OSCAR-SWOT : Rapport Final

Traitement et analyse des données de la campagne OSCAR/BioSWOT en synergie avec SWOT (Tâche 1)

A l'attention de :

François BOY (CNES)
Gérald DIBARBOURE (CNES)
Nicolas PICOT (CNES)
François SOULAT (CLS)
Jean-François LEGEAIS (CLS)

	Fonction	Nom	Signature	Date
Préparé par	Chef de Projet/ Equipe	Eva Le MERLE Adrien MARTIN		01/12/23
Approuvé par	Directeur Général Adjoint	Mahmoud EL HAJJ		01/12/23

NOVELTIS

153 rue du Lac – 31670 Labège – France
Tél. : +33 (0)562 88 11 11 – Fax : +33 (0)562 88 11 12 – Courriel : noveltis@noveltis.fr

afaq ISO 9001 Qualité AFNOR CERTIFICATION

Liste de diffusion

INTERNE	**EXTERNE**	
Prénom NOM	**Prénom NOM**	**Société / Organisme**
Documentation NOVELTIS	François BOY	CNES
Richard BRU	Gérald DIBARBOURE	CNES
Equipe Projet	Nicolas PICOT	CNES
	François SOULAT	CLS
	Jean-François LEGEAIS	CLS

Etat du document

OSCAR-SWOT : Rapport Final Traitement et analyse des données de la campagne OSCAR/BioSWOT en synergie avec SWOT (Tâche 1)			
Edition	Révision	Date	Raison de la révision
1	0	01/12/2023	Version initiale

Suivi des modifications				
Ed.	Rév.	Etat *	Paragraphes modifiés	Description de la modification

* *I = Inséré* *S = Supprimé* *M = Modifié*

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

Acronymes

CFOSAT	China-France Oceanography SATellite
CSA	Canadian Space Agency
ESA	European Space Agency
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
IMU	Inertial Measurement Unit
KaRIn	Ka-band Radar Inteferometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ODYSEA	Ocean DYnamics and Surface Exchange with the Atmosphere
OSCAR	Ocean Surface Current Airborne Radar
RCM	Radar Constellation Mission
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLA	Sea Level Anomaly
SWOT	Surface Water Ocean Topography
UKSA	United Kingdom Space Agency

Documents applicables

N°	Référence	Titre
[DA1]	CLS-ENV-BC-23-0310	Marché spécifique entre CLS et NOVELTIS sous marché 221332 (SALP 2023-2024) sous accord-cadre CNES 14026

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

Sommaire

1. INTRODUCTION 6

2. LA CAMPAGNE DE MESURES 7

2.1. INFORMATIONS SUR LA CAMPAGNE 7
2.2. DONNÉES OSCAR 7
2.3. DONNÉES SWOT 10
2.4. AUTRES DONNÉES DISPONIBLES 11

3. ANALYSES DES DONNÉES SWOT, OSCAR ET SAR 13

3.1. COMPARAISONS INTER-INSTRUMENTALES 13
3.1.1. 5 mai 2023 13
3.1.2. 7 mai 2023 21
3.1.3. 8 mai 2023 24
3.2. CARACTÉRISTIQUES NON GÉOPHYSIQUES DANS LES DONNÉES OSCAR 29
3.2.1. Images OSCAR 29
3.2.2. Interférogrammes OSCAR 31

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 33

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

1. Introduction

Suite au lancement réussi de la mission SWOT en décembre 2022, l'observation de la dynamique océanique va connaître un essor sans précédent. En effet, grâce à cette mission, il sera à présent possible d'observer la dynamique océanique à une échelle de quelques dizaines de kilomètres avec une précision centimétrique. De plus, de récentes études ont montré l'importance des courants océaniques de surface à méso-échelle et sous-mésoéchelle sur les interactions océan-atmosphère, la dynamique océanique ainsi que les écosystèmes marins.

Au vu de l'importance de l'observation des courants océaniques de surface à méso-échelle et sous-mésoéchelle, des efforts sont déployés afin de développer des satellites capables de répondre à cette ambition. C'est notamment le cas de la mission SeaSTAR, candidate au programme ESA Earth Explorer 11 (phase 0), et de la mission ODYSEA, candidate au programme NASA Earth System Explorers.

Dans le but de démontrer la faisabilité de la mission SeaSTAR, l'instrument OSCAR a été développé et utilisé lors de campagne de mesures de mai 2022 en mer d'Iroise et de mai 2023 en mer Méditerranée. Grâce à l'instrument OSCAR, il est possible d'acquérir des images haute résolution des courants de surface et des vents au-dessus des régions à fortes activités méso/sous-mésoéchelle. La campagne de mesures en mer Méditerranée a eu lieu au même moment que la campagne in-situ BioSWOT, qui est l'un des projets « Adopt A Crossover » de la mission SWOT, et a ainsi permis d'avoir des mesures colocalisées dans le temps et l'espace entre SWOT et OSCAR. Dans le cadre de ces campagnes, de nombreuses images satellitaires ont aussi été collectées afin d'enrichir notre jeu de données et de comparer ces données aux données KaRIn et OSCAR.

C'est dans ce contexte que se place le projet OSCAR-SWOT.

Les objectifs du projet sont multiples :

- Valoriser les données SWOT avec un jeu de données conséquent et varié, dans une zone où la dynamique océanique à méso-échelle est importante.
- Réaliser des inter-comparaisons entre les différentes données SWOT, OSCAR et SAR afin de mieux comprendre le principe de mesure de l'instrument OSCAR. Cela contribue également à démontrer la faisabilité de la mission SeaSTAR pour imager les plus petites échelles.
- Mieux caractériser la surface océanique en utilisant les données OSCAR afin de produire un jeu de données de vérité terrain (« ground truth ») pour le concept de mission satellitaire ODYSEA.

Ce document décrit les résultats des comparaisons de données effectuées dans le cadre du projet OSCAR-SWOT, où les données SWOT ont été comparées aux données OSCAR ainsi qu'à d'autres données SAR.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

2. La campagne de mesures

2.1. Informations sur la campagne

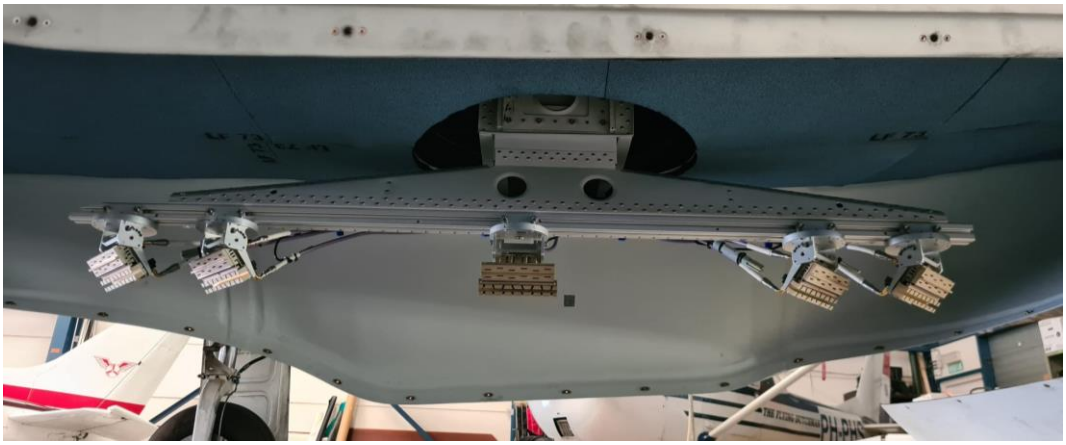
La campagne de mesures SEASTARex-SWOT-Med s'est déroulée entre le 5 et le 8 mai 2023, dans le secteur de Majorque/Minorque. Cette campagne de mesures s'inscrit dans le cadre de la validation de la phase Cal/Val de la mission SWOT puisqu'elle se déroule au même endroit et au même moment que la campagne en mer BioSWOT, qui est l'un des projets « Adopt A Crossover » de la mission SWOT (https://www.swot-adac.org/campaigns/bioswot-med/). Lors de la campagne BioSWOT, plusieurs mesures in-situ ont pu être effectuées sur une période allant du 20 avril au 15 mai 2023. Ces mesures in-situ, bien que différentes des mesures OSCAR et SWOT, constituent tout de même une source d'information supplémentaire et peuvent se révéler de précieux alliés afin de mieux caractériser les motifs observés avec SWOT et OSCAR. Ces données n'ont pas été utilisées dans le cadre de ce projet, mais elles pourront l'être si ce projet était poursuivi.

La zone étudiée située au Nord-Ouest de la mer Méditerranée est intéressante de par la présence de nombreuses structures mésoéchelles et sous-mésoéchelles qui varient significativement avec les saisons.

Les conditions météorologiques varient d'une journée à l'autre lors de la campagne SEASTARex-SWOT-Med, notamment avec un épisode de Tramontane le 8 mai au matin, qui a entraîné un mélange de la couche superficielle de l'océan et des conditions atmosphériques turbulentes. Les conditions météorologiques sont développées plus en détail dans les sections présentant les comparaisons de données, savoir : 3.1.1, 3.1.2 et 3.1.3.

2.2. Données OSCAR

L'instrument OSCAR est un radar à synthèse d'ouverture (SAR) en bande Ku, composé de 3 antennes nommées « Fore », « Mid » et « Aft » et monté à bord d'un avion (Figure 1). L'antenne Mid, aussi appelée « Zero-Doppler » vise à 90° sur la gauche par rapport à la direction de propagation de l'avion, tandis que les antennes Fore et Aft visent respectivement à 45° et 135° vers la gauche par rapport à cette même direction. Ces deux dernières antennes sont composées de deux canaux : Master (qui émet et reçoit le signal rétrodiffusé) et Slave (qui agit comme récepteur du signal rétrodiffusé) qui fonctionnent en polarisation verticale ('VV') et permettent de calculer le décalage de phase et donc l'interférogramme. L'instrument est monté sur un cardan à 3 axes (Figure 1 (haut)), équipé d'une unité de mesure inertielle (IMU) et d'un récepteur GNSS de haute précision pour stabiliser précisément l'orientation de l'instrument par rapport à l'aéronef et résoudre la géométrie d'orientation des faisceaux avec une grande précision. Le système SAR et le cardan sont installés dans un radôme spécialement conçu pour les fréquences en bande Ku et Ka, et ils sont montés sur une structure d'aéronef PA-31 Piper Navajo appartenant à Metasensing BV (Figure 1 (bas)).



© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.



Figure 1 : Photo de l'instrument OSCAR avec les 5 canaux qui forment ses 3 antennes (en haut). Photo de l'avion sur lequel est intégré OSCAR (en bas).

Lors de cette campagne, trois vols OSCAR ont été effectués sur trois jours : le 5, le 7 et le 8 mai 2023. Au cours de chacun de ces vols, 14 trajectoires ont été acquises dans des directions différentes formant une rose. De plus, une trace de calibration acquise sur Minorque a aussi été enregistrée. La Figure 2 montre une carte des acquisitions OSCAR pour le 7 mai 2023. Ce même schéma a été répété à l'identique durant les trois vols.

Dans un premier temps, les données de la trajectoire alignée avec la trace SWOT ainsi que celles de la trajectoire de calibration (toutes les deux apparaissant en rouge sur la Figure 2) ont été livrées en juin 2023 par MetaSensing. En raison d'un retard dans le traitement et la calibration des données, le reste des trajectoires a été livré le 6 octobre 2023.

Les acquisitions OSCAR ont été colocalisées dans le temps et l'espace avec SWOT. Toutefois, étant donné qu'un vol OSCAR dure en moyenne 4 h et le passage de SWOT quelques secondes, pour certaines trajectoires, il peut parfois y avoir 2 h d'écart entre l'acquisition des données SWOT et OSCAR.

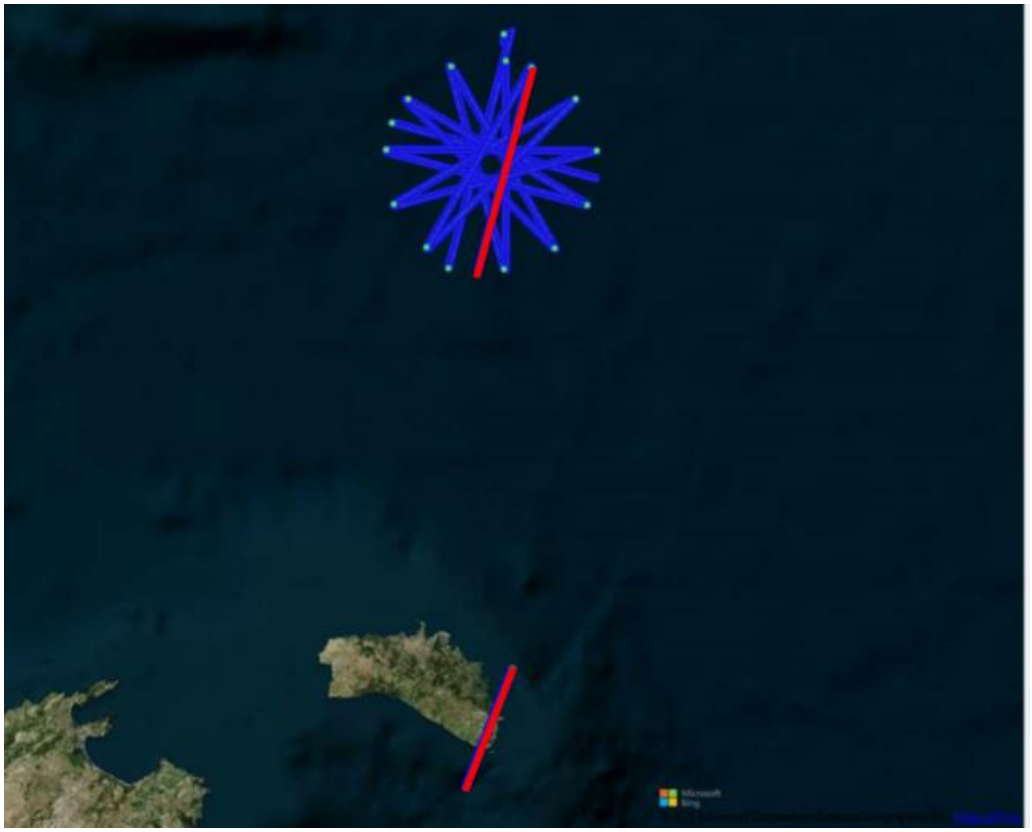


Figure 2 : Carte des trajectoires OSCAR acquises lors du vol du 7 mai 2023. Les trajectoires rouges ont été livrées au début du projet, et les trajectoires bleues le 6 octobre 2023.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

Les données OSCAR ont été analysées tout au long du projet. Cette analyse a permis de mettre en évidence certains motifs non géophysiques et de les corriger. L'analyse nous a aussi permis d'identifier des erreurs de calcul, notamment pour le calcul du σ_0 de l'antenne Zero-Doppler, qui avaient pour effet de rendre les images floues (Figure 3). La correction opérée a permis de rendre exploitables les images prises par l'antenne Zero-Doppler. Cette correction a aussi permis de corriger les faibles valeurs de σ_0, qui apparaissaient dans la direction along-track dans toutes les images prises par cette antenne (lignes noires présentes sur la Figure 3, à gauche).

D'autres motifs non géophysiques ont également été relevés et mentionnés auprès de MetaSensing, comme la chute de σ_0 qui apparaît au nord de la trace sur la Figure 3 et des problèmes résiduels dans la phase, qui sont, pour l'heure, en cours de résolution. Les sections 3.2 et 3.2.2 présentent de manière plus détaillée ces motifs non géophysiques.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

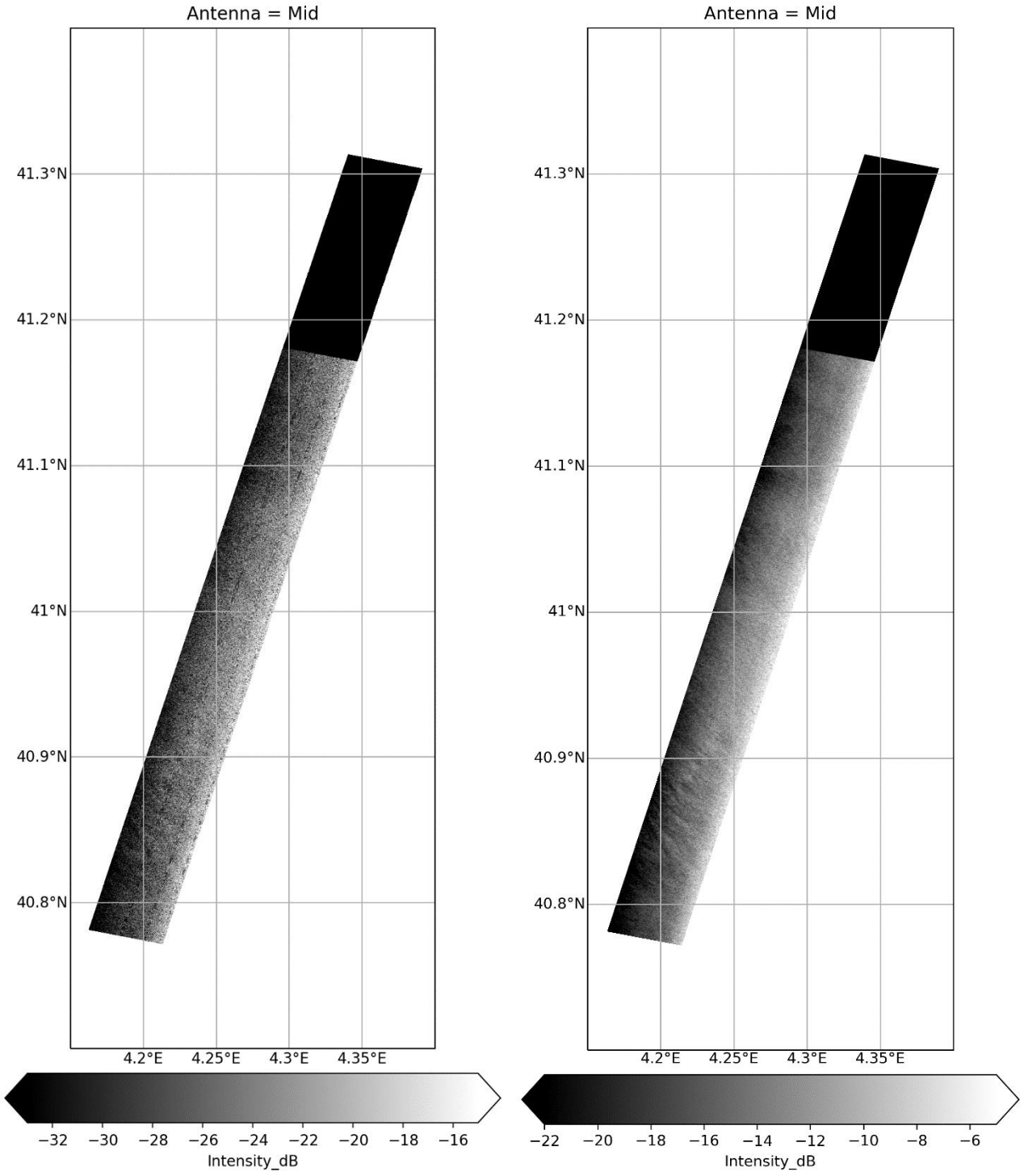


Figure 3 : Exemple d'une image de σ_0 acquise avec l'antenne Zero-Doppler avant (gauche) et après (droite) correction.

2.3. Données SWOT

Etant donné que l'objectif était de comparer les données KaRIn aux données OSCAR, qui sont des images à haute résolution de la surface océanique, les produits KaRIn LR 250 m de l'orbite #3 ont été utilisés sur la période de Cal/Val. De plus afin de voir si de plus petites structures sont visibles avec les données KaRIn, les tuiles HR acquises au nord de Minorque ont aussi été fournies par le CNES, début octobre 2023.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

2.4. Autres données disponibles

Grâce aux campagnes de mesure BioSWOT et SEASTARex-SWOT-Med, de nombreuses images SAR ont pu être récupérées. Maximiser et diversifier le jeu de données d'observation étaient essentiels pour mieux comprendre et interpréter les données KaRIn et OSCAR.

Ces images SAR ont été acquises grâce au programme Third-Party Mission de l'ESA et au soutien des agences spatiales du Royaume Uni (UKSA) et du Canada (CSA). Les données RCM ont, quant à elles, été acquises grâce à Mohammed Dabboor (CSA), et l'acquisition des données NovaSAR-1 a été financée par l'UKSA. Pour ces deux missions, de nombreuses images ont été acquises sous la trace SWOT-1 jour numéro 3 jusqu'en juillet 2023, avec des acquisitions RCM quasi-quotidiennes. Les données PAZ, TerraSAR-X et Cosmo-SkyMed ont, par ailleurs, été acquises grâce au programme Third-Party Mission de l'ESA, pour lequel nous avions soumis une proposition en support de la campagne aéroportée, avec 10 acquisitions par plateforme satellitaire. Après acceptation de la proposition Third-Party Mission, les demandes de programmation des acquisitions ont été effectuées indépendamment pour chaque système, ce qui a pris un certain temps. Le téléchargement des données acquises a également demandé un effort supplémentaire assez important. Toutes les données, à l'exception de RCM, ont été téléchargées sur nos serveurs courant août 2023, puis regardées avec les « quicklooks ». Les données RCM n'ont, quant à elles, été disponibles que fin septembre, à la suite de difficultés rencontrées lors du téléchargement. Enfin, les images Sentinel-1 disponibles sur la période mai - juillet 2023 ont également été téléchargées.

En tout, plus de cinquante images SAR ont été obtenues dans la zone de l'orbite #3 SWOT 1-jour au nord de Minorque entre mai et juillet 2023, ce qui représente un jeu de données conséquent. La table 1 montre un catalogue créé pour le mois de mai répertoriant les conditions météorologiques ainsi que les dates et heures d'acquisition des données satellites. Les passages des altimètres tels que Sentinel-3, Sentinel-6, AlTiKa, Jason3 et CFOSAT ont aussi été répertoriés. Les lignes en vert représentent les jours durant lesquels l'instrument OSCAR a fait des acquisitions. Les horaires des altimètres affichés en gras indiquent que la trace altimètre suit parfaitement la trace SWOT. L'évolution de la SSH peut ainsi être comparée entre SWOT et l'altimètre, et ce, bien que l'échantillonnage ne soit pas le même entre les deux instruments.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

Tableau 1 : Catalogue de recensement des conditions météorologiques et des données SAR et altimétriques pour tout le mois de mai 2023 sous l'orbite SWOT #3.

	Mean environmental cond. at SWOT acquisition time							SAR Satellites + UTC time + subswath SWOT (West, Nadir, East)														Other satellites						Altim					
Date	SWOT (UTC)	WSpd (m/s)	Wdir (°)	SWH (m)	Wave Dir	Max current (m/s)	Cloud conditions	NovaSAR		RCM	S1		PAZ		COSMO-SkyMed		R2		TerraSAR-X			S2		S3		S3	S6	Cryosat-2	Saral-Altika	Jason 3	CFOSAT
01/05/2023	19:02	7,6	256	1,28	258	0,60	Cloudy			17:28 (2)	05:45	W, N, E												9:30-10:30	W, N, E	18:37				11:58	
02/05/2023	18:52	5,1	261	1,31	235	0,65	Haze			17:36 05:44 (2-2)												10:36	Wp	9:30-10:30	W, N, E						
03/05/2023	18:43	2,8	199	0,64	129	0,70	Clear			17:44 05:51 (2-2)														9:30-10:30	W, N, E	21:13					
04/05/2023	18:34	2,3	163	0,36	110	0,74	Clear			17:21 05: 59 (1-2)												10:25	W, N, E	9:30-10:30	W, N, E						
05/05/2023	18:24	3,8	167	0,30	159	0,77	Mixed			17:28 (2)														9:30-10:30	W, N, E				05:00		
06/05/2023	18:15	3,9	110	0,54	128	0,78	Mixed			17:37 05:43 (2-2)	05:53	W, Np												9:30-10:30	W, N, E					15:00	
07/05/2023	18:05	5,6	2	0,74	110	0,96	Cloudy			17:45 05:51 (2-2)	17:38	W, N, E	5:54	Wp, N, E								10:36	Wp	9:30-10:30	W, N, E	21:10					06:50
08/05/2023	17:56	10,0	354	1,08	241	1,01	Mixed			05:59 (4)														9:30-10:30	W, N, E						
09/05/2023	17:47	5,0	252	0,65	290	0,88	Cloudy			17:29 (2)												10:26	W, N, E	9:30-10:30	W, N, E		08:00				
10/05/2023	17:37	8,3	231	1,87	233	0,85	Cloudy			17:37 05:43 (2-2)							17:30	Ep						9:30-10:30	W, N, E	**10:10**					
11/05/2023	17:28	4,9	206	1,34	242	0,77	Cloudy			17:45 05:51 (2-2)							5:43	Np	17:24	W, N, E				9:30-10:30	W, N, E					06:00	
12/05/2023	17:18	3,9	167	0,92	220	0,70	Cloudy	09:45	Wp, N, E													10:36	Wp	9:30-10:30	W, N, E			07:30			
13/05/2023	17:09	5,7	192	0,83	189	0,64	Cloudy	09:51	Wp	17:28 (2)	05:45	W, N, E	5:45	N, E										9:30-10:30	W, N, E	10:06			**18:00**		
14/05/2023	17:00	6,1	288	0,80	267	0,66	Mixed			17:36 05:44 (2-2)					17:28	W, N, E						10:25	W, N, E	9:30-10:30	W, N, E		16:00	07:30			
15/05/2023	16:50	10,1	297	1,78	304	0,59	Haze			17:44 05:51 (2-2)			17:24	W, N, E										9:30-10:30	W, N, E						
16/05/2023	16:41	10,4	264	2,27	303	0,53	Mixed																	9:30-10:30	W, N, E					15:00	
17/05/2023	16:32	8,0	209	1,85	234	0,62	Mixed								17:34	W, N, E	17:26	Ep				10:36	Wp	9:30-10:30	W, N, E						
18/05/2023	16:22	8,3	123	1,09	215	0,63	Cloudy				05:53	W, N					5:39	Ep						9:30-10:30	W, N, E			**19:30**			
19/05/2023	16:13	9,2	83	1,15	157	0,58	Cloudy				17:38	W, N, E										10:25	W, N, E	9:30-10:30	W, N, E		06:00				
20/05/2023	16:03	9,1	212	1,53	101	0,57	Cloudy																	9:30-10:30	W, N, E	21:12					
21/05/2023	15:54	6,6	162	1,11	100	0,65	Cloudy	22:19	Wp, N, E															9:30-10:30	W, N, E		15:00			03:00	
22/05/2023	15:45	5,0	109	0,58	69	0,62	Cloudy								17:28	W, N, E			17:24	W, N, E		10:36	Wp	9:30-10:30	W, N, E						
23/05/2023	15:35	4,2	121	0,69	92	0,58	Mixed																	9:30-10:30	W, N, E						
24/05/2023	15:26	2,5	166	0,61	125	0,68	Mixed						5:45	N, E			17:22	Ep				10:25	W, N, E	9:30-10:30	W, N, E						
25/05/2023	15:16	3,5	80	0,48	118	0,80	Cloudy	09:24-22:42	Np, E / W, N		05:45	W, N, E			17:34	W, N, E								9:30-10:30	W, N, E						
26/05/2023	15:07	3,0	183	0,39	131	0,67	Mixed		Wp				17:24	Wp, N, E										9:30-10:30	W, N, E					15:00	
27/05/2023	14:58	2,7	140	0,36	153	0,56	Mixed															10:36	Wp	9:30-10:30	W, N, E	**10:13**					
28/05/2023	14:48	3,1	234	0,34	215	0,57	Cloudy																	9:30-10:30	W, N, E						
29/05/2023	14:39	2,3	163	0,33	216	0,54	Cloudy	09:47	Wp, Np, Ep													10:25	W, N, E	9:30-10:30	W, N, E		04:00		**18:00**		
30/05/2023	14:30	3,1	220	0,35	174	0,63	Cloudy	09:53	Wp		05:53	W, N												9:30-10:30	W, N, E	21:14					
31/05/2023	14:20	2,7	126	0,43	157	0,65	Mixed				17:38	W, N, E							5:45	W, N, E				9:30-10:30	W, N, E					03:00	17:47

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

3. Analyses des données SWOT, OSCAR et SAR

3.1. Comparaisons inter-instrumentales

Cette section présente les résultats des comparaisons effectuées pour les 3 jours de la campagne SEASTARex-SWOT-Med. Dans un premier temps, les premières comparaisons ont été réalisées de manière qualitative, puis des premiers outils ont commencé à être développés afin de procéder à des comparaisons plus quantitatives.

3.1.1. 5 mai 2023

La journée du 5 mai est caractérisée par des conditions météorologiques stables et relativement calmes selon ERA5, avec un vent du Sud de 4 m/s à 10 m.

L'instrument OSCAR a volé entre 15 et 19 h et a effectué un plan de vol sous forme de rose tel que présenté sur la Figure 2. La Figure 4 montre les images d'anomalies de σ_0 acquises par OSCAR pour les trois antennes. Sur les trois figures, des motifs géophysiques, probablement de nature océanique, apparaissent au milieu de la rose, et ce, pour les 3 antennes. De plus, on observe aussi une continuité de ces motifs d'une trajectoire à l'autre. Le fait que ces motifs apparaissent sur les images des 3 antennes et soient continus entre les trajectoires confirme leur nature géophysique.

La Figure 5 montre les images d'anomalies de σ_0 et de phase pour une trajectoire OSCAR. La comparaison des deux images indique que la structure au sud de la trajectoire est visible dans les anomalies de σ_0 et dans la phase. Ce n'est pas le cas de toutes les trajectoires à cause du bruit présent à grande incidence.

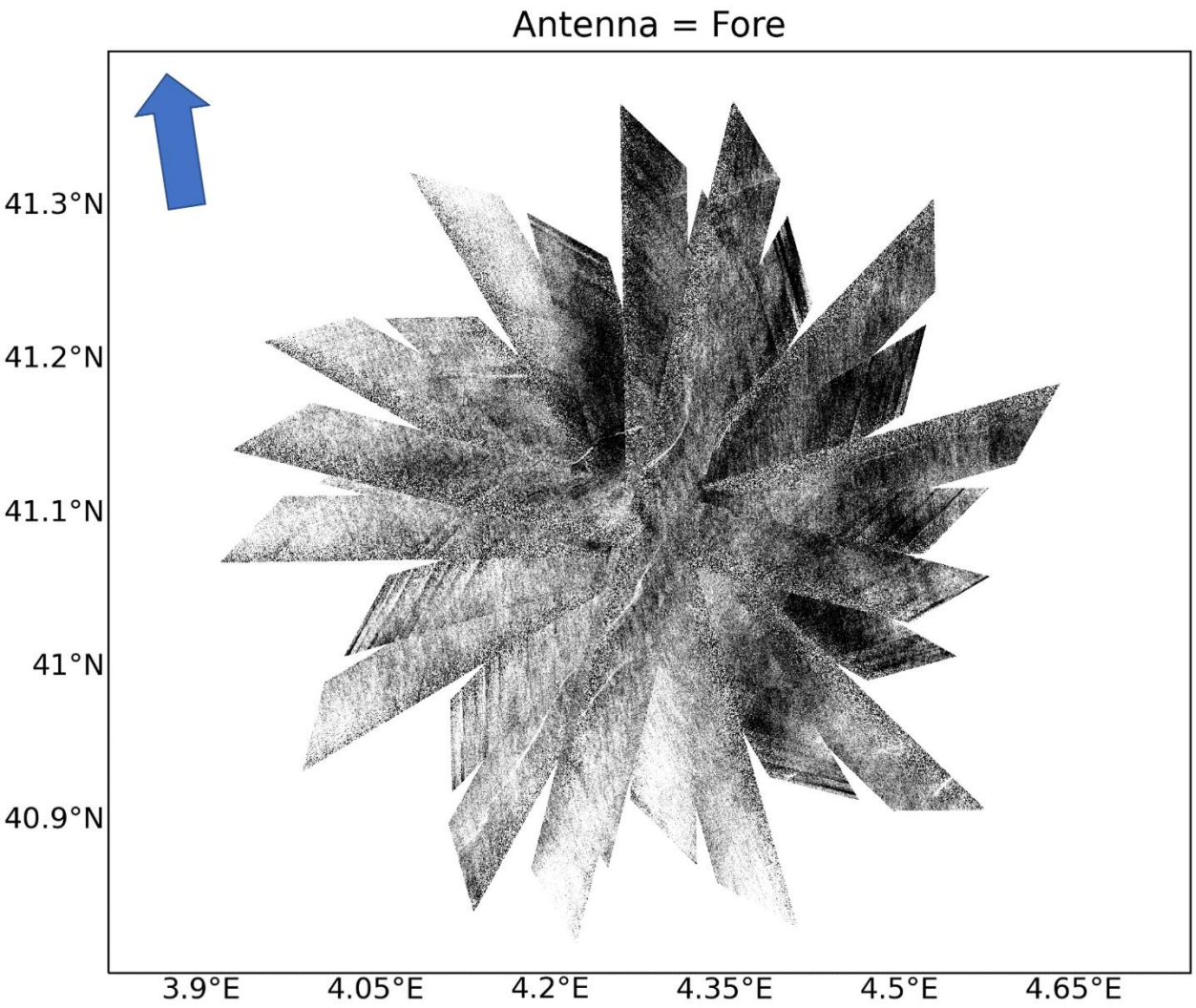
Dans l'après-midi du 5 mai 2023, les données SWOT, OSCAR et RCM ont été acquises à trois heures d'intervalle : SWOT vers 18h30, RCM à 17h28, et OSCAR à 15h30 pour la trajectoire 1 et 15h40 pour la trajectoire 2. Cette succession de mesures permet leur comparaison en supposant que la surface océanique n'a pas trop évolué du fait des conditions météorologiques relativement calmes et stables.

La comparaison des données OSCAR, KaRIn et SWOT est présentée sur la Figure 6. Les flèches rouges indiquent des motifs communs visibles sur les trois images, bien qu'ils soient moins visibles avec les données SWOT et RCM, probablement du fait des résolutions de KaRIn et de RCM plus basses que celle d'OSCAR (250 m, 30 m et 8 m respectivement).

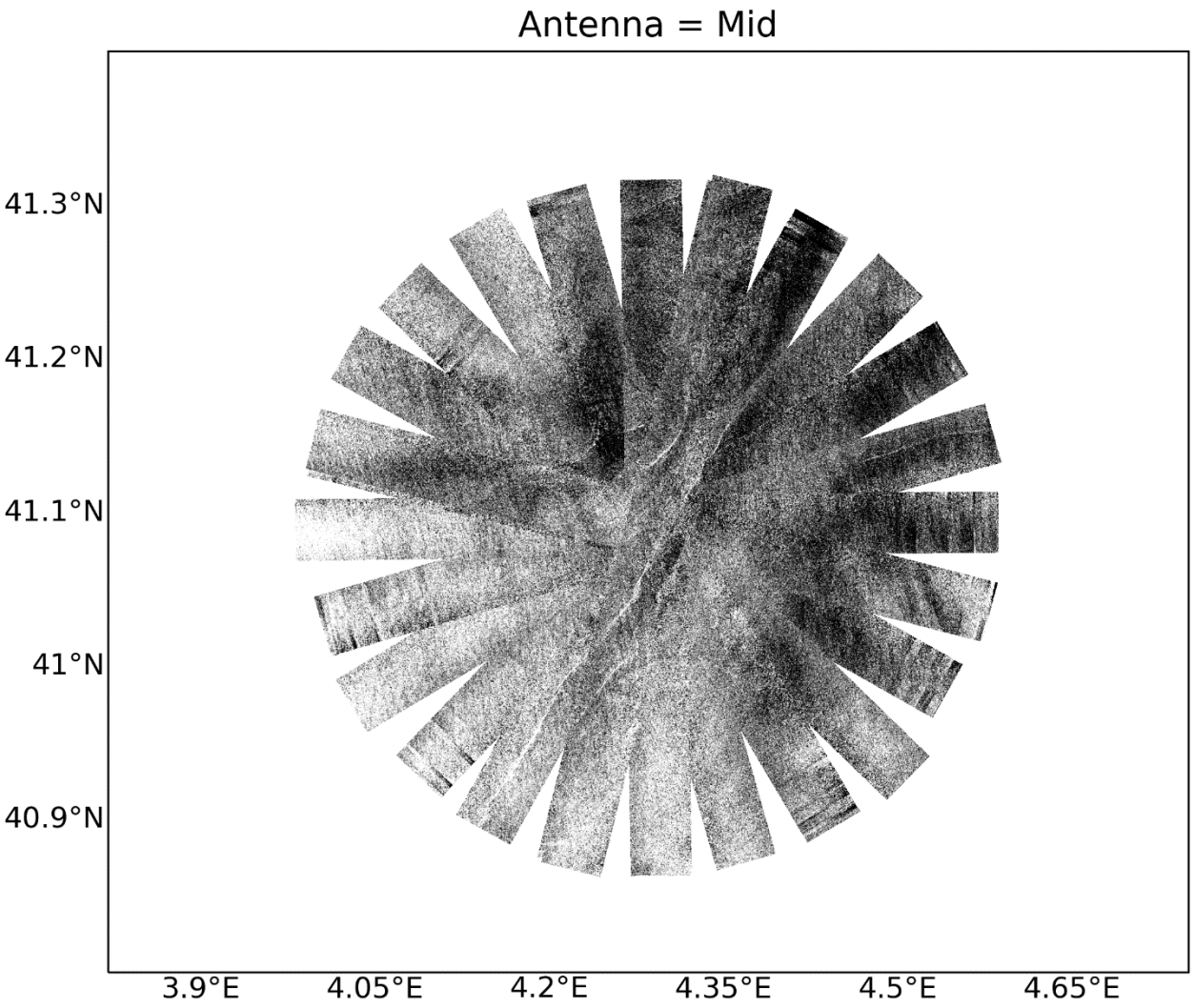
La Figure 7 montre une superposition des anomalies de σ_0 d'OSCAR sur une image KaRIn. Cette superposition permet de montrer une continuité entre les deux images des motifs observés et mentionnés précédemment, le plus flagrant se trouvant au nord de l'image OSCAR.

L'analyse des données de la journée du 5 mai 2023 a permis de montrer qu'OSCAR était capable de mesurer des motifs géophysiques à petite échelle et que ces mêmes motifs étaient aussi distinguables dans les données SWOT. L'observation RCM a, par ailleurs, permis de confirmer l'existence de ces motifs et leur nature géophysique.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.



© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.



© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

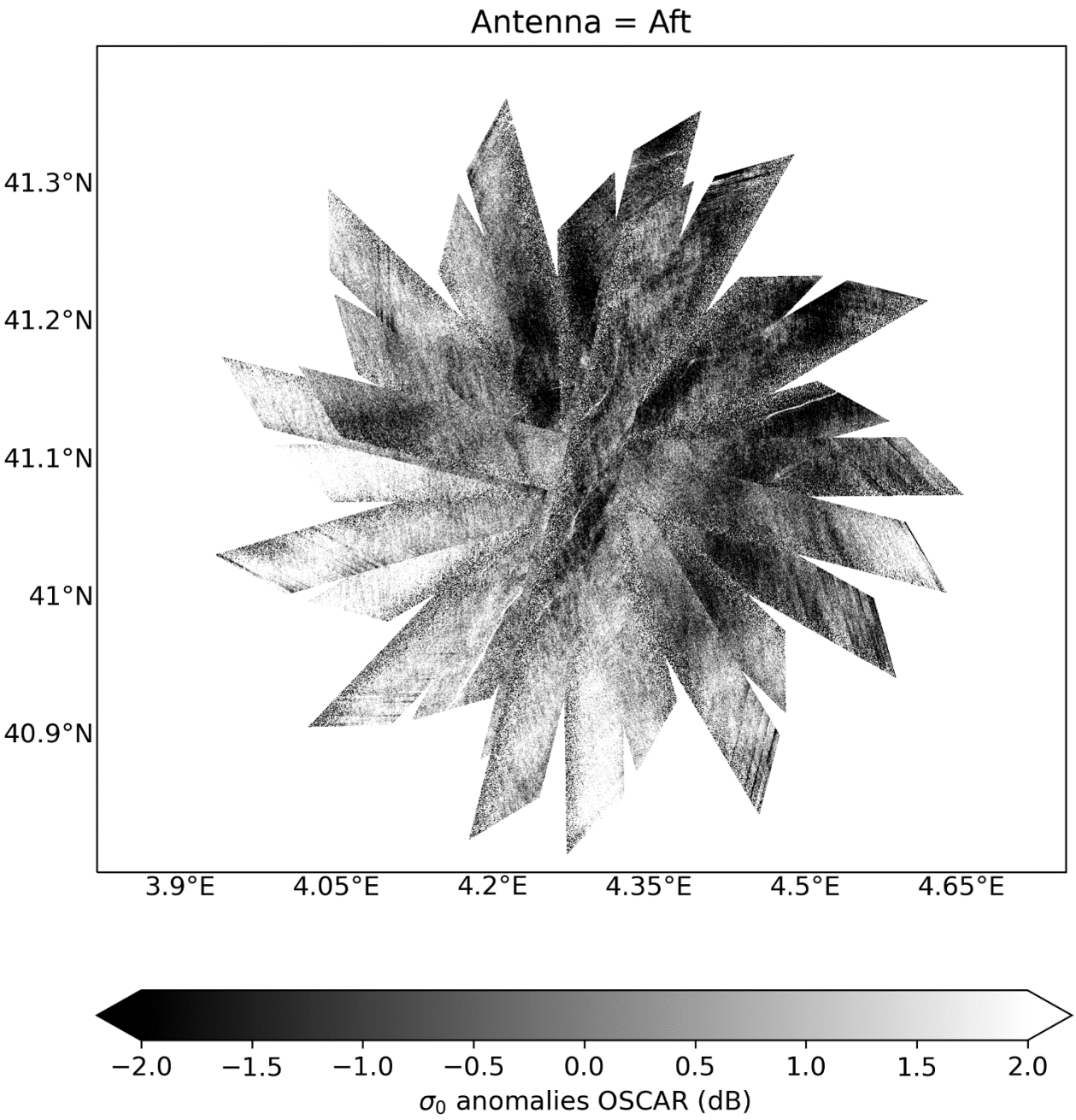


Figure 4 : Assemblage des 14 trajectoires effectuées par OSCAR pour les antennes Fore (en haut), Mid (au milieu) et Aft (en bas) lors de la journée du 5 mai 2023. La flèche bleue représente la direction du vent.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

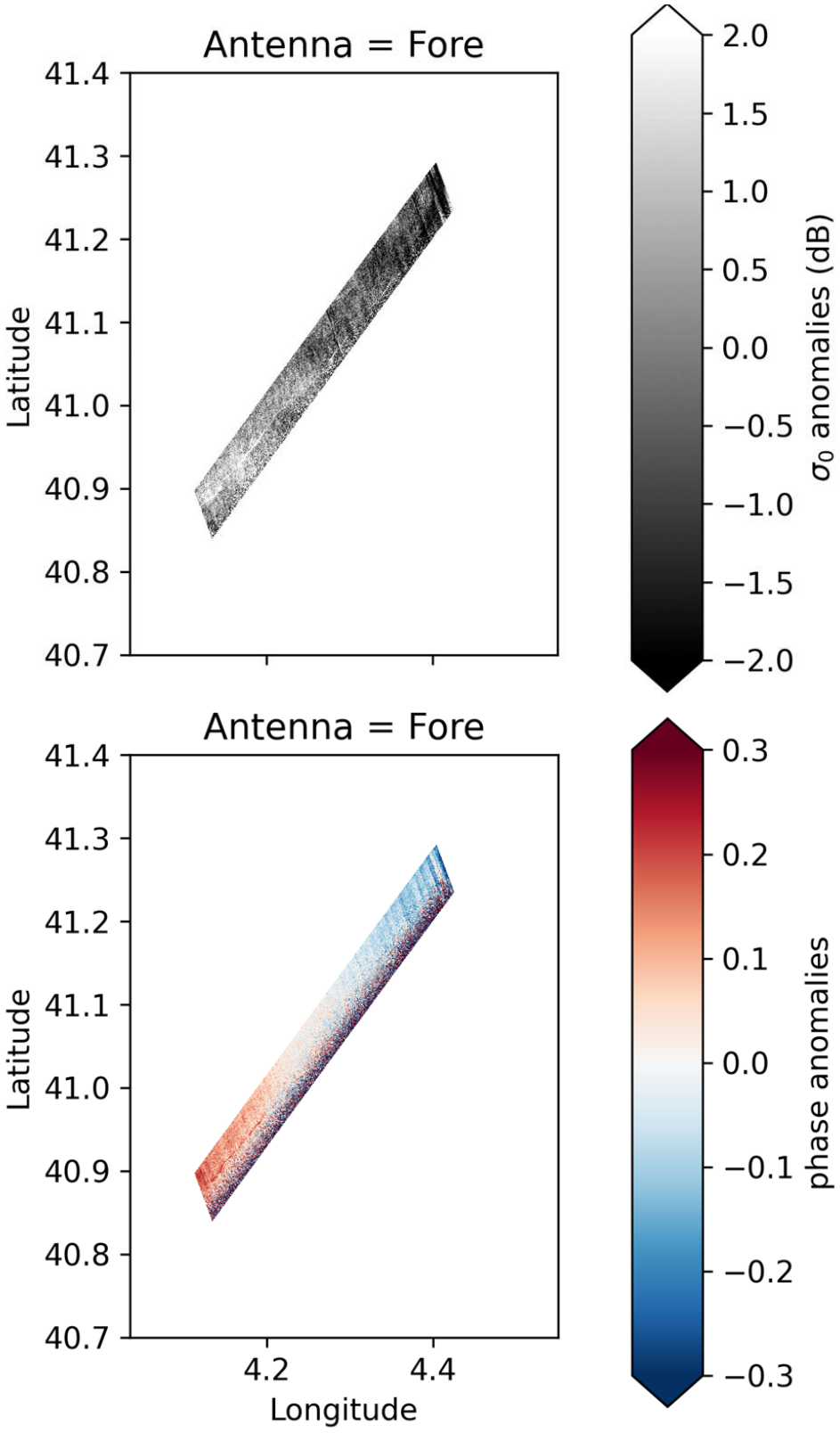
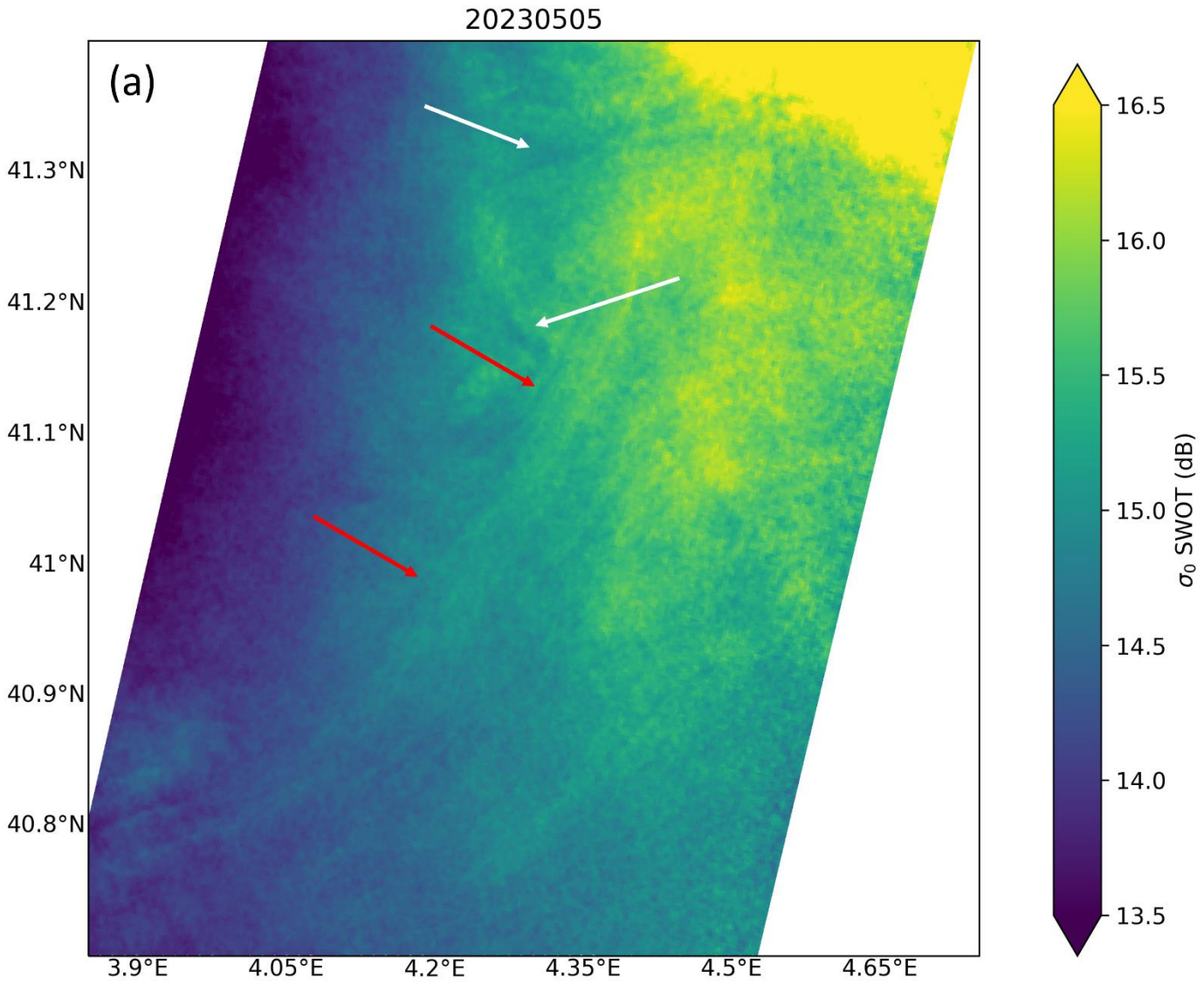
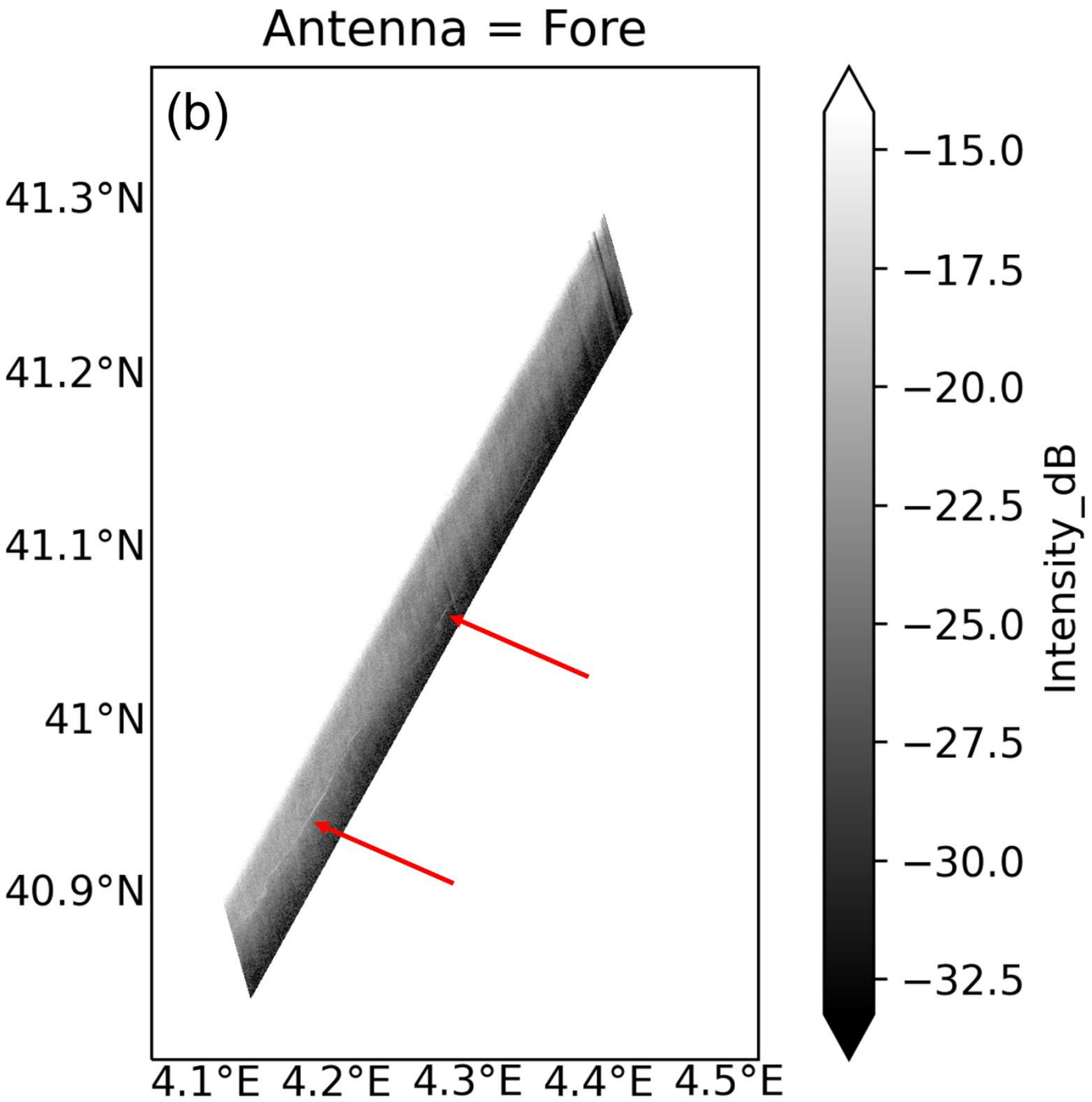


Figure 5 : Anomalies de σ_0 (à gauche) et de phase (à droite) pour la trajectoire #2 acquise par OSCAR le 5 mai 2023.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.



© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.



© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

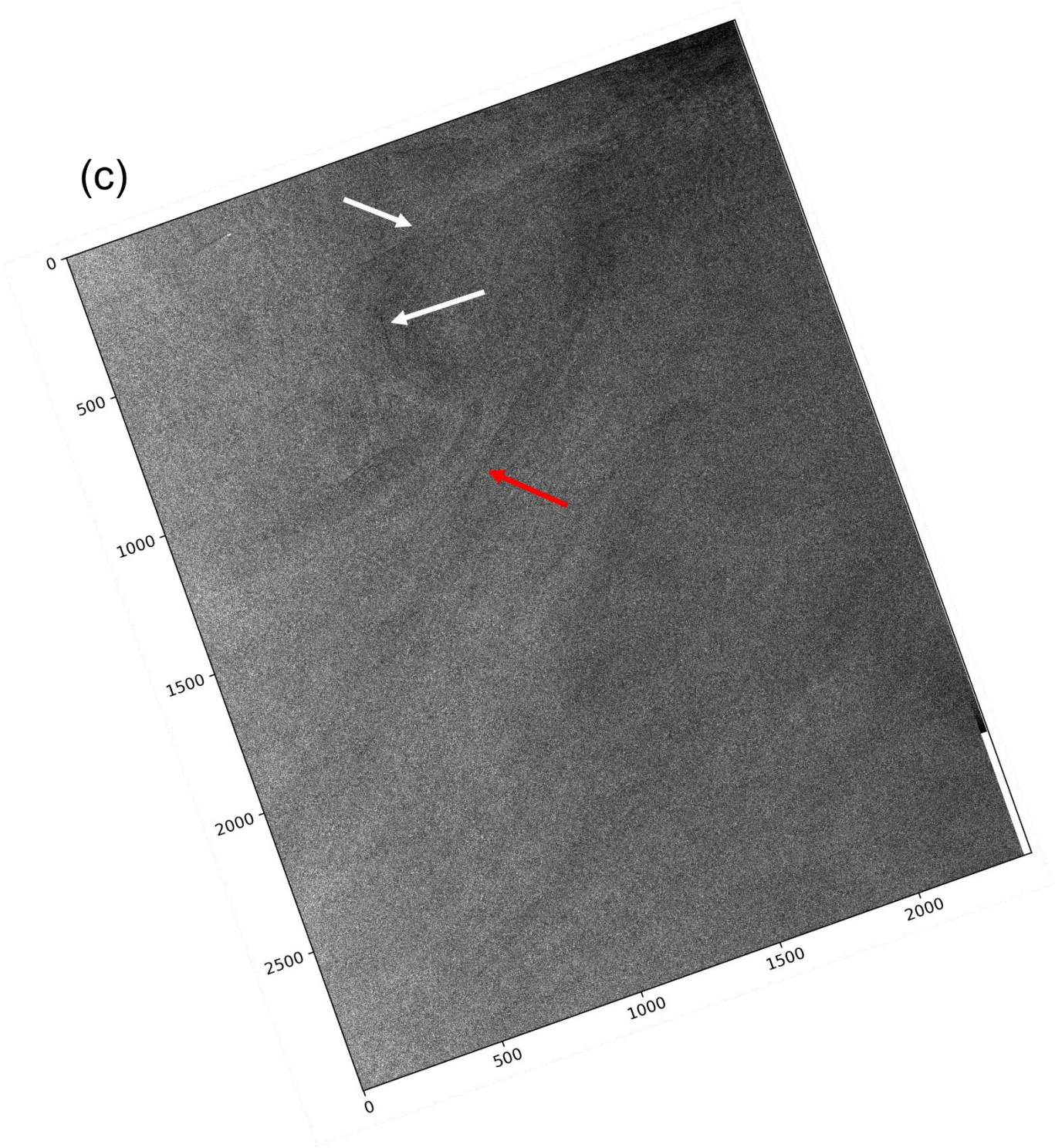


Figure 6 : (a) σ_0 des produits KaRIn 250 m, (b) σ_0 d'OSCAR et (c) « quickview » RCM le 5 mai 2023. Les flèches rouges indiquent un filament océanique visible sur les trois images et les flèches blanches indiquent des motifs communs à SWOT et RCM.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

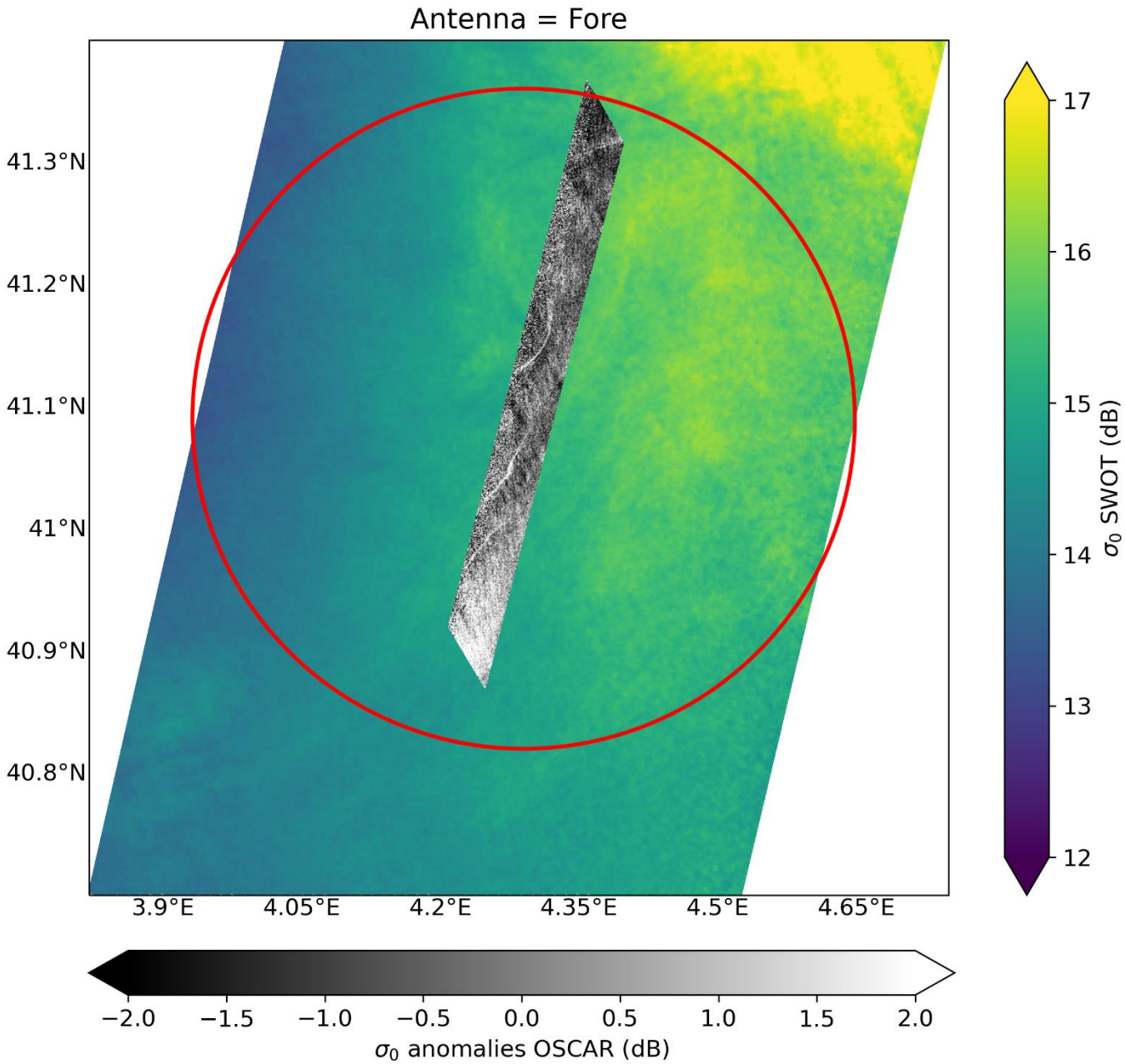


Figure 7 : Superposition du σ_0 SWOT et des anomalies de σ_0 OSCAR le 5 mai 2023. Le cercle rouge correspond à la zone où les trajectoires OSCAR qui forment la rose ont été acquises.

3.1.2. 7 mai 2023

Au cours du vol OSCAR de la journée du 7 mai, la vitesse du vent à 10 m était d'environ 6 m/s orienté Nord-Sud selon le modèle global ECMWF. Au cours de cette journée, SWOT a été colocalisé dans le temps et l'espace avec plusieurs satellites SAR tels que Sentinel-1 et RCM.

La Figure 8-a montre les images d'anomalies de σ_0 et de phase, acquises avec les 3 antennes OSCAR pour la trace #1. La visualisation des anomalies de σ_0 des données OSCAR montre la présence de motifs atmosphériques tels que des stries de vents de petite échelle et des ondulations atmosphériques de plus grandes échelles. La direction de propagation de ces stries de vents est Ouest-Est alors que celle des ondulations plus large échelle est alignée avec la direction de propagation du vent. Les variations des anomalies de phase semblent concorder avec les ondulations atmosphériques grandes échelles. Les Figure 8-b et Figure 8-c montrent respectivement les images Sentinel-1 et KaRIn de la même zone.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

Les stries de vents sont visibles sur Sentinel-1 et sur SWOT, alors que les ondulations atmosphériques larges échelles ne sont visibles que sur l'image KaRIn.

En prenant un peu de hauteur, les données KaRIn présentent aussi des caractéristiques communes avec les images Sentinel-1 et RCM (Figure 9). Ces motifs, repérés par les flèches et les cercles bleus sur la Figure 9, sont liés à des variations brutales de vents. La comparaison des différentes images montre aussi que certains motifs présents dans les images KaRIn (dans le cercle rouge et à l'est de l'île de Minorque) ne sont pas visibles dans les images Sentinel-1 et RCM. Cela s'explique probablement par l'angle d'incidence de KaRIn qui est plus faible que celui de Sentinel-1 et de RCM. Ainsi, KaRIn est capable d'apporter une information supplémentaire par rapport aux SAR conventionnels, dont l'angle d'incidence d'observation est plus élevé.

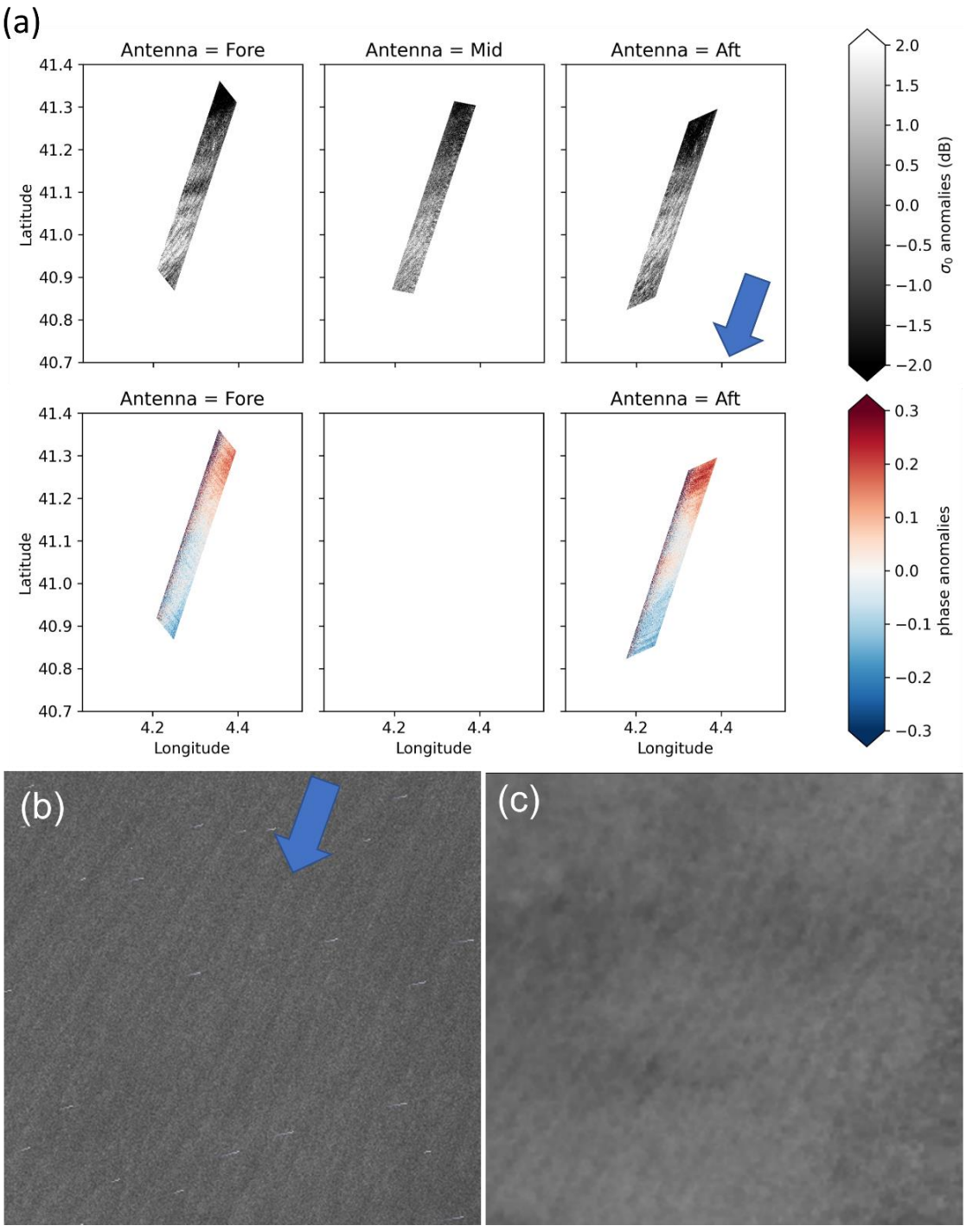


Figure 8 : (a) Anomalies de σ_0 (en haut) et de phase (en bas) pour les trois antennes lors de la journée du 7 mai 2023 pour la trace #1. (b) Image Sentinel-1 et (c) image SWOT de la même zone.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

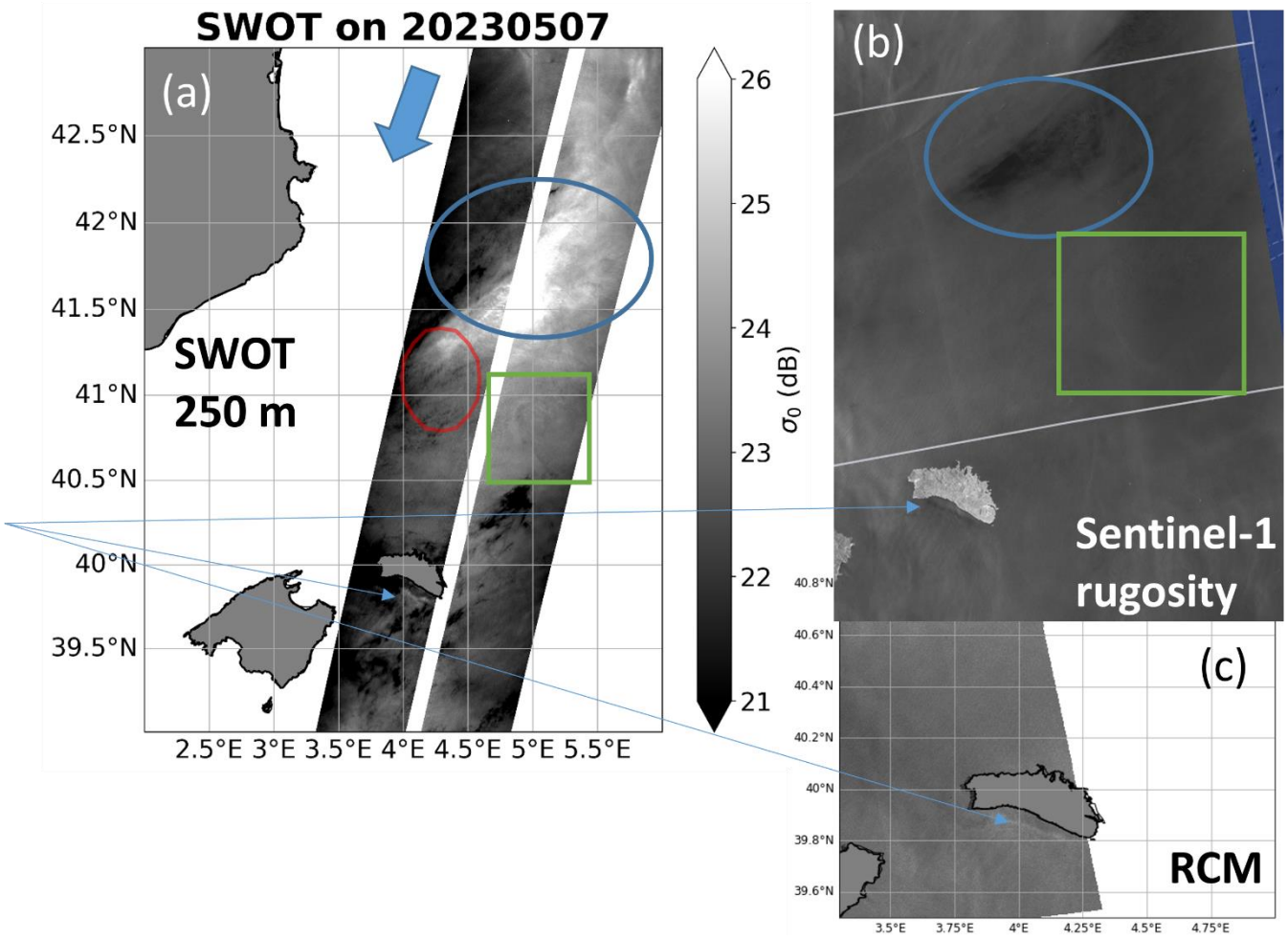


Figure 9 : Images SWOT (a), Sentinel-1 (b) et RCM (c) acquises lors de la journée du 7 mai 2023. Les flèches et cercles bleus ainsi que les carrés verts montrent des motifs communs aux différentes images. Le cercle rouge indique l'endroit où ont été effectuées les trajectoires OSCAR.

Additionnellement à tous ces motifs de nature atmosphérique, un phénomène océanique est aussi visible sur les images KaRIn et Sentinel-1. Il s'agit d'un tourbillon repéré dans le carré vert sur la Figure 9. Nous pouvons affirmer qu'il s'agit d'un tourbillon car l'analyse visuelle du courant géostrophique issu de Globcurrent CMEMS indique que celui-ci tourne autour de la structure. Ce tourbillon est également visible dans l'anomalie de hauteur de mer (SLA) calculée dans les produits KaRIn à 2 km, comme indiqué sur la Figure 10.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

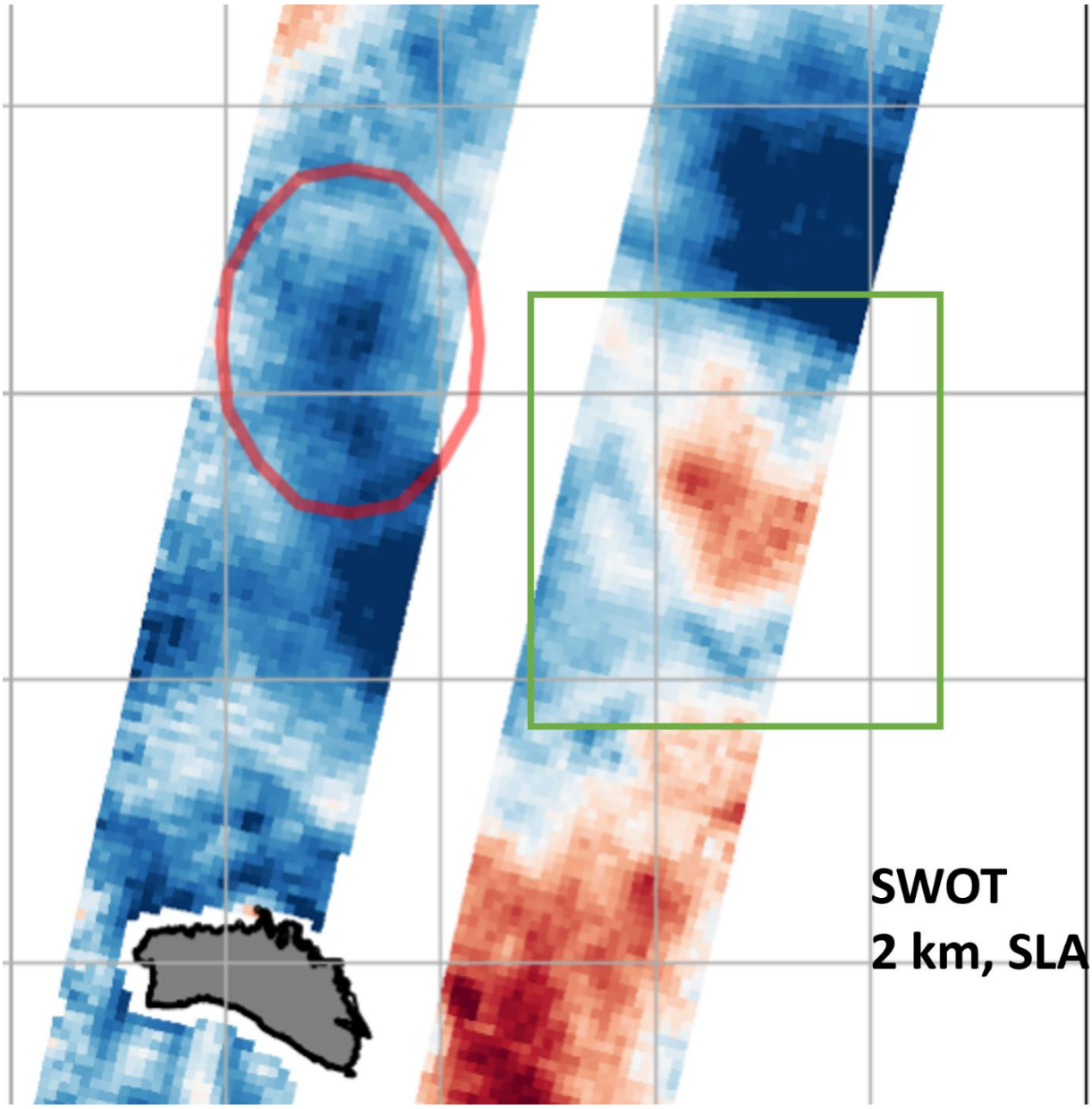


Figure 10 : Anomalies de hauteur de mer (SLA) issues de KaRIn le 7 mai 2023. Résolution des produits de 2 km. Le carré vert indique un gradient de l'anomalie à l'endroit même où se trouve un tourbillon. Le cercle rouge indique l'endroit où ont été effectuées les trajectoires OSCAR.

3.1.3. 8 mai 2023

La nuit du 7 au 8 mai 2023 a été marquée par un épisode de Tramontane qui a entraîné un mélange de la couche superficielle de la mer Méditerranée. Au moment du vol, le vent à 10 m souffle à 10 m/s en provenance du Nord. Il s'agit de la journée de campagne avec le vent le plus fort. La hauteur significative des vagues est impactée par cet épisode et ce vent puisqu'elle est d'environ 1 m selon les réanalyses ERA5.

La Figure 11 montre un exemple d'images d'anomalies de σ_0 et de phase, acquises avec les 3 antennes OSCAR pour la trace #4. Comme la journée du 7 mai 2023, la visualisation des anomalies de σ_0 des données OSCAR montre la présence de motifs atmosphériques tels que des stries de vents de petite échelle et des ondulations atmosphériques de plus grandes échelles. Les variations des anomalies de phase semblent concorder avec les ondulations atmosphériques grandes échelles.

La Figure 12 montre les images d'anomalies de σ_0 obtenues avec l'antenne Fore. Comme pour la journée du 7, des stries de vent sont visibles à l'ouest des trajectoires et des ondulations atmosphériques à plus grandes échelles apparaissent à l'est de la rose. Nous pouvons voir une continuité de ces ondulations au fil des trajectoires. Grâce au développement d'outils de calcul, une future analyse pourrait consister à calculer la vitesse de propagation de ces ondulations en

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

mesurant le déplacement effectué par ces ondes d'une trajectoire à l'autre. Ceci est illustré sur la Figure 13, qui montre l'évolution de la médiane across-track des anomalies de σ_0 en fonction de la latitude. Chaque courbe correspond à une trajectoire, et sur chacune de ces courbes, des pics similaires apparaissent. Deux de ces ondulations sont repérées sur la Figure 13 par des traits pleins ou des tiretés verticaux. Il est possible de déterminer leur vitesse en calculant la distance entre les pics de ces ondulations (représentée par les doubles flèches noires sur la Figure 13). Comme mentionné précédemment, pour obtenir des estimations avec une précision optimale, il est nécessaire de développer des algorithmes qui permettraient d'abord de détecter les pics de ces ondulations de manière précise, puis de calculer la distance effective qui les séparent.

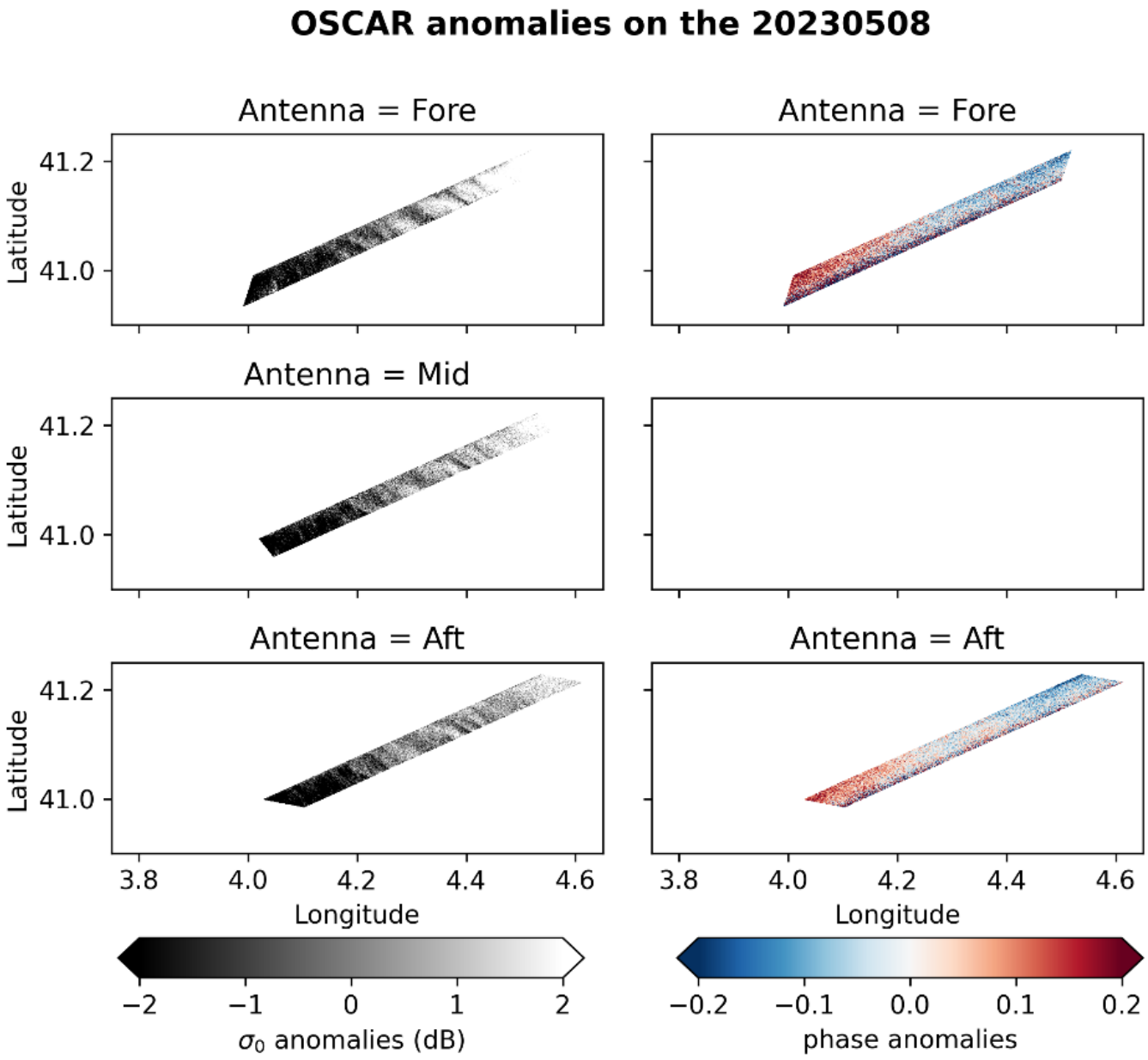


Figure 11 : Anomalies de σ_0 (en haut) et de phase (en bas) pour les trois antennes lors de la journée du 8 mai 2023 pour la trace #4.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

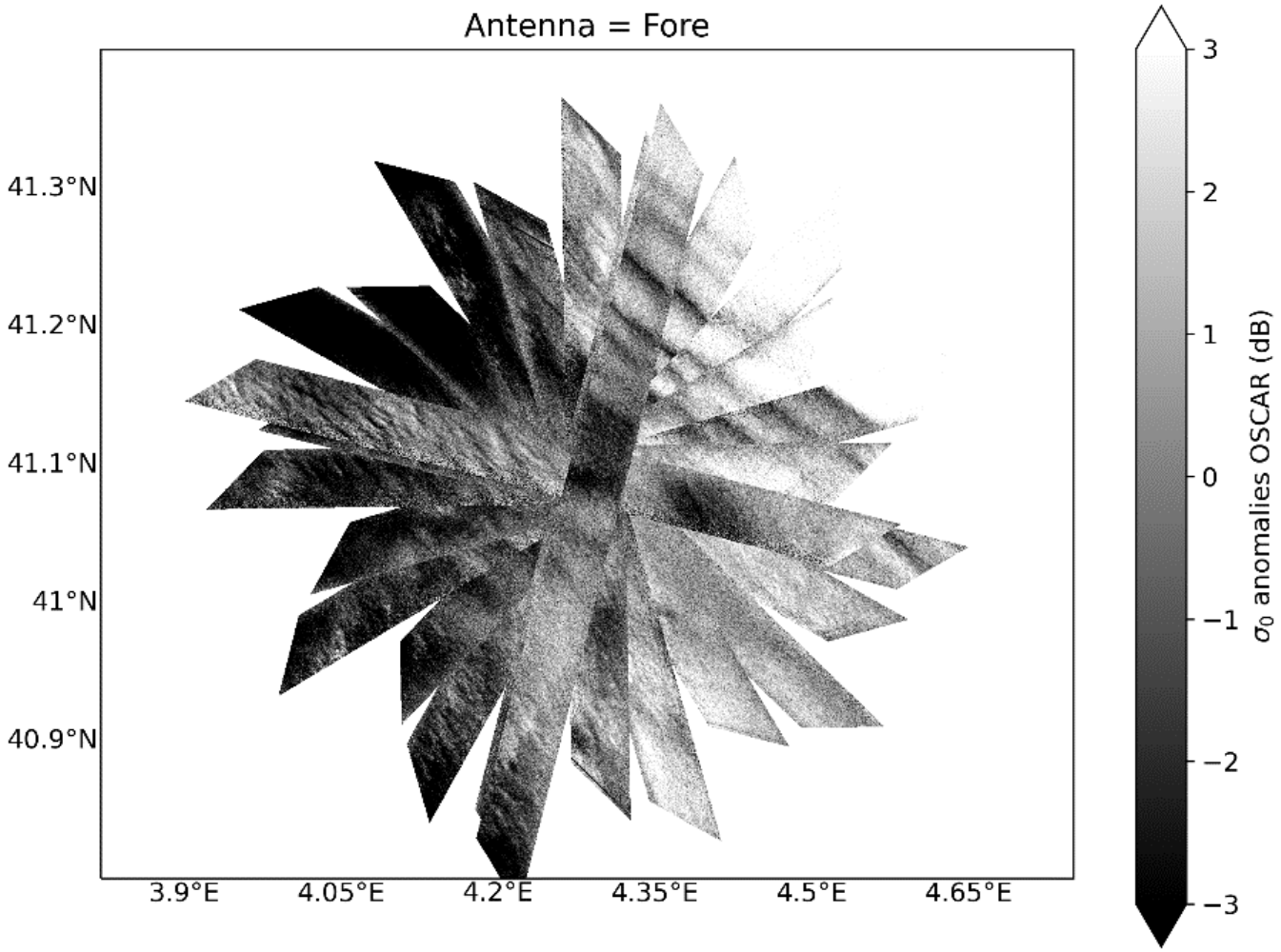


Figure 12 : Images d'anomalie de σ_0 acquises par l'antenne Fore d'OSCAR lors de la journée du 8 mai 2023.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

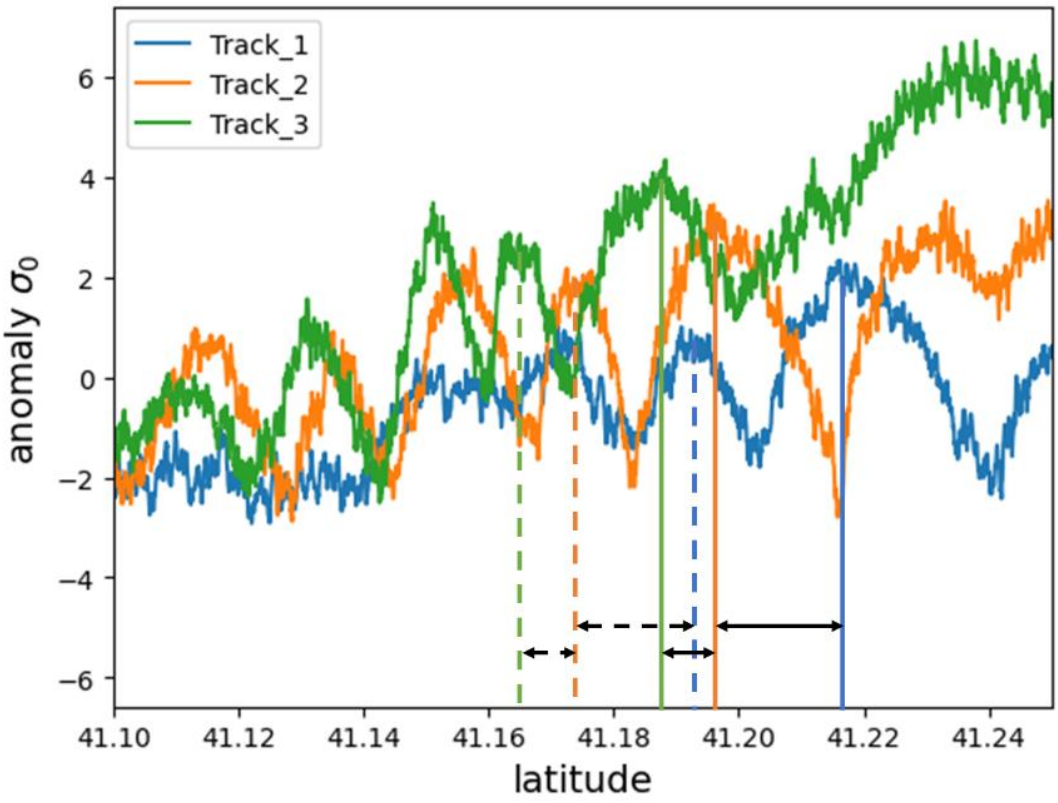


Figure 13 : Illustration de la propagation des ondulations des anomalies de σ_0 dans les images OSCAR pour les trajectoires 1, 2 et 3. Les lignes verticales indiquent le pic d'ondulation : le trait plein correspond à l'ondulation la plus au Nord et le trait en tiretés indique l'ondulation suivante ; leur couleur correspond à la trajectoire concernée. La distance entre les pics de ces ondulations est représentée par les doubles flèches noires.

La superposition des données OSCAR aux images KaRIn indique que KaRIn voit aussi ces ondulations larges échelles au même endroit (Figure 14). Lors de ce 8 mai, une image optique acquise par Sentinel-3 montre aussi des ondulations atmosphériques dans les nuages présents au nord de Minorque (Figure 15-a). L'analyse des cartes de vent à 100 m d'altitude indique, par ailleurs, que deux fronts de vents se rencontrent au nord-est de Minorque, pouvant ainsi conduire à une instabilité et des interactions entre les masses d'air dans cette région.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

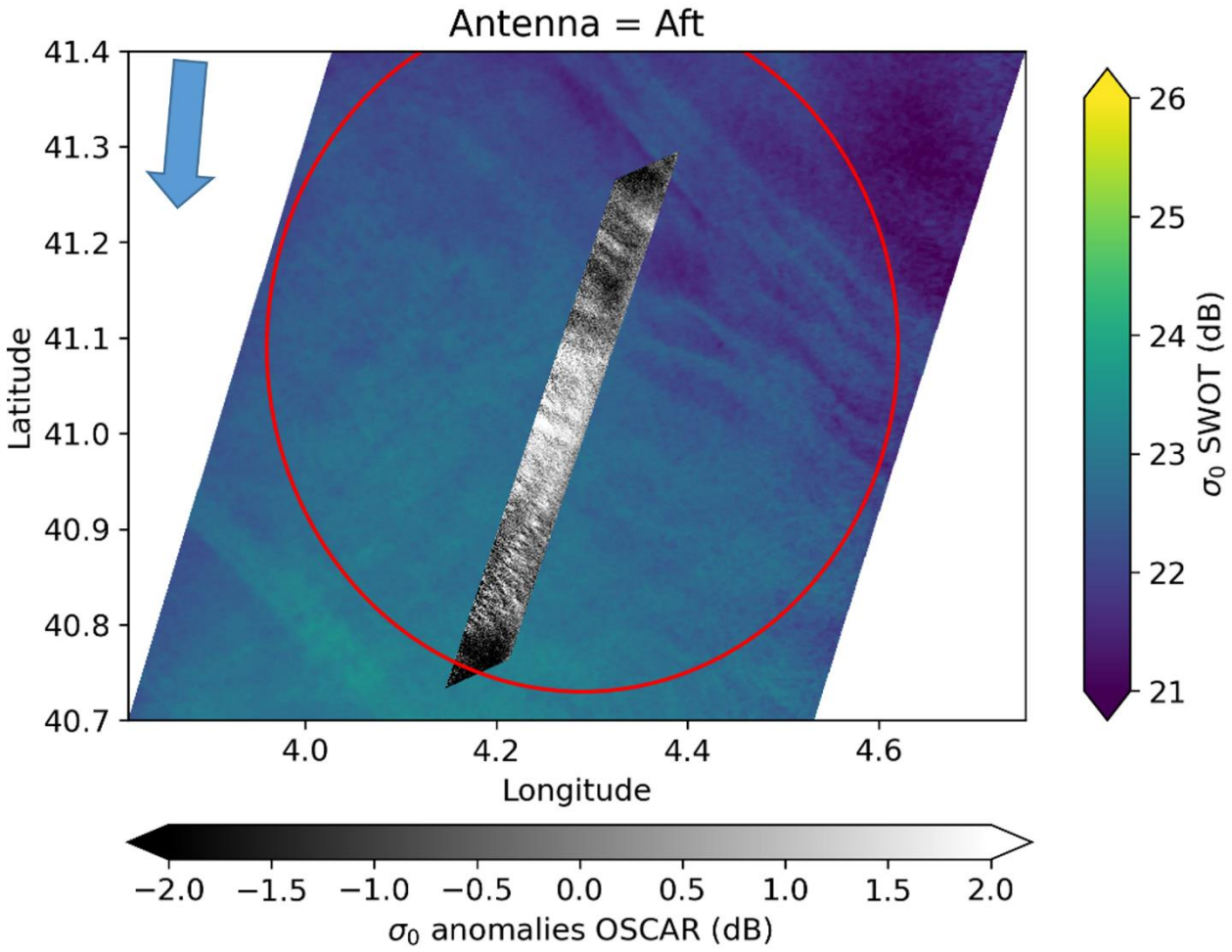


Figure 14 : Superposition des anomalies de σ_0 obtenues avec OSCAR au σ_0 de KaRIn le 8 mai 2023. Le cercle rouge indique la zone où les trajectoires OSCAR formant la rose ont été effectuées. La flèche bleue indique la direction de propagation du vent.

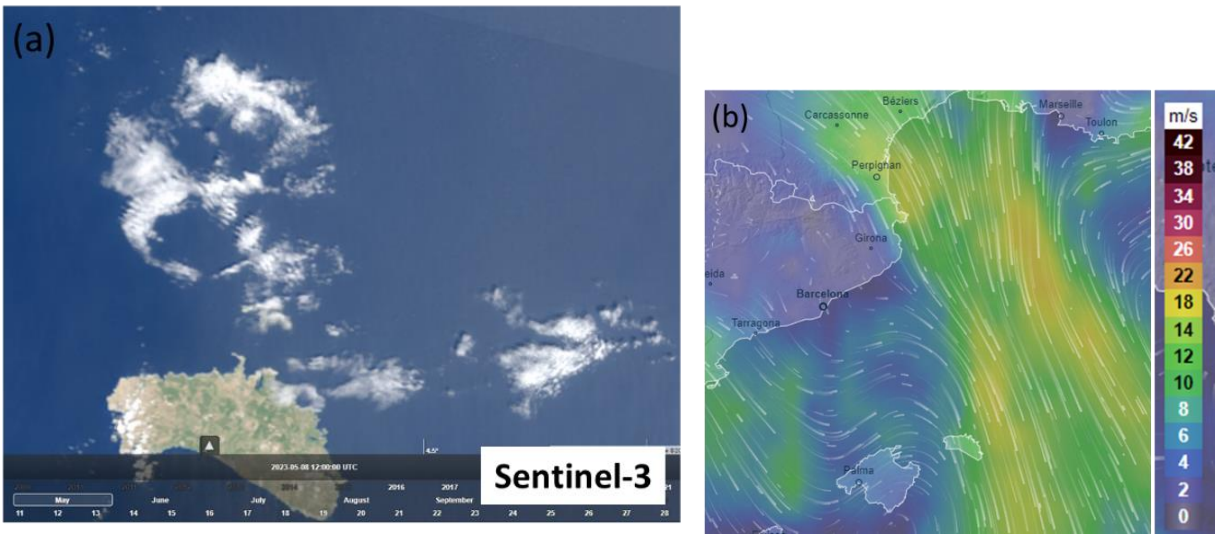


Figure 15 : (a) Image Sentinel-3 acquise le 8 mai 2023 à 9h30 du matin. (b) Carte des vitesses de vent à 100 m le 8 mai à 16 h à partir du modèle GMF.

L'analyse de la carte des anomalies de hauteurs de mer mesurées par KaRIn (Figure 16) a montré que les ondulations atmosphériques étaient visibles dans ce paramètre. Il est difficile d'identifier précisément la cause de ces ondulations dans le SLA, mais, étant donné l'instabilité du champ de vent, ce gradient peut être lié à une mauvaise estimation du vent dans le modèle, entraînant une mauvaise estimation du « Sea State Bias », ou à des ondulations atmosphériques

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

entraînant un effet barométrique inverse. Si ces ondulations se révélaient liées à cette dernière cause, il serait probablement très difficile de le corriger. De plus, un fort gradient de SLA est aussi visible à 5.25°E et 41.75°N. Ce type de phénomène plus intense a déjà été observé dans le Pacifique. Ces phénomènes sont difficiles à comprendre à cause du manque d'observations pour mieux les quantifier et caractériser. Cependant, en Méditerranée, la zone du front correspond à celle où se situait le bateau lors de la campagne BioSWOT. Il se peut, ainsi, que des observations in-situ aient été acquises au bon endroit, au bon moment, et elles permettraient, dans ce cas, de mieux comprendre ces gradients.

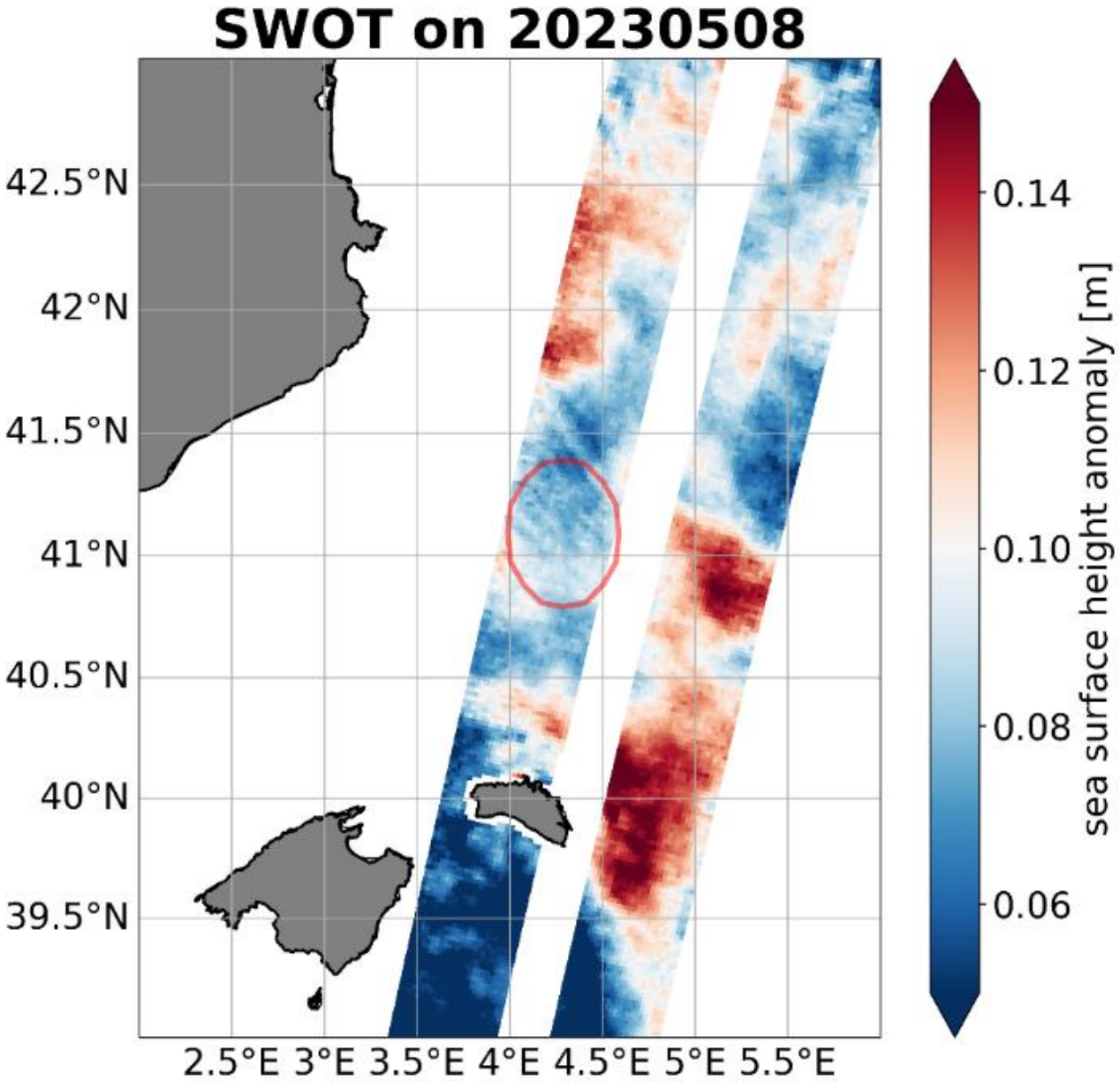


Figure 16 : Carte des anomalies de hauteurs de mer issues de KaRIn (produits à 2 km), mesurées la journée du 8 mai 2023.

3.2. Caractéristiques non géophysiques dans les données OSCAR

3.2.1. Images OSCAR

Bien que les données OSCAR présentent des phénomènes océaniques et atmosphériques à petite échelle ainsi que des caractéristiques communes avec les données SWOT et les images SAR, certaines caractéristiques ne sont pas représentatives de phénomènes géophysiques. Le Tableau 2 reprend les problèmes majeurs relevés lors de cette analyse qui ont été mentionnés auprès de MetaSensing et qui sont illustrés sur la Figure 17. Les artefacts concernent

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

les 3 antennes pour la journée du 7 mai et uniquement l'antenne Zero-Doppler pour le 8 mai, cette dernière ayant été victime d'un problème de transmission/réception.

Tableau 2 : Recensement des artefacts des mesures OSCAR

Date d'acquisition	Artefact	Trace(s) concernée(s)
07/05/2023	Gimbal error (3 Antennes) (Figure 17, gauche)	Track 10, 12
07/05/2023	Inconnu (3 Antennes) (Figure 17, milieu)	Tracks 13, 14
08/05/2023	Problème de TX/RX pour l'antenne Zero-Doppler (Figure 17, droite)	Tracks 1, 3, 10, 12

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

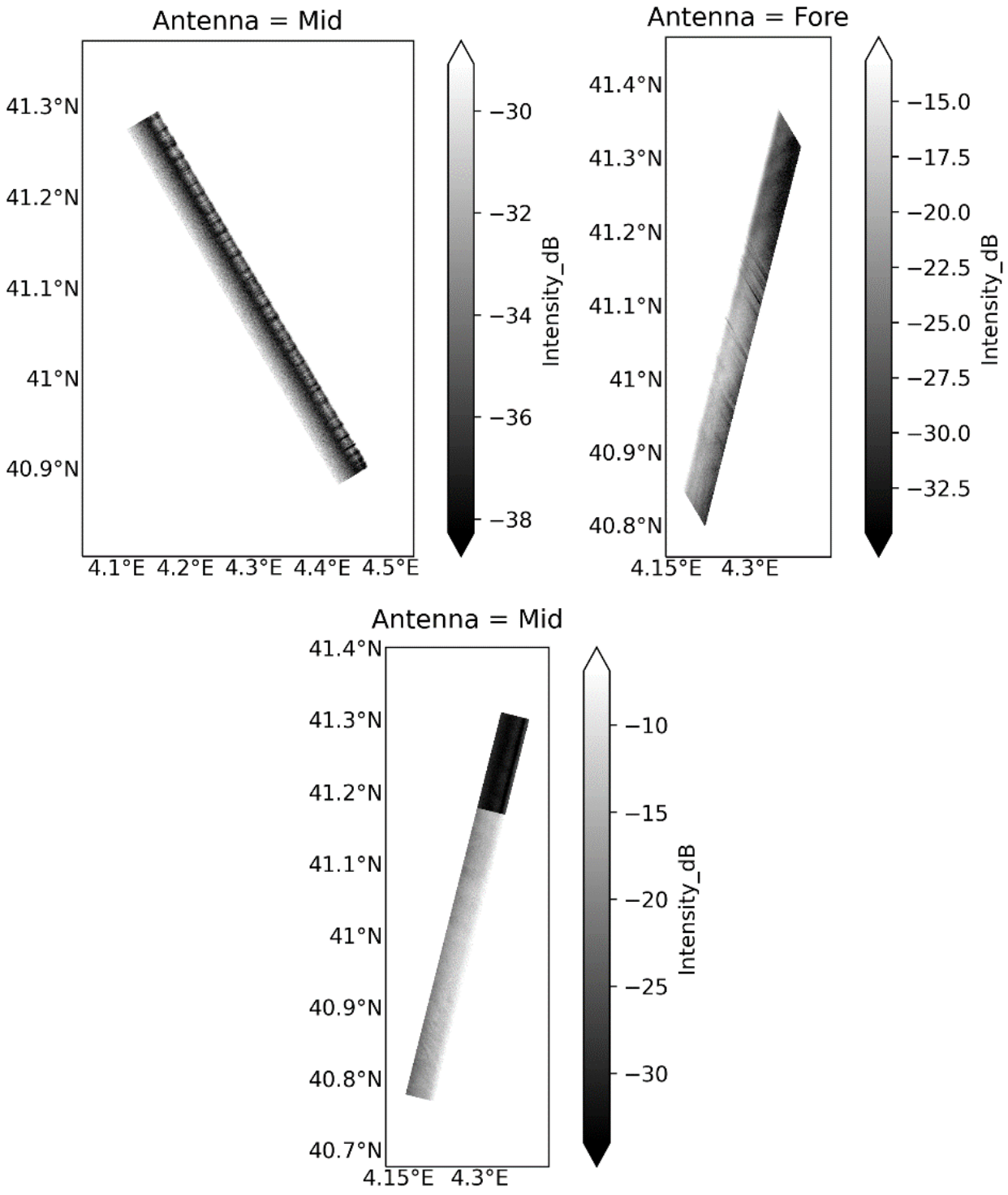


Figure 17 : Illustration des artefacts de mesure présents dans les données OSCAR (gimbal error à gauche, inconnu au milieu et problème de TX/RX pour l'antenne Zero-Doppler.

3.2.2. Interférogrammes OSCAR

L'analyse des interférogrammes mesurés sur la trace de calibration a permis de mettre en évidence deux artefacts de mesure. Le premier consiste en des ondulations le long de la trajectoire along track (Figure 18). Ces ondulations ont été étudiées à l'aide de transects dans cette direction along-track. Des transects de la médiane cross-track puis choisis aléatoirement dans la trace (là où les ondulations étaient les plus fortes) ont permis de vérifier que ces ondulations ne sont pas constantes d'une trace à l'autre, que ce soit en matière de longueur d'onde ou d'amplitude. Ceci est aussi

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

visible sur la Figure 18 : bien que les barres de couleurs soient différentes entre les deux graphiques, on remarque que la longueur d'onde des ondulations est plus petite sur l'image de gauche que sur l'image de droite.

Le second artefact de mesure concerne un décalage de phase non nul qui évolue sur la Terre (Figure 19). Cependant, comme la Terre est immobile, le décalage de phase devrait être de 0 ou a minima constant.

Ces artefacts ont été mentionnés auprès de MetaSensing. Un nouveau jeu de données corrigées et mieux calibrées a été fourni le 5 décembre 2023. L'évolution liée à ces problèmes sera présentée dans une prochaine version de ce rapport livré courant décembre.

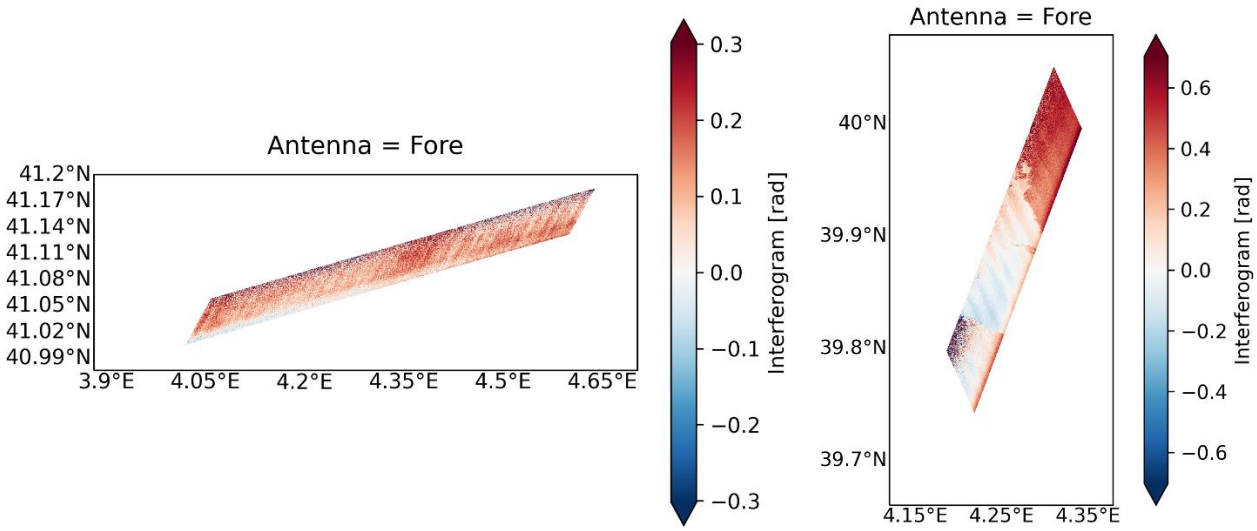


Figure 18 : Exemple de deux interférogrammes OSCAR acquis le 7 mai 2023 (à gauche) et le 5 mai 2023 (à droite).

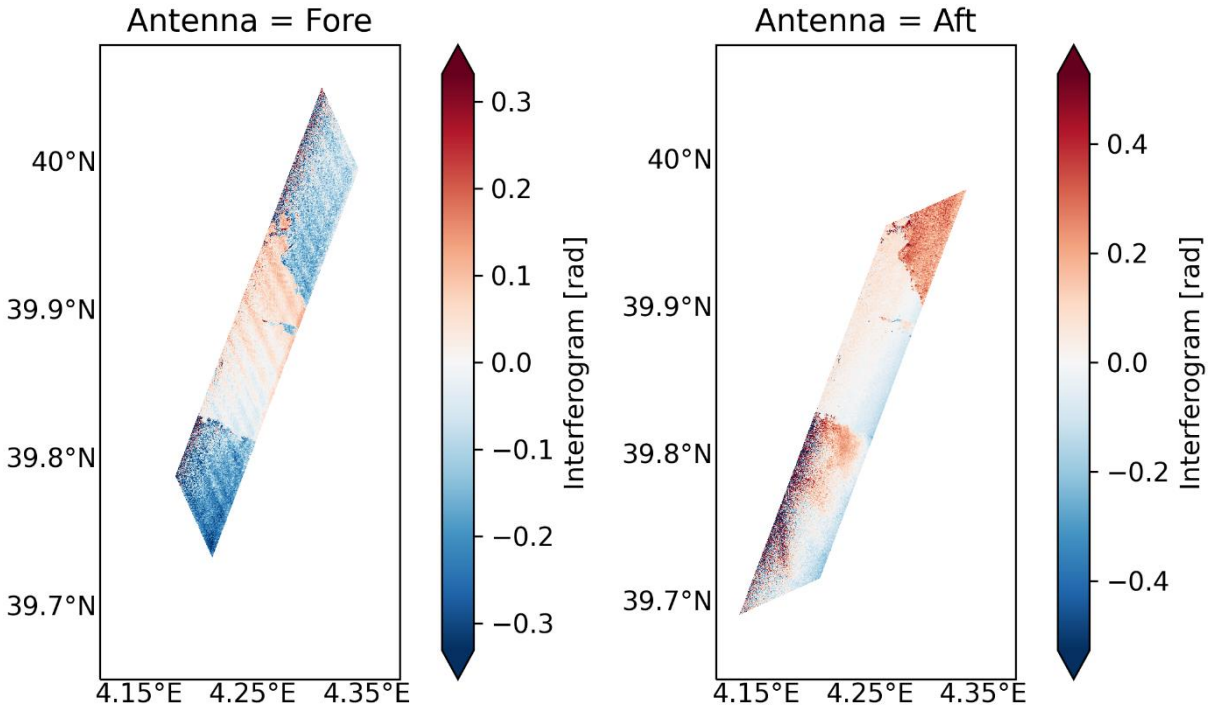


Figure 19 : Exemple de deux interférogrammes OSCAR acquis le 7 mai 2023 (à gauche) et le 8 mai 2023 (à droite) au-dessus de l'île de Minorque.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

4. Conclusions et perspectives

Le projet OSCAR-SWOT s'est tenu dans le cadre du lancement de la mission SWOT et des projets « Adopt A Crossover ». Grâce à la période Cal/Val de SWOT, la campagne de mesures SEASTARex-SWOT-Med a pu être organisée en mer Méditerranée du 5 au 8 mai 2023, et l'instrument OSCAR a pu effectuer des observations de la surface océanique au nord de Minorque. L'instrument OSCAR a été développé dans le but de démontrer la faisabilité de la mission SeaSTAR, candidate au programme ESA Earth Explorer 11 (phase 0).

Grâce aux campagnes de mesures BioSWOT et SEASTARex-SWOT-Med, de nombreuses images SAR ont pu être récupérées. Maximiser et diversifier le jeu de données d'observation étaient essentiels pour mieux comprendre et interpréter les données KaRIn de SWOT et OSCAR. Ainsi, plus 60 images SAR ont pu être récupérées par le programme Third Party Mission de l'ESA, mais aussi par le biais des agences spatiales britannique et canadienne. Les commandes et le téléchargement des données SAR ayant demandé beaucoup de temps, la grande majorité des données ont pu être exploitées au cours de ce projet mais pas toutes.

Ce rapport présente les analyses des données recueillies pendant les jours de la campagne SEASTARex-SWOT-Med, à savoir les 5, 7 et 8 mai 2023. Ce travail d'analyse a permis de montrer que les données KaRIn révélaient de nombreux détails sur la surface océanique et qu'elles étaient aussi sensibles aux variations de l'atmosphère. Bien que ces analyses aient, pour l'instant, été réalisées de manière qualitative et non quantitative, elles ont tout de même permis de rendre compte de la richesse contenue dans les images KaRIn. De plus, la diversité du jeu de données a permis de mieux caractériser les phénomènes présents dans ces images et de distinguer s'ils étaient de nature océanique ou atmosphérique.

La comparaison des données OSCAR avec les données KaRIn et auxiliaires a révélé de nombreuses similarités et montré que les données KaRIn étaient complémentaires des données SAR. Cela a aussi démontré que les données OSCAR acquises sous forme de rose permettaient d'effectuer de nouvelles analyses, comme le calcul de vitesse de déplacement des phénomènes visibles sur les différentes images.

L'analyse initialement prévue sur l'impact des vagues dans la phase d'OSCAR a été réajustée en raison de la réception tardive des données directionnelles d'OSCAR en octobre 2023. Ce réajustement a permis de se concentrer sur une étude détaillée du σ_0, assurant ainsi la qualité des données. Cette étude a été fructueuse, permettant notamment de corriger une erreur dans le σ_0 de l'antenne Zero-Doppler, ce qui a augmenté la fiabilité des données.

Ce projet aura permis de collecter avec succès un jeu de données SAR diversifié de mai à juillet 2023 et de mener des analyses préliminaires en démontrant la richesse des données SWOT. Un futur travail pourra être mené afin de poursuivre les comparaisons des données SWOT et SAR collectées, mais aussi des données OSCAR et des données in-situ acquises lors de la campagne BioSWOT. Ce travail permettra de mieux comprendre les processus géophysiques et leur impact sur le signal SWOT et OSCAR. En effet, certains phénomènes ayant un impact sur la mesure de hauteur de mer sont encore peu compris aujourd'hui, en raison du manque d'observations. De plus, les données SAR acquises sur la période de mai à juillet 2023 offriront une opportunité précieuse d'analyser une plus grande diversité de situations.

© NOVELTIS. Ce document est la propriété de NOVELTIS et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.