange (anomalie réduite au pôle). La carte bathymétrique de haute résolution dévoile le caractère relativement lisse du plancher de la caldeira, constitué des laves les plus récentes. Elle révèle également le dome résurgent tectonisé et ancien situé au centre de la caldeira. Cette zone a été épargnée par les coulées récentes.

Les deux volcans externes présentent un sommet aplati ainsi qu'un cratère central. La carte d'anomalies magnétiques réduites au pôle montre qu'ils sont associés à la plus forte anomalie positive et suggère qu'ils sont constitués de basaltes récents.



*Fig. 66: Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite du pôle (en bas) générée par la caldeira A.*

La signature magnétique du fond de la caldeira est relativement peu marquée. Les zones où l'activité hydrothermale a été constatée sont dispersées, avec une concentration plus importante dans la partie Nord. Les zones hydrothermales actives situées au Nord-Est de la caldeira sont situées au sein des plus fortes anomalies négatives, comme attendu sur un substrat basaltique. La structure centrale ne présente pas de signature magnétique particulière. La zone où les manifestations hydrothermales sont les plus abondantes semble située au milieu d'une anomalie positive de faible amplitude (Figures 66 et 67). Cela pourrait s'expliquer par le peu de vigueur de l'activité hydrothermale observée lors des plongées Nautile, mais également par son caractère très récent (quelques semaines à quelques mois). Le défaut d'aimantation qui en résulte pourrait ainsi être masqué par la forte aimantation des basaltes issus d'une coulée récente.



**Fig. 67 :** Superposition des cartes bathymétrique et magnétique de la caldeira A. Les contours bleus correspondent aux anomalies négatives, les rouges aux positives et le noir à l'isocourbe 0. Les sites hydrothermaux actifs ont également été reportés. La zone où ils sont majoritairement concentrés se situe au milieu d'une légère anomalie positive par rapport au milieu environnant.

Le décalage vers l'Est de l'anomalie négative par rapport aux sites actifs pourrait traduire des zones d'altérations hydrothermales au pied du mur de la caldeira. Des formations altérées ont été échantillonnées dans cette zone. Des faciès acoustiques particuliers sont également observés. Ces faciès d'altération ont été vus sur les images acoustiques en plusieurs points sur le mur de la caldeira.

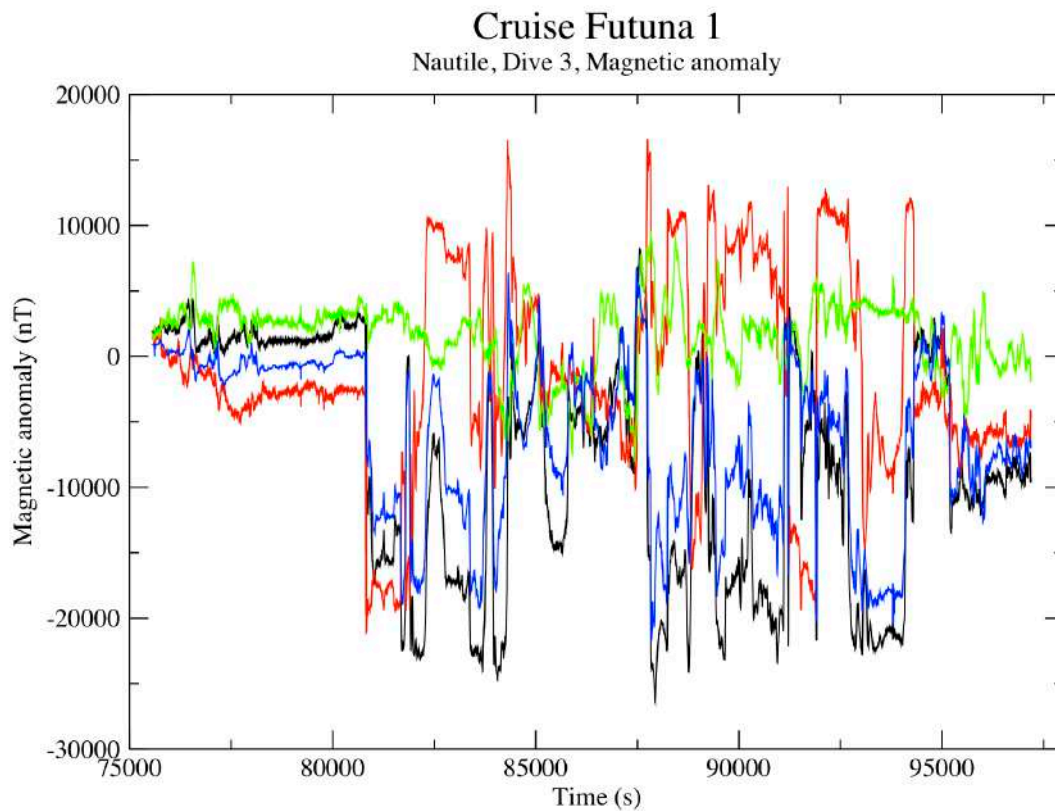
Les manifestations hydrothermales observées au niveau de la caldeira A sont relativement limitées et paraissent ténues, sans dépôts hydrothermaux associés. Elles peuvent être reliées à une activité volcanique fréquente. Les sites hydrothermaux sont ainsi rapidement recouverts par une nouvelle coulée de lave, qui les empêche de se développer de manière conséquente.

## **b) Données du Nautilé**

### *Anomalies*

Lors de la campagne Futuna 1, six plongées du Nautilé ont été consacrées à la caldeira A. Elles ont permis de l'explorer en totalité, à l'exception du quart Sud-Est qui n'a pas pu être visité. Elles n'ont en outre pas permis de repérer toutes les zones hydrothermales, en particulier les zones inactives. Une plongée supplémentaire a eu lieu dans la zone Sud-Est lors de la campagne Futuna 3 mais le sous-marin n'était alors pas équipé d'un magnétomètre vectoriel.

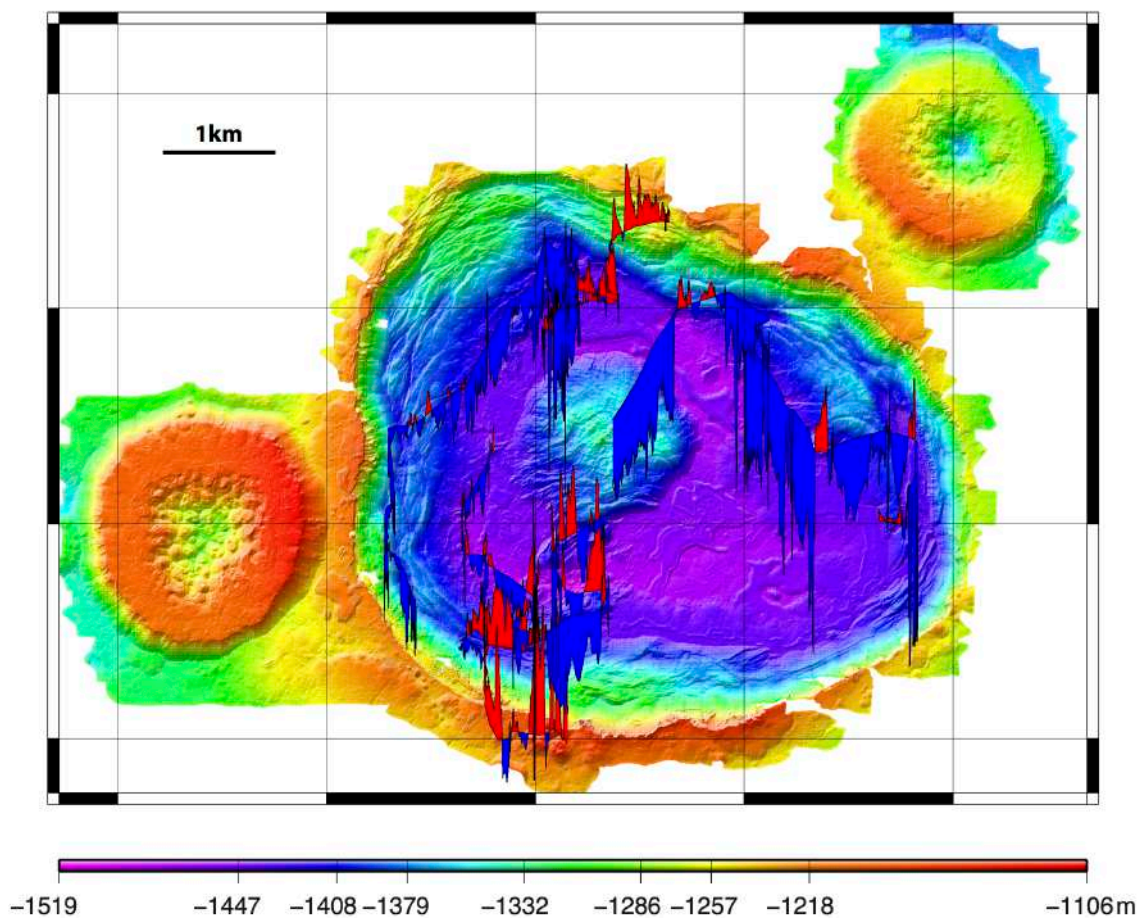
Parmi ces six plongées, deux ont posé problème du point de vue du magnétisme. La première plongée réalisée a été pénalisée par une panne des instruments peu de temps après l'arrivée au fond. Au cours de la troisième, la géométrie du sous-marin a été modifiée peu après son arrivée au fond (bras manipulateur déplié et non remis en place etc...), comme en atteste l'impossibilité de corriger les données de la plongée avec les coefficients déduits des boucles effectuées durant la descente. Les données de cette plongée après traitement sont présentées en figure 68. Malgré cette difficulté, la procédure permettant de calculer l'aimantation absolue grâce au modèle en trois dimensions a été appliquée à cette plongée.



**Fig. 68 :** Données magnétiques obtenues après le traitement des boucles lors de la troisième plongée du Nautile sur la caldeira A. L'influence du cap devient dominante aux alentours de 81 000s.

La carte des plongées est proposée en figure 69 ci-dessous. Comme dans le cas de la ride volcanique, les anomalies magnétiques ont été reportées le long des trajectoires.

**Cruise Futuna 1, Caldeira A, Altitude = 70m  
Bathymetry & Nautilé tracks**

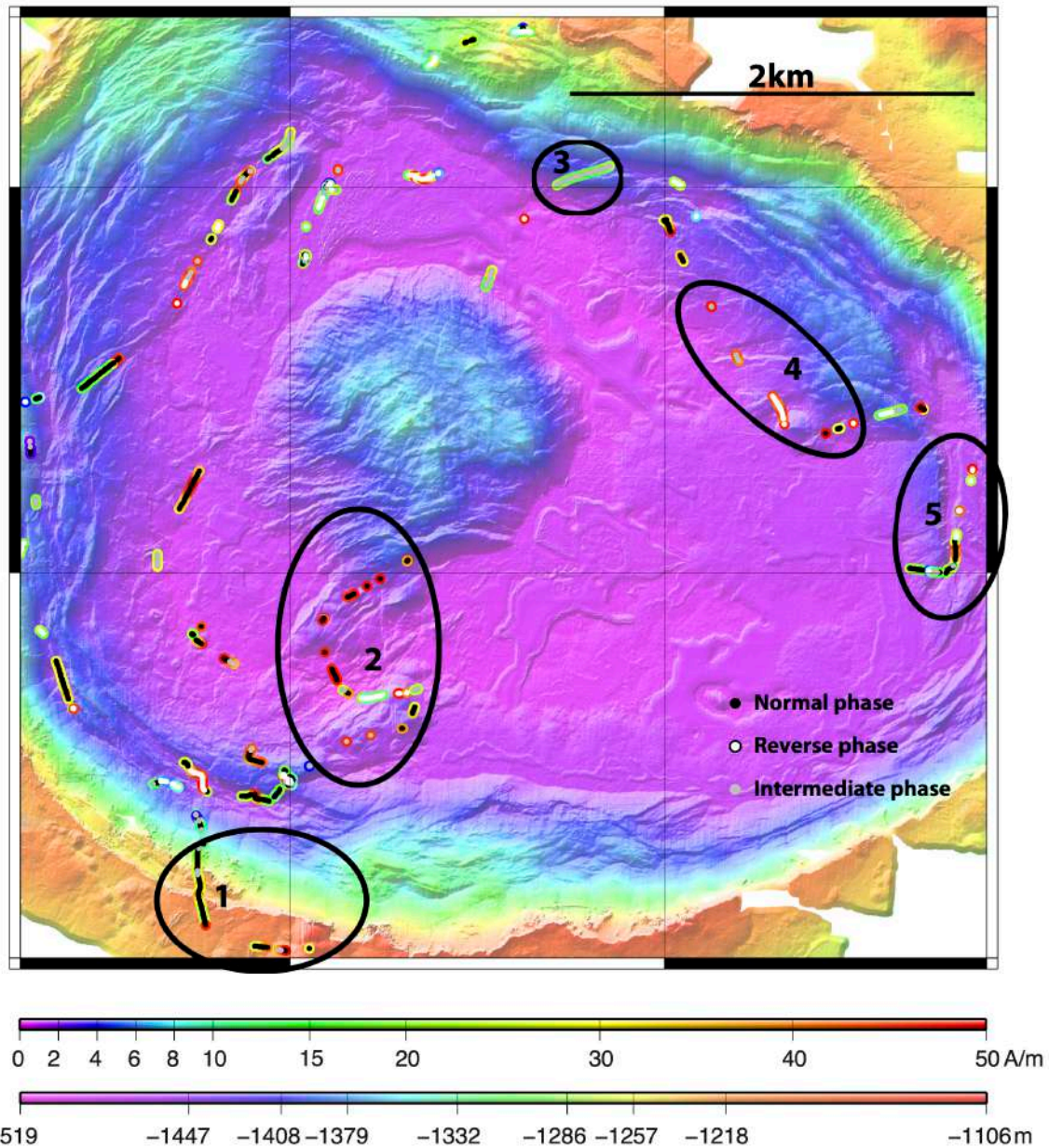


**Fig. 69 :** Superposition des 6 plongées du Nautilé effectuées à l'intérieur de la caldeira A sur la carte bathymétrique. La plongée n°3 posant problème couvre la partie Nord-Est de la zone et présente des anomalies négatives extrêmement fortes.

### ***Aimantations***

Les aimantations obtenues par la méthode 3D sont reportées sur la figure 70. Afin de faciliter les comparaisons, l'échelle de couleurs est la même que sur la ride volcanique. Ces valeurs sont généralement plus élevées que sur la ride, ce qui s'explique par les nombreuses coulées très récentes qui tapissent le fond de la caldeira.

**Cruise Futuna 1, Caldeira A**  
**Bathymetry & Absolute magnetization from the Nautille**



**Fig. 70 :** Carte d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautille sur la caldeira A.

Les observations in situ effectuées à bord du Nautille au cours des six plongées confirment que la structure du fond est constituée de basaltes récents. La bathymétrie de haute résolution issue du sondeur de l'AUV souligne les contours des différentes coulées.

Les polarités laissent apparaître plusieurs tendances. Les zones 1 et 2 correspondent à des polarités principalement normales et une valeur d'aimantation élevée. La zone 2 est située au fond de la caldeira et donc constituée de coulées récentes.

La zone 1, sur le mur de la caldeira, est constituée de roches plus anciennes mais la polarité normale des aimantations suggère une période de mise en place postérieure à l'inversion de Brunhes-Matuyama. La zone 3, située au pied du mur en dehors des zones couvertes par les coulées récentes pourrait être plus ancienne, ce qui expliquerait son aimantation moyenne plus faible. La zone 4 ressemble à la zone 2 : située au fond de la caldeira et sur des coulées récentes, elle présente des valeurs d'aimantation très élevées, mais les polarités y présentent une variabilité plus importante.

La zone 5 est proche de la base du mur de la caldeira. Les aimantations observées dans cette petite zone présentent de forts contrastes en termes d'intensités mais également de polarités sur une surface restreinte. Les valeurs les plus fortes correspondent aux basaltes récents. Les valeurs plus faibles pourraient résulter des éboulis accumulés au pied des murs. Les fragments éboulés adoptent des orientations variées, qui affaiblissent leur signature magnétique moyenne et créent des variations dans leurs polarités.

Les autres zones explorées par le Nautille présentent une variabilité importante en termes d'intensités et de polarités, même si la tendance générale est à une polarité normale attendue pour un édifice récent. Les aimantations obtenues près des sources hydrothermales ne paraissent pas affectées par ces dernières, confirmant le caractère récent de l'activité hydrothermale et la domination des basaltes jeunes sur les anomalies magnétiques observées.

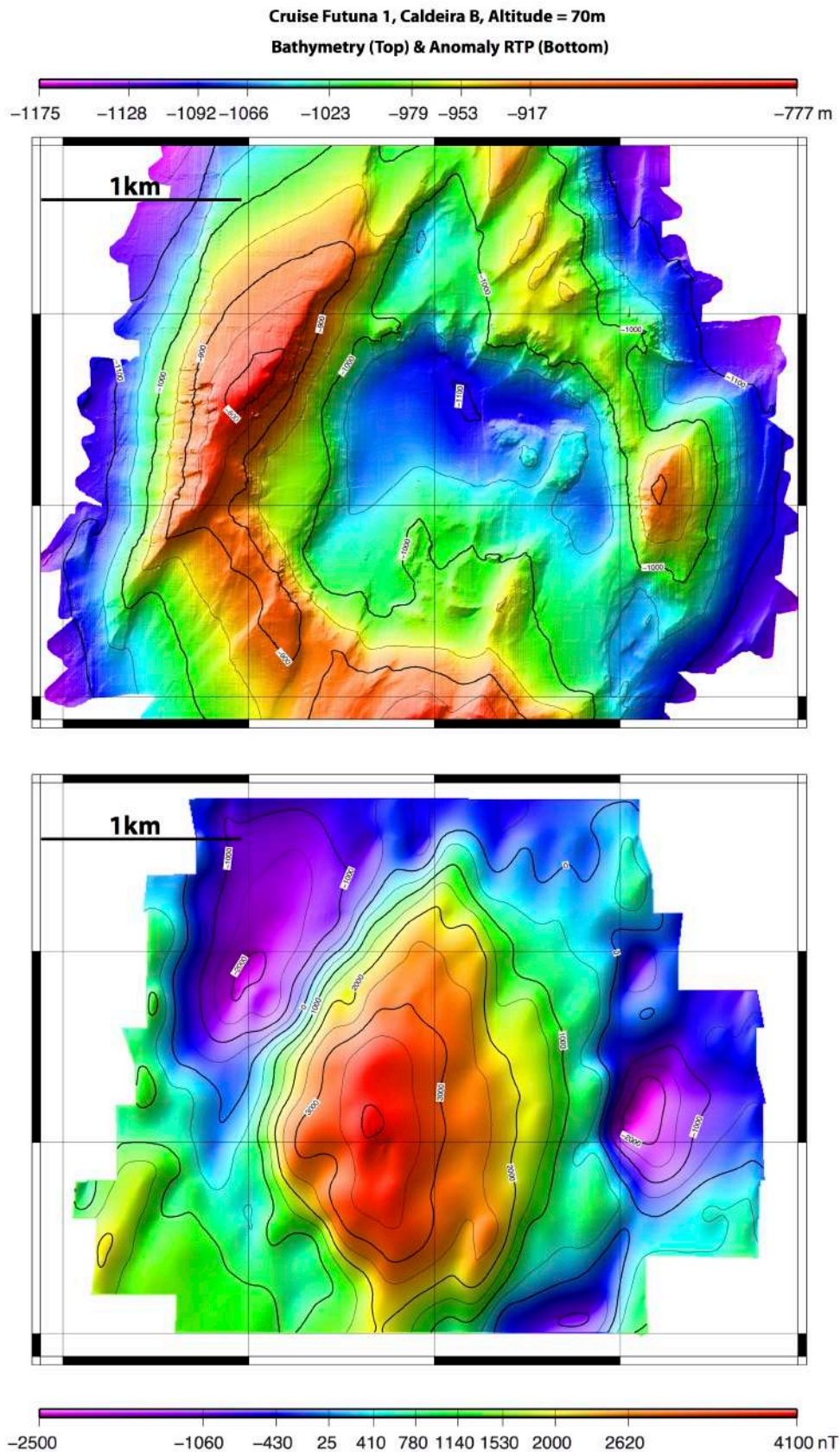


## 4) Caldeira B

### a) Résultats

Les résultats de magnétisme et de bathymétrie haute résolution obtenus par l'AUV sur cette zone sont présentés en figure 71. La bathymétrie montre une zone plus lisse que dans le cas de la caldeira A, attestant de la présence de dépôts sédimentaires, notamment dans la partie centrale de la caldeira. L'action des failles d'orientation N30° visible sur les parties hautes montre également que le site est beaucoup plus ancien que la caldeira A.

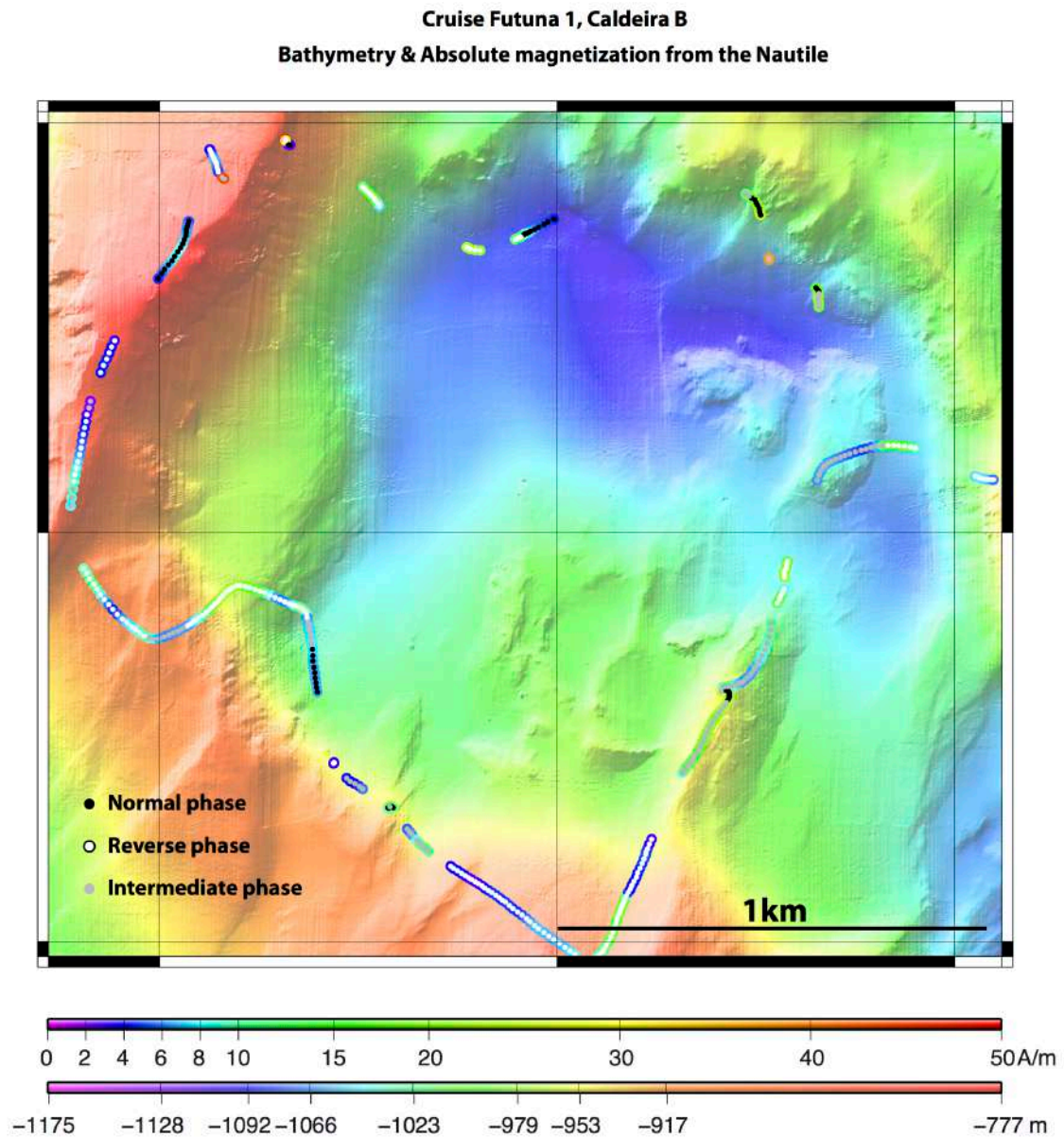
La carte d'anomalies réduites au pôle confirme cette hypothèse. Contrairement à la caldeira A, qui présente une anomalie magnétique plus faible dans sa partie centrale et plus forte sur les murs, la caldeira B est caractérisée par une forte anomalie positive à l'aplomb de sa dépression centrale. Cette observation suggère que les laves constituant la caldeira B sont à dominante inverse et que son âge remonte vraisemblablement à la période de Matuyama.



**Fig. 71 :** Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle (en bas) de la caldeira B. Cette caldeira n'a fait l'objet que d'une unique plongée AUV et Nautile. Sa signature magnétique traduit un âge de formation antérieur à la dernière inversion de polarité du champ géomagnétique.

## b) Aimantations

Les aimantations obtenues par la méthode 3D ont été déterminées grâce à la seule plongée du Nautilé effectuée sur la caldeira. Les résultats sont présentés en figure 72.



**Fig. 72 :** Carte d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long de la plongée du Nautilé sur la caldeira B. L'échelle des valeurs est identique à celle des deux cas précédents.

Une première observation concerne la polarité des aimantations, qui est en majorité inverse, en accord avec les résultats obtenus à partir des données de l'AUV (Figure 71). Les aimantations calculées par la méthode 3D permettent ainsi de confirmer que la formation de la caldeira remonte à plus que 0.78Ma.

Par ailleurs, les intensités d'aimantation sont sensiblement plus faibles que dans le cas de la caldeira A et présentent une certaine homogénéité au niveau des murs de la caldeira. Ces valeurs faibles pourraient être le résultat de l'altération progressive des laves et de la diminution concomitante de leur aimantation.

## 5) Plongées isolées

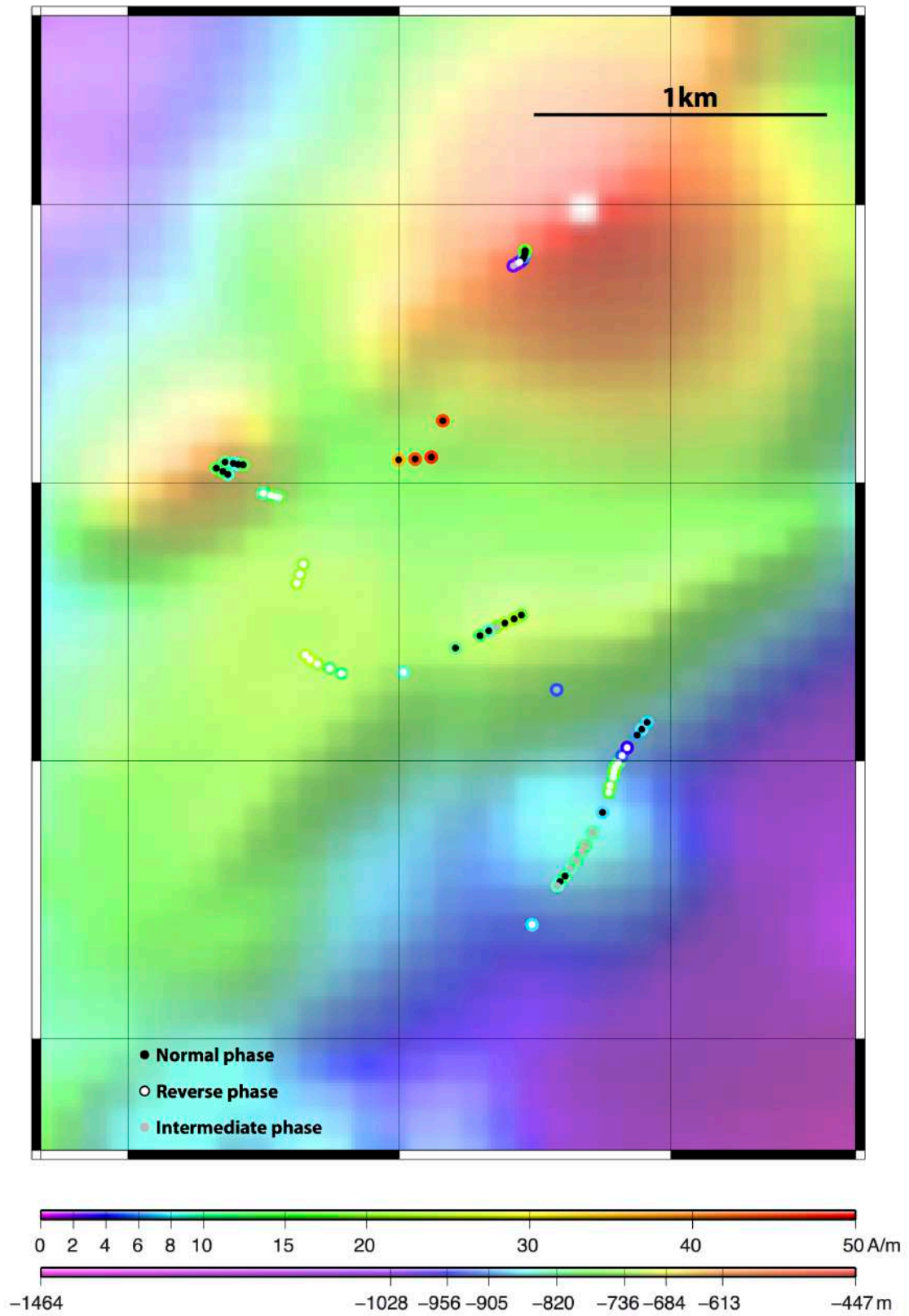
Au cours de la campagne Futuna 1, trois plongées du Nautille ont été réalisées dans des zones non couvertes par l'AUV d'un point de vue bathymétrique. Il s'agissait dans les trois cas de plongées d'exploration. Les seules données bathymétriques pour ces plongées sont celles du sondeur multifaisceaux de l'Atalante, de résolution moindre. Ces données ne permettent pas de calculer l'aimantation par la méthode 3D. Pour cette raison, les aimantations et les polarités ont été déterminées à partir de la méthode 2D mise au point par Honsho (1999) et reposant sur les données d'immersion et d'altitude du sous-marin.

La première plongée a été entreprise sur une ride volcanique. Les deux autres l'ont été sur des structures volcaniques isolées, l'une ancienne, l'autre plus récente. Les résultats du calcul de l'aimantation pour la première sont présentés en figure 73 ci-dessous. Les grands traits de la bathymétrie sont visibles en arrière plan. On constate que les mesures effectuées sur la petite structure volcanique à l'Ouest présentent une polarité normale. Cette information laisse donc penser qu'il s'agit d'une structure récente (<0.78Ma).

Plus au Sud, une série de mesures présente des valeurs d'aimantation relativement faibles et une polarité inverse. Il est donc possible que des volcans à polarité normale se soient superposés à un socle plus ancien de polarité inverse. Comme pour la ride volcanique, des formations pyroclastiques ont en outre été observées sur les sommets de cette zone.

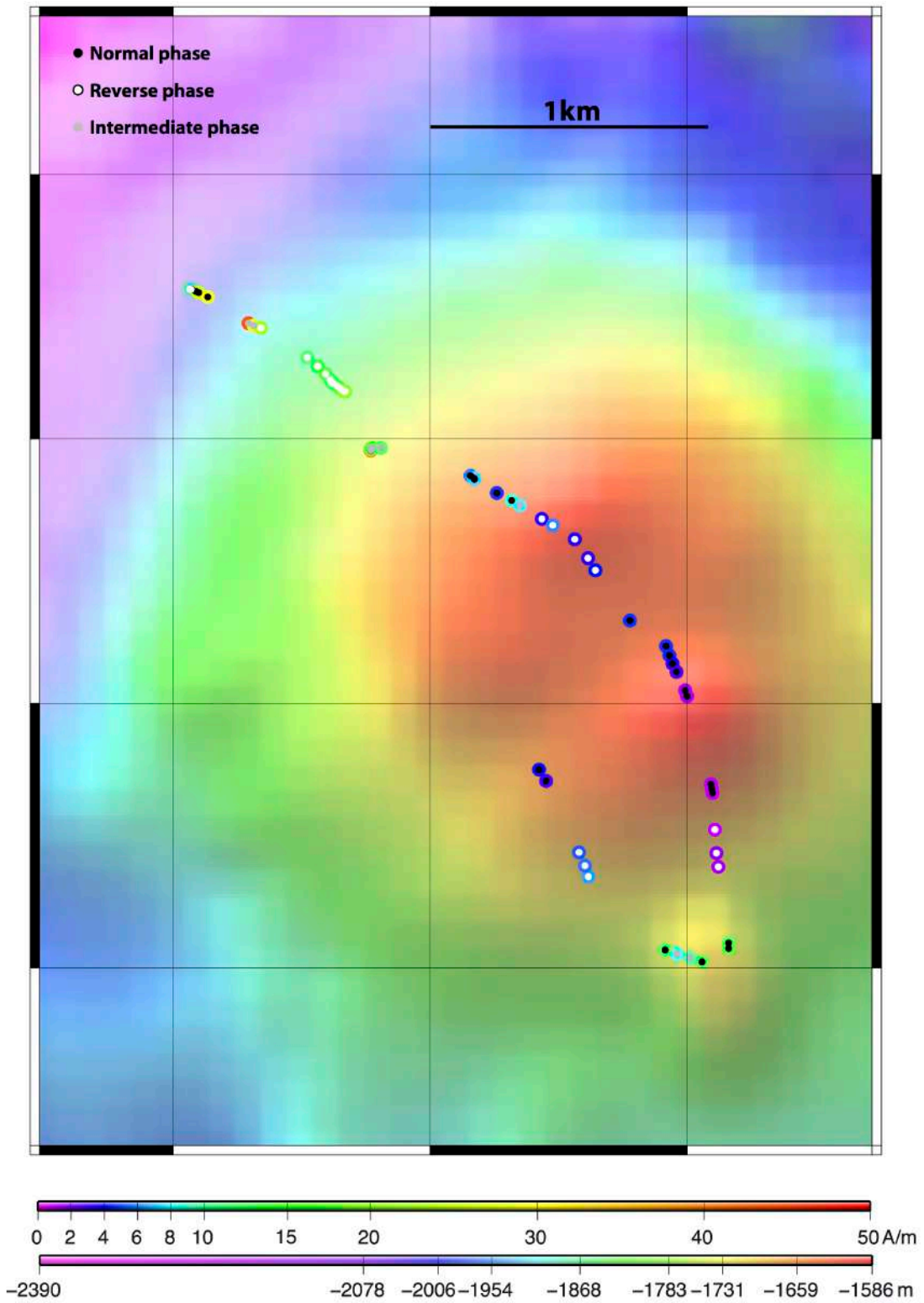
Les résultats de la 10<sup>ème</sup> plongée du Nautille sont représentés en figure 74. Elle consistait à explorer un volcan hors axe. On constate que les aimantations qui lui sont associées se caractérisent par des intensités faibles. Celles des régions plus éloignées sont plus fortes et paraissent présenter une polarité inverse. Par analogie avec nos autres observations, les faibles aimantations pourraient correspondre à des dépôts pyroclastiques ou à de l'altération hydrothermale. Des formations hydrothermales de basse température et extensives ont été observées à la surface du volcan le long de la plongée.

Cruise Futuna 1, Nautille, Dive 7  
Bathymetry & Absolute magnetization from the Nautille



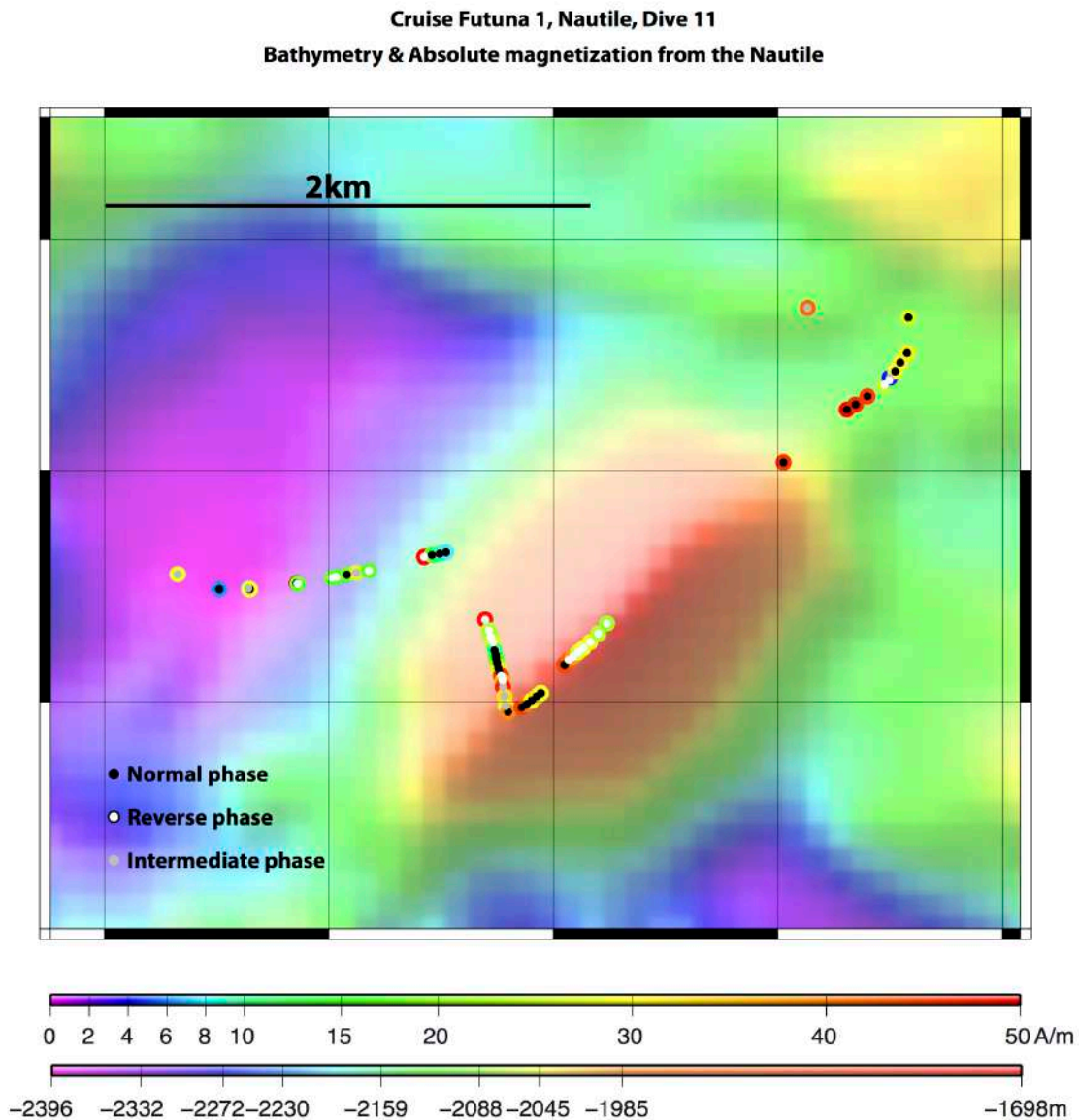
**Fig. 73 :** Carte d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 2D le long de la 7<sup>ème</sup> plongée du Nautille.

Cruise Futuna 1, Nautille, Dive 10  
Bathymetry & Absolute magnetization from the Nautille



**Fig. 74** : Carte d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 2D le long de la 10<sup>ème</sup> plongée du Nautille.

La dernière des plongées isolées a été la 11<sup>ème</sup> de la campagne. Elle se situait sur une ride volcanique et ses alentours. Les résultats sont présentés sur la figure 75.



**Fig. 75 :** Carte d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 2D le long de la 11<sup>ème</sup> plongée du Nautille.

Les observations effectuées depuis le sous-marin ont indiqué que la zone dans son ensemble était recouverte d'éboulis et de basaltes en place, en accord avec la variabilité relativement forte des aimantations et des polarités sur la colline volcanique. Les valeurs d'aimantations les plus fortes correspondent aux basaltes récents et peu sédimentés, alors que les valeurs les plus faibles sont caractéristiques de la présence des éboulis sur les pentes.



## 6) Conclusions

La campagne Futuna 1 était centrée sur trois principaux objets géologiques (respectivement deux caldeiras et une ride volcanique). Les données magnétiques ont permis d'établir avec certitude une chronologie de formation entre ces différentes structures. Les données de l'AUV et du Nautilé indiquent ainsi que la caldeira B s'est formée durant une période de polarité inverse du champ magnétique (antérieure à 0.78Ma), alors que la ride et la caldeira A sont plus récentes. Il s'agit par conséquent de la cible la plus ancienne.

Nous avons également établi que le caractère récent de l'activité hydrothermale constatée dans la caldeira A pouvait s'expliquer par l'activité volcanique intense, générant des coulées recouvrant les sites et les empêchant d'acquérir la désaimantation attendue en environnement basaltique.

Enfin, l'étude conjuguée de la bathymétrie de haute résolution et des anomalies magnétiques réduites au pôle a permis d'estimer une valeur minimale de l'épaisseur des dépôts pyroclastiques dans la zone de la ride volcanique.

# **IV) Campagne Futuna 3**

## **1) Introduction**

La campagne Futuna 3 s'est déroulée en Mai et Juin 2012, à bord du navire N/O L'Atalante. L'objectif des travaux de magnétisme était de mettre en œuvre les méthodes développées pour les données de la dorsale Médio-Atlantique puis rodées lors de la campagne Futuna 1, afin de traiter les données magnétiques de l'AUV et du Nautille en temps réel et de guider la stratégie d'exploration en utilisant le magnétisme comme outil de détection des sites hydrothermaux, actifs ou pas.

Des plongées du Nautille et de l'AUV Idef-X ont été réalisées sur deux zones identifiées lors de la campagne précédente. Sur les 30 plongées Nautille et 30 plongées AUV initialement prévues, seules 17 plongées AUV et 21 plongées Nautille ont finalement eu lieu, en raison d'aléas météo. Par ailleurs, des problèmes de fret ont retenu pendant plusieurs semaines le magnétomètre destiné au Nautille à Auckland. Pour cette raison, seules 12 plongées du Nautille disposent finalement de données magnétiques.

## **2) Zone 1**

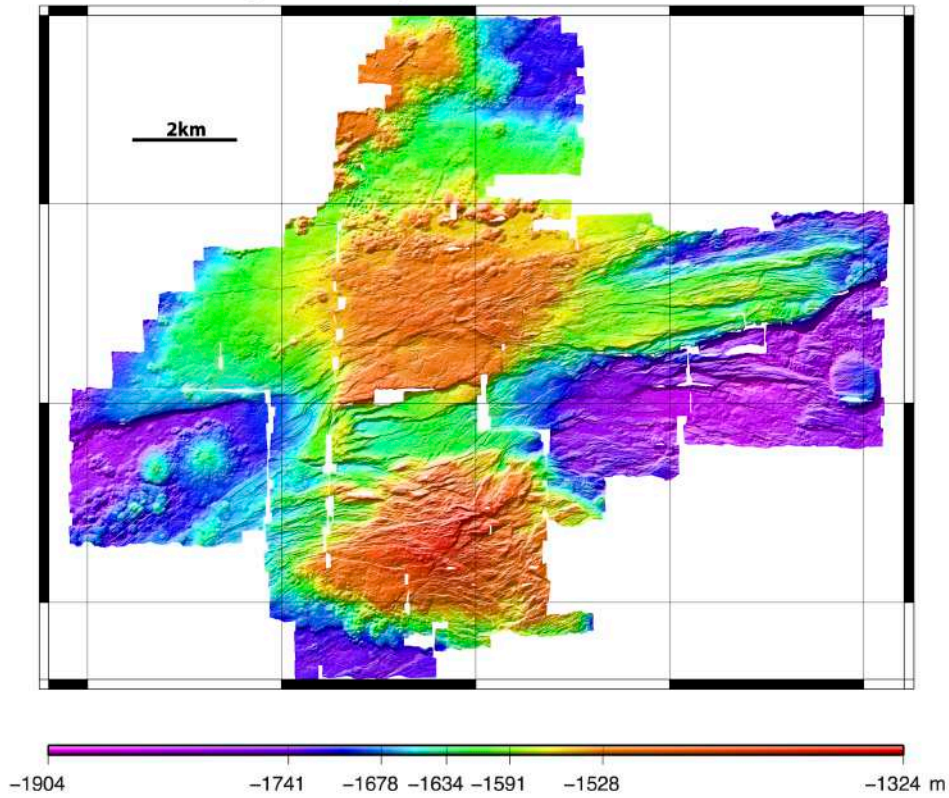
### **a) Données de l'AUV**

La zone 1 couvre une surface équivalente à environ 2 fois la ville de Paris, ce qui représente une étendue considérable à couvrir avec un AUV. Ses dimensions justifient les 15 plongées nécessaires afin de la balayer entièrement. L'AUV Idef-X était équipé d'un magnétomètre 3 composantes et d'un sondeur multifaisceaux de dernière génération, fournissant des données bathymétriques de très haute résolution et permettant l'analyse des anomalies acoustiques dans la colonne d'eau.

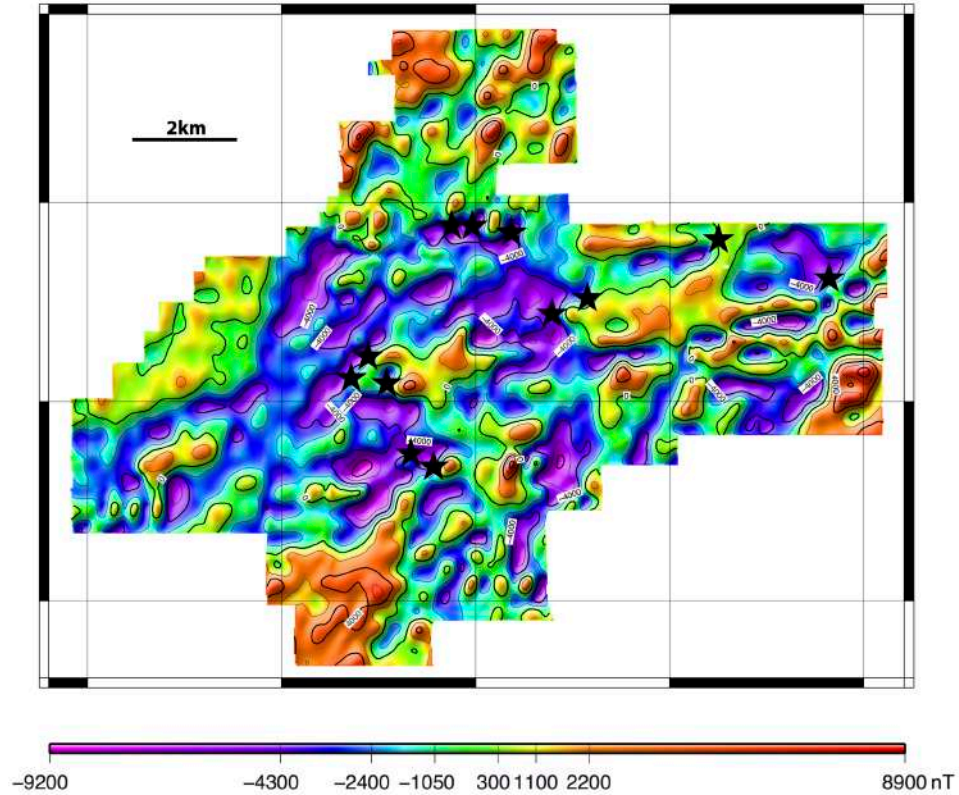
La bathymétrie (Figure 76) laisse apparaître une zone complexe suggérant la superposition de plusieurs épisodes tectoniques et volcaniques. Cette complexité favorise l'existence de croisements de failles, propices à la focalisation des sorties de fluides hydrothermaux. Le trait le plus marquant est la présence d'un domaine volcanique traversé par un graben d'orientation N80°. Plusieurs zones d'extension semblent se propager dans ce domaine, l'une au Nord-Est, l'autre au Sud-Ouest. Cette dernière présente un ensemble de quelques volcans constitués de laves siliceuses proches des rhyolites. La coexistence des laves basaltique et rhyolitique (également appelé volcanisme bimodal) est connue à terre pour être particulièrement favorable à la formation d'amas sulfurés.

Sur la carte d'anomalies magnétiques réduites au pôle (Figure 76), les sites hydrothermaux ont été reportés sous la forme de petites étoiles noires. Ils se situent principalement dans des zones d'anomalie magnétique négative, ce qui est cohérent avec la signature des sites hydrothermaux sur substrat basaltique.

### A) Zone Fatukapa, Bathymétrie

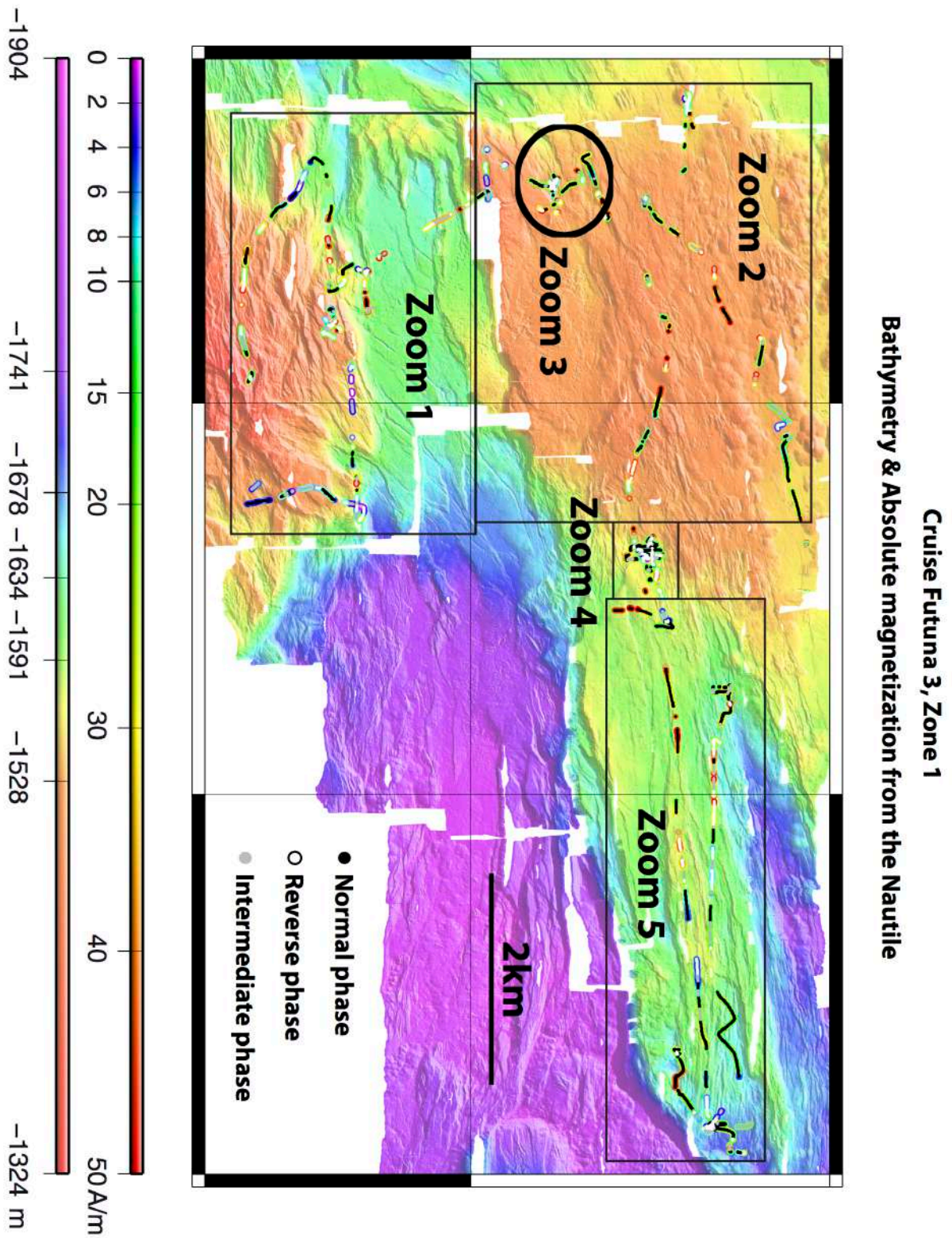


### B) Zone Fatukapa, Anomalie RTP



**Fig. 76 :** Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle (en bas) de la zone 1, à proximité de Futuna. Les sites hydrothermaux sont symbolisés par des étoiles noires.

## b) Données du Nautilé

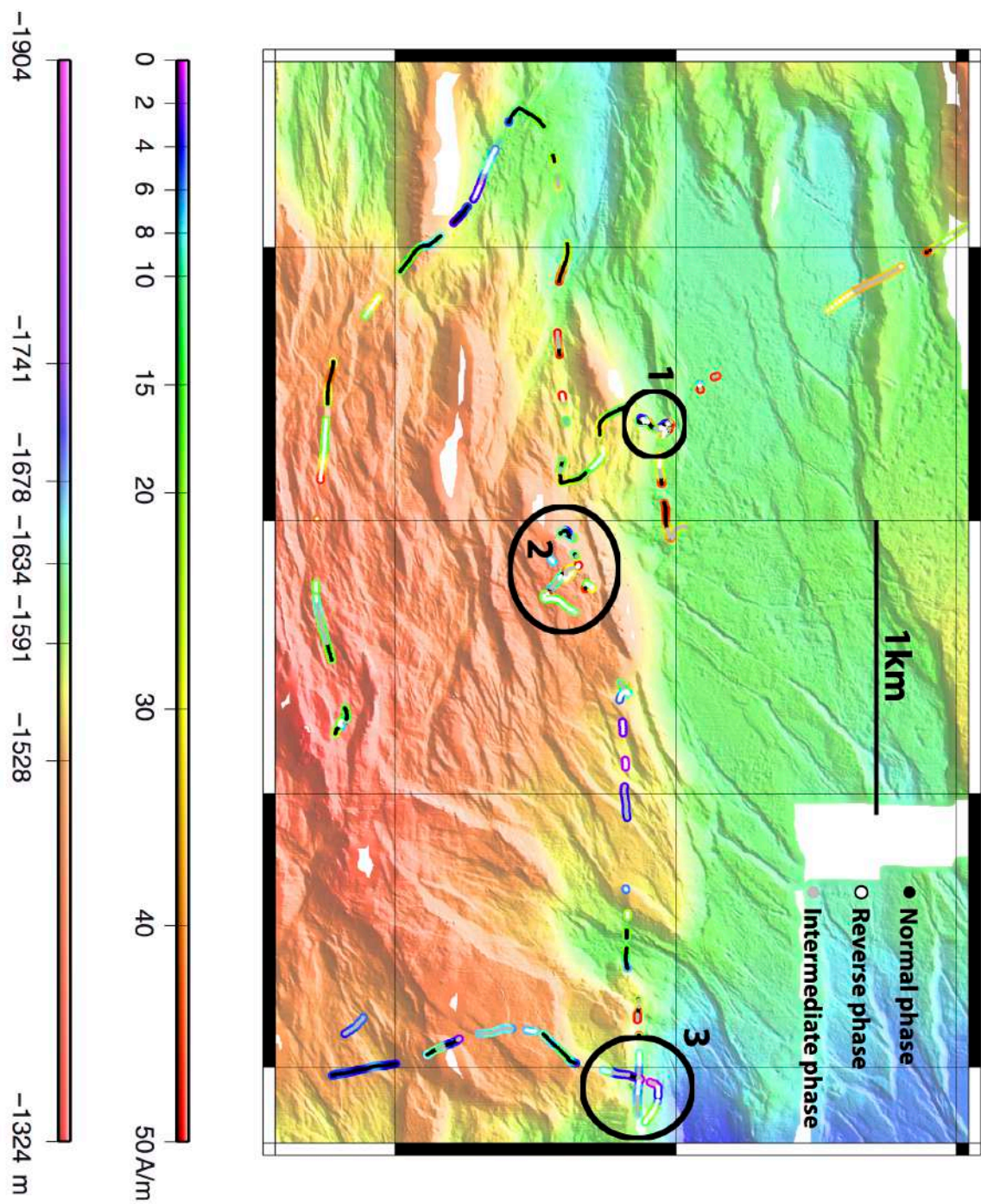


**Fig. 77 :** Carte bathymétrique et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautilé sur la zone 1.

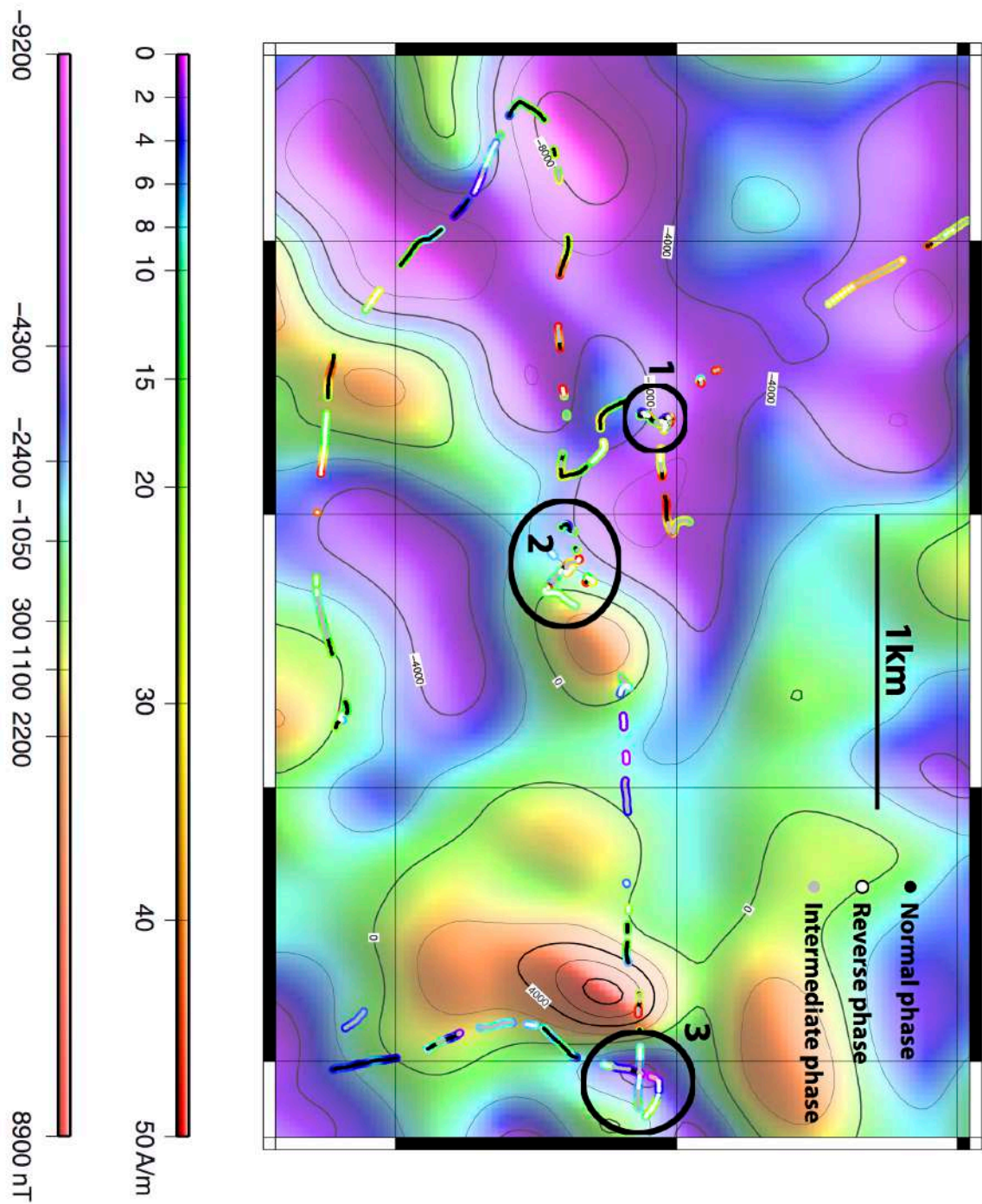
Les dix plongées Nautile effectuées sur la zone 1 ont été traitées en suivant la méthode utilisée lors de la campagne Futuna 1. L'ensemble des données est reporté en figure 77, mais l'échelle ne permet pas d'effectuer une interprétation fine. Plusieurs zones ont par conséquent été définies afin de la faciliter. Leurs contours sont établis selon la position des sites hydrothermaux découverts mais également en suivant les limites des différentes structures géologiques.

Les cartes du Zoom 1 présentées en figure 78 et 79 reprennent la partie Sud du domaine ainsi que le graben l'ayant probablement coupé en deux. La carte bathymétrique laisse apparaître deux grands groupes d'orientations de failles, N20° et N80°. Sur la figure 79, les aimantations calculées à partir des données du Nautile ont été superposées à la carte d'anomalies magnétiques réduites au pôle fournie par le magnétomètre de l'AUV (L'échelle de couleurs est la même que sur la figure 76). Les deux principaux sites hydrothermaux identifiés correspondent aux zones 1 et 2 définies par des cercles noirs. Ces deux sites se trouvent dans une zone d'anomalie magnétique moyenne et encadrent une zone d'anomalie négative. Ils présentent des aimantations et des polarités variables.

La zone 3 correspond à une loupe d'arrachement à l'origine d'éboulis. Ces éboulis ayant des orientations quelconques, ils sont magnétiquement incohérents et leur signature magnétique globale est faible, en accord avec les aimantations calculées à cet endroit. Cette faible signature magnétique est également visible sur l'anomalie magnétique réduite au pôle, négative à cet endroit (Figure 79).



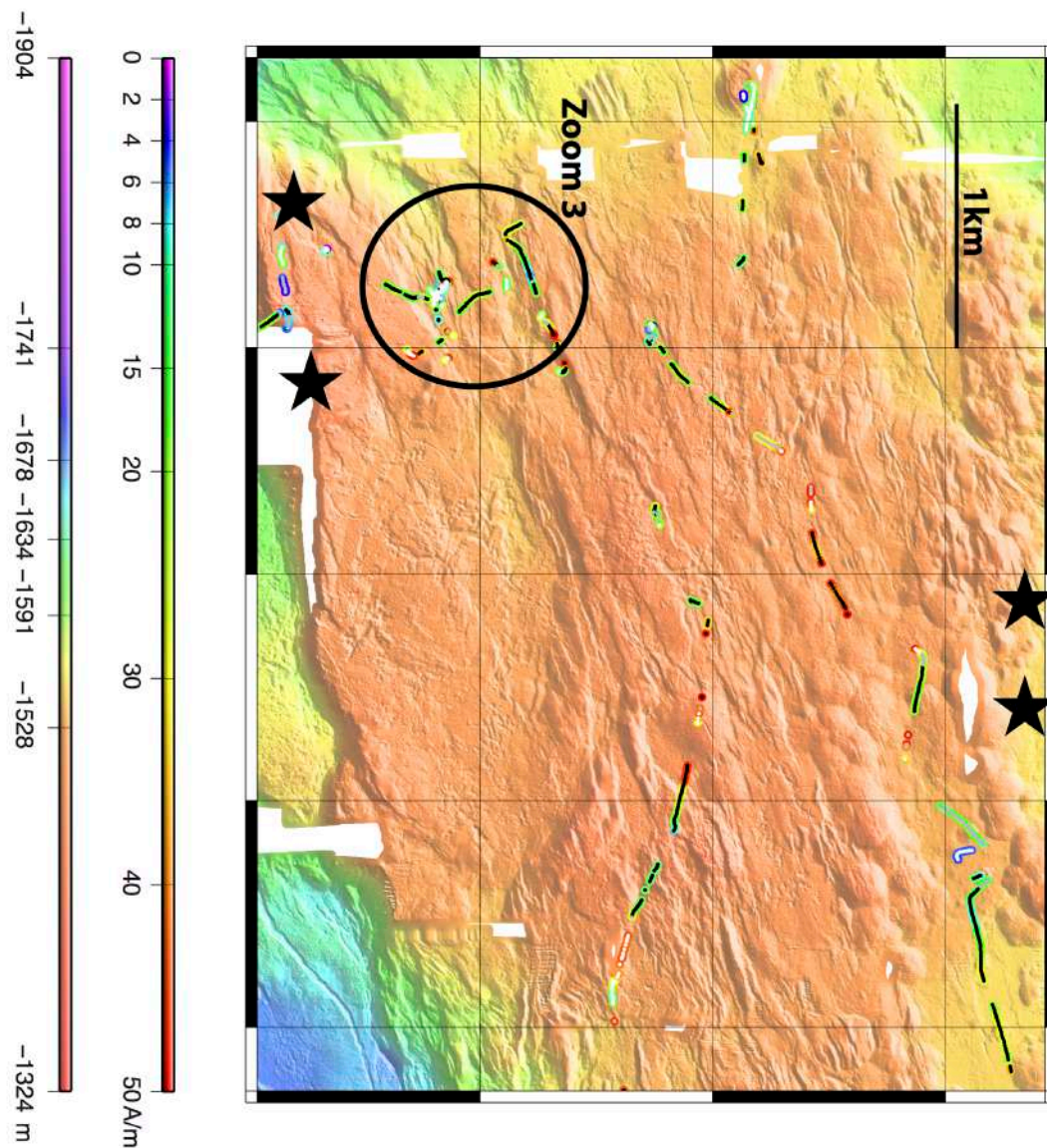
**Fig. 78 :** Carte bathymétrique et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautille sur le Zoom 1 de la zone 1.



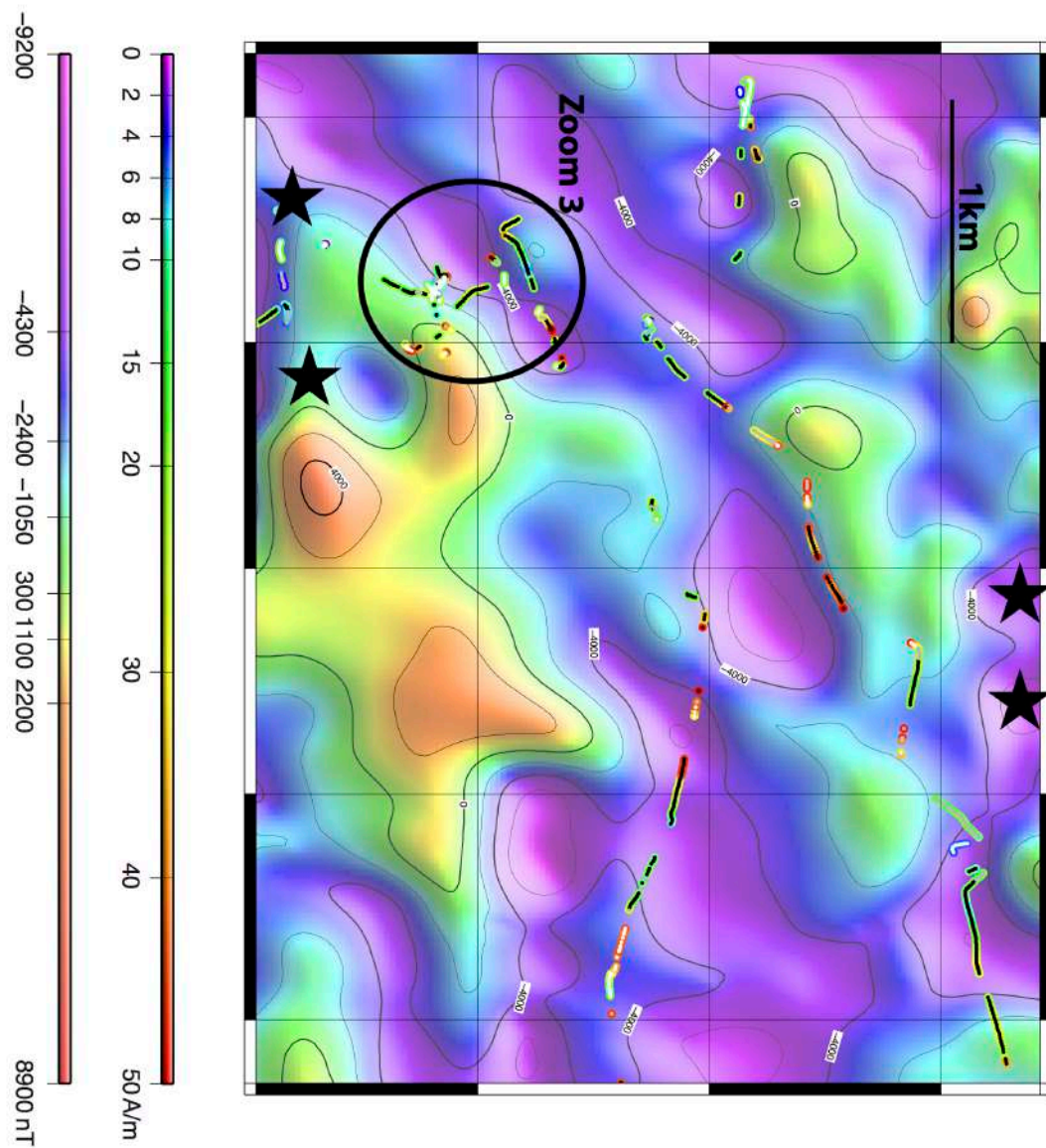
**Fig. 79 :** Carte d'anomalie magnétique réduite au pôle et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautile sur le Zoom 1 de la zone 1.



La carte du Zoom 2 se situe immédiatement au Nord du Zoom 1 (Figures 80 et 81). Elle est centrée sur la partie Nord du domaine volcanique. Sa profondeur est relativement faible et plusieurs sites hydrothermaux y ont été observés, mais pour certains d'entre eux (représentés par des étoiles noires sur les figures 80 et 81), les calculs d'aimantation n'ont pas pu être réalisés. Le site hydrothermal correspondant au zoom 3 sera détaillé après. En dehors des zones hydrothermales, les aimantations calculées sont assez variables. La partie la plus haute d'un point de vue bathymétrique correspond aux zones où les aimantations calculées sont fortes. Il pourrait donc s'agir de la partie la plus jeune où se trouvent des basaltes frais et fortement aimantés.

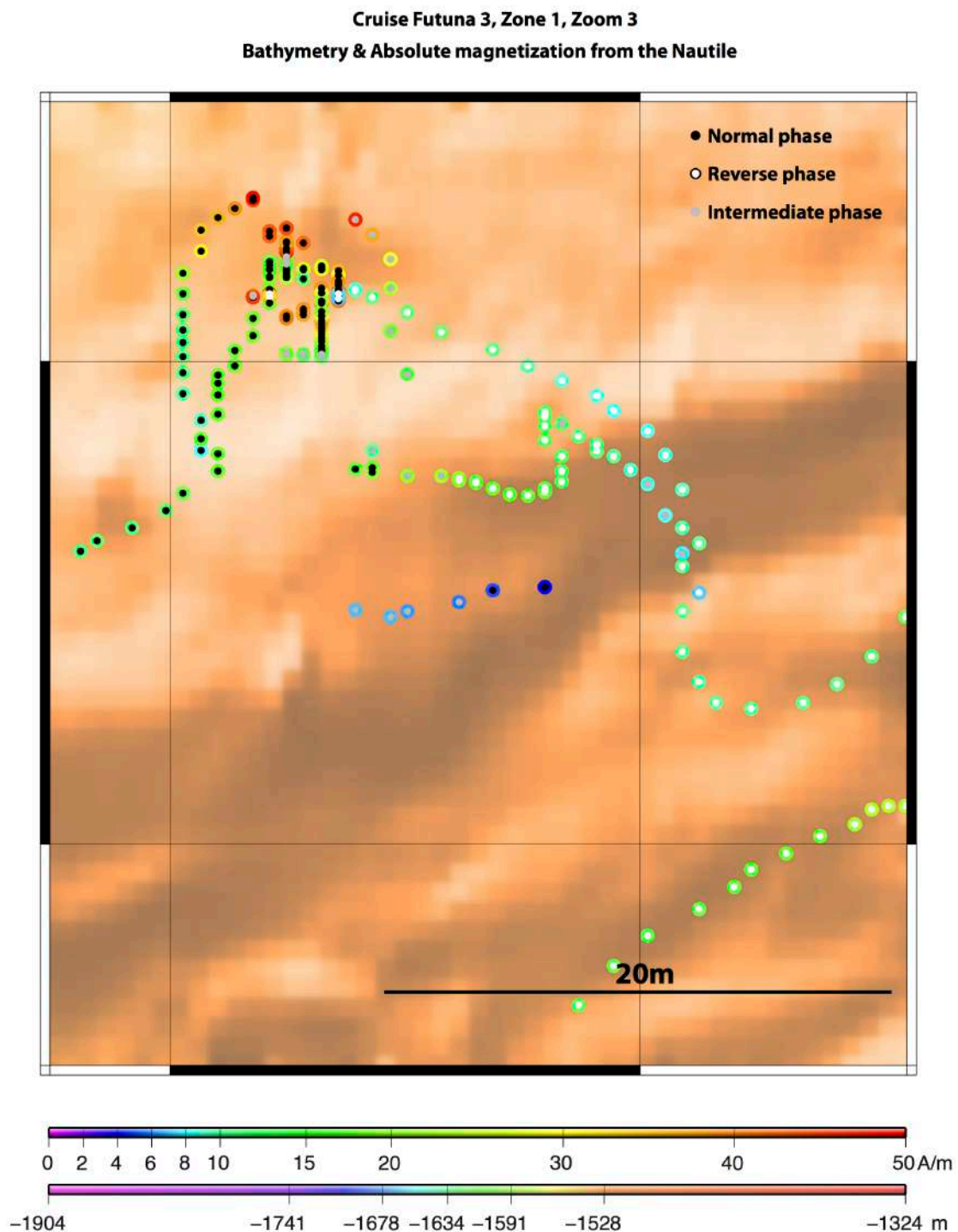


**Fig. 80 :** Carte bathymétrique et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautilé sur le Zoom 2 de la zone 1.



**Fig. 81 :** Carte d'anomalie magnétique réduite au pôle et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautile sur le Zoom 2 de la zone 1.

La carte du Zoom 3 présentée en figure 82 se focalise sur l'un des sites hydrothermaux découverts au cours des plongées du Nautilé. L'échelle reportée sur la carte traduit sa taille très limitée, de l'ordre de la dizaine de mètres. Ce site présente des aimantations faibles à moyennes, en accord avec son substrat basaltique. Les valeurs d'aimantation plus fortes observées immédiatement au Nord du site pourraient correspondre à des zones moins altérées.

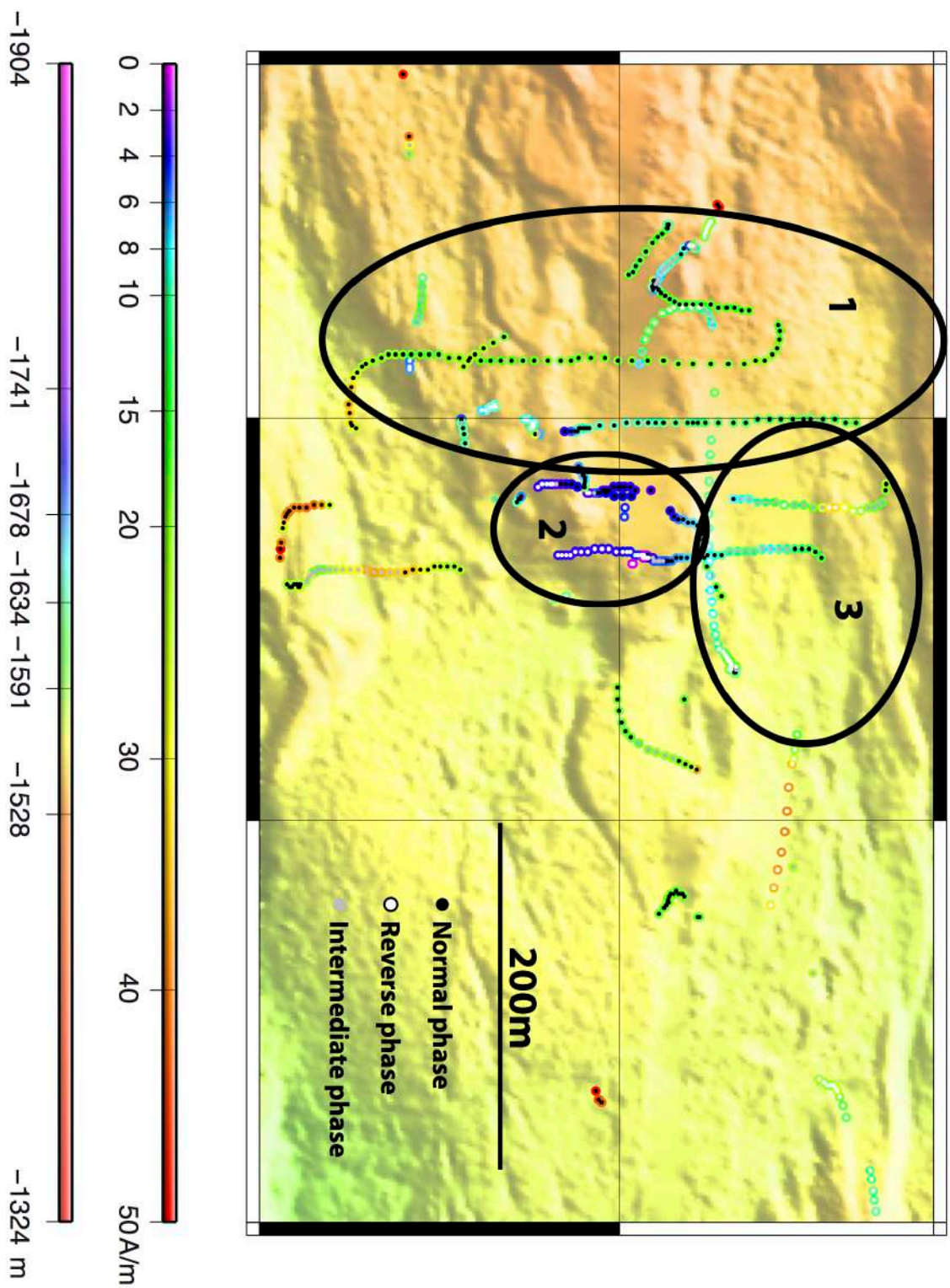


**Fig. 82** : Carte bathymétrique et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautilé sur le Zoom 3 de la zone 1.

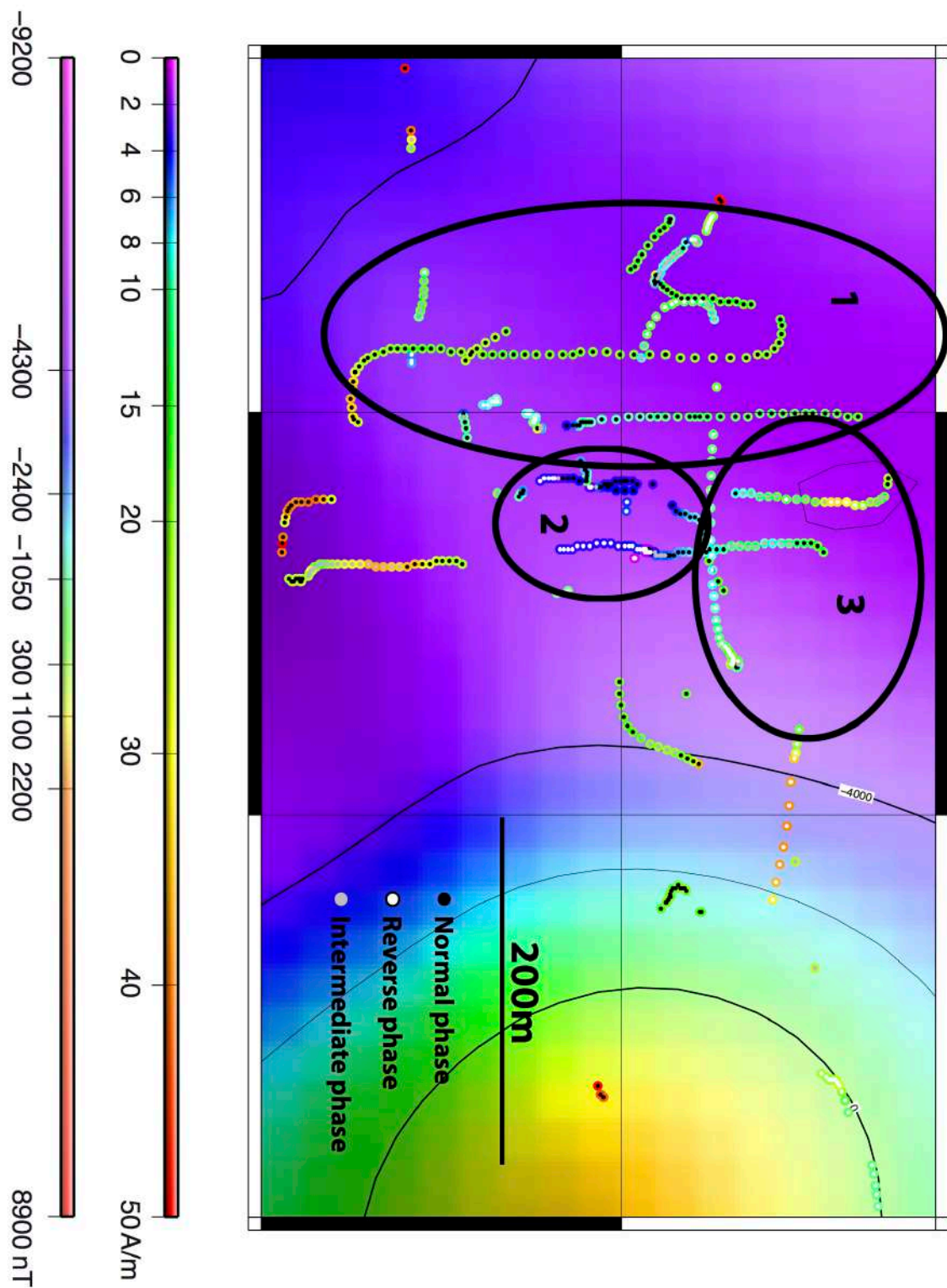
Le Zoom 4 reprend l'intégralité d'une plongée centrée sur une zone d'activité hydrothermale (Figures 83 et 84). Les aimantations qui y sont calculées se caractérisent par leur grande homogénéité en termes d'intensités et de polarités. Ainsi, les zones 1 et 2 se définissent par des valeurs voisines de 15A/m et une polarité généralement normale. Cette polarité illustre l'aspect récent de la structure.

Les parties Sud et Est sont plus excentrées et probablement moins affectées par l'activité hydrothermale. Les aimantations calculées y sont logiquement plus élevées. Sur le site proprement dit (zone 2), les aimantations sont nettement plus faibles, en accord avec les travaux antérieurs traitant de la signature magnétique des sites hydrothermaux sur substrat basaltique. La polarité de cette zone peu aimantée doit être considérée comme mal définie car les polarités observées (normale à l'Ouest et inverse à l'Est) résultent de la comparaison de signaux de faible amplitude.

La carte d'anomalies magnétiques réduites au pôle (Figure 84) confirme les aimantations calculées en présentant une forte anomalie négative à la verticale du site pouvant être liée à une désaimantation.



**Fig. 83 :** Carte bathymétrique et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautille sur le Zoom 4 de la zone 1.

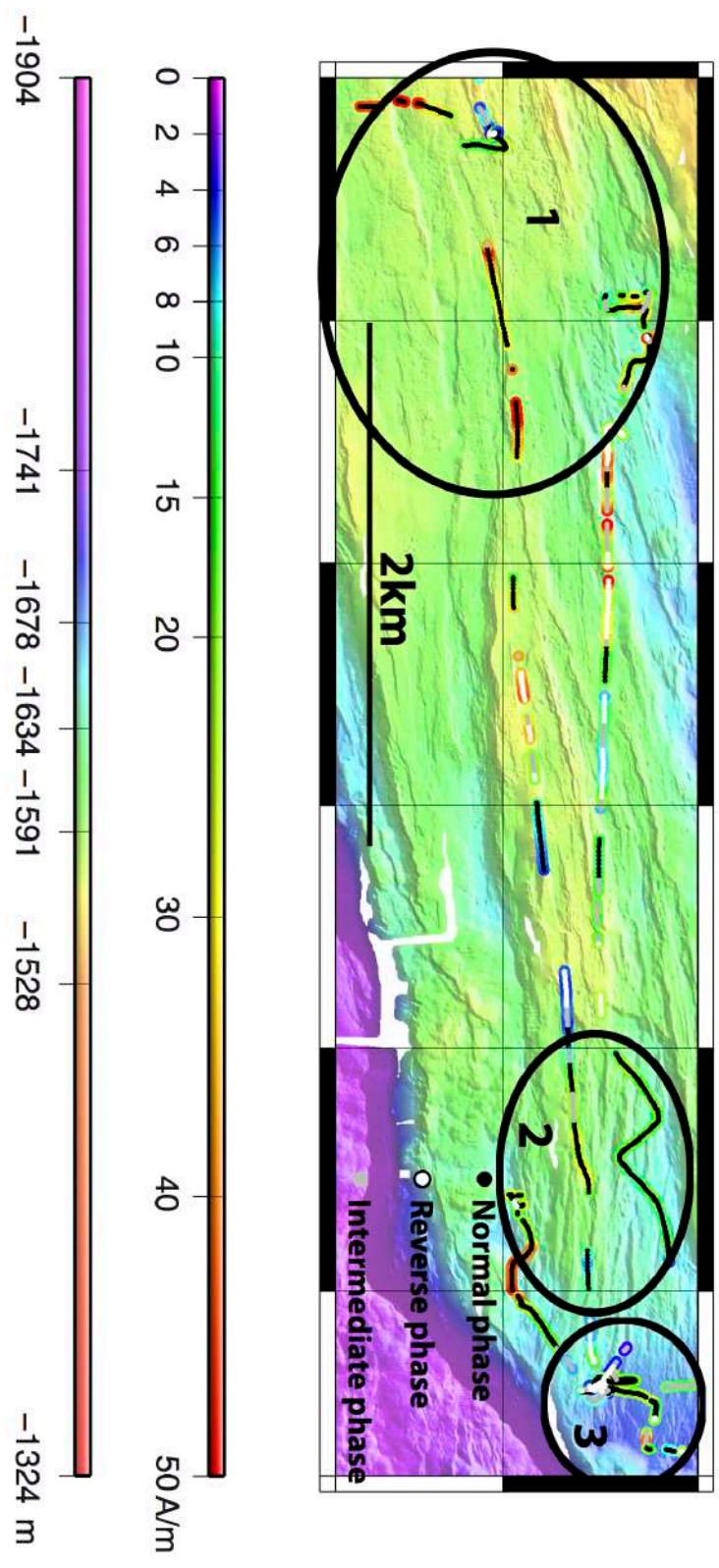


**Fig. 84 :** Carte d'anomalie magnétique réduite au pôle et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautile sur le Zoom 4 de la zone 1.

La partie orientale du domaine volcanique (Zoom 5) a également fait l'objet de plongées du Nautile (Figures 85 et 86). Plusieurs transits rectilignes y ont été réalisés.

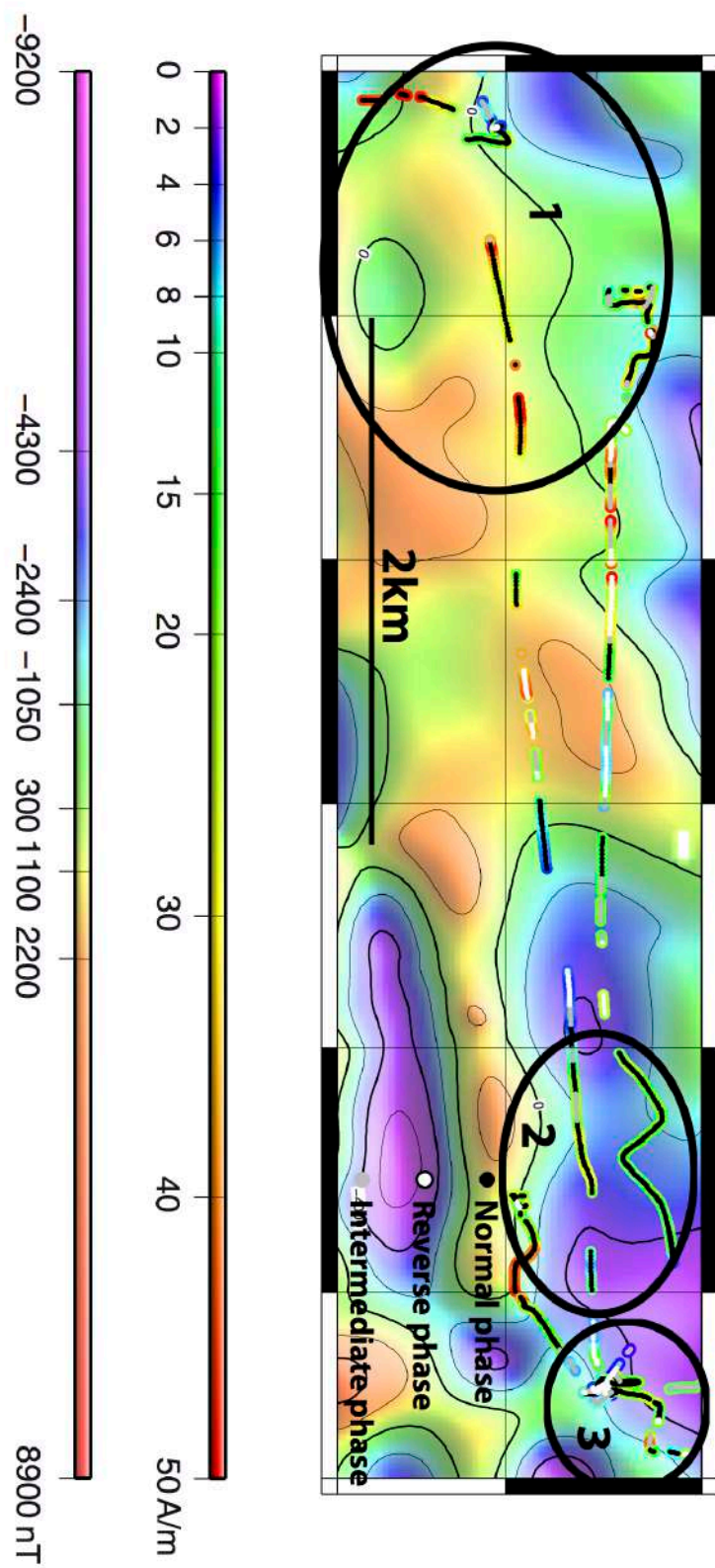
Dans cette zone, les failles ont une orientation moyenne  $N80^\circ$  et les trajectoires du Nautile les recoupent avec un angle très fermé. La bathymétrie générale de la zone (Figure 85) indique que le rift situé immédiatement au Nord et progressant vers l'Ouest semble être en train de couper ce plateau en deux parties distinctes. Ce plateau pourrait donc être une structure antérieure au début du processus de rifting local survenant dans cette région. Sachant que la profondeur moyenne de cette zone est plus importante que celle du principal volcan, il est donc possible que la formation de ce plateau remonte à une époque antérieure à celle du volcan, qui se serait ensuite progressivement construit par dessus.

La zone 1 se caractérise par des polarités normales et des valeurs moyennes d'aimantation plus élevées, suggérant la présence de basaltes récents. En progressant vers l'Est, après une zone alternant aimantations fortes et faibles et polarités inverses et normales, on atteint la zone 2, caractérisée par ses polarités exclusivement normales et ses aimantations voisines de 15A/m. La grande homogénéité laisse de nouveau penser qu'il s'agit de basaltes récents mais néanmoins affectés par des failles.



**Fig. 85 :** Carte bathymétrique et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautilus sur le Zoom 5 de la zone 1.





**Fig. 86 :** Carte d'anomalie magnétique réduite au pôle et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautile sur le Zoom 5 de la zone 1.

### **3) Zone 2**

La seconde zone d'exploration n'a fait l'objet que de 2 plongées de l'AUV et 2 plongées du Nautille (dont une seule avec le magnétomètre de l'IPGP). Sa surface est par conséquent plus restreinte que la précédente.

#### **a) Données de l'AUV**

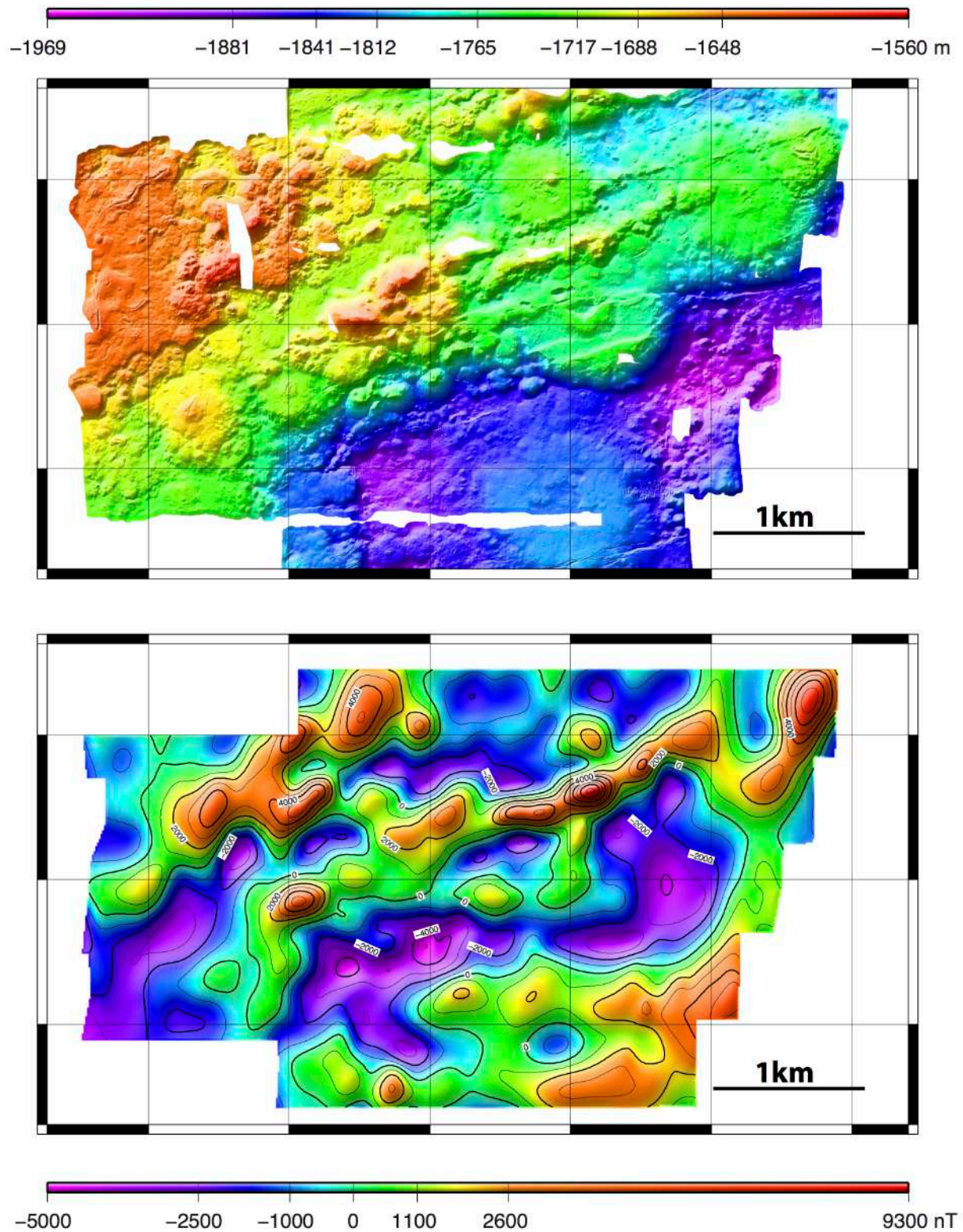
Les données bathymétriques et magnétiques de l'AUV sur la zone 2 sont présentées en figure 87.

Cette région est caractérisée par la superposition de nombreux édifices volcaniques de deux types : de grands édifices plats, « en galette » et de petits édifices coniques formant des rides volcaniques. Deux rides s'étendent suivant une direction N60° à N70° dans la partie la moins profonde du levé, au Nord-Ouest. Ces rides sont marquées par une forte anomalie magnétique positive. Les observations directes issues des plongées du Nautille montrent que ces zones sont constituées de basaltes récents et peu sédimentés, dont les aimantations probablement fortes créent les anomalies magnétiques positives observées.

Peu faillées, ces rides constituent la partie la plus récente du levé et semblent recouvrir les édifices « en galette ». Ces derniers, cantonnés à la partie orientale du levé, sont faillés. Leur signature magnétique varie: certains présentent une anomalie magnétique positive forte ou assez forte, d'autres sont marqués par une anomalie négative qui suggère qu'ils auraient pu se former durant la période de polarité inverse du champ magnétique de Matuyama, antérieur à 780 000 ans. Le sommet des édifices les plus gros montre une anomalie de moindre amplitude.

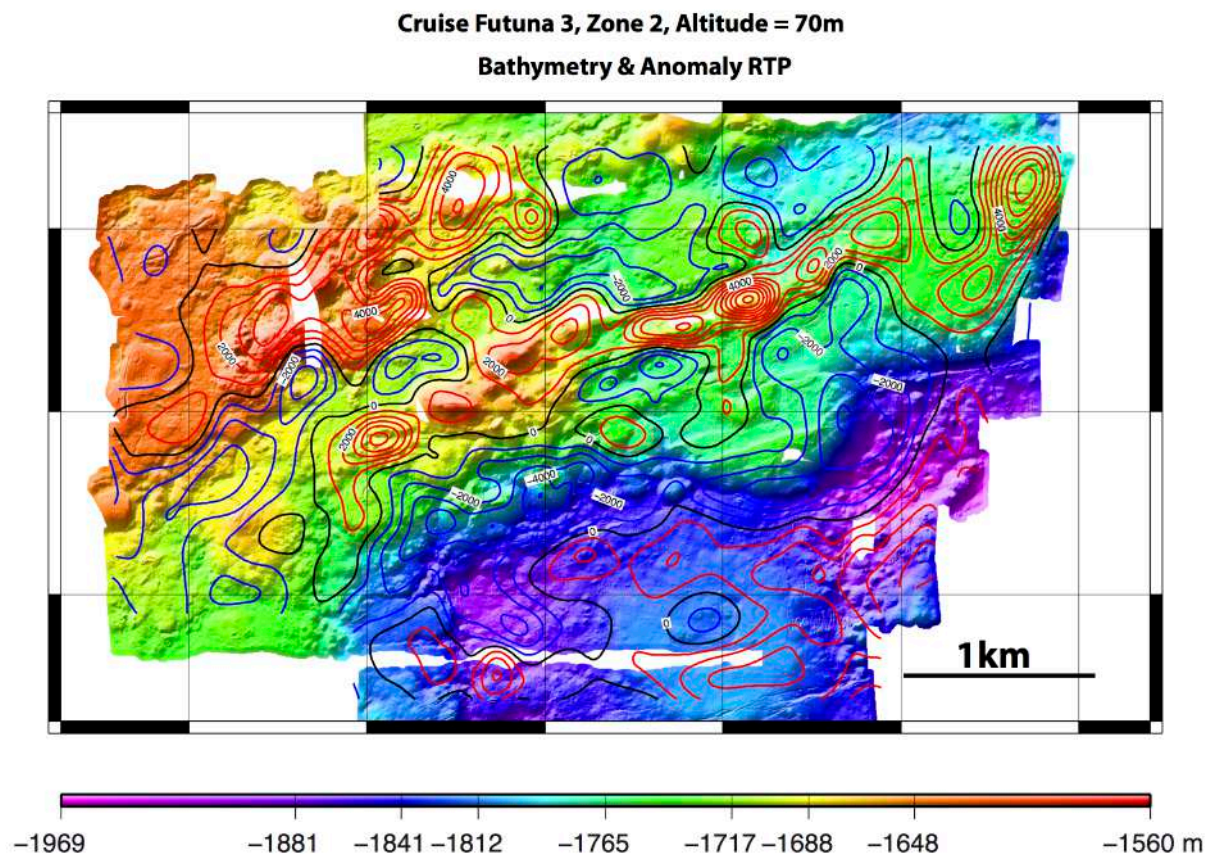
La présence probable de volcans porteurs d'une aimantation inverse crée une catégorie supplémentaire d'anomalies magnétiques négatives et complique la recherche des sites hydrothermaux. La zone la plus prometteuse a été découverte dans la partie septentrionale du levé, marquée par une large anomalie négative sur les données de l'AUV.

Cruise Futuna 3, Zone 2, Altitude = 70m  
Bathymetry (Top) & Anomaly RTP (Bottom)



**Fig. 87:** Bathymétrie (en haut) et anomalie magnétique réduite au pôle (en bas) de la Zone 2.

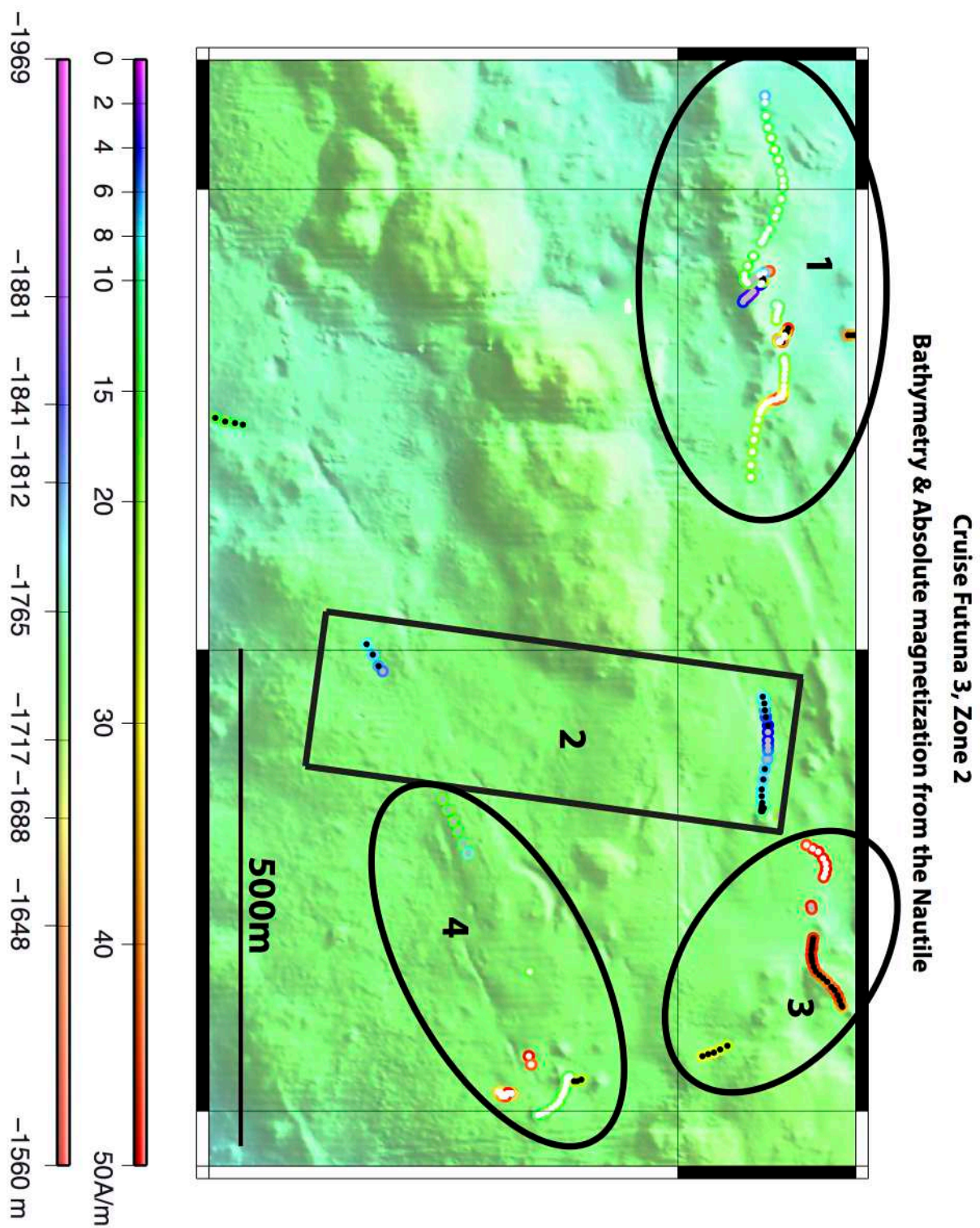
La corrélation entre l'anomalie magnétique réduite au pôle et la bathymétrie ressort d'une manière flagrante sur la figure 88 et permet d'établir un lien direct entre l'influence des structures géologiques et les anomalies observées.



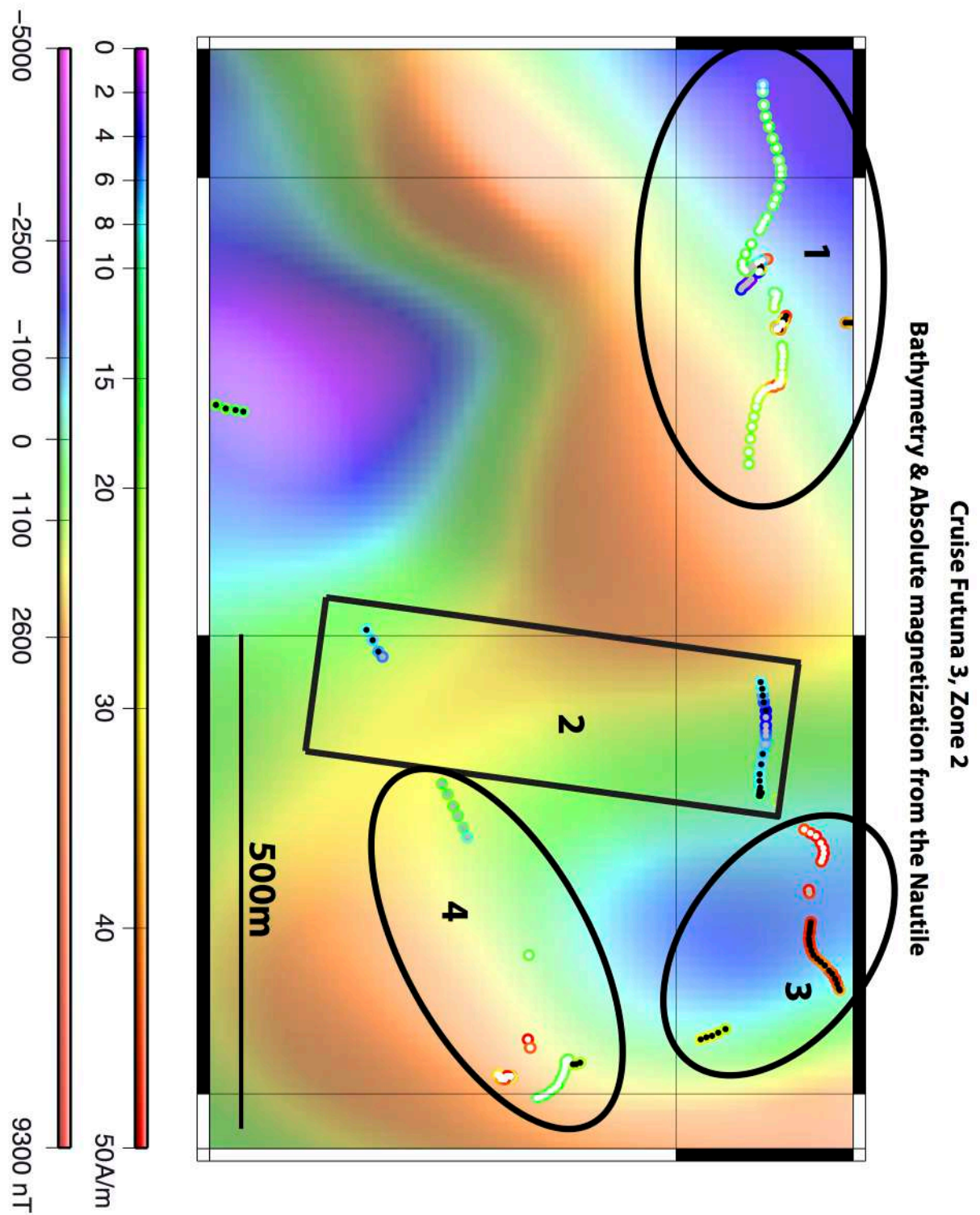
**Fig. 88 :** *Superposition de la bathymétrie de la zone 2 fournie par le sondeur multifaisceaux de l'AUV avec les contours de la carte d'anomalies magnétiques réduites au pôle. Les isocontours suivent très bien les principaux reliefs géologiques.*

## **b) Données du Nautilé**

Deux plongées du Nautilé ont eu lieu dans cette zone mais une seule a permis d'acquérir des données magnétiques vectorielles. Les résultats sont présentés en figures 89 et 90. Ils peuvent être séparés en quatre parties distinctes, se différenciant les unes des autres par les valeurs moyennes de l'aimantation où par les polarités.



**Fig. 89 :** Carte bathymétrique et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautilie sur la zone 2.



**Fig. 90** : Carte d'anomalie réduite au pôle et d'aimantations absolues calculées à partir du modèle 3D le long des plongées du Nautilie sur la zone 2.

La zone 2 présente une meilleure homogénéité des polarités. La zone 1 est caractérisée par des aimantations moyennes relativement faibles et une polarité inverse. Cette dernière se serait donc formée avant la dernière inversion du champ magnétique. Dans la zone 2, les aimantations baissent sensiblement et leur polarité devient normale, résultat d'une possible activité hydrothermale.

Dans la zone 3, les aimantations sont nettement plus élevées et les polarités passent d'inverse à normale. Ce secteur correspond au prolongement d'une ride volcanique jeune, probablement très aimantée.

Dans la zone 4, les aimantations restent assez fortes mais la polarité est inverse, en accord avec les résultats de l'AUV sur les volcans en galette.

# Conclusion générale

Nos travaux ont permis de confirmer et compléter les précédents résultats obtenus sur les sites hydrothermaux actifs à substrat basaltique, dont la signature magnétique négative constitue un phénomène pérenne demeurant après la fin de l'activité hydrothermale. Cette constatation démontre donc que l'altération des minéraux joue un rôle prépondérant dans le défaut d'aimantation par rapport à la désaimantation thermique. Son application est immédiate dans le cadre de la prospection minière sous-marine à l'échelle locale, actuellement en plein essor en raison du coût élevé des matières premières.

Le magnétisme s'intègre ainsi comme un élément dans les approches multi-outils en offrant la possibilité de détecter les sites fossiles. L'une des difficultés est toutefois de parvenir à discriminer l'altération hydrothermale et les zones d'éboulis.

Par ailleurs, nous avons établi que les sites hydrothermaux de haute température sur substrat ultramafique, que l'on ne trouve que sur les dorsales lentes, se caractérisent généralement par une signature magnétique positive, opposée à celle des sites sur substrat basaltique et correspondant à une aimantation plus élevée que celle du milieu environnant. Ce contraste anormal peut s'expliquer de deux manières :

- (1) La présence de serpentines très aimantées en raison du contact entre les péridotites et les fluides hydrothermaux de haute température.
- (2) Une altération différentielle de la magnétite présente dans la serpentine des sites hydrothermaux et dans celle située en dehors de la zone de circulation des fluides réducteurs. Cette variation est à l'origine d'une zone moins désaimantée au niveau du site actif.

À condition que la nature géologique du plancher océanique soit connue avec précision, il est ainsi possible d'utiliser le magnétisme comme outil de détection des sites actifs et inactifs.

Le magnétisme de haute résolution, proche du fond océanique, représente ainsi l'un des rares outils géophysiques et géologiques disponibles pour localiser les sites



hydrothermaux actifs et inactifs. Peu coûteuse, sa mise en œuvre accroît les chances de découvertes si les données sont traitées en temps réel.

L'opportunité de tester cette méthode lors des campagnes organisées par l'Ifremer à proximité de l'île de Futuna m'a permis d'en confirmer l'intérêt et la validité. Au terme de ces campagnes, les AUV apparaissent comme des outils d'une qualité exceptionnelle permettant de couvrir de vastes surfaces rapidement, tout en offrant une excellente résolution bathymétrique et magnétique. D'un point de vue scientifique, ils constituent ainsi un complément idéal aux sous-marins habités et aux techniques d'exploration régionales permettant de découvrir les cibles sur lesquelles réaliser les explorations locales près du fond, en offrant une vue générale permettant de localiser des cibles potentiellement intéressantes sur lesquelles plongeront ces derniers.

# General conclusion

This work confirms and completes previous studies of active basalt-hosted hydrothermal sites. It is now established that demagnetization remains after the end of activity, indicating that alteration is the main cause of the low magnetic signature of these sites compared to thermal demagnetization. This observation is really useful for the quickly developing deep-sea mining exploration, as a result of increasing prices of raw materials.

We also demonstrated that high-temperature, ultramafic-hosted hydrothermal sites, found on slow-spreading centers, have a positive magnetic signature, opposite to the one of basalt-hosted hydrothermal sites and corresponding to a stronger magnetization. This anomalous contrast may be a result of two phenomena :

- (1) Highly magnetized serpentines are created by contact between peridotites and high-temperature hydrothermal fluids.
- (2) A lower alteration of hydrothermal magnetites, as a result of the circulation of reductive hydrothermal fluids. This contrast therefore generates a less demagnetized area on the hydrothermal site.

Assuming that the geological basement is known (basaltic or ultramafic rocks), it is therefore possible to use magnetism as a tool to detect active and inactive hydrothermal sites. High-resolution, near-seafloor magnetism is consequently one of the few available tools to detect hydrothermalism. If data are processed in real time, it greatly improves the probability of locating hydrothermal deposits.

The opportunity to test this method during cruises around Futuna Island (SW Pacific Ocean), allowed to demonstrate its validity and efficiency. After these cruises, AUVs appear to be efficient tools to cover large areas in a short time and to get high-resolution bathymetric and magnetic data. In a scientific point of view, they represent a perfect add-on to deep-sea submersibles, allowing to locate their diving targets.



# Travaux à venir

Les travaux menés au cours de cette thèse ont permis d'affiner nos connaissances sur la signature magnétique des sites hydrothermaux dans différents contextes géologiques, mais certains points demandent des études complémentaires.

Nous savons désormais que les sites hydrothermaux à substrat basaltique conservent leur signature magnétique après l'arrêt de l'activité hydrothermale et qu'elle résulte principalement de l'altération de la titanomagnétite en titanomaghémite par l'action des fluides de haute température. Cependant, en dehors de la partie Ouest de Rainbow, qui est inactive peu de temps, nous ne disposons d'aucune information concernant l'évolution de la signature magnétique des sites hydrothermaux à substrat ultramafique. Ce point demanderait à être éclairci par des mesures supplémentaires adaptées à ce type de cas, de manière à mieux contraindre l'origine de la forte aimantation observée.

Par ailleurs, la méthode d'inversion bayésienne de Honsho et al. (2012) reste à ce jour expérimentale et ne peut être appliquée qu'à de petites zones (telles qu'un levé à 10m au dessus d'un site hydrothermal), en raison notamment de la puissance de calcul requise. Il n'est donc, à l'heure actuelle, pas envisageable de l'employer sur de plus grandes zones. Il paraît donc indispensable de poursuivre les recherches dans ce sens afin de résoudre cette difficulté.

Enfin, ce travail pourrait trouver des applications dans d'autres environnements encore mal contraints. Un exemple pourrait consister à mener une étude comparative entre la signature magnétique des sites hydrothermaux le long des dorsales et ceux situés dans un contexte de volcanisme d'arc ou de point chaud.



## **Remerciements**

Je remercie tous ceux qui, au cours de cette thèse, m'ont aidé à avancer, que ce soit d'un point de vue scientifique ou personnel. Mes premiers remerciements vont bien entendu à mon directeur de thèse, Jérôme Dymont. Je remercie également mon co-encadrant, Yves Fouquet, pour son aide apportée au cours des missions océanographiques autour de l'île de Futuna, au cours desquelles il a su me faire bénéficier de son expertise en tant que géologue.

Je remercie le Dr. Chie Honsho, de l'Université de Tokyo pour son savoir-faire en matière de programmation et son accord pour utiliser ses codes.

Merci à tous les membres de mon jury : Mathilde Cannat en tant que présidente mais également pour ses conseils sur les questions de géologie, Maurice Tivey et Fabio Caratori-Tontini pour avoir eu la patience de lire ma thèse alors qu'elle n'était pas rédigée dans leur langue.

Je remercie bien évidemment ma famille au sens large pour avoir su m'épauler dans les moments de remise en question et d'hésitations. Enfin, un grand merci à toute l'équipe de l'IPG pour son chaleureux accueil.



## **Références**

**Aballea M.**, Radford K. J., Appriou P., Bougault H., Charlou J. L., Donval J. P., Etoubleau J., Fouquet Y., German C. R., and Miranda M., Manganese distribution in the water column near the Azores triple junction along the Mid-Atlantic Ridge and the Azores domain, *Deep-Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(8), p. 1319–1338, 1998.

**Alt J. C.**, Teagle D. A. H., Probing the TAG hydrothermal mound and stockwork : oxygen-isotopic profiles from deep ocean drilling, Herzig, P.M., Humphris, S.E., Miller, D.J., and Zierenberg, R.A. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Vol. 158, 1998.

**Anderson D. L.**, *Composition of the Earth*, *Science*, 243(4889), p. 367–370, 1989.

**Batuev B. N.**, et al., Massive sulfide deposits discovered and sampled at 14°45'N, Mid-Atlantic Ridge. *Bridge Newsletter* 6, p. 6–10, 1994.

**Bel'tenev V.**, Nescheretov A., Shilov V., Ivanov V., Shagin A., Stepanova T. V., Cherkashev G. A., Batuev B., Samorarov M., Rozhdestvenskaya I., Andreeva I., Fedorov I., Davydov L., Romanova A., Rumyantsev A., Zaharov V., Luneva N., and Artemeva O., New discoveries at 12°58'N, 44°52'W, MAR : Professor Logachev-22 cruise, initial results, *InterRidge News*, 12(1), p. 13–14, 2003.

**Binns R. A.**, and Scott S. D., Actively forming polymetallic sulfide deposits associated with felsic volcanic rocks in the eastern Manus Back-Arc Basin, Papua-New-Guinea, *Economic Geology*, 88, p. 2226–2236, 1993.

**Borowski C.**, et al. New coordinates for the hydrothermal structures in the Logachev vent field at 14°45'N on the Mid-Atlantic Ridge. *InterRidge News* 16, p. 13–14, 2007.



**Bougault H.**, Charlou J. L., Fouquet Y., Needham H. D., Vaslet N., Appriou P., Baptiste P. J., Rona P. A., Dmitriev L., and Silantiev S., Fast and slow spreading ridges; structure and hydrothermal activity, ultramafic topographic highs, and CH<sub>4</sub> output, Rona, Peter A., Thompson, Geoffrey A, Special section on Atlantic hydrothermal activity. NOAA, Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, Miami, FL, United-States. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth and Planets.* 98(6), p. 9643–9651, 1993.

**Brocher T. M.** (Woods Hole Oceanogr. Inst., Woods Hole, MA, United States), Brink T., Uri S., Variations in oceanic layer 2 elastic velocities and their correlation to lithospheric flexure, AGU fall meeting. Anonymous, 1985.

**Cann J. R.**, Blackman D. K., Smith D. K., McAllister E., Janssen B., Mello S., Avgerinos E., Pascoe A. R., and Escartin J., Corrugated slip surfaces formed at ridge-transform intersections on the Mid-Atlantic Ridge, *Nature (London)*, 385(6614), p. 329–332, 1997.

**Cannat M.**, Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges, *Journal of Geophysical Research*, 98, p. 4163–4172, 1993.

**Cannat M.**, and Casey J. F., An ultramafic lift at the Mid-Atlantic Ridge: Successive stages of magmatism in serpentinized peridotites from the 15°N region, in mantle and lower crust exposed in oceanic ridges and in ophiolites, edited by R. L. M. Vissers and A. Nicolas, p. 5–34, 1995.

**Cannat M.**, Lagabrielle Y., Bougault H., Casey J., de Coutures N., Dmitriev L., and Fouquet Y., Ultramafic and gabbroic exposures at the Mid-Atlantic Ridge; geological mapping in the 15 degrees N region, in *The Adolphe Nicolas volume.*, edited by Mainprice D. et al., p. 193–213, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1997.

**Cannat M.**, Sauter D., Mendel V., Ruellan E., Okino K., Escartin J., Combiér V. and Baala M., Modes of seafloor generation at a melt-poor ultraslow spreading ridge, *Geology*, 34(7), 605, 2006.

**Cannat M.**, Mangeney A., Ondréas H., Fouquet Y., Normand A., High resolution bathymetry reveals contrasting landslide activity shaping the walls of the Mid-Atlantic Ridge axial valley, *Geochimistry Geophysics Geosystems*, Vol. 4, Number 4, DOI : 10.1002/ggge.20056, ISSN : 1525-2027, 2013.

**Caratori-Tontini F.**, Davy B., De Ronde C., Embley R. W., Leybourne M., Tivey M. A., Crustal magnetization of Brothers Volcano, New Zealand, Measured by Autonomous Underwater Vehicles : Geophysical Expression of a Submarine Hydrothermal System, *Economic Geology*, Vol. 107, p. 1571–1581, 2012.

**Carbotte S. M.**, Ryan W. B. F., Jin W., Cormier M. H., Bergmanis E., Sinton J., and White S., Magmatic subsidence of the East Pacific Rise (EPR) at 18°140S revealed through fault restoration of ridge crest bathymetry, *G<sup>3</sup>*, 4(1), 1008, DOI : 10.1029/2002GC000337, 2003.

**Charlou J. L.**, Bougault H., Appriou P., Nelsen T., and Rona P., Different TDM/CH<sub>4</sub> hydrothermal plume signatures; TAG site at 26 degrees N and serpentinized ultrabasic diapir at 15 degrees 05'N on the Mid-Atlantic Ridge, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(11), p. 3209–3222, 1991.

**Charlou J. L.**, Donval J. P., Douville E., Knoery J., Fouquet Y., Bougault H., Jean B. P., Stievenard M., and German C. R., High methane flux between 15 degrees N and the Azores triple junction, Mid-Atlantic Ridge; hydrothermal and serpentinization processes, in AGU 1997 fall meeting., edited by Anonymous, p. 831, American Geophysical Union, Washington, DC, United States, 1997.

**Charlou J. L.**, Fouquet Y., Bougault H., Donval J. P., Etoubleau J., Jean B. P., Dapoigny A., Appriou P., and Rona P. A., Intense CH<sub>4</sub> plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15°20'N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(13), p. 2323–2333, 1998.

**Charlou J. L.**, Donval J. P., Fouquet Y., Jean-Baptiste P., Holm N., Geochemistry of high H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14'N, MAR). *Chemical Geology* 191, p. 345–359, 2002.

**Charlou J. L.**, Donval J. P., Konn C., Ondréas H., Fouquet Y., Jean-Baptiste P., Fourré E. High production and fluxes of H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> and evidence of abiotic hydrocarbon synthesis by serpentinization in ultramafic-hosted hydrothermal systems on the Mid-Atlantic Ridge p. 265–296 *Geophysical Monograph Series 188* by the American Geophysical Union. 10.1029/2008GM000773, 2010.

**Cherkashev G. A.**, Ashadze A. M., Gebruk A. V., New fields with manifestations of hydrothermal activity in the Logachev area (14°N, Mid-Atlantic Ridge). *InterRidge News* 9, p. 26–27, 2000.

**Cherkashev G. A.**, Bel'tenev V., Ivanov V., Lazareva L., Samovarov M., Shilov V., Stepanova T., Glasby G. P., and Kuznetsov V., Two New Hydrothermal Fields at the Mid-Atlantic Ridge, *Marine Georesources & Geotechnology*, 26(4), DOI: 10.1080 / 10641190802400708 | PII 10641190906370498, 2008.

**Corliss J. B.**, Dymond J., Gordon L. I., Edmond J. M., von Herzen R. P., Ballard R. D., Green K., Williams D., Bainbridge A., Crane K., and van Andel T. H., Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. *Science*, 203, p. 1073–1083, 1979.

**De Ronde C.** et al., Submarine hydrothermal activity along the mid Kermadec Arc, New Zealand: Large scale effects on venting. *G<sup>3</sup>*, 8, DOI: 10.1029/2006GC001495, 2007.

**Delaney J. R.**, Robigou V., McDuff R. E., and Tivey M. A., Geology of a vigorous hydrothermal system on the Endeavour segment, Juan de Fuca Ridge: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, p. 663–682, 1992.

**Deschamps A.**; Fujiwara T., Asymmetric accretion along the slow-spreading Mariana Ridge, *G<sup>3</sup>*, 4 (10): 8622, 2003.

**Dick H. J. B.**, Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism, in *Magmatism in the ocean basins.*, edited by A. D. Saunders and M. J. Norry, p. 71–105, Woods Hole Oceanographic Institution. Woods Hole, MA, United States, Geological Society of London, p. 115, 1989.

**Dick H. J. B.**, Lin J., and Schouten H., An ultraslow spreading class of ocean ridge, *Nature*, 426, p. 405–412, 2003.

**Douville E.**, Charlou J. L., Oelkers E. H., Bienvenu P., Colon C. F. J., Donval J. P., Fouquet Y., Prieur D., and Appriou P., The Rainbow vent fluids (36°14'N, MAR) : the influence of ultramafic rocks and phase separation on trace metal content in Mid-Atlantic Ridge hydrothermal fluids. *Chemical Geology*, 184, p. 37–48, 2002.

**Edmond J. M.**, Measures C, McDuff R. E., Chan L. H., Collier R., Grant B., Gordon L. I., and Corliss J. B., Ridge crest hydrothermal activity and the balances of the major and minor elements in the ocean: The Galapagos data. *Earth and Planetary Science Letters*, 46, p. 1–18, 1979.

**Escartin J.**, and Lin J., Tectonic modification of axial crustal structure; evidence from spectral analyses of residual gravity and bathymetry of the Mid-Atlantic Ridge flanks, *Earth and Planetary Science Letters*, 154(1-4), p. 279–293, 1998.

**Escartin J.**, and Cannat M., Ultramafic exposures and the gravity signature of the lithosphere near the Fifteen-Twenty fracture zone (Mid-Atlantic Ridge, 14°–16.5°N), *Earth and Planetary Science Letters*, 171(3), p. 411–424, 1999.

**Escartin J.**, Smith D. K., Cann J., Schouten H., Langmuir C. H., and Escrig S., Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere, *Nature*, 455(7214), p. 790–794, 2008.

**Fabri M. C.**, Bargain A., Briand P., Gebruk A., Fouquet Y., Morineaux M., Desbruyeres D., The hydrothermal vent community of a new deep-sea field, Ashadze-1 on the Mid-Atlantic Ridge, Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, page 1 of 13. Marine Biological Association of the United Kingdom, DOI: 10.1017/S0025315410000731, 2010.

**Fouquet Y.**, Von Stackelberg U., Charlou J. L., Erzinger J., Herzig P., Mühe R., and Wiedicke M. Metallogenesis in back-arc environments: The Lau Basin example. Economic Geology 88, p. 154–181, 1993.

**Fouquet Y.**, Marcoux E., Lead isotope systematics in Pacific hydrothermal sulfide deposits, Journal of Geophysical Research, 100, B4, DOI: 10.1029/94JB02646, 1995.

**Fouquet Y.**, Where are the large hydrothermal sulphide deposits in the oceans?, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a Mathematical and Physical Engineering Sciences, Feb 15, 355 (1723), p. 427–440, 1997.

**Fouquet Y.**, Charlou J. L., Ondréas H., Radford-Knoery J., Donval J. P., Douville E., Apprioual R., Cambon P., Pellé H., Landuré J. Y., Normand A., Ponsevera E., German C., Parson L., Barriga F., Costa I., Relvas J., and Ribeiro A., Discovery and first submersible investigations on the Rainbow Hydrothermal Field on the MAR (36°14N), paper presented at American Geophysical Union Fall Meeting (Eos Transactions), AGU, San Francisco, 1997a.

**Fouquet Y.**, Barriga F., Charlou J. L., Elderfield H., German C. R., Ondréas H., Parson L., Radford-Knoery J., Relvas J., Ribeiro A., Schultz A., FLORES diving cruise with the Nautilus near the Azores. First dives on the Rainbow field : hydrothermal seawater/mantle interaction, InterRidge News, 7(1), p. 24–28, 1998a.

**Fouquet Y.**, Henry K., Knott R., Cambon P., Ocean Drilling Program, Shipboard Scientific Party, College Station, Tx, United States, Geochemical section of the TAG hydrothermal mound, in Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results, TAG, drilling an active hydrothermal system on a sediment-free slow-spreading ridge; covering Leg 158 of the cruises of the drilling vessel JOIDES Resolution, Las Palmas, Gran Canaria, to Las Palmas, Gran Canaria, Site 957, 23 September-22 November 1994., edited by M. Herzig Peter, et al., p. 363–387, Texas A & M University, Ocean Drilling Program, College Station, TX, United States, 1998b.

**Fouquet Y.**, Cherkashev G., Charlou J. L., Ondréas H., Birot D., Cannat M., Bortnikov N., Silantiev S., Sudarikov S., Cambon-Bonavita M. A., Desbruyères D., Fabri M. C., Querellou J., Hourdez S., Gebruk A., Sokolova T., Hoisé E., Mercier E., Konn C., Donval J. P., Etoubleau J., Normand A., Stephan M., Briand P., Crozon J., Fernagu P., and Buffier E., Serpentine cruise - Ultramafic Hosted Hydrothermal Deposits on the Mid Atlantic Ridge: First Submersible Studies on Ashadze 1 and 2, Logachev 2 and Krasnov Vent Fields InterRidge News 18, p. 15–19, 2008.

**Fouquet Y.**, Cambon P., Etoubleau J. Charlou J. L., Ondreas H., Barriga F., Cherkashev G., Semkova T., Poroshina I., Bohn M., Donval J. P., Henry K., Murphy P., Rouxel O. Geodiversity of Hydrothermal Processes along the Mid-Atlantic Ridge – Ultramafic-Hosted Mineralization: a New Type of Oceanic Cu-Zn-Co-Au VMS Deposit, Revised version, AGU monograph, 2010.

**Fruh Green G. L.**, Kelley D. S., Bernasconi S. M., Karson J. A., Ludwig K. A., Butterfield D. A., Boschi C., and Proskurowski G., 30 000 years of hydrothermal activity at the Lost City vent field, Science, 301(5632), p. 495–498, 2003.

**Fujiwara T.**, Lin J., Matsumoto T., Kelemen P. B., Tucholke B. E., Crustal evolution of the Mid-Atlantic Ridge near the fifteen-twenty fracture zone in the last 5 Ma. *G<sup>3</sup>*, 4 (3). DOI: 10.1029/2002GC000364, 2003.

**Gebruk A. V.**, Chevaldonné P., Shank T., Lutz R. A., Vrijenhoek R. C., Deep-sea hydrothermal vent communities of the Logachev area (14°45'N, Mid-Atlantic Ridge): diverse biotopes and high biomass. *Journal of the Marine Biological Association of the UK* 80, p. 383–393, 2000.

**German C. R.**, and Parson L. M., Distributions of hydrothermal activity along the Mid-Atlantic Ridge; interplay of magmatic and tectonic controls, *Earth and Planetary Science Letters*, 160(3-4), p. 327–341, 1998.

**German C. R.**, Richards K., Lam M. M., Thurnherr A., Charlou J. L., Radford K. J., Donval J. P., Jean B. P., Dapoigny A., Cooper M., Rudnicki M., Elderfield H., Edmonds H., Green D., Patching J., Khripounoff A., Crassous P., Vangrisme A., Dixon D., and Herring P., A segment scale study of fluxes through the Rainbow hydrothermal plume, 36°N Mid-Atlantic Ridge, in AGU 1999 fall meeting, edited by Anonymous, p. 957–958, American Geophysical Union, Washington, DC, United States, 1999.

**Gibson H. L.**, Morton R. L., and Hudak G. J., Submarine volcanic processes, deposits, and environments favorable for the location of volcanic-associated massive sulfide deposits, in *Volcanic-associated massive sulfide deposits; processes and examples in modern and ancient settings.*, edited by C. T. Barrie and D. Hannington Mark, p. 13–51, Society of Economic Geologists, Socorro, NM, United States, 1999.

**Gracia E.**, Bideau D., Hekinian R., Lagabrielle Y., and Parson L. M., Along-axis magmatic oscillations and exposure of ultramafic rocks in a second-order segment of the Mid-Atlantic Ridge (33 degrees 43'N to 34 degrees 07'N), *Geology (Boulder)*, 25(12), p. 1059–1062, 1997.

**Grzesczyk A.** (Cent. Orstom Nouméa, Nouméa, New Caledonia), Eissen J. P.; Dupont J., Lefevre C., Maillet P., Monzier M., *Pétrographie et minéralogie des îles Futuna et Alofi, TOM de Wallis et Futuna (Pacifique Sud-Ouest)*, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre*, Vol. 305, Issue 2, p. 93–98, 1987.

**Grzesczyk A.** (Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres-Artois, Villeneuve d'Ascq, France), Monzier M., Lefevre C., Butterlin J., Dupont J., Eissen J. P., Glacon G., Maillet P., Muller C. Géologie des îles Futuna et Alofi (T.O.M. des îles Wallis et Futuna, Pacifique Sud-Ouest); Données préliminaires, *Géologie de la France*, Vol. 1988, Issue 2-3, p. 131–134, 1988.

**Grzesczyk A.** (U. S. T., Lille-Flandres-Artois, Laboratoire de Pétrologie, Villeneuve d'Ascq 59655, France), Lefevre C., Monzier M., Eissen J. P., Dupont J., Maillet P., Mise en évidence d'un volcanisme transitionnel Pliocène supérieur sur Futuna et Alofi (SW Pacifique); un nouveau témoin de l'évolution géodynamique Nord-Tonga, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre*, Vol. 312, Issue 7, p. 713–720, 1991a.

**Grzesczyk A.** (U. S. T. , Laboratoire de Pétrologie, Villeneuve d'Ascq, France), Joron J. L., Micard A., Lefevre C., Monzier M., Maillet P., Dupont J. The upper Pliocene transitional eruptive stage on Futuna and Alofi islands, SE Pacific; trace element and Sr-Nd isotopic evidence for a heterogeneous mantle contribution *Terra Abstracts, March*, Vol. 03, Issue 1, p. 425–426, 1991b.

**Guspi F.**, Frequency-domain reduction of potential field measurements to a horizontal plane: *Geoexploration*, Vol. 24, p. 87–98, 1987.

**Hannington M. D.**, Galley A. G., Herzig P. M., Petersen S., and L. Ocean Drilling Program, Shipboard Scientific Party, College Station, Tx, United States, Comparison of the TAG mound and stockwork complex with cyprus-type massive sulfide deposits, in *Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results, TAG, drilling an active hydrothermal system on a sediment-free slow-spreading ridge; covering Leg 158 of the cruises of the drilling vessel JOIDES Resolution, Las Palmas, Gran Canaria, to Las Palmas, Gran Canaria, Site 957, 23 September-22 November 1994.*, edited by M. Herzig Peter, et al., p. 389–415, Texas A & M University, Ocean Drilling Program, College Station, TX, United States, 1998.



**Hellebrand E.**, Snow J. E. and Muehe R., Mantle melting beneath Gakkel Ridge (Arctic Ocean), abyssal peridotite spinel compositions, *Chemical Geology*, 182(2-4), p. 227–235, 2000.

**Honsho C.**, Magnetic Structure of the Mid-Atlantic Ridge, 21°40N Segment, an approach from near-bottom magnetic measurements onboard a submersible, PhD Thesis, University of Tokyo (Japan), 1999.

**Honsho C.**, Dymant J., Tamaki K., Ravilly M., Horen H. and Gente P., Magnetic structure of a slow spreading ridge segment: Insights from near-bottom magnetic measurements on board a submersible, *Journal of Geophysical Research*, 114, B05101, DOI: 10.1029/2008JB005915, 2009.

**Honsho C.**, Ura T. and Tamaki K., The inversion of deep-sea magnetic anomalies using Akaike's Bayesian information criterion, *Journal of Geophysical Research*, 117, B01105, DOI: 10.1029/2011JB008611, 2012.

**Humphris S. E.**, Herzig P. M., Miller D. J., Alt J. C., Becker K., Brown D., Bruegmann G., Chiba H., Fouquet Y., Gemell J. B., Guerin G., Hannington M. D., Holm N. G., Honnorez J. J., Iturrino G. J., Knott R., Ludwig R., Nakamura K., Petersen S., Reysenbach A. L., Rona P. A., Smith S., Sturz A. A., Tivey M. A. and Zhao X., The internal structure of an active sea-floor massive sulphide deposit, *Nature*, 377(6551), p. 713–716, 1995.

**Hussenoeder S. A.**, Tivey M. A., Schouten H., Direct inversion of potential fields from an uneven track with application to the Mid-Atlantic Ridge, *Geophysical Research Letters*, Vol. 22, N°23, p. 3131–3134, December 1, 1995.

**Ildefonse B.**, Blackman D., John B., Ohara Y., Miller D., and MacLeod C., Oceanic core complexes and crustal accretion at slow-spreading ridges, *Geology*, 35(7), p. 623–626, 2007.

**Isezaki N.**, A new shipboard three-component magnetometer, *Geophysics*, Vol. 51, 10, p. 1992–1998, 1986.

**Johnson K. T. M.**, and Dick H. J. B., Open system melting and temporal and spatial variation of peridotite and basalt at the Atlantis II fracture zone, *Journal of Geophysical Research*, B, Solid Earth and Planets, 97(6), p. 9219–9241, 1992.

**Johnson H. P.**, Hautala S. L., Tivey M. A., Jones C. D., Voight J., Pruis M., Garcia-Berdeal I., Gilbert L. A., Bjorklund T., Fredericks W., Howland J., Tsurumi M., Kurakawa T., Nakamura K., O'Connell K., Thomas L., Bolton S., and Turner J., Survey studies hydrothermal circulation on the northern Juan de Fuca Ridge: *Eos (Transactions, American Geophysical Union)*, Vol. 83, p. 73–79, 2002.

**Karson J. A.**, and Rona P. A., Block-tilting, transfer faults, and structural control of magmatic and hydrothermal processes in the TAG area, Mid-Atlantic Ridge 26°N, with Suppl. Data 90-21, *Geological Society of America Bulletin*, 102(12), p. 1635–1645, 1990.

**Kelemen P. B.**, Kikawa E., Miller D. J., et al., *Proceedings ODP, Initial Reports, 209: Leg 209 summary. Ocean Drilling Program, College Station TX*, p. 1–139, 2004.

**Kelley D. S.**, Karson J. A., Blackman D. K., Frueh G. G. L., Butterfield D. A., Lilley M. D., Olson E. J., Schrenk M. O., Roe K. K., Lebon G. T. and Rivizzigno P., An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30°N, *Nature (London)*, 412(6843), p. 145–149, 2001.

**Knott R.**, Fouquet Y., Honnorez J., Petersen S., Bohn M., Petrology of hydrothermal mineralization, a vertical section through the TAG mound, Herzig, P. M., Humphris, S. E., Miller, D. J., and Zierenberg, R. A. (Eds.), 1998 *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Vol. 158, 1998.

**Konn C.**, Donval J. P., Birot D., Guyader V., Germain Y., Crozon J., Dapoigny A., Futuna 2 cruise report, 2011.

**Korenaga J.**, Comprehensive analysis of marine magnetic vector anomalies, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, B1, p. 365–378, 1995.

**Koschinsky A.**, Billings A., Devey C., Dubilier N., Duester A., Edge D., Garbe-Schoenberg D., German C., Giere O., Keir R., Lackschewitz K., Mai H. A., Marbler H., Mawick J., Melchert B., Mertens C., Peters M., Sander S., Schmale O., Schmidt W., Seifert R., Seiter C., Stoeber U., Suck I., Walter M., Weber S., Yoerger D., Zarrouk M., and Zielinski F., Discovery of new hydrothermal vents on the southern Mid-Atlantic Ridge (4°S–10°S) during cruise M68/1, *InterRidge News*, 15, p. 9–15, 2006.

**Krasnov S. G.**, et al., Detailed geological studies of hydrothermal fields in the north Atlantic. *Geological Society Special Publication* 87, p. 43–64, 1995.

**Lagabrielle Y.**, Bideau D., Cannat M., Karson J. A., and Mevel C., Ultramafic-Mafic Plutonic rock suites exposed along the mid Atlantic ridge (10°N–30°N). Symmetrical-Asymmetrical distribution and implications for seafloor spreading processes in faulting and magmatism at Mid-Ocean Ridges, edited by G. Monograph, p. 153–175, American Geophysical Union, 1998.

**Lalou C.**, Thompson G., Arnold M., Bricchet E., Druffel E., Rona P., Geochronology of TAG and Snake Pit Hydrothermal Fields, Mid-Atlantic Ridge : witness to a long and complex hydrothermal history, *Earth Planet Scientific Letters* 97, p. 113–128, 1990.

**Lartaud F.**, de Rafelis M., Graham O., Krylova E., Dyment J., Ildefonse B., Thibaud R., Gente P., Hoisé E., Fossil clams from a serpentinite-hosted sedimented vent field near the active smoker complex Rainbow, MAR, 36°13'N: Insight into the biogeography of vent fauna, *G<sup>3</sup>*, Vol. 11 18, Q0AE01, DOI: 10.1029/2010GC003079, 2010.

**Lattimore R. K.**, Rona P. A. and DeWaid O. E., Magnetic anomaly sequence in the central North Atlantic, *Journal of Geophysical Research*, 79, p. 1207–1209, 1974.

**Lein A. Y.**, Cherkashev G. A., Ul' yanov A. A., Ul' yanova N. V., Stepanova T. V., Sagalevich A. M., Bogdanov Y. A., Gurvich E. G. and Torokhov A. P., Mineralogy and geochemistry of sulfide ores from the Logachev-2 and Rainbow fields: Similar and distinctive features, *Geochemistry International*, 41(3), p. 271–294, 2003.

**Lesur V.**, A technique for estimating the absolute vector geomagnetic field from marine vessel, *Journal of Geophysical Engineering*, Vol. 1, p 109–115, 2004.

**Louat R.** (Cent. ORSTOM, Gen. Evol. Domaines Ocean., Nouméa, New Caledonia), Monzier M., Grzesczyk A., Dupont J., Eissen J. P., Maillet P., Sismicité superficielle a proximité des îles de Horne (Territoire de Wallis et Futuna-Pacifique Sud); caractéristiques et conséquences, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre*, Vol. 308, Issue 5, p. 489–494, 1989.

**Macdonald K. C.**, Miller S. P., Huestis S. P. and Spiess F. N., Three-dimensional modeling of a magnetic reversal boundary from inversion of deep-tow measurements, *Journal of Geophysical Research*, 85:3670-3681, 1980.

**McGregor B. A.**, Harrison C. G. A., Lavelie J. W., and Rona P. A., Magnetic anomaly patterns on Mid-Atlantic Ridge crest at 26°N, *Journal of Geophysical Research*, 82, p. 231–238, 1977.

**Malahoff A.**, Embley R. W., et al., The geological setting and chemistry of hydrothermal sulfides and associated deposits from the Galápagos Rift at 86°W, *Marine Mining* 4, p. 123–137, 1983.

**Marques A. F. A.**, Barriga F., Chavagnac V., and Fouquet Y., Mineralogy, geochemistry, and Nd isotope composition of the Rainbow hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge, *Mineralium Deposita*, 41(1), p. 52–67, 2006.

**Marques A. F. A.**, Barriga F., and Scott S. D., Sulfide mineralization in an ultramafic-rock hosted seafloor hydrothermal system: From serpentinization to the formation of Cu-Zn-(Co)-rich massive sulfides, *Marine Geology*, 245, p. 20–39, 2007.

**Martinez F.**, Fryer P., Becker N., Geophysical Characteristics of the Southern Mariana Trough, 11°N–13°N, *Journal of Geophysical Research*, 105, p. 16591–16607, 2000.

**Melchert B.**, Devey C. W., German C. R., Lackschewitz K. S., Seifert R., Walter M., Mertens C., Yoerger D. R., Baker E. T., Paulick H., and Nakamura K., First evidence for high-temperature off-axis venting of deep crustal/mantle heat; the Nibelungen hydrothermal field, southern Mid-Atlantic Ridge, Earth and Planetary Science Letters, 275(1-2), p. 61–69, 2008.

**Merrill R. T.**, McFadden P. L., Geomagnetic polarity transition, Reverse Geophysics, Vol. 37, 2, p. 201–226, 1995.

**Merrill R. T.**, McElhinny M. W., McFadden P. L., The magnetic field of the Earth, Int. Geophys., Ser., Vol. 63, p. 531, Academic, San Diego, Calif., 1996.

**Michael P. J.**, Langmuir C. H., Dick H. J. B., Snow J. E., Goldstein S. J., Graham D. W., Lehnert K., Kurras G., Jokat W., Muehe R. and Edmonds H. N., Magmatic and amagmatic seafloor generation at the ultraslow-spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean, Nature (London), 423(6943), p. 956–961, 2003.

**Miranda J. M.**, Luis J. F., Lourenço N., Santos F. M., Identification of the magnetization low of the Lucky Strike hydrothermal vent using magnetic data, Journal of Geophysical Research, Vol. 110, B04103, DOI: 10.1029/2004JB003085, 2005.

**Nakamura K.**, Toki T., Mochizuki N., Asada M., Ishibashi J., Nogi Y., Yoshikawa S., Miyazaki J., Okino K. Discovery of a new hydrothermal vent based on an underwater, high-resolution geophysical survey, Deep-Sea Research I 74, p. 1–10, 2013.

**Ondreas H.**, Cannat M., Cherkashev G., Fouquet, Y., Normand A. and Serpentine scientific party, High resolution mapping of the Ashadze and Logachev hydrothermal fields, Mid Atlantic Ridge 13-15°N, in AGU Fall Meeting, edited, p. 52, 2007.

**Ondreas H.**, Cannat M., Fouquet Y., and Normand A., Geological context and vents morphology of the ultramafic-hosted Ashadze hydrothermal areas (Mid-Atlantic Ridge 13°N), G<sup>3</sup>, Vol. 13, Issue 11, DOI 10.1029/2012GC004433, 2012.

**Parker R. L.**, and Huestis S. P., The inversion of magnetic anomalies in the presence of topography: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 79, p. 1587–1594, 1974.

**Parson L. M.**, Pearce J. A., Murton B. J., Hodkinson R.A., RRS Charles Darwin Scientific Party, Role of ridges jumps and ridge propagation in the tectonic evolution of the Lau back-arc basin, Southwest Pacific, *Geology* 18 (5), p. 470–473, 1990.

**Parson L. M.**, Fouquet Y., Ondreas H., Barriga F. J. A. S., Relvas J. M. R. S., Ribeiro A., Charlou J. L., German C. R., and Flores Scientific Party, Non-transform discontinuity settings for contrasting hydrothermal systems on the MAR; Rainbow and Famous at 36 degrees 14' and 36 degrees 34'N, in AGU 1997 fall meeting, edited by Anonymous, p. 832, American Geophysical Union, Washington, DC, United States, 1997.

**Parson L.**, Gracia E., Collier E., German C. and Needham D., Second order segmentation - The relationship between volcanism and tectonism at the MAR, 38°N-35°40'N, *Earth and Planetary Science Letters*, 1999.

**Pelletier B.** (Géosciences Azur, Villefranche sur Mer, France), Calmant S., Pillet R., Current tectonics of the Tonga-New-Hebrides region, *Earth and Planetary Science Letters*, December 15, Vol. 164, Issue 1-2, p. 263–276, 1998.

**Pelletier B.** (Institut de Recherche pour le Développement, Laboratoire de Géologie-Géophysique, Nouméa, New Caledonia), Lagabrielle Y., Benoit M., Cabioch G., Calmant S., Garel E., Guivel C., Newly identified segments of the Pacific-Australia plate boundary along the North Fiji transform zone, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 193, Issue 3-4, p. 347–358, 2001.

**Petersen S.**, et al., The geological setting of the ultramafic-hosted Logachev hydrothermal field (14°45'N, Mid-Atlantic Ridge) and its influence on massive sulfide formation. *Lithos* 112 (2009), p. 40–56, 2009.

**Pilkington M.**, Urquhart W. E. S., Reduction of potential field data to a horizontal plane, *Geophysics*, 55, p. 549–555, 1990.

**Price R. C.** (La Trobe University, Department of Geology, Bundoora, Victoria, Australia), Maillet P., McDougall I., Dupont J., The geochemistry of basalts from the Wallis Islands, northern Melanesian Borderland; evidence for a lithospheric origin for samoan-type basaltic magmas?, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 45, Issue 3-4, p. 267–288, 1991.

**Ribeiro da Costa I.**, Barriga F. J. A. S. and Taylor R. N., Late seafloor carbonate precipitation in serpentinites from the Rainbow and Saldanha sites (Mid-Atlantic Ridge), *European Journal of Mineralogy*, 20(2), p. 173–181, 2008.

**Robigou V.**, Delaney J. R., and Stakes D. S., Large massive sulfide deposits in a newly discovered active hydrothermal system, the High-Rise field, Endeavour segment, Juan de Fuca Ridge: *Geophysical Research Letters*, Vol. 20, p. 1887–1890, 1993.

**Rona P. A.**, *Marine Geology: The Trans-Atlantic Geotraverse*, p. 252–256, McGraw-Hill, New York, 1973.

**Rona P. A.**, Pattern of hydrothermal mineral deposition: Mid-Atlantic Ridge crest and latitude 26°N, *Marine Geology*, 21, M59-M66, 1976.

**Rona P. A.**, Black smokers and massive sulfides at the TAG hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge 26°N, *Eos Trans. AGU*, 66, p. 936, 1985.

**Rona P. A.**, Klinkhammer G., Nelsen T. A., Trefry J. H. and Elderfield H., Black smokers, massive sulphides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, 321, p. 33–37, 1986.

**Rona P. A.**, Widenfalk L., and Bostroem K., Serpentinized ultramafics and hydrothermal activity at the Mid-Atlantic Ridge crest near 15 degrees N, *Journal of Geophysical Research*, B, Solid Earth and Planets, 92(2), p. 1417–1427, 1987.

**Sangster D. F.** and Scott S. D., Precambrian, strata-bound, massive Cu-Zn-Pb sulfide ores of North America, in Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits; II. Regional studies and specific deposits; Vol. 6, Cu, Zn, Pb, and Ag deposits, edited, Elsevier Publ. Co. New York United States (USA), 1976.

**Sauter D.**, Mendel V., Rommevaux Jestin C., Parson L. M., Fujimoto H., Mevel C., Cannat M. and Tamaki K., Focused magmatism versus amagmatic spreading along the ultra-slow spreading Southwest Indian Ridge: Evidence from TOBI side scan sonar imagery - art. no. Q10K09, *G<sup>3</sup>*, 5, 2004.

**Schroeder T.**, John B. and Frost B. R., Geologic implications of seawater circulation through peridotite exposed at slow-spreading mid-ocean ridges, *Geology (Boulder)*, 30(4), p. 367–370, 2002.

**Sclater J. G.**, Hawkins J. W., Mammerricks J. et Chase C. G. - Crustal extension between the Tonga and Lau ridges : petrologic and geophysical evidence. *Geological Society of America Bulletin* 83 p. 505–517, 1972.

**Searle R.**, MacLeod C., Murton B., Mallows C., Casey J., Achenbach K., Unsworth S. and Anonymous, Development of oceanic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge at 13°N–14°N; deep-towed geophysical measurements and detailed seafloor sampling, in AGU fall meeting, T51F-01 EOS, 2007.

**Seyler M.**, Cannat M. and Mevel C., Evidence for major-element heterogeneity in the mantle source of abyssal peridotites from the Southwest Indian Ridge (52 degrees to 68 degrees E), *G<sup>3</sup>*, 4, 2003.

**Schmidt K.**, Koschinsky A., Garbe-Schönberg D., de Carvalho L. M., Seifert R., Geochemistry of hydrothermal fluids from the ultramafic-hosted Logachev hydrothermal field, 15°N on the Mid-Atlantic Ridge: temporal and spatial investigation. *Chemical Geology* 242, p. 1–21, 2007.



**Smith D. K.**, Cann J. R. and Escartin J., Widespread active detachment faulting and core complex formation near 13 degree N on the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, 442(7101), p. 440–443, 2006.

**Smith D. K.**, Escartin J., Schouten H., and Cann J., Fault rotation and core complex formation: Significant processes in seafloor formation at slow spreading mid-oceanic ridges (Mid-Atlantic Ridge, 13°–15°N), *G<sup>3</sup>*, 9, Q03003, DOI: 10.1029/2007GC001699, 2008.

**Sudarikov S. M.**, Davydov M. P., Cherkashev G. A., Gubenkov V. V., Pivovarchuk O. A., Kazachenko V. F. and Mikhailov A. L., A new area of hydrothermal activity in the rift zone of the Mid-Atlantic Ridge, 13 degrees N, *Doklady Earth Sciences*, 381a(9), 1099-1102, 2001.

**Talwani M.** and Heirtzler J. R., Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional bodies of arbitrary shape, in *Computers in the mineral industries*, edited by G. A. Parks, p. 464–480, Stanford Univ. Publ., 1964.

**Taylor S. R.** and McLennan S. M., *The continental crust : Its composition and evolution*, p. 312, 1985.

**Thompson G.**, Humphris S. E., Schroeder B., Sulanowska M. and Rona P., Active vents and massive sulfides at 26°N (TAG) and 23°N (Snake Pit) on the Mid-Atlantic Ridge, *Canadian Mineralogist* 26, p. 697–711, 1988.

**Tivey M. A.** and Delaney J. R., Growth of large sulfide structures on the Endeavour segment of the Juan de Fuca Ridge, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 77, p. 303–317, 1986.

**Tivey M. A.**, Rona P. A. and Schouten H., Reduced crustal magnetization beneath the active sulfide mound, TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge, at 26°N, *Earth and Planetary Science Letters*, 115, p. 101–115, 1993.

**Tivey M. A.**, Johnson H. P, Crustal magnetization reveals subsurface structure of Juan de Fuca Ridge hydrothermal vent fields, Geological Society of America, *Geology*, Vol. 30, 11, p. 979–982, 2002.

**Tivey M. A.**, Dymant J., The Magnetic Signature of Hydrothermal Systems in Slow Spreading Environments, Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges Geophysical Monograph Series 188 by the American Geophysical Union. 10.1029/2008GM00773, 2010.

**Tivey M. K.**, Environmental conditions within active seafloor vent structures: sensitivity to vent fluid composition and fluid flow. In Wilcock, W., Cary, C., De Long, E., Kelley, D., Baross, J. (Eds.) *Subseafloor Biosphere at Mid-Ocean Ridges*, Geophysical Monograph Series, 144. American Geophysical Union, Washington, DC, p. 137–152, 2004.

**Tucholke B. E.**, Lin J. and Kleinrock M. C., Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge, *Journal of Geophysical Research*, B, Solid Earth and Planets, 103(5), p. 9857–9866, 1998.

**Von Stackleberg U.** and the Shipboard Scientific Party, 1988, Active hydrothermalism in the Lau back-arc basin (SW Pacific). First results from the SONNE 48 Cruise: *Marine Mining*, Vol. 7, p. 431-442, 1987.

**Von Stackleberg U.**, Untersuchung der geologischen Entwicklung und des Hydrothermalismus eines aktiven Back-Arc-Beckens (Lau Becken, SW Pacific) mit F. S. SONNE (S048): Hanover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, p. 86, 1987.

**Weiss P.**, La variation du ferromagnétisme et de la température, *Comptes Rendus*, 143, p. 1136–1149, cited in Cullity, p. 116, 2008.

**Wetzel L. R.** and Shock E. L., Distinguishing ultramafic from basalt-hosted submarine hydrothermal systems by comparing calculated vent fluid compositions, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 105(B4), p. 8319–8340, 2000.

**Wolf R.** and Anders E., Moon and Earth; compositional differences inferred from siderophiles, volatiles, and alkalis in basalts, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(12), p. 2111–2124, 1980.

**Won I. J.** and Bevis M., Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines, *Geophysics*, 52, p. 232–238, 1987.

**Yamazaki T.**, Seama N., Okino K., Kitada K., Joshima M., Oda H., Naka J. Spreading process of the Northern Mariana Trough : Rifting-spreading transition at 22°N, *G<sup>3</sup>*, 4 (9): 1075, 2003.

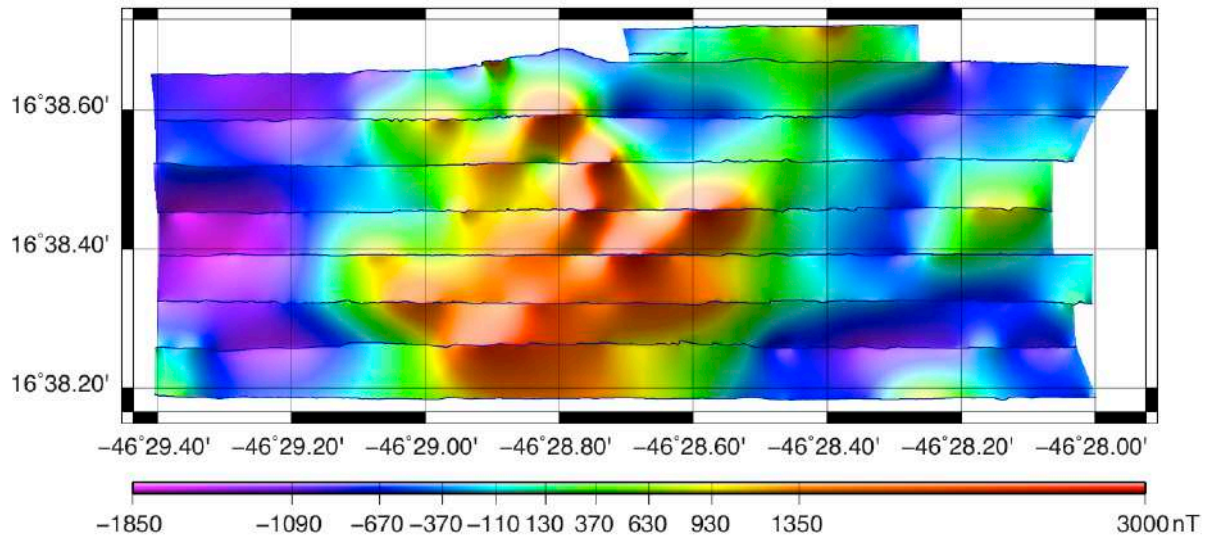
**Zhu J.**, Lin J., Chen Y. J., Tao C., German C. R., Yoerger D. R., Tivey M. A., A reduced crustal magnetization zone near the first observed active hydrothermal vent field on the Southwest Indian Ridge, *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, L18303, DOI: 10.1029/2010GL043542, 2010.

# Annexes

# Krasnov

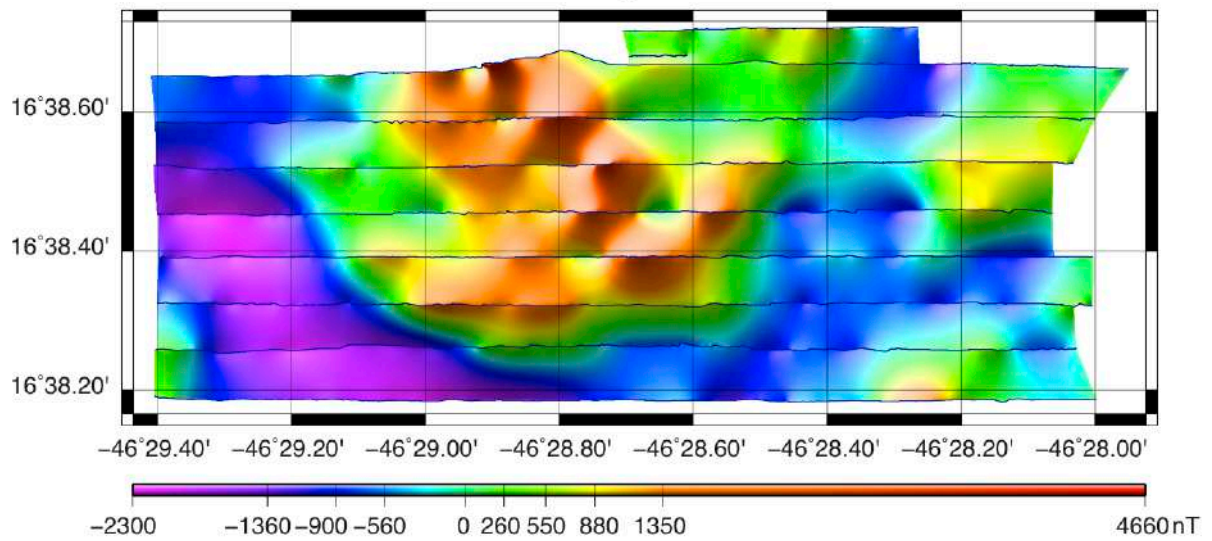
Cruise Serpentine, Krasnov Site, Altitude = 50m

Total field



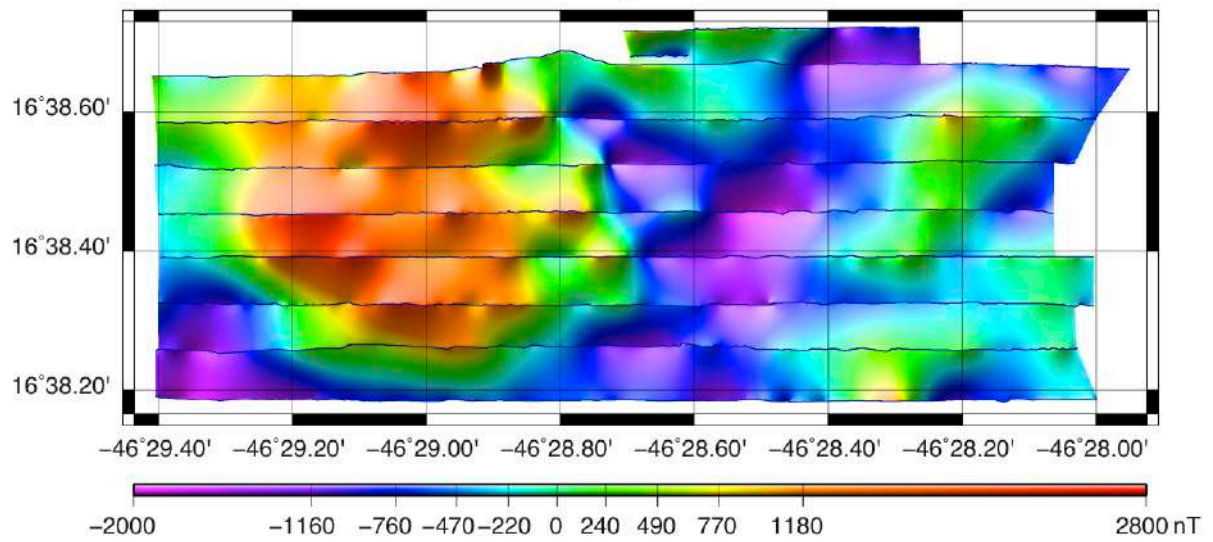
Cruise Serpentine, Krasnov Site, Altitude = 50m

Z component



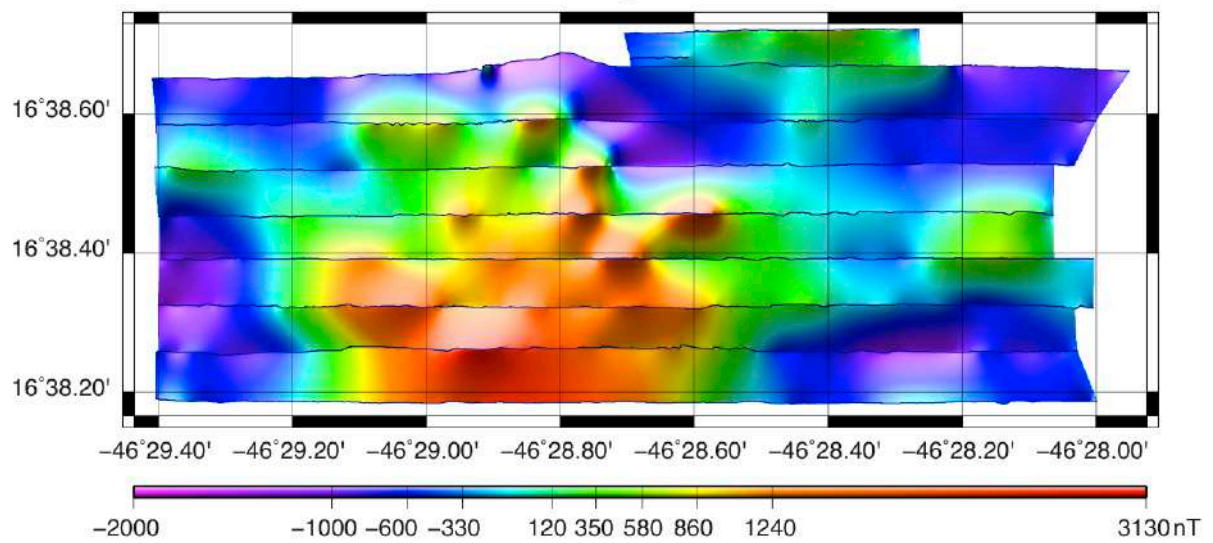
**Cruise Serpentine, Krasnov Site, Altitude = 50m**

**Y component**



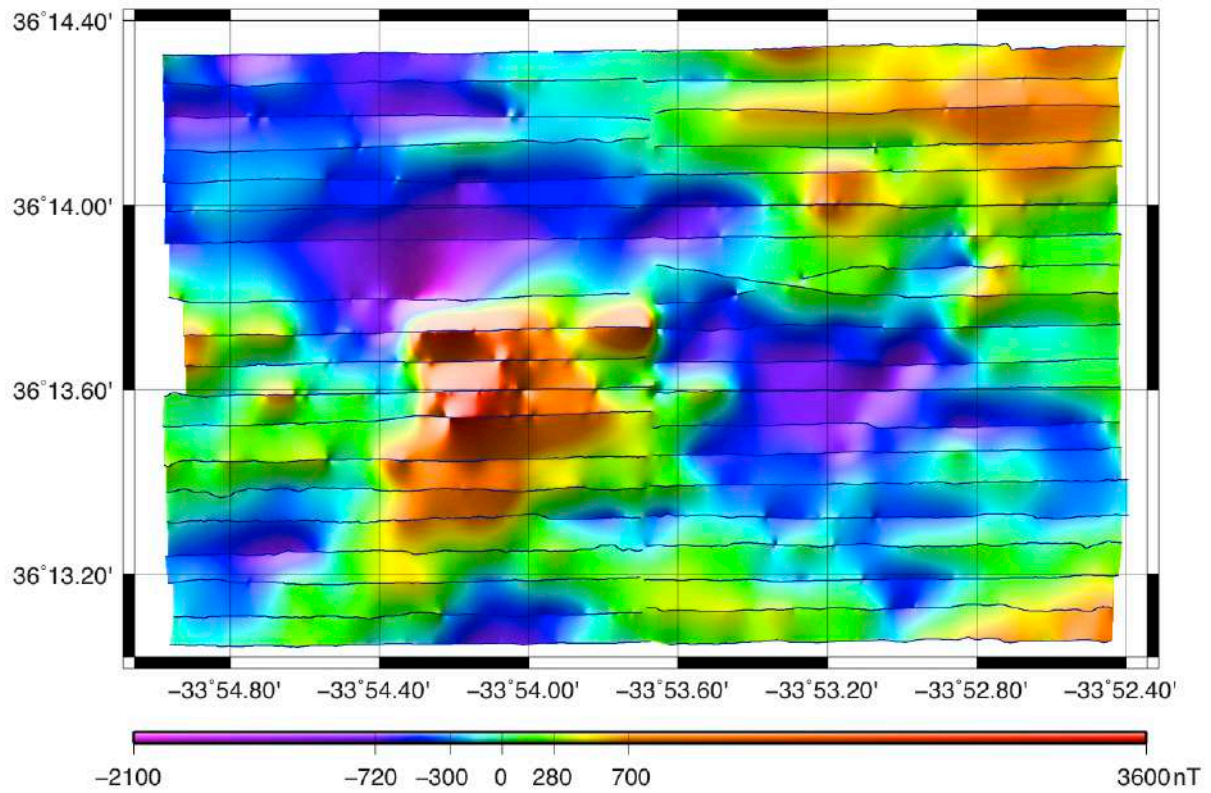
**Cruise Serpentine, Krasnov Site, Altitude = 50m**

**X component**

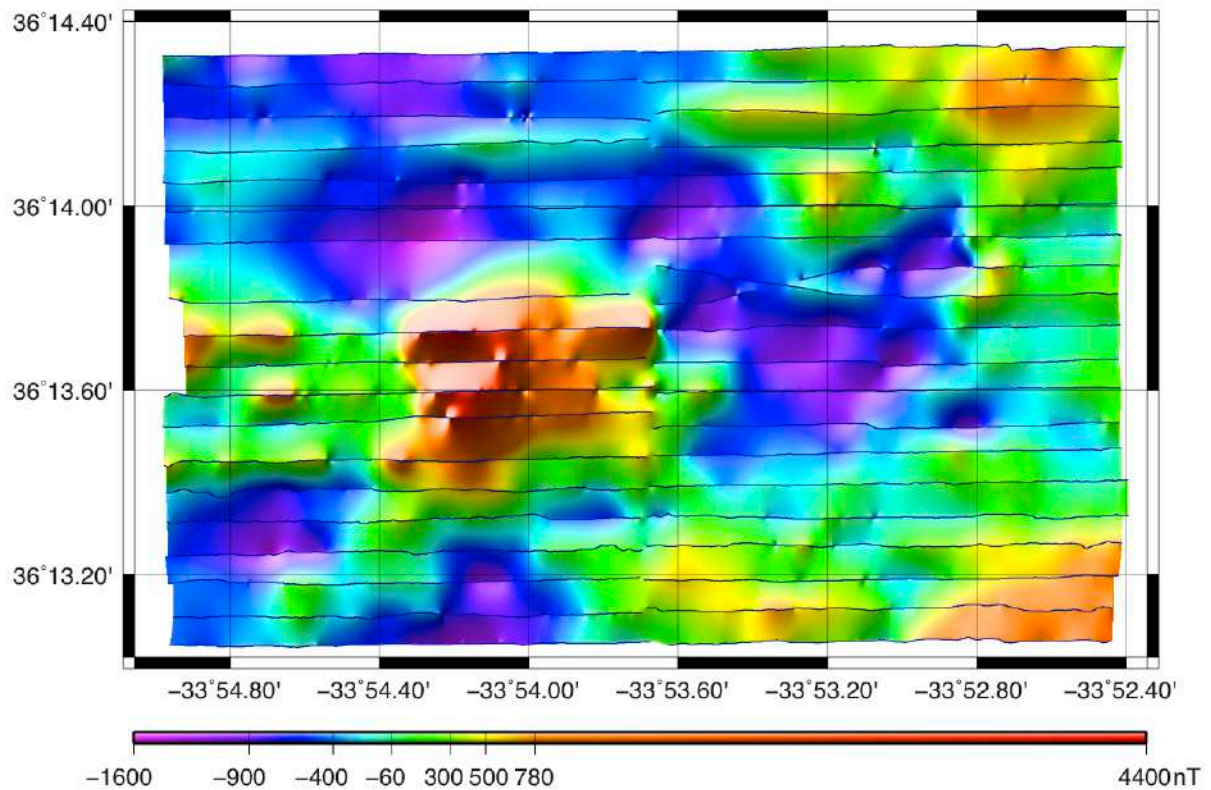


# Rainbow, 50m

Cruise MoMar Dream, Rainbow Site, Altitude = 50m  
Total field

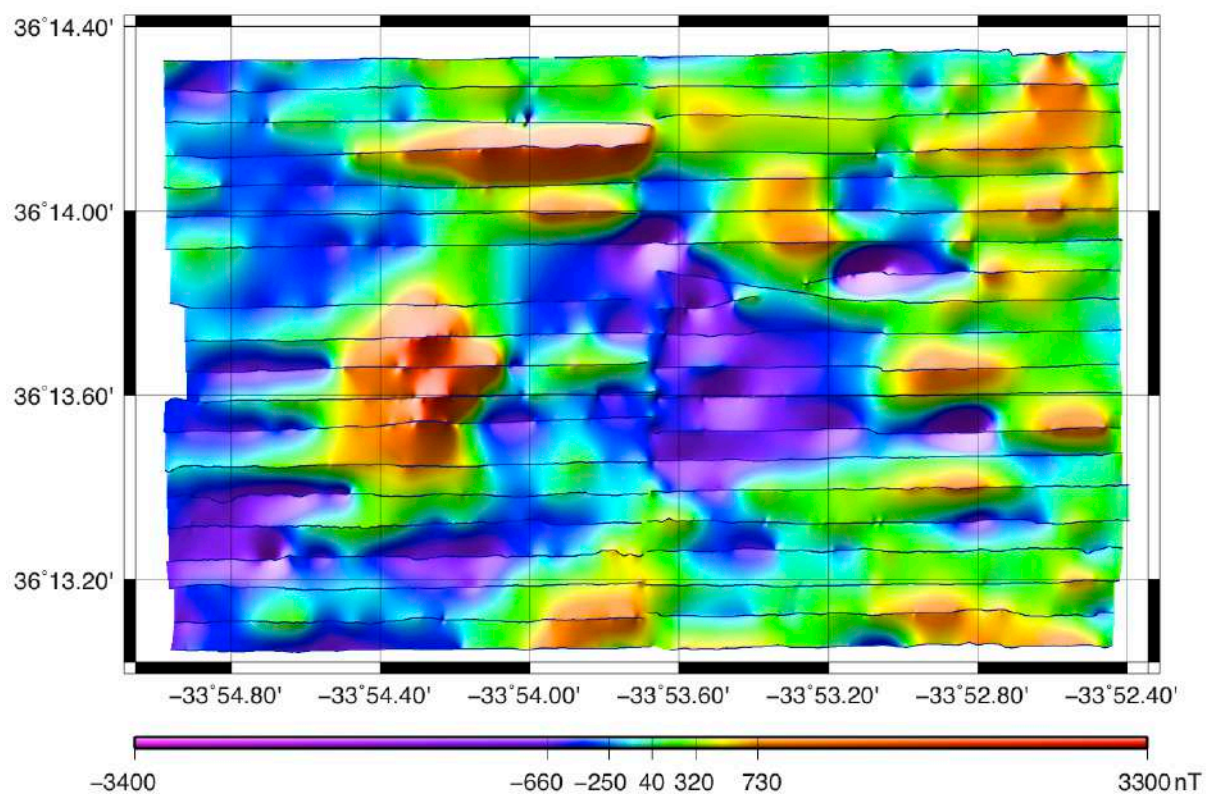


Cruise MoMar Dream, Rainbow Site, Altitude = 50m  
Z component



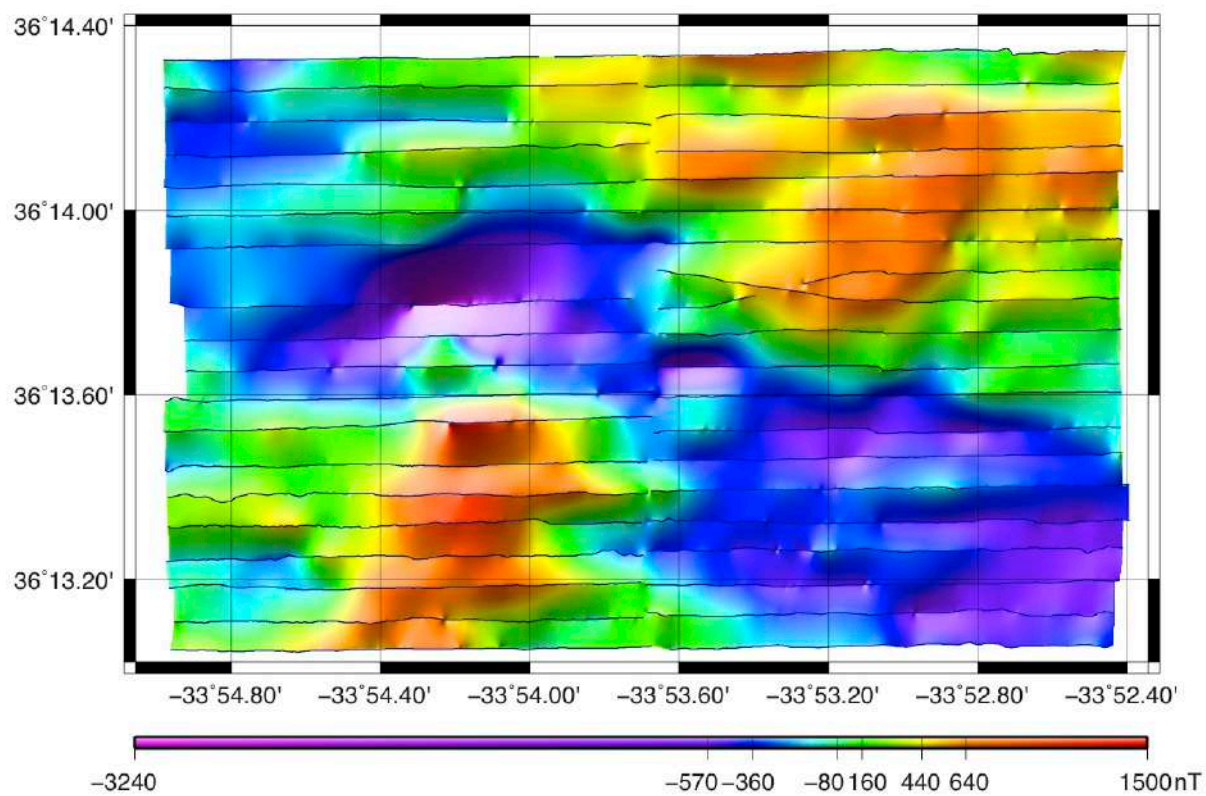
Cruise MoMar Dream, Rainbow Site, Altitude = 50m

Y component



Cruise MoMar Dream, Rainbow Site, Altitude = 50m

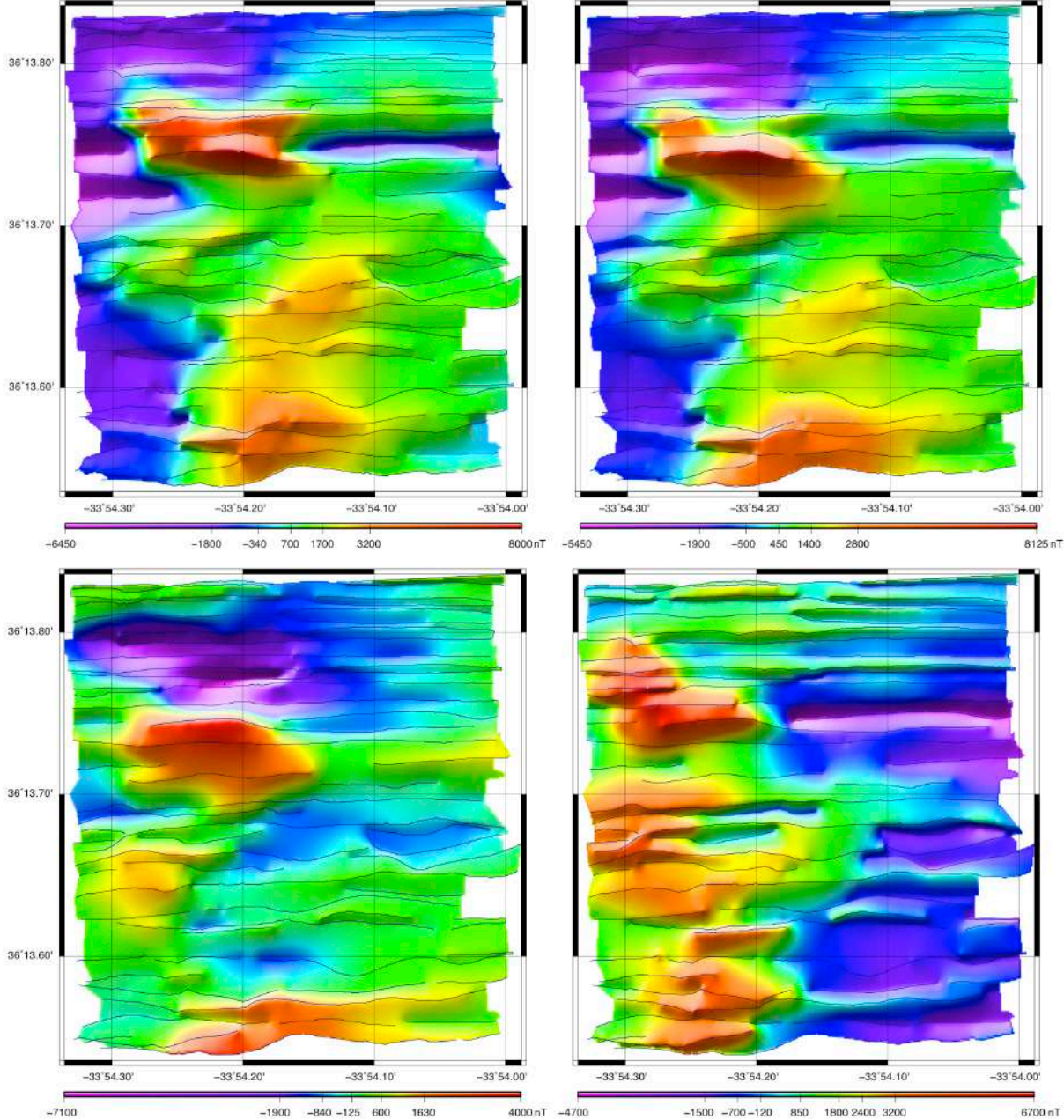
X component





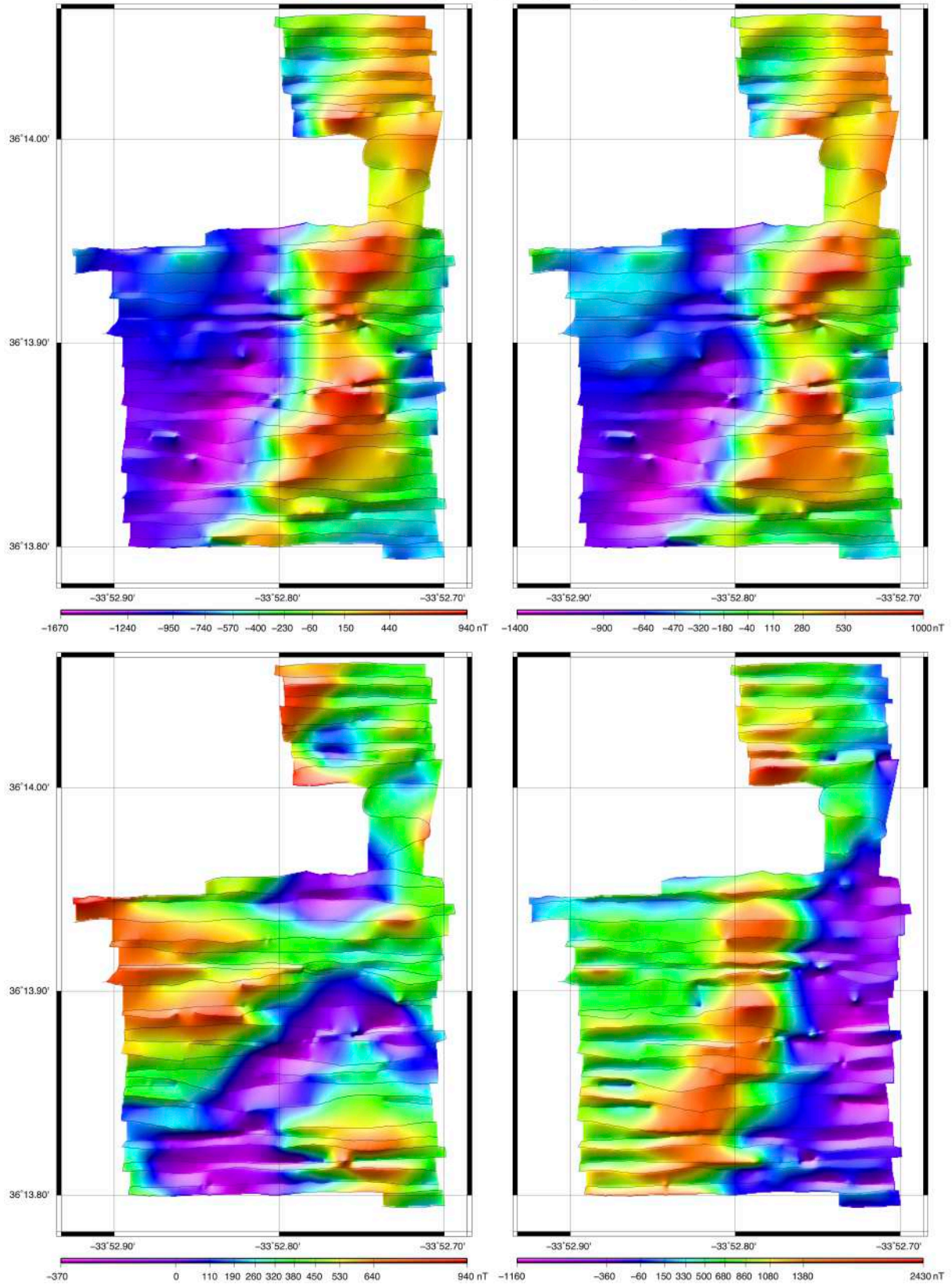
# Rainbow, 10m

Cruise MoMar Dream, Rainbow Site, Altitude = 10m  
From down to the top & from left to right: X component, Y component, Z component & Total field



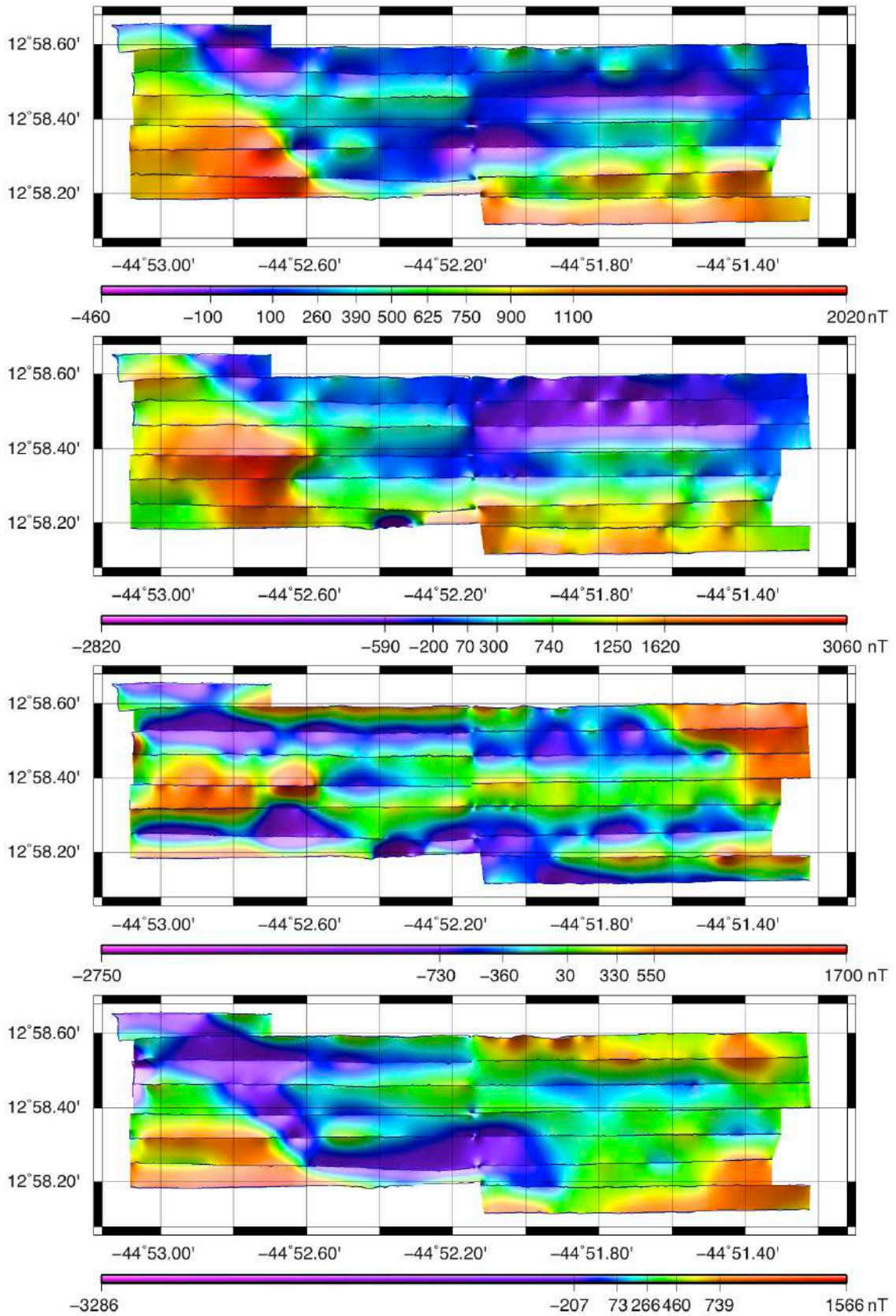
# Ghost City, 10m

Cruise MoMar Dream, Ghost City, Altitude = 10m  
From down to the top & from left to right: X component, Y component, Z component & Total field



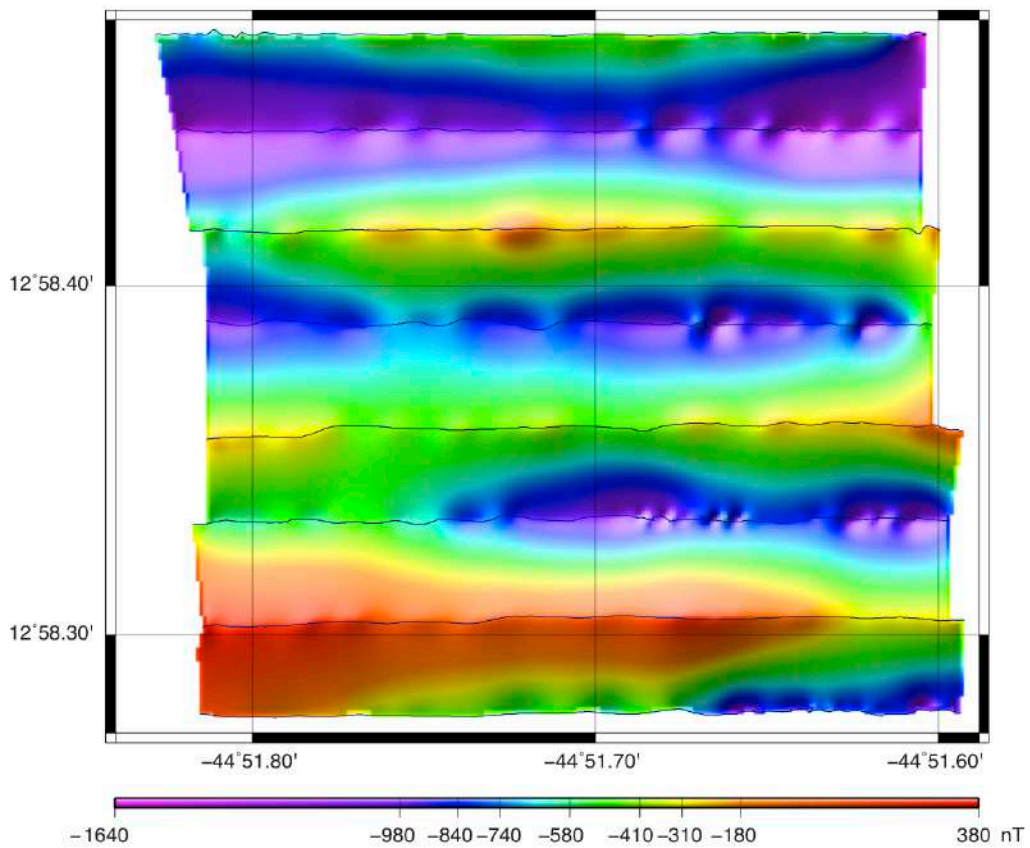
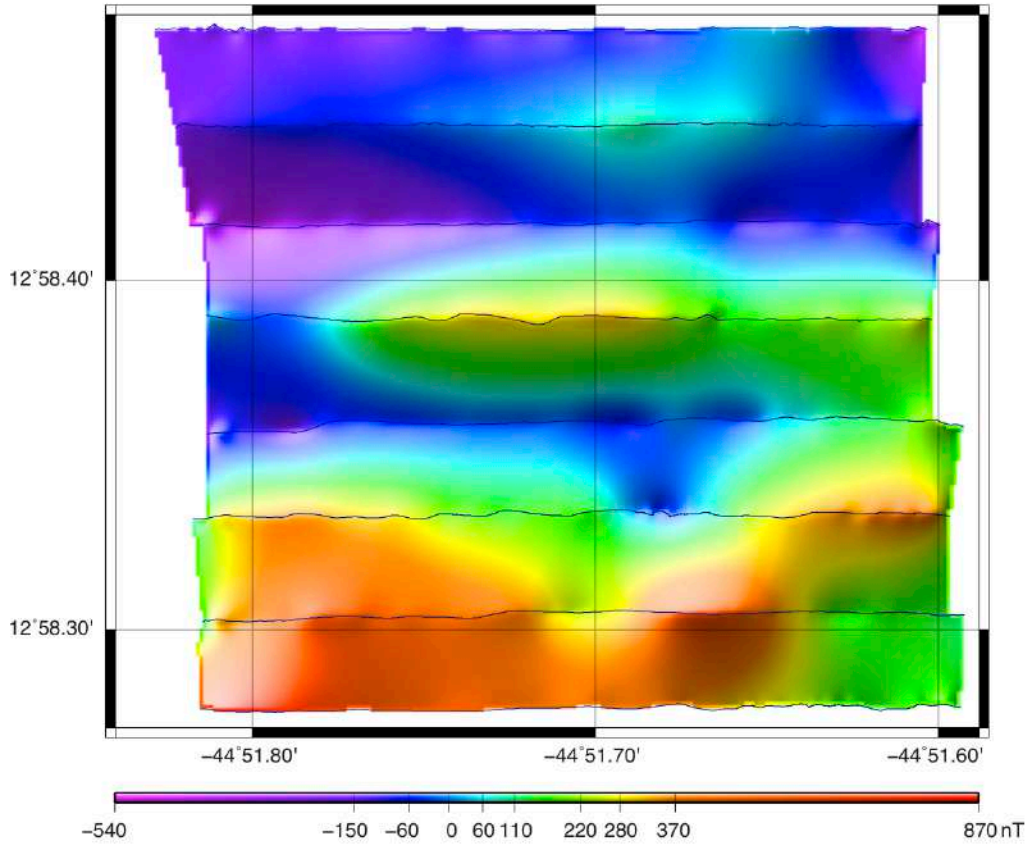
# Ashadze, 50m

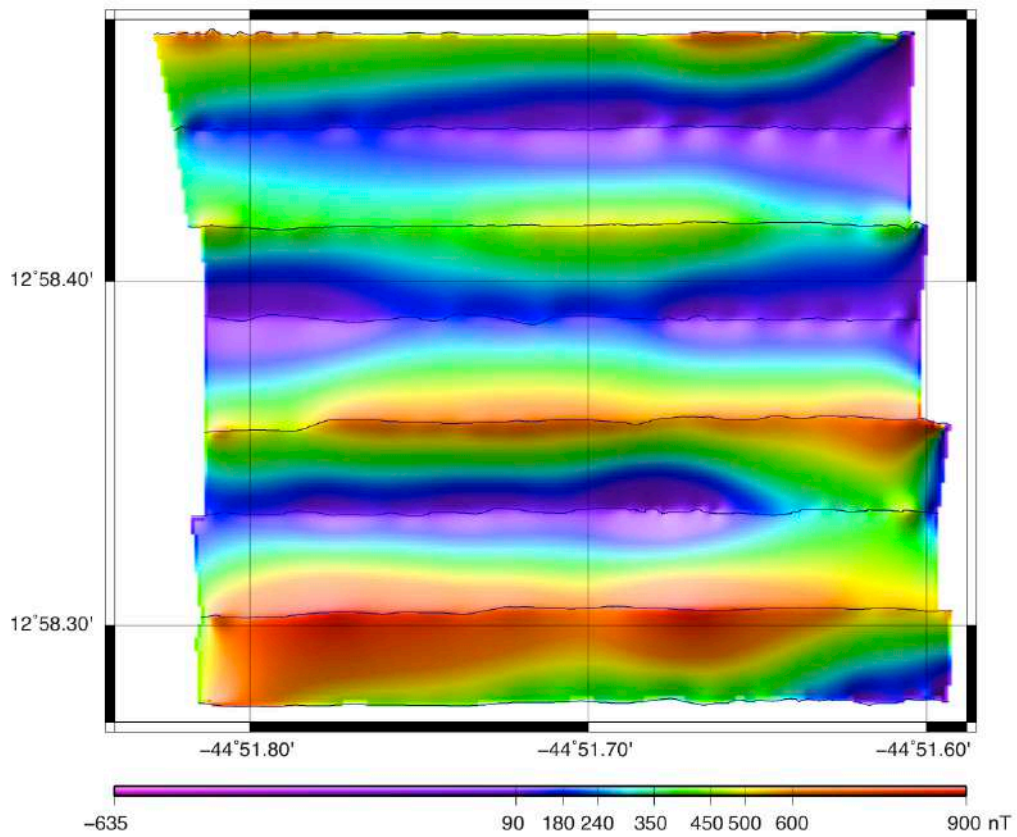
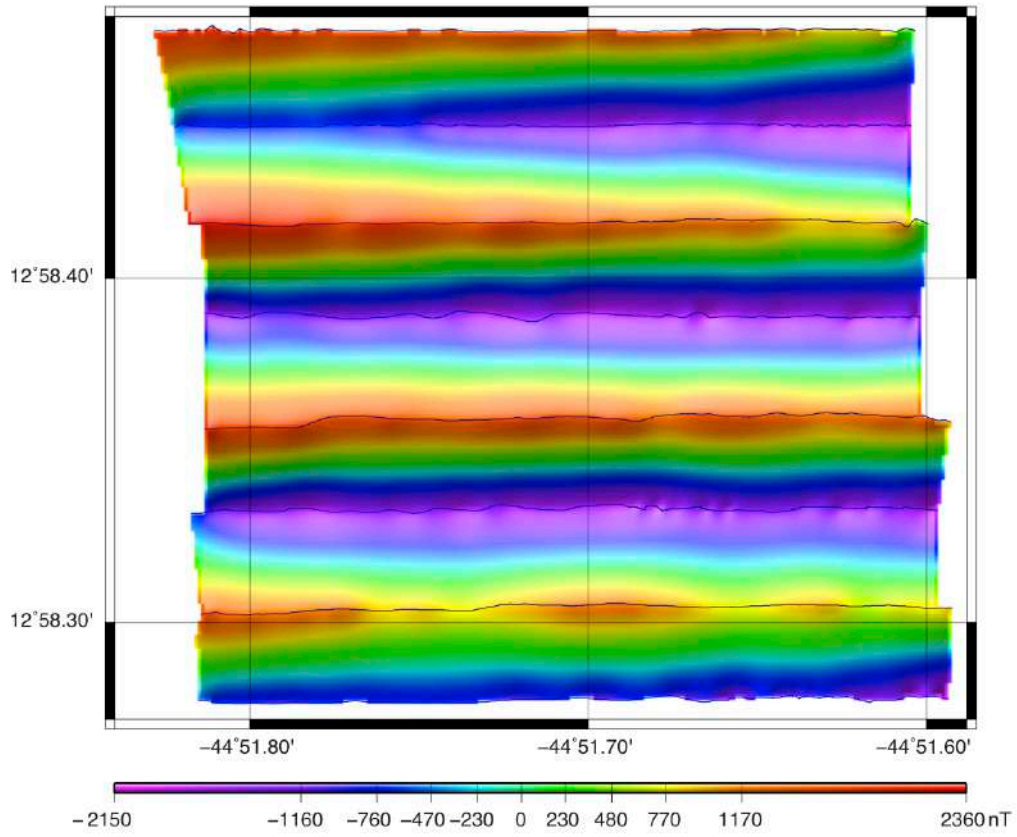
Cruise Serpentine, Ashadze Site, Altitude = 50m  
From down to the top: X component, Y component, Z component, Total field



# Ashadze, 20m

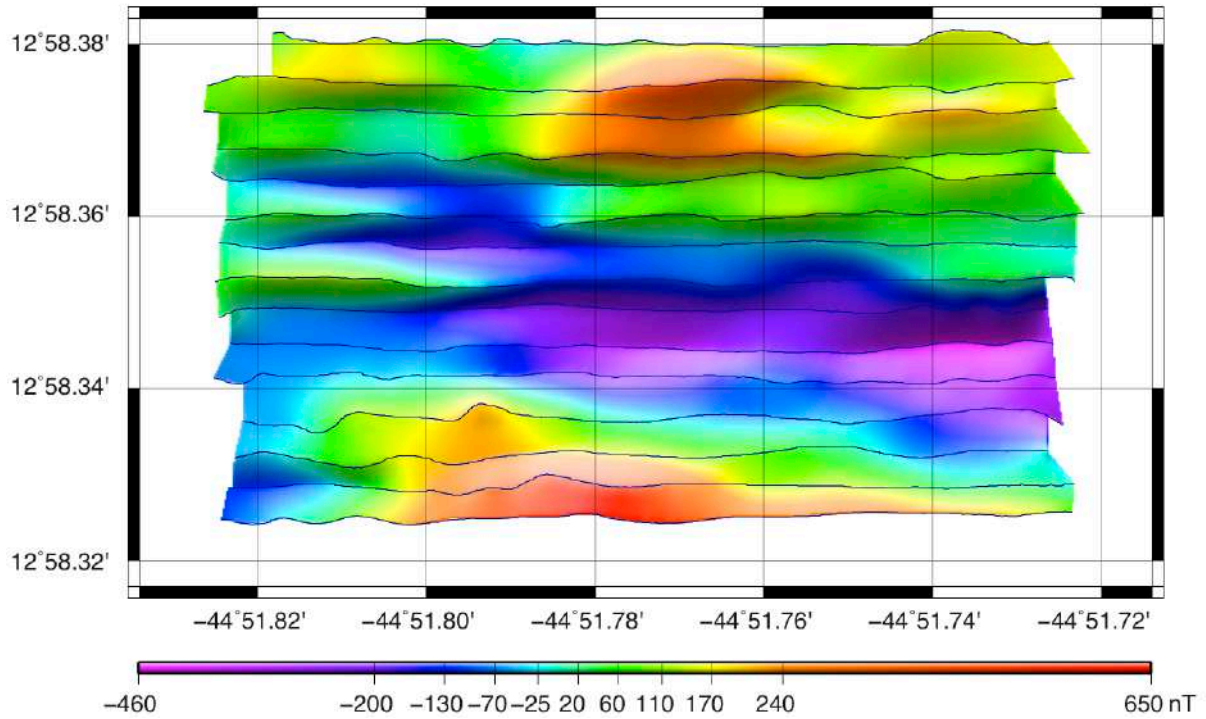
Cruise Serpentine, Ashadze Site, Altitude = 20m  
From down to the top: X component, Y component, Z component, Total field



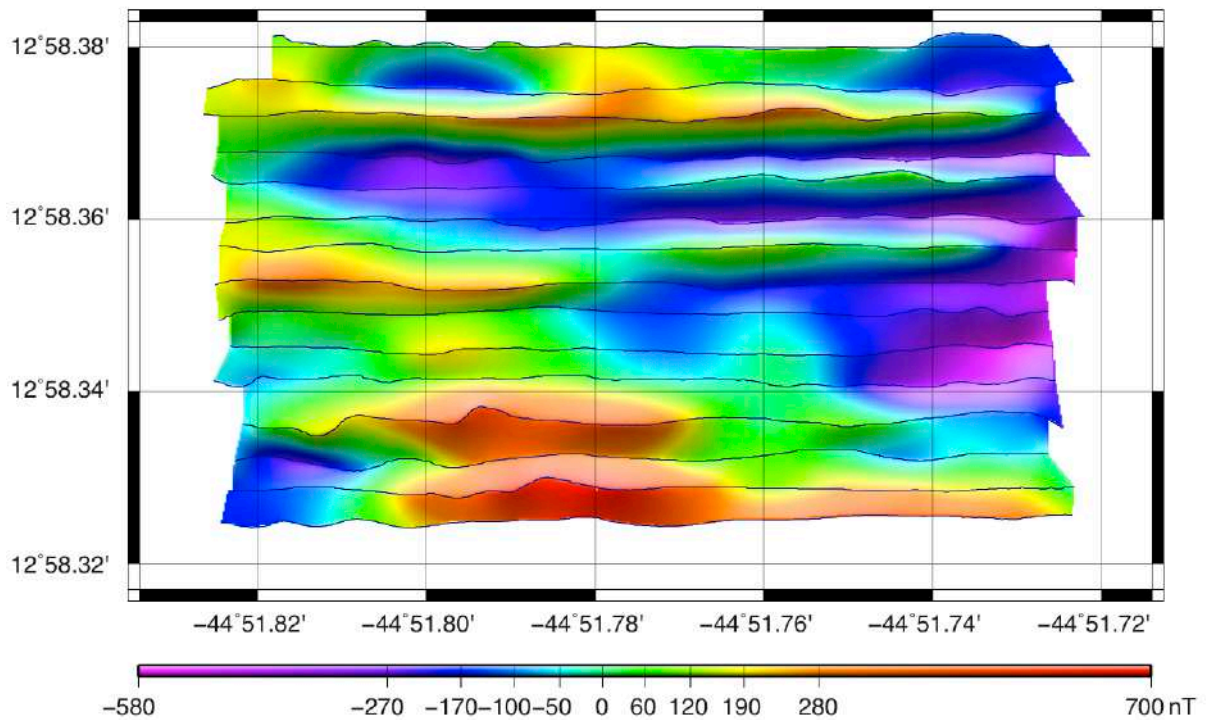


# Ashadze, 10m

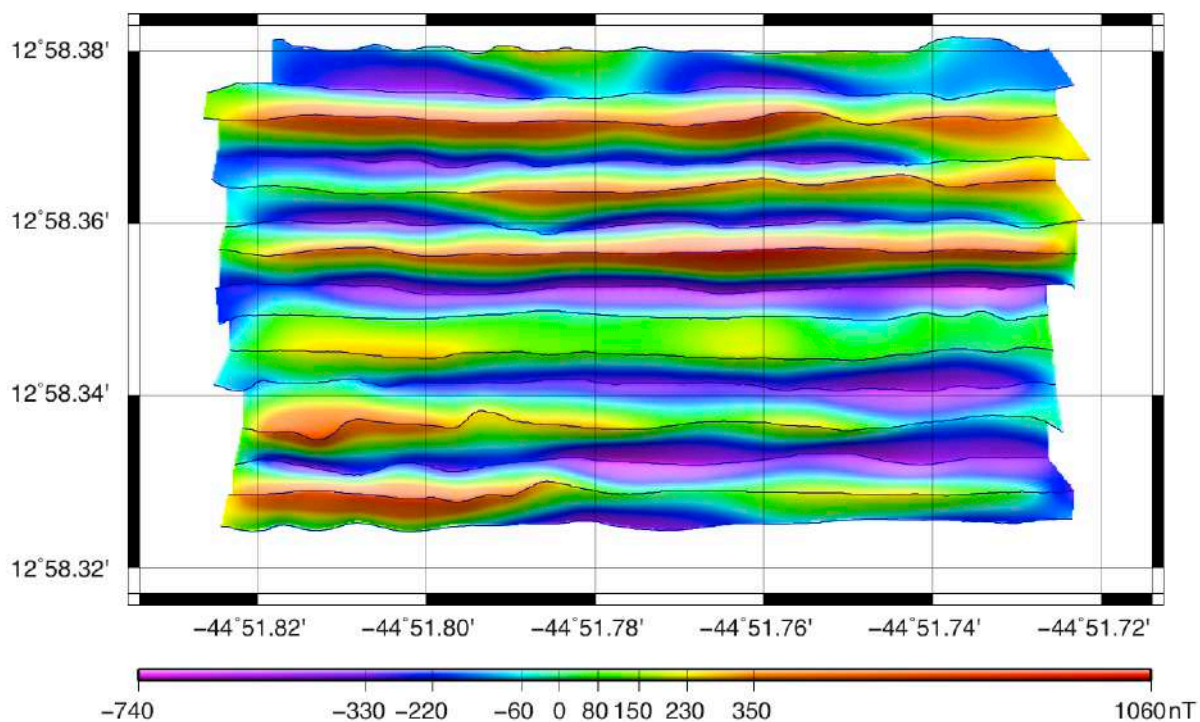
Cruise Serpentine, Ashadze Site, Altitude = 10m  
Total field



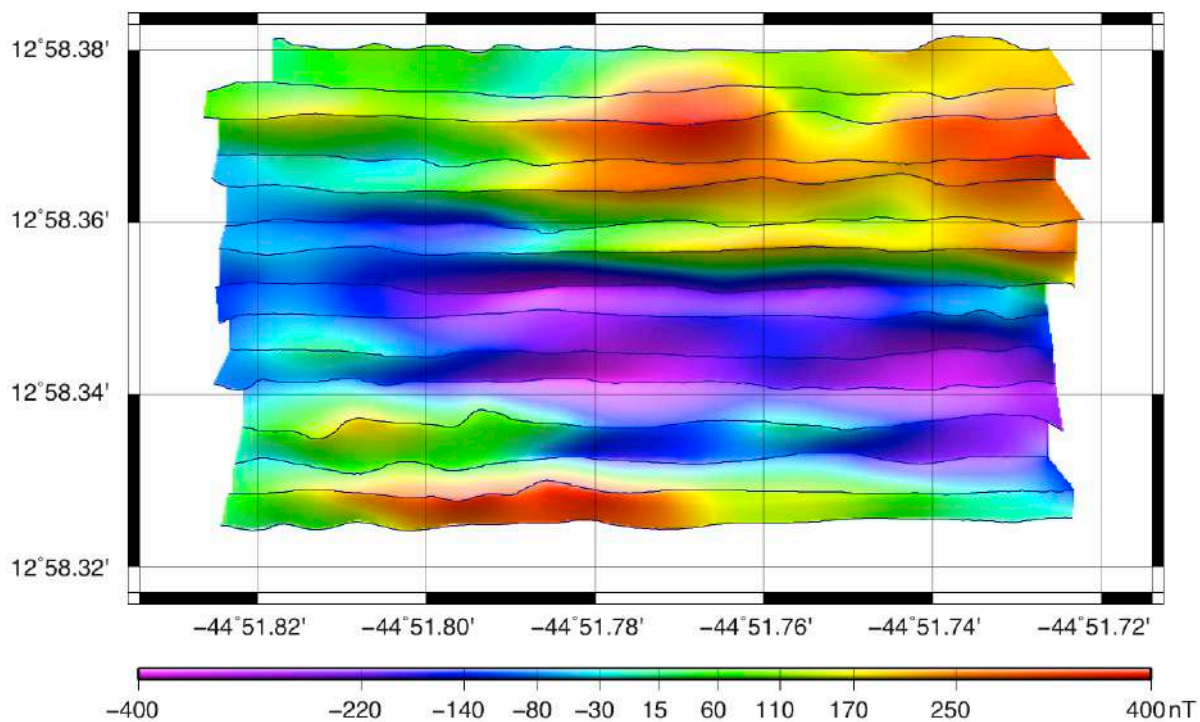
Cruise Serpentine, Ashadze Site, Altitude = 10m  
Z component



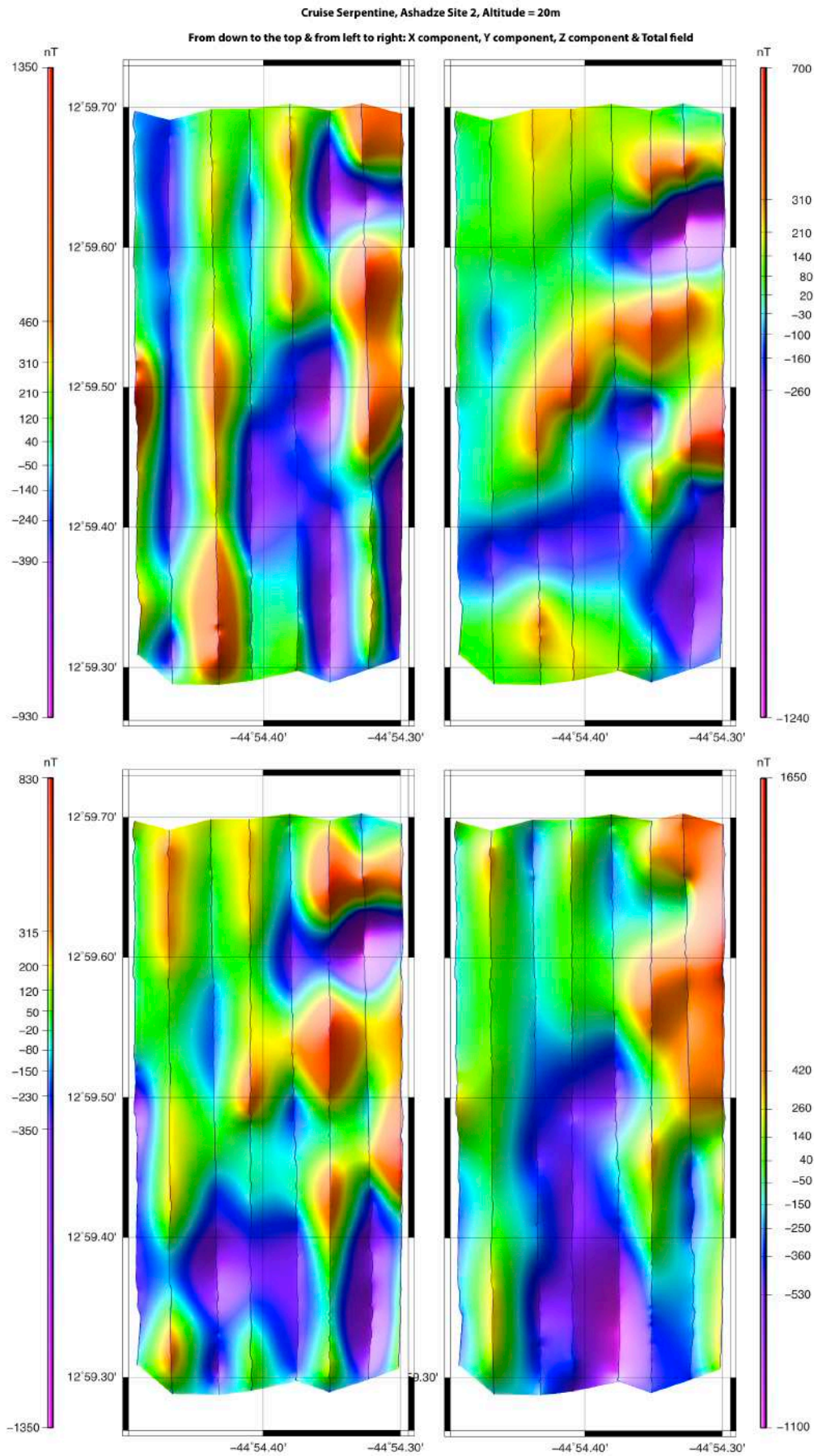
Cruise Serpentine, Ashadze Site, Altitude = 10m  
Y component



Cruise Serpentine, Ashadze Site, Altitude = 10m  
X component



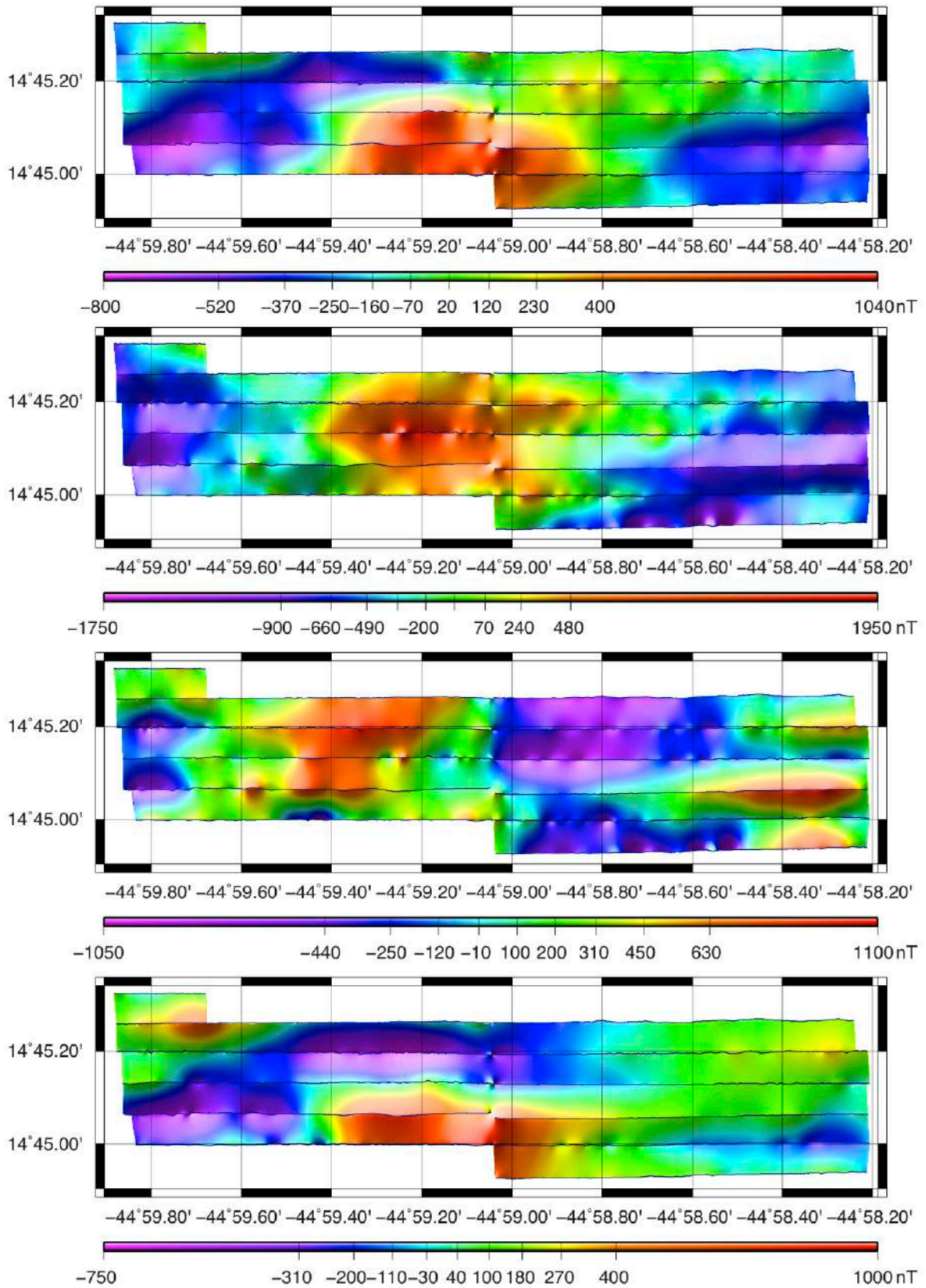
# Ashadze 2





# Logachev, 50m

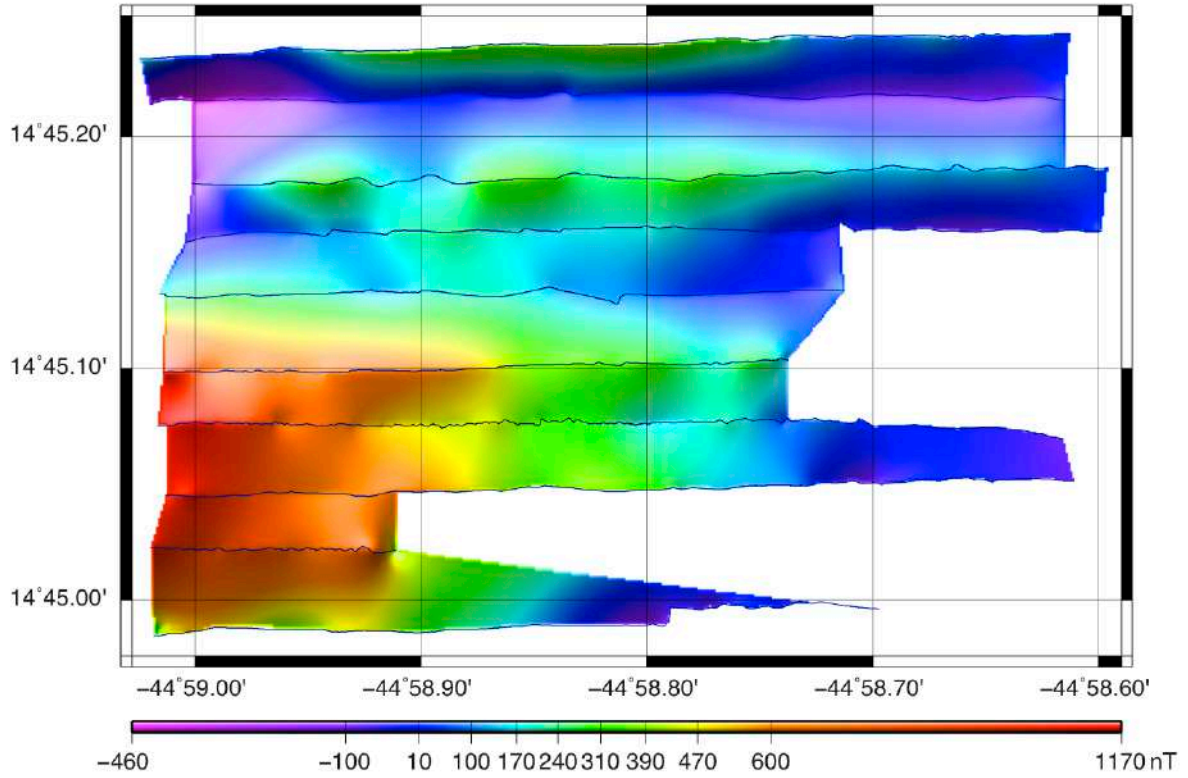
Cruise Serpentine, Logachev Site, Altitude = 50m  
From down to the top: X component, Y component, Z component, Total field



# Logachev, 20m

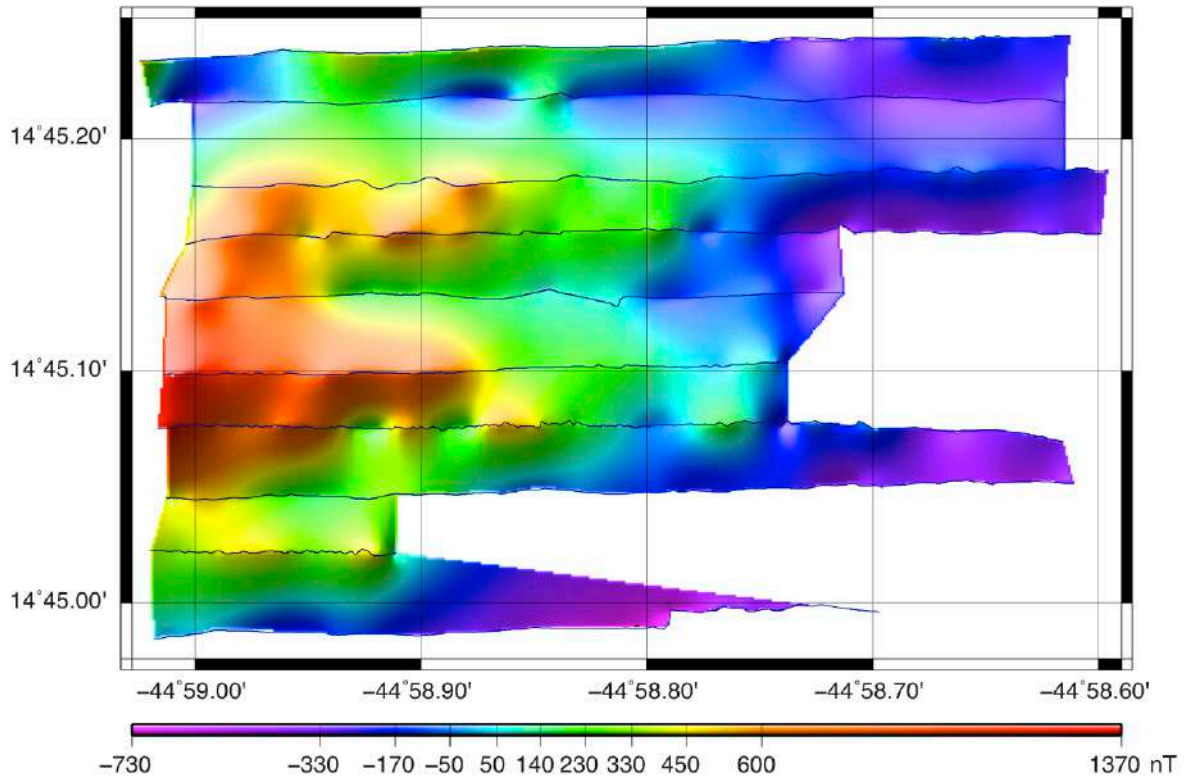
Cruise Serpentine, Logachev Site, Altitude = 20m

Total field



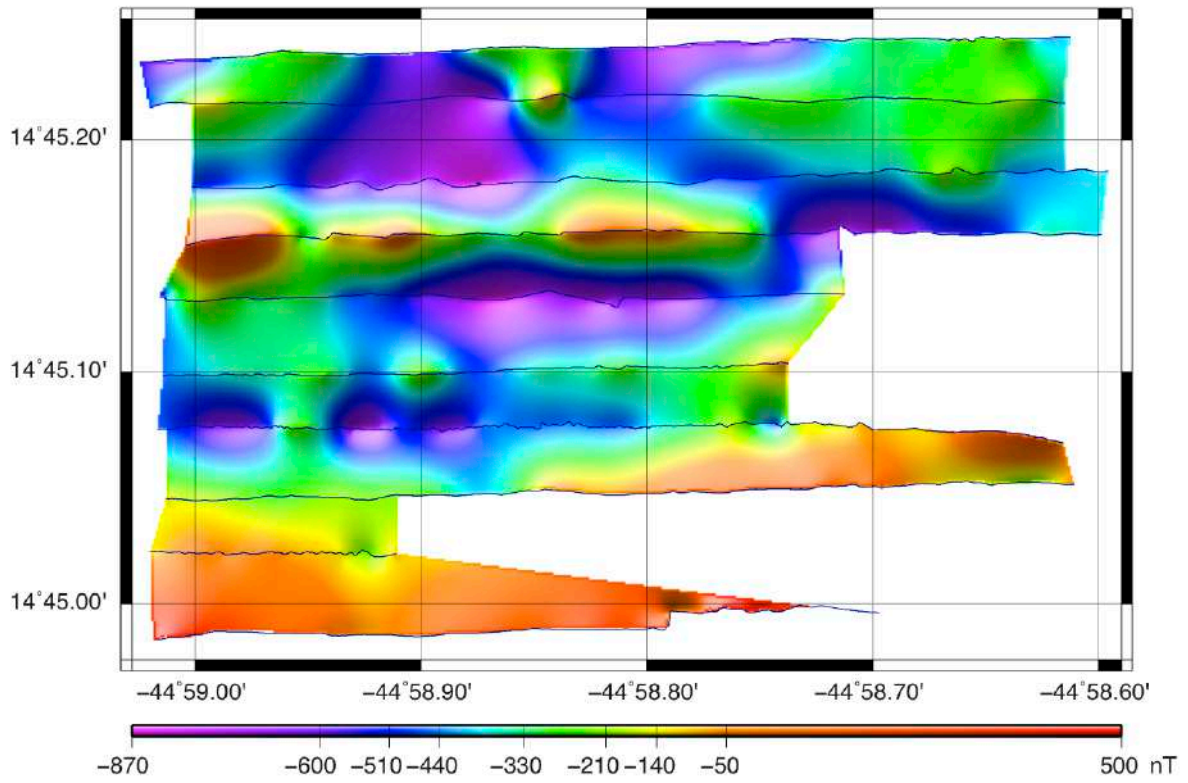
Cruise Serpentine, Logachev Site, Altitude = 20m

Z component



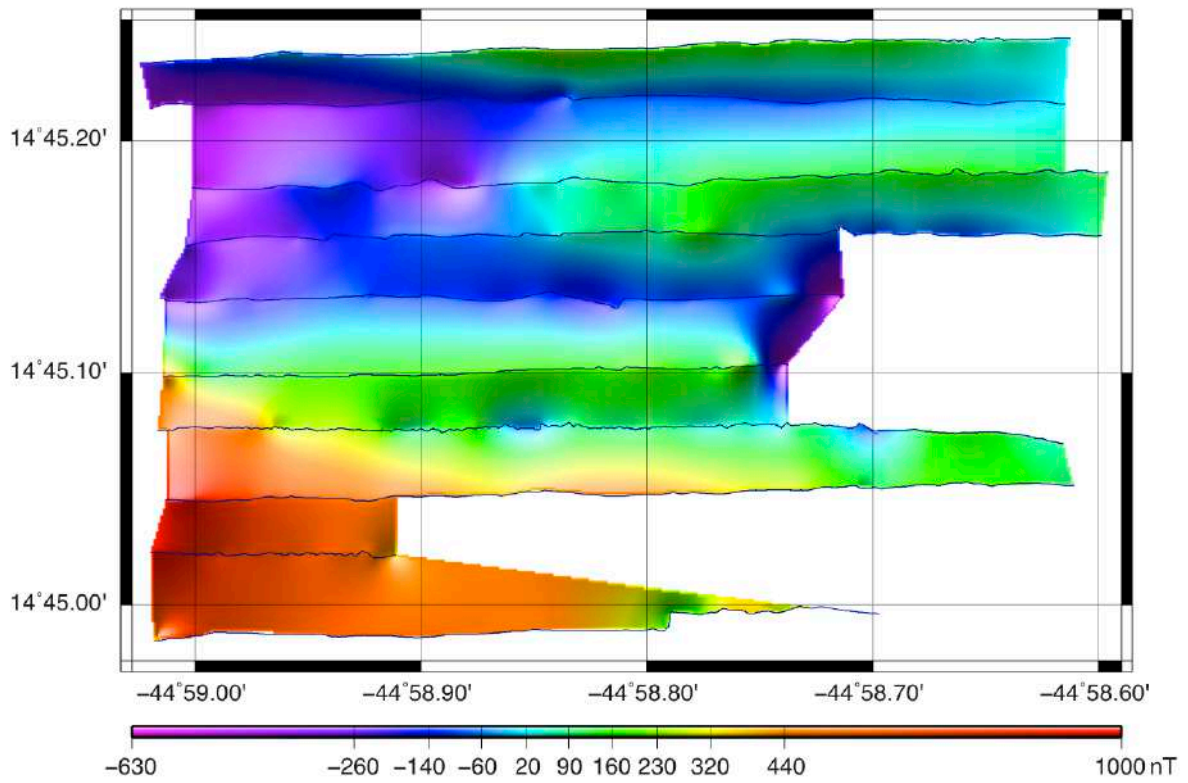
Cruise Serpentine, Logachev Site, Altitude = 20m

Y component



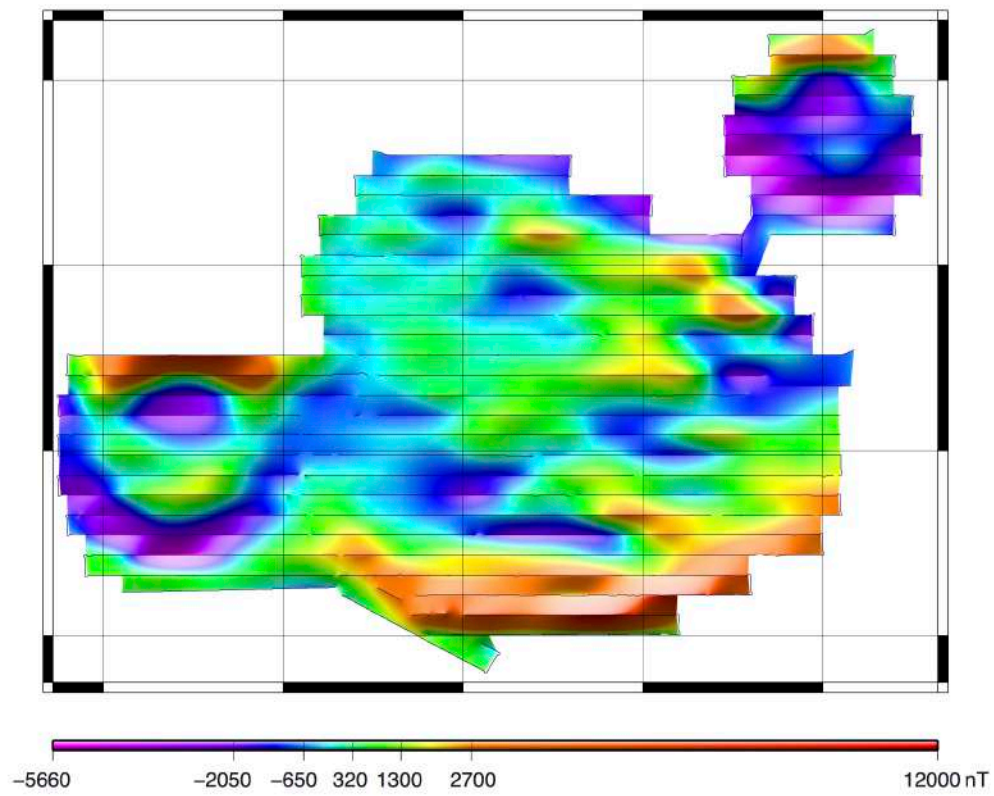
Cruise Serpentine, Logachev Site, Altitude = 20m

X component

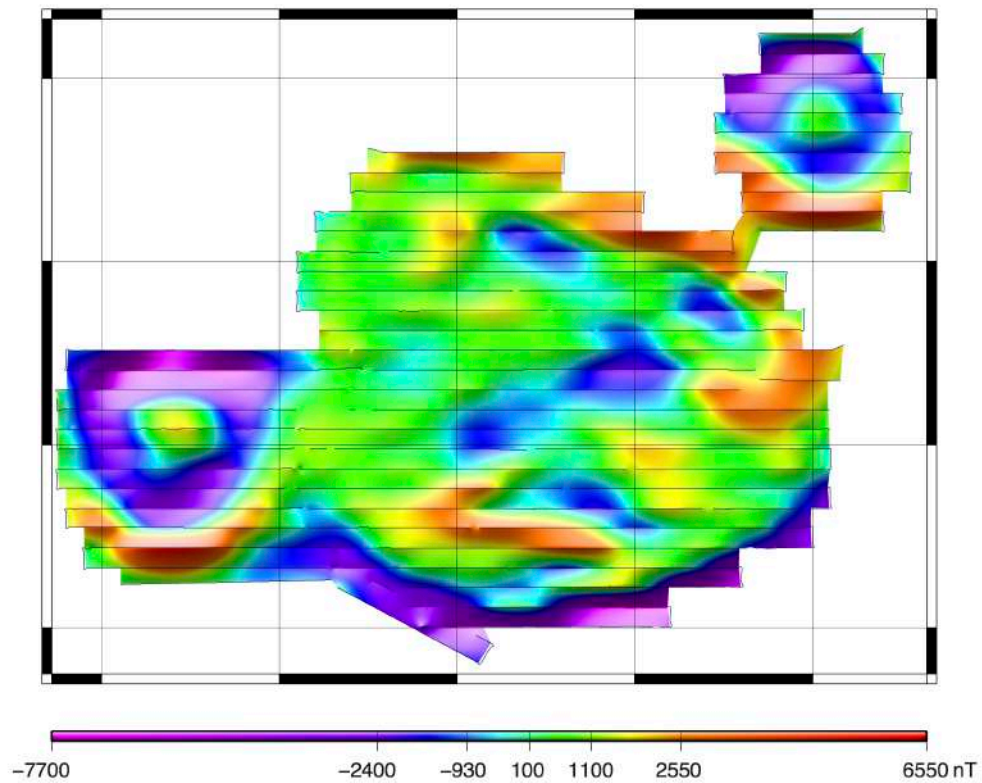


# Mission Futuna 1, AUV, Caldeira A

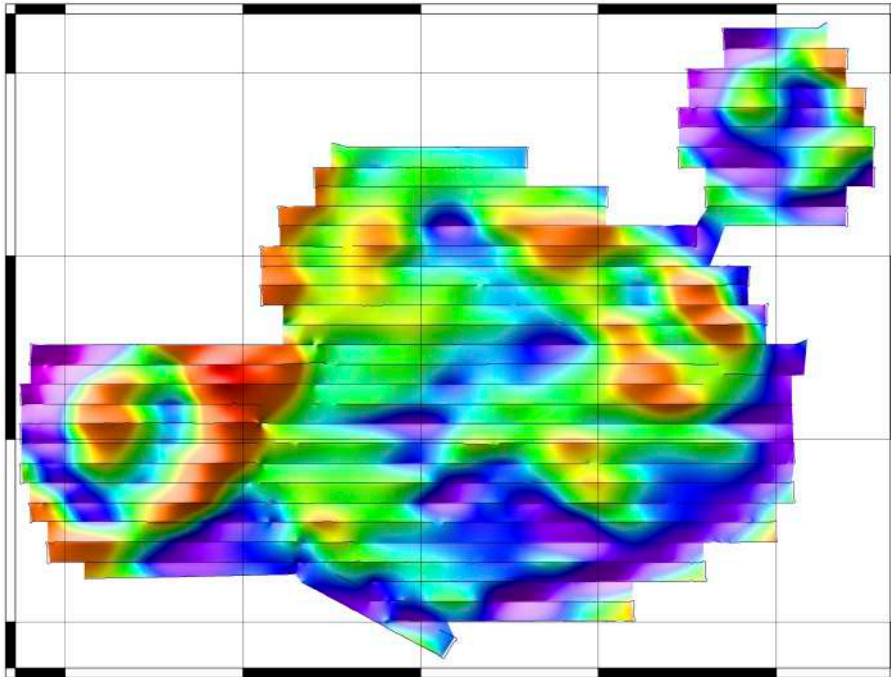
Cruise Futuna 1, Caldeira A, Altitude = 70m  
Total field



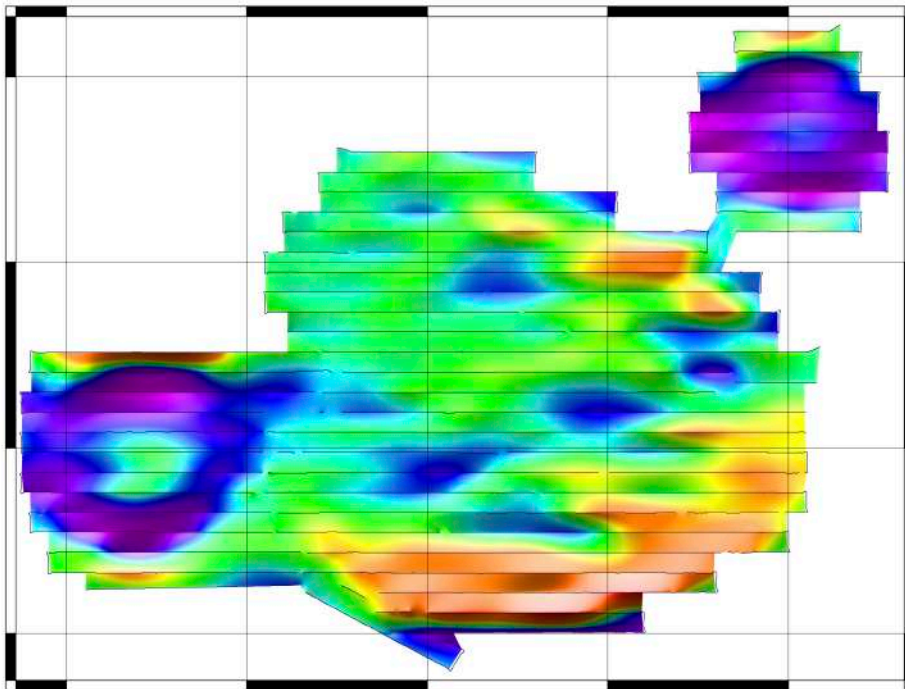
Cruise Futuna 1, Caldeira A, Altitude = 70m  
Z component



Cruise Futuna 1, Caldeira A, Altitude = 70m  
Y component

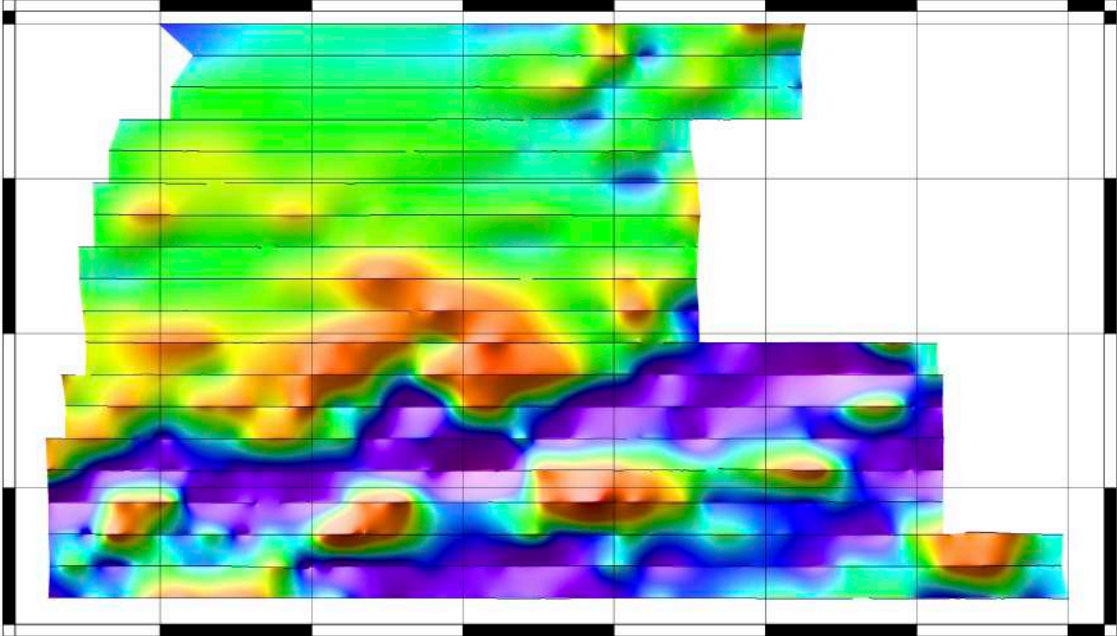


Cruise Futuna 1, Caldeira A, Altitude = 70m  
X component



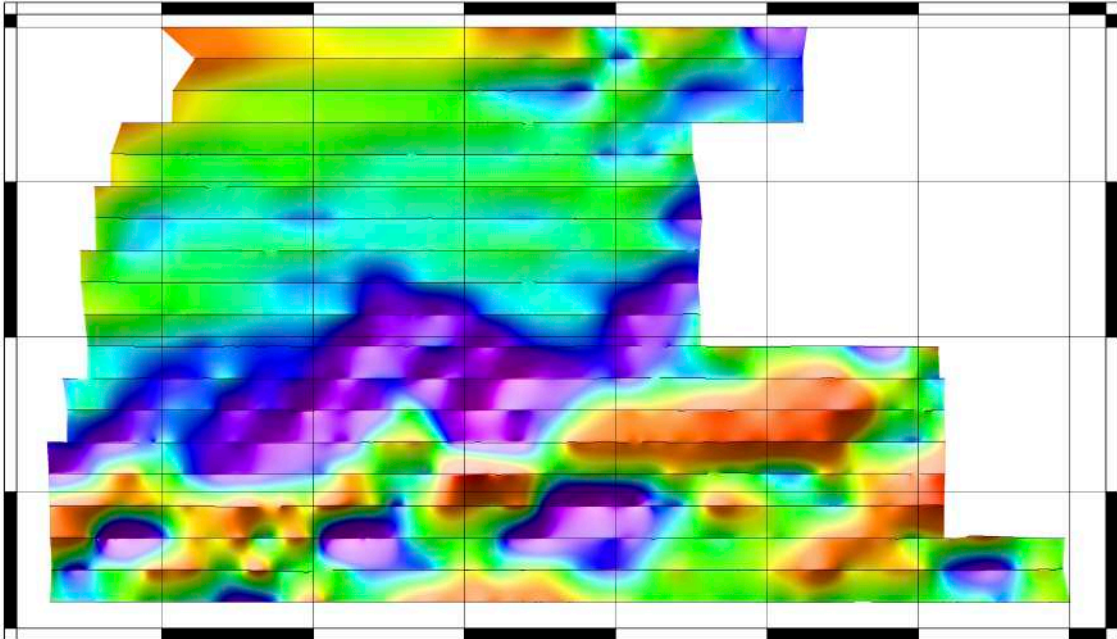
# Mission Futuna 1, AUV, Volcanic Ridge

Cruise Futuna 1, Volcanic Ridge, Altitude = 70m  
Total field



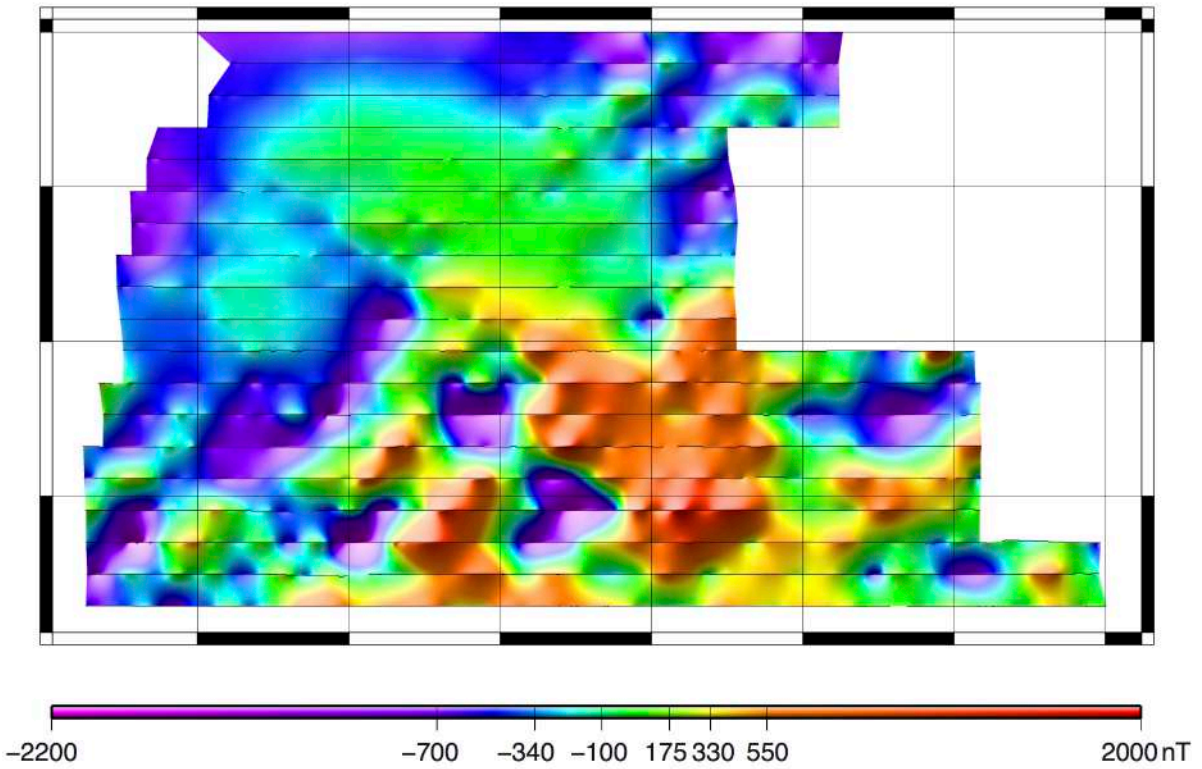
-3500 -850 -350 0 340 850 3200nT

Cruise Futuna 1, Volcanic Ridge, Altitude = 70m  
Z component

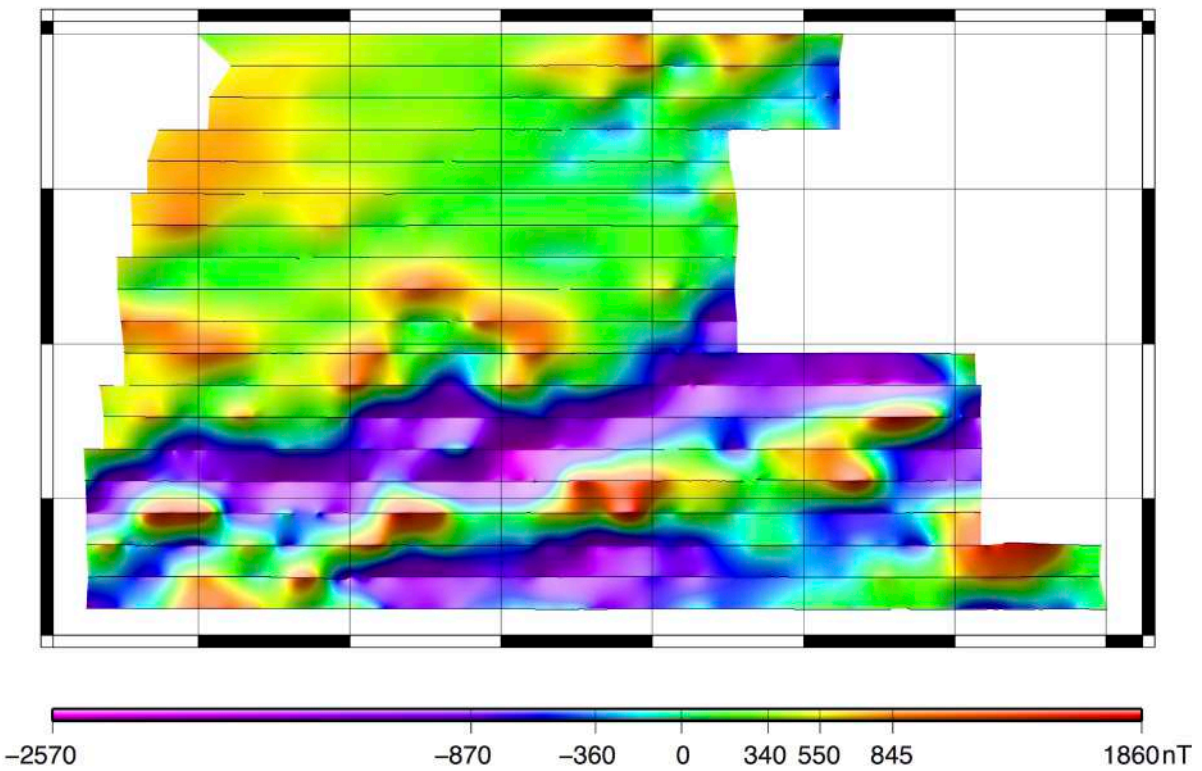


-3000 -1000 -430 0 400 660 1000 3400nT

**Cruise Futuna 1, Volcanic Ridge, Altitude = 70m**  
**Y component**

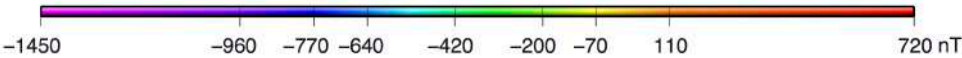
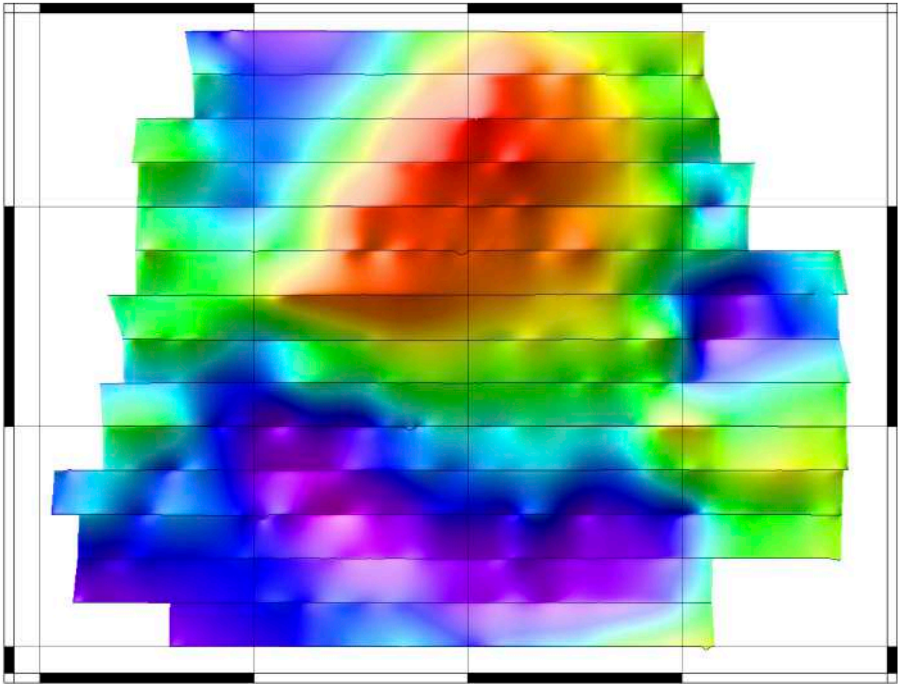


**Cruise Futuna 1, Volcanic Ridge, Altitude = 70m**  
**X component**

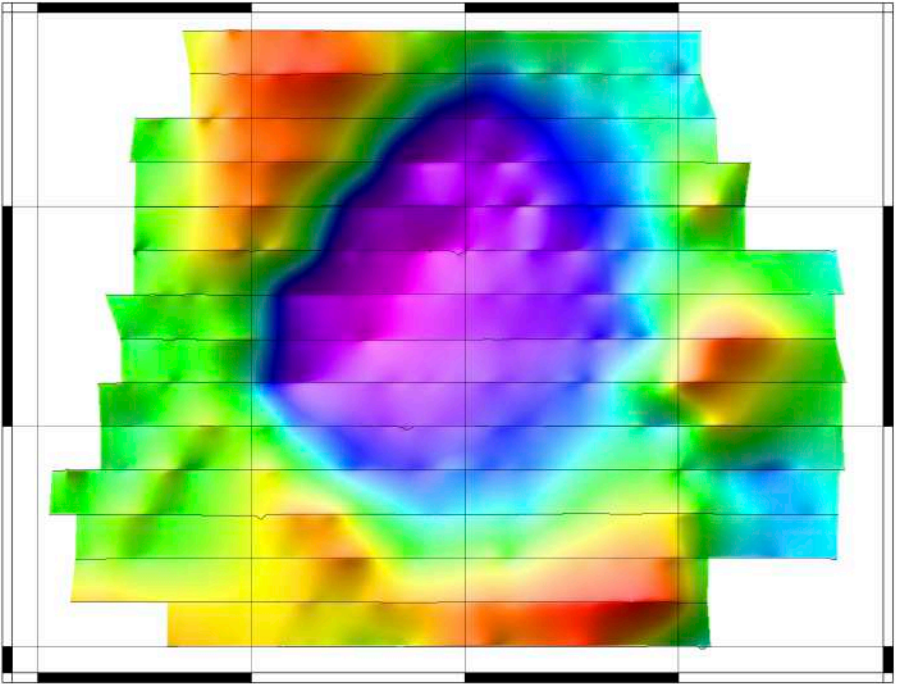


# Mission Futuna 1, AUV, Caldeira B

Cruise Futuna 1, Caldeira B, Altitude = 70m  
Total field



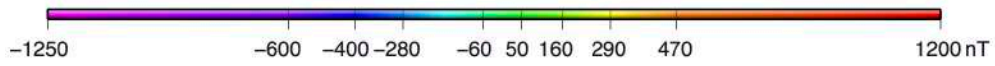
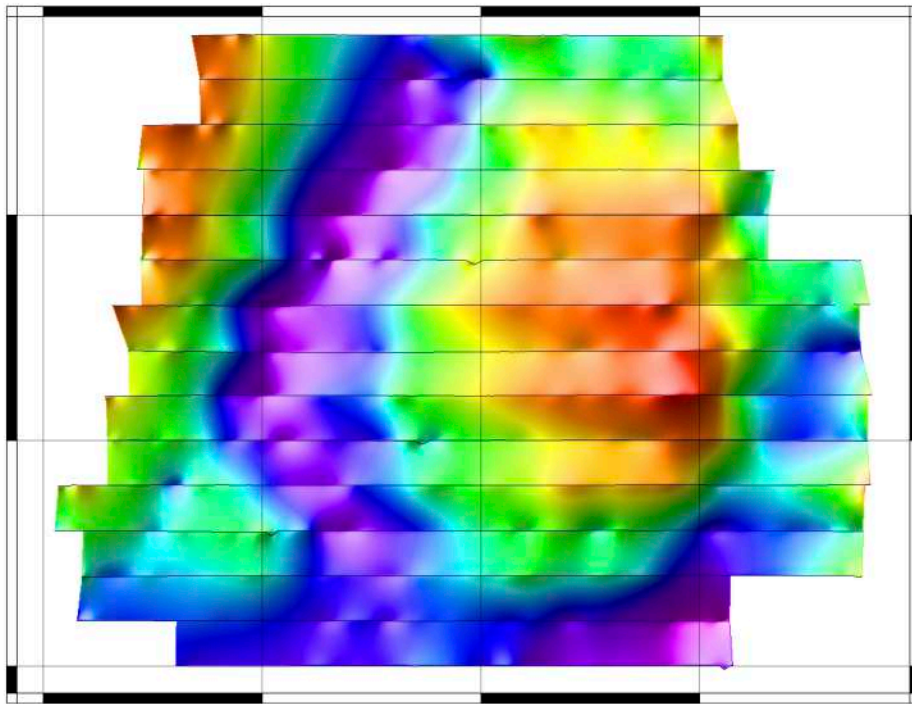
Cruise Futuna 1, Caldeira B, Altitude = 70m  
Z component





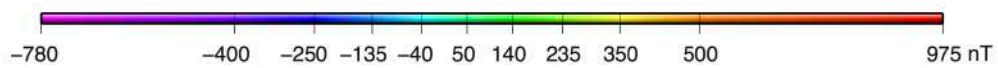
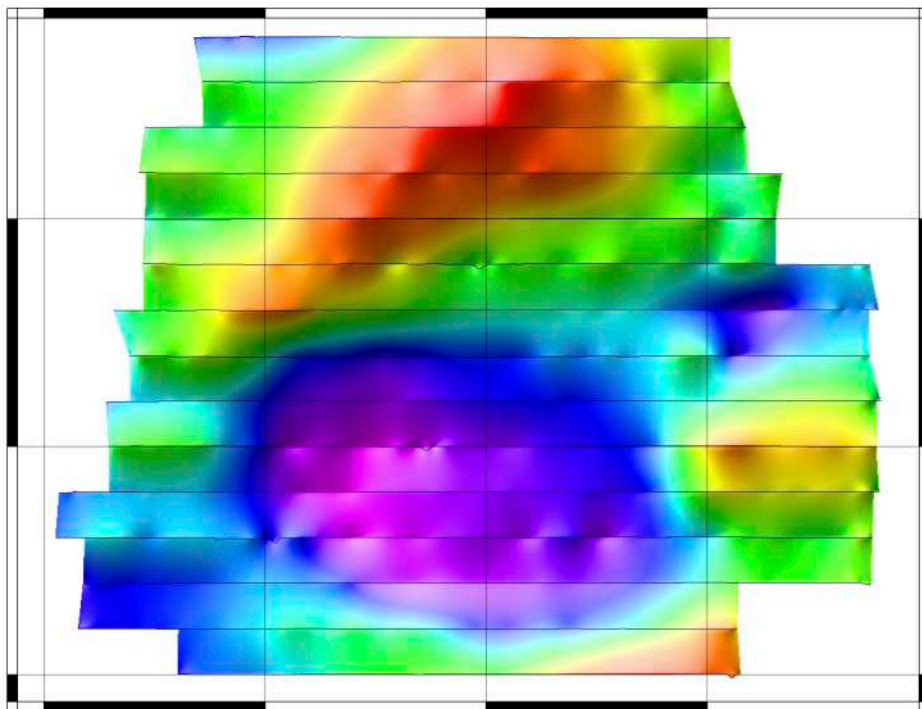
Cruise Futuna 1, Caldeira B, Altitude = 70m

Y component



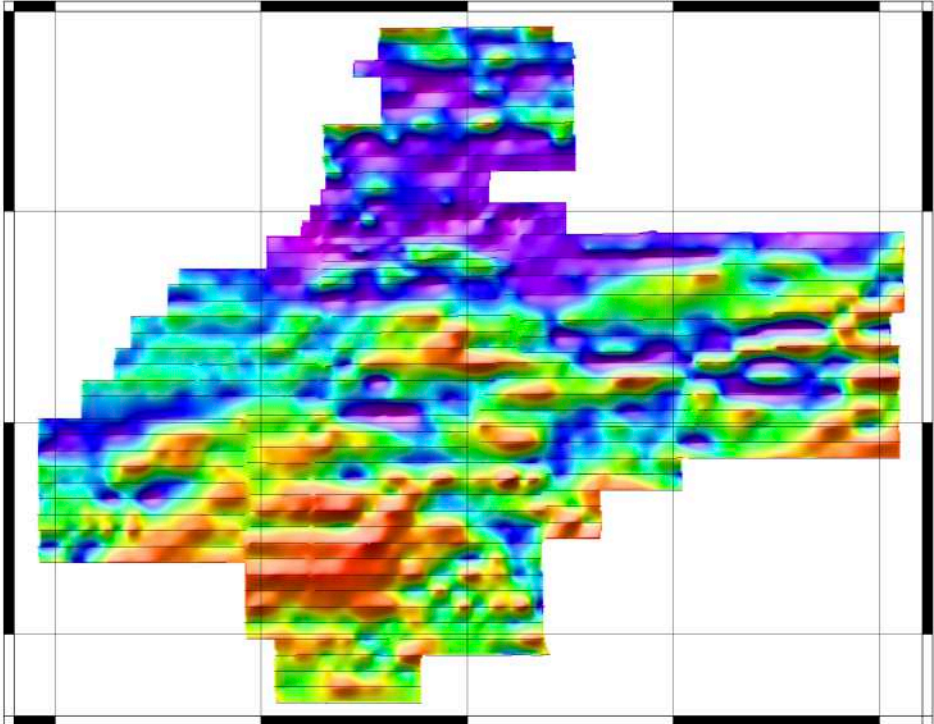
Cruise Futuna 1, Caldeira B, Altitude = 70m

X component

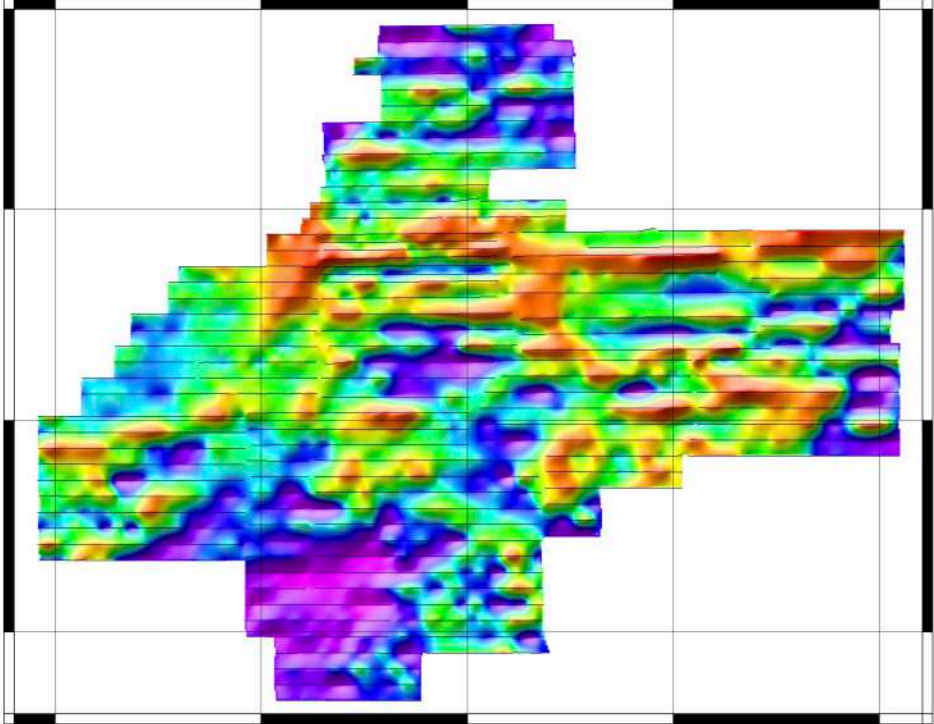


# Mission Futuna 3, AUV, Zone 1

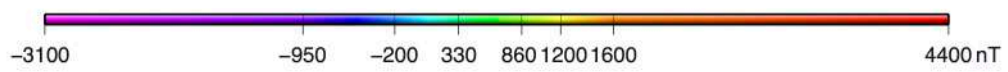
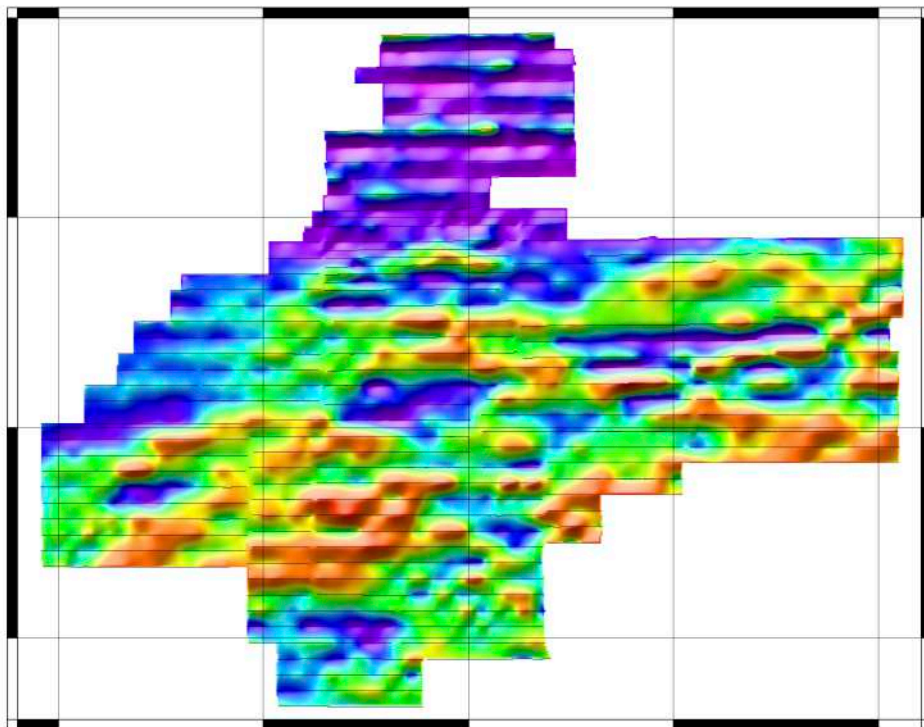
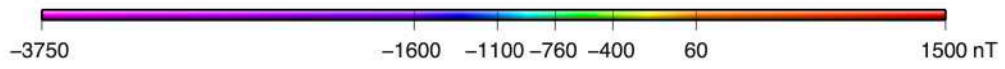
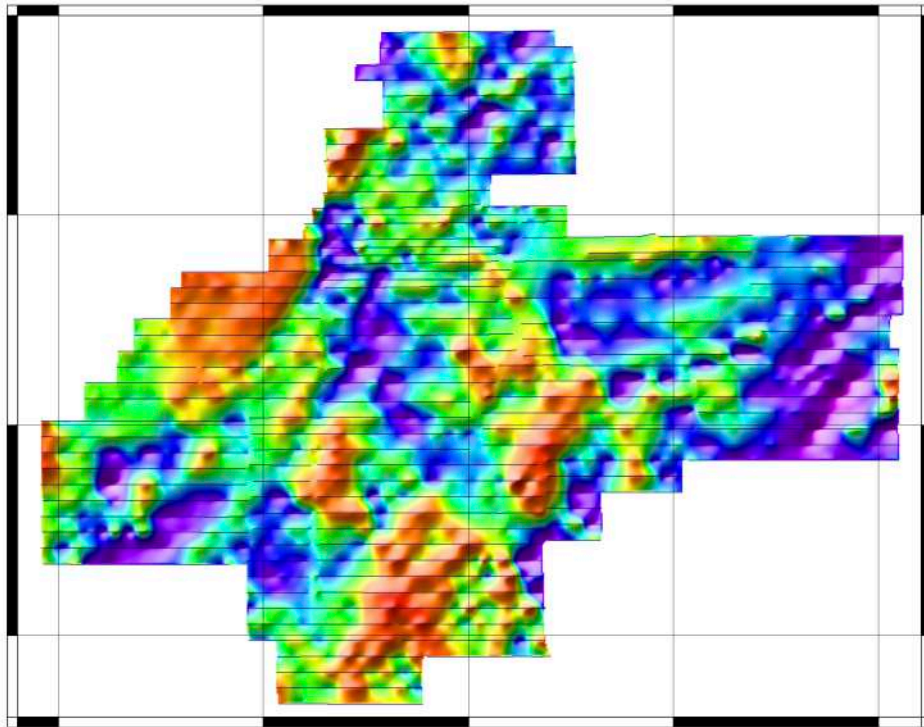
Cruise Futuna 1, Zone 1, Altitude = 70m  
From down to the top: X component, Y component, Z component, Total field



-3100 -1200 -760 -430 130 700 1000 1500 4100 nT



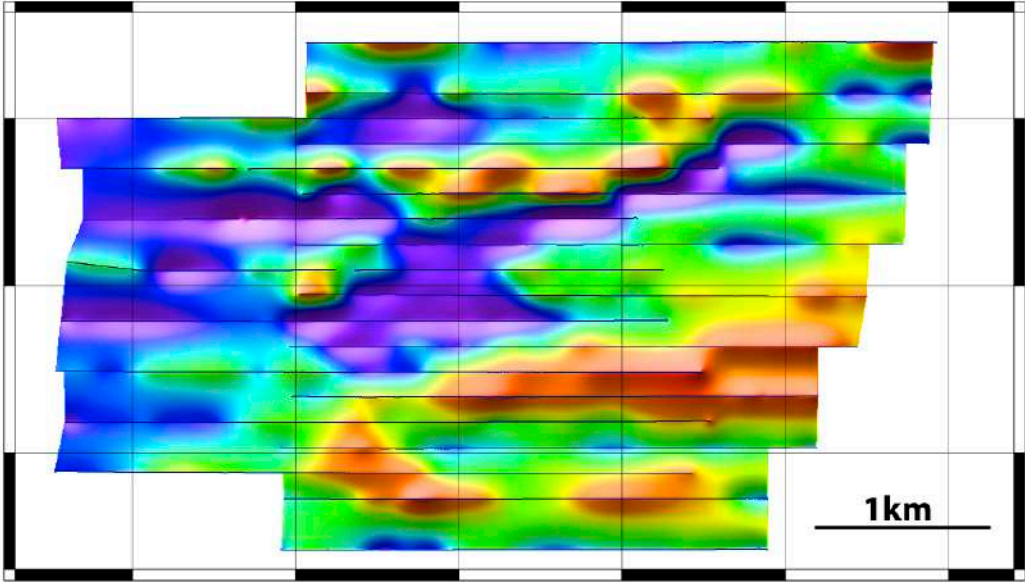
-3600 -1400 -900 -520 100 400 1100 1600 4300nT



# Mission Futuna 3, AUV, Zone 2

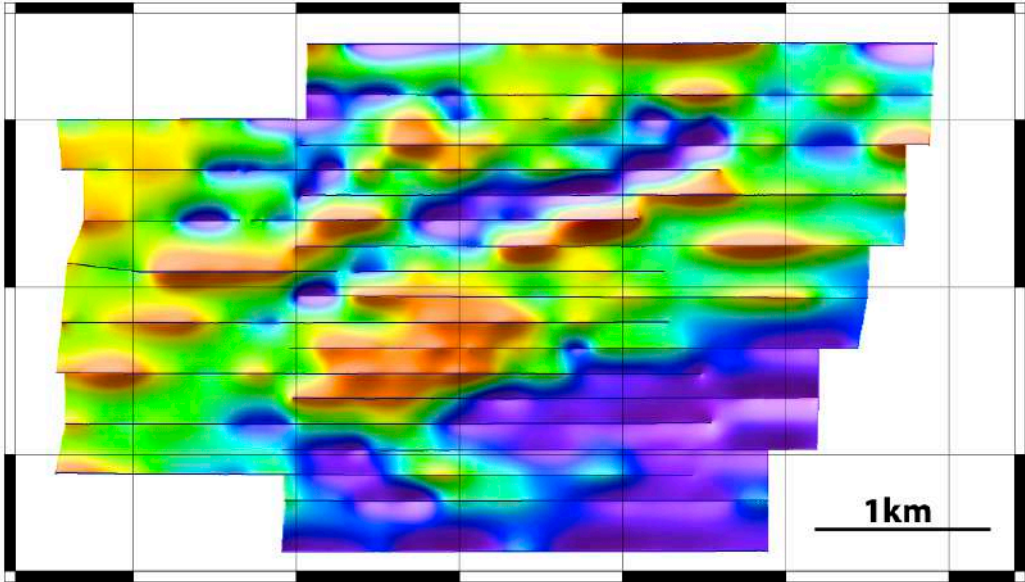
Cruise Futuna 3, Zone 2, Altitude = 70m

Total field



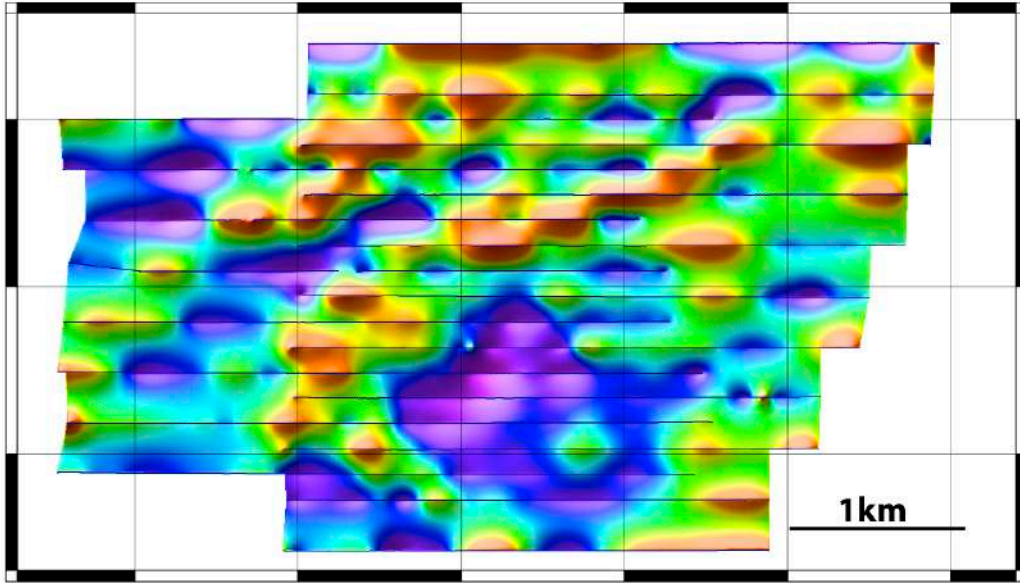
Cruise Futuna 3, Zone 2, Altitude = 70m

Z component



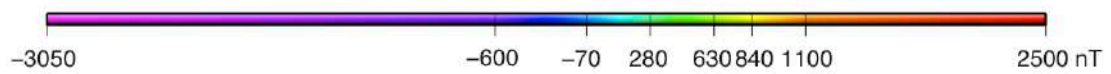
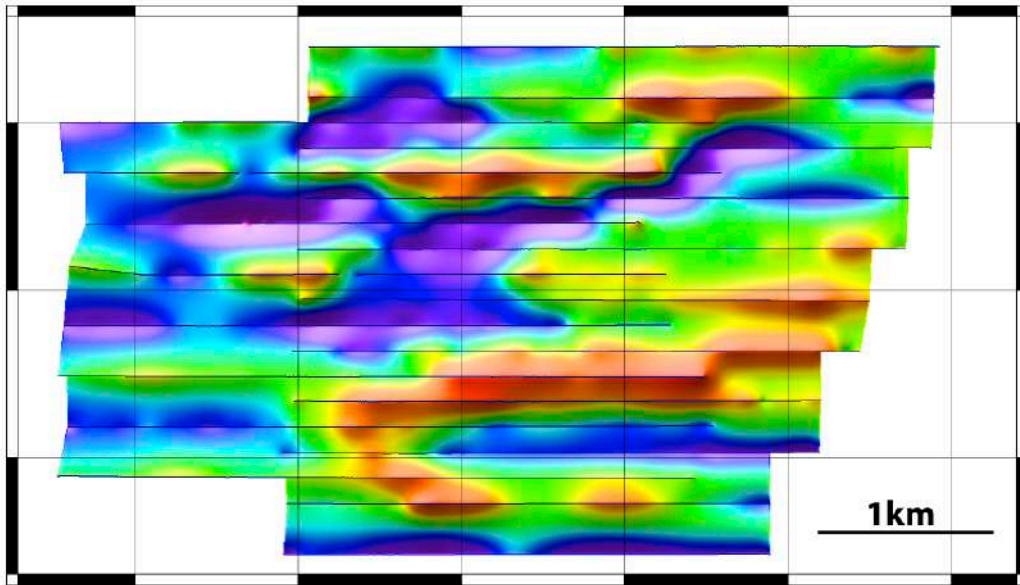
Cruise Futuna 3, Zone 2, Altitude = 70m

Y component



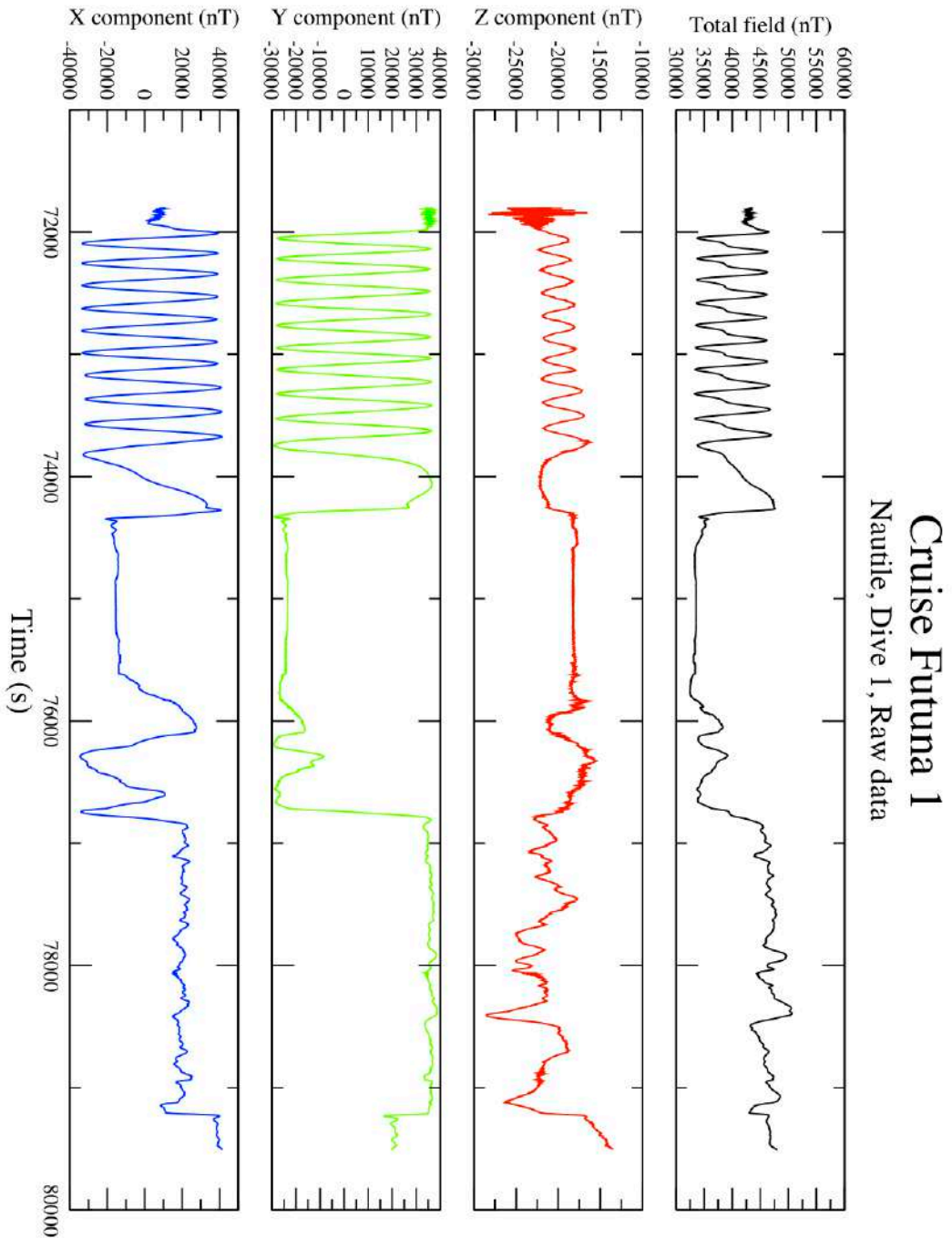
Cruise Futuna 3, Zone 2, Altitude = 70m

X component



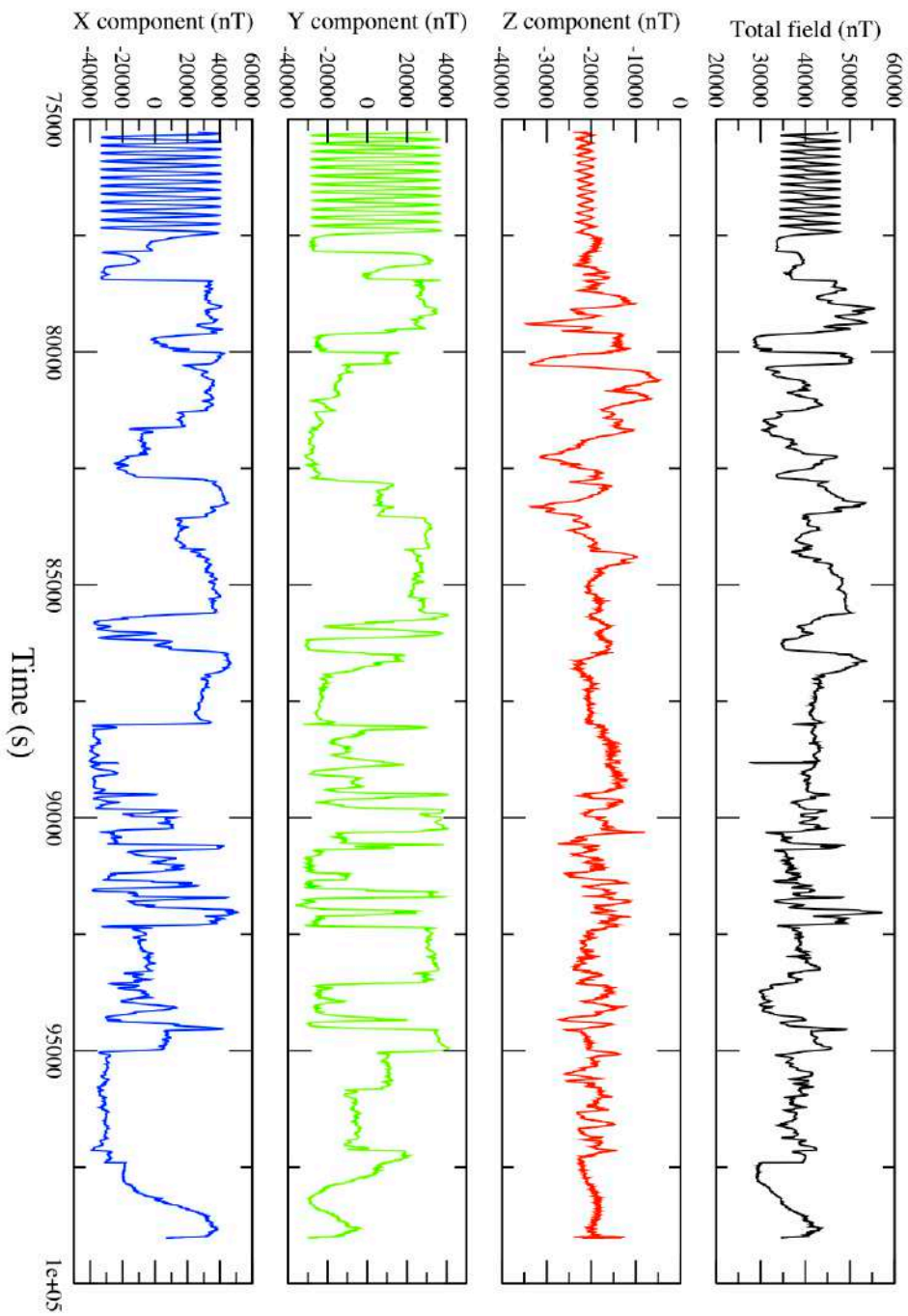
# Données du Nautille

## Données brutes



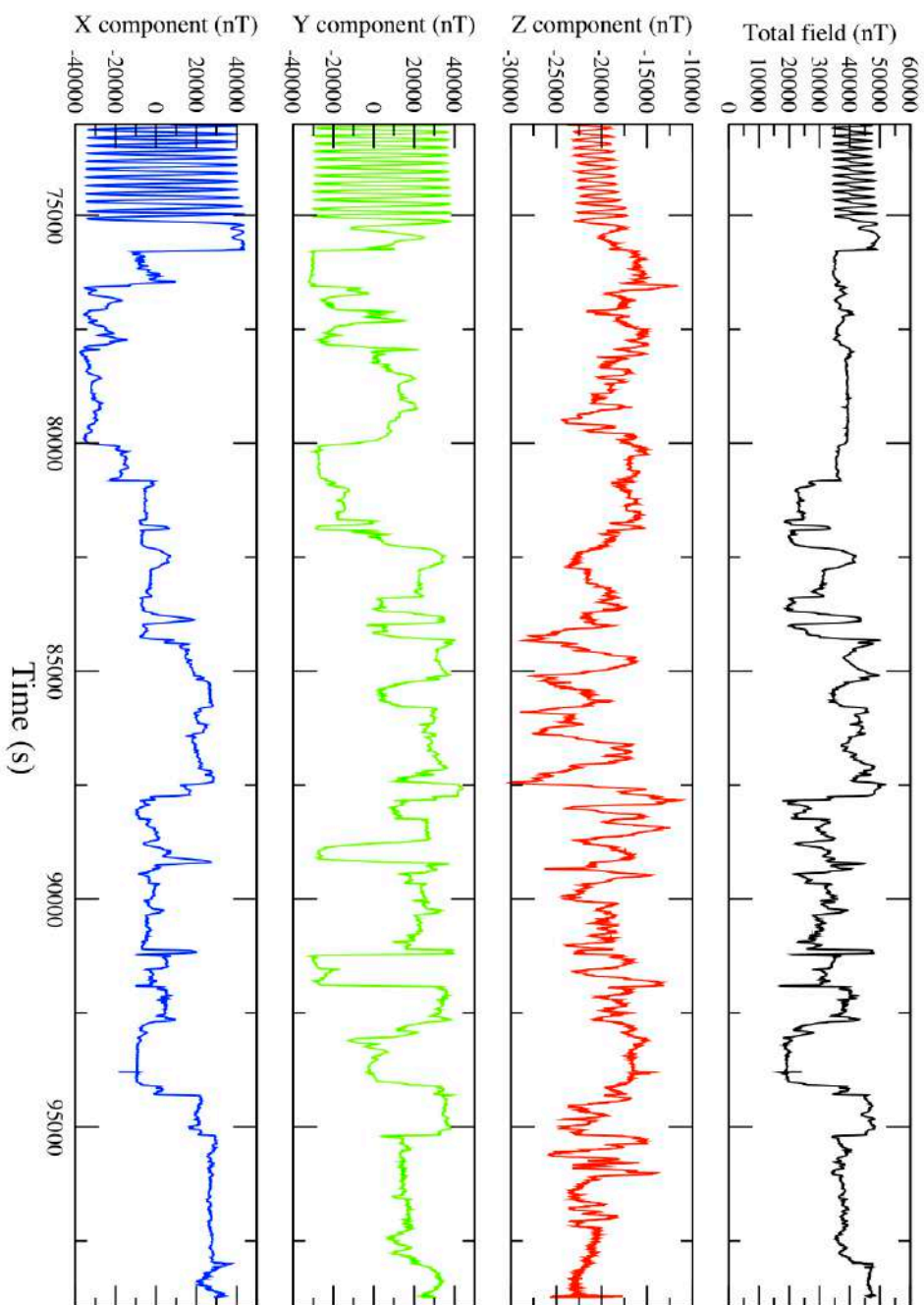
# Cruise Futuna 1

## Nautilie, Dive 2, Raw data



# Cruise Futuna 1

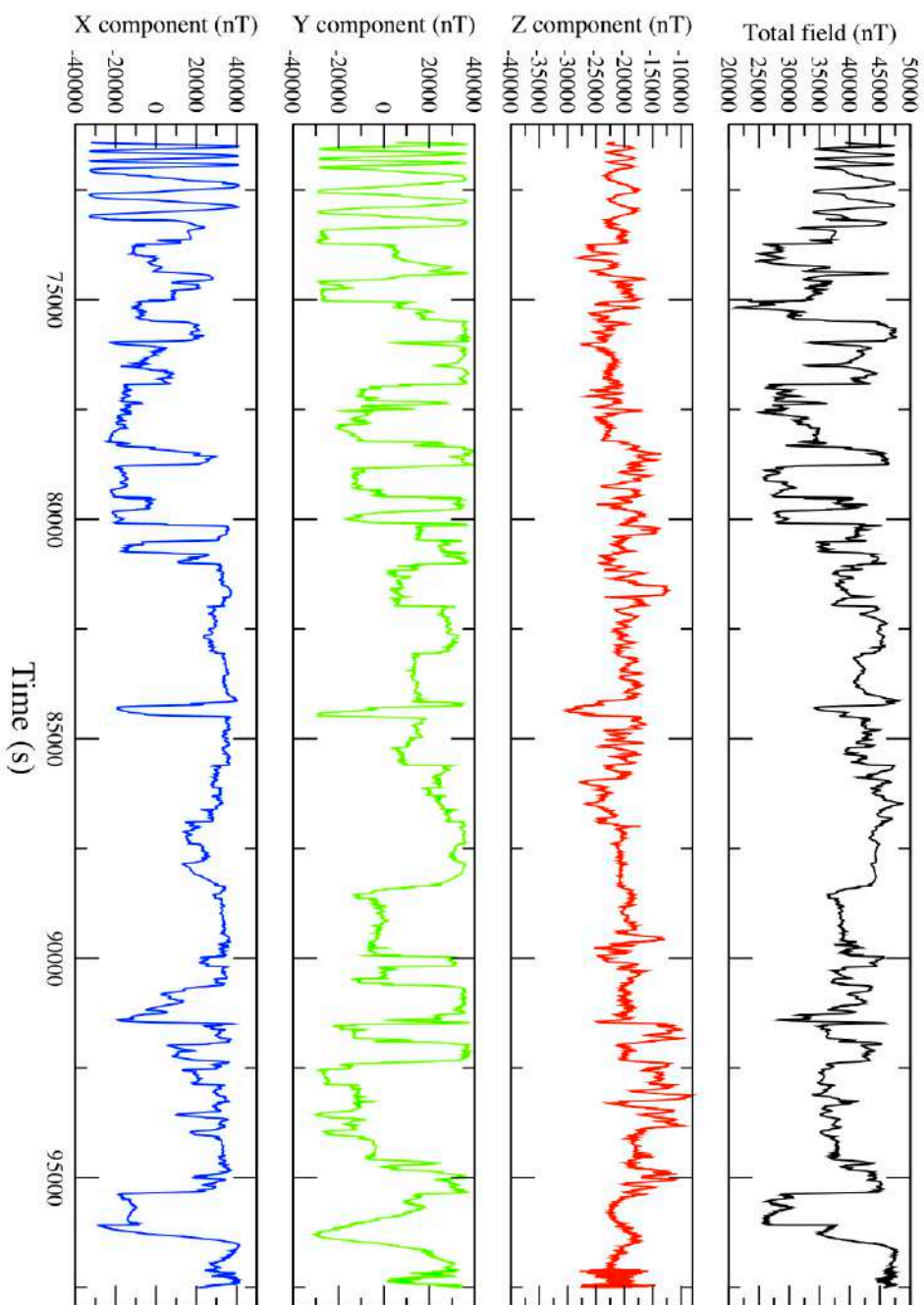
## Nautilie, Dive 3, Raw data





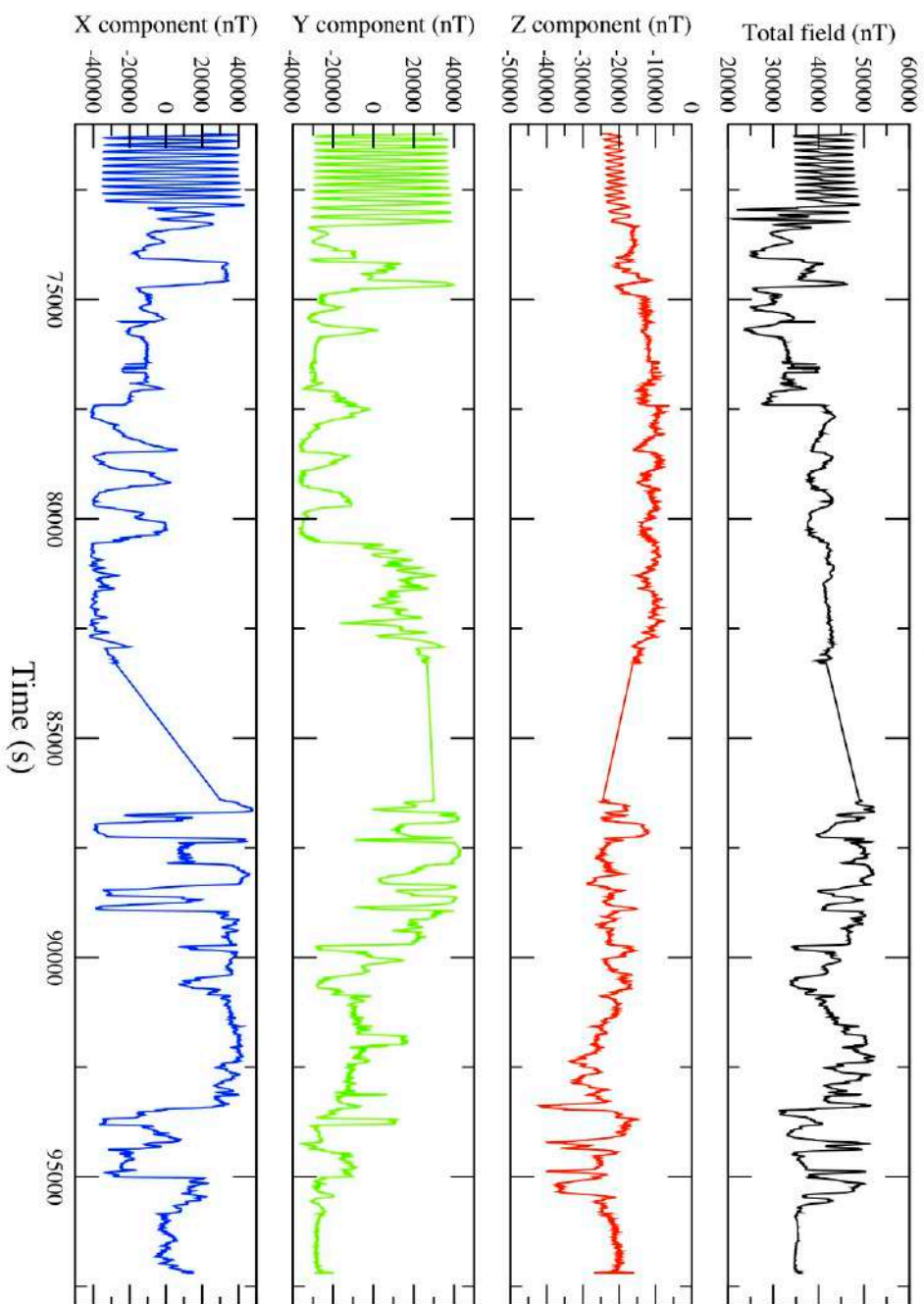
# Cruise Futuna 1

## Nautilie, Dive 4, Raw data



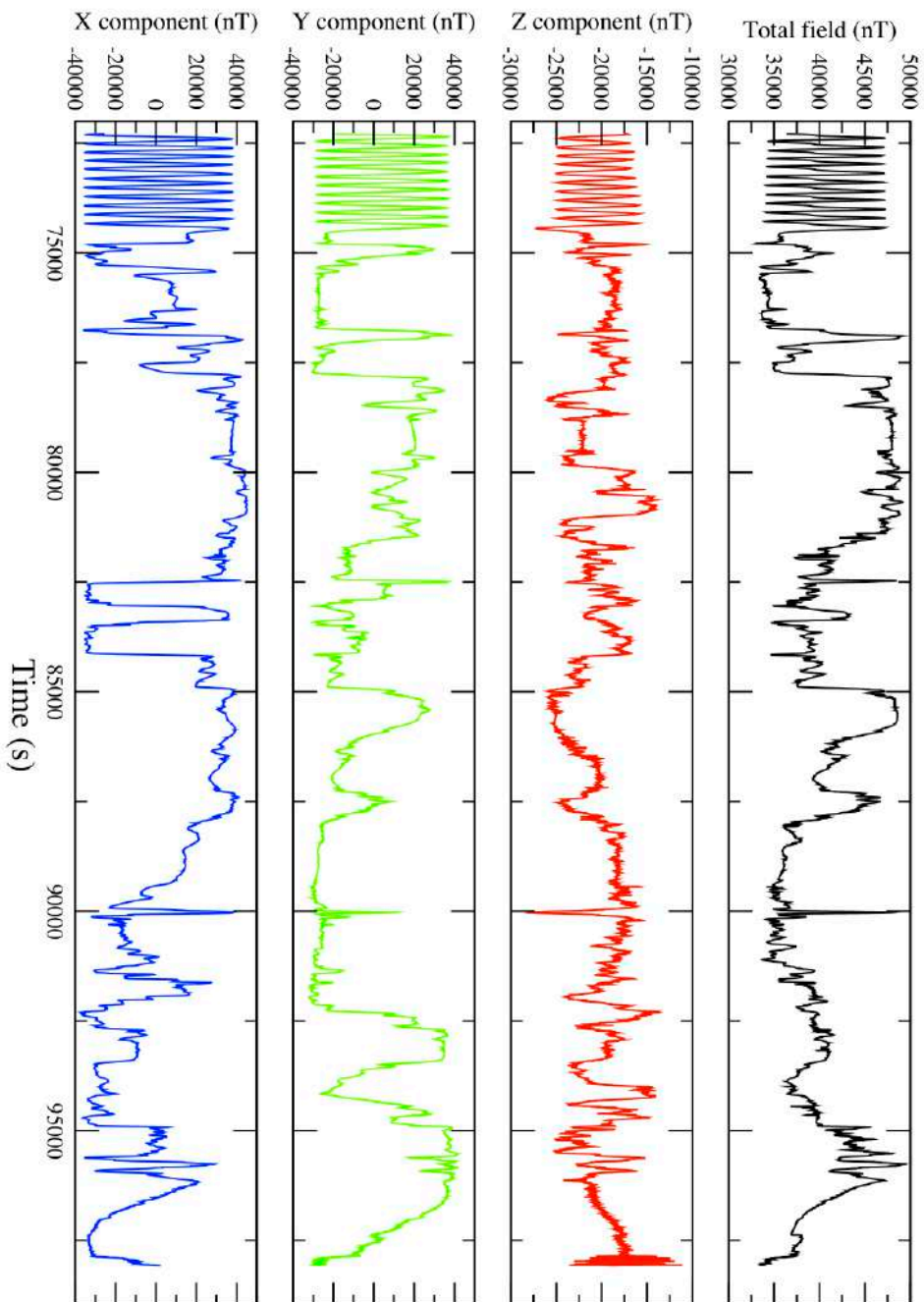
# Cruise Futuna 1

## Nautilie, Dive 5, Raw data



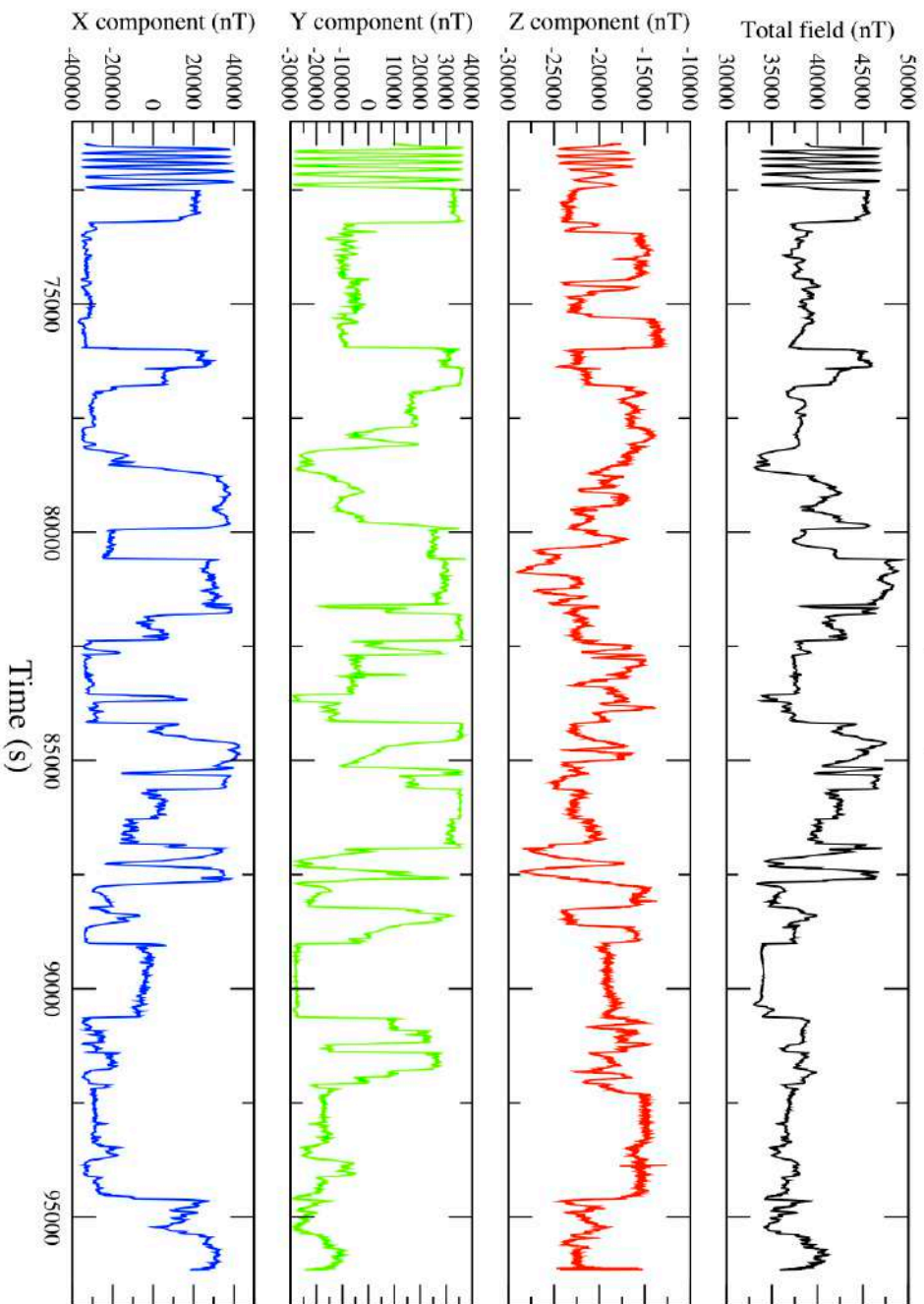
# Cruise Futuna 1

## Nautilie, Dive 6, Raw data



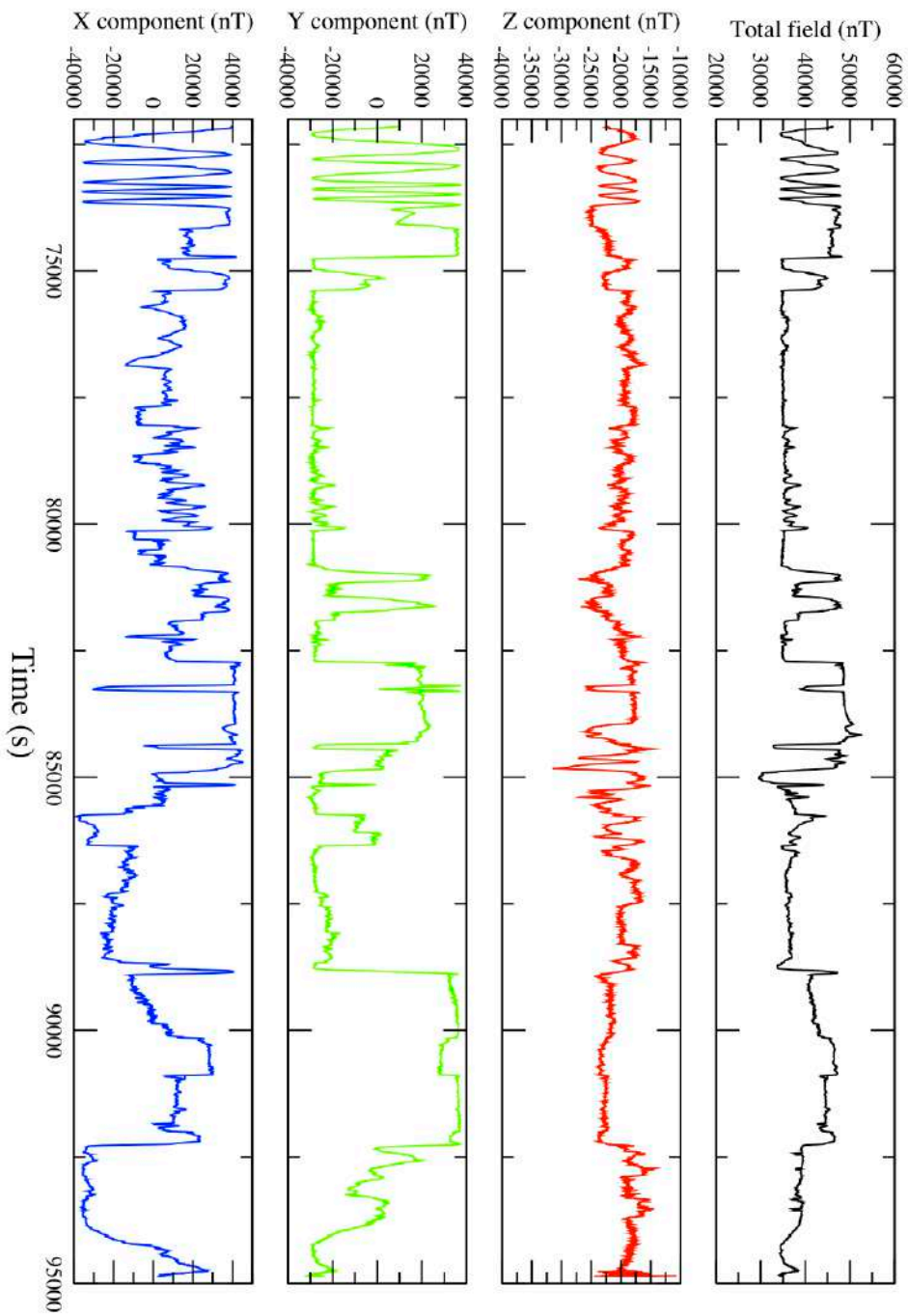
# Cruise Futuna 1

## Nautilie, Dive 7, Raw data



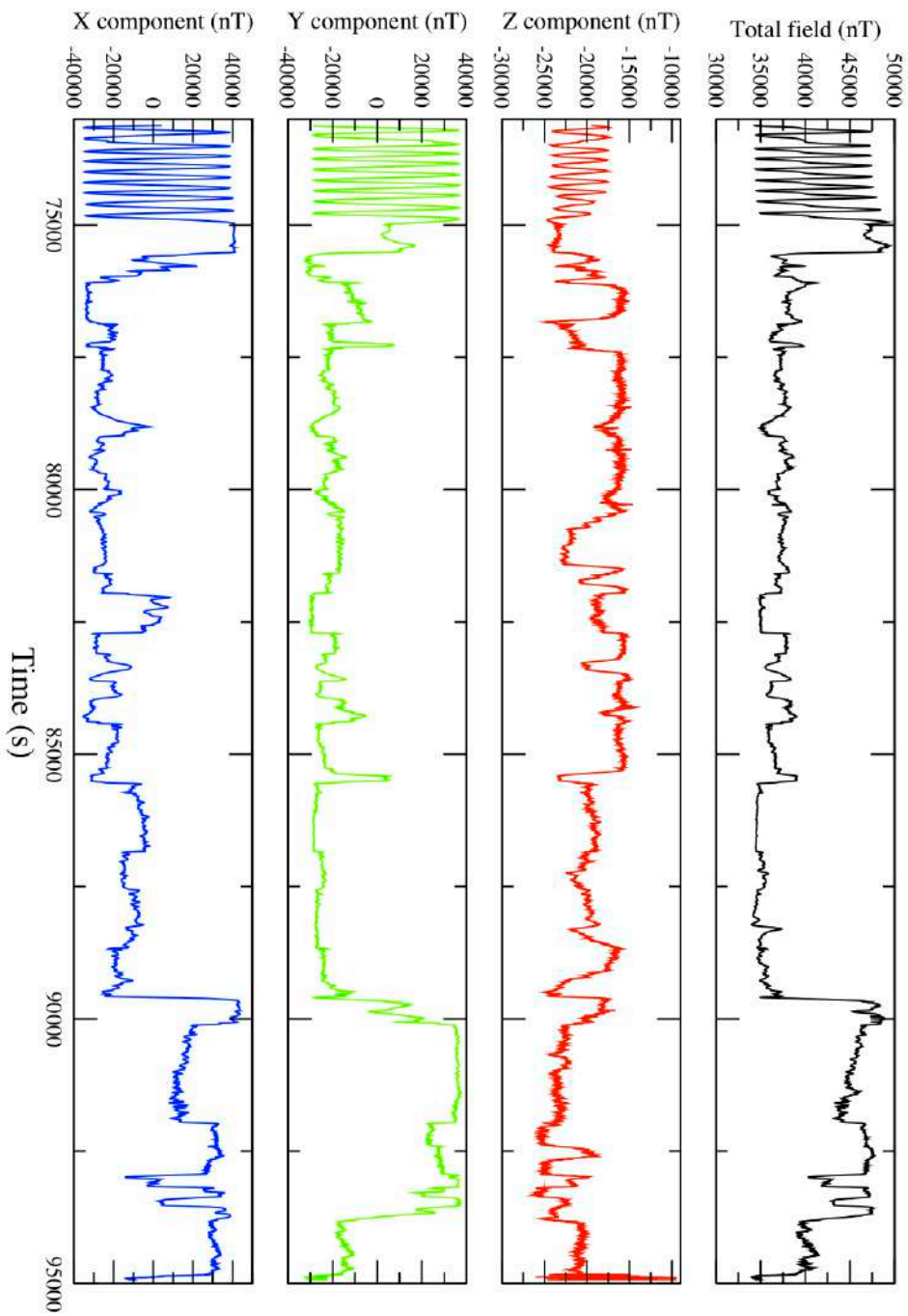
# Cruise Futuna 1

## Nautilie, Dive 8, Raw data



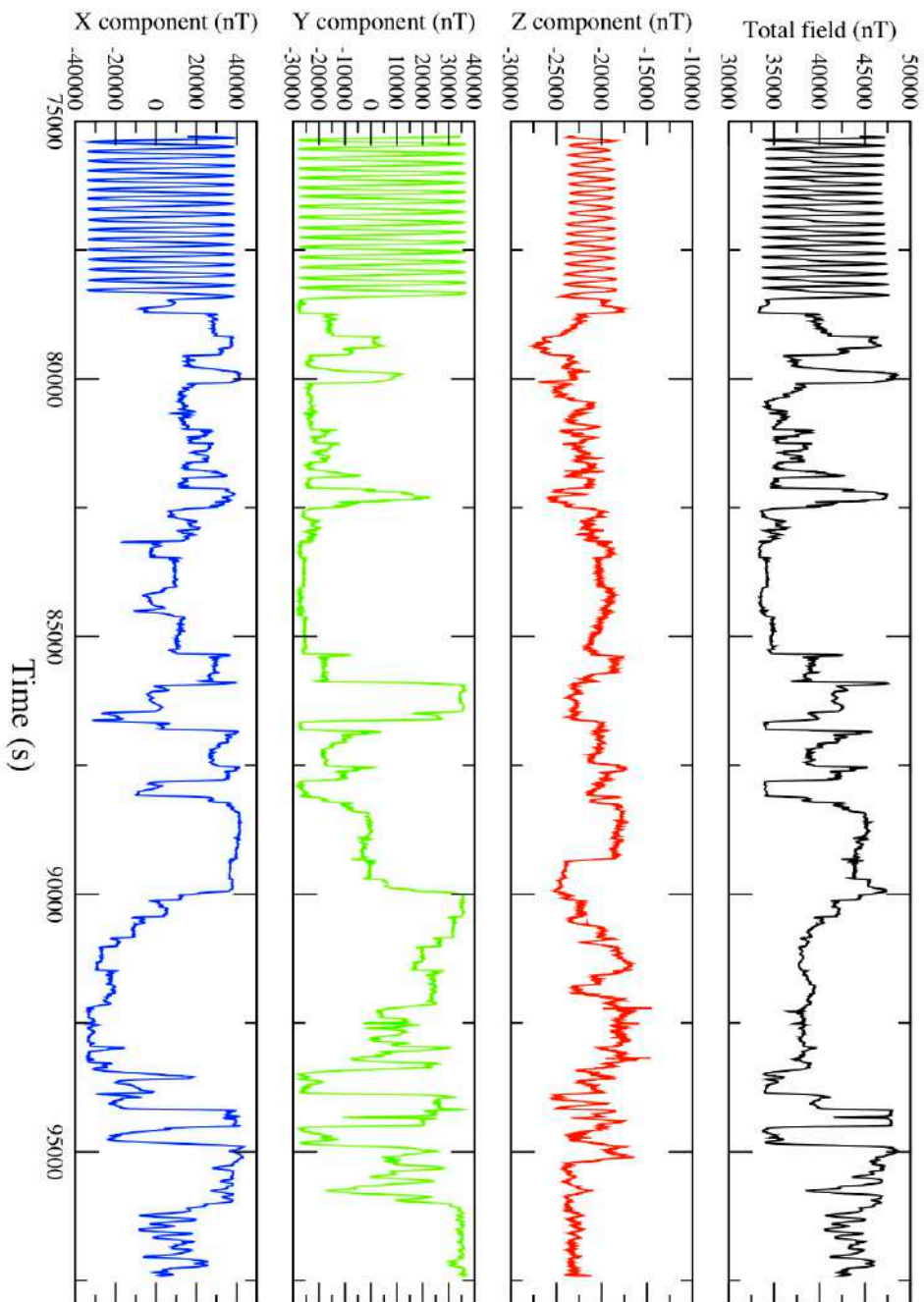
# Cruise Futuna 1

## Nautil, Dive 9, Raw data



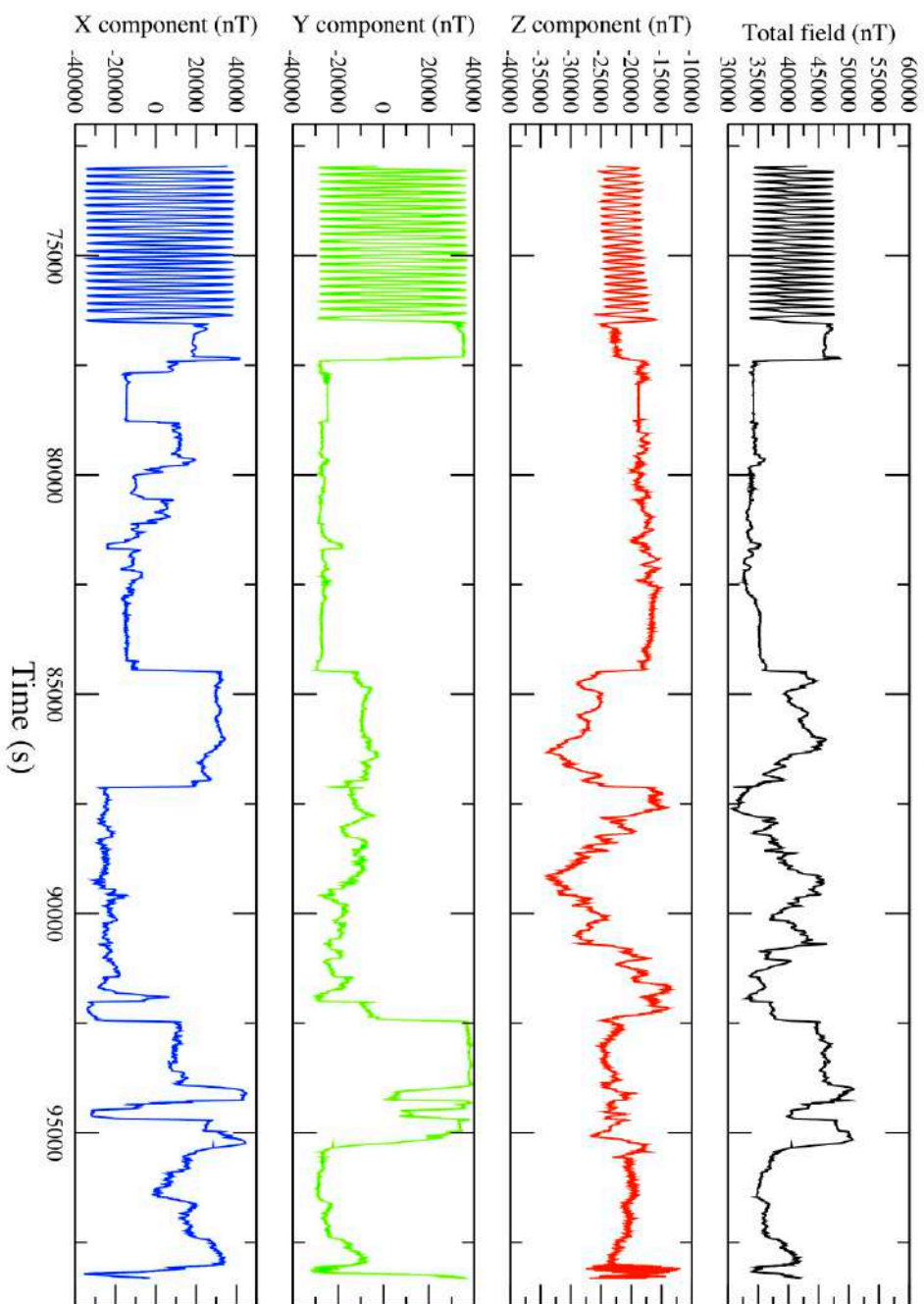
# Cruise Futuna 1

## Nautilie, Dive 10, Raw data



# Cruise Futuna 1

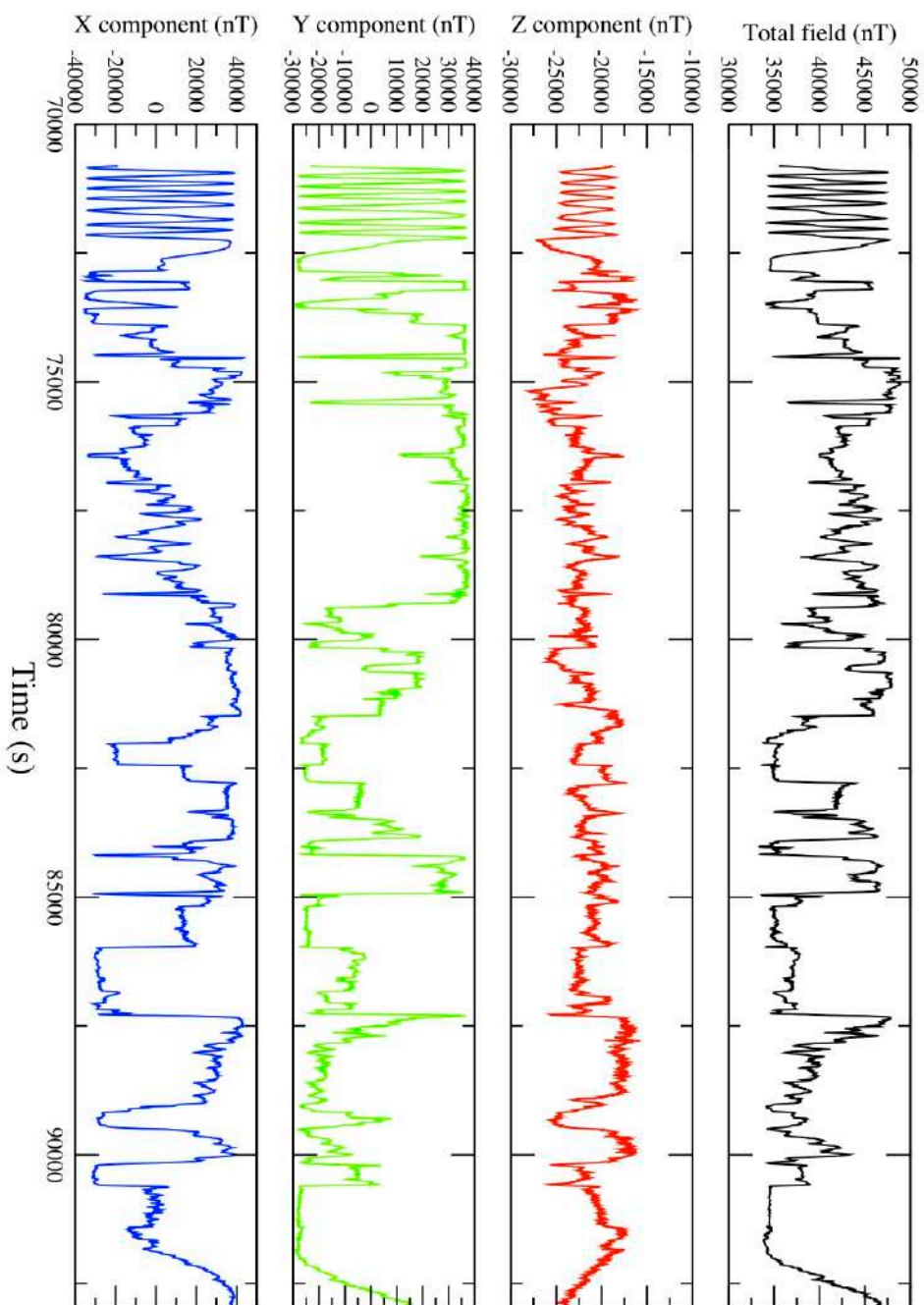
## Nautilie, Dive 11, Raw data





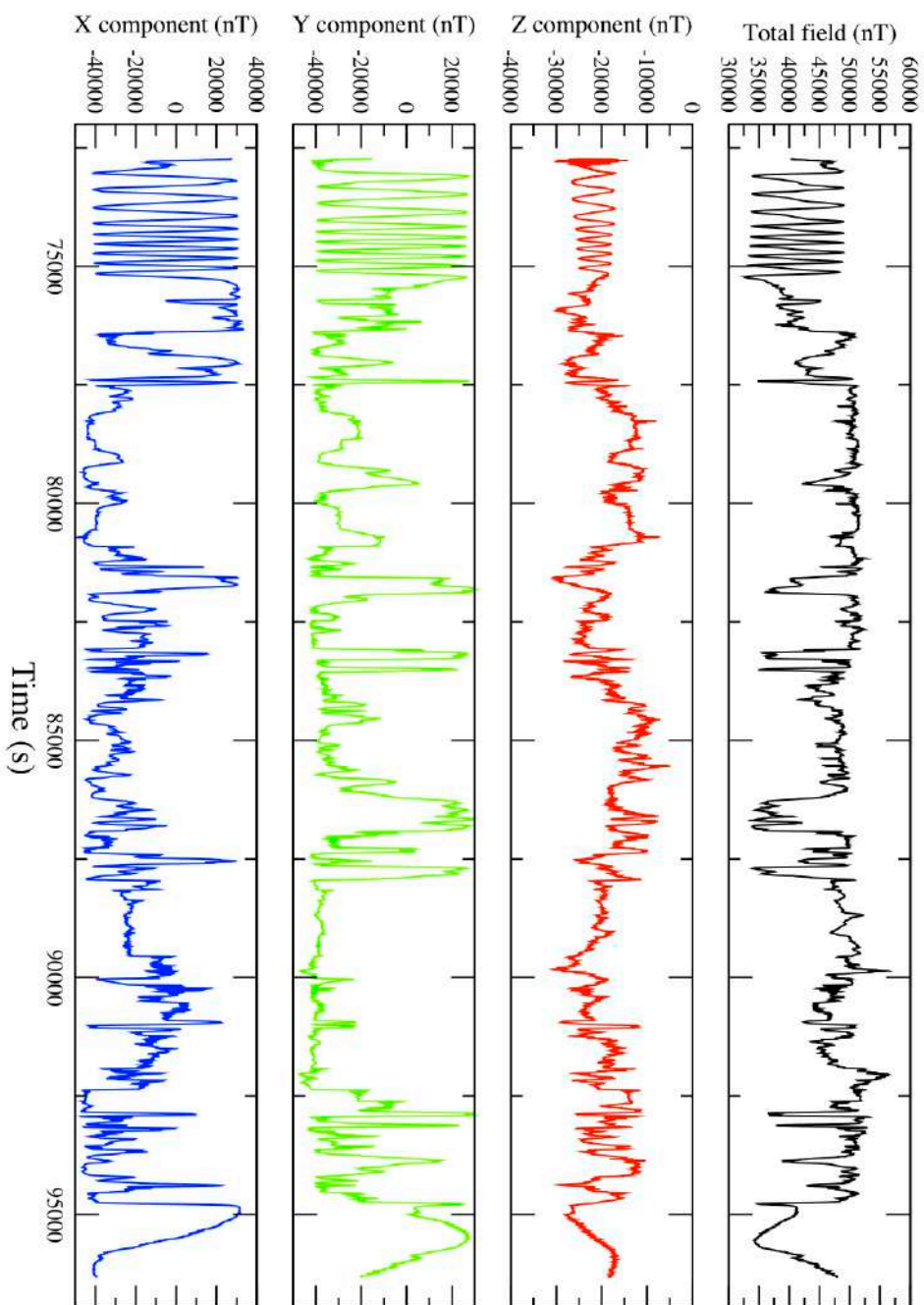
# Cruise Futuna 1

## Nautilie, Dive 12, Raw data



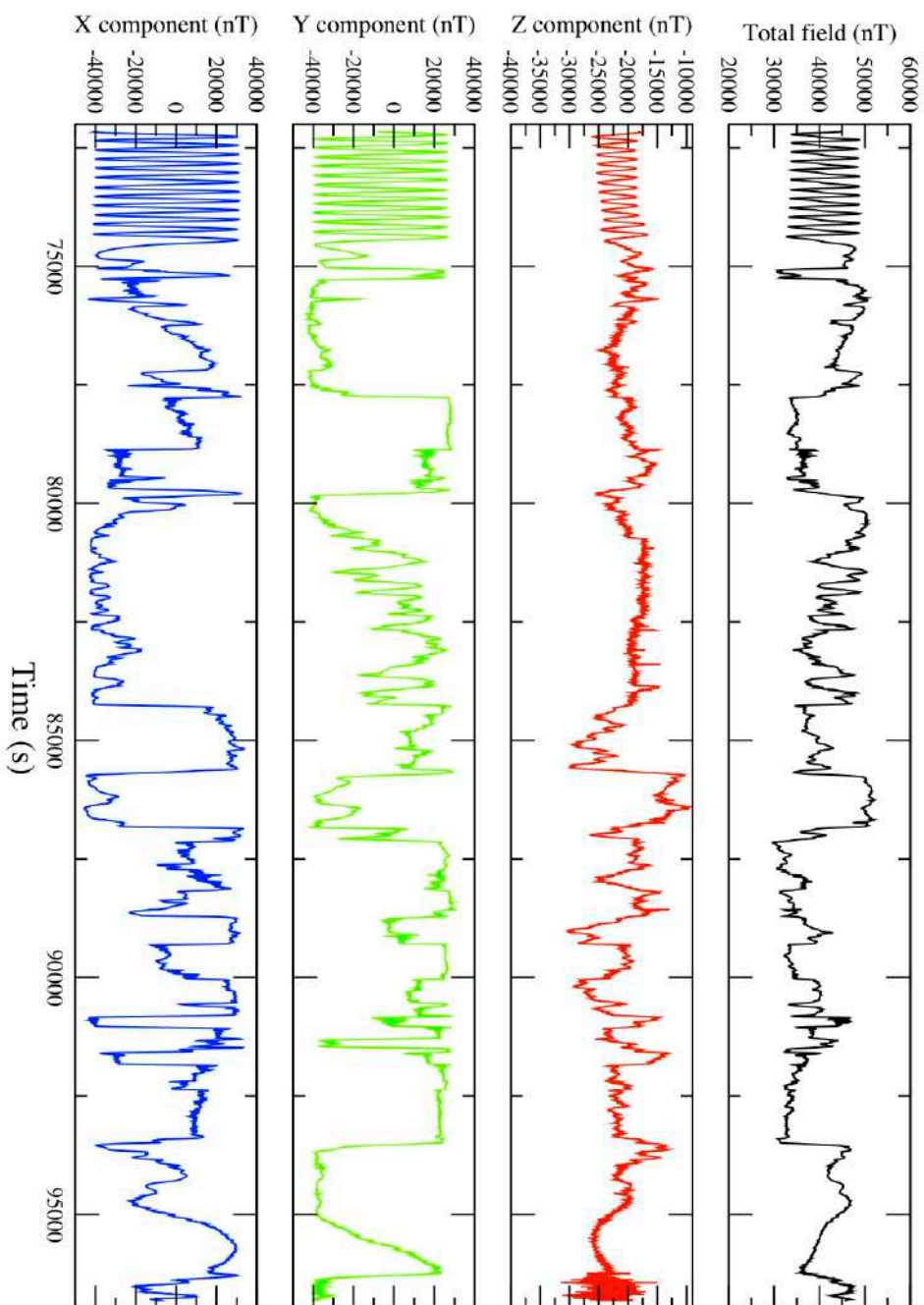
# Cruise Futuna 3

## Nautilé, Dive 11, Raw data



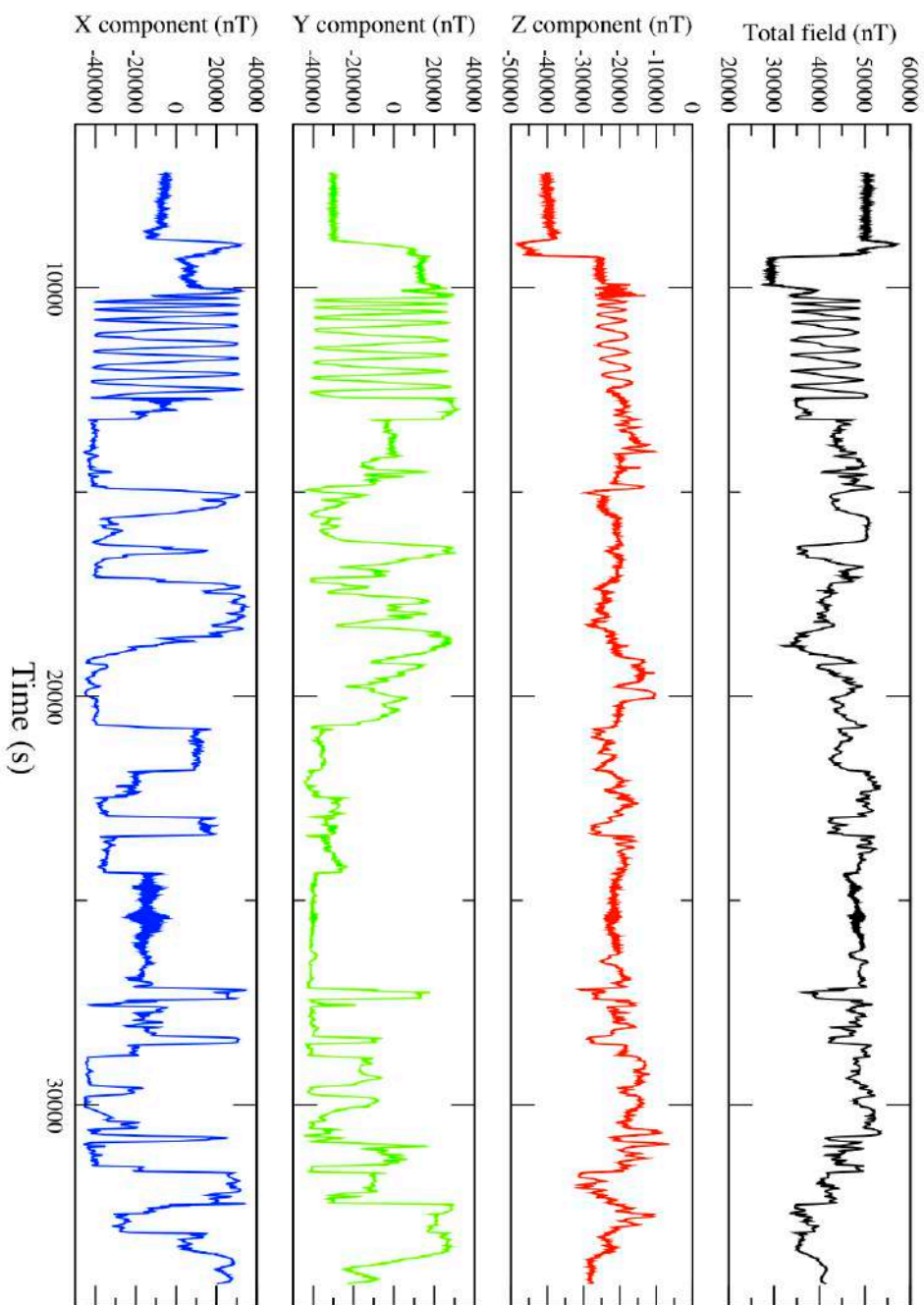
# Cruise Futuna 3

## Nautilé, Dive 12, Raw data



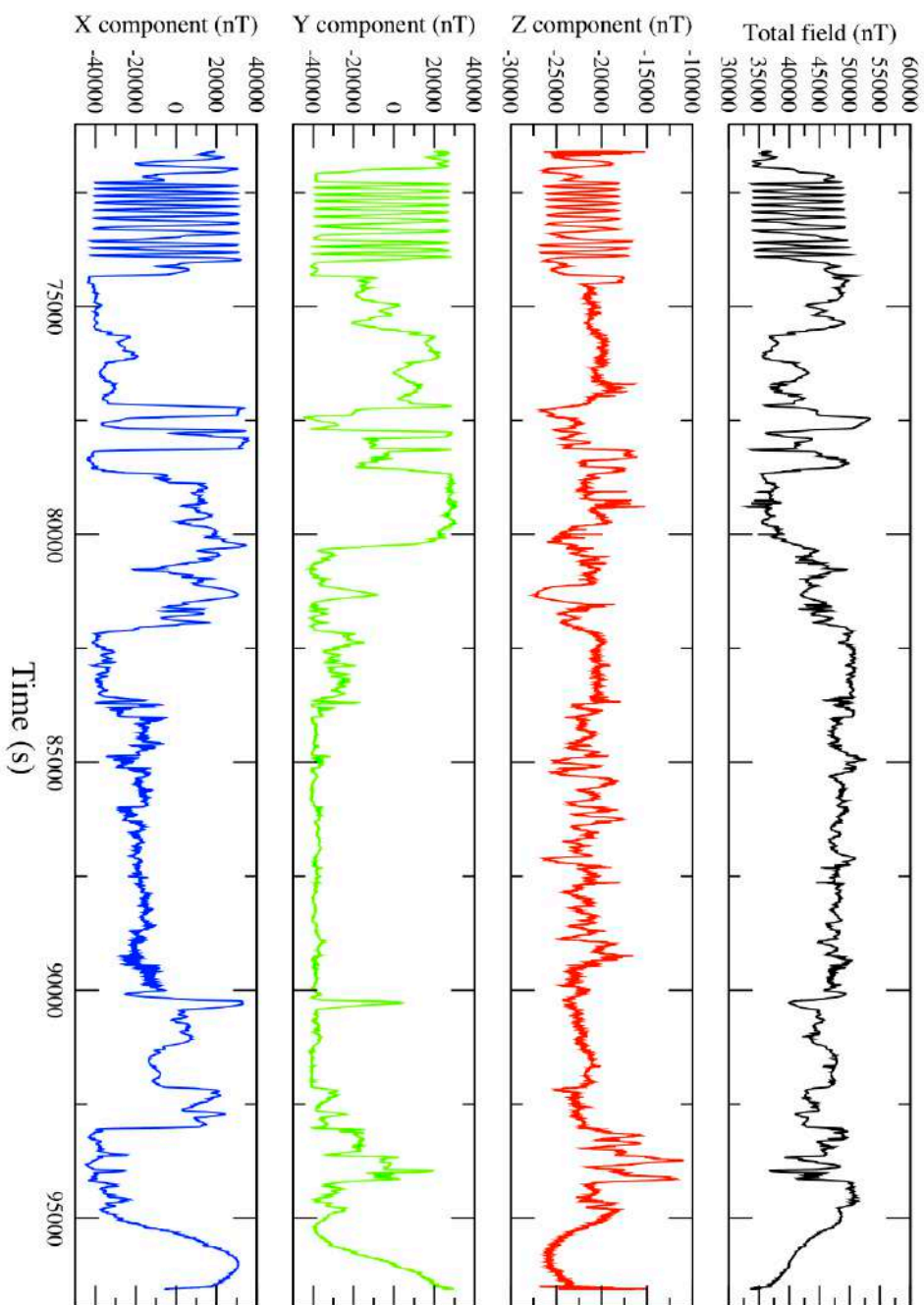
# Cruise Futuna 3

## Nautil, Dive 13, Raw data



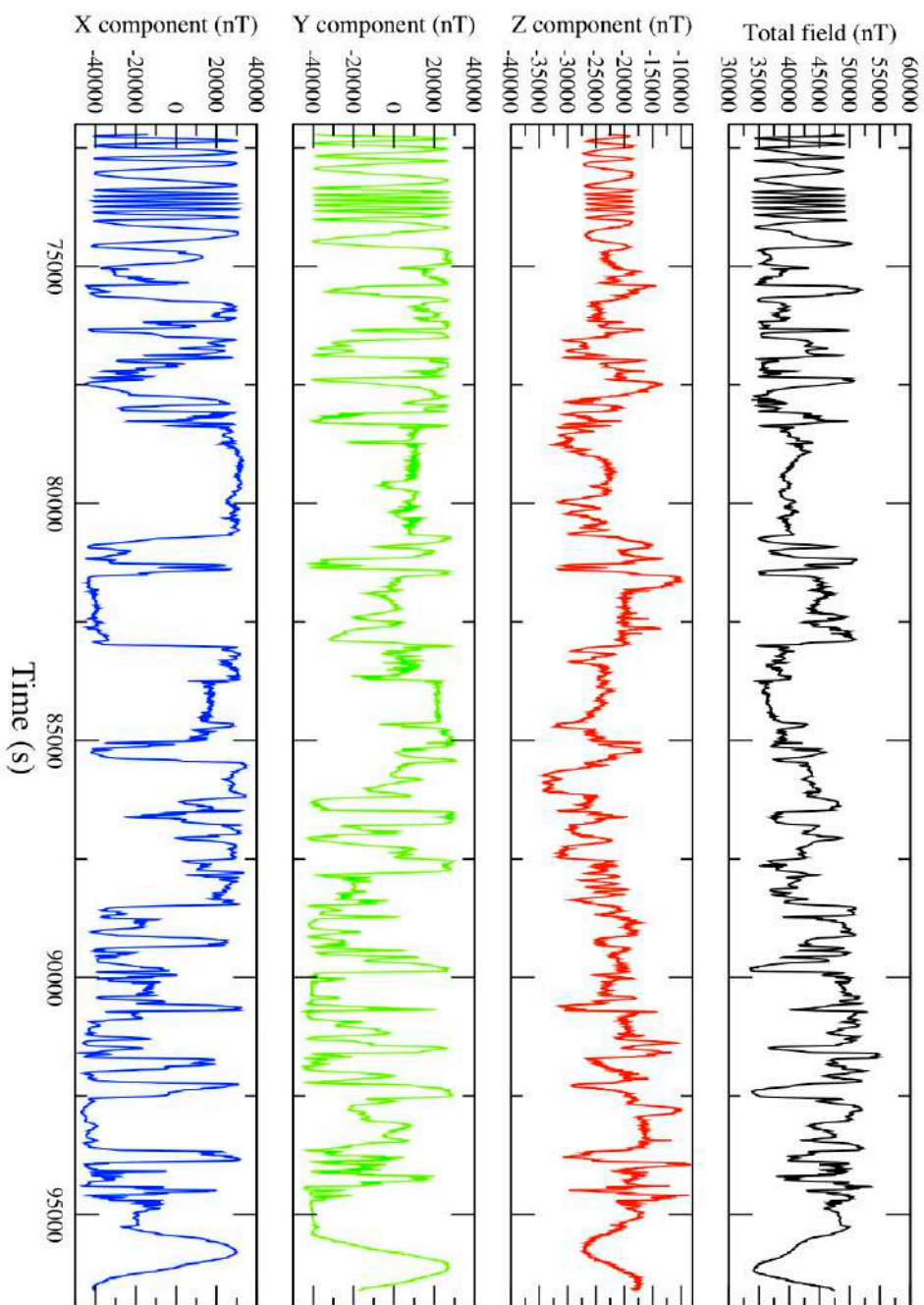
# Cruise Futuna 3

## Nautilé, Dive 14, Raw data



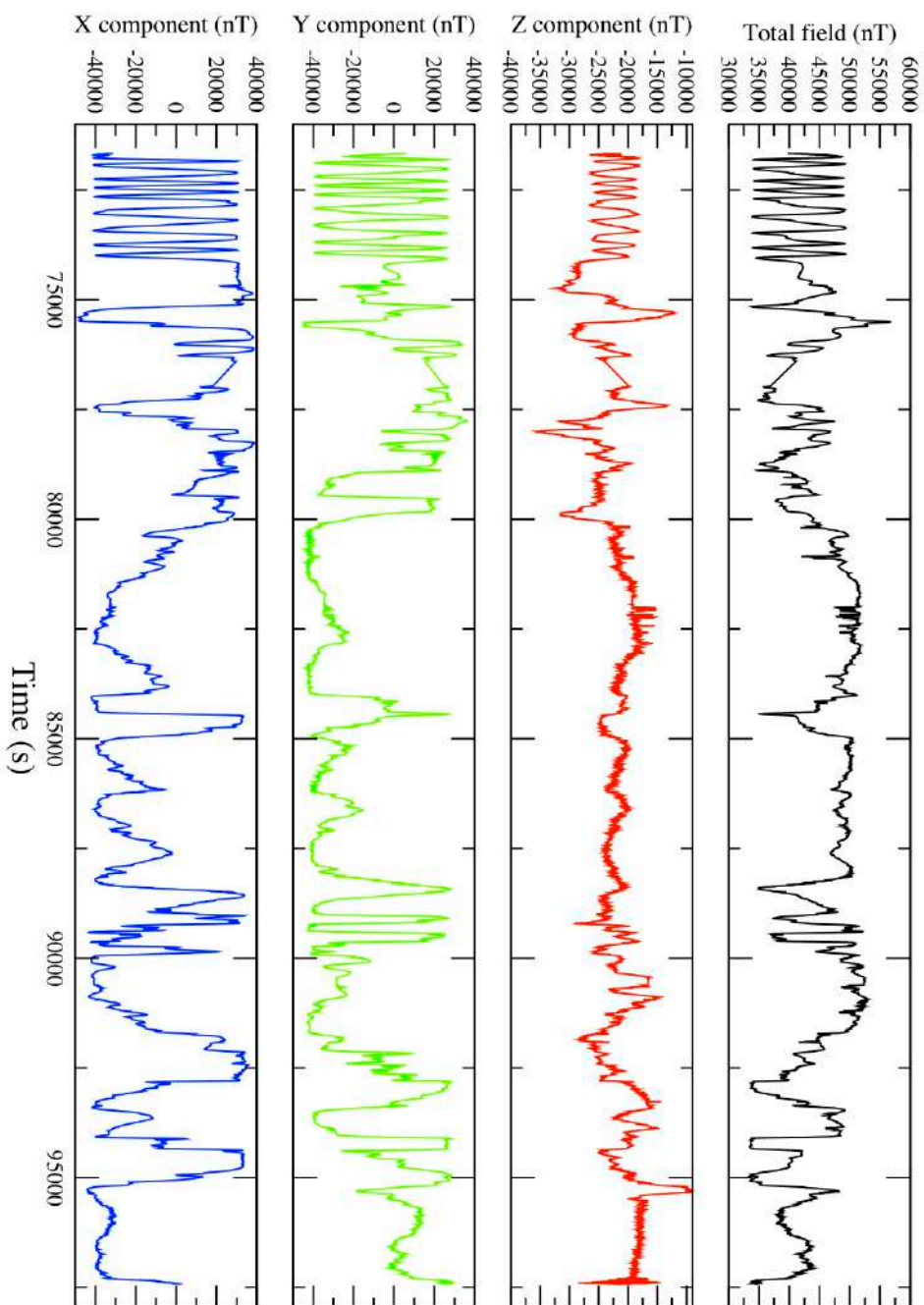
# Cruise Futuna 3

## Nautilé, Dive 15, Raw data



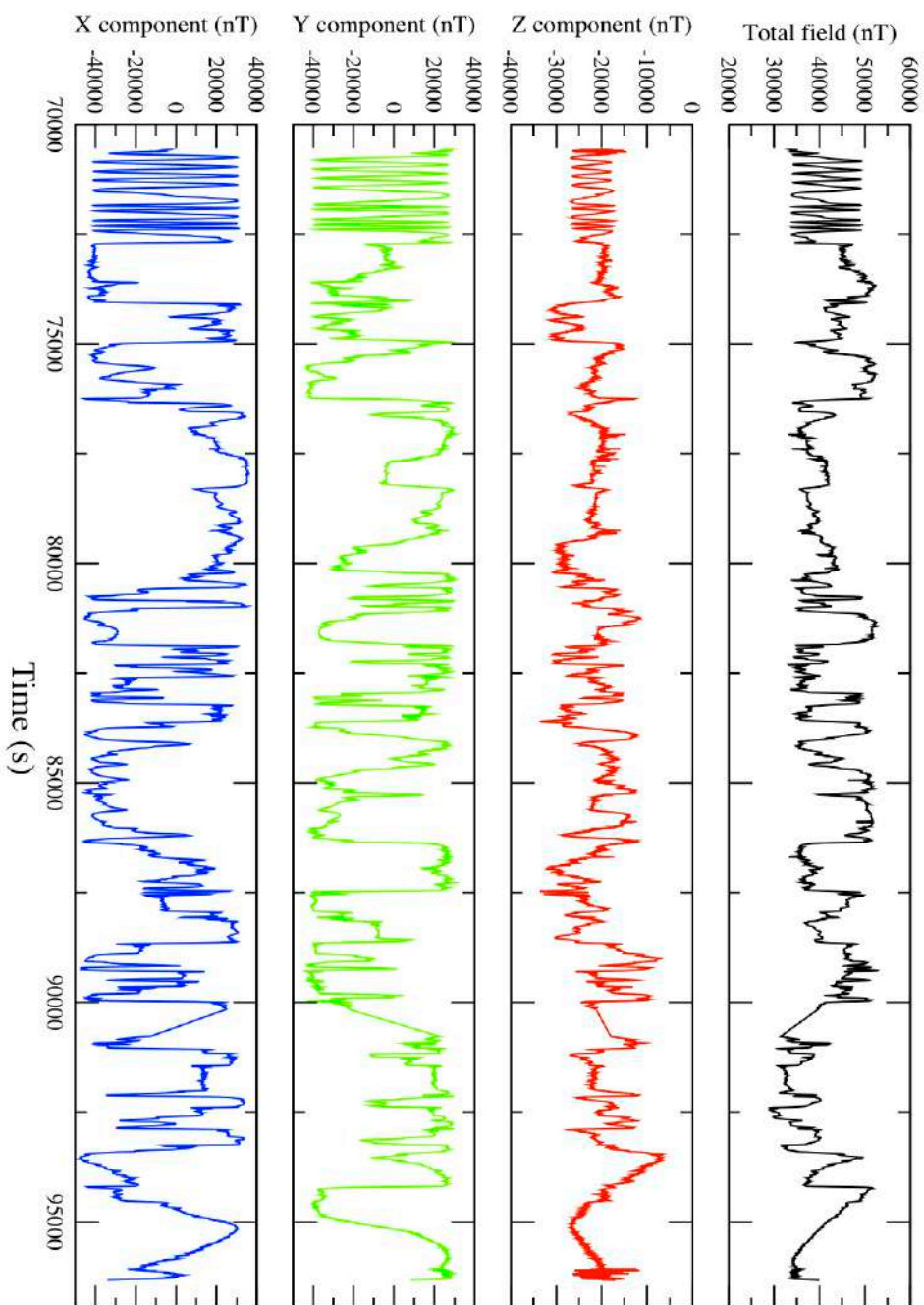
# Cruise Futuna 3

## Nautilé, Dive 16, Raw data



# Cruise Futuna 3

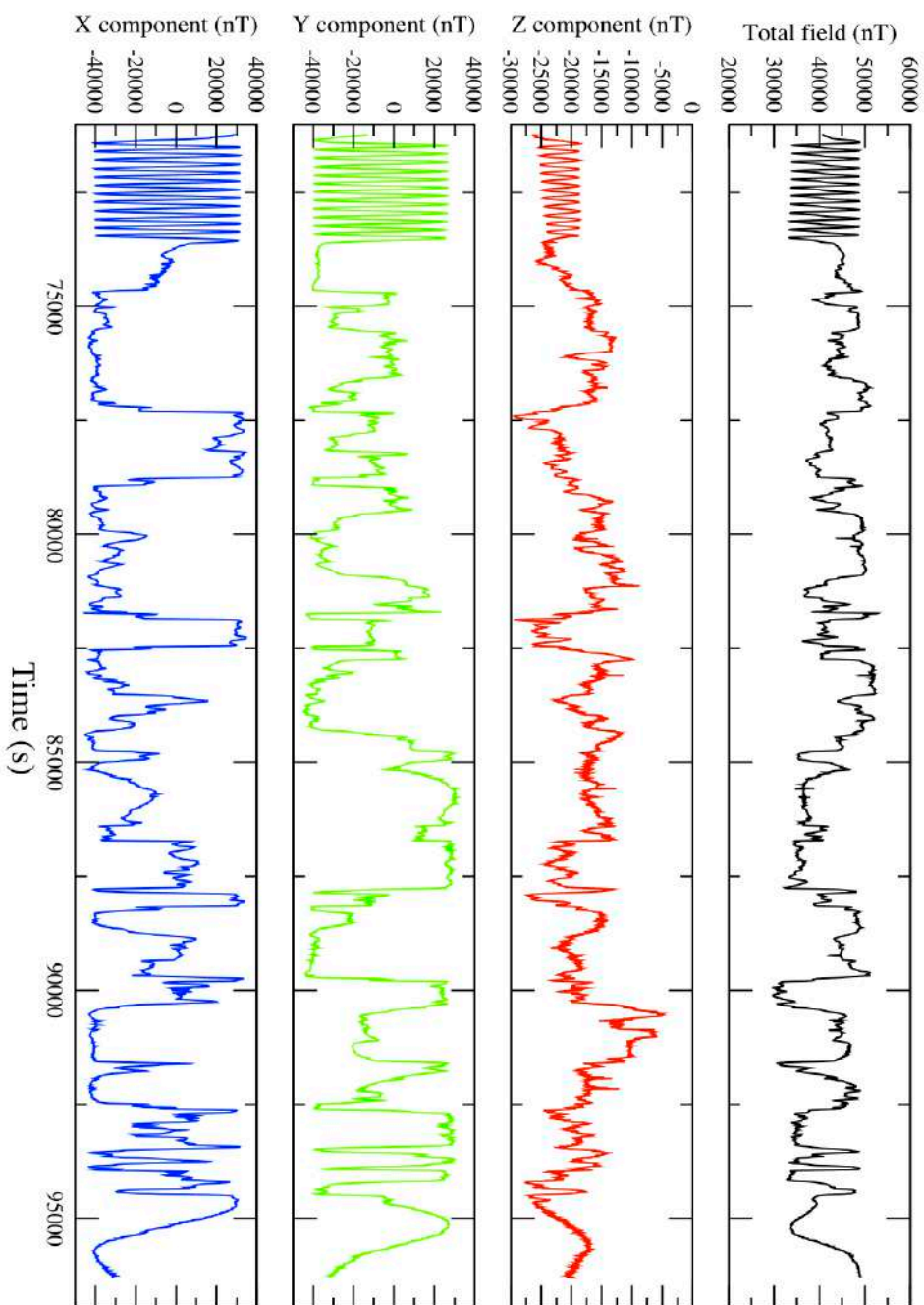
## Nautille, Dive 17, Raw data





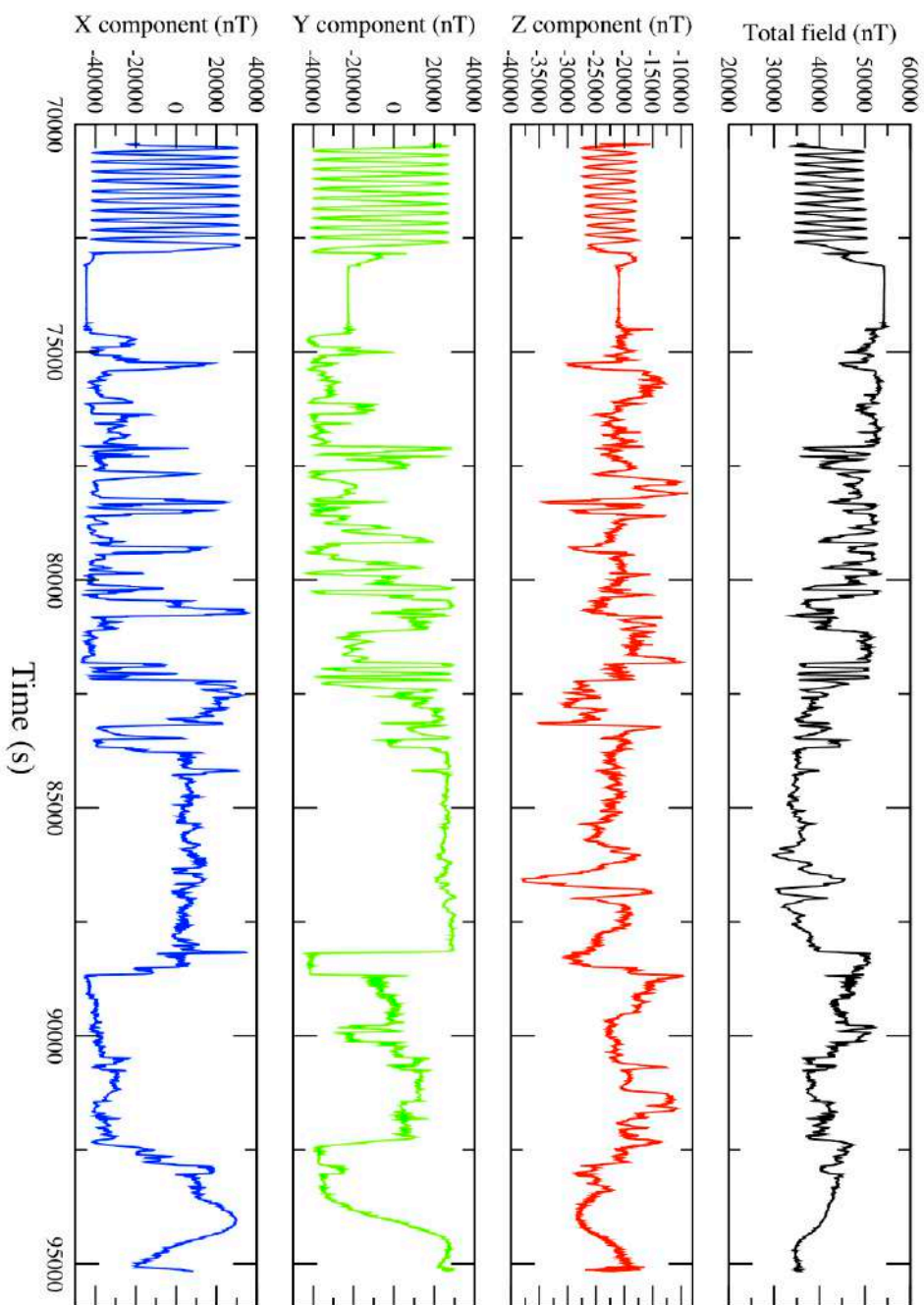
# Cruise Futuna 3

## Nautilé, Dive 18, Raw data



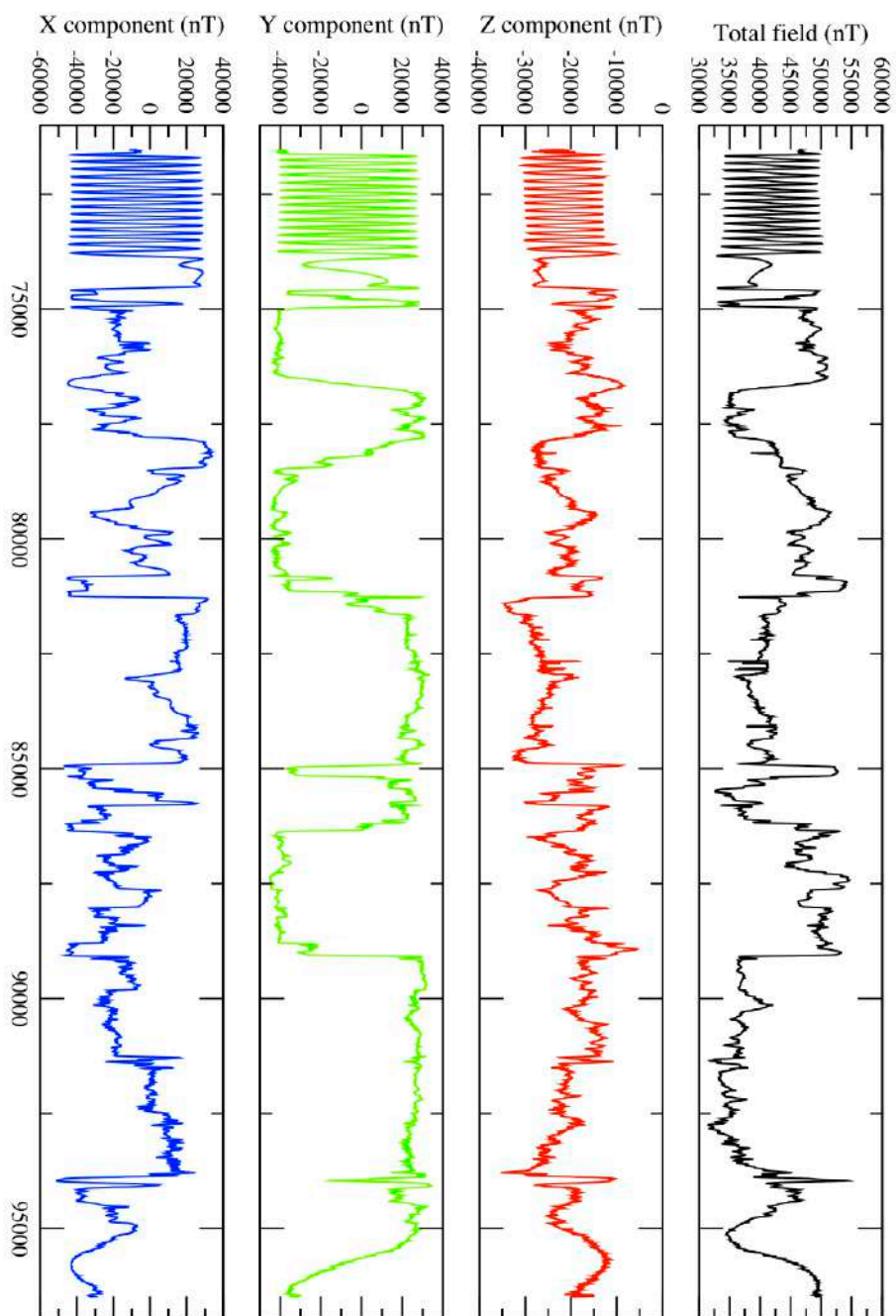
# Cruise Futuna 3

## Nautilé, Dive 19, Raw data



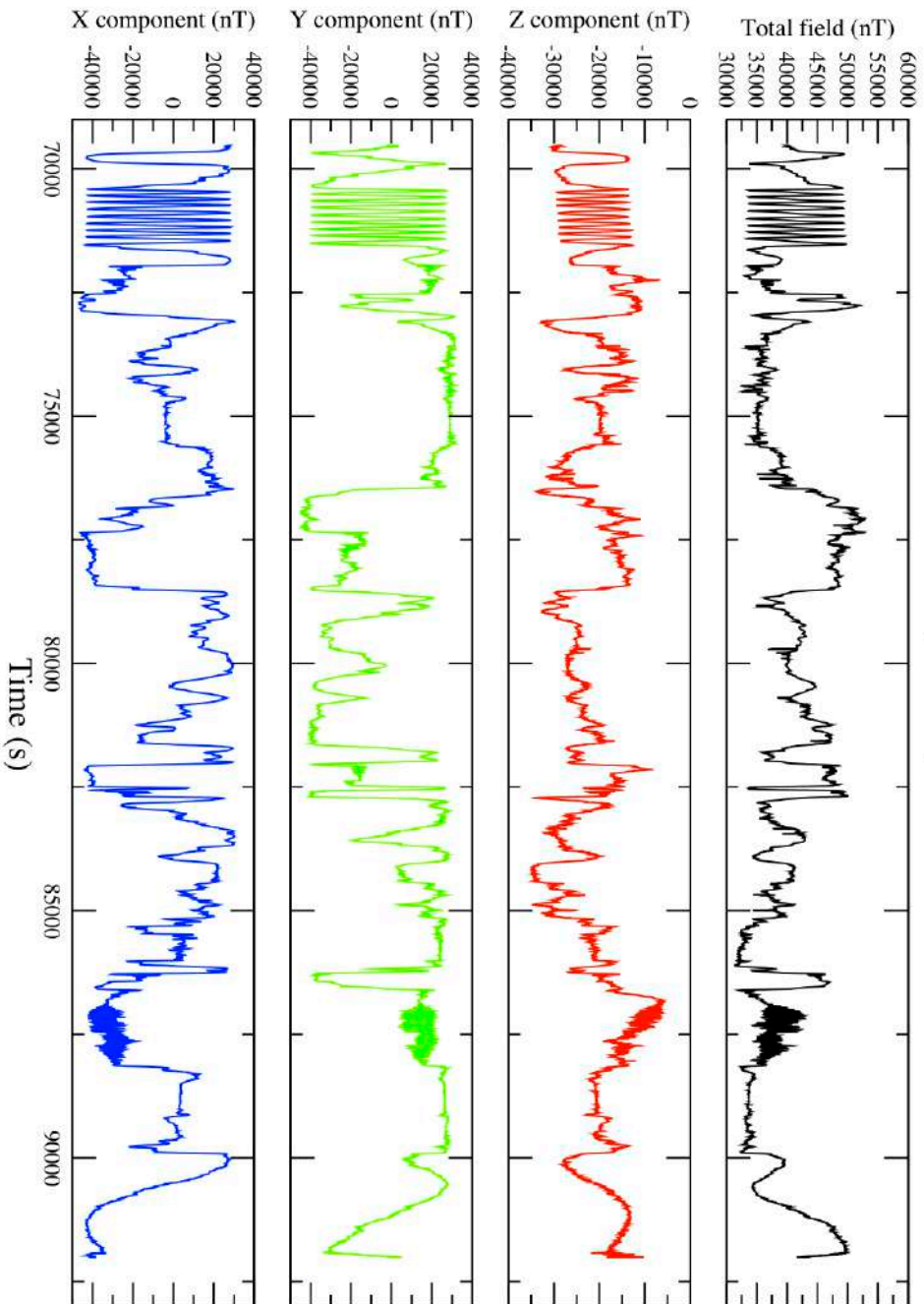
# Cruise Futuna 3

## Nautilé, Dive 20, Raw data

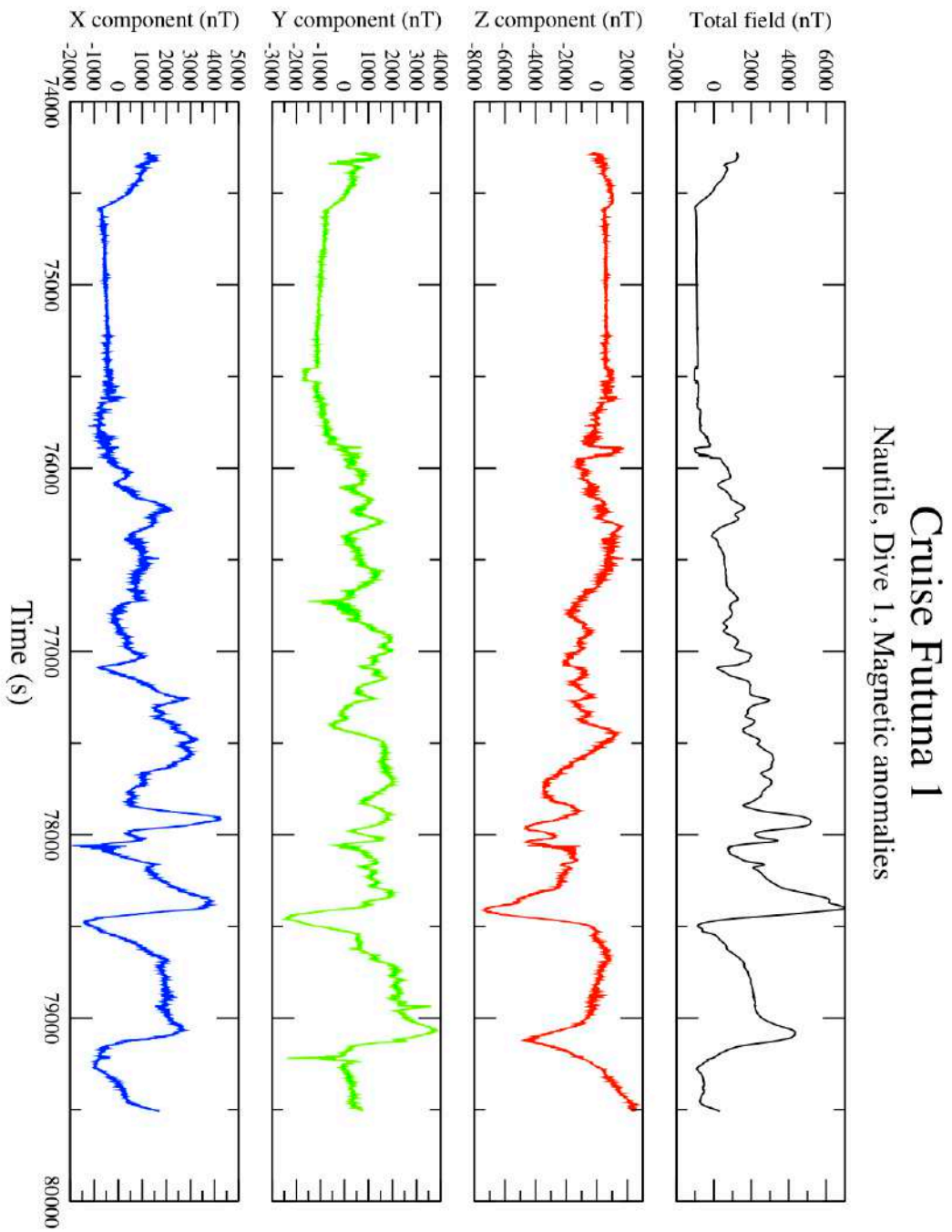


# Cruise Futuna 3

## Nautilie, Dive 21, Raw data

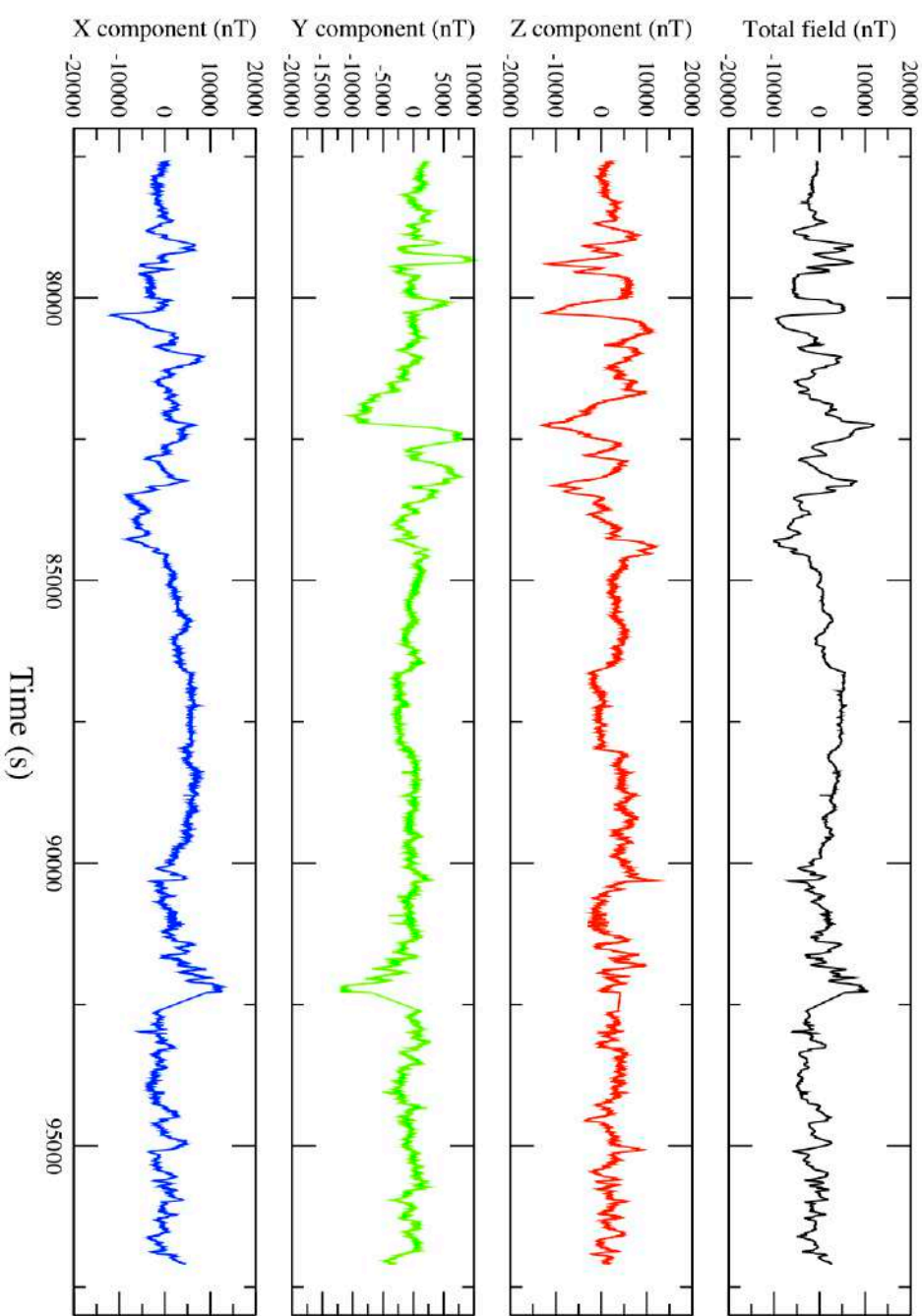


## Anomalies



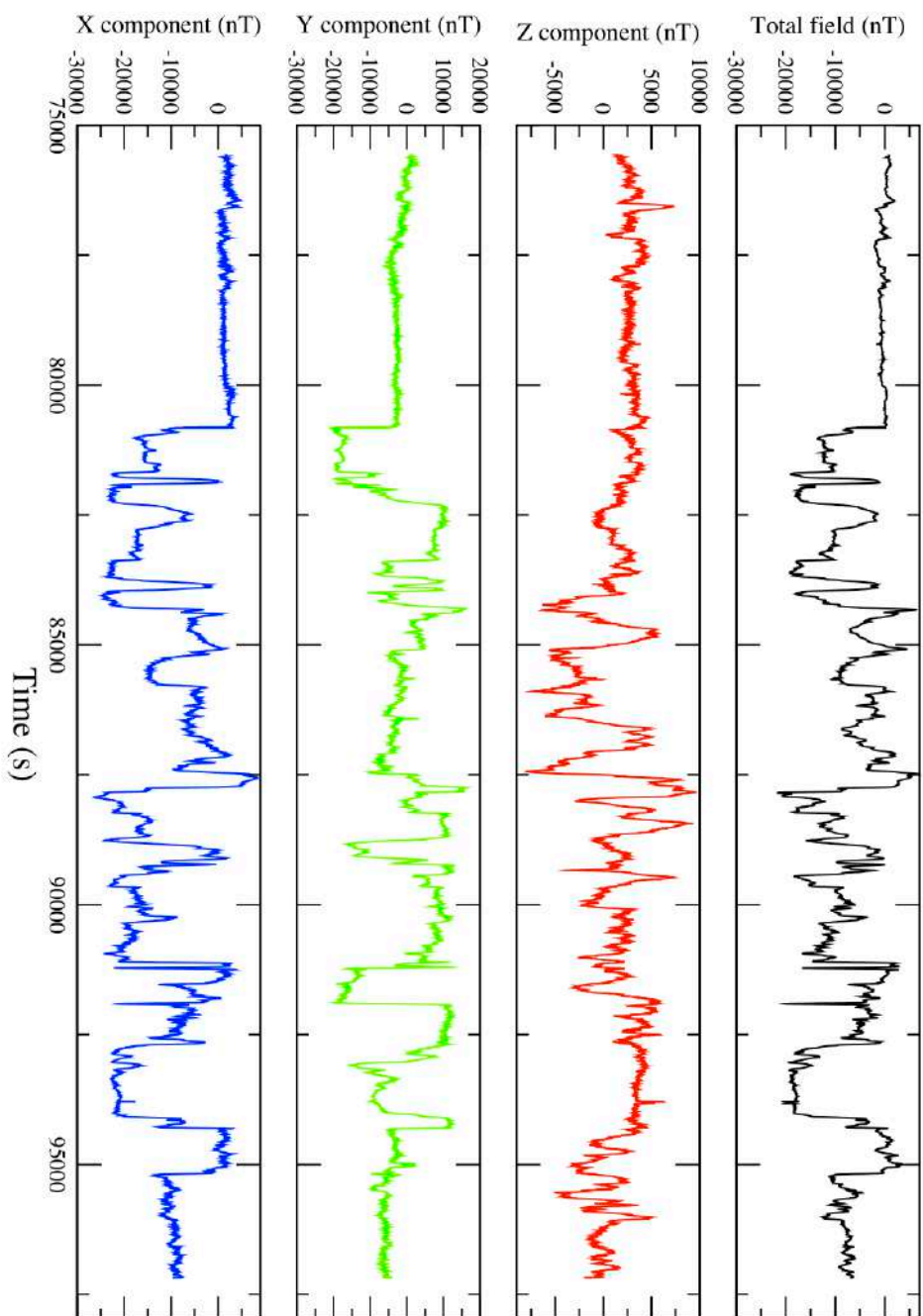
# Cruise Futuna 1

## Nautilé, Dive 2, Magnetic anomalies



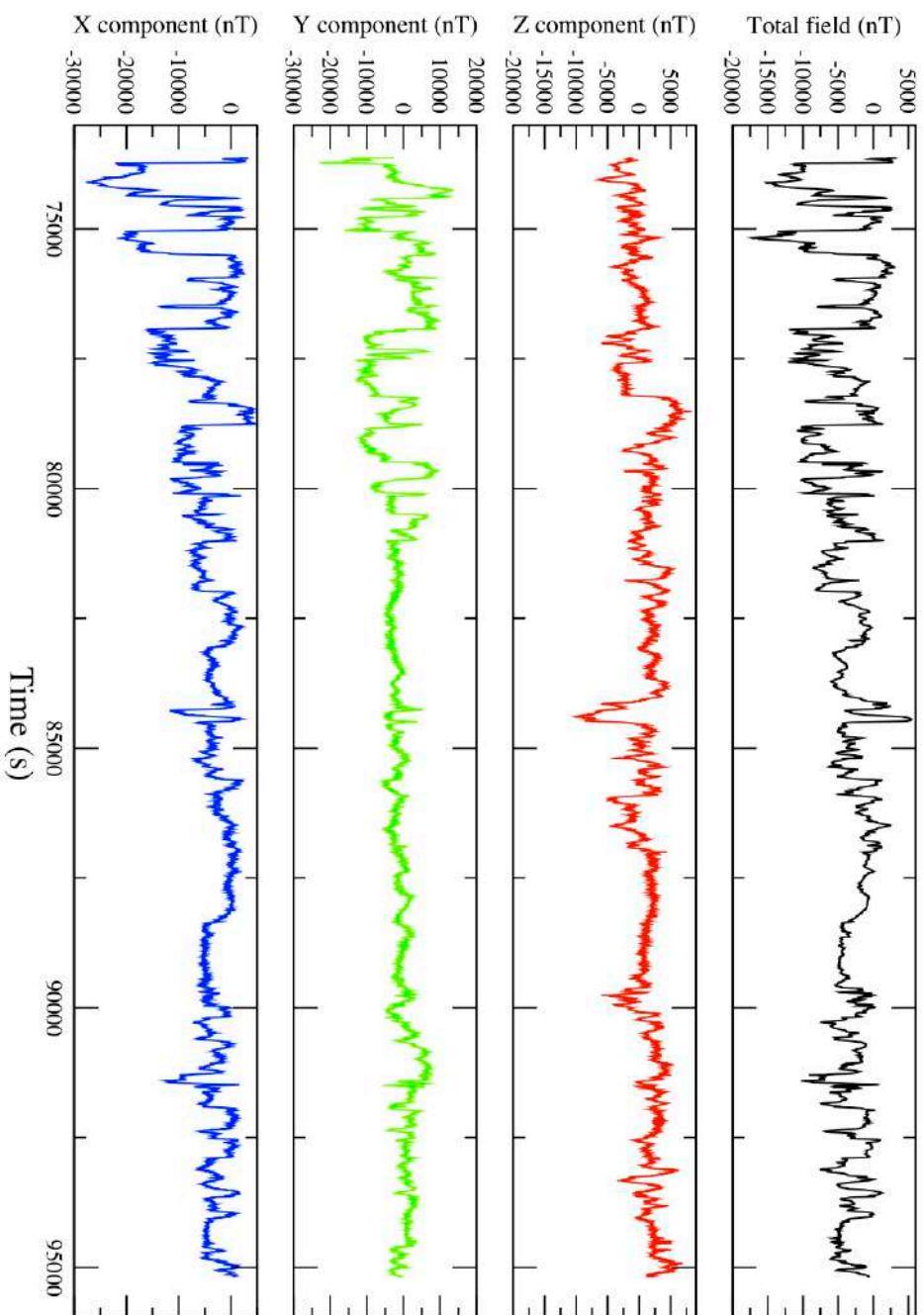
# Cruise Futuna 1

## Nautilé, Dive 3, Magnetic anomalies



# Cruise Futuna 1

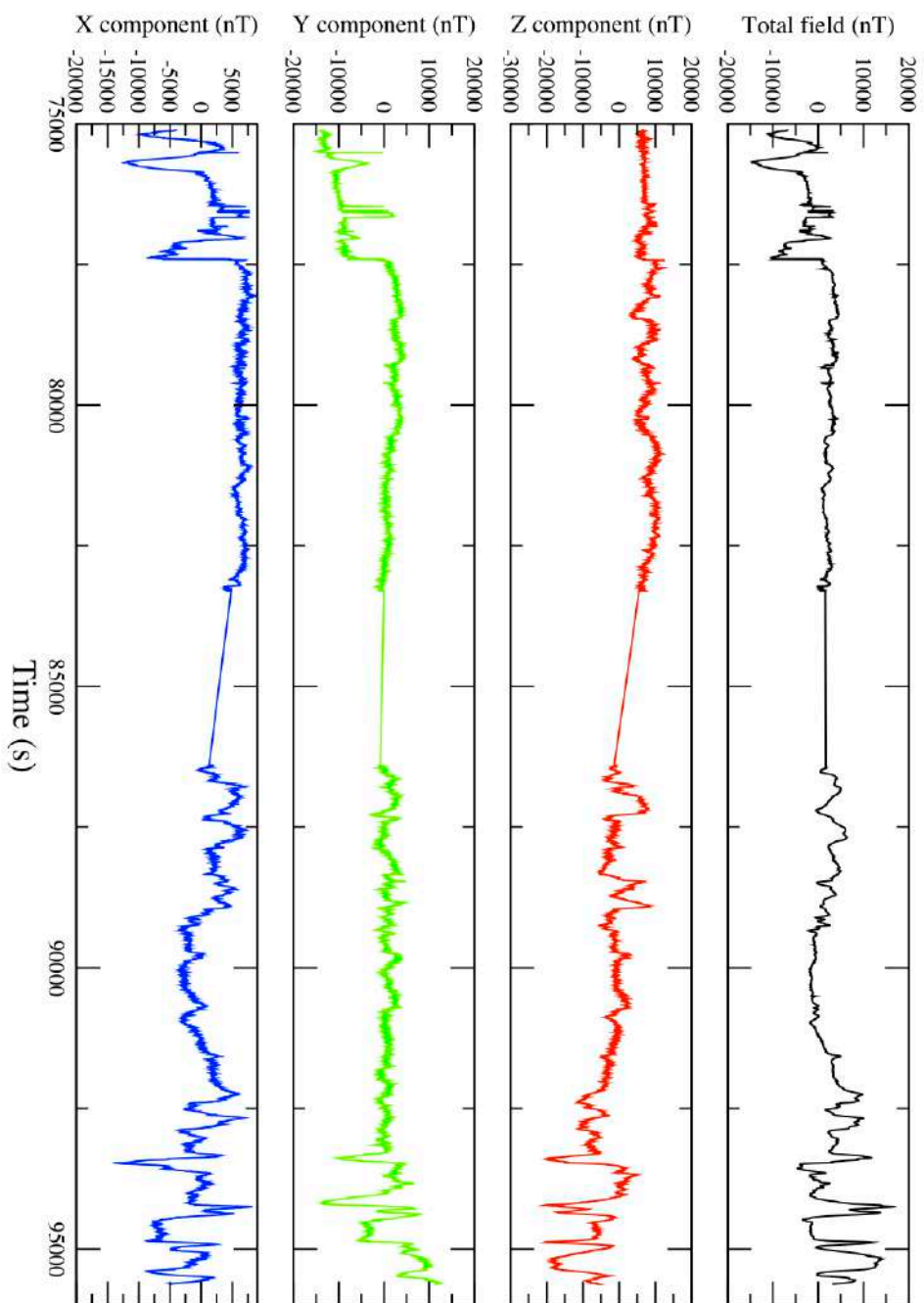
## Nautilie, Dive 4, Magnetic anomalies





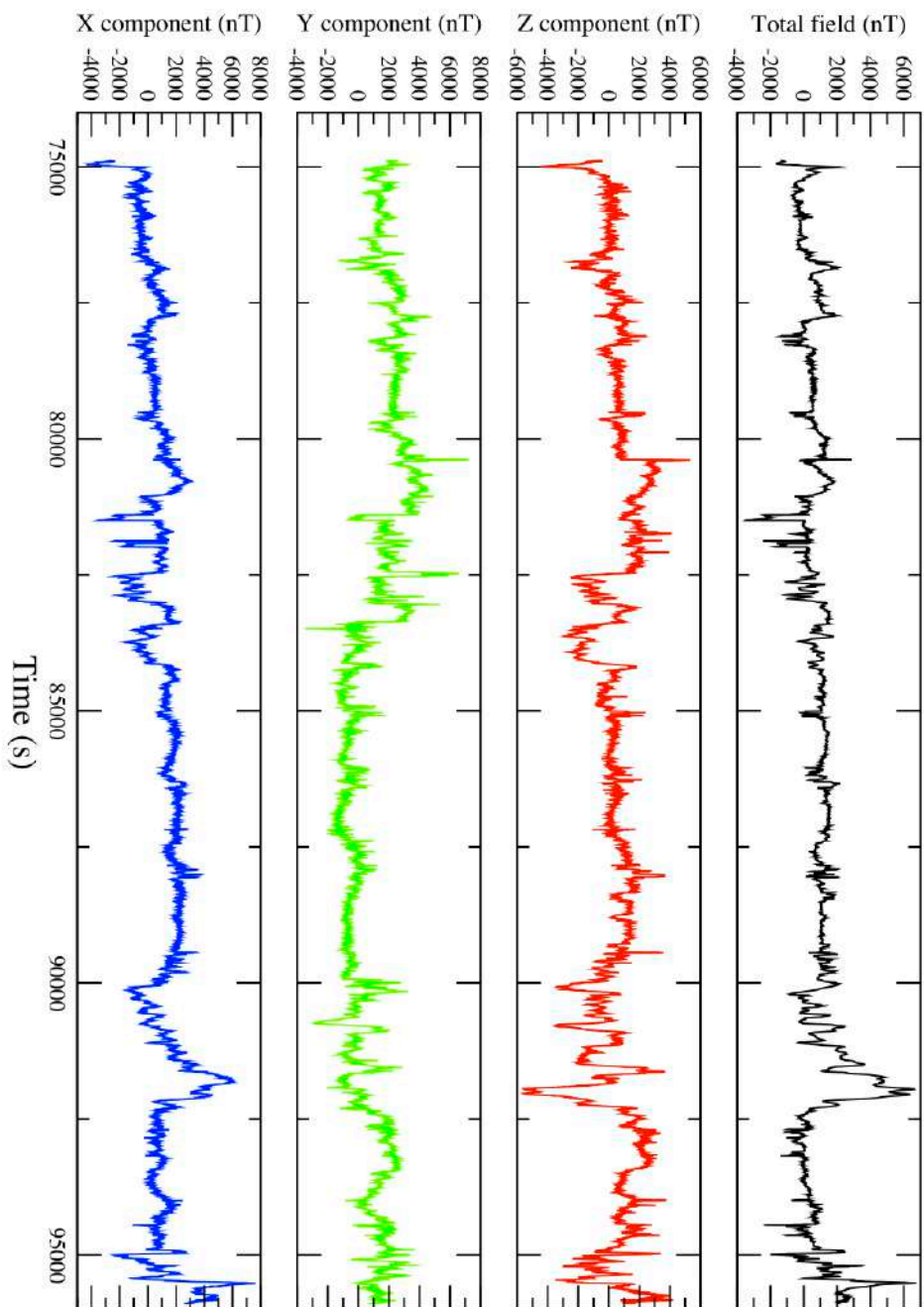
# Cruise Futuna 1

## Nautilé, Dive 5, Magnetic anomalies



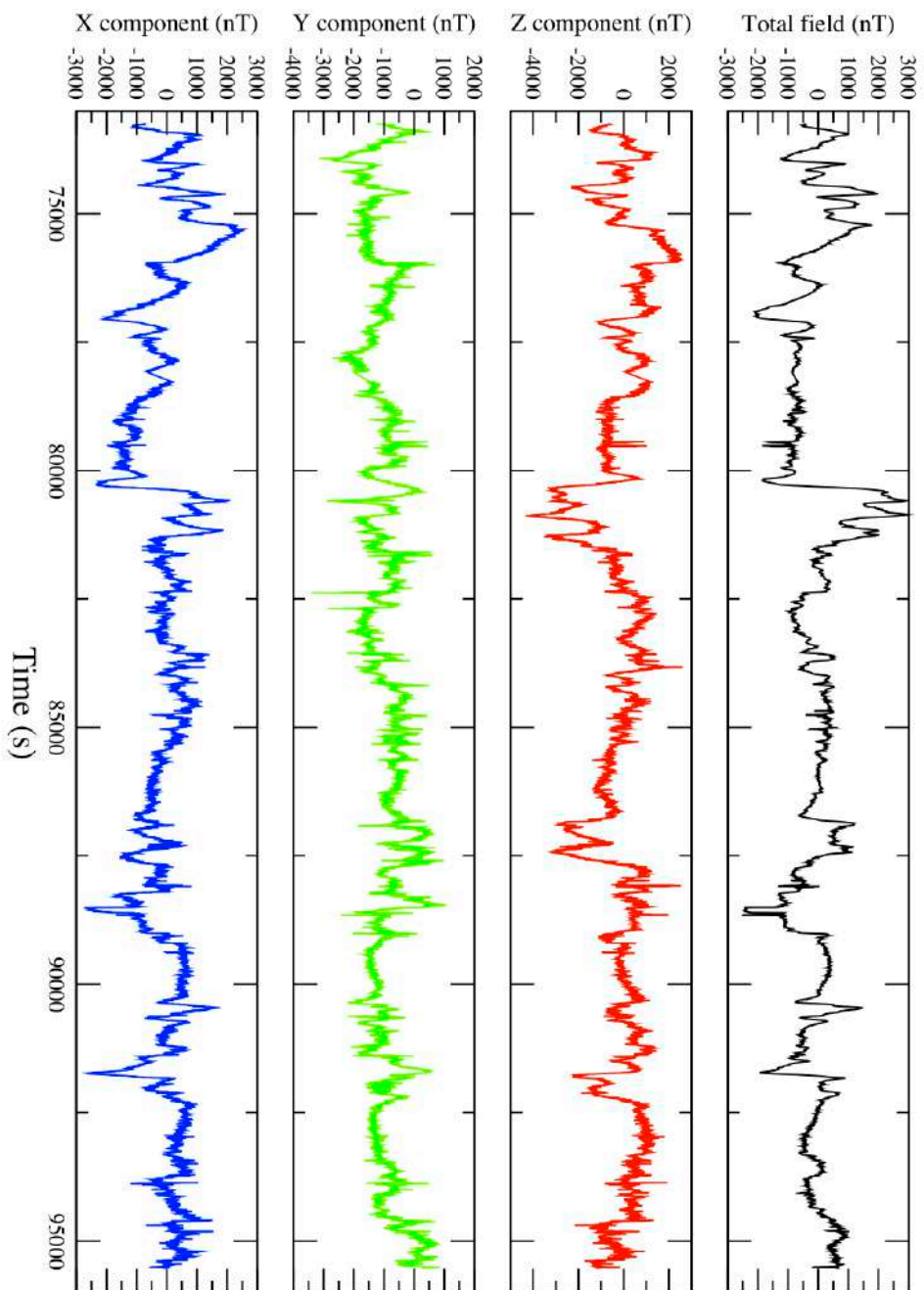
# Cruise Futuna 1

## Nautilé, Dive 6, Magnetic anomalies



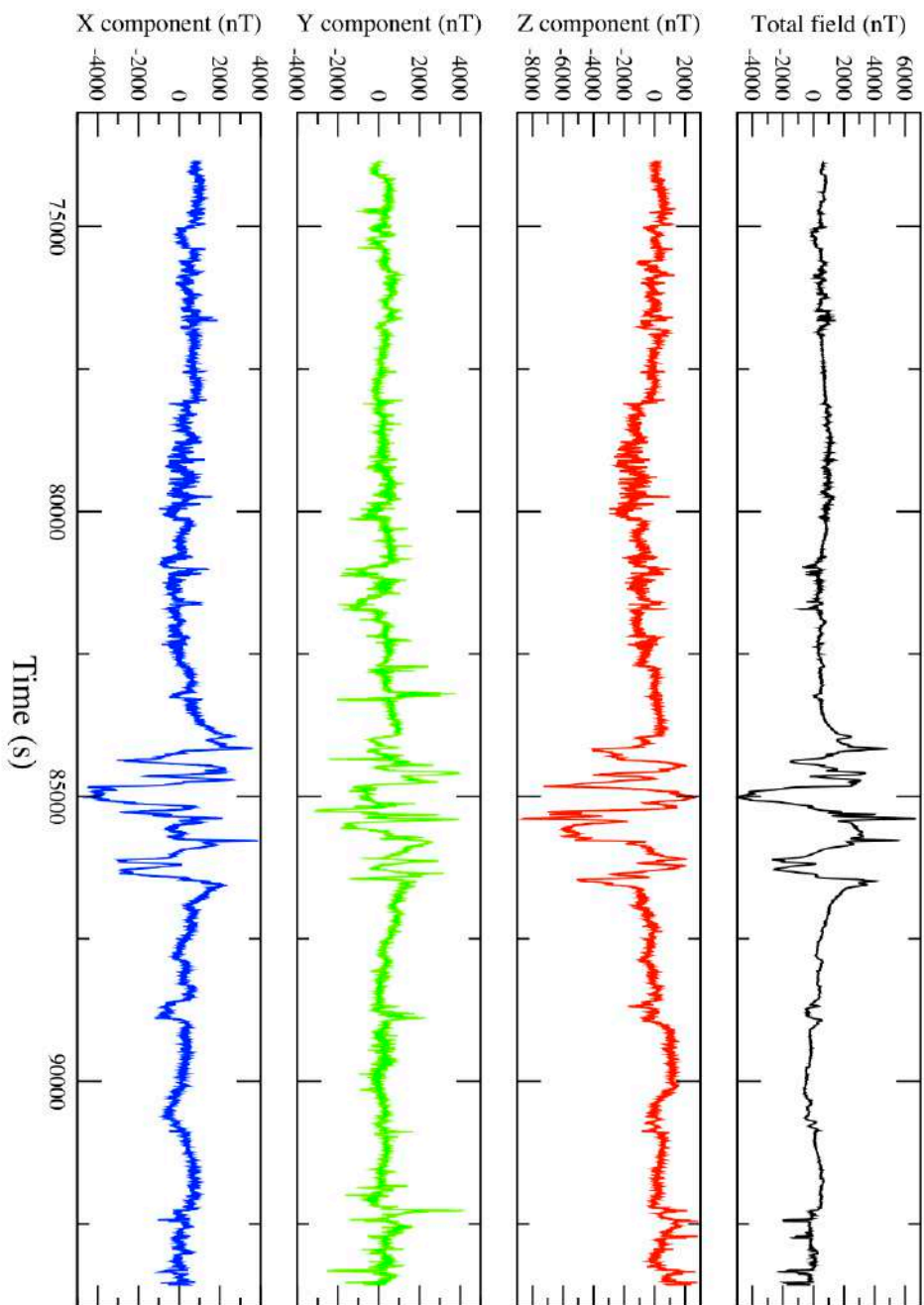
# Cruise Futuna 1

## Nautilé, Dive 7, Magnetic anomalies



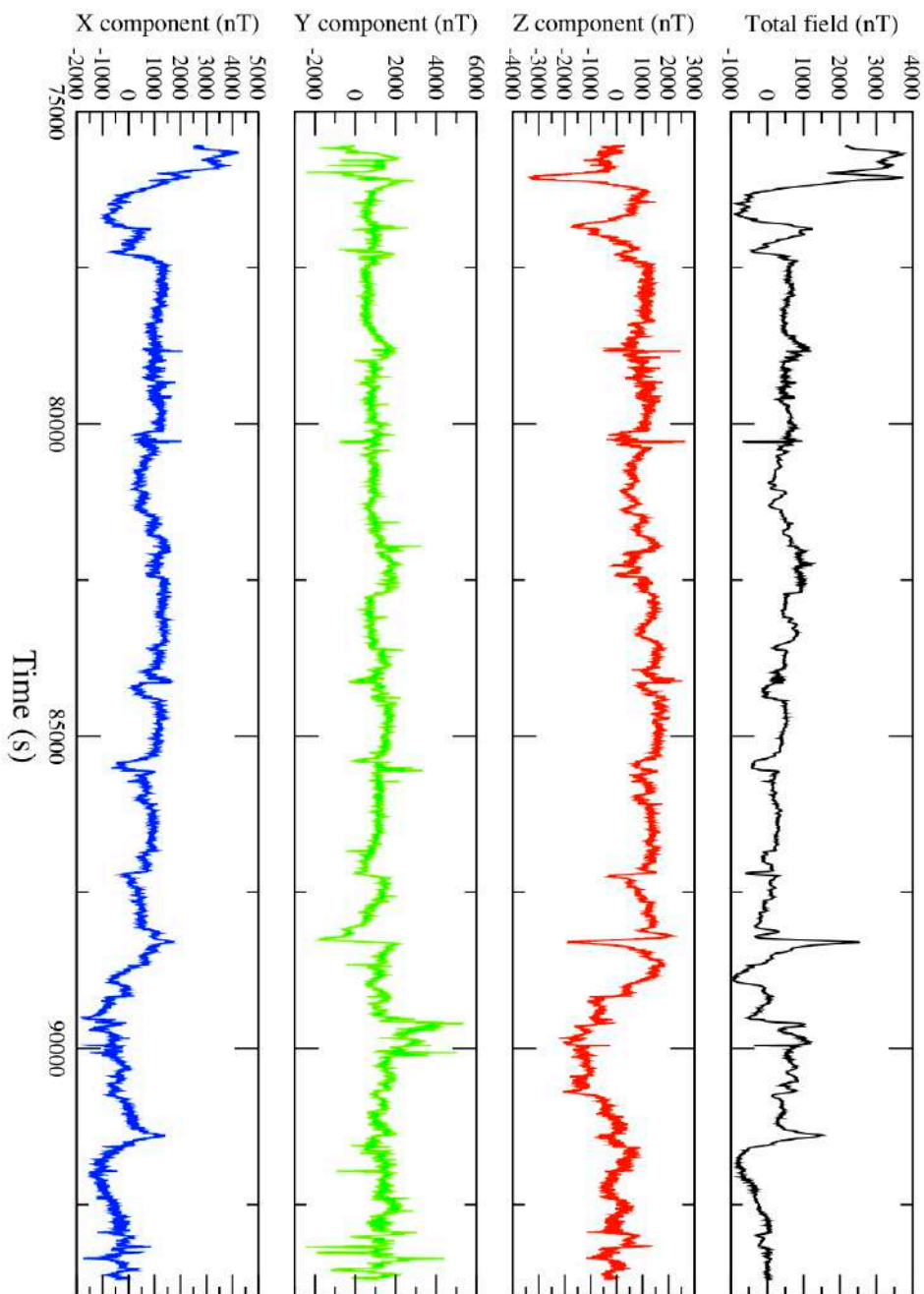
# Cruise Futuna 1

## Nautilé, Dive 8, Magnetic anomalies



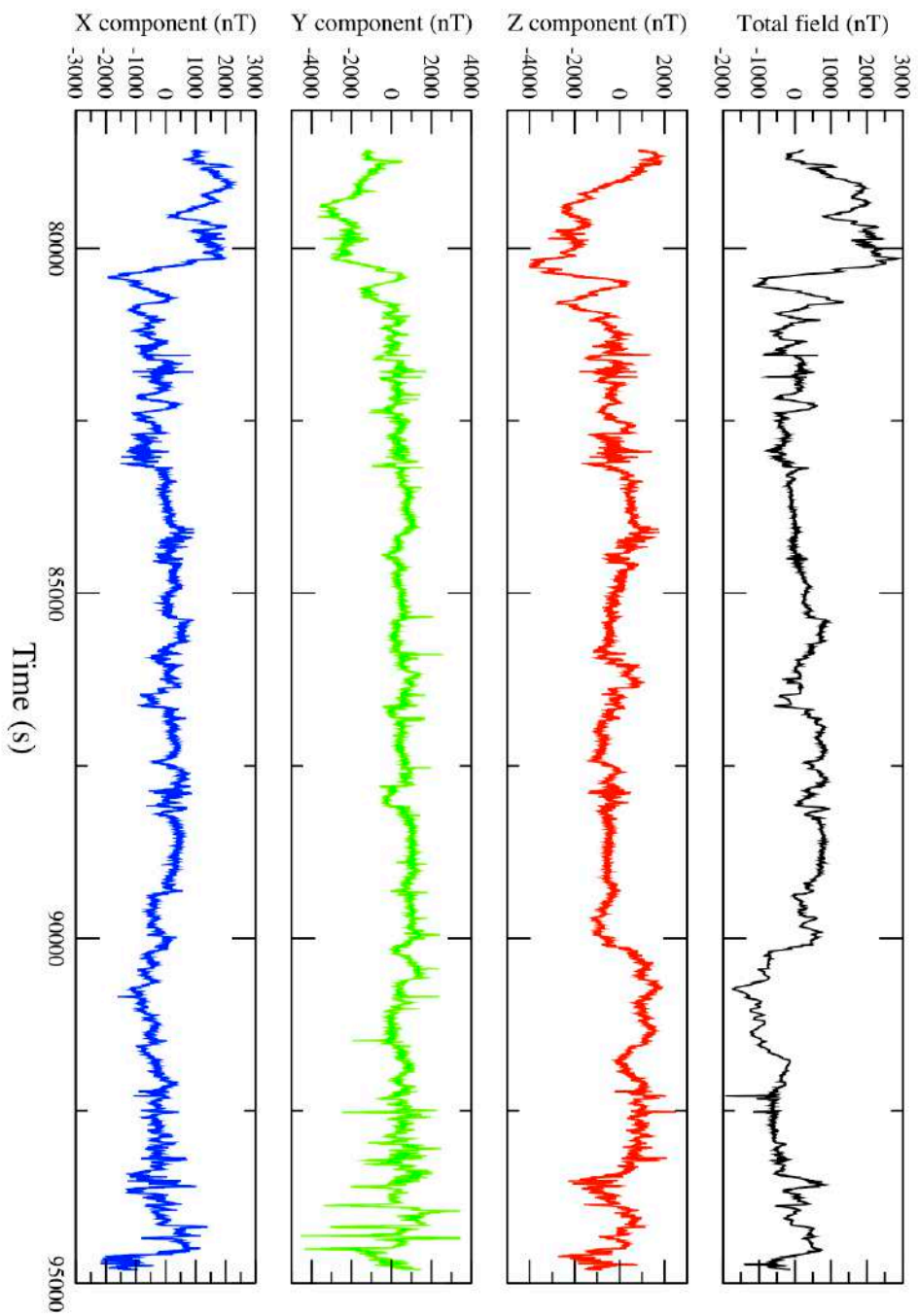
# Cruise Futuna 1

## Nautilé, Dive 9, Magnetic anomalies



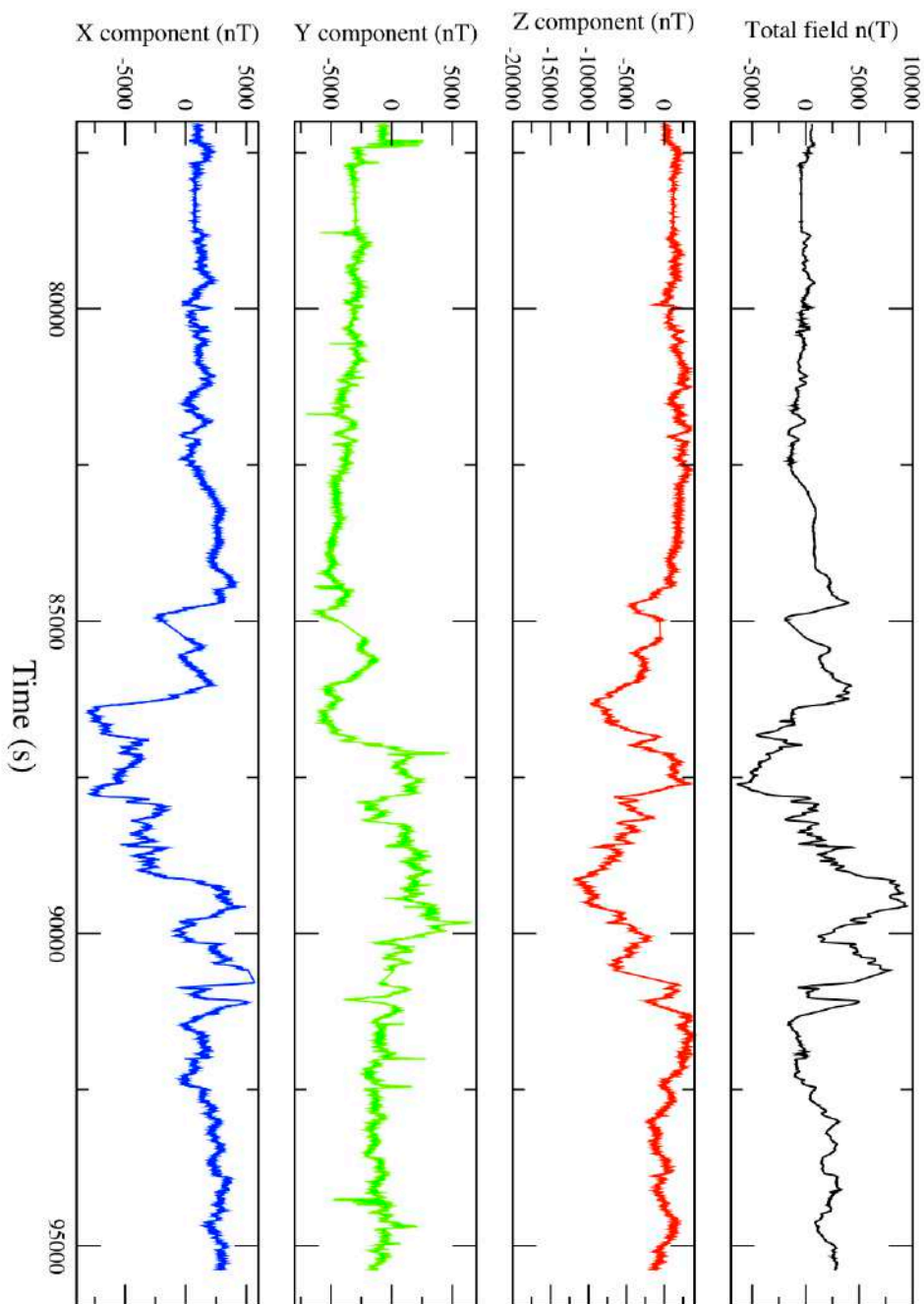
# Cruise Futuna 1

## Nautilie, Dive 10, Magnetic anomalies



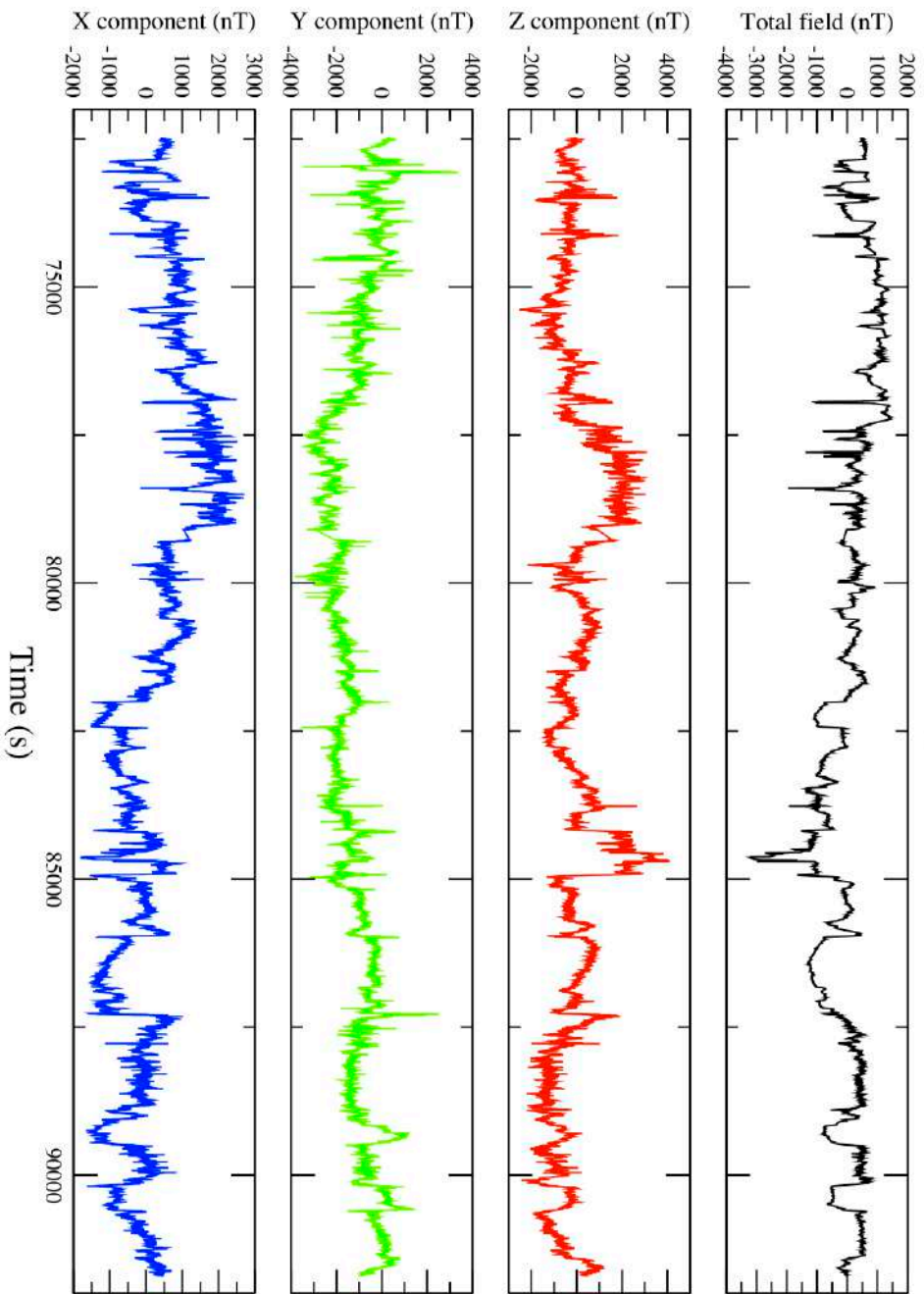
# Cruise Futuna 1

## Nautilie, Dive 11, Magnetic anomalies



# Cruise Futuna 1

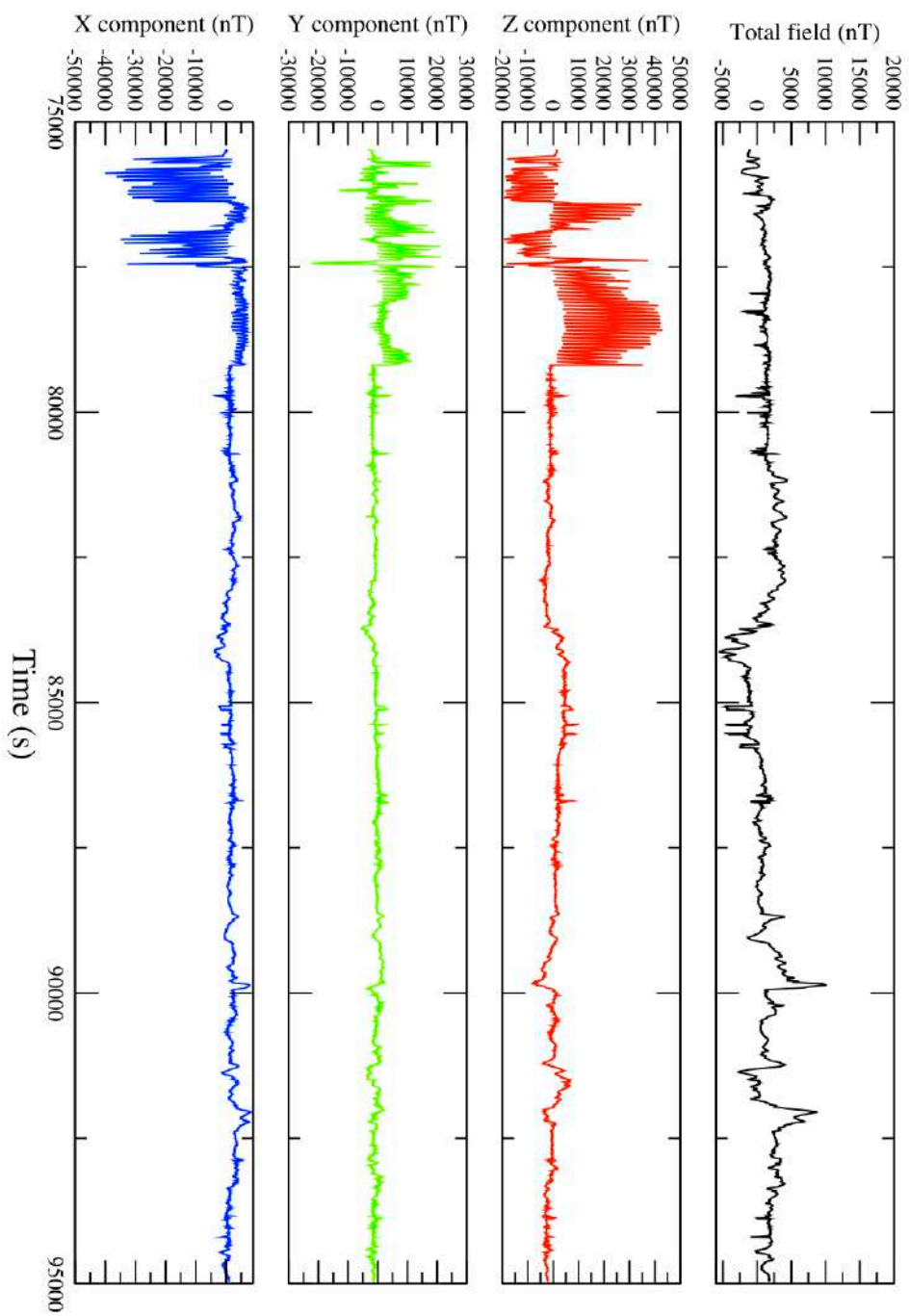
## Nautilie, Dive 12, Magnetic anomalies





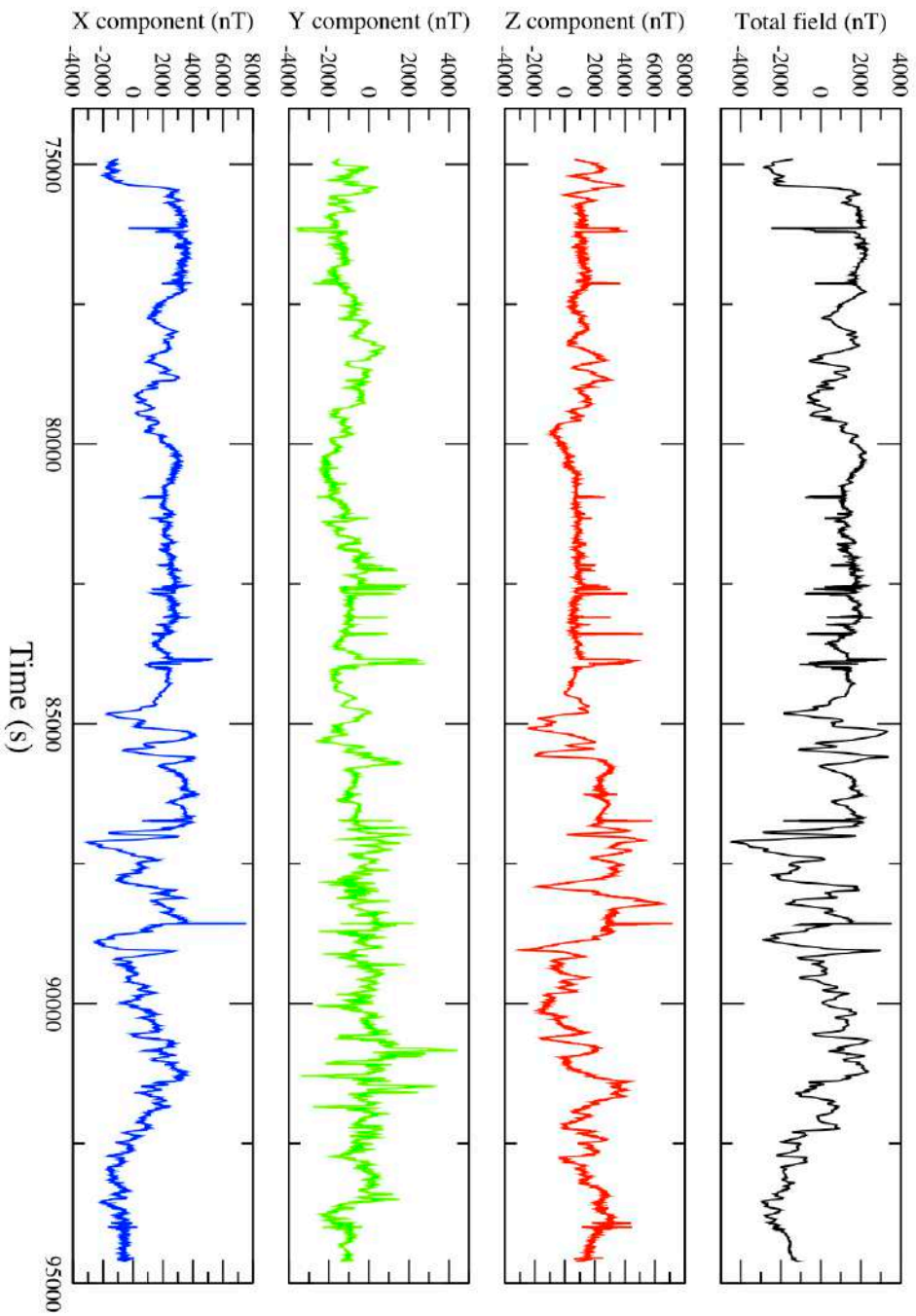
# Cruise Futuna 3

## Nautilie, Dive 11, Magnetic anomalies



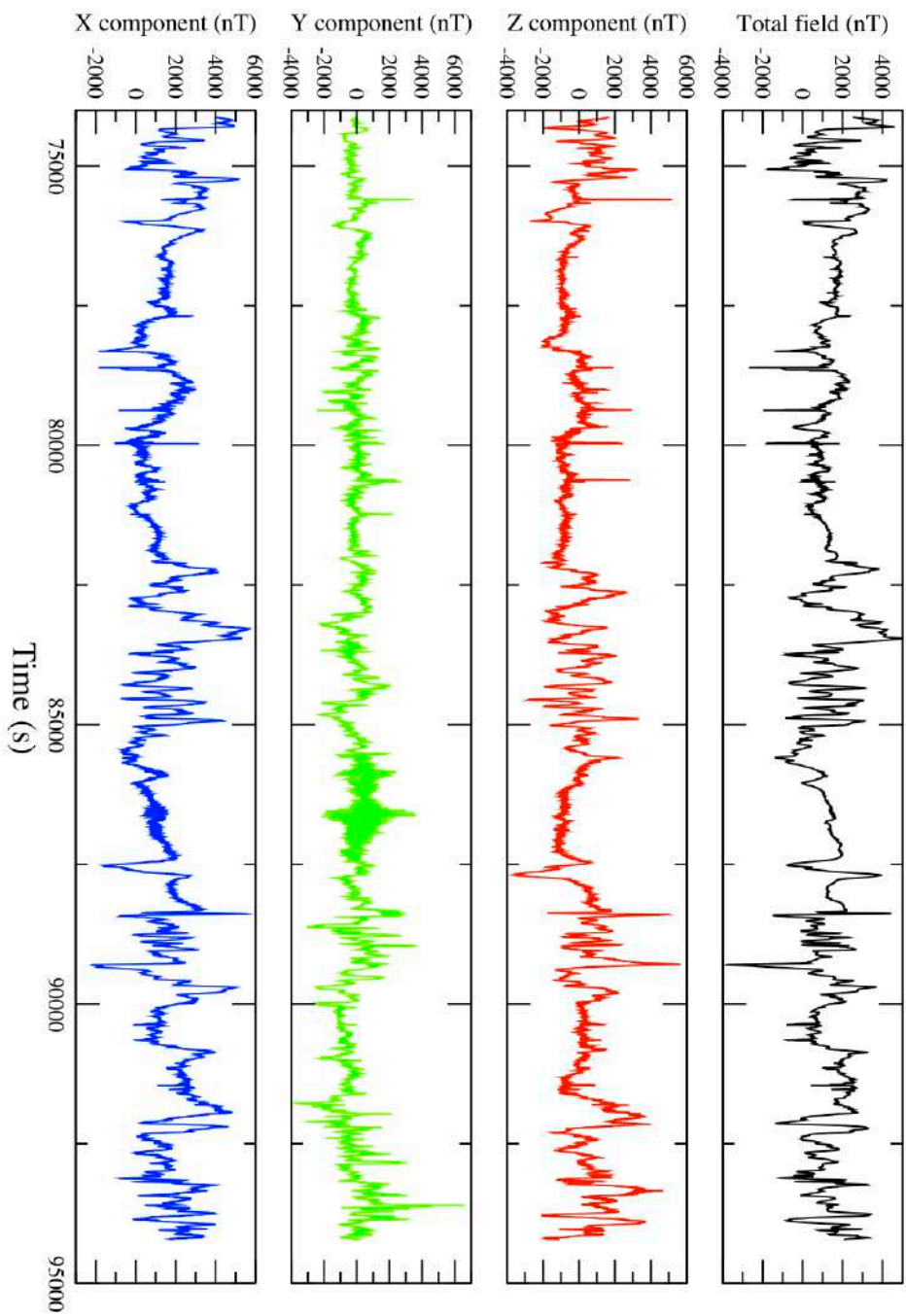
# Cruise Futuna 3

## Nautilie, Dive 12, Magnetic anomalies



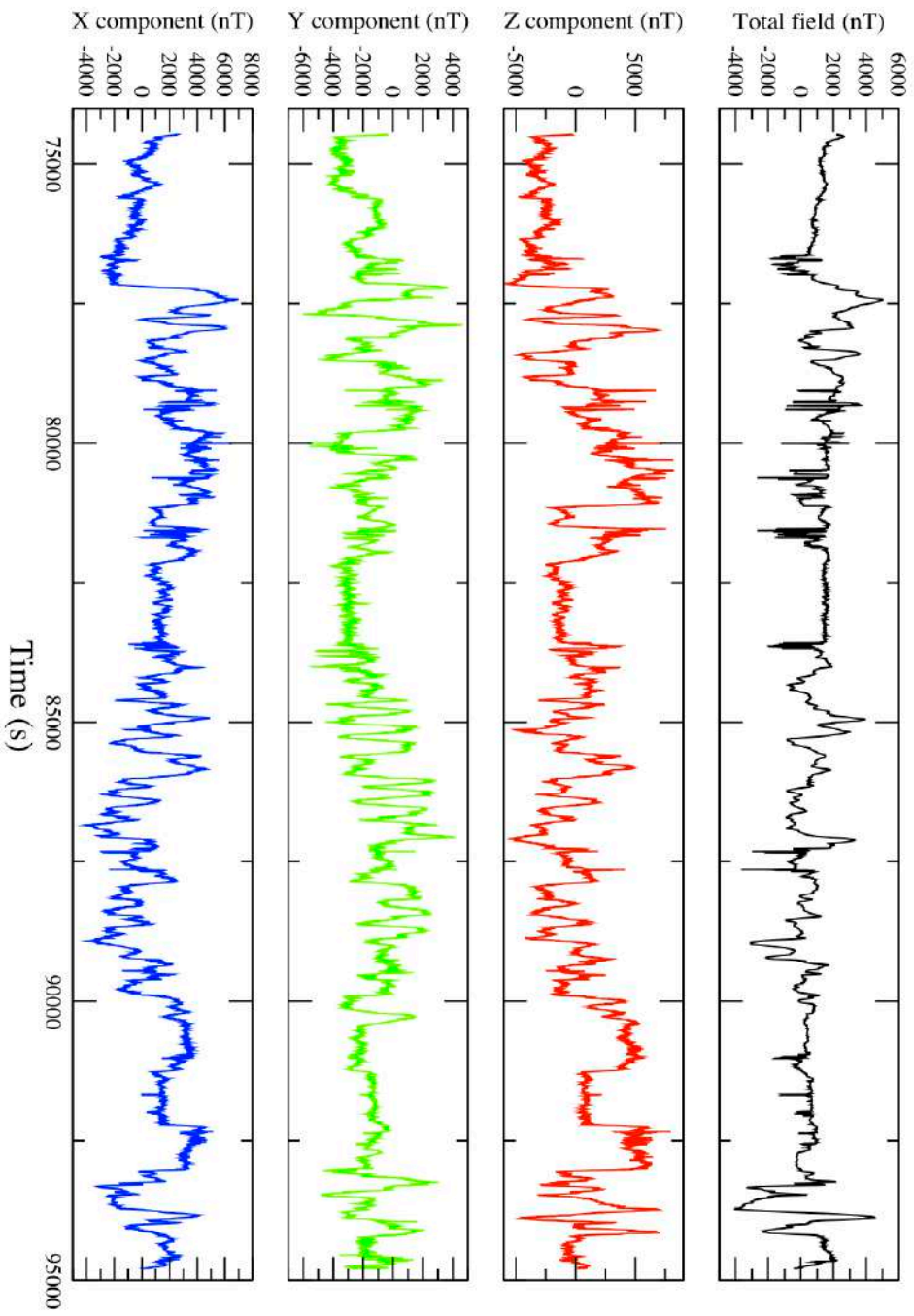
# Cruise Futuna 3

## Nautilie, Dive 13, Magnetic anomalies



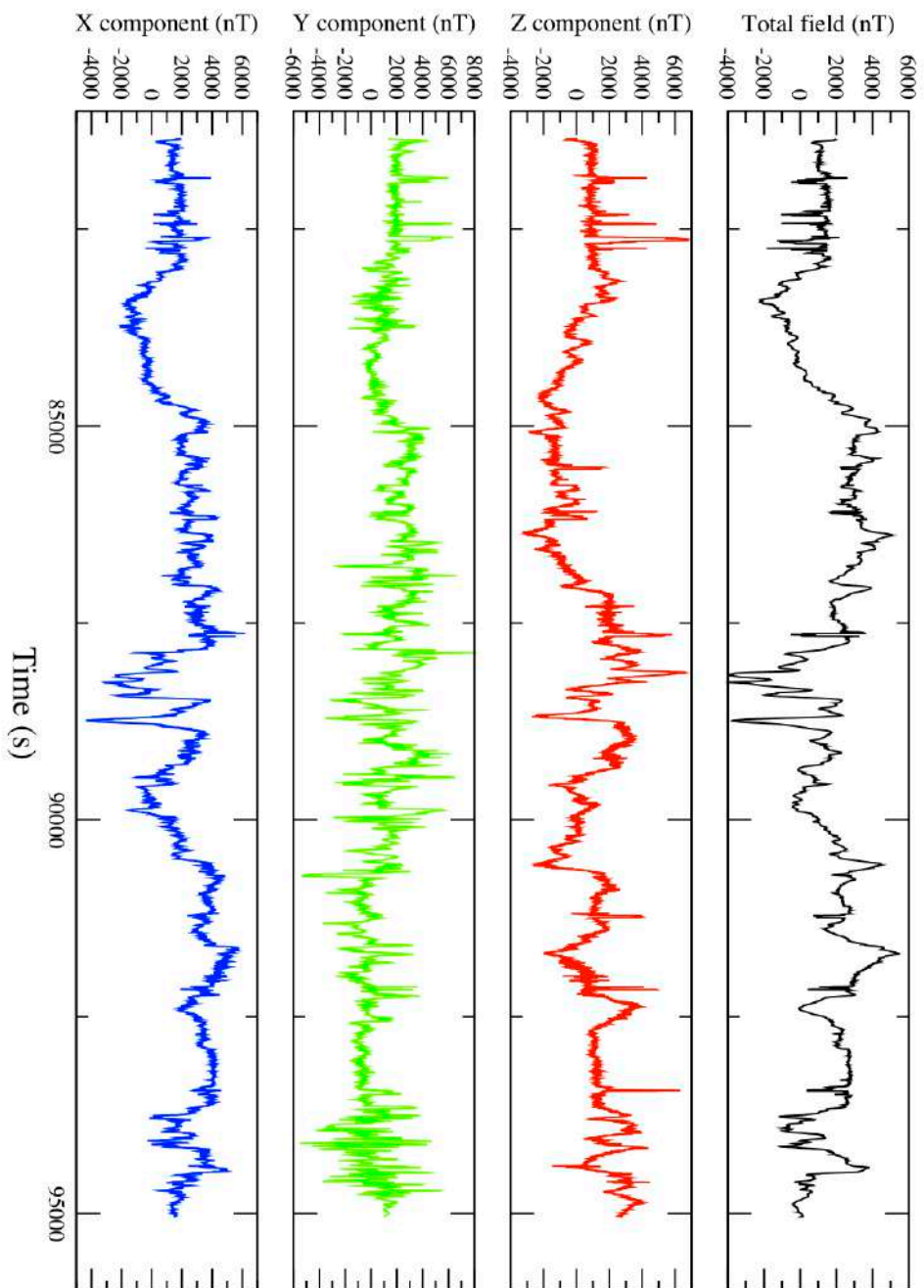
# Cruise Futuna 3

## Nautilie, Dive 14, Magnetic anomalies



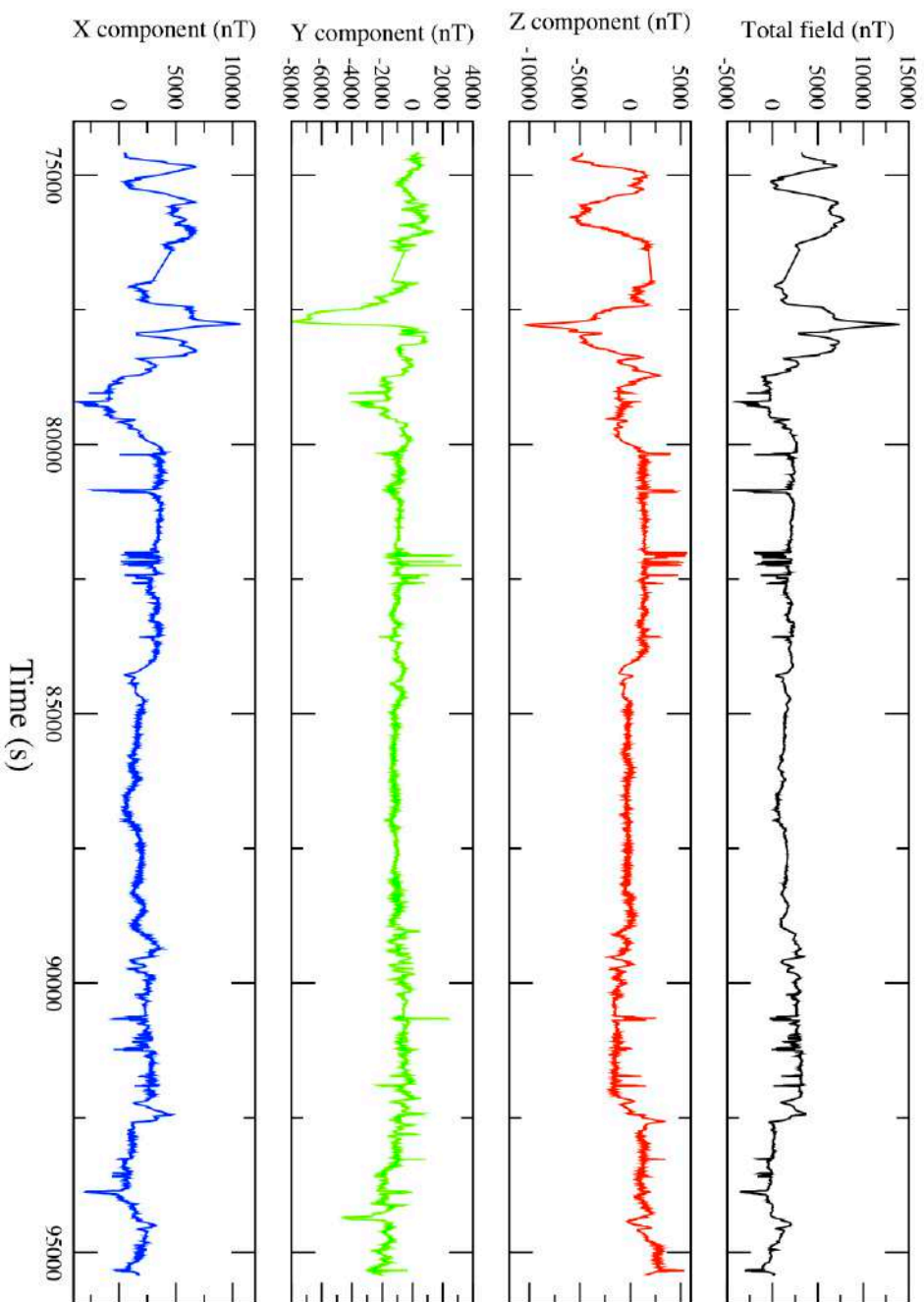
# Cruise Futuna 3

## Nautilie, Dive 15, Magnetic anomalies



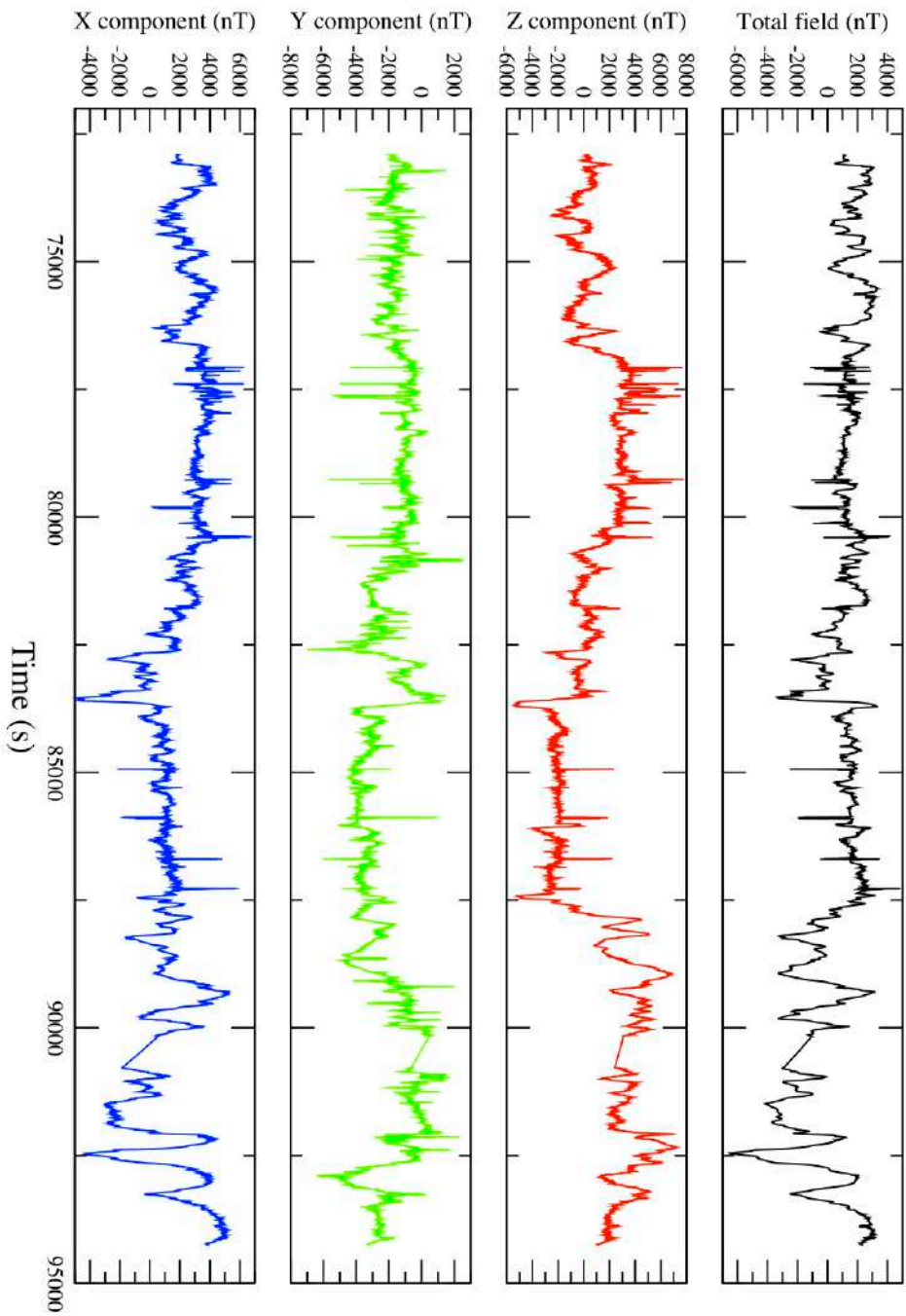
# Cruise Futuna 3

## Nautilie, Dive 16, Magnetic anomalies



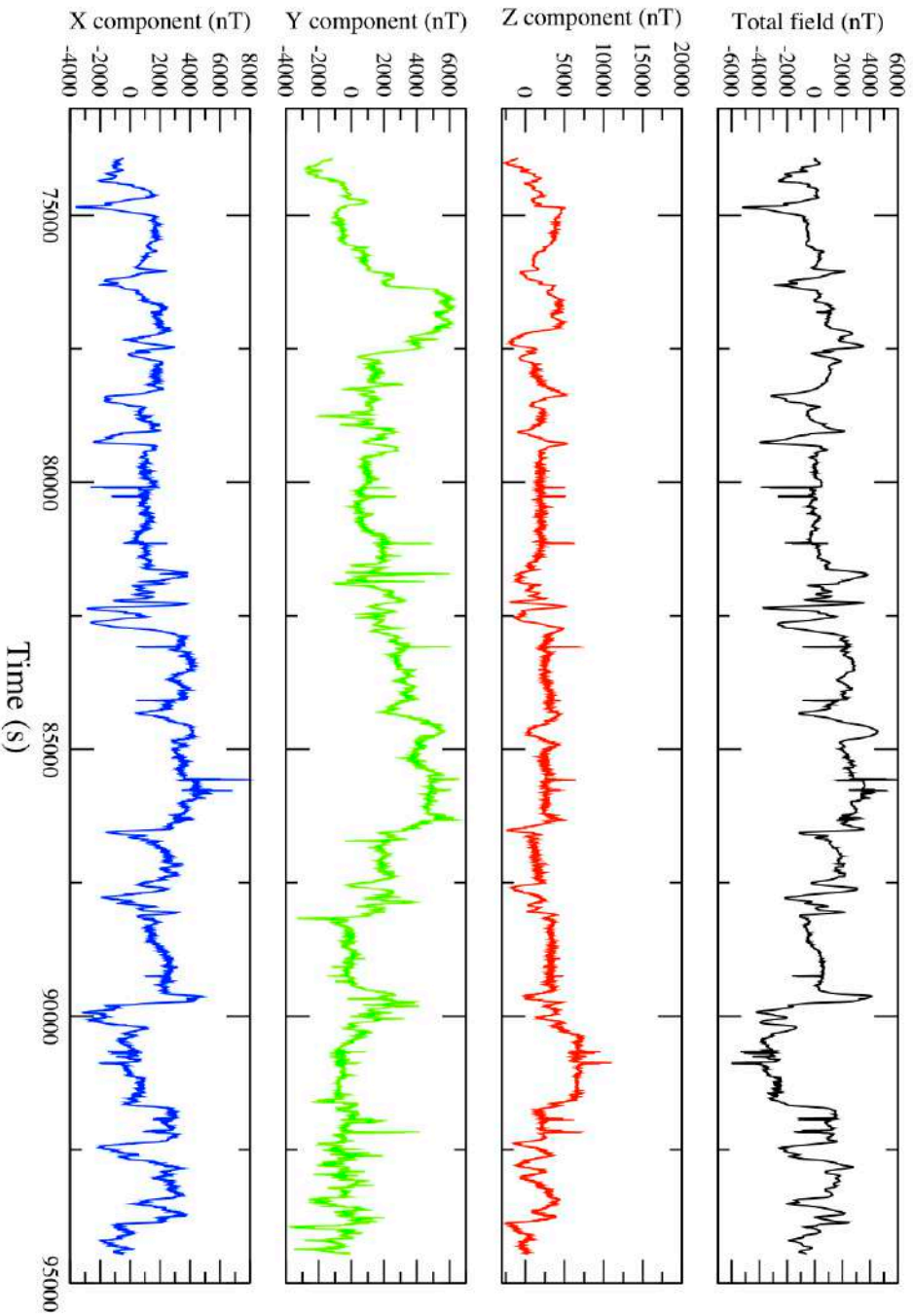
# Cruise Futuna 3

## Nautilie, Dive 17, Magnetic anomalies



# Cruise Futuna 3

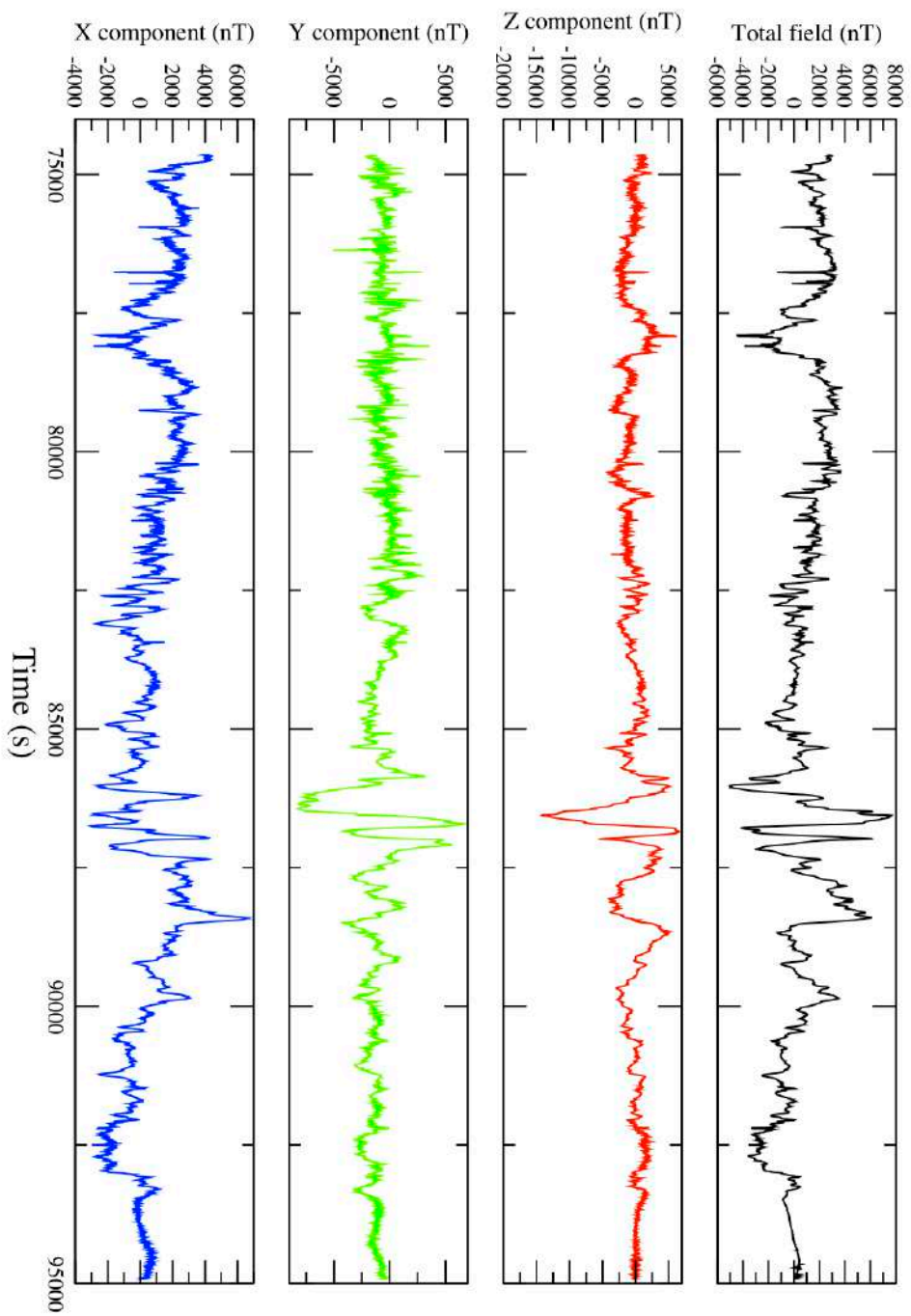
## Nautilie, Dive 18, Magnetic anomalies





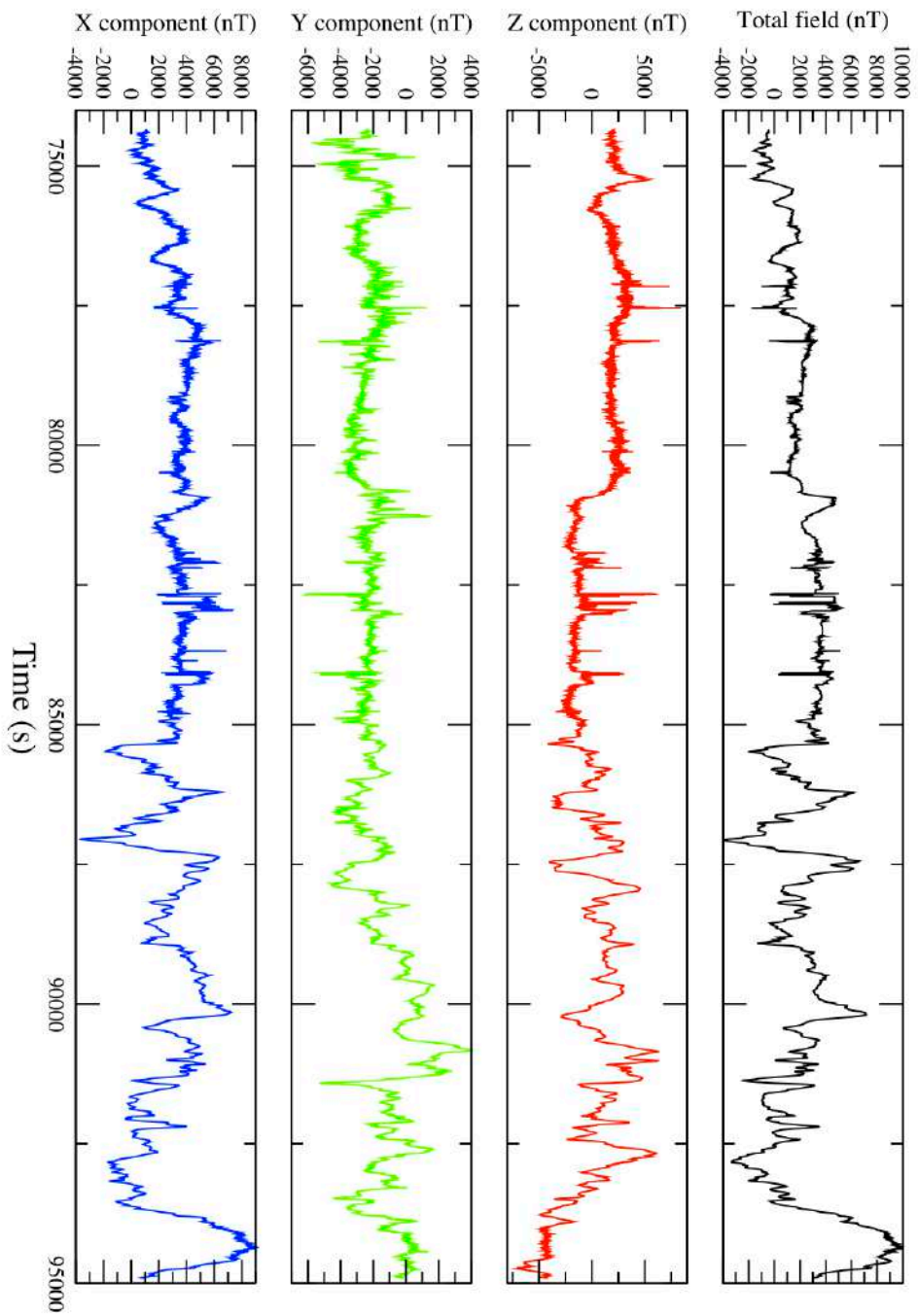
# Cruise Futuna 3

## Nautilie, Dive 19, Magnetic anomalies



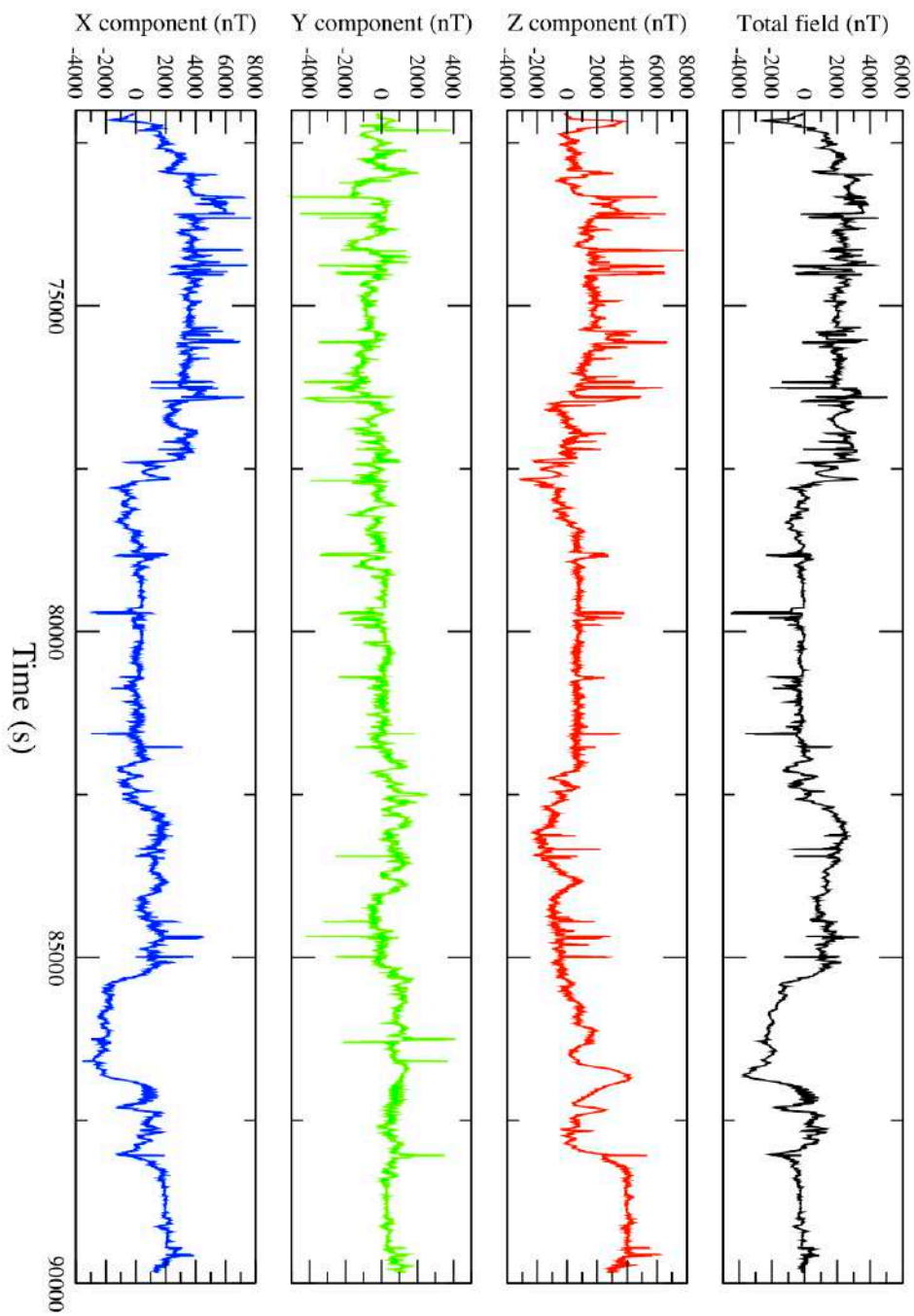
# Cruise Futuna 3

## Nautilie, Dive 20, Magnetic anomalies



# Cruise Futuna 3

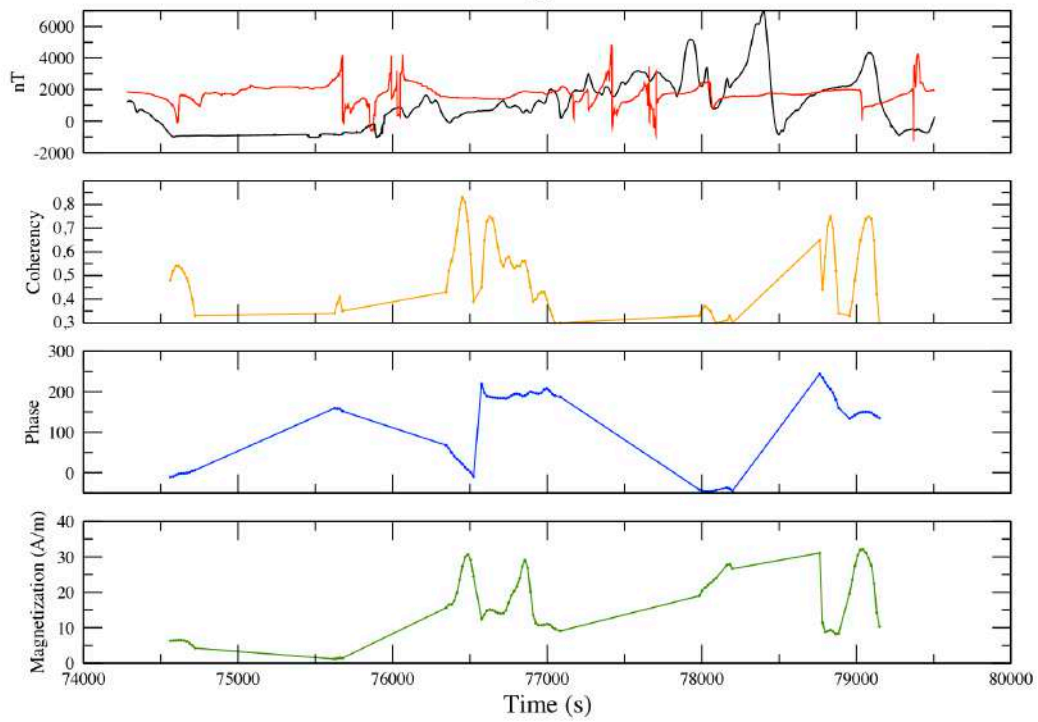
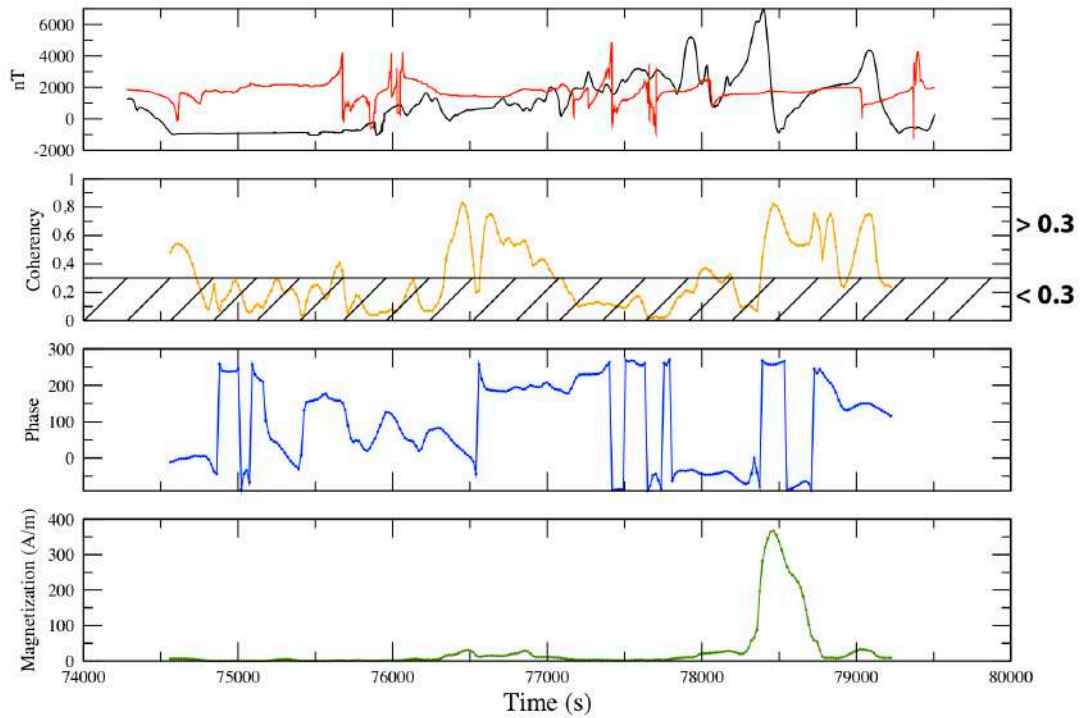
## Nautilie, Dive 21, Magnetic anomalies



# Aimantations

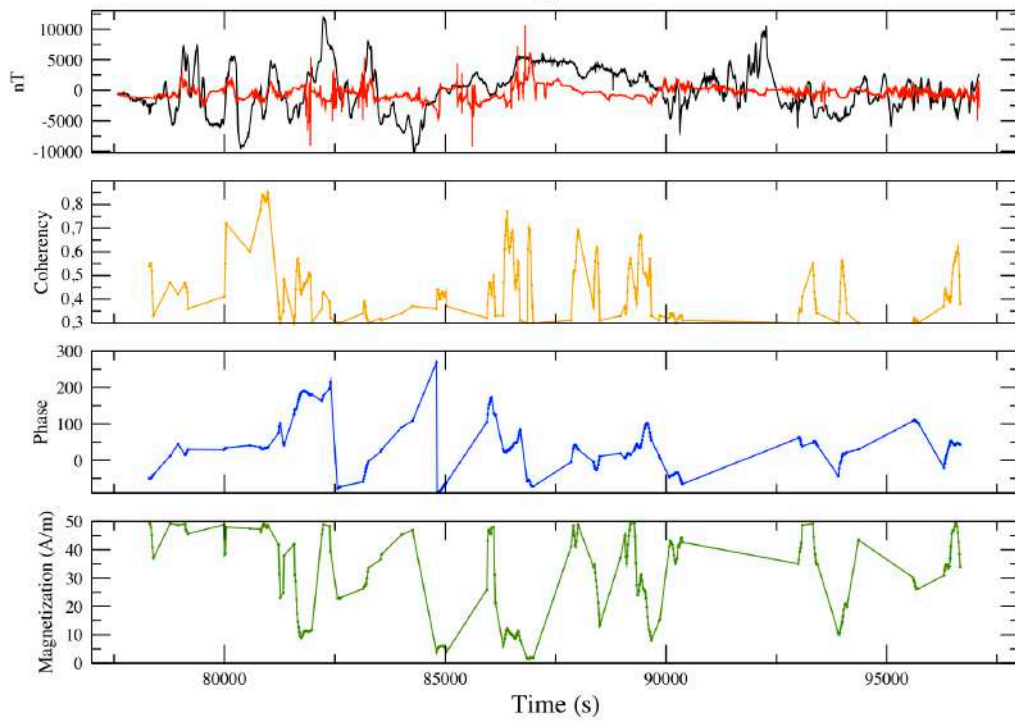
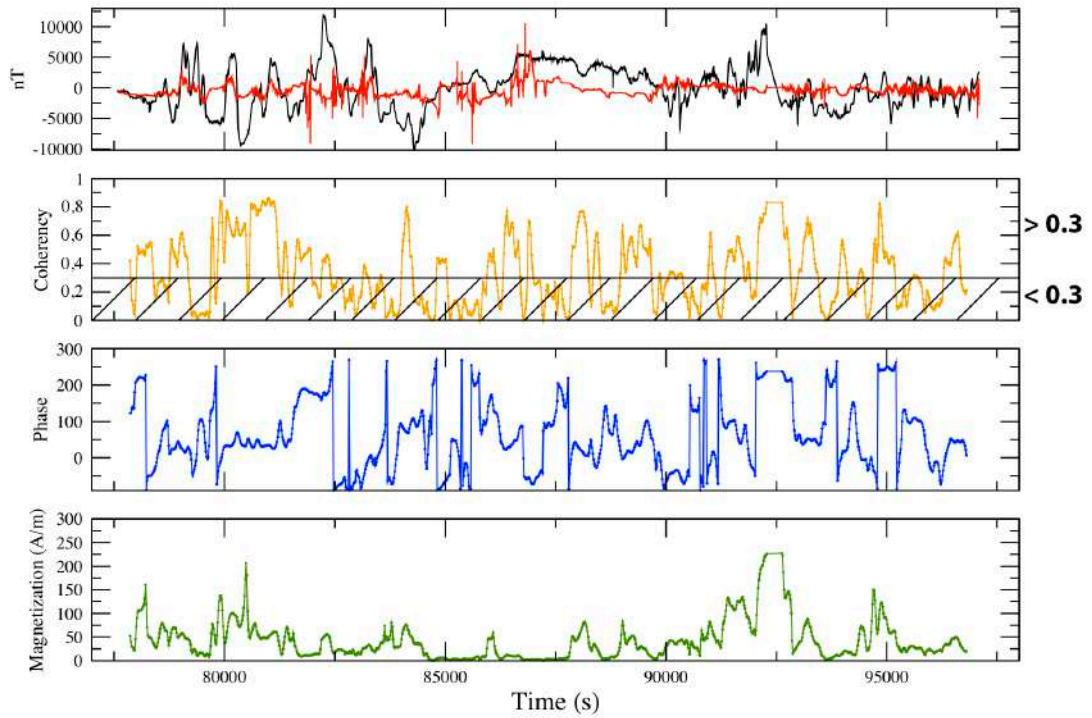
## Cruise Futuna 1

Nautile, Dive 1, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



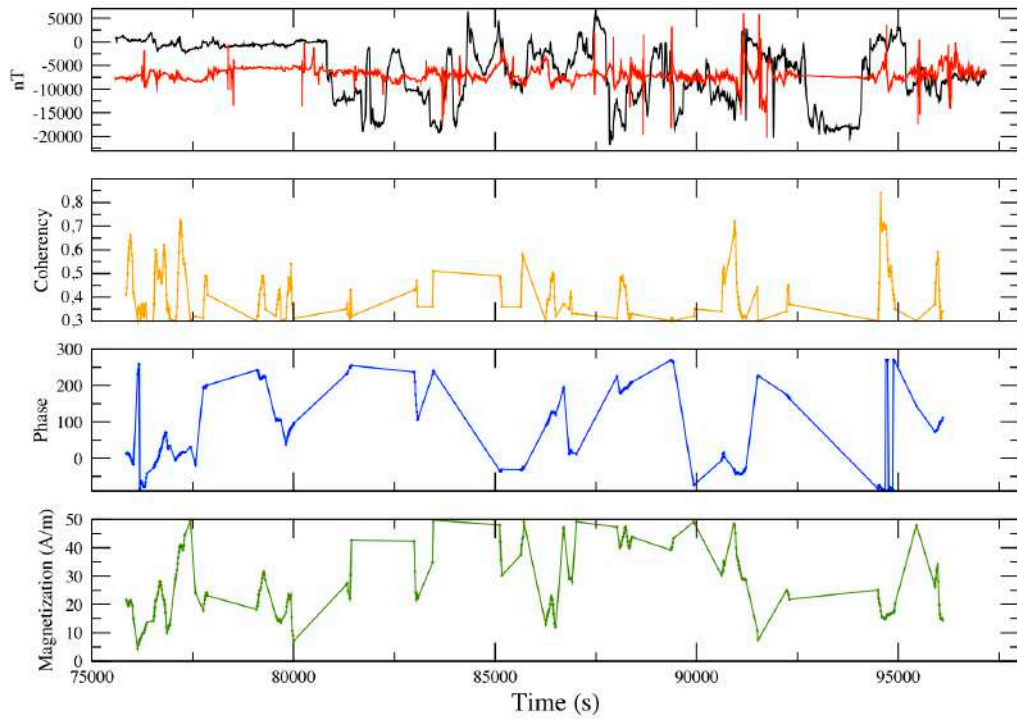
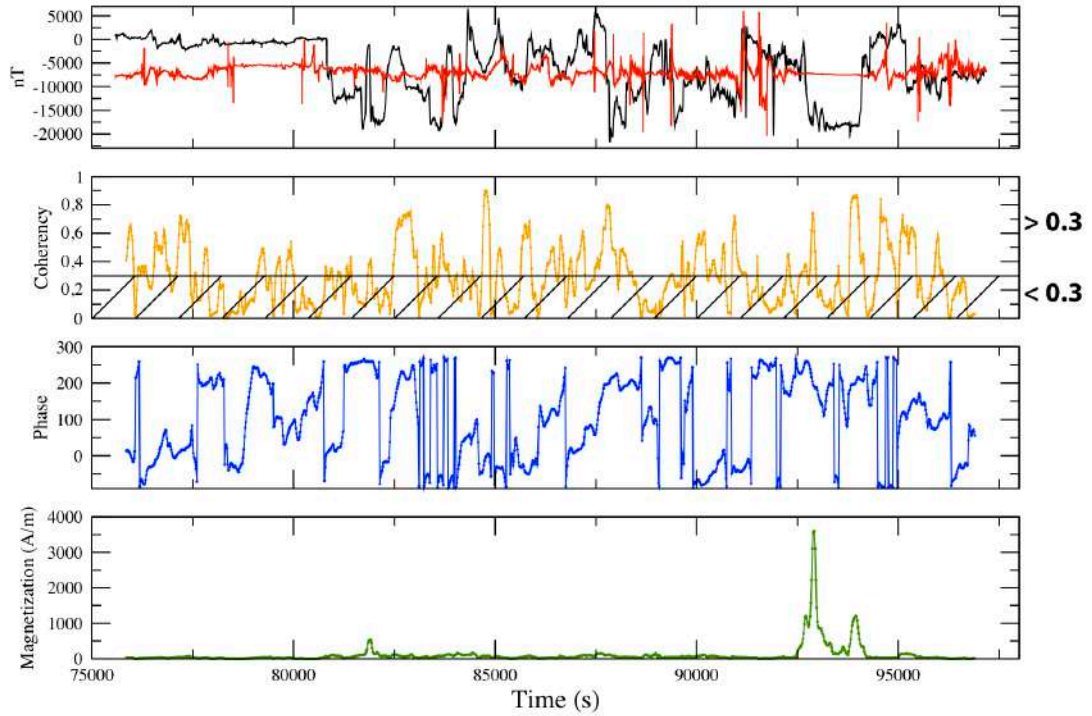
# Cruise Futuna 1

Nautile, Dive 2, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



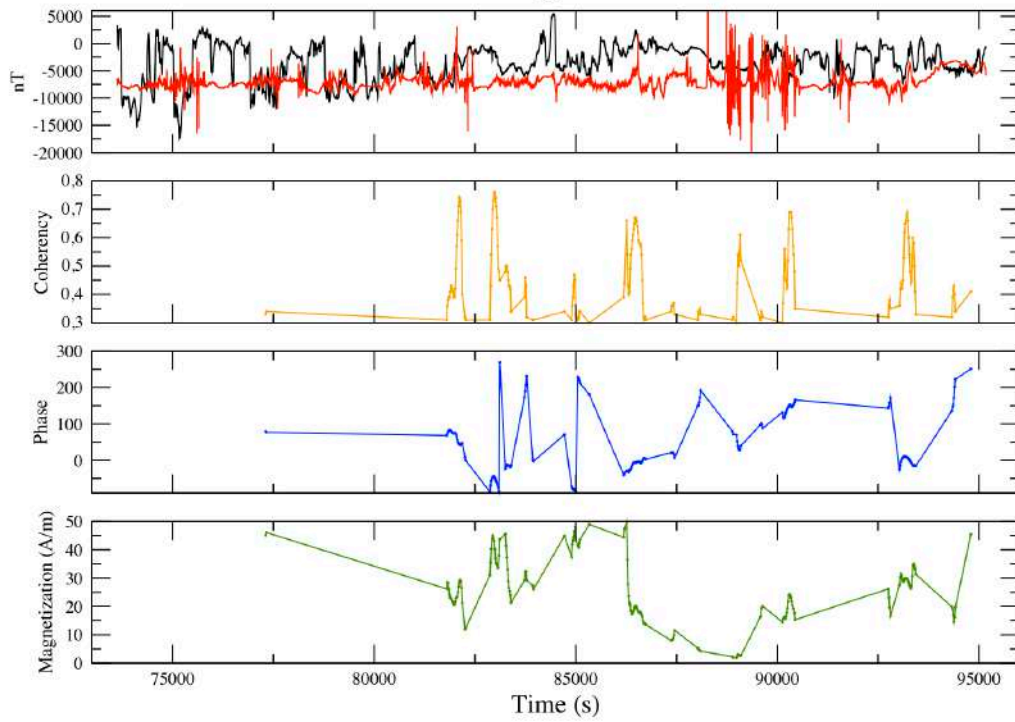
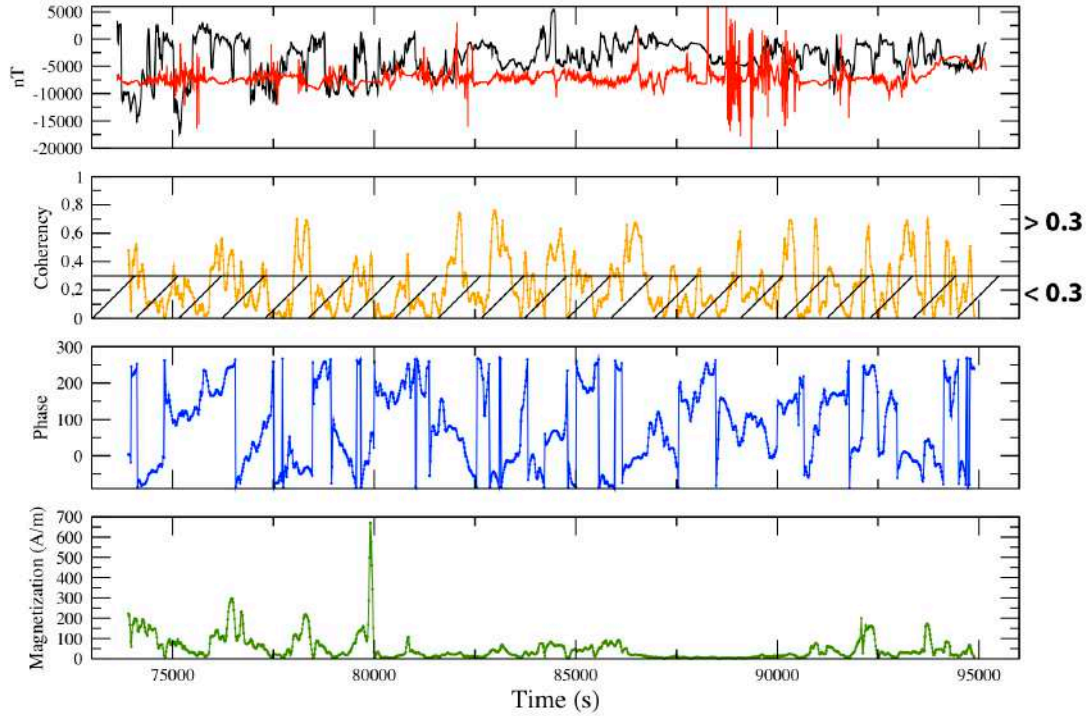
# Cruise Futuna 1

Nautile, Dive 3, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



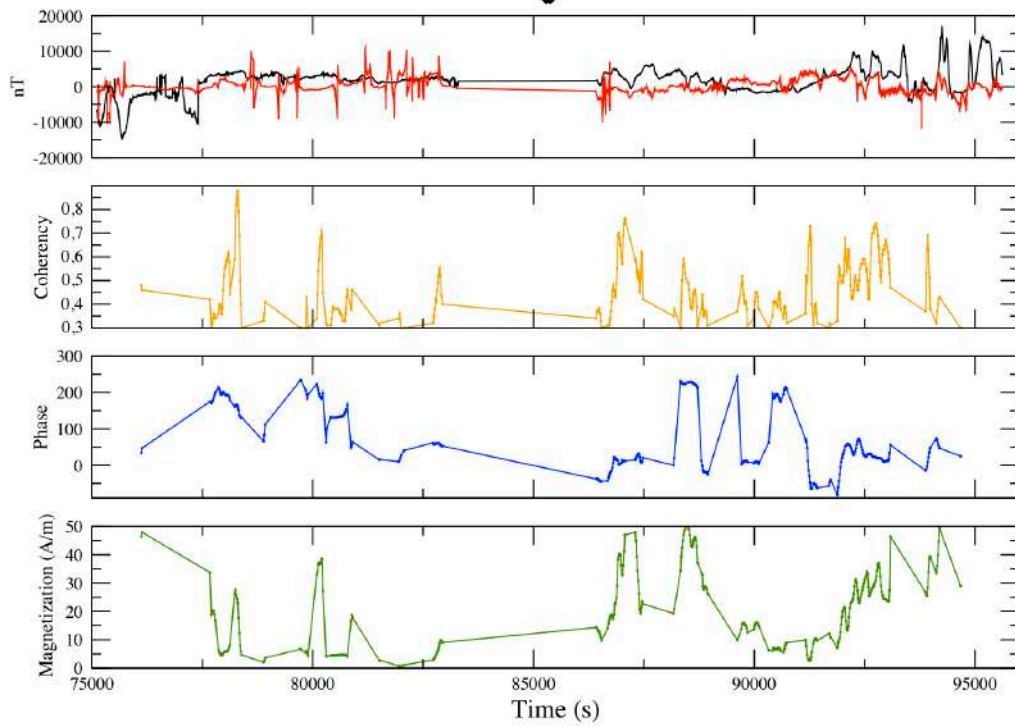
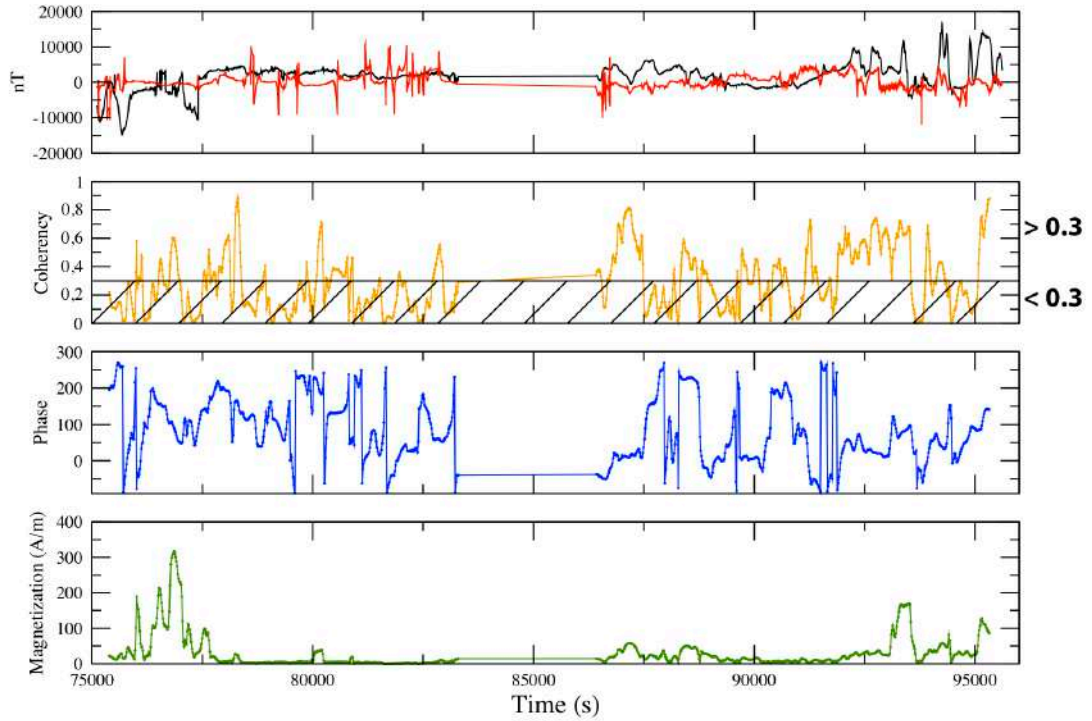
# Cruise Futuna 1

Nautile, Dive 4, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



# Cruise Futuna 1

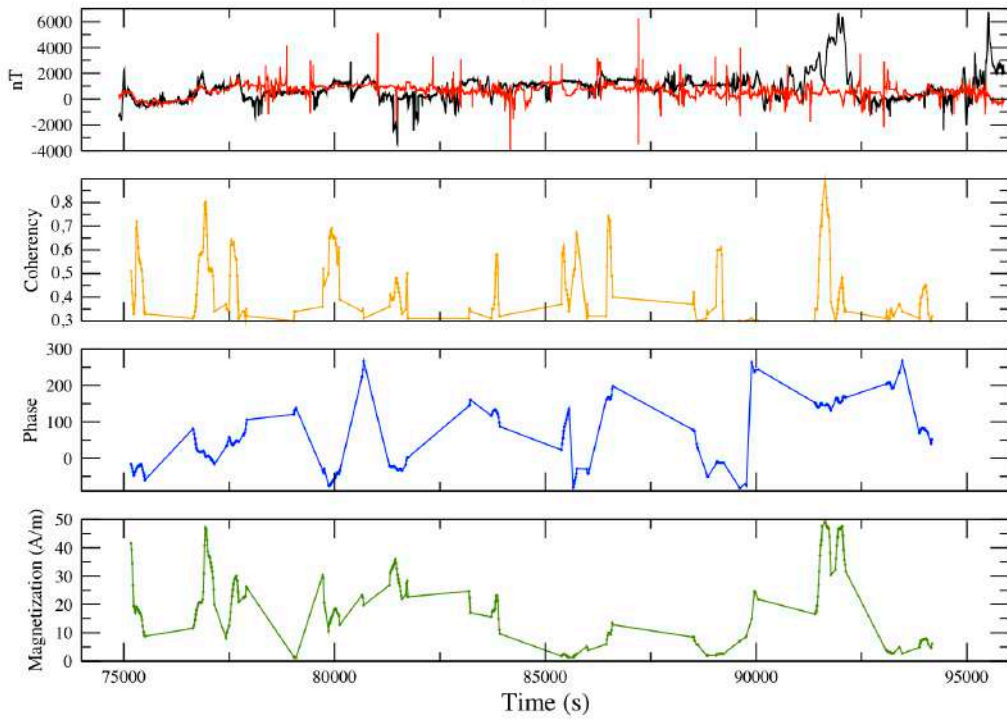
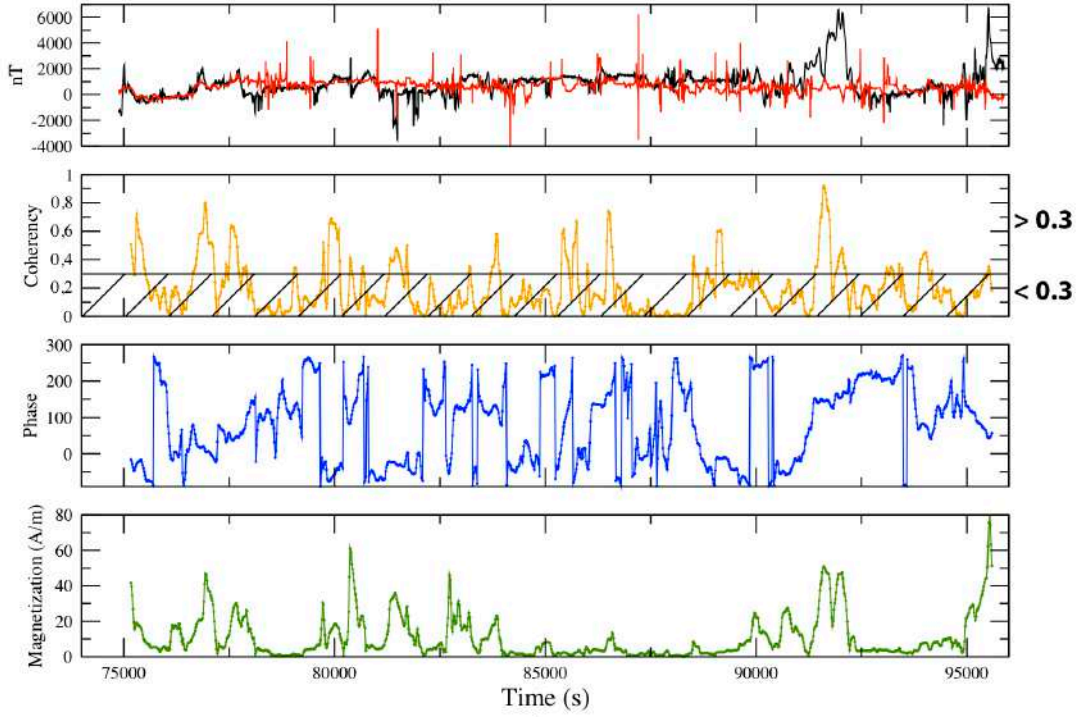
Nautile, Dive 5, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)





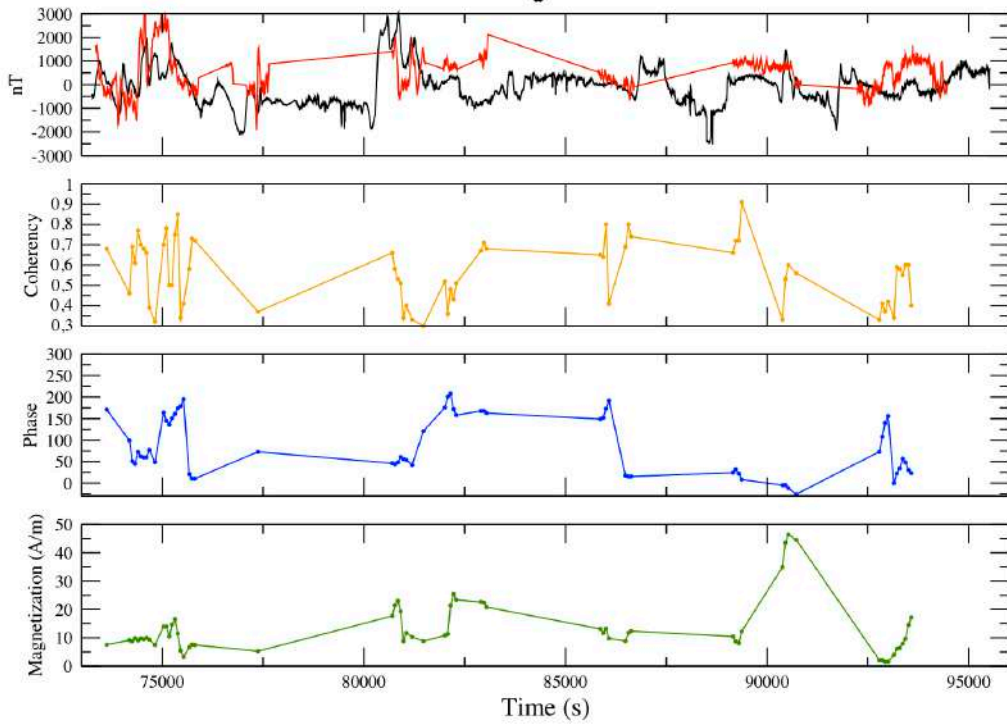
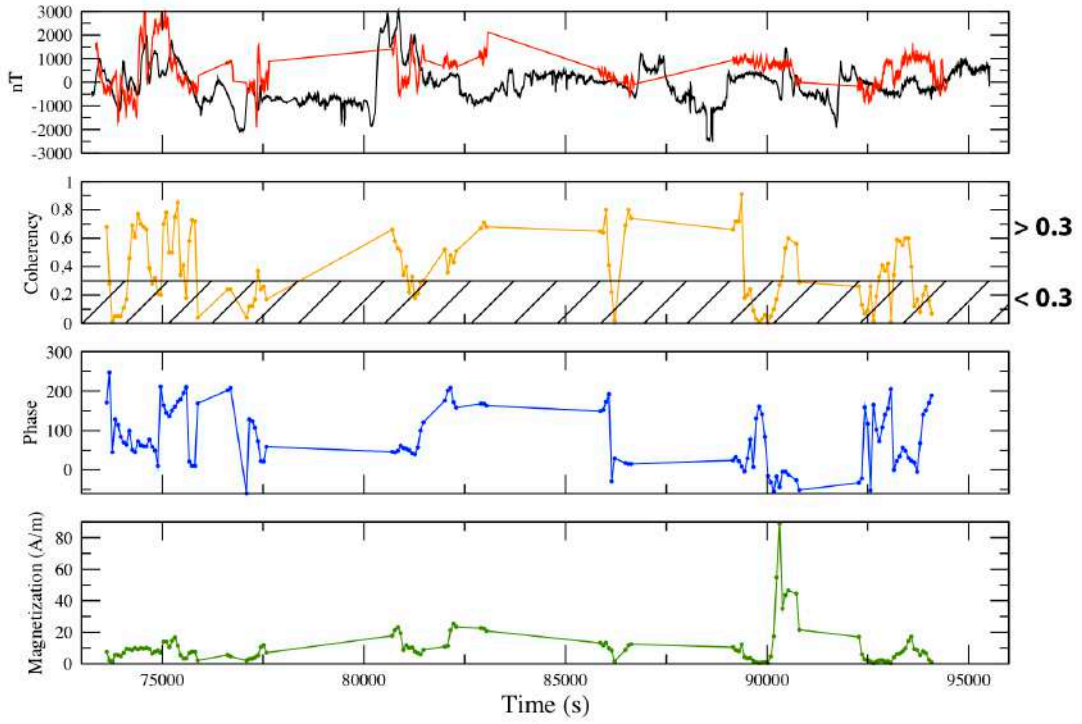
# Cruise Futuna 1

Nautilé, Dive 6, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



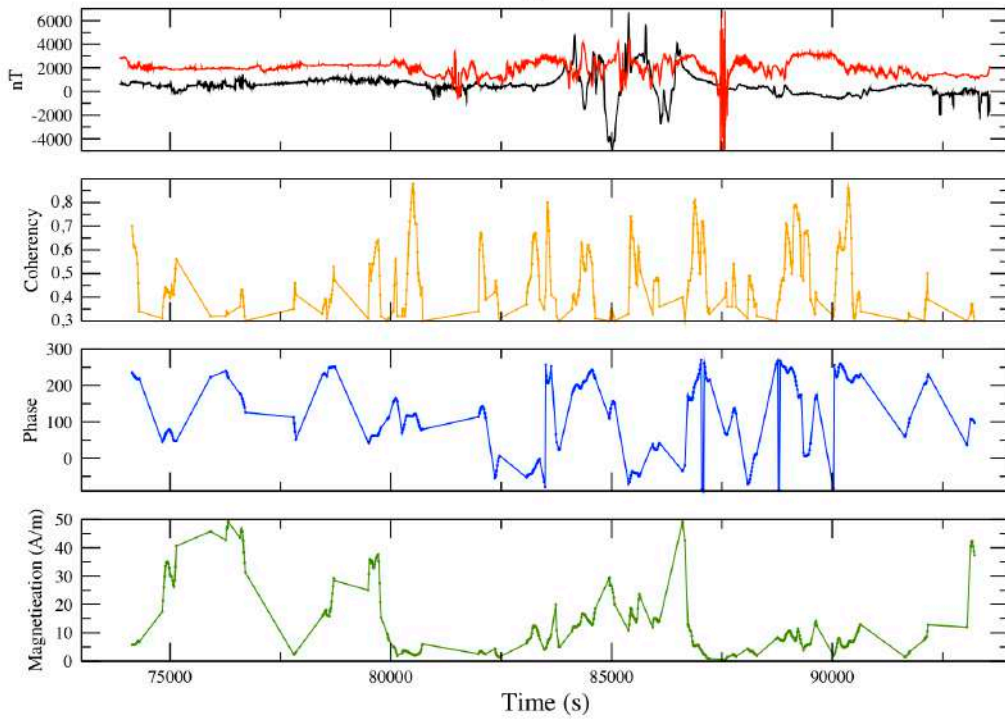
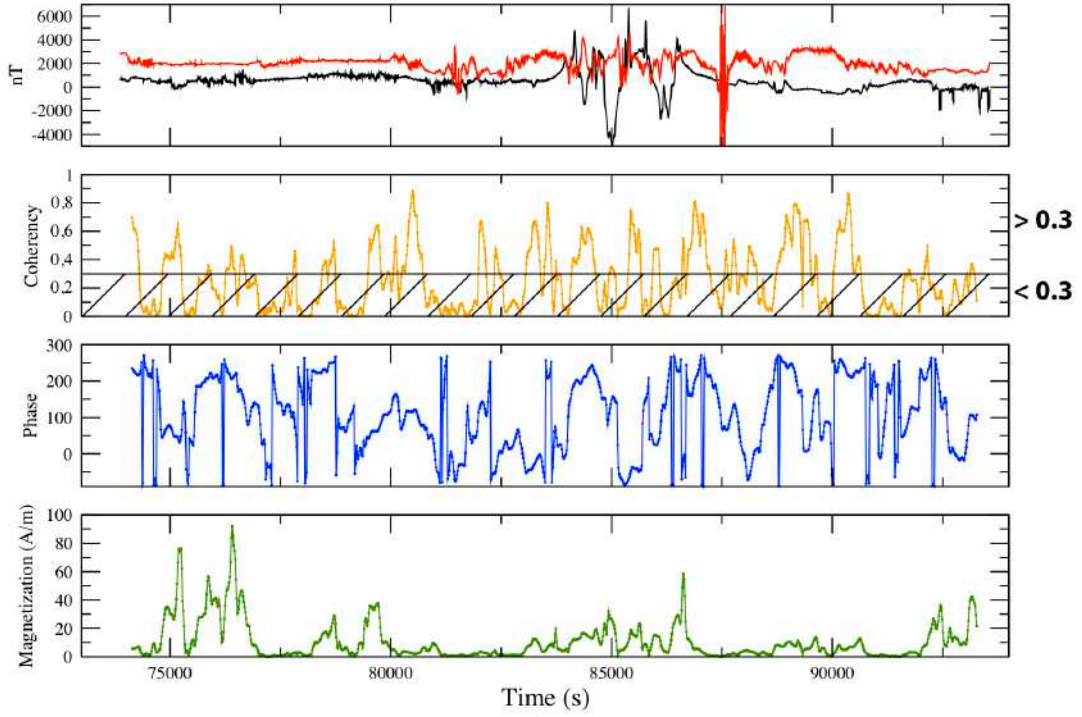
# Cruise Futuna 1

Nautilé, Dive 7, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



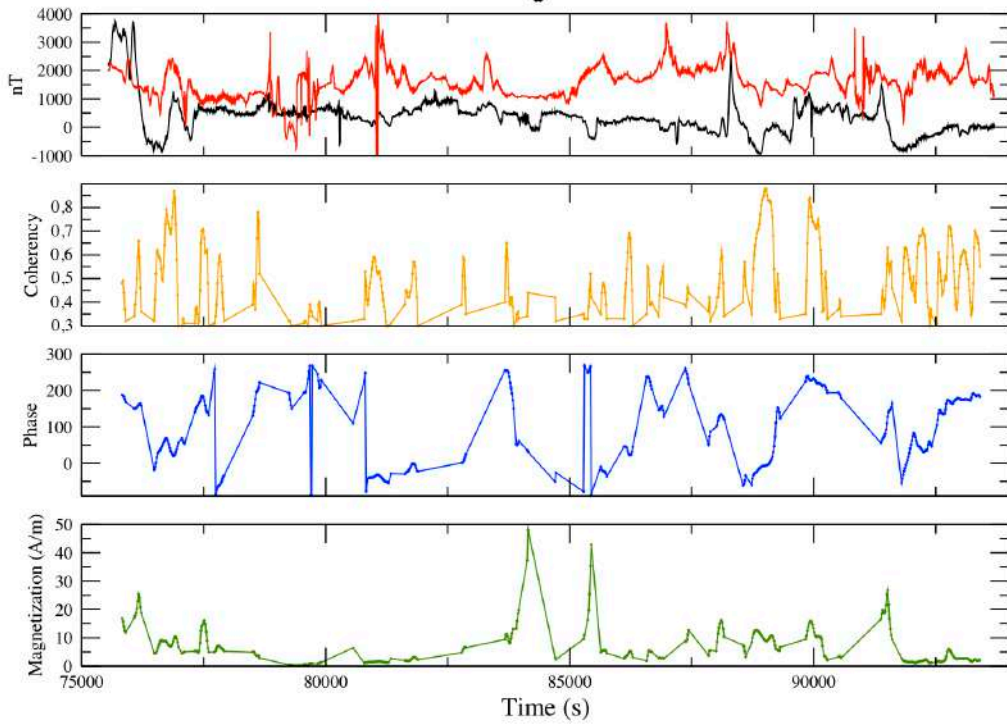
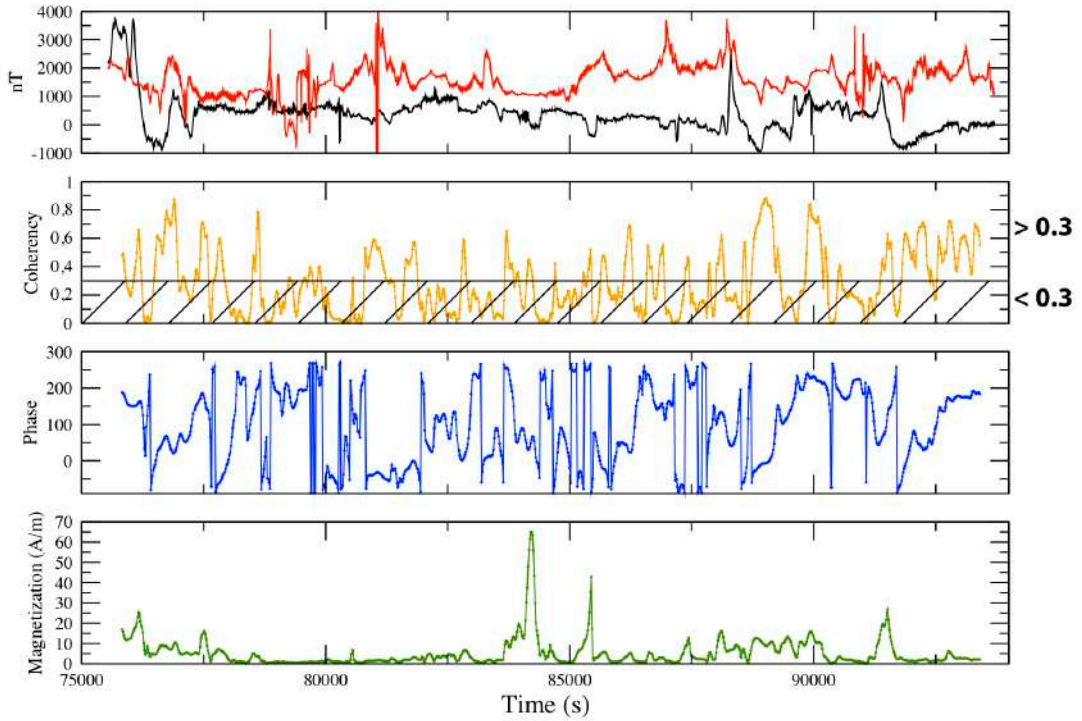
# Cruise Futuna 1

Nautilé, Dive 8, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



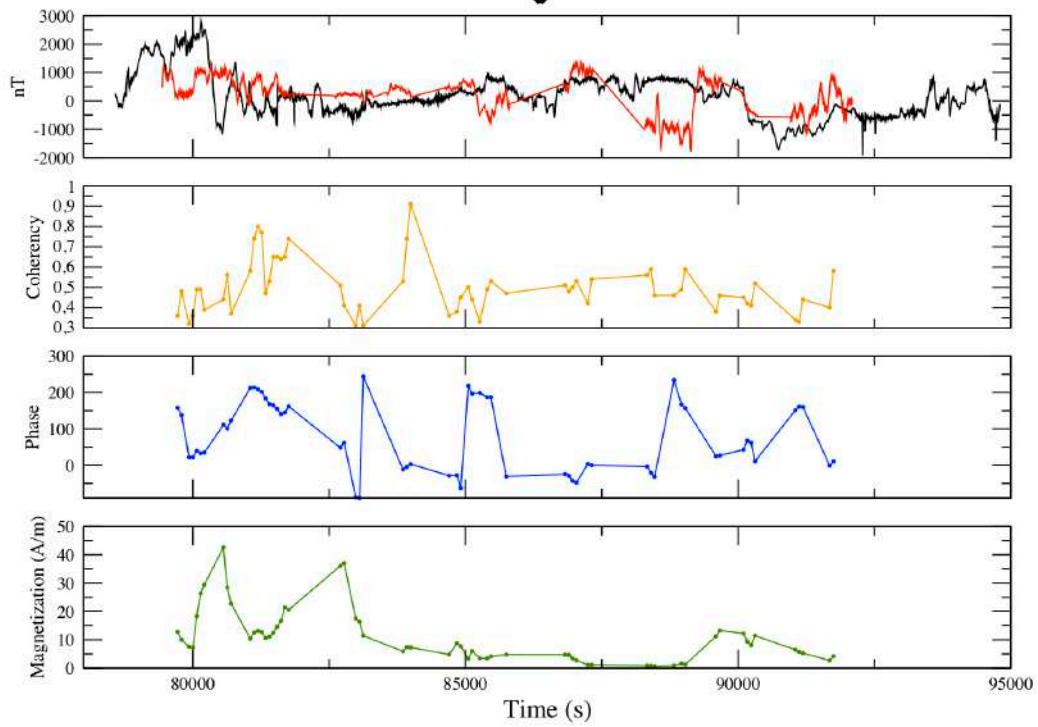
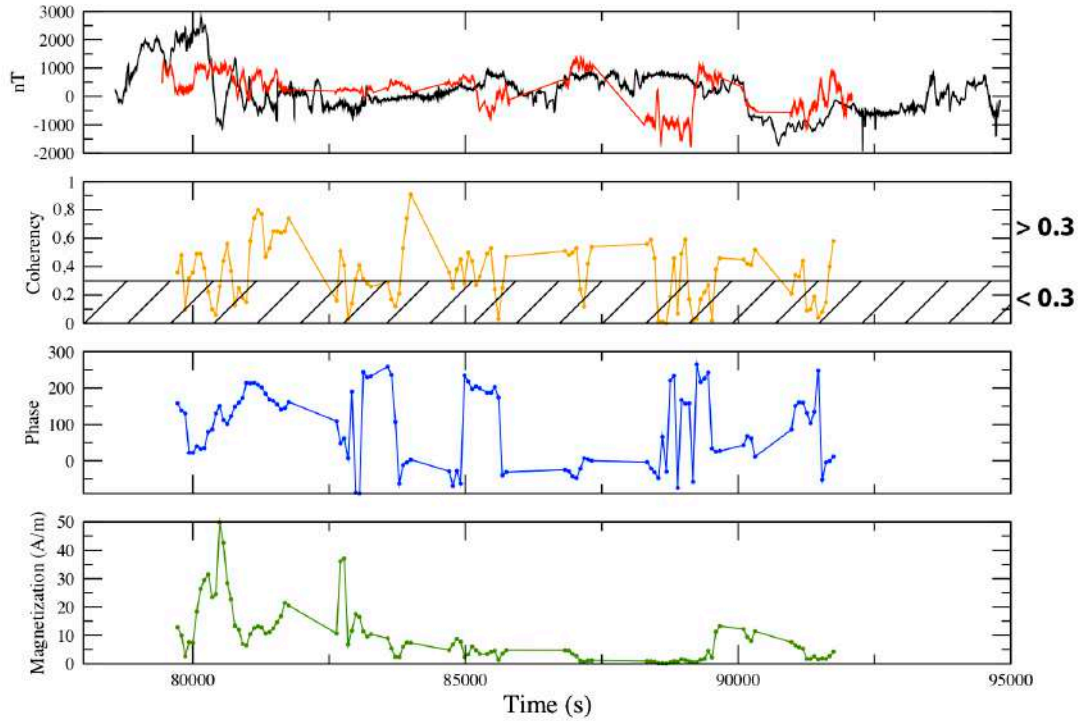
# Cruise Futuna 1

Nautilé, Dive 9, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



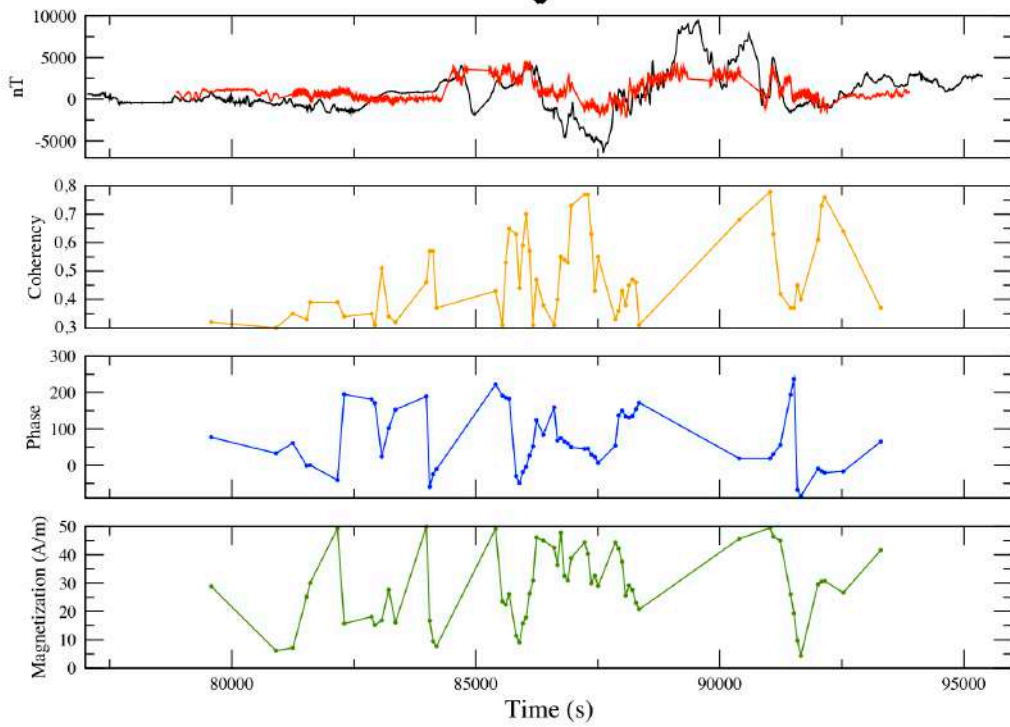
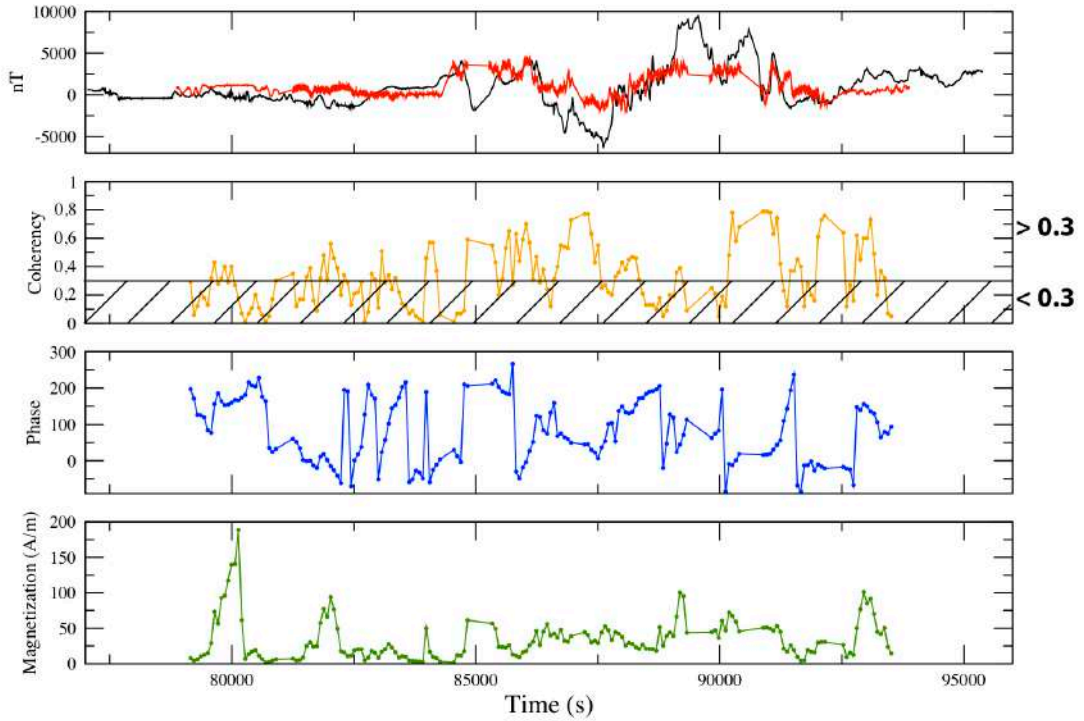
# Cruise Futuna 1

Nautile, Dive 10, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



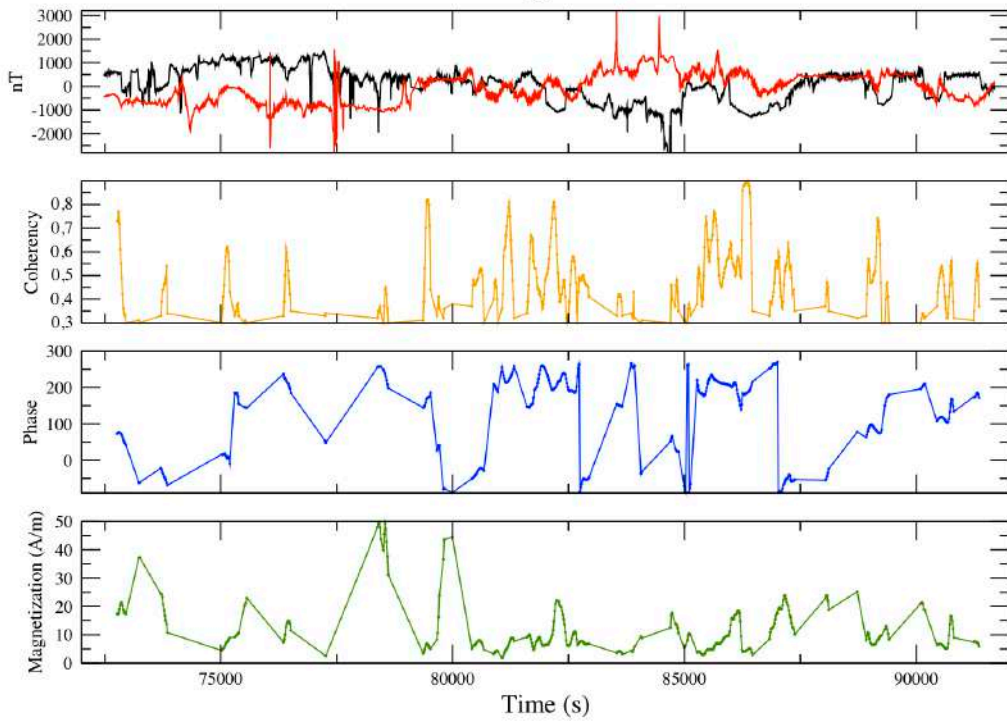
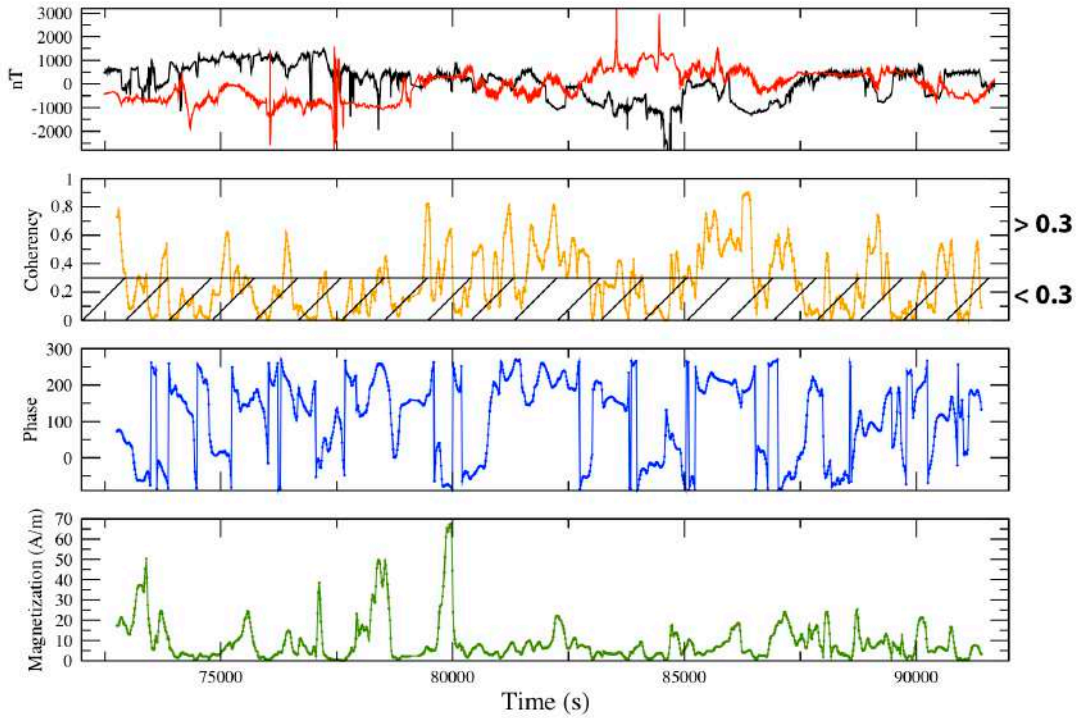
# Cruise Futuna 1

Nautilé, Dive 11, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



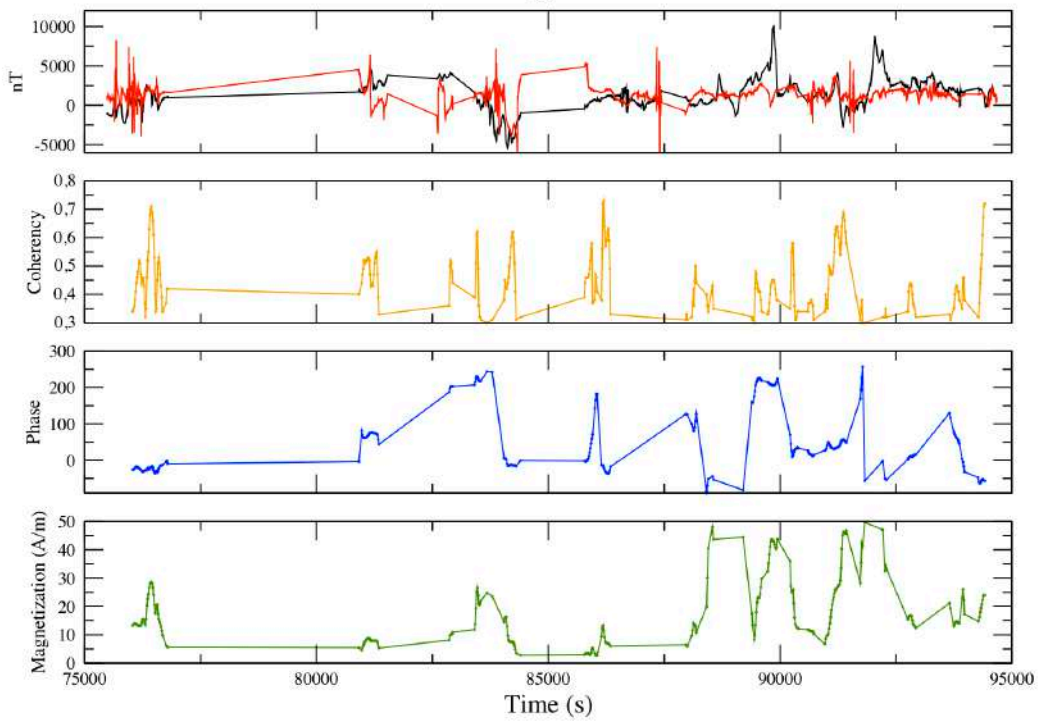
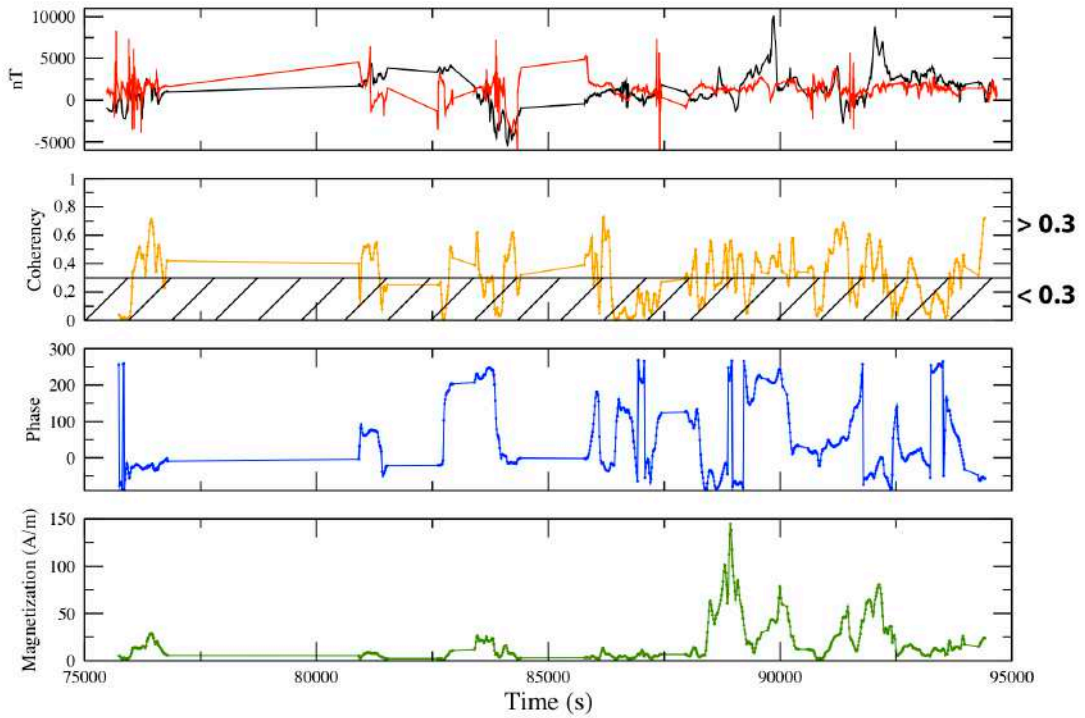
# Cruise Futuna 1

Nautile, Dive 12, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



# Cruise Futuna 3

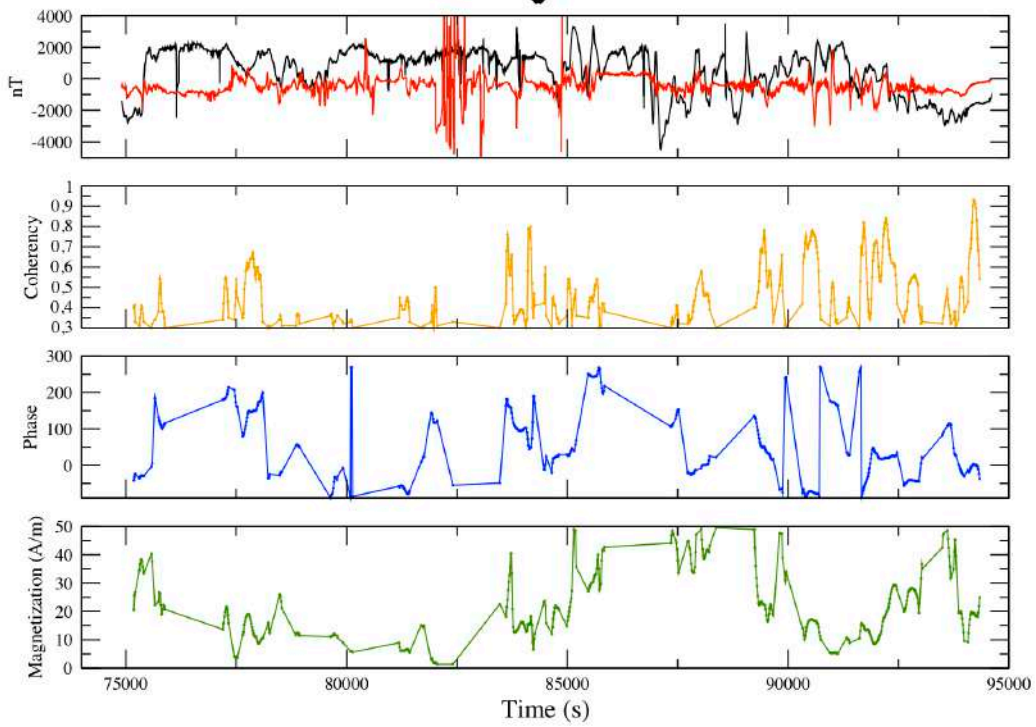
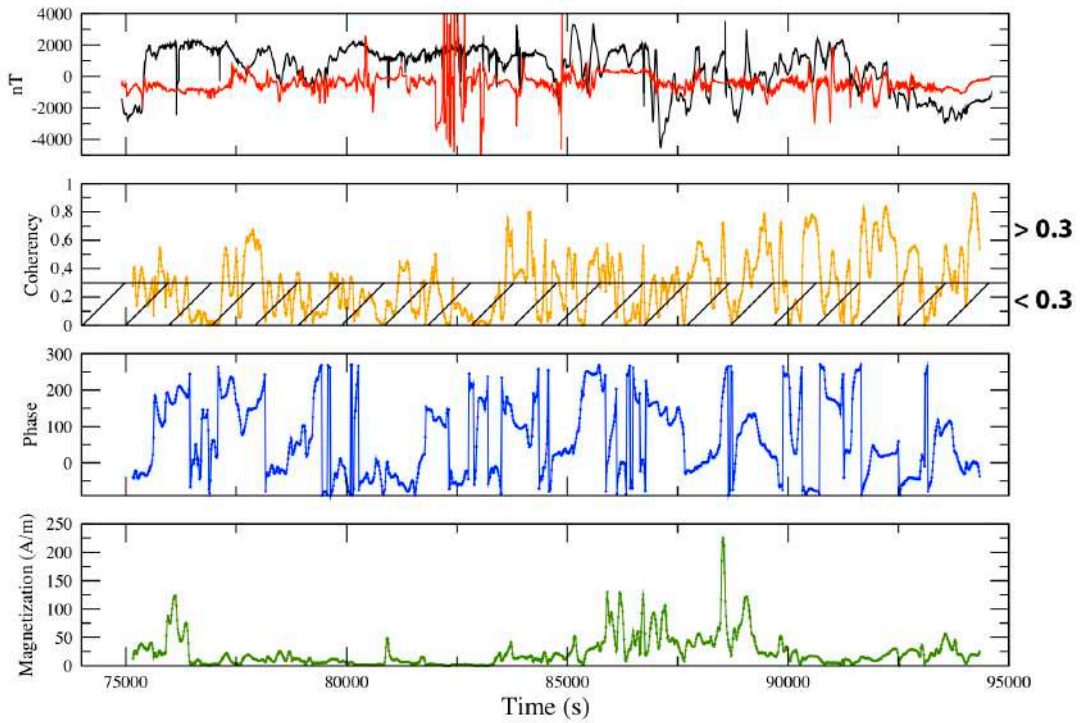
Nautile, Dive 11, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)





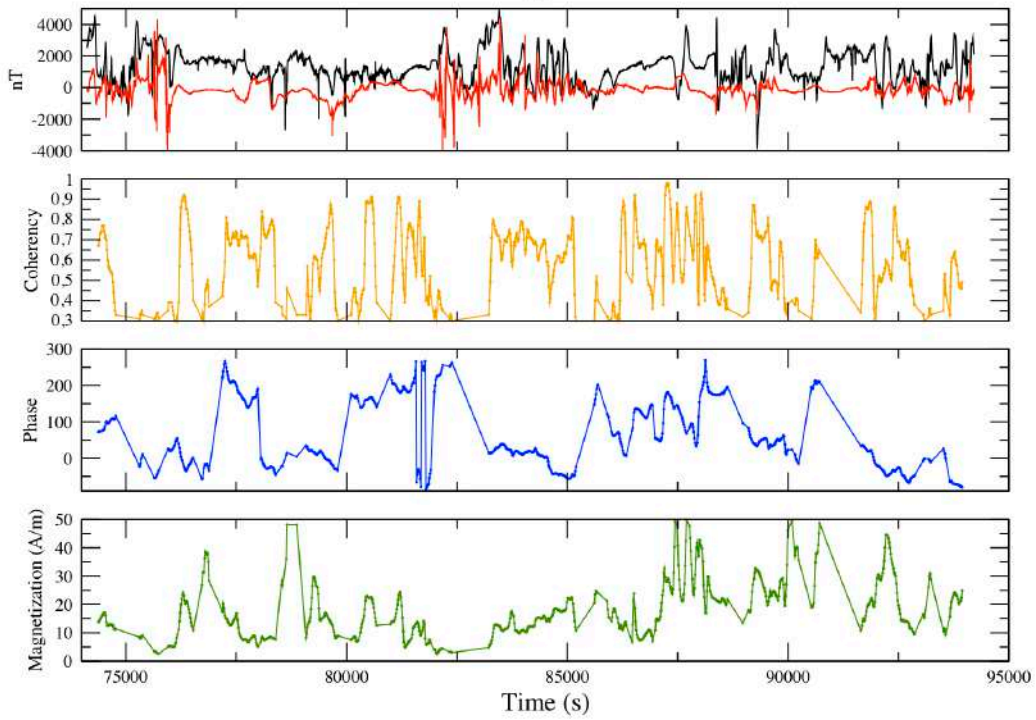
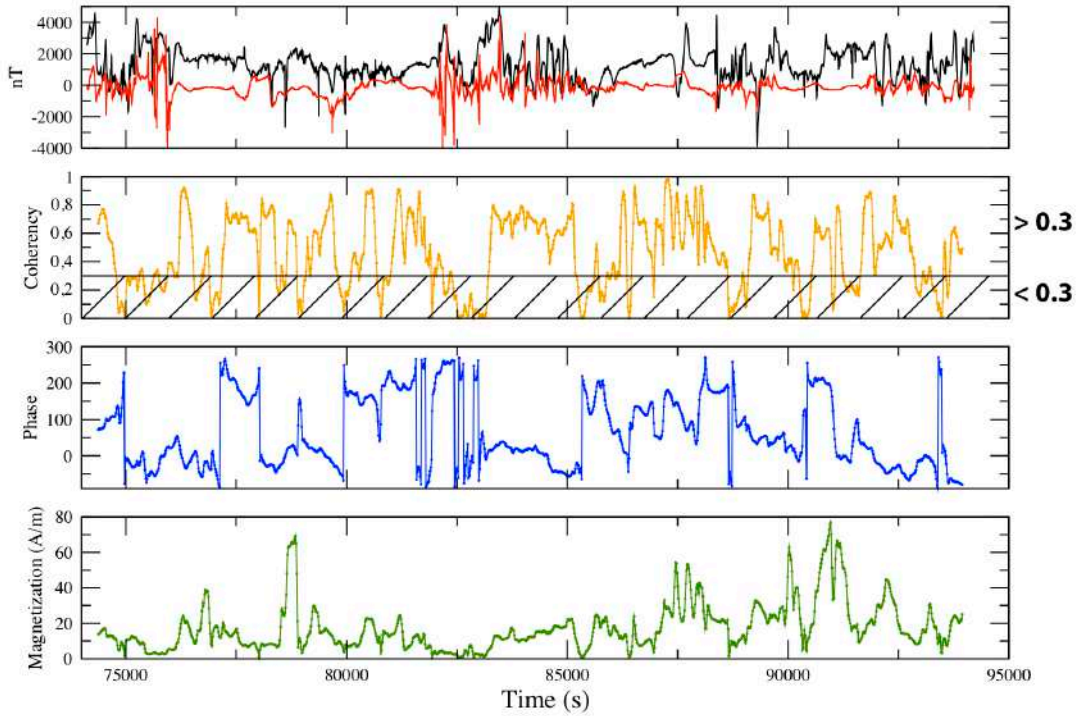
# Cruise Futuna 3

Nautile, Dive 12, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



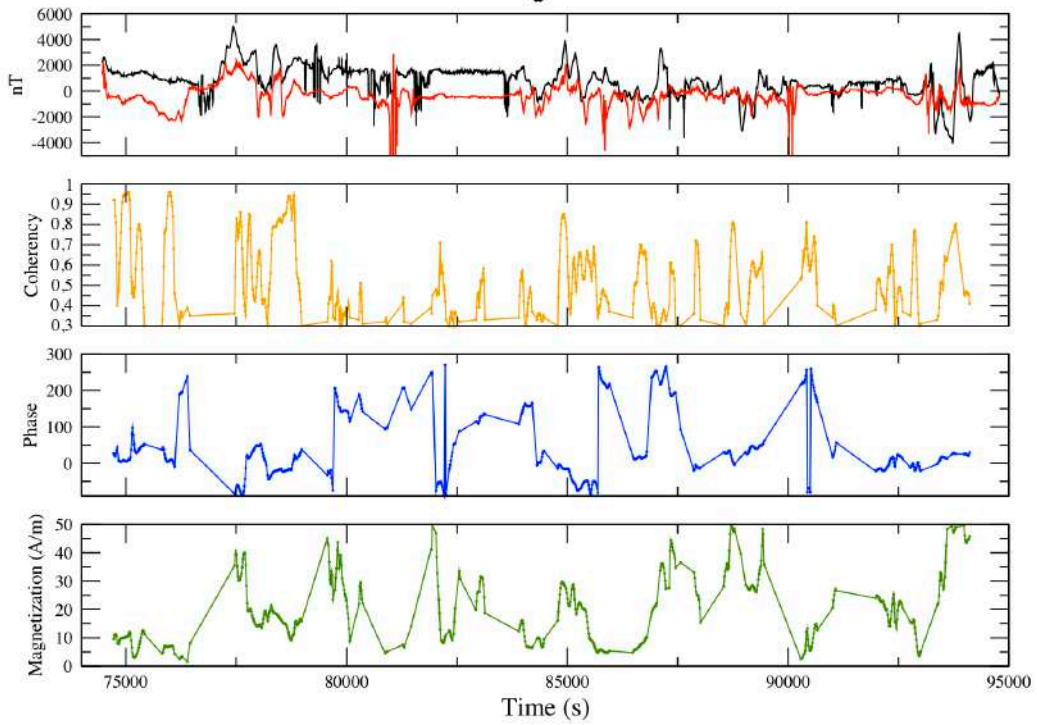
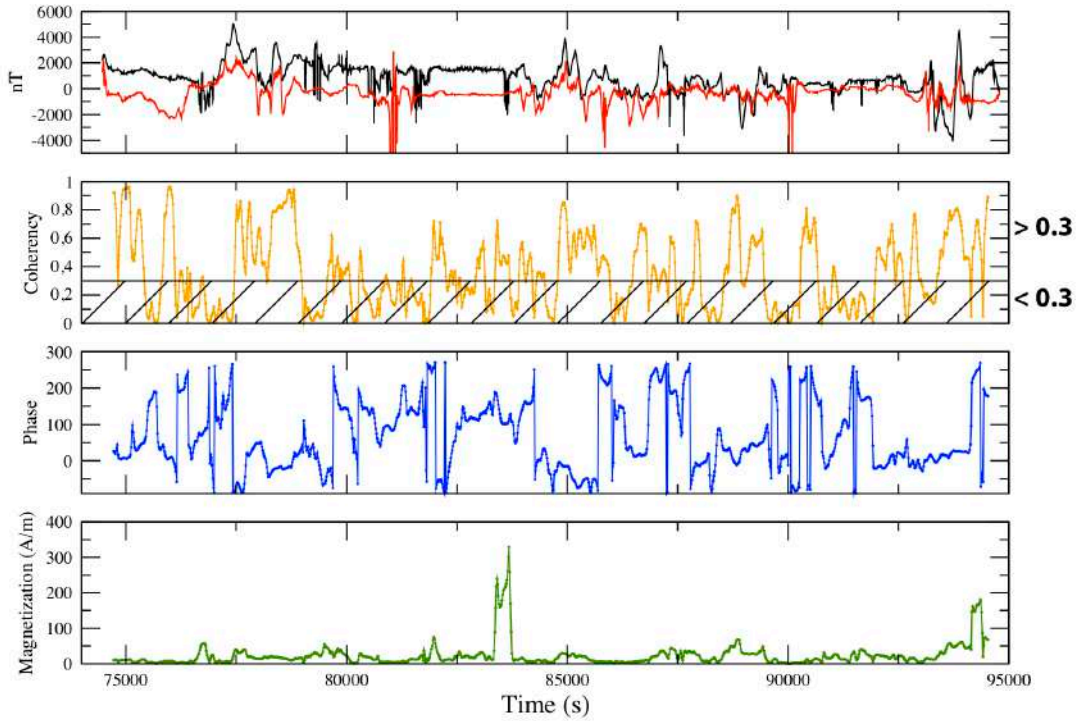
# Cruise Futuna 3

Nautile, Dive 13, Magnrtic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



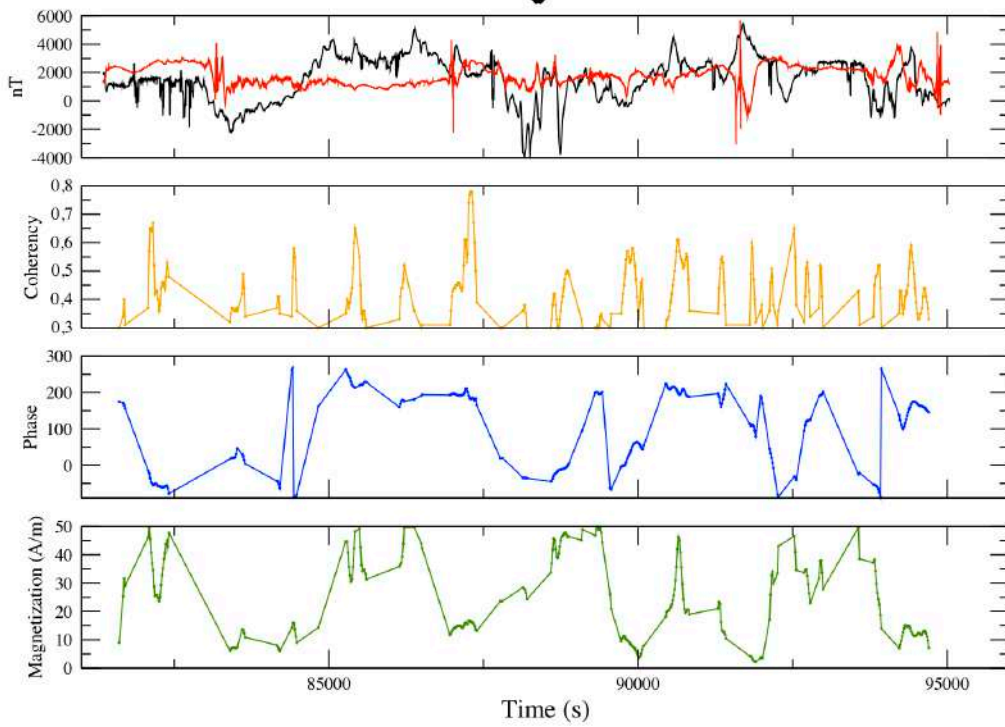
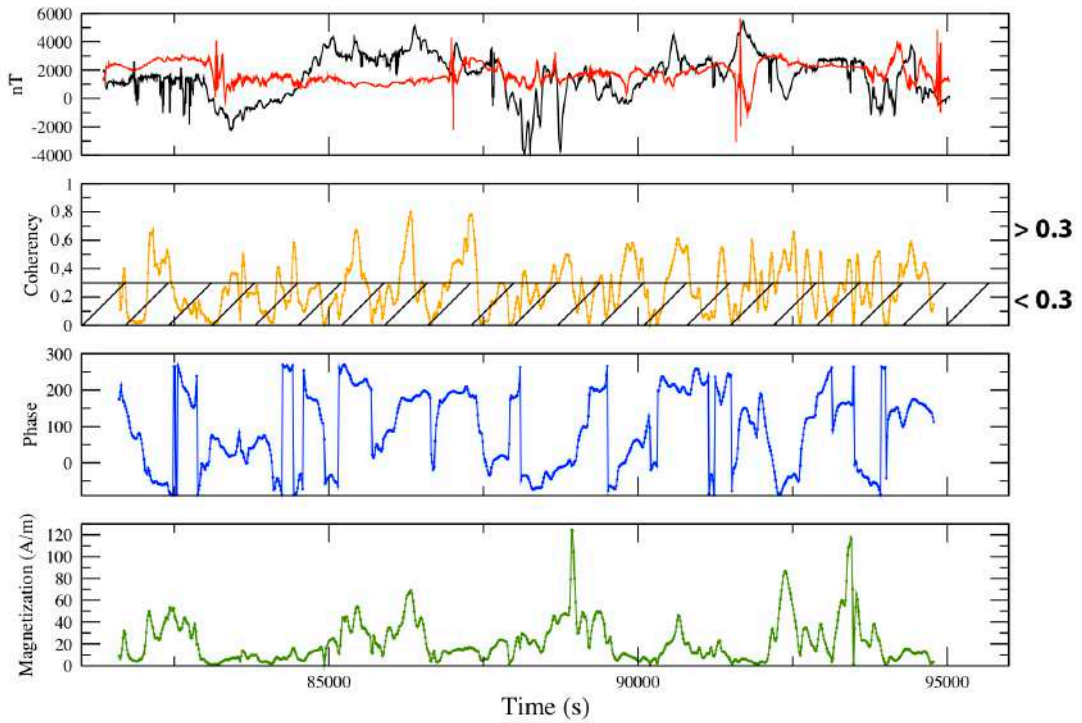
# Cruise Futuna 3

Nautile, Dive 14, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



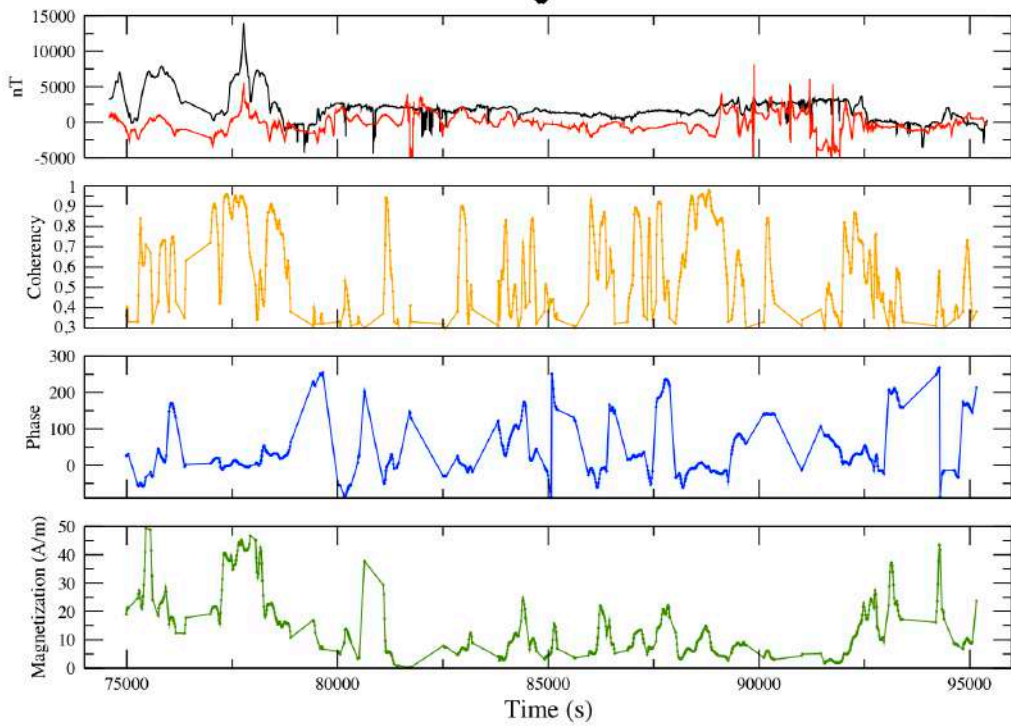
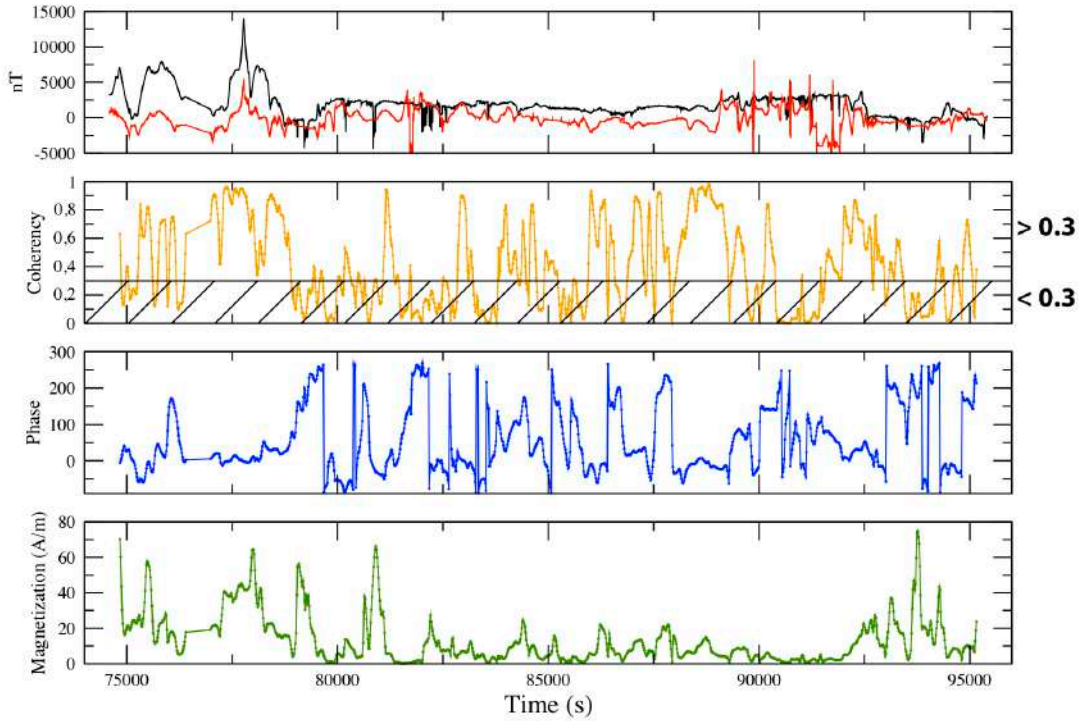
# Cruise Futuna 3

Nautile, Dive 15, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



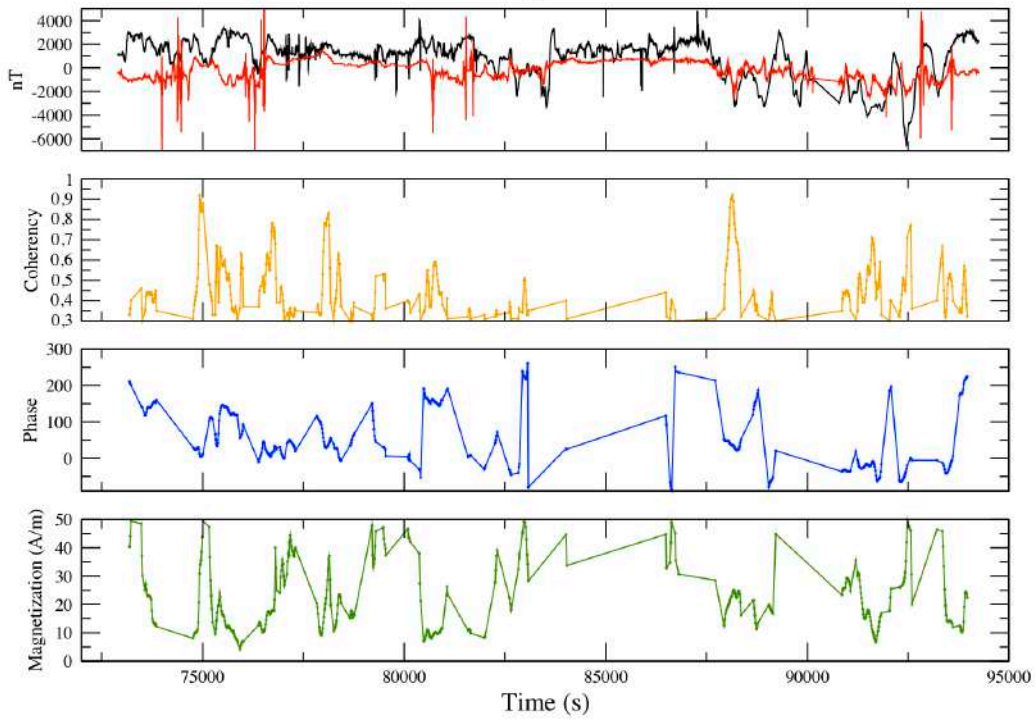
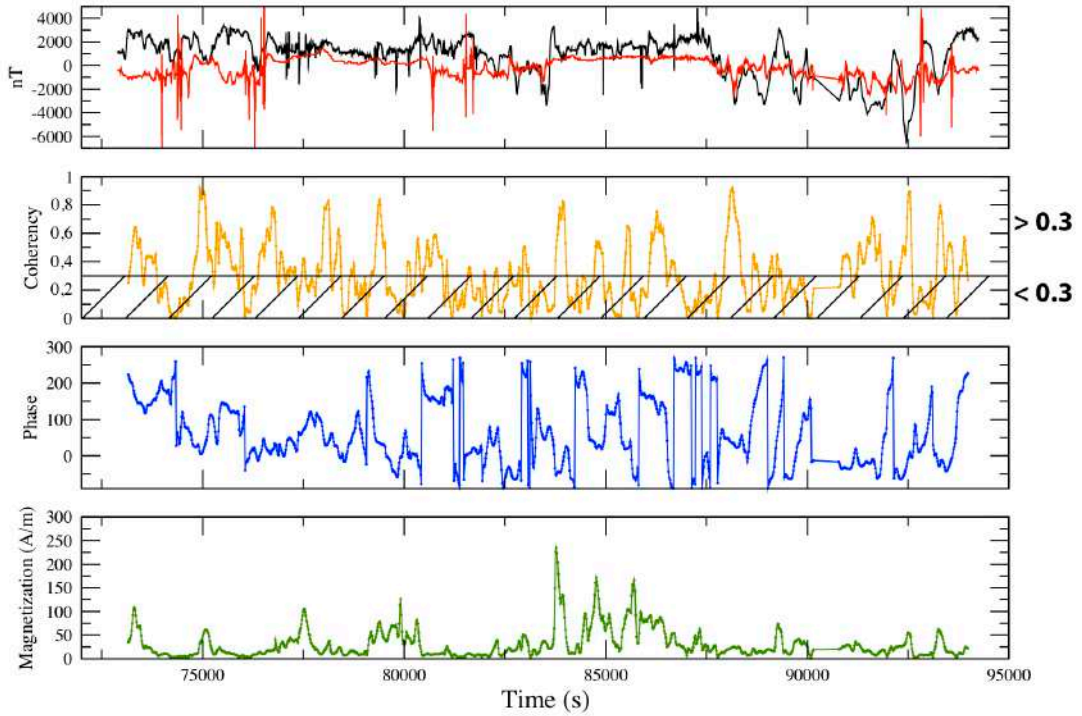
# Cruise Futuna 3

Nautile, Dive 16, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



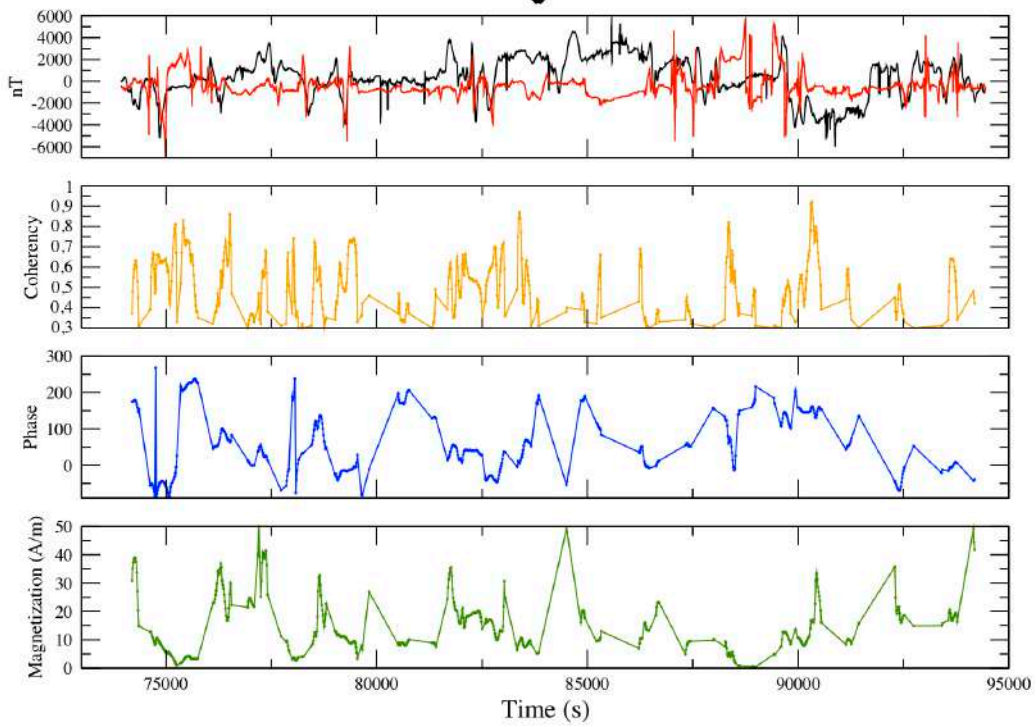
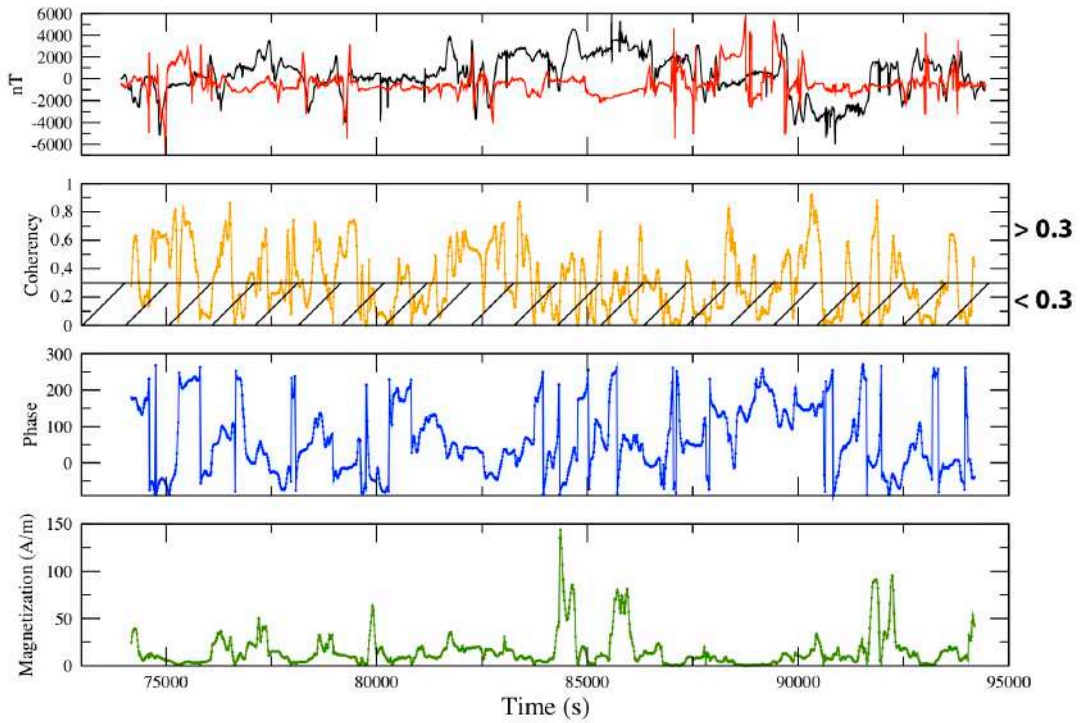
# Cruise Futuna 3

Nautile, Dive 17, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



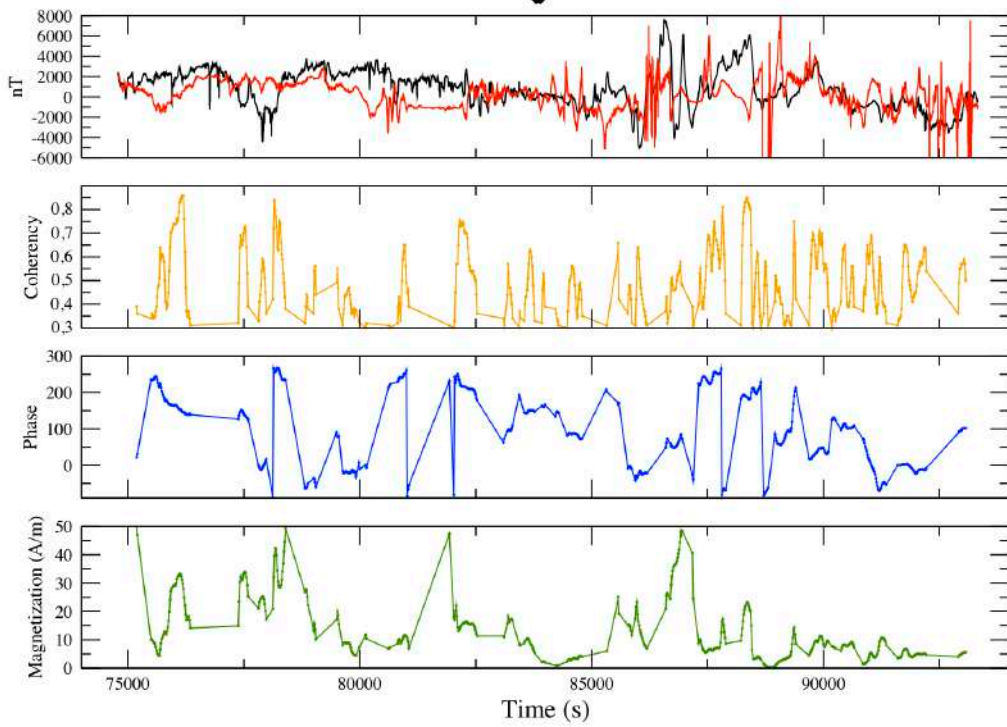
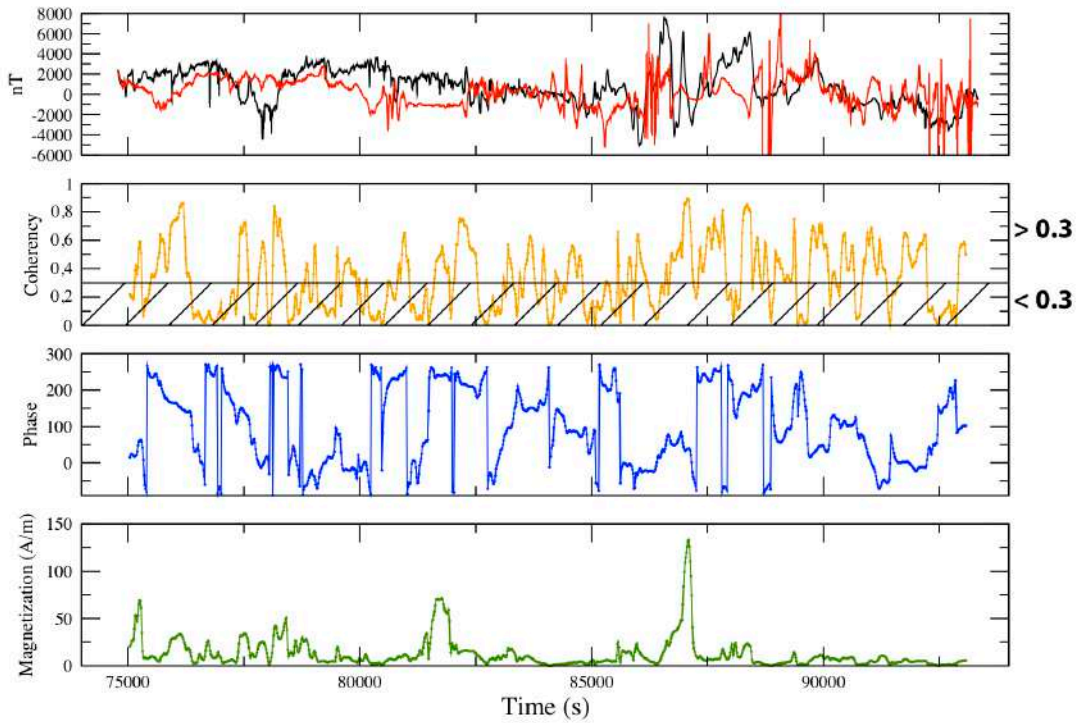
# Cruise Futuna 3

Nautile, Dive 18, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



# Cruise Futuna 3

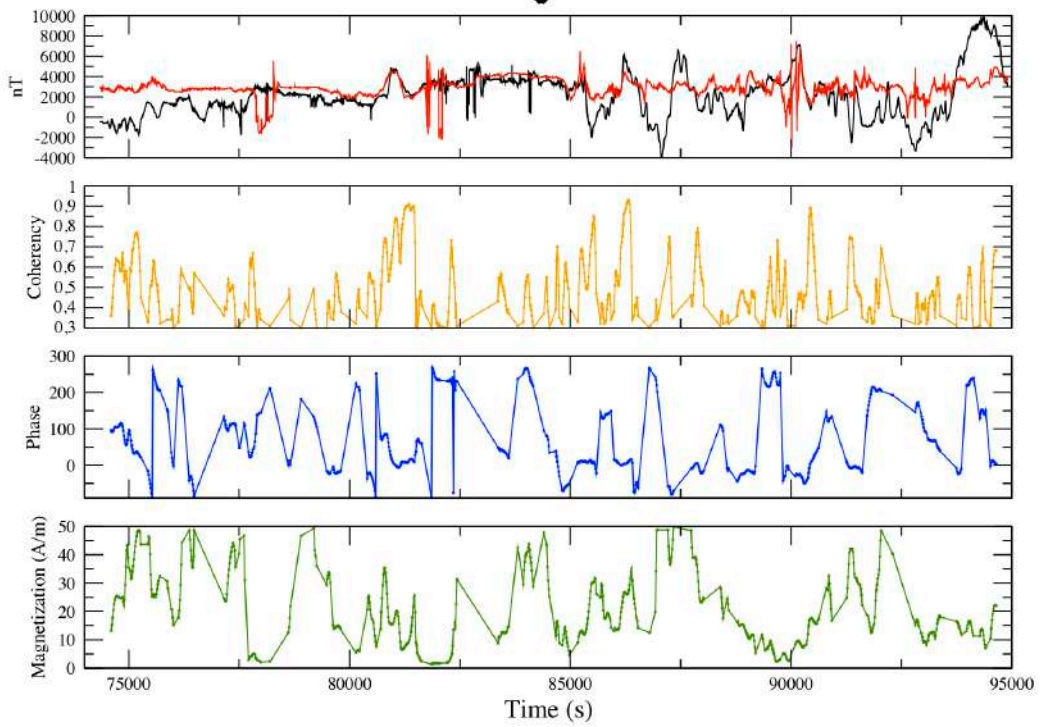
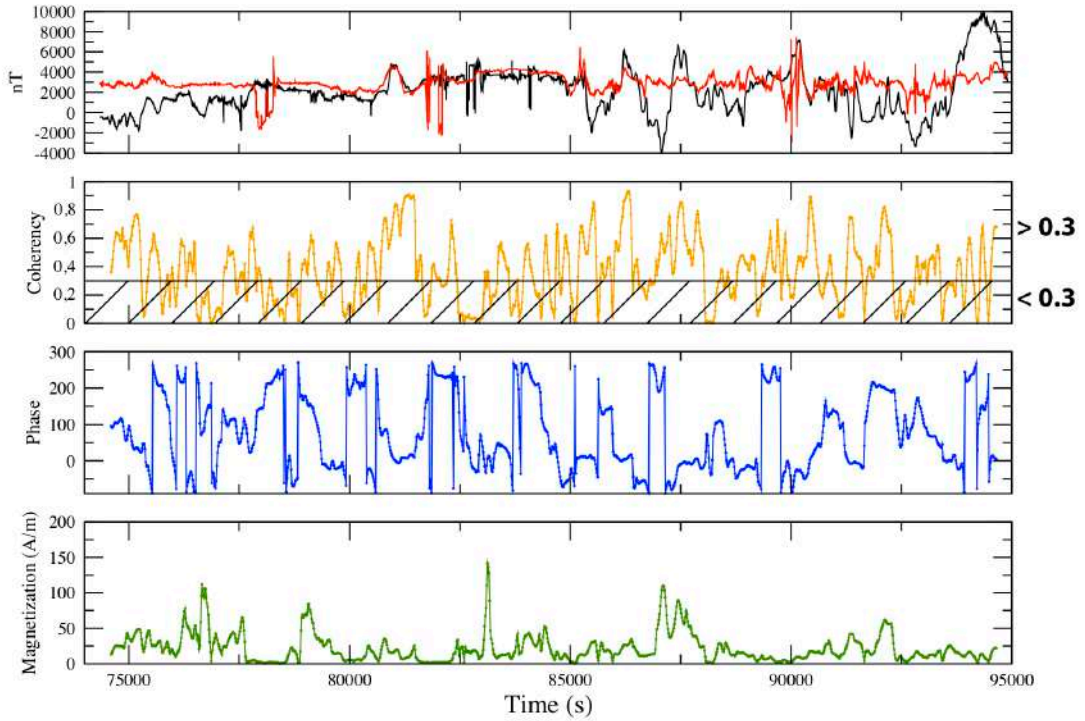
Nautile, Dive 19, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)





# Cruise Futuna 3

Nautile, Dive 20, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)



# Cruise Futuna 3

Nautile, Dive 21, Magnetic anomaly (black) & Synthetic signal (red)

