



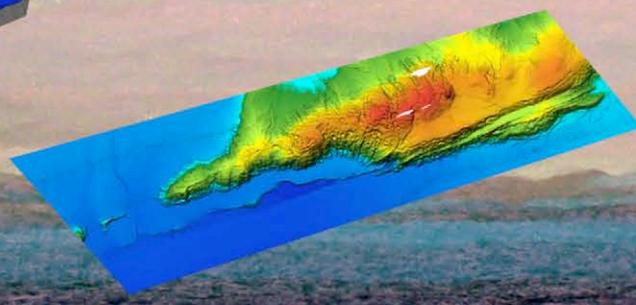
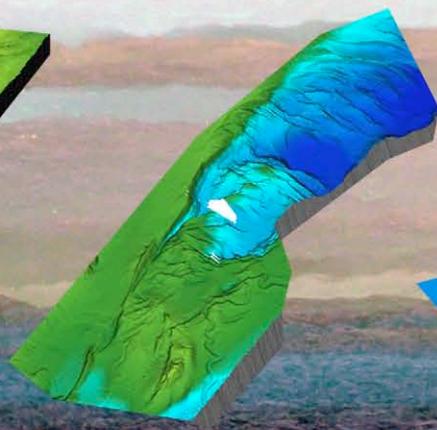
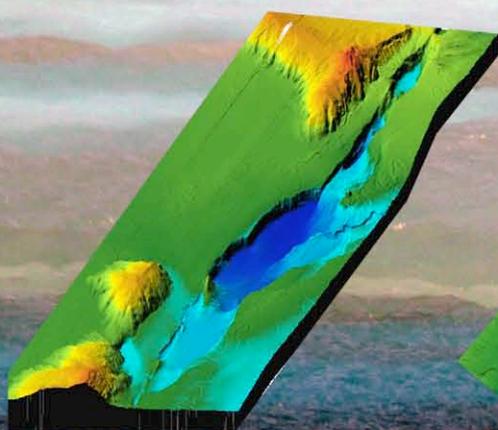
Rapport de campagne

OWEN

Djibouti, 1 Mars 2009

Salalah, Sultanat d'Oman, 16 Mars 2009

BHO Beautemps-Beaupré



SOMMAIRE

Avant-propos	3
Informations générales	4
- Equipe embarquée	4
- Plan de position	5
- Tableau de déroulement	6
Rappel des objectifs	7
Premiers résultats	17
- Bathymétrie	17
- Profils du sondeur de sédiments	23
- Cartes gravimétriques	27
- Anomalies magnétiques	28
- Réflectivité	29
Acquisition et traitement	31
- Bathymétrie et imagerie	31
- Gravimétrie	35
- Magnétométrie	36
- Sondeur de sédiment SBP 120	39
Conclusions préliminaires	43

AVANT-PROPOS

La campagne océanographique Owen s'est déroulée du 1^{er} au 16 mars 2009 entre Djibouti et Salalah (Sultanat d'Oman) sur le bâtiment hydrographique et océanographique *BHO Beautemps-Beaupré* de la Marine nationale, dans le cadre de la coopération entre le SHOM et l'IFREMER. Son objectif était de reconnaître la frontière de plaque entre l'Arabie et l'Inde dans le nord-ouest de l'Océan Indien.

La stratégie adoptée pour cette campagne a consisté à cartographier la frontière de plaque active par une série de profils parallèles à la zone de fracture d'Owen (NNE-SSO) et espacés d'environ 7 milles nautiques. 3020 milles ont été parcourus dans la zone de travail, 10.891.787 sondes bathymétriques ont été validées, 147.420 mesures gravimétriques ont été effectuées, ainsi que des mesures magnétiques et des profils de sondeur de sub-surface.

La campagne a été réalisée par une équipe de 6 chercheurs et enseignant-chercheurs relevant de trois laboratoires partenaires (iSTeP, Institut des Sciences de la Terre de Paris, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6 ; Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure ; Géosciences Azur) rattachés au CNRS-INSU. Les travaux ont été menés à bien grâce aux moyens fiables et performants du BHO Beautemps-Beaupré mis en œuvre par les hydrographes du Groupe Océanographique de l'Atlantique (GOA) du SHOM sous la conduite de l'ingénieur Vincent Lamarre et de l'ingénieur Yves-Marie Tanguy pour la logistique, et grâce au concours du commandant du bâtiment, le capitaine de frégate Geoffroy de Kersauson, de ses officiers et de son équipage. L'ensemble de l'équipage, y compris une équipe de commandos et de fusiliers marins chargés de la sécurité du navire dans ce secteur à fort risque de piraterie, les membres du GOA et l'équipe scientifique, comprenait 56 personnes.

Il faut souligner la disponibilité constante des uns et des autres, la synergie entre les équipes et l'efficacité propre à la Marine. Les exigences de la navigation et la rigueur de la programmation n'ayant pas interdit la souplesse quand il s'est agi de modifier les routes ou de revenir en arrière à la suite d'une avarie technique temporaire.

Tout au long de la campagne, les données bathymétriques, gravimétriques, magnétiques, et de sondeur de sub-surface ont été acquises sans discontinuités notables et leur traitement s'est fait quasiment en temps réel. Après l'exposé préliminaire des objectifs, des points réguliers ont été faits à l'occasion du briefing journalier permettant à chacun de s'informer de l'avancement des travaux. De plus, la communication interne a été facilitée par l'intranet du bord très performant.

Au terme de la mission, la moisson de données est considérable et d'excellente qualité. L'équipe scientifique est particulièrement satisfaite et remercie chaleureusement l'ensemble des participants, se félicitant de la façon exemplaire avec laquelle cette coopération entre divers organismes s'est opérée, dans un parfait esprit d'équipe. Il faut souhaiter que cet exemple d'association, qui profite aux différents groupes d'intervenants, puisse se réitérer lors d'opérations ultérieures.

INFORMATIONS GENERALES

☐ Equipe embarquée

Equipe scientifique civile

Chef de mission: ddm **Marc Fournier (1)**
 Marie-Odile Beslier (2)
 Nicolas Chamot-Rooke (3)
 Benjamin Hazard (1)
 Philippe Huchon (1)
 Yann Le Faou (4)
 Carole Petit (1)

Equipe GOA

Chef ingénieur hydrographe: **Vincent Lamarre (IETA)**

Bord

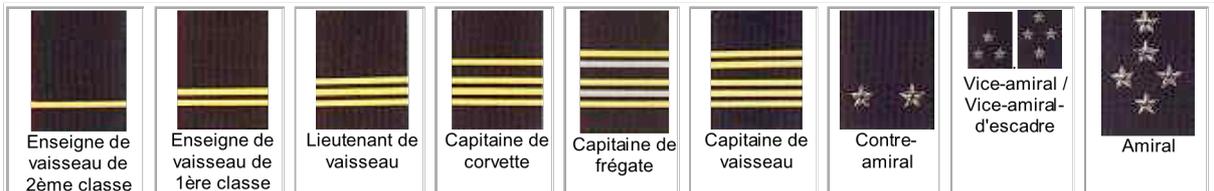
Commandant : **Geoffroy de Kersauson (CF)**

- 1 – ITeP, CNRS UMR 7193, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, Case 129, 4 place Jussieu, 75252 PARIS Cedex 05
 2 – Géosciences Azur, CNRS UMR 6526, UPMC-UNSA-CNRS-IRD, La Darse, 06235 Villefranche-sur-mer Cedex
 3 – Laboratoire de Géologie, CNRS UMR 8538, Ecole Normale Supérieure, 24 rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05
 4 – Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

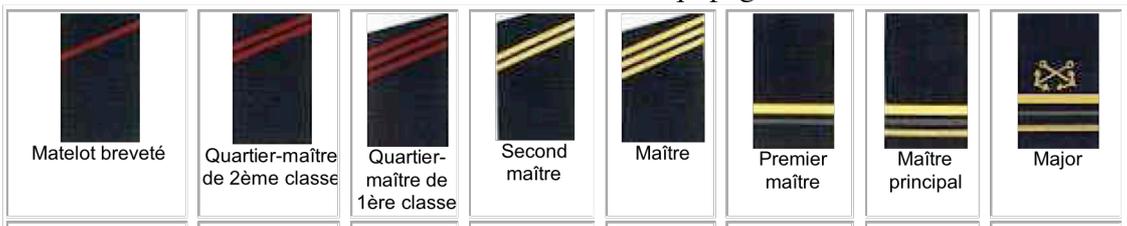
Grades de la Marine :

CF : Capitaine de frégate ; CC : Capitaine de corvette ; LV : Lieutenant de vaisseau ; IETA : Ingénieur des études et techniques de l'armement ; EV : Enseigne de vaisseau ; MJR: Major ; MP : Maître principal ; PM : Premier maître ; MTS : Maître ; SM : Second maître ; QM : Quartier-maître ; MOT : Matelot.

Insignes de grades :
Officiers



Officiers mariniens et équipage



□ Plan de position

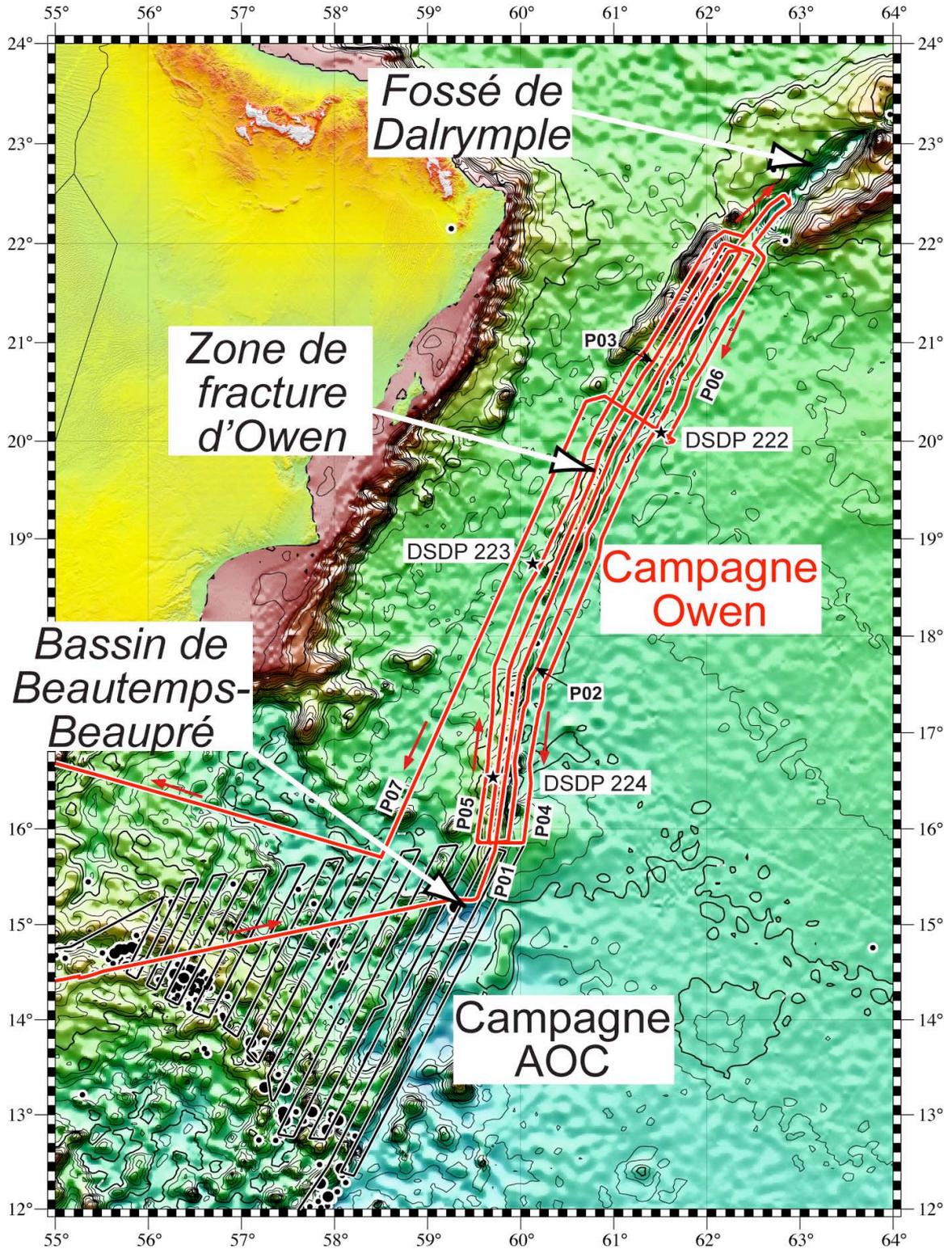


Figure 1. Plan de position de la campagne Owen.

 **Tableau de déroulement**

N° profil	Début de profil			Fin de profil			Distance		Cap °E	Vitesse Nds	Commentaires
	Lat °N	Long °E	Date - Heure GMT	Lat °N	Long °E	Date - Heure GMT	n.m.	km			
T010	11,606	43,127	1-mars 5:00	15,252	59,423	4-mars 12:09	976,6	1808,6	77	12,3	Départ Djibouti 8:00 - Transit
P010	15,252	59,423	4-mars 12:09	15,353	59,562	4-mars 13:30	10,1	18,7	53	7,5	Début profil 1 - Début levé Owen
P010	15,353	59,562	4-mars 13:30	15,786	59,722	4-mars 16:00	27,6	51,0	20	11,0	
P010	15,786	59,722	4-mars 16:00	16,745	59,862	4-mars 21:15	58,2	107,7	8	11,1	Manœuvre anti-collision
P010	16,745	59,862	4-mars 21:15	17,611	59,995	5-mars 3:00	110,7	205,0	8	10,1	
P010	17,611	59,995	5-mars 3:00	19,925	61,009	5-mars 16:36	150,4	278,6	23	11,1	
P010	19,925	61,009	5-mars 16:36	21,899	62,220	6-mars 5:00	136,6	253,0	30	11,0	Fin de profil 1
P020	21,899	62,220	6-mars 5:00	21,895	62,348	6-mars 5:50	7,1	13,2	92	8,6	Début profil 2
P020	21,895	62,348	6-mars 5:50	19,665	61,009	6-mars 20:00	153,5	284,4	209	10,8	
P020	19,665	61,009	6-mars 20:00	17,508	60,094	7-mars 8:30	139,6	258,6	202	11,2	
P020	17,508	60,094	7-mars 8:30	15,876	59,866	7-mars 17:30	98,9	183,1	188	11,0	Fin de profil 2 - Soirée MacDo Loto
P030	15,876	59,866	7-mars 17:30	15,863	59,652	7-mars 18:46	12,4	23,0	266	9,8	Début profil 3
P030	15,863	59,652	7-mars 18:46	17,814	59,939	8-mars 5:30	118,3	219,1	8	11,0	Journée Dimanche
P030	17,814	59,939	8-mars 5:30	19,414	60,677	8-mars 15:30	118,3	219,1	8	11,0	Barbecue au zébu grillé plage arrière
P030	19,414	60,677	8-mars 15:30	20,179	61,010	8-mars 19:30	154,5	286,1	23	11,0	
P030	20,179	61,010	8-mars 19:30	21,987	62,173	9-mars 7:30	126,6	234,5	31	10,6	Fin de profil 3
P040	21,987	62,173	9-mars 7:30	21,848	62,468	9-mars 9:00	18,4	34,1	117	12,3	Début profil 4
P040	21,848	62,468	9-mars 9:00	20,574	61,685	9-mars 17:00	88,2	163,3	210	11,0	
P040	20,574	61,685	9-mars 17:00	20,259	61,537	9-mars 18:52	20,7	38,3	204	11,1	Manœuvre anti-collision
P040	20,259	61,537	9-mars 18:52	19,692	61,196	9-mars 23:08	59,7	110,5	207	9,7	Arrêt SBP 120 puis reprise
P040	19,692	61,196	9-mars 23:08	17,328	60,229	10-mars 13:00	152,3	282,0	201	11,0	Tectonique des plaques par P. Huchon
P040	17,328	60,229	10-mars 13:00	15,860	60,031	10-mars 21:03	88,9	164,6	187	11,0	Fin de profil 4
P050	15,860	60,031	10-mars 21:03	15,873	59,529	10-mars 23:46	29,0	53,7	272	10,7	Début profil 5
P050	15,873	59,529	10-mars 23:46	17,737	59,741	11-mars 10:00	112,6	208,5	6	11,0	
P050	17,737	59,741	11-mars 10:00	19,936	60,717	11-mars 23:00	143,2	265,2	23	11,0	
P050	19,936	60,717	11-mars 23:00	21,198	61,521	12-mars 7:00	231,0	427,8	26	11,0	Panne DA 4, remontée magnétomètre
P050	21,198	61,521	12-mars 7:00	21,161	61,497	12-mars 7:50	2,6	4,9	211	3,2	Reprise du profil
P050	21,161	61,497	12-mars 7:50	21,977	62,017	12-mars 13:00	57,0	105,5	31	11,0	
P050	21,977	62,017	12-mars 13:00	22,102	62,260	12-mars 14:30	15,4	28,6	61	10,3	Début profil de ralliement Dalrymple
P050	22,102	62,260	12-mars 14:30	22,082	62,419	12-mars 15:24	8,9	16,5	98	9,9	Début profil Dalrymple S-N
P050	22,082	62,419	12-mars 15:24	22,088	62,424	12-mars 15:34	0,5	0,9	35	2,9	Panne DA 4, remontée magnétomètre
P050	22,088	62,424	12-mars 15:34	22,450	62,817	12-mars 19:20	30,8	57,0	45	8,2	Fin de profil Dalrymple S-N
P050	22,450	62,817	12-mars 19:20	22,468	62,888	12-mars 20:00	4,1	7,6	75	6,2	Fin de giration dans fossé Dalrymple
P050	22,468	62,888	12-mars 20:00	22,330	62,811	12-mars 20:45	9,3	17,3	207	12,4	Début profil Dalrymple N-S
P050	22,330	62,811	12-mars 20:45	22,047	62,549	12-mars 22:30	22,4	41,4	221	12,8	
P050	22,047	62,549	12-mars 22:30	21,982	62,502	12-mars 23:00	4,7	8,7	214	9,4	Fin profil Dalrymple N-S
P050	21,982	62,502	12-mars 23:00	21,910	62,567	12-mars 23:30	5,7	10,5	140	11,3	
P060	21,910	62,567	12-mars 23:30	21,832	62,609	13-mars 0:00	5,2	9,7	154	10,4	Début profil 6
P060	21,832	62,609	13-mars 0:00	21,404	62,351	13-mars 2:40	29,5	54,6	209	11,0	
P060	21,404	62,351	13-mars 2:40	20,053	61,595	13-mars 11:00	91,5	169,5	208	11,0	Fin profil 6
R010	20,053	61,595	13-mars 11:00	20,059	61,565	13-mars 12:30	1,7	3,2	282	1,1	Forage DSDP 222
R010	20,059	61,565	13-mars 12:30	20,451	60,905	13-mars 16:30	44,0	81,5	302	11,0	
P070	20,451	60,905	13-mars 16:30	20,376	60,688	13-mars 17:43	13,0	24,1	250	10,7	Début profil 7
P070	20,376	60,688	13-mars 17:43	16,611	58,922	14-mars 16:00	247,4	458,2	204	11,1	
P070	16,611	58,922	14-mars 16:00	15,700	58,500	14-mars 21:30	59,9	110,9	204	10,9	Fin profil 7 - Fin levé Owen
T020	15,700	58,500	14-mars 21:30	16,940	54,019	16-mars 3:00	268,7	497,7	286	9,1	Transit retour vers Salalah

RAPPEL DES OBJECTIFS

☐ Survol du projet

La demande de campagne Owen est motivée par la découverte au cours de la campagne AOC (en 2006) d'une faille active majeure à l'extrémité sud de la zone de fracture d'Owen, entre les plaques Arabie et Inde. Les données montrent que cette frontière de plaques change de configuration depuis ~8 Ma : la région du point triple Arabie-Inde-Somalie correspond à une zone de déformation diffuse qui accommode le transfert vers la plaque Inde d'une portion de la plaque Arabie. L'histoire de cette frontière de plaque est jalonnée de changements de géométrie et de cinématique : elle a été successivement une *marge passive* au Jurassique, une *zone d'obduction* à la transition K/T située 200 km plus à l'Ouest qu'actuellement, éventuellement une *zone de subduction* au début du Tertiaire, puis une *marge transformante* dont le sens s'est inversé de sénestre à dextre au Miocène. Actuellement, elle suit un petit cercle centré sur le pôle Arabie-Inde et accommode un mouvement dextre de 3 mm/an détecté par la solution géodésique la plus récente (ITRF-2005). Cette frontière est donc un objet approprié pour étudier la localisation et l'évolution des limites de plaques, ce qui est un des enjeux majeurs de la tectonique moderne. Le projet Owen a pour objectif de caractériser avec des profils de sismique multitrace la structure crustale de la frontière de plaque Arabie-Inde — bassin d'Owen inclus — afin de mieux contraindre son évolution géodynamique et mécanique. Cette étude apportera des contraintes nouvelles sur les mécanismes de localisation de la déformation le long des frontières de plaques.

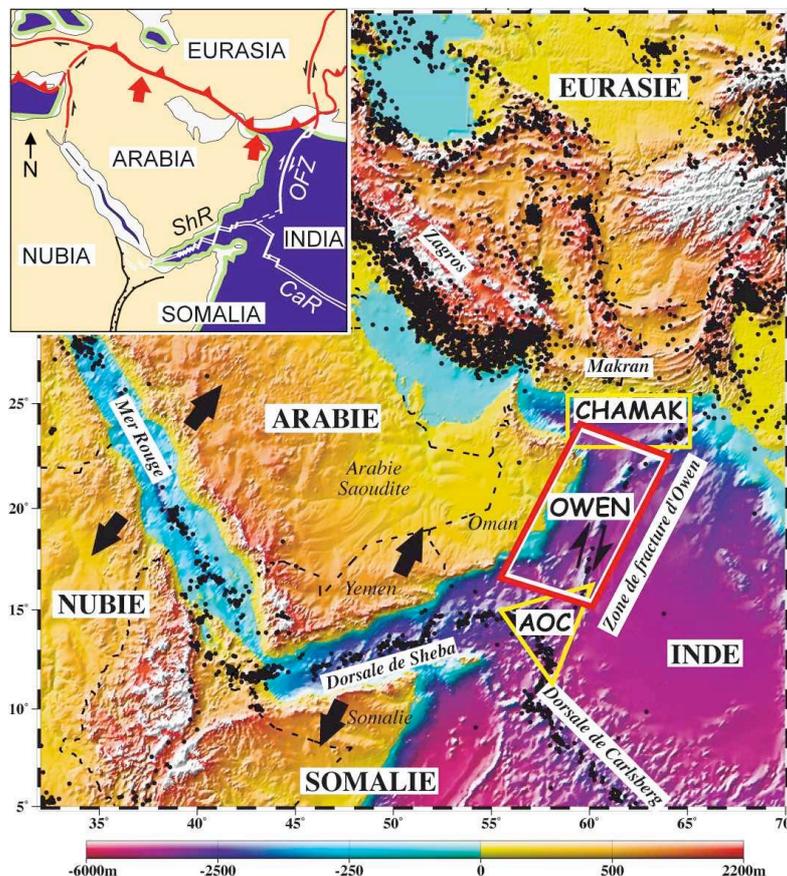


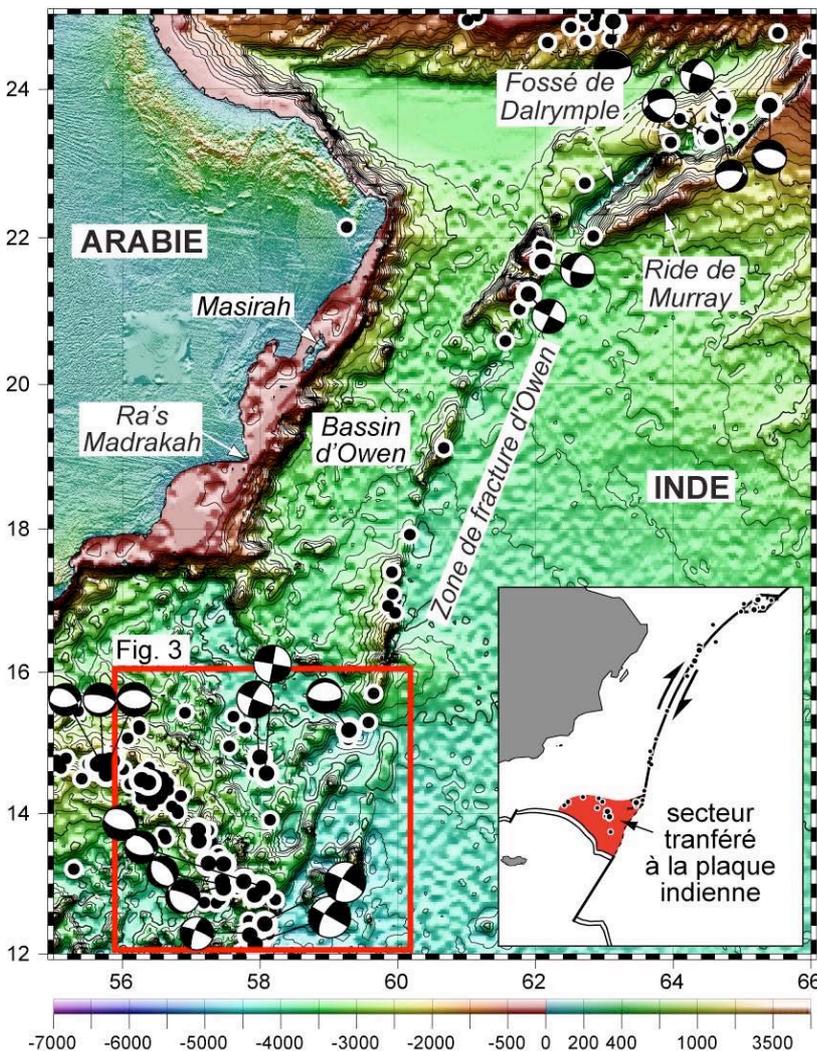
Figure 2. Localisation et contexte géodynamique de la zone de fracture d'Owen à la frontière de plaque Arabie-Inde (cadre rouge). Les encadrés jaunes montrent la position des campagnes AOC et CHAMAK (Ellouz-Zimmermann et al. , 2007).

□ Objectifs

➤ Motivations du projet Owen

La demande de campagne Owen est motivée par la découverte au cours de la campagne AOC en 2006 d'une faille active majeure à l'extrémité sud de la zone de fracture d'Owen (ZFO; Fig. 2). Cette faille décrochante décale la ride d'Owen, adjacente à la zone de fracture d'Owen, sur 12 km et se termine au sud dans un bassin bordé par des failles normales sismiques attestant d'une extension active. Ce bassin s'étend vers l'ouest à l'intérieur de ce qui était considéré comme la plaque arabe. Des séismes diffus dans et à l'ouest du bassin délimitent un secteur en forme de coin qui faisait initialement partie de la plaque arabe et qui est transféré, en totalité ou en partie, à la plaque indienne (Fig. 3 ; DeMets, 2008). **La frontière de plaque Arabie-Inde change donc actuellement de configuration.** Ce changement s'est probablement amorcé entre 3 et 8 Ma, en même temps que s'est initiée la faille récemment découverte (Fournier et al., 2008 ; cf. annexes).

Ce n'est pas la première fois que cette frontière de plaque change de configuration. A la limite K/T — c'était alors la frontière entre la plaque Inde et la plaque Afrique-Arabie —, elle était localisée le long de la marge continentale arabe, 200 km plus à l'ouest qu'actuellement, et consistait vraisemblablement en une frontière décrochante au niveau de laquelle se sont mises en place les ophiolites de Masirah et de Ra's Madrakah (Fig. 3). **Cette frontière est donc un objet approprié pour étudier la localisation et l'évolution des limites de plaques, ce qui est l'un des enjeux majeurs de la tectonique moderne associant détermination des conditions aux limites (cinématique des plaques) et de la rhéologie de la lithosphère (localisation de la déformation).**



De plus, la plaque Arabie s'est individualisée il y a seulement 20 Ma, lorsque l'accrétion océanique a démarré dans le golfe d'Aden oriental (anomalie magnétique 6). Actuellement, elle remonte vers le Nord à peine plus vite que l'Inde par rapport à l'Eurasie, ce qui induit un lent mouvement dextre (3 mm/an) le long de la ZFO. Les mouvements relatifs des deux plaques par rapport à l'Eurasie sont décrits par des pôles eulériens très proches, ce qui suggère qu'elles sont entraînées par une même dynamique. Pourtant, les deux plaques présentent des caractéristiques très différentes : la plaque Inde s'est individualisée au Crétacé et est entrée en collision avec l'Eurasie au niveau de

Figure 3. Sismicité et mécanismes au foyer à la frontière de plaque Arabie-Inde. L'insert montre la géométrie des frontières de plaques avec un coin de la plaque arabe transféré, en totalité ou en partie, à la plaque indienne.

l'Himalaya il y a 50 Ma, tandis que l'Arabie entre en collision au niveau du Zagros depuis 25 Ma seulement (avant même d'être totalement séparée de l'Afrique ; Agard et al. ; 2005). L'Inde et l'Arabie sont bordées au sud par deux dorsales d'âge et de cinématique distincts, les dorsales de Carlsberg (~60 Ma) et de Sheba (~20 Ma) respectivement. L'Inde et l'Arabie sont connectées à des panneaux de lithosphère océanique plongeant en subduction, dont les géométries sont différentes. **Pourquoi deux plaques tectoniques aux caractéristiques si différentes ont-elles des mouvements si proches ? Quel est le rôle de la ZFO dans ce processus (couplage/découplage) et pourquoi cette frontière change-t-elle de configuration ?**

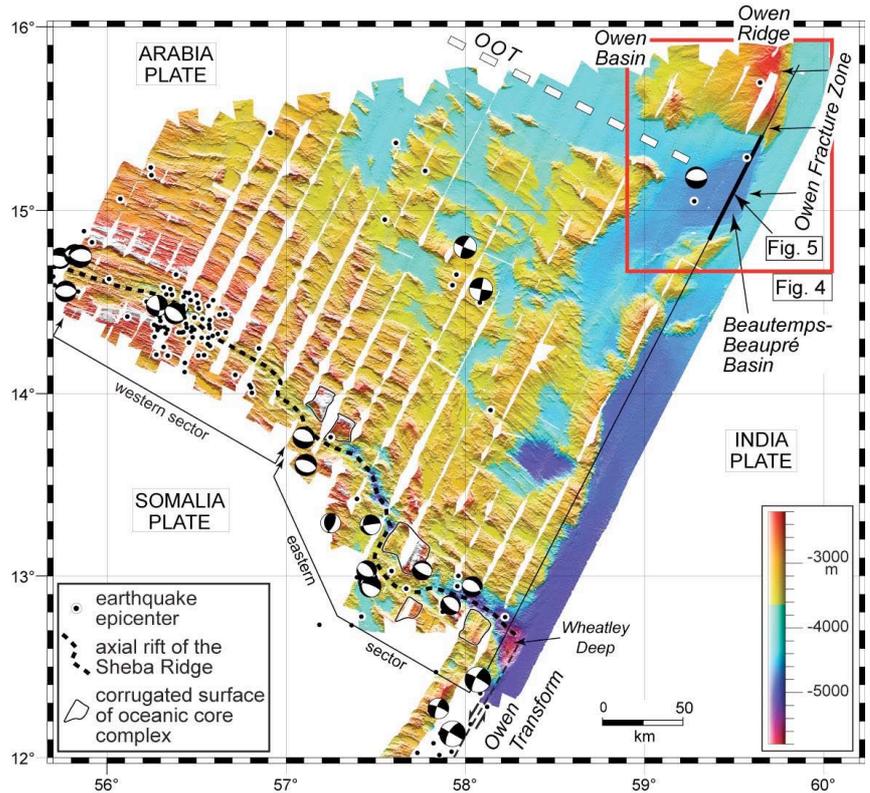


Figure 4. Carte bathymétrique multifaisceaux du point triple AOC (localisation fig. 2) levée pendant la campagne AOC (2006). La carte montre le flanc nord de la dorsale de Sheba et la terminaison sud de la ZFO au NE. Au SE, le rift axial de la dorsale de Sheba est bordé de part et d'autre par des *oceanic core complexes*.

Le principal défi dans l'étude de la ZFO est l'absence d'information précise et récente sur sa géométrie et sa structure. L'objectif de la campagne Owen est de caractériser la structure crustale de la frontière de plaque Arabie-Inde depuis la ZFO jusqu'à la marge continentale arabe (marge est-oman), en incluant le bassin d'Owen.

➤ Les enseignements de la campagne AOC

L'utilisation pendant la campagne AOC du sondeur multi-faisceaux de seconde génération du *BHO Beautemps-Beaupré* pour cartographier le point triple Aden-Owen-Carlsberg (AOC) a permis de mettre en évidence une faille active majeure à l'extrémité sud de la ZFO reconnue sur une longueur d'environ 120 km (Fig. 5a). Cette faille, rectiligne et verticale, orientée N10°E recoupe en la décalant de manière dextre sur 12 km la ride d'Owen qui borde la ZFO. La faille n'est pas localisée au pied du relief comme on aurait pu s'y attendre.

La faille active se termine au sud dans un bassin de 50 km de large, jusqu'ici inconnu et baptisé bassin Beautemps-Beaupré (Fournier et al., accepté), bordé par des failles normales actives orientées N70°E à N90°E (Fig. 5b et 5c). Les profils sismiques de subsurface (sondeur 3,5 kHz) mettent en évidence la structure superficielle du bassin (Fig. 6).

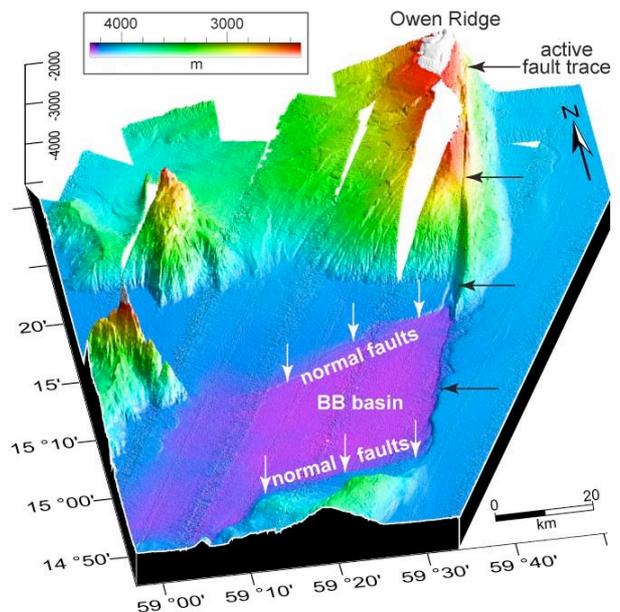


Figure 5a. Vue 3D de la faille active à l'extrémité sud de la zone de fracture d'Owen. La faille est orientée N10°E, elle recoupe la ride d'Owen, et se termine au sud dans un bassin en pull-apart.

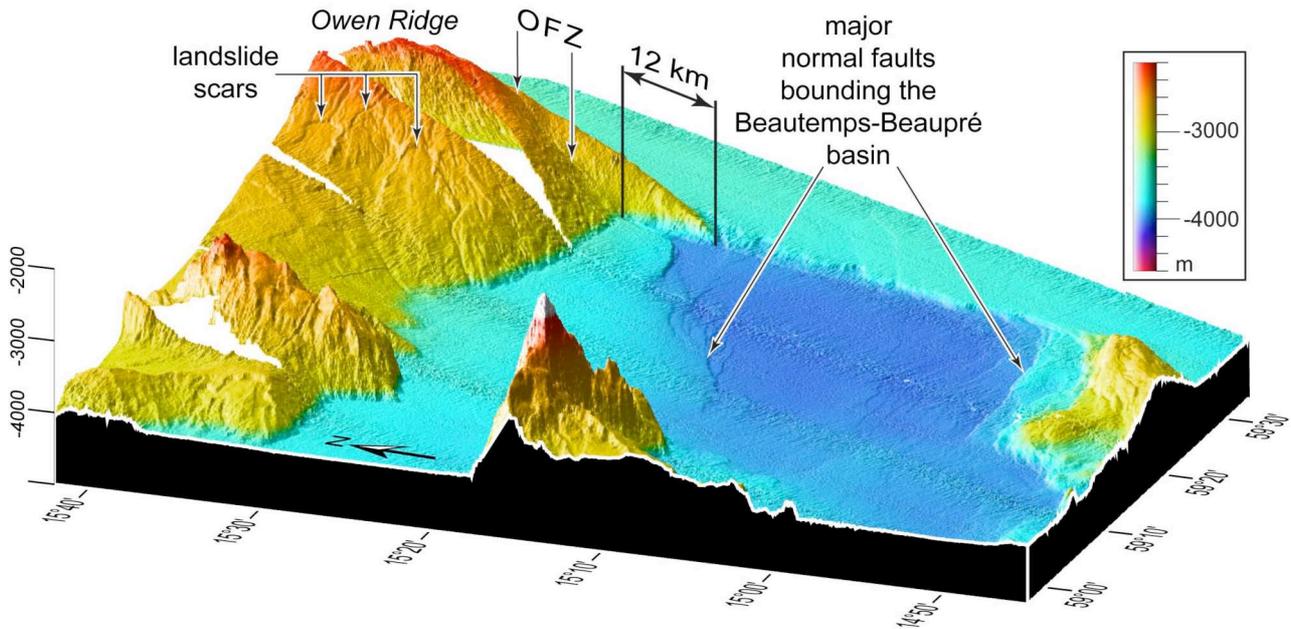


Figure 5b. Vue en perspective du bassin Beautemps-Beaupré à l'extrémité sud de la ZFO. La faille active décale la ride d'Owen de manière dextre sur 12 km. Elle se termine au sud dans un bassin bordé par des failles normales de direction N70°E à N90°E. L'activité sismique des failles a vraisemblablement déclenché d'importants glissements de terrains sous-marins dont les cicatrices sont observables sur les pentes bordières du bassin.

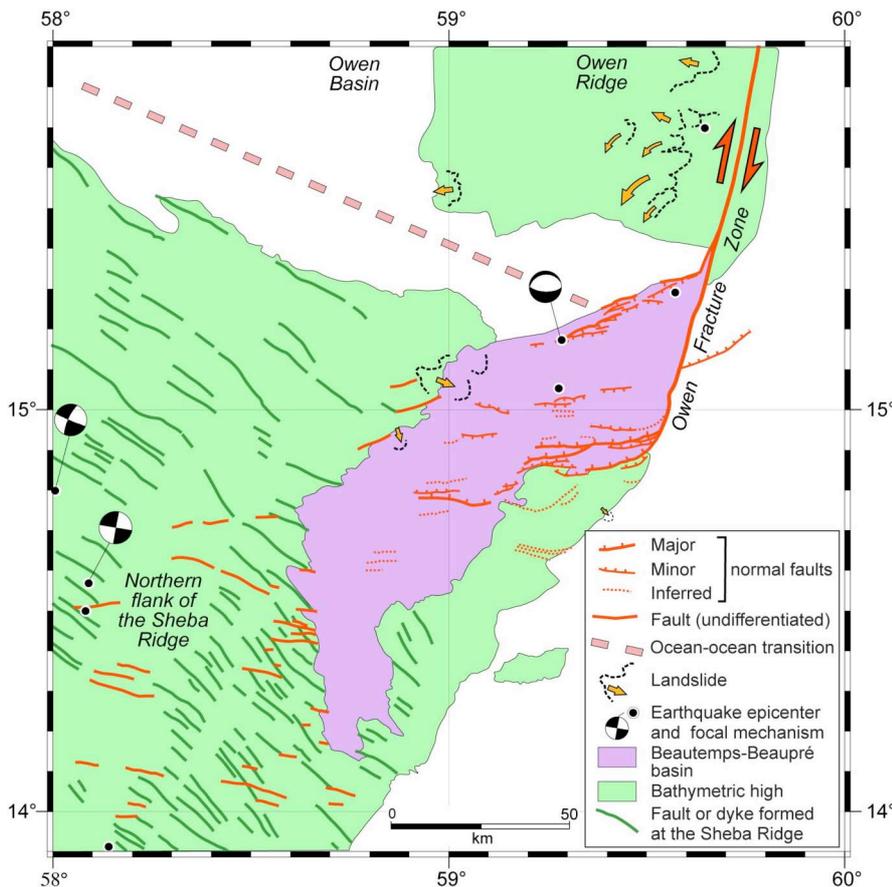


Figure 5c. Carte structurale du bassin Beautemps-Beaupré et de l'extrémité sud de la ZFO. La ZFO se termine au sud dans le bassin Beautemps-Beaupré large de 50 km et long de 120 km. Le bassin Beautemps-Beaupré s'est nucléé dans la zone de transition entre l'ancienne lithosphère océanique du bassin d'Owen, d'âge indéterminé, et la lithosphère océanique formée à la dorsale de Sheba depuis le Miocène. Le rifting s'est initié entre 3 et 8 Ma et se propagé vers l'Ouest dans le flanc nord de la dorsale de Sheba, comme le suggère l'observation de failles E-W dans la croûte océanique à l'ouest du bassin. De nombreuses cicatrices de glissement de terrain probablement déclenchés par des séismes sont observées sur les pentes au voisinage du bassin.

La ZFO, c'est-à-dire la frontière de plaque Arabie-Inde, se termine donc dans le bassin Beautemps-Beaupré à environ 250 kilomètres au nord de la frontière Arabie-Somalie (dorsale de Sheba). La déformation extensive au niveau du bassin semble se propager à l'Ouest dans la lithosphère océanique, mais elle n'atteint pas encore le rift axial de la dorsale. **Le point triple Arabie-Inde-Somalie (point triple AOC) est donc actuellement une zone de déformation diffuse, qui semble correspondre à un état transitoire avant l'établissement d'une nouvelle frontière divergente** (encarts de la fig. 7).

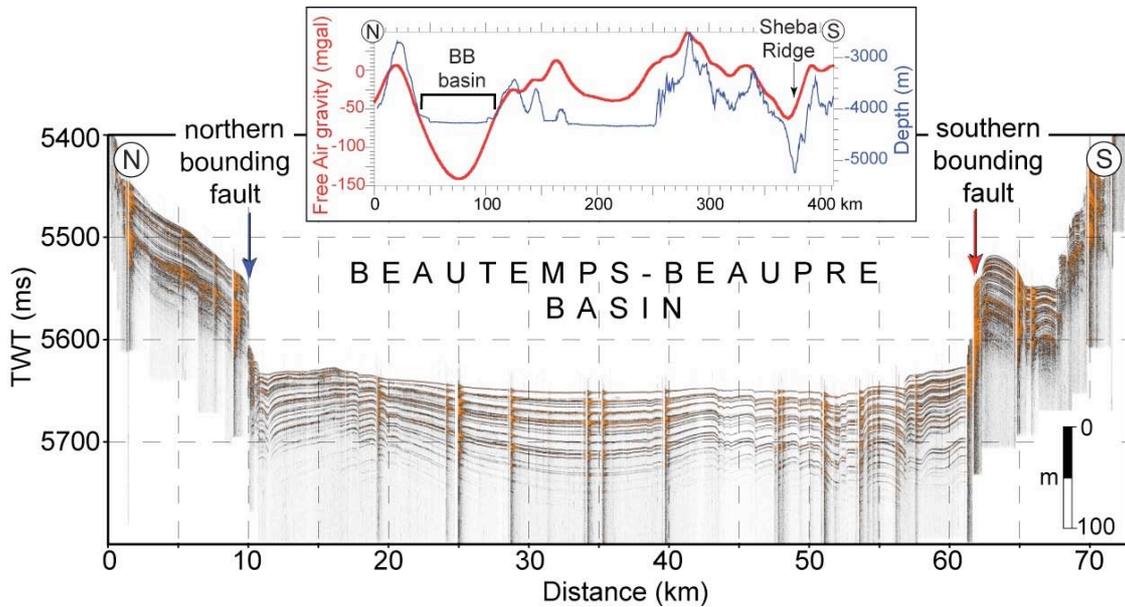


Figure 6. Profil sismique de sub-surface (sondeur 3.5 kHz) à travers le bassin Beautemps-Beaupré et (en haut) profil de l'anomalie gravimétrique à l'air libre (en rouge) superposé à la bathymétrie (en bleu) à travers le bassin et le flanc nord de la dorsale de Sheba (localisation des profils en fig. 3). Le bassin est limité par deux failles normales majeures présentant un rejet vertical de ~100 m. Le dépôt-centre actuel du bassin est marqué par de nombreuses failles normales dans la partie sud du bassin. Le bassin se caractérise par une forte anomalie gravimétrique négative d'environ 100 mgal par rapport au plancher océanique environnant.

La ZFO est une frontière ultra-lente dont le mouvement est mal contraint et dont les solutions GPS récentes prédisaient un mouvement allant de sénestre à dextre transpressif ou transtensif. Nous avons testé si la solution ITRF2005 fournissait une solution plus robuste en accord avec nos données. Trois jeux de données indépendants (les mesures GPS, les mécanismes au foyer des séismes, les données bathymétriques multi-faisceaux) indiquent que la ZFO est une frontière purement décrochante qui suit un petit cercle centré sur le pôle de rotation Arabie-Inde (Figure 7 ; Fournier et al., 2001 ; 2008). Le meilleur pôle prédit un mouvement de 2-4 millimètres par an le long de la ZFO. Dans l'hypothèse d'un mouvement stationnaire, l'âge de la faille active découverte pendant la campagne AOC — obtenu en divisant son rejet (12 km) par sa vitesse (2-4 mm/an) — serait de 3-6 Ma. Cet âge est significativement plus jeune que la dernière réorganisation cinématique régionale dans l'Océan Indien qui correspond à l'initiation de la déformation intra-plaque au sud de l'Inde il y a 8 Ma (Cochran, 1990) et à un changement de cinématique de la dorsale de Carlsberg à peu près à la même époque (Merkouriev et DeMets, 2006). Un scénario où le mouvement de la faille démarrerait il y a 8 Ma et augmenterait progressivement de 0 à 3 mm/an reste compatible avec les données GPS et bathymétrique et est en meilleur accord avec la tectonique régionale. Ainsi, le changement de configuration du point triple AOC, synchrone de l'apparition de la faille active et du bassin Beautemps-Beaupré, débiterait vers 8 Ma et se poursuivrait actuellement (encarts de la fig. 7).

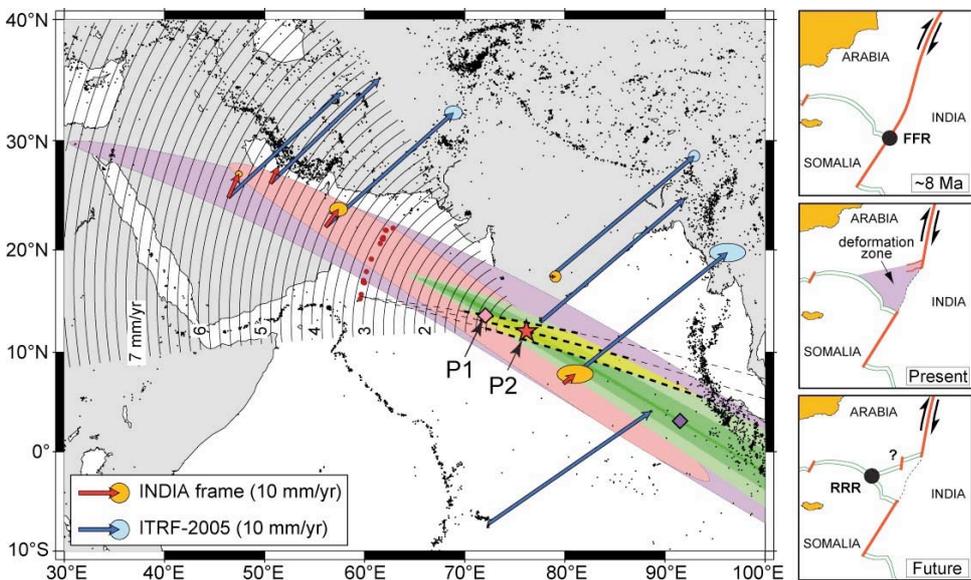


Figure 7. Cinématique GPS Arabie-Inde. Les flèches bleues et rouges montrent respectivement les vitesses de plaques (solution ITRF2005 avec des stations GPS permanentes) dans le référentiel initial et dans le référentiel Inde fixe. Le pôle de rotation Arabie-Inde P1 a été déterminé à partir des données GPS uniquement et le meilleur pôle P2 en prenant en compte les séismes le long de la ZFO et l'azimut de la faille décrochante active cartographiée pendant la campagne AOC.

> Evolution de la frontière Arabie-Inde

L'histoire de la frontière Arabie-Inde — initialement frontière entre l'Afrique-Arabie et l'Inde — commence avec l'éclatement de la Pangée au Jurassique moyen dans cette zone (ouverture du bassin de Somalie) et se poursuit avec la fermeture de la Téthys par convergence de l'Afrique et de l'Inde vers l'Eurasie. Plusieurs événements géodynamiques successifs ont affecté l'évolution cette frontière (Fig. 8) :

(1) L'ouverture du bassin somalien à partir du Jurassique moyen (~160 Ma) séparant le bloc Madagascar-Inde du bloc Afrique-Arabie.

(2) La séparation de Madagascar et du bloc Seychelles-Inde au Crétacé supérieur (83 Ma, âge de la plus ancienne anomalie A34 dans le bassin des Macareignes ; Schlich, 1982 ; Dyment, 1991), la remontée rapide vers le nord de l'Inde, et la mise en place des ophiolites de Masirah sur la marge est-omanaise dans l'intervalle Maestrichtien supérieur-Paléogène (66-56 Ma ; Fig. 8a). Cet événement est distinct de l'obduction des ophiolites d'Oman (ophiolites de Samail ; Fig. 8a) au Turonien moyen-Santonien (91-83 Ma ; Coleman, 1981).

(3) La mise en place de la dorsale de Carlsberg au début du Tertiaire, suivie par une période de convergence relative Inde-Arabie vers 45 Ma (Royer et al., 2002), vraisemblablement absorbée par subduction d'une partie du plancher océanique indien au niveau de la frontière Arabie-Inde.

(4) Le rifting dans le golfe d'Aden qui débute à l'Oligocène (~30 Ma) et se poursuit par l'accrétion océanique initiée vers 20 Ma dans le golfe d'Aden oriental (Fig. 8b).

(5) La collision de la plaque Arabie avec l'Eurasie qui débute vers 25 Ma au niveau du Zagros (Figs. 8b et 8c ; Agard et al., 2005).

La frontière Arabie-Inde a donc été successivement une marge passive au Jurassique, une zone d'obduction à la transition K/T, éventuellement une zone de subduction au début du Tertiaire, puis une marge transformante dont le sens s'est inversé de sénestre à dextre au Miocène. De plus, la limite de plaque s'est déplacée d'ouest en est, puisqu'elle se situait le long de la marge continentale Arabe à la transition K/T, quand se sont mises en place les ophiolites de Masirah, avant de migrer 200 km à l'est au niveau de la ZFO à une période indéterminée entre la transition K/T et le Miocène inférieur. Plus récemment la frontière s'est localisée au niveau de la faille active découverte pendant la campagne AOC.

L'évolution de cette frontière de plaque à géométrie variable nécessite d'être mieux contrainte par une connaissance approfondie de sa structure crustale et de la géométrie du Moho de part et d'autre des principales discontinuités, depuis la ZFO jusqu'à la marge continentale de l'Arabie.

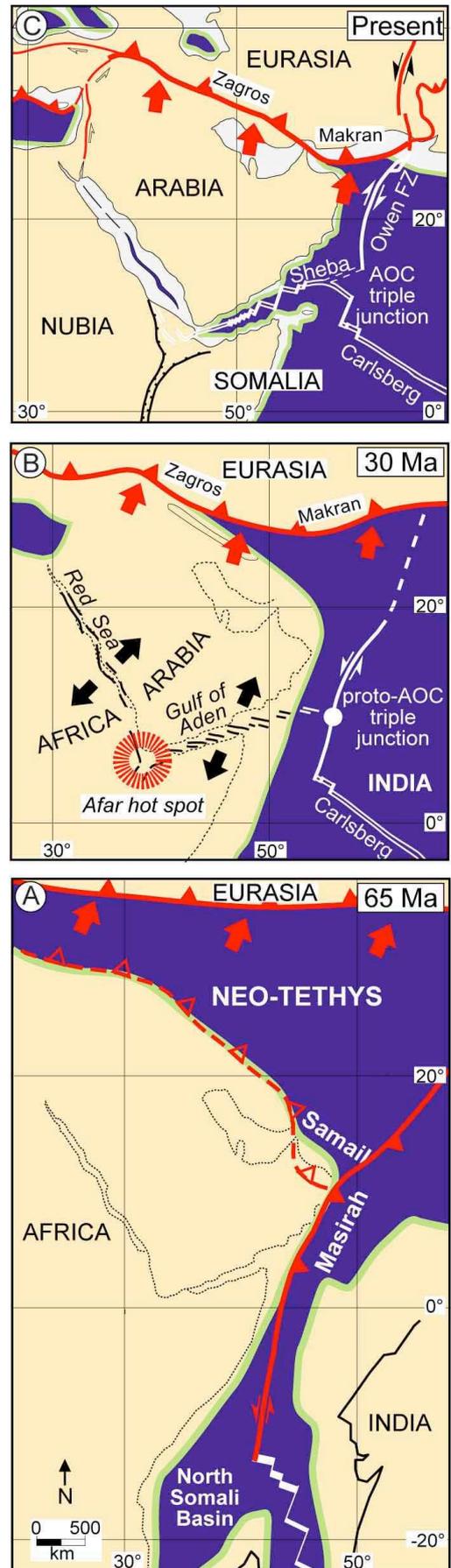


Figure 8. Evolution géodynamique de la frontière de plaques Arabie-Inde depuis la transition K/T (d'après Dercourt et al., 1993 ; Stampfli et Borel, 2002).

➤ Enregistrement à terre de l'évolution Néogène de la frontière de plaque ?

Les observations de terrain en Oman montrent que les formations Miocène sont affectées par une compression E-W à NE-SW qui s'exprime par des plis et des failles inverses et décrochantes. Elle est enregistrée sur toute la bordure orientale de l'Oman depuis les montagnes d'Oman au nord jusqu'à la marge passive du golfe d'Aden au sud (Fournier et al., 2004, 2006) et en particulier dans les formations Eocène de l'île de Masirah, qui reposent sur les ophiolites (Fig. 9; unpublished data). Le début de la compression est daté de la fin du Miocène inférieur avec l'inversion de la faille de Qalhat au voisinage de Sur (Wyns et al., 1992). Au Miocène supérieur-Pliocène, la direction de compression évolue d'ENE-WSW à N-S.

L'origine de cette compression E-W est mal comprise. Sa direction est très oblique par rapport à la direction de convergence Arabie-Eurasie et peut difficilement être reliée à la collision au Zagros. Elle pourrait être liée à l'évolution Miocène de la frontière de plaque Arabie-Inde.

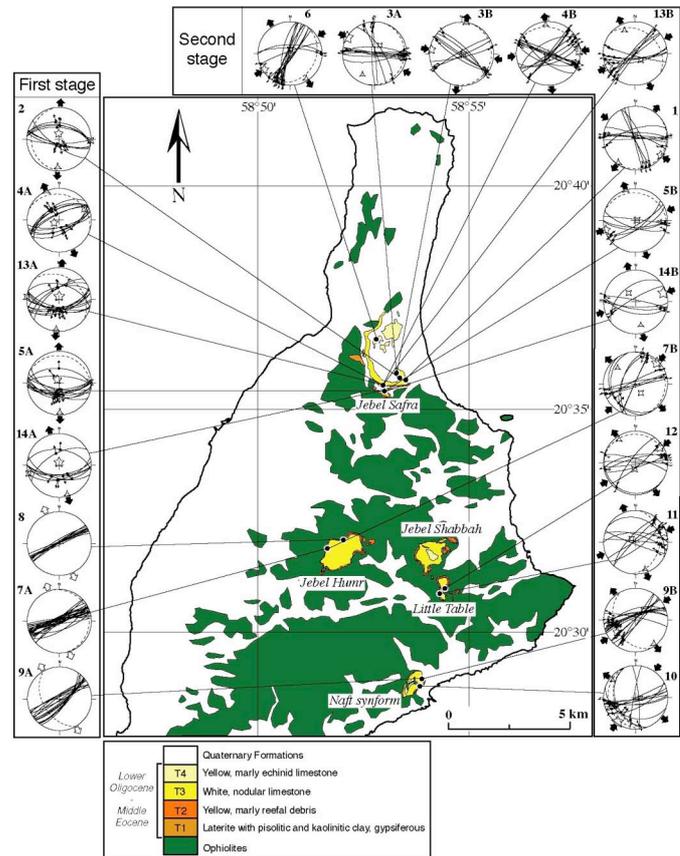


Figure 9. Deux phases de déformation successives sont enregistrées dans les formations éocènes de Masirah. La compression E-W à NE-SW est postérieure à l'extension N150°-N180°E du golfe d'Aden. L'île de Masirah est localisée en Fig. 2.

❑ Stabilité ou variabilité des grandes failles aux frontières de plaques

Le caractère permanent ou transitoire des grandes failles transformantes a été abordé de façon récurrente par les géologues de terrain en domaine continental. La structure crustale de certaines de ces failles (e.g., faille de San Andreas, faille du Levant) a été étudiée par sismique (Holbrook et al., 1996 ; Weber et al., 2004). Le problème principal qui est posé est celui de l'évolution et donc de la durée de vie de ces grandes structures : peuvent-elles disparaître au cours des temps géologiques – quand le mouvement qui leur a donné naissance s'annule – ou bien restent-elles des zones de faiblesse permanentes prêtes à rejouer au moment des grandes crises tectoniques ? Les méthodes modernes d'analyse tant géologiques que géophysiques (datations, forages, sismique, géodésie) ont mis en évidence une grande hétérogénéité spatiale au niveau de ces grandes failles (Ben-Zion and Sammis, 2003 ; Le Pichon et al., 2005) : la faille naît éventuellement à la limite d'une discontinuité lithosphérique, puis les ruptures répétées finissent par juxtaposer des matériaux de nature très variable de part et d'autre, en particulier en domaine continental. Des réseaux de failles parallèles peuvent alors jouer alternativement ou simultanément ("couloir" décrochant).

Pourquoi étudier une frontière transformante en mer, et pourquoi la faille d'Owen ?

- À l'instar d'autres grandes zones de fracture en domaine océanique comme le *Macquarie Ridge Complex* à la frontière Australie-Pacifique (Massel et al., 2000 ; Lebrun et al., 2003), la zone de fracture Rivera dans le Pacifique central (Michaud et al., 1997), ou la zone de fracture de la Romanche (Sage et al., 2000), la zone de fracture d'Owen est de dimension comparable aux grandes failles transformantes intracontinentales (de l'ordre de 1000 km). **Les processus physiques**

impliqués sont donc similaires. Sa localisation actuelle en domaine océanique au pied de la marge continentale, c'est-à-dire dans un milieu relativement homogène, permet de s'affranchir des effets complexes de « l'héritage structural » contrairement aux sutures continentales qui résultent généralement d'une succession de phases géologiques très anciennes. En effet, par opposition au domaine continental, il y a un consensus sur la rhéologie de la lithosphère océanique (e.g., Watts and Burov, 2003). Même dans l'hypothèse où la ZFO réactiverait une ancienne zone de fracture océanique, l'effet de l'héritage serait beaucoup moins complexe qu'un domaine continental.

- Elle forme la limite entre deux des grandes plaques lithosphériques, l'Inde et l'Arabie. **La zone de fracture d'Owen est donc une structure majeure qui a valeur de frontière lithosphérique localisée**, il ne s'agit pas d'une faille accommodant une déformation diffuse comme souvent en domaine continental.
- **Les conditions aux limites sont connues grâce aux reconstructions du mouvement Inde-Arabie** (Afrique) déduites des anomalies magnétiques. On a rarement accès aux détails de la cinématique passée en domaine continental.
- **Le tracé actuel de la faille active est facilement identifiable**, tant sur le plan morphologique (miroir de faille cartographié lors de la campagne AOC) que sismique (séismes sur la faille uniquement). Le jeu est dextre pur le long d'un petit cercle du mouvement Inde-Arabie, et de l'ordre de 3-4 mm/an. Ce mouvement est parfaitement détecté par la solution géodésique la plus récente (ITRF-2005).
- A moins de maintenir ce mouvement relatif Inde-Arabie constant sur une très grande période de temps – ce que l'on sait être faux – la trace de la faille a donc nécessairement évolué au cours du temps. La faille s'est probablement installée initialement à la limite lithosphère océanique – lithosphère continentale étirée. Or, la trace active se situe aujourd'hui à plus de 200 km à l'est de cette limite. **Il y donc eu migration de la faille au cours du temps** avec abandon progressif des anciennes traces au niveau du bassin d'Owen.
- On peut espérer caractériser cette migration (où, quand, voire comment) à l'aide de profils sismiques imageant les sédiments et la croûte, en corrélant les profils sismiques avec les forages DSDP et ODP pour dater les horizons : **les déformations liées à cette migration ont pu être enregistrées dans les sédiments, dans la structure de la croûte, dans la position du Moho.**

□ Objectifs de la campagne Owen

Les reconstitutions géodynamiques montrent que la localisation et la cinématique de la frontière Arabie-Inde ont changé au cours du temps. La campagne AOC a confirmé cette analyse en montrant de façon spectaculaire qu'une faille récente recoupait la ride topographique d'Owen qui borde la ZFO, ce qui met en évidence un polyphasage avec une phase de création de relief antérieure au jeu purement décrochant observé actuellement.

La campagne Owen a pour objectifs de déterminer :

1. Le tracé de la faille active au niveau de la zone de fracture d'Owen

La faille active récemment découverte représente la frontière de plaque actuelle. Notre premier objectif est de poursuivre sa reconnaissance vers le Nord jusqu'au fossé de Dalrymple pour préciser sa géométrie. Des profils de bathymétrie multifaisceaux le long de la zone de fracture sont nécessaires pour cartographier précisément son tracé et de quantifier des décalages finis tels que ceux observés lors de la campagne AOC.

2. L'âge de la croûte océanique du bassin d'Owen à l'aide des anomalies magnétiques

De profils magnétiques dans le bassin d'Owen, orientés parallèlement et perpendiculairement à la marge, viendront compléter les données existantes et permettront peut-être de préciser son âge. De plus, les relevés magnétiques à l'est de la ZFO seront utilisés pour identifier les plus anciennes anomalies de la mer d'Arabie. À l'heure actuelle, la plus vieille anomalie reconnue est l'anomalie 27 (61 Ma), mais il existe des anomalies plus anciennes encore mal identifiées (cf. Royer et al., 2002).

3. La géométrie en profondeur de la zone de fracture d'Owen et du Moho de part et d'autre

Des profils de sismique multitrace et de gravimétrie perpendiculaires à la ZFO mettront en évidence sa géométrie profonde (pendage, enracinement) et la structure crustale (épaisseur, nature de la croûte) de part et d'autre de la faille.

4. L'origine des reliefs qui jalonnent la zone de fracture d'Owen

La sismique multitrace permettra de déterminer si les reliefs bordant la ZFO sont associés à une phase de compression (sédiments plissés, failles inverses), ou à une grande faille normale comme le suggèrent les profils sismiques du Leg DSDP 23, ou encore à des édifices volcaniques.

5. La structure du bassin d'Owen et de la marge continentale Arabe

La structure du bassin d'Owen et de la marge Arabe seront caractérisées grâce à l'analyse conjointe des données de sismique multitrace, de gravimétrie et de magnétisme : principales discontinuités, géométrie des corps sédimentaires (datés par corrélations avec les forages), nature de la croûte sous-jacente.

6. L'évolution tectonique de la frontière de plaques Arabie/Inde

In fine, les données structurales et cinématiques seront utilisées pour reconstituer un calendrier tectonique de cette frontière de plaques, et notamment pour caler dans le temps (1) l'âge du saut de frontière depuis la marge omanaise jusqu'à la zone de fracture d'Owen et (2) l'âge de la localisation de la frontière actuelle sur la faille active. **Nous espérons ainsi mieux comprendre quels sont les facteurs qui favorisent la pérennité d'une faille ou d'un couloir de faille en limite de plaque ou au contraire qui provoquent sa migration au cours du temps.** On déterminera aussi la relation entre la compression Miocène observée à terre et l'évolution de la frontière de plaque.

Pour atteindre ces objectifs, nous proposons d'acquérir des données bathymétriques, gravimétriques, magnétiques, et des profils 3.5 kHz (pour identifier les failles actives) le long de la ZFO et dans le bassin d'Owen, ainsi que des profils de sismique réflexion multitrace dans le bassin d'Owen le long de plusieurs transects allant de la marge continentale arabe à l'ouest jusqu'à la ZFO à l'Est.

□ Bibliographie

- Agard P., J. Omrani, L. Jolivet and F. Mouthereau 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94, 401-419, DOI 10.1007/s00531-005-0481-4.
- Barton, P. J., T. R. E. Owen and R. S. White, The deep structure of the east Oman continental margin: preliminary results and interpretation, *Tectonophys.*, 173, 319-331, 1990.
- Beauchamp, W. H., A. C. Ries, M. P. Coward, and J. A. Miles, Masirah graben, Oman: a hidden Cretaceous rift basin, *AAPG Bull.*, 79, 864-879, 1995.
- Ben-Zion, Y., and C.G. Sammis, Characterization of fault zones, *Pure and Applied Geophysics*, 160, 677-715, 2003.
- Beurrier, M. 1987. Géologie de la nappe ophiolitique de Semail dans les parties orientales et centrales de l'Oman, Thèse Doc. Etat, Univ. Paris 6, 406 pp.
- Chaubey, A.K, Dymant, J., Bhattacharya, G.C., Royer, J.-Y., Srinivas, K. and Yatheesh, V., 200, Paleogene magnetic isochrons and paleo-propagators in the Arabian and Eastern Somali basins, Northwest Indian Ocean. In: P. Clift, D. Kroon, C. Gaedicke and J. Craig (eds), *The Tectonic & Climatic Evolution of the Arabian Sea Region*. Geological Society Special Publication, v. 195, p. 71-85.
- Cochran, J.R. (1988) Somali Basin, Chain Ridge, and origin of the Northern Somali Basin gravity and geoid low, *J. Geophys. Res.*, **93**, 11,985-12,008.
- Cochran, J.R. Himalayan uplift, sea level, and the record of Bengal Fan sedimentation at the ODP LEG 116 Sites. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* **116**, 397-414 (1990). Coleman, R.G. 1981. Tectonic setting for ophiolite obduction in Oman. *J. Geophys. Res.*, 86, 2497-2508.
- Delescluse M. & N. Chamot-Rooke. 2007. Instantaneous deformation and kinematics of the India-Australia plate, *Geophys. J. Int.*, 168 (2), doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03181.x
- DeMets, C., Arabia's slow dance with India, *Nature Geoscience*, 1, 10-11, doi:10.1038/ngeo.2007.56
- DeMets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus, S. Stein, Current plate motion, *Geophys. J. Int.* 101 (1990) 425-478.
- Dercourt J., Ricou, L.E., and Vrielynck, B., 1993, Atlas Tethys Palaeoenvironmental Maps: Gauthier-Villars, Paris, 307 pp.
- Dymant, J. 1991. Structure et évolution de la lithosphère océanique dans l'océan Indien : apport des anomalies magnétiques. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Edwards, R. A., T. Minshall, R. S. White, Extension across the Indian-Arabian plate boundary: the Murray Ridge, *Geophys. J. Int.*, 142, 461-477, 2000.
- Ellouz-Zimmermann, N., Lallemand, S., Castilla, R., Mouchot, N., Leturmy, P., Battani, A., Buret, C., Cherel, L., Desaubliaux, G., Deville, E., Ferrand, J., Luqcke, A., Mahieux, G., Mascle, G., Muhr, P., Pierson-Wickmann, A., Robion, P., Schmitz, J., Danish, M., Hasanv, S., Shahzad, A., Tabreez, A., 2007. Offshore frontal part of the Makran Accretionary prism: The Chamak survey (Pakistan). In: Lacombe, O., Lavé, J., Roure, F., Vergés, J. (Eds.). *Thrust Belts and Foreland Basins - From Fold Kinematics to Hydrocarbon System*, *Frontiers in Earth Science Series*, Springer Berlin Heidelberg, 351-366.
- Fournier, M., Chamot-Rooke, N., Petit, C., Fabbri, O., Huchon, P., Maillot, B. & Lepvrier, C. (2008), In-situ evidence for dextral active motion at the Arabia-India plate boundary, *Nature Geoscience*, 1, 54-58, doi:10.1038/ngeo.2007.24
- Fournier, M., Lepvrier, C., Razin, P., Jolivet, L. (2006), Post-obduction extension in the Oman Mountains and subsequent compression, *GeoArabia*, 11, 17-40.
- Fournier, M., N. Bellahsen, O. Fabbri, and Y. Gunnell (2004), Oblique rifting and segmentation of the NE Gulf of Aden passive margin, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5, Q11005, doi:10.1029/2004GC000731.

- Fournier, M., P. Patriat, and S. Leroy (2001), Reappraisal of the Arabia-India-Somalia triple junction kinematics, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 189, 103-114.
- Fournier, M., Petit, C., Chamot-Rooke, N., Fabbri, O., Maillot, B., Huchon, P. & Lepvrier, C. Do ridge-ridge-fault triple junctions exist on Earth? Probing the AOC junction in the Indian Ocean, *Basin Research (accepted with moderate revision)*
- Gaedicke, G., A. Prexl, H.-U. Schlüter, H. Meyer, H. A. Roeser, and P. Cliff, Seismic stratigraphy and correlation of major regional unconformities in the northern Arabian Sea, *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 195, 25-36, 2002a.
- Gaedicke, G., H.-U. Schlüter, H. A. Roeser, A. Prexl, B. Schreckenberger, H. Meyer, C. Reichert, P. Cliff and S. Amjad, Origin of the northern Indus Fan and Murray Ridge, Northern Arabian Sea: interpretation from seismic and magnetic imaging, *Tectonophysics*, 127-143, 2002b.
- Gnos, E., A. Immenhauser and T. Peters, Late Cretaceous/early Tertiary convergence between the Indian and Arabian plates recorded in ophiolites and related sediments, *Tectonophysics*, 271, 1-19, 1997.
- Gnos, E., and M. Perrin Formation and evolution of the Masirah ophiolite constrained by paleomagnetic study of volcanic rocks, *Tectonophysics*, 253, 53-64, 1996.
- Gordon, R.G., C. DeMets, Present-day motion along the Owen fracture zone and Dalrymple trough in the Arabian Sea, *J. Geophys. Res.*, 94, 5560-5570, 1989.
- Holbrook, W.S., T.M. Brocher, U.S. ten Brink, and J.A. Hole, Crustal structure of a transform plate boundary : San Francisco Bay and the central California continental margin, *J. Geophys. Res.*, 101, 22 311-22 334, 1996.
- Immenhauser, A. 1996. Cretaceous sedimentary rocks on the Masirah Ophiolite (Sultanate of Oman); evidence for an unusual bathymetric history, *J. Geol. Soc.*, 153, 539-551.
- Kopp, C., J. Fruehn, E. R. Flueh, C. Reichert, N. Kukowski, J. Bialas and D. Klaeschen, Structure of the Makran subduction zone from wide-angle and reflection seismic data, *Tectonophysics*, 329, 171-191, 2000.
- Kukowski, N., T. Schillhorn, K. Huhn, U. von Rad, S. Husen and E. R. Flueh, Morphotectonics and mechanics of the central Makran accretionary wedge off Pakistan, *Marine Geology*, 173, 1-19, 2001.
- Le Métour, J., E. Béchenec, J. Rabu, J.-P. Patel and R. Wyns 1992. Geological map of Al Masirah, Sheet NF 40-16, scale 1:250,000. Directorate General of Minerals, Oman Ministry of Petroleum and Minerals, Muscat Oman.
- Le Pichon X., C. Kreemer & N. Chamot-Rooke, 2005. Asymmetry in elastic properties and the evolution of large continental strike-slip faults, *J. Geophys. Res.*, 110 (B3): Art. No. B03405. doi : 10.1029/2004JB003343.
- Lebrun, J.-F., G. Lamarche, and J.-Y. Collot, Subduction Initiation at a Strike-Slip Plate Boundary: the Cenozoic Pacific - Australian Plate Boundary, South of New Zealand., *J. Geophys. Res.*, 108, B9, 2003.
- Massell, C., M. F. Coffin, P. Mann, S. Mosher, C. Frohlich, C. L. Schuur, G. D. Karner, D. Ramsay, and J. F. Lebrun, Neotectonics of the Macquarie ridge complex, Australia-Pacific plate boundary, *J. Geophys. Res.*, 105, 13457-13480, 2000.
- Merkouriev, S. DeMets, C. Constraints on Indian plate motion since 20 Ma from dense Russian magnetic data: Implications for Indian plate dynamics. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 7, Q02002, doi:10.1029/2005GC001079 (2006).
- Michaud F., J.-Y. Royer, J. Bourgois, B. M. and G.P. Liaudon (1997). The Rivera fracture zone revisited, *Marine Geology*, 137 (3-4), 207-225.
- Minshull, T. A., R. S. White, P. J. Barton and J. S. Collier, Deformation at plate boundaries around the gulf of Oman, *Marine Geology*, 104, 265-277, 1992.
- Mountain, G. S. and W. L. Prell 1990. A multiphase plate tectonic history of the southeast continental margin of Oman, In: Robertson, A. H. F., Searle, M. P. and Ries, A. C. (eds) the *Geology and Tectonics of the Oman Region*. *Geol. Soc. London Spec. Pub.* 49, 725-743.
- Peters, T. 2000. Formation and evolution of the western Indian Ocean as evidenced by the Masirah ophiolite: A review. In: Dilek, Y., Moores, E.M., Elthon, D. and Nicolas, A., eds. *Ophiolites and Oceanic crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program*. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 349, 525-536.
- Peters, T. and I. Mercolli 1997. Formation and evolution of the Masirah Ophiolite (Sultanate of Oman). *Ophioliti*, 22, 15-34.
- Peters, T. and I. Mercolli, Extremely thin oceanic crust in the Proto-Indian Ocean: Evidence from the Masirah Ophiolite, Sultanate of Oman, *J. Geophys. Res.*, 103, 677-689, 1998
- Peters, T., A. Immenhauser, I. Mercolli and J. Meyer 1995. Geological Map of Masirah North and Masirah South. Sheet K768-North and Sheet K768-South. Scale 1:50,000, with explanatory notes. Directorate General of Minerals, Oman Ministry of Petroleum and Minerals, Muscat Oman.
- Petit, C., M. Fournier, and Y. Gunnell, Tectonic and climatic controls on rift escarpments: Erosion and flexural rebound of the Dhofar passive margin (Gulf of Aden, Oman), *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2006JB004554, 2007, in press.
- Royer, J.-Y., Chaubey, A. K., Dymant, J., Bhattacharya, G. C., Srinivas, K., Yatheesh, V., and Ramprasad, T., 2002, Paleogene plate tectonic evolution of the Arabian and Eastern Somali basins. In: P. Cliff, D. Kroon, C. Gaedicke and J. Craig (eds), *The Tectonic & Climatic Evolution of the Arabian Sea Region*. *Geological Society Special Publication*, v. 195, p. 7-23.
- Sage F., C. Basile, J. Mascle, B. Pontoise and R. B. Whitmarsh (2000). Crustal structure of the continent-ocean transition off the Cote d'Ivoire-Ghana transform margin: implications for thermal exchanges across the palaeotransform boundary, *Geophys. J. Int.*, 143, 662-678.
- Schlich, R. 1982. The Indian Ocean: aseismic ridges, spreading centers and basins. In: Nairn, A.E.M. & Stehli, F.G. (eds) *The Ocean Basins and Margins*, 6, The Indian Ocean, New York, 51-147.
- Shackleton, R. M. and A. C. Ries 1990. Tectonics of the Masirah Fault Zone and eastern Oman. In: Robertson, A. H. F., Searle, M. P. and Ries, A. C. (eds) the *Geology and Tectonics of the Oman Region*. *Geol. Soc. London Spec. Pub.* 49, 715-724.
- Smewing, J.D., I. L. Abbotts, L.A. Dunne, D.C. Rex 1991. Formation and emplacement ages of the Masirah ophiolite, Sult. of Oman, *Geology* 19, 453-456.
- Stampfli, G.M. and G.D. Borel, 2002, A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 196, p. 17-33.
- Stein C.A., Cochran J.R., The transition between the Sheba ridge and the Owen basin: rifting of old oceanic lithosphere, *G. J. R. astr. Soc.*, 81, 47-74, 1985.
- Watts, A.B., E. Burov, Lithospheric strength and its relationship to the elastic and seismogenic layer thickness, *Earth Planet Sci. Letters*, 213, 113-131, 2003.
- Weber, M., and the DESERT Group, The crustal structure of the Dead Sea Transform, *Geophys. J. Int.*, 156, 655-681, 2004.
- Whitmarsh, R.B., 1974. Summary of general features of the Arabian Sea and Red Sea Cenozoic history based on Leg 23 cores. Initial report DSDP, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 23, 1115-1123.
- Whitmarsh, R.B., 1979. The Owen Basin off the south-east margin of Arabia and the evolution of the Owen Fracture Zone, *Geophys. J. R.*
- Wyns, R., Le Métour, J., Roger, J., and Chevrel, S., 1992, Geological map of Sur with Explanatory Notes, Sheet NF 40-08, Scale 1:250,000. Ministry of Petroleum and Minerals, Directorate General of Minerals, Muscat, Oman, 80 p.

PREMIERS RESULTATS

□ Bathymétrie

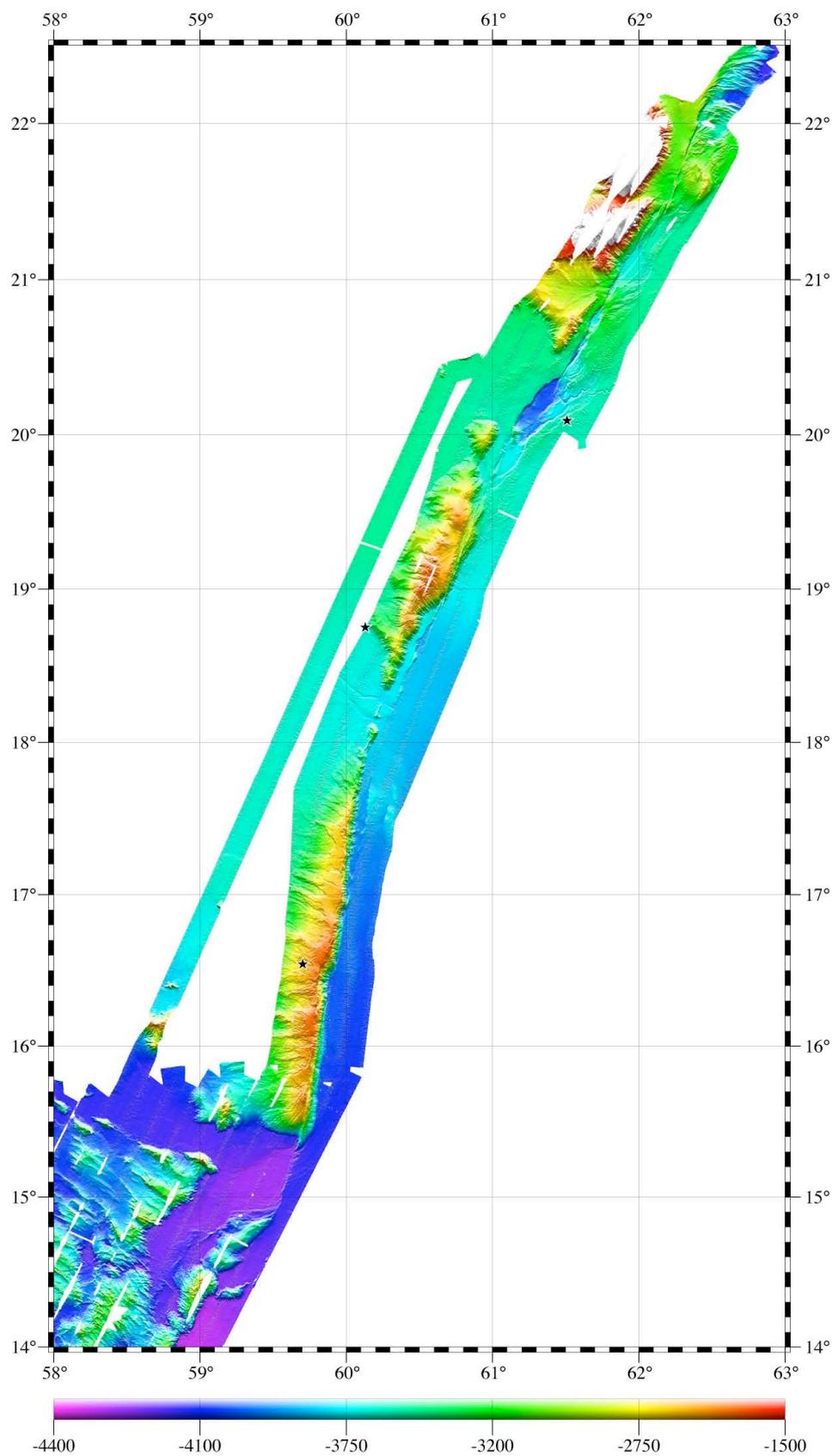


Figure 10. Couverture bathymétrique de l'ensemble de la zone Owen. La faille active est observée sur 800 km entre le bassin de Beautemps-Beaupré et le fossé de Dalrymple.

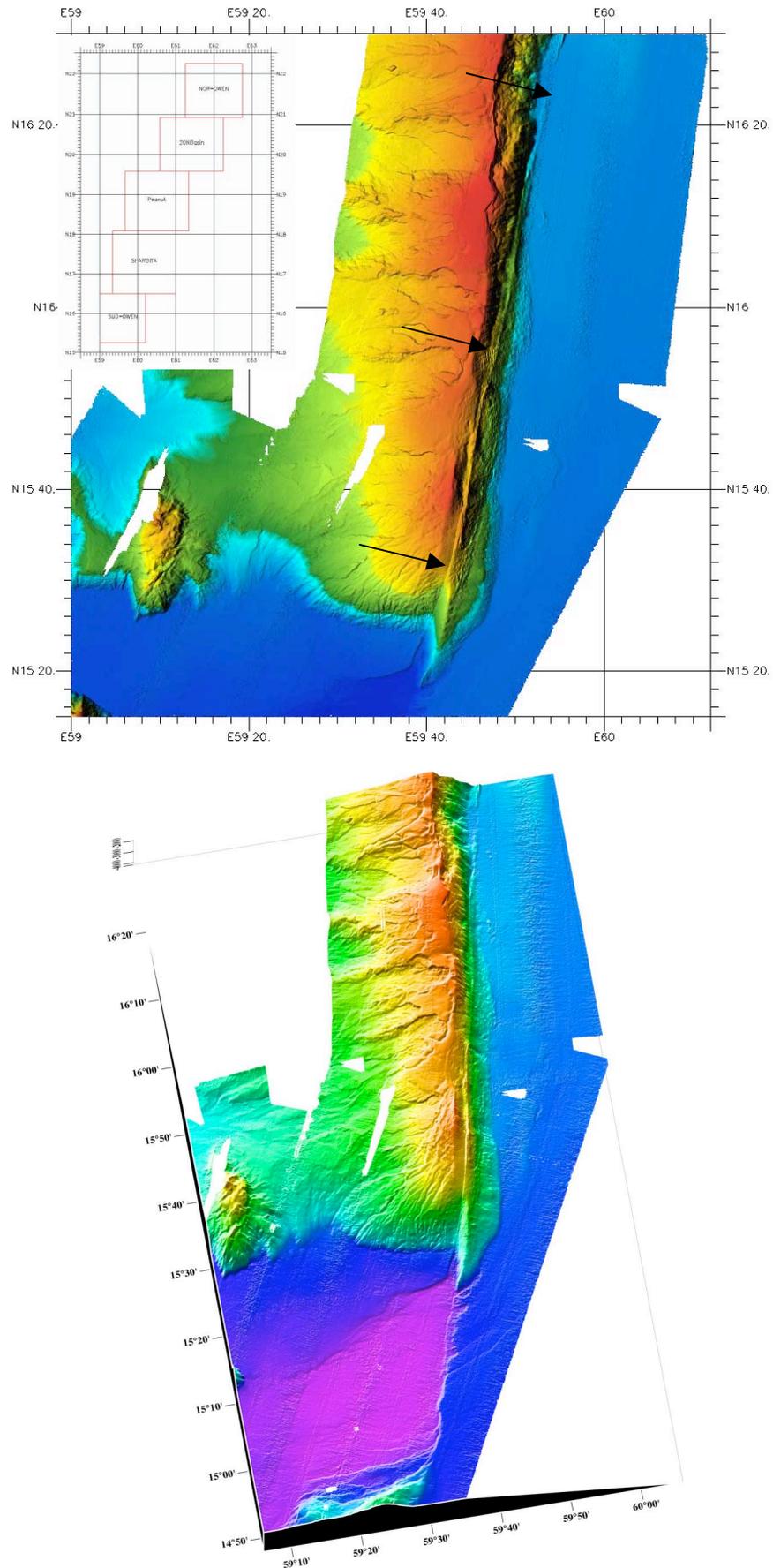


Figure 11. Vue en carte (haut) et bloc-diagramme 3D (bas) de la zone SUD-OWEN et de sa connexion avec le levé AOC (au sud). La faille décrochante est parfaitement rectiligne, orientée N10°E, et recoupe au sud la ride topographique d'Owen qu'elle décale de 12 km de manière dextre.

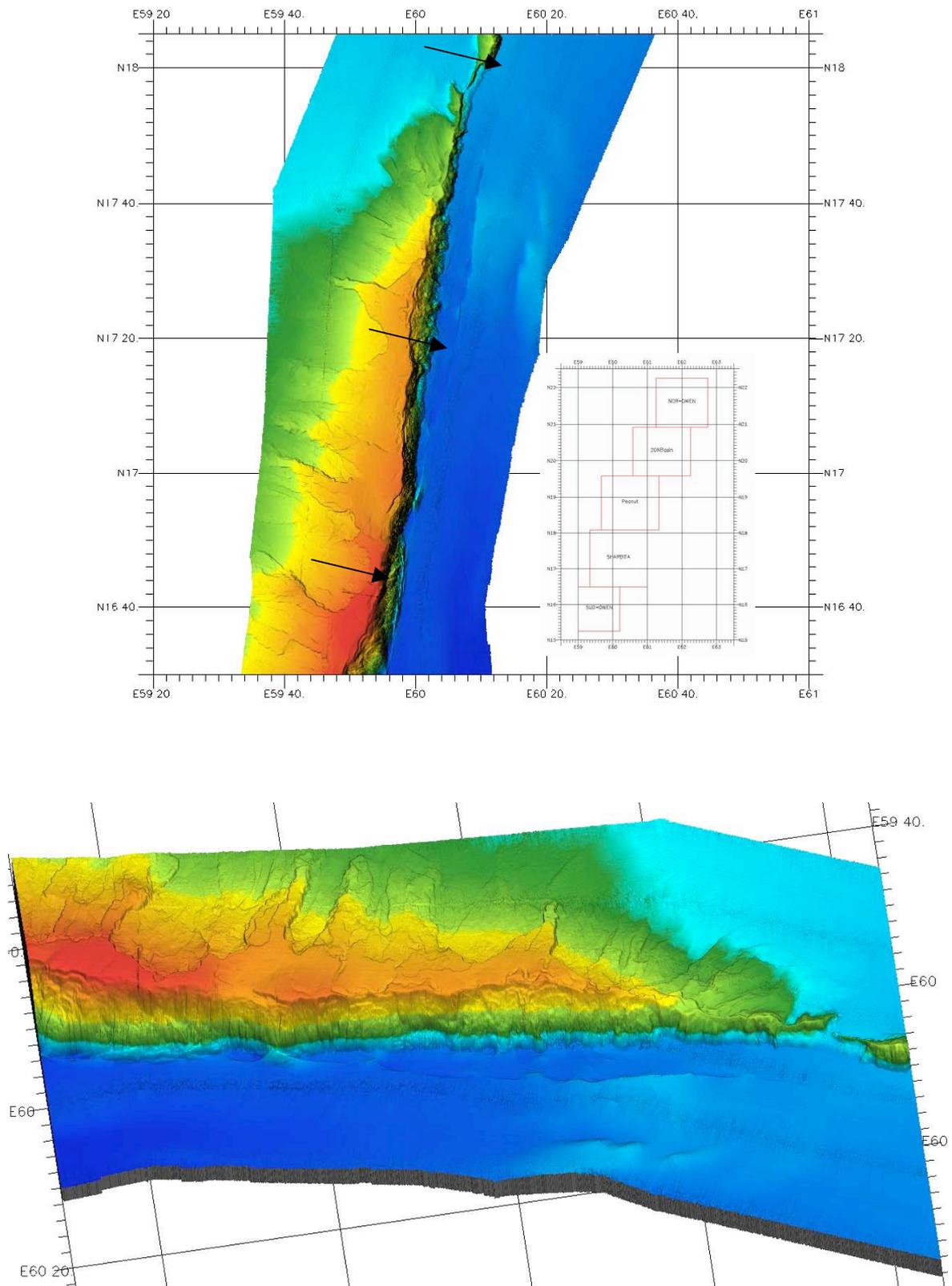


Figure 12. Vue en carte (haut) et bloc-diagramme 3D (bas) de la zone SHARBITAT. La faille décrochante suit le pied des reliefs de la ride d'Owen puis change légèrement d'orientation vers 17°30'N. Ce changement d'orientation est associé à la formation de petits reliefs à l'est dans la plaque indienne.

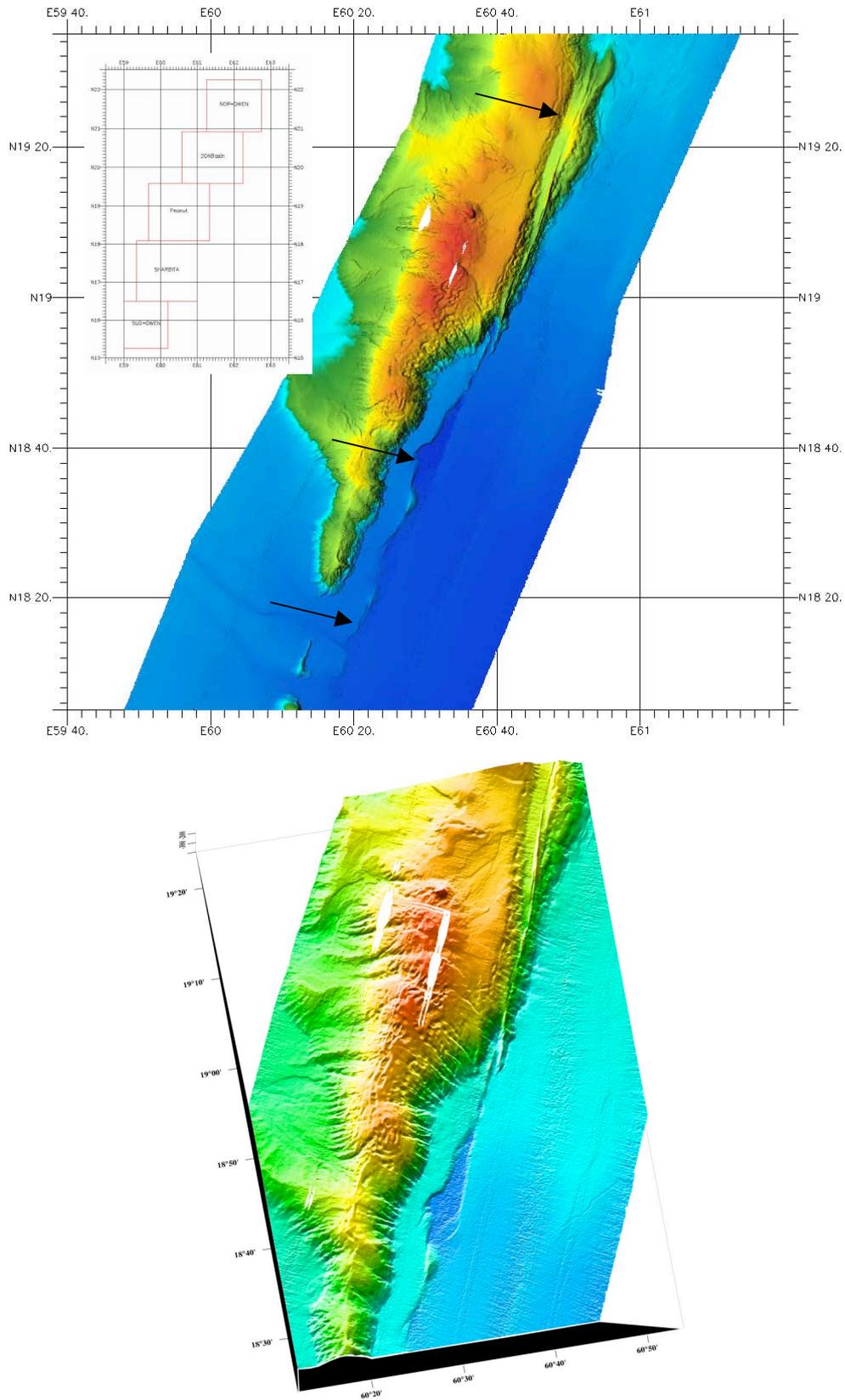


Figure 13. Vue en carte (haut) et bloc-diagramme 3D (bas) de la zone PEANUT. La faille franchit un relais extensif au niveau du bassin en pull-apart rhomboédrique de Peanut, puis reprend un tracé rectiligne en recoupant à nouveau le relief de la ride d'Owen. Le décalage dextre est de l'ordre de 10 km.

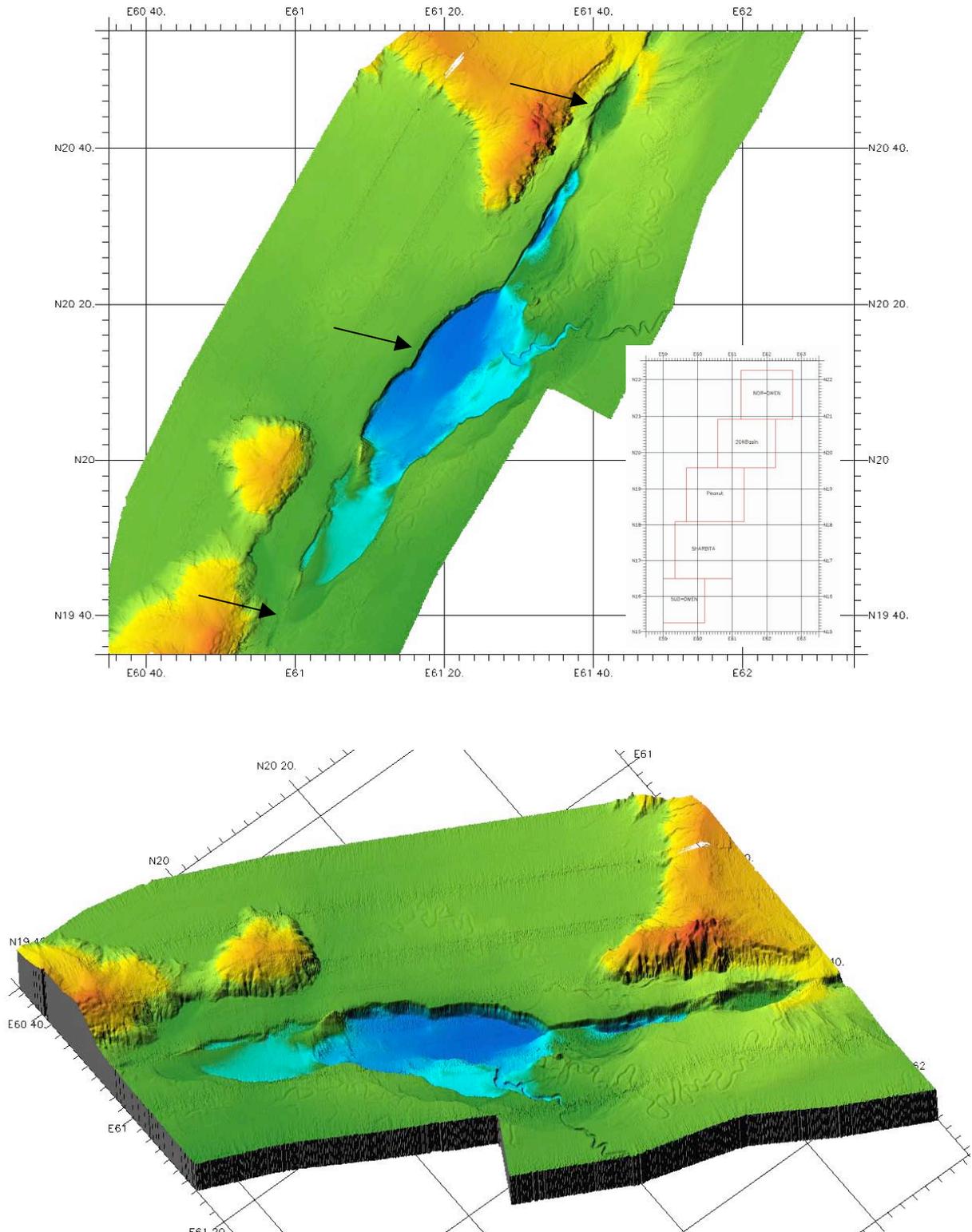


Figure 14. Vue en carte (haut) et bloc-diagramme 3D (bas) de la zone 20°N-BASIN. Un bassin en pull-apart de 80 km de long sur 30 km de large s'est développé au niveau d'un relais extensif de la zone de fracture d'Owen. Le bassin est alimenté par un chenal actif et érosif du deep-sea fan de l'Indus. Des chenaux méandriiformes abandonnés sont observables latéralement.

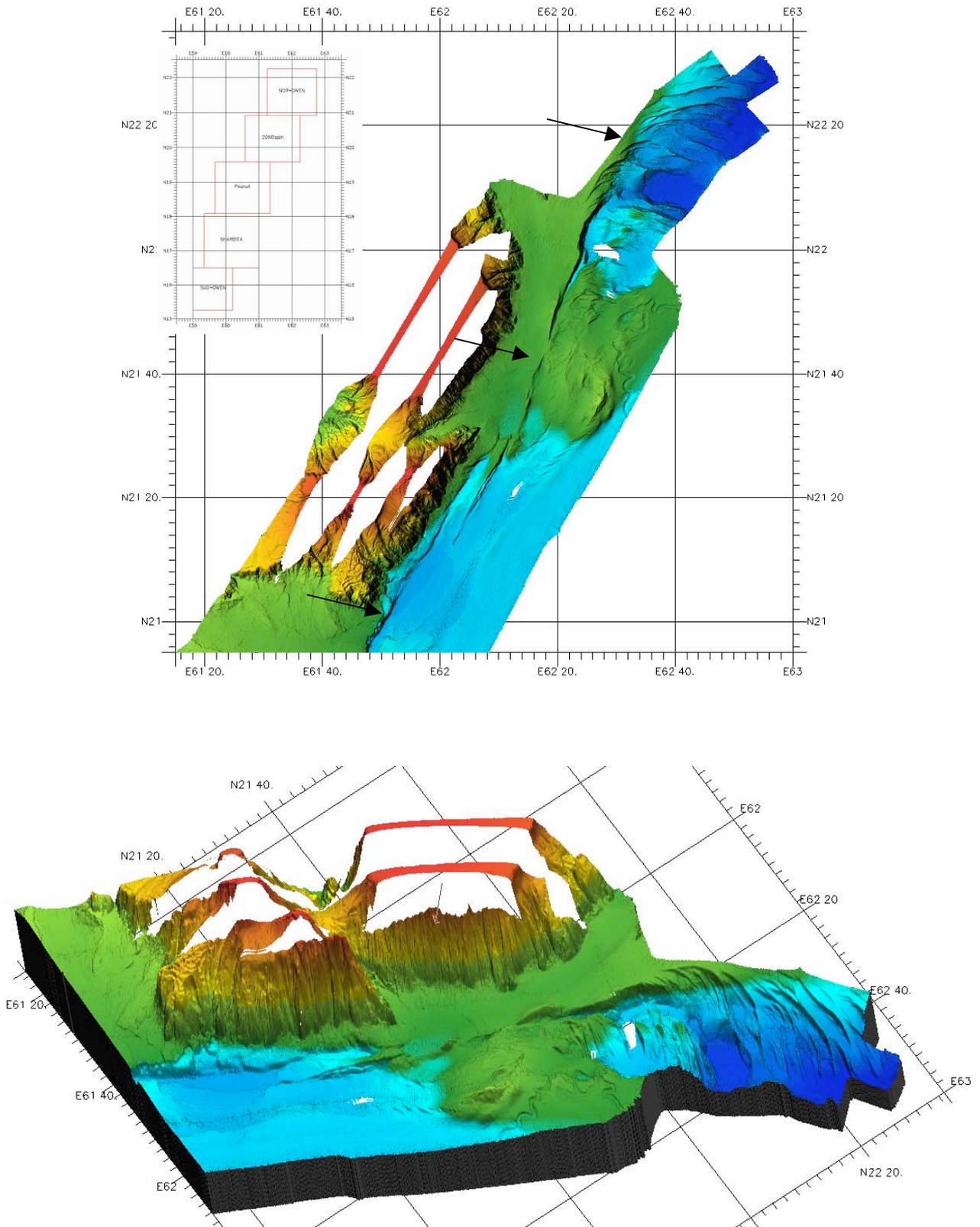


Figure 15. Vue en carte (haut) et bloc-diagramme 3D (bas) de la zone NORD. A l'extrémité nord de la zone d'étude, près de la limite sud du fossé de Dalrymple, la ZFO se termine par une spectaculaire structure en queue-de-cheval extensive.

□ Profils du sondeur de sédiments

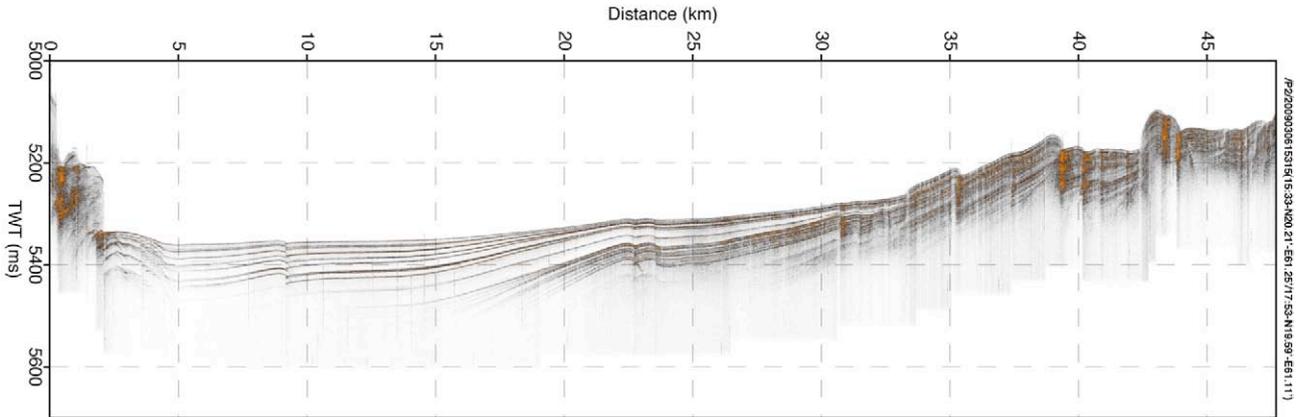


Figure 16. Profil SBP120 (nord à gauche) à travers le bassin 20°N montrant un basculement et un épaissement des séries vers le nord et de nombreuses failles normales dans la partie sud. Les turbidites du bassin sont caractérisées par leur faciès sismique transparent.

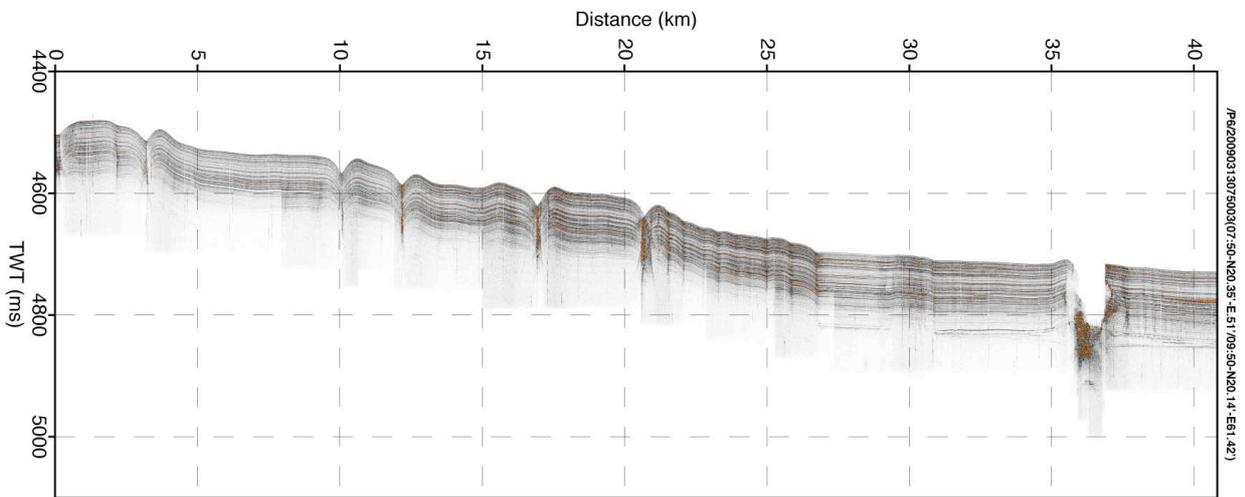


Figure 17. Profil SBP120 (nord à gauche) à l'est du bassin 20°N montrant le canyon actif à l'extrémité sud du profil et des canyons fossiles abandonnés plus haut sur la pente (partie gauche du profil).

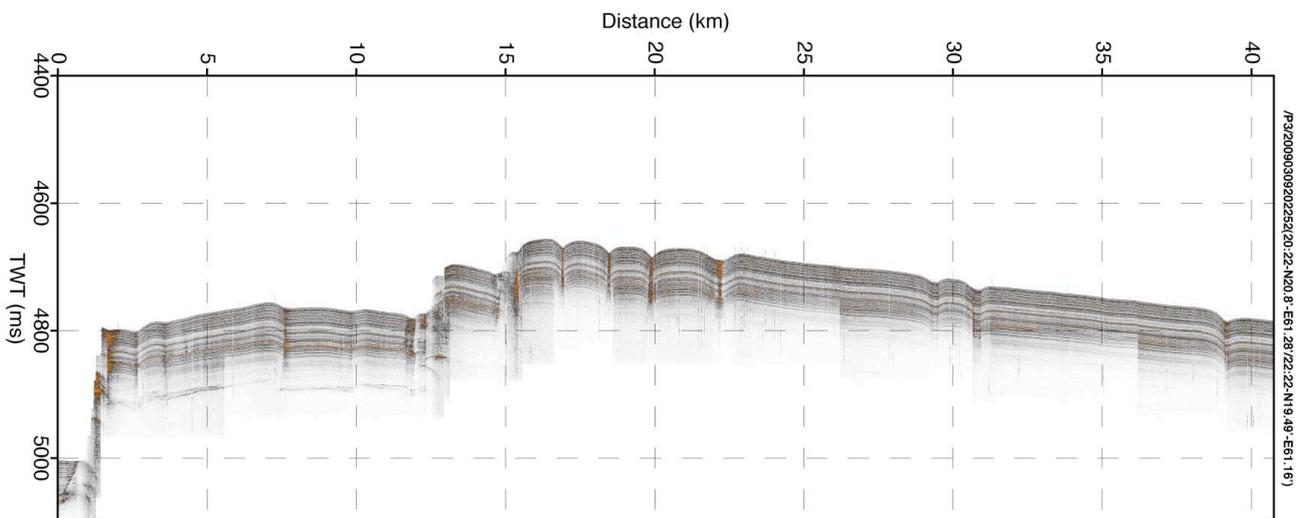


Figure 18. Profil SBP120 (nord à gauche) dans la partie sud du bassin 20°N montrant des failles normales à pendage nord et des chenaux fossiles sur le haut de la pente.

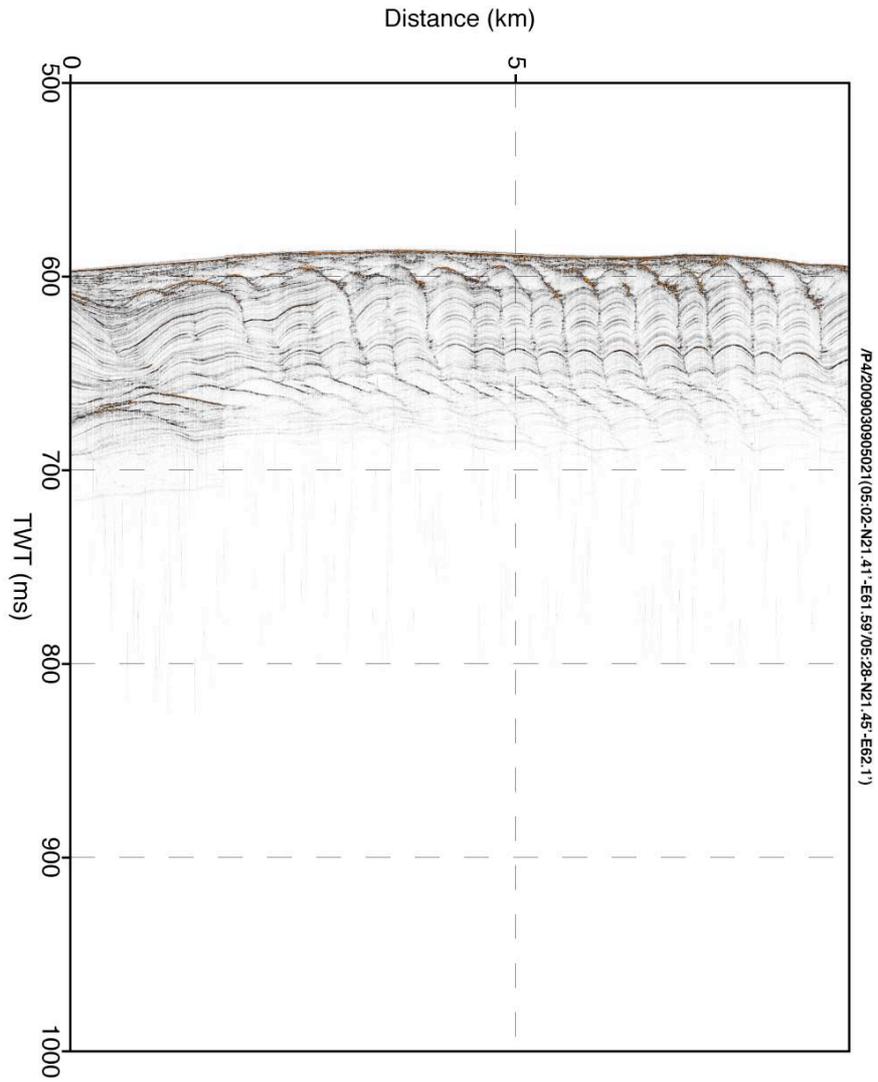


Figure 19. Dunes hydrauliques migrant vers le sud sur le sommet du mont Qalhat (sud à gauche).

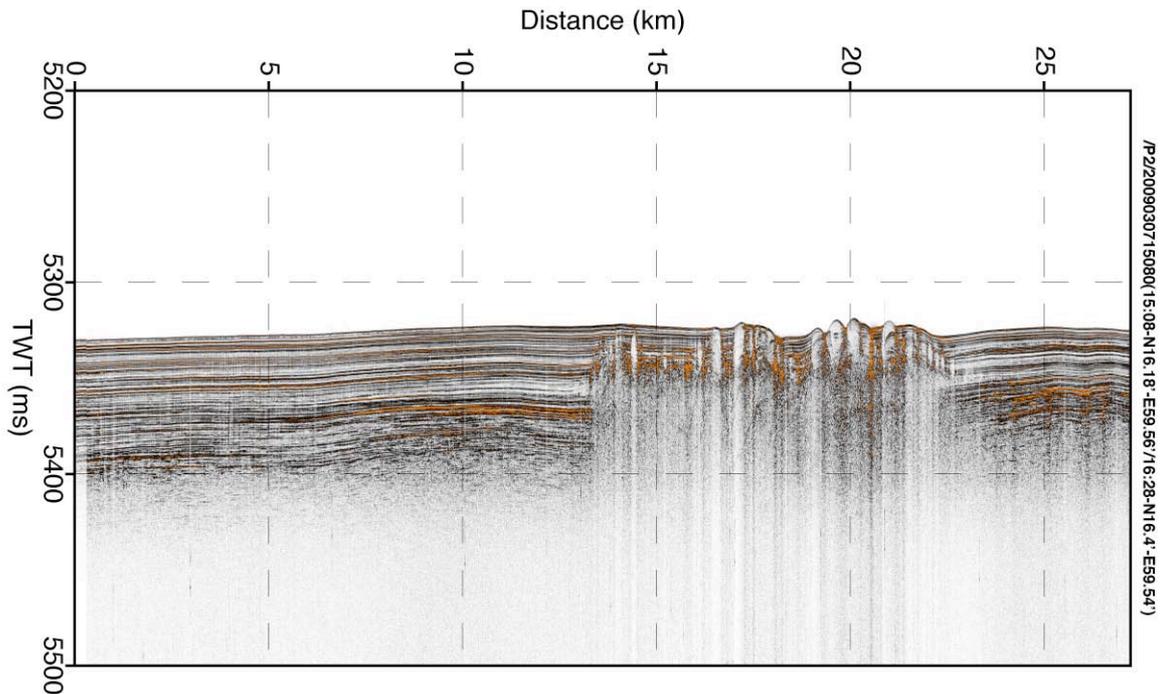


Figure 20. Sorties de fluides dans la plaine abyssale indienne au pied de la ride d'Owen (nord à gauche).

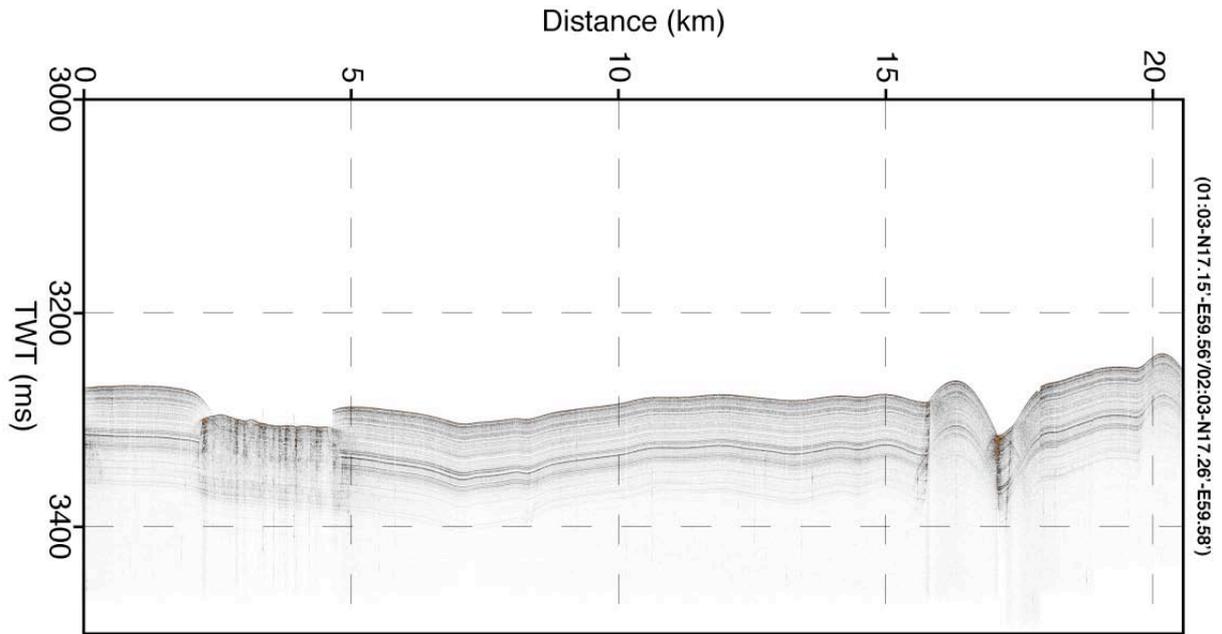


Figure 21. Profil SBP120 (sud à gauche) le long de la crête de la ride d'Owen montrant la série sédimentaire qui drape la ride incisée par un canyon à droite et un glissement de terrain superficiel à gauche.

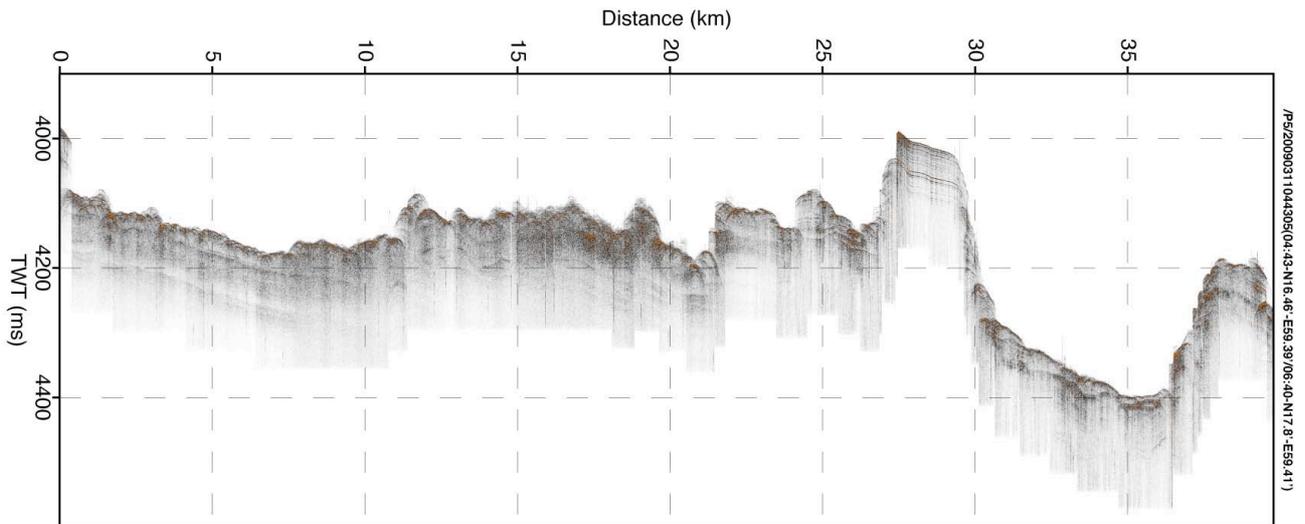


Figure 22. Profil SBP120 (sud à gauche) sur le flanc ouest de la ride d'Owen montrant une butte-témoin préservée entre deux instabilités gravitaires à faciès chaotique.

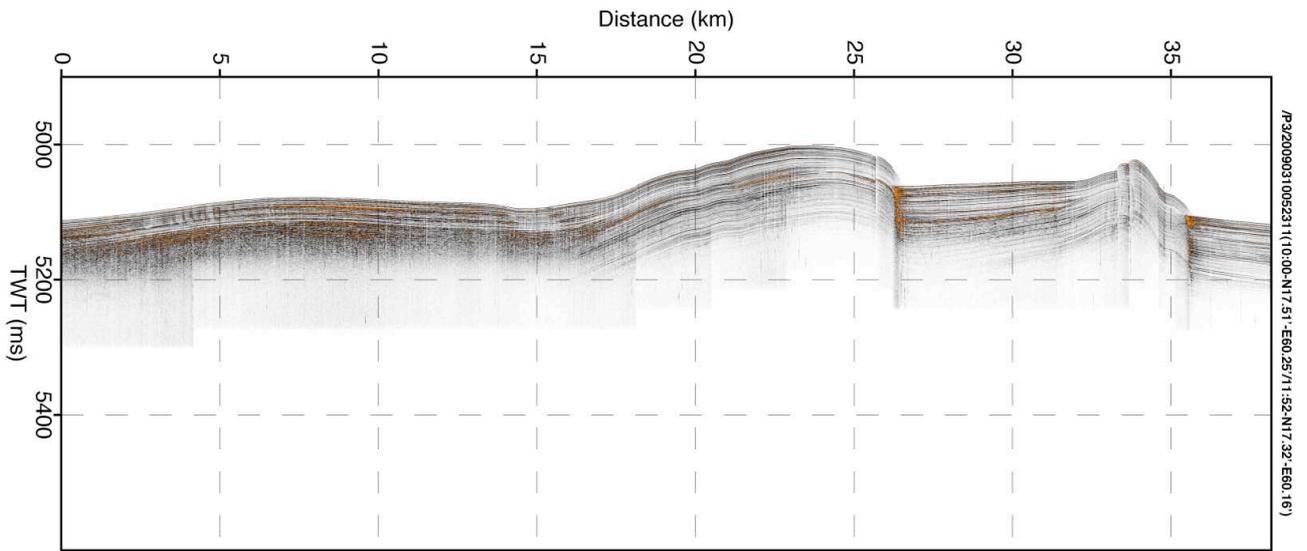


Figure 23. Profil SBP120 (nord à gauche) dans la plaine abyssale indienne à l'est de la portion sud ride d'Owen montrant des failles inverses et plis associés au niveau d'un relais transpressif le long de la faille active.

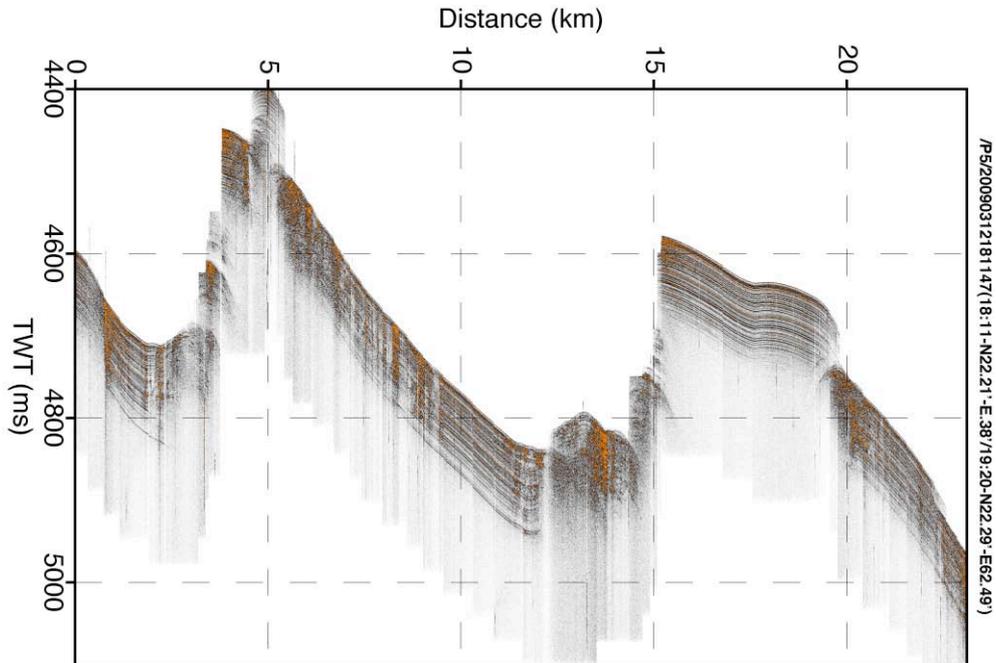


Figure 24. Profil SBP120 (sud à gauche) à travers les blocs basculés vers le nord de la terminaison en queue-de-cheval de la ZFO au niveau du fossé de Dalrymple.

☐ Cartes gravimétriques

Les anomalies gravimétriques à l'air libre et de Bouguer (Figure 21) ont été calculées. L'anomalie à l'air libre reflète principalement la topographie du fond, mais elle permet aussi de mettre en évidence les bassins remplis de sédiments (moins denses que la croûte), notamment le long de la zone de fracture d'Owen à 20°N. L'anomalie de Bouguer est calculée en effectuant une correction de plateau avec une différence de densité eau/croûte de 1.84.

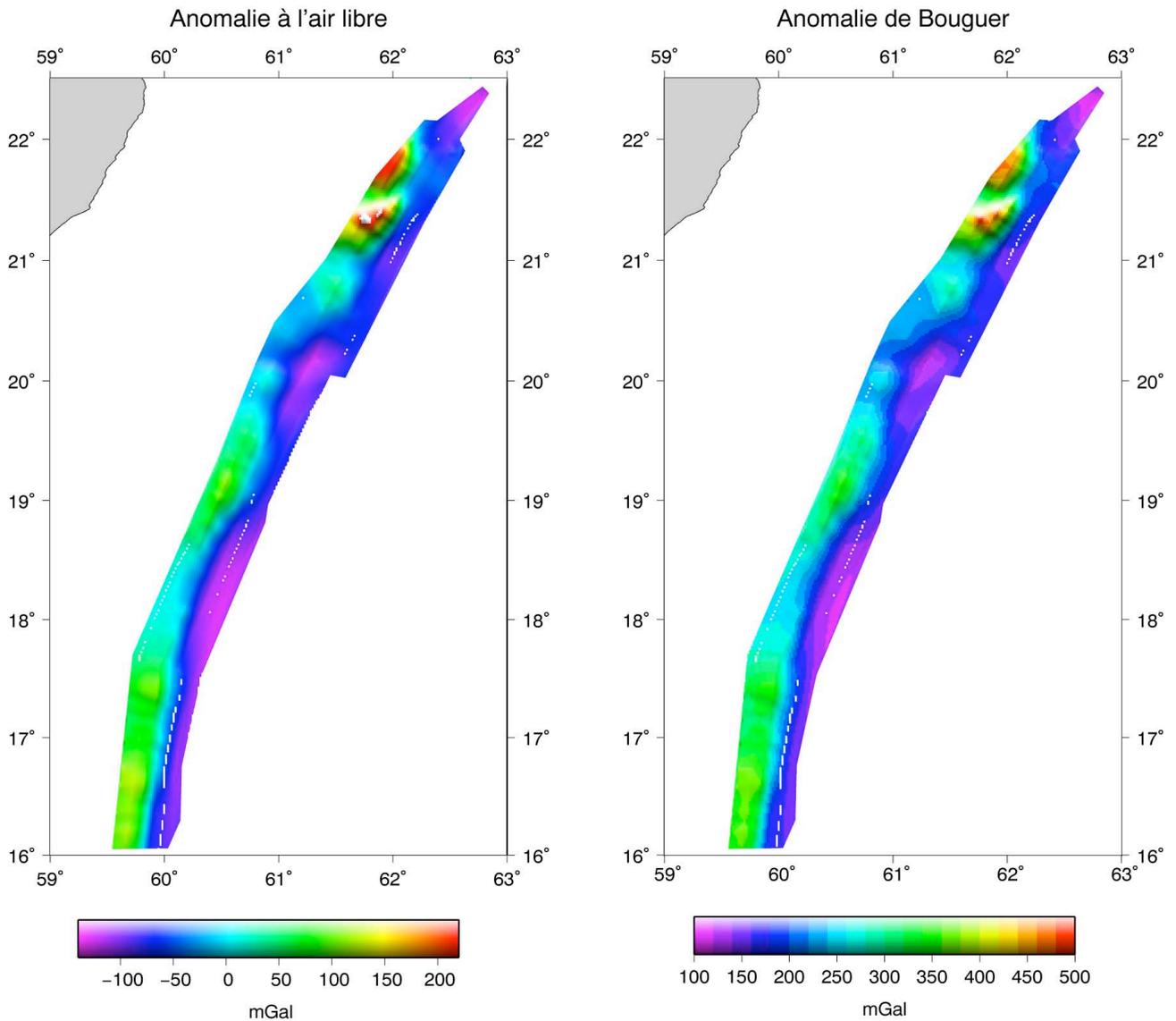


Figure 21. Anomalie à l'air libre et anomalie de Bouguer de la zone d'étude. Une anomalie positive est associée aux reliefs du mont Qalhat et à l'ensemble de la ride, alors que les bassins sédimentaires, à cause de leur moindre densité, sont soulignés par une anomalie négative.

□ Anomalies magnétiques

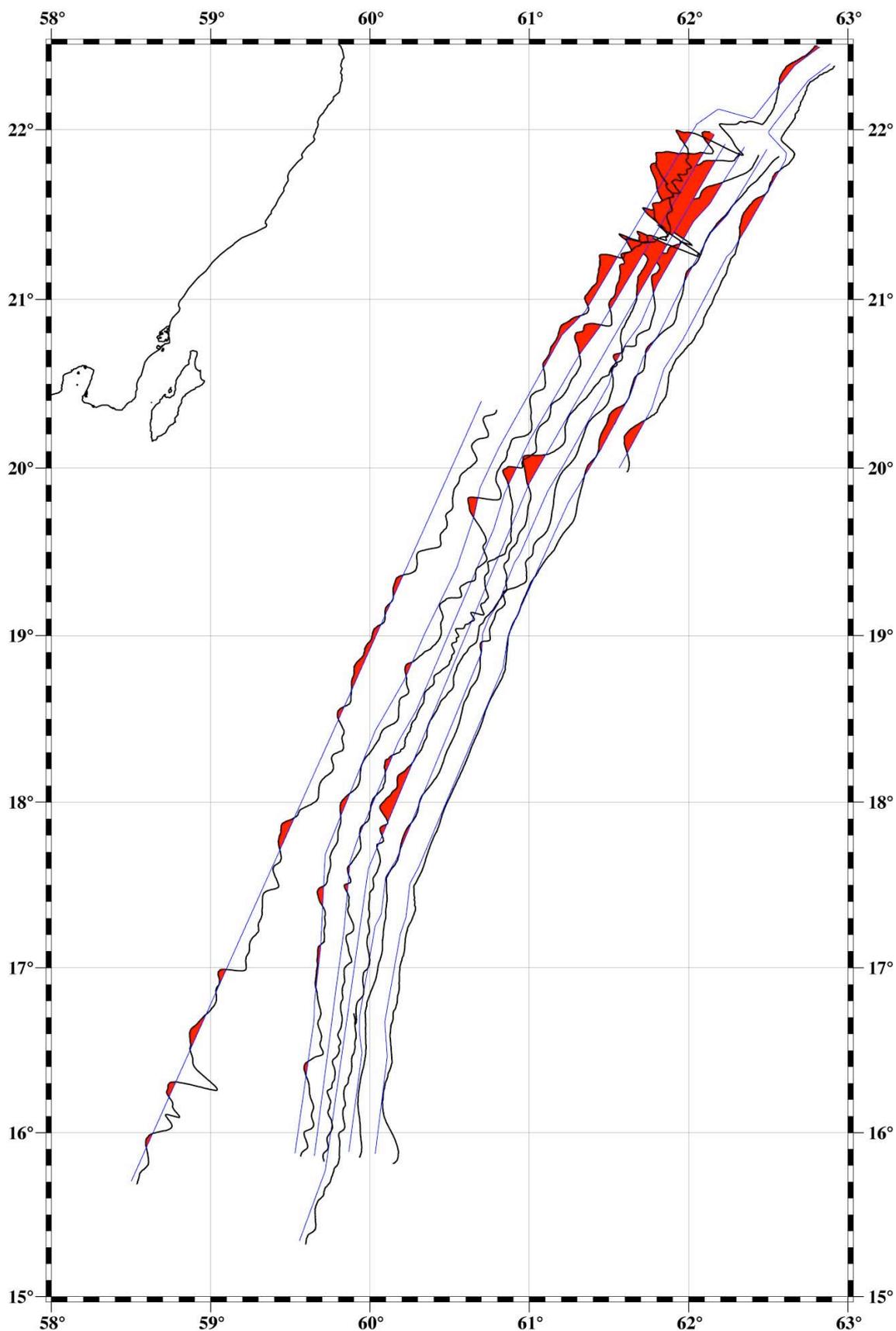


Figure 22. Carte des anomalies magnétiques rabattues le long des profils. L'intensité des anomalies est forte au nord de la zone au niveau du mont Qahlat probablement de nature volcanique.

□ Réflectivité

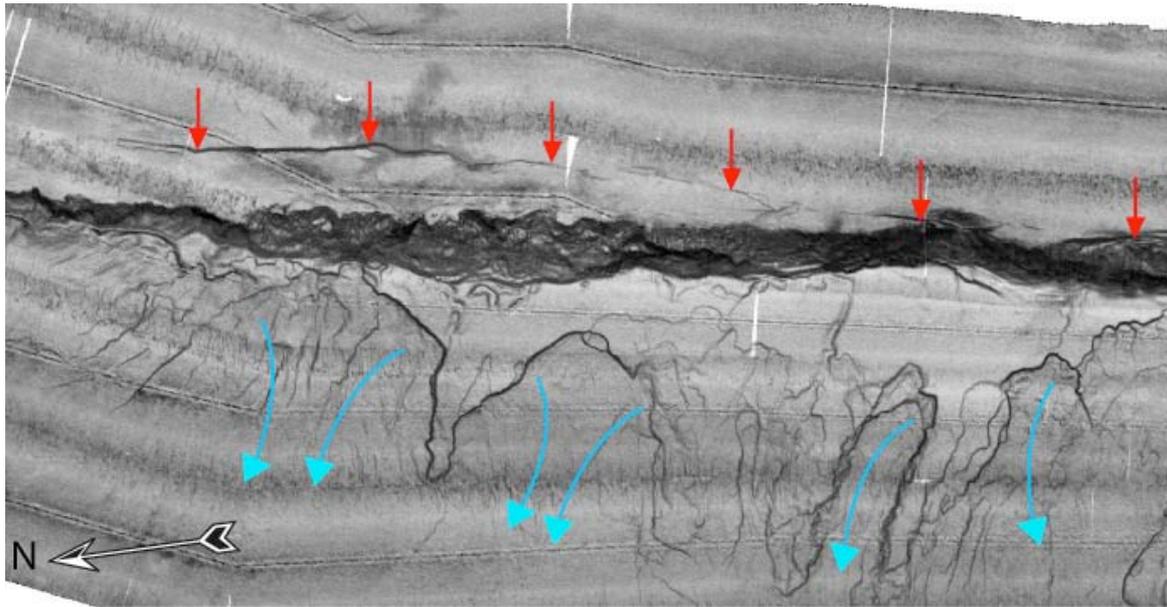


Figure 23. Carte de réflectivité le long de la ride d'Owen dans la section SHARBITAT. Les flèches rouges indiquent le tracé de la faille active, et les flèches bleues montrent les glissements de terrain qui affectent le versant ouest de la ride d'Owen.

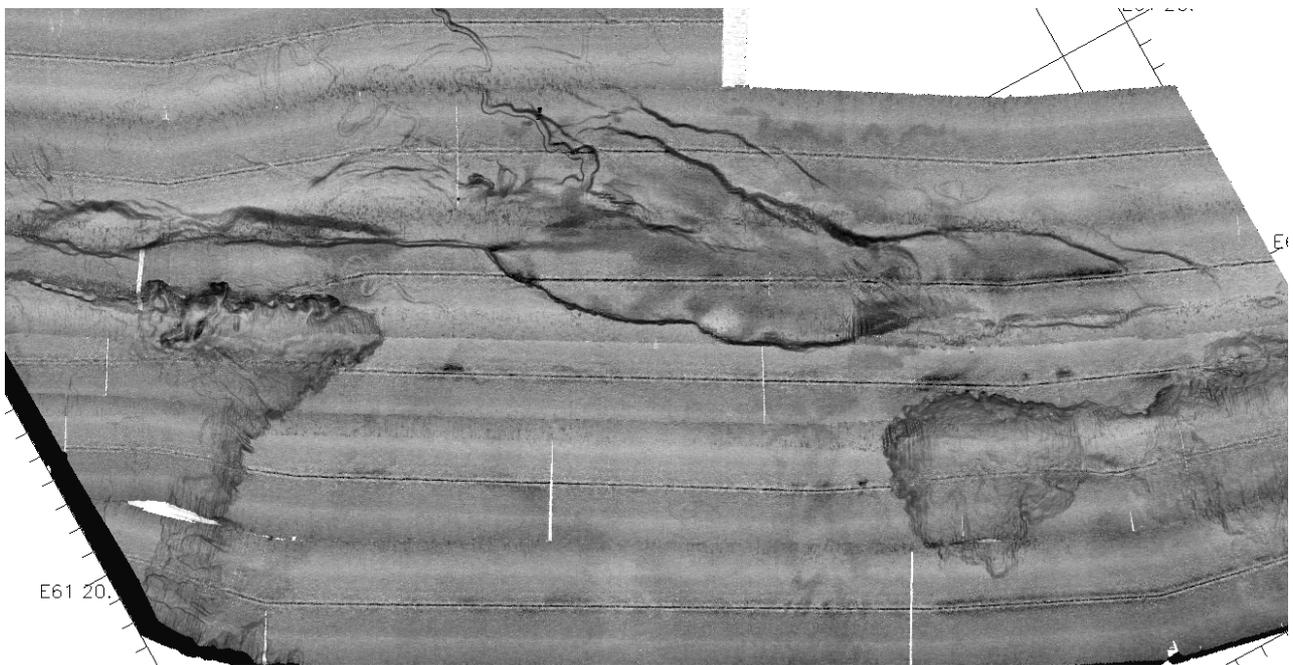


Figure 24. Carte de la réflectivité drapée sur la bathymétrie dans la région du bassin 20°N montrant la forte réflectivité des escarpements de failles actives et la complexité du remplissage sédimentaire du bassin depuis des corps très réfléchissants au débouché du chenal jusqu'à des corps très peu réfléchissants (bord opposé).



Figure 25. Carte de la réflectivité drapée sur la bathymétrie dans la région du bassin de Peanut montrant un patch de forte réflectivité au premier plan identifié sur le sondeur 3.5 kHz comme une zone de sortie de fluide. Un réseau ramifié au niveau du seuil de la ride d'Owen suggère des apports sédimentaires depuis la plaine d'Owen.

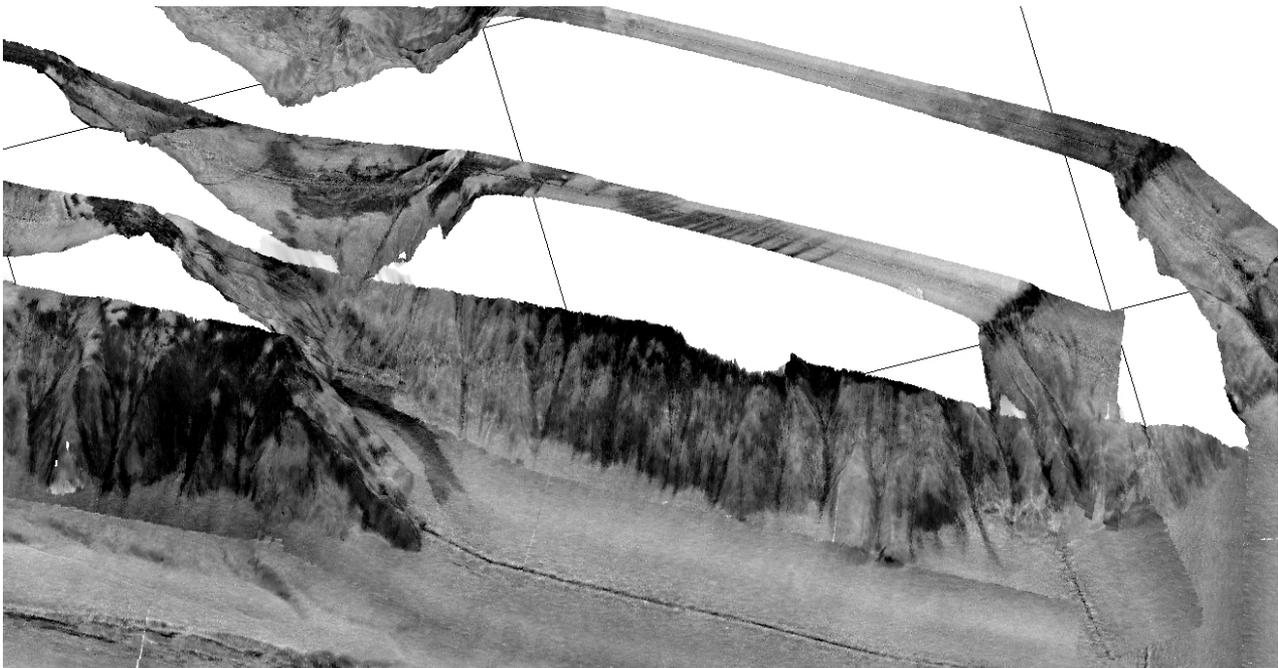


Figure 26. Détail de la réflectivité sur le mont Qalhat (faisceau central) montrant un système de dunes hydrauliques.

ACQUISITION ET TRAITEMENT

❑ Bathymétrie et imagerie

A- Le sondeur et son équipe

Le sondeur du BHO Beautemps-Beaupré (Kongsberg/Simrad EM-120) est un sondeur de « seconde génération », d'une qualité nettement supérieure aux sondeurs montés sur les autres navires de la flotte française (EM-12 de L'Atalante ou Thomson du Marion Dufresne), à l'exception du Pourquoi-Pas qui – si son fonctionnement devient nominal – devrait fournir des données comparables. Dans ces deux navires, c'est la technique de la gondole sous coque qui a été retenue.

La spécificité du BHO Beautemps-Beaupré est la présence d'une équipe d'hydrographes du SHOM (GOA – Groupe Océanographique de l'Atlantique) qui assure non seulement les quarts acquisition, mais également le traitement de la sonde.



B- Les logiciels de traitement

Pour des raisons historiques, le SHOM et l'IFREMER utilisent des logiciels de traitement des données multifaisceaux différents. Le SHOM a opté pour le logiciel commercial canadien Caris qui semble faire l'unanimité parmi les hydrographes. IFREMER a choisi de développer son logiciel propre – Caraïbes – largement et gratuitement diffusé dans les laboratoires de l'Université et du CNRS.

Au total, les sondes de la campagne Owen auront été passées au crible de 3 logiciels : Caris pour le nettoyage par les hydrographes du SHOM, GMT et Caraïbes V3.4r1 pour les scientifiques embarqués. En sortie de Caris, deux fichiers ont été spécialement produits : un fichier des sondes acceptées pour traitement avec GMT, un fichier des sondes rejetées pour traitement dans Caraïbes.

C- Découpe des données en profils

Le flux de données brutes (à l'entrée de Caris et de Caraïbes) correspond à un ensemble de fichiers de sondes/imagerie/célérité/navigation, chaque fichier représentant à peu près 15 minutes d'acquisition. La campagne a été segmentée en profils vrais (P01 à P06) et profils de ralliements (R01 à R03). Des profils de type transit (T*) ont également été réalisés à l'approche et à la sortie de la zone Owen proprement dite. Une double structure a été retenue pour le traitement sur Caraïbes: une structure de base, journalière (J1 à J15), et une structure en profil, la première étant utilisée pour les sondes bathymétriques et la seconde pour l'imagerie. Cette double structure s'est avérée plus commode du fait de l'exceptionnelle longueur des profils.

D- Importation des données sous Caraïbes



L'import se fait à partir des fichiers Simrad *_raw.all, que ce soit pour les sondes ou pour l'imagerie (modules Tfm120 pour les sondes et TfmSi pour l'imagerie). L'épuration des données bathymétriques par le personnel GOA est effectuée à l'aide du logiciel Caris. Une procédure d'intégration de l'épuration Caris dans les fichiers .mbg Caraïbes est maintenant opérationnelle dans la version V3.2 de Caraïbes (Flagmbb). Les sondes invalidées sont exportées au format ascii avec les colonnes suivantes : (fichiers P**_rejected.txt).

2009 068 02:49:09.052 1 12 327.360

2009 068 02:49:09.052 1 13 328.080

2009 068 02:49:09.052 1 14 328.540

...

Année / Julien / Time / Profile / Beam / Depth

(Profile = numéro de cycle, Beam = numéro de faisceau)

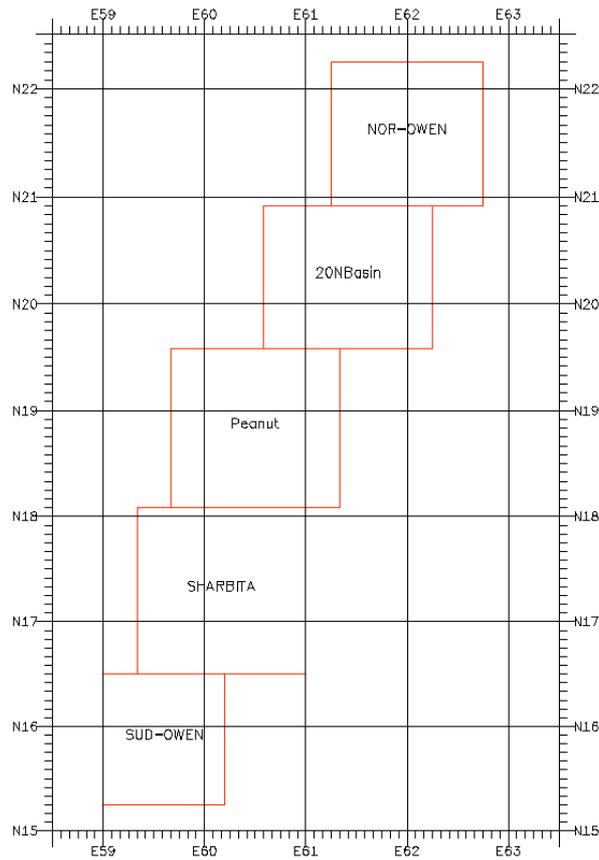


Les traitements de la navigation réalisés par le GOA à l'aide du logiciel Caris ne peuvent pas être exportés vers Caraïbes. Les .nvi générés ont donc été validés après d'éventuelles corrections par des modules de navigation de Caraïbes (module Ananav).

E- Découpe en feuilles

Outre la découpe en profil, nous avons opté pour une découpe en cinq feuilles pour l'ensemble de la zone : zone Sud Owen, zone Sharbita, zone Peanut Basin, zone 20°N Basin et zone Nord Owen. Cette découpe en feuille assure une taille raisonnable des MNT, en particulier pour la visualisation 3D.

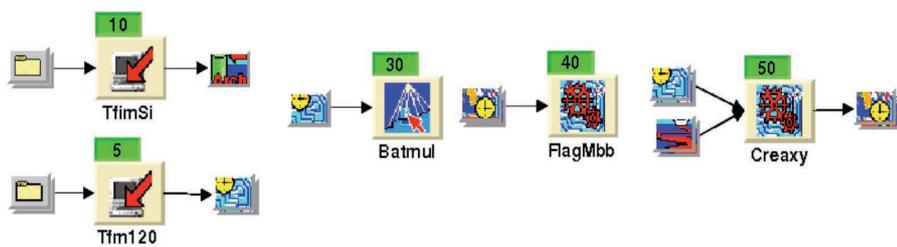
	Zone	Lat. S	Lat. N	Long. W	Long. E
feuille	SUD-OWEN	N15 15.00	N16 30.00	E 59 00.00	E 60 12.00
feuille	SHARBITA	N16 30.00	N18 05.00	E 59 20.00	E 61 00.00
feuille	Peanut	N18 05.00	N19 35.00	E 59 40.00	E 61 20.00
feuille	20NBasin	N19 35.00	N20 55.00	E 60 35.00	E 62 15.00
feuille	NOR-OWEN	N20 55.00	N22 35.00	E 61 15.00	E 63 00.00

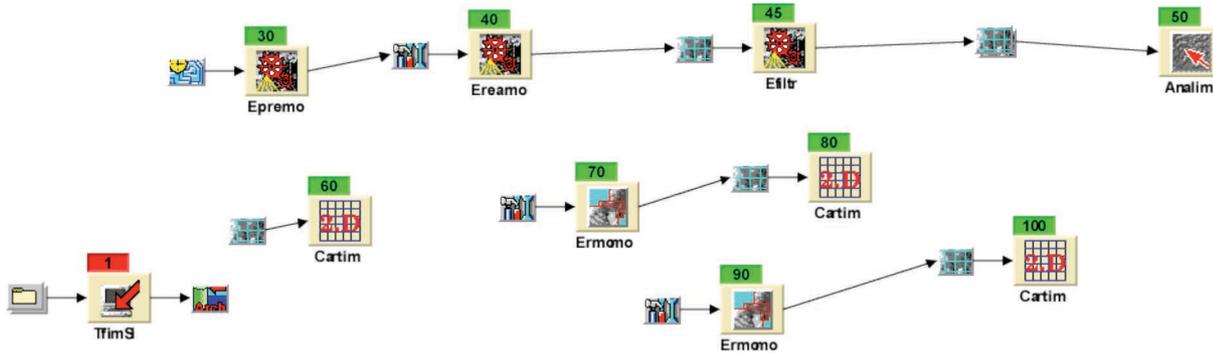


F- Traitement de la bathymétrie

Les traitements ont principalement visé à préparer des fichiers « mbg » de sondes corrigées, validées et géo-référencées avant maillage. Cette méthodologie permet de disposer de fichiers propres et prêts au maillage à différents pas de grille. Des essais de filtrage ont été réalisés.

Des mnt bathymétriques au pas de 80m ont été produits pour les 5 zones, ainsi que des mosaïques de l'imagerie pour chacune de ces zones. Un mnt global au pas de 100 m a également été réalisé.



G- Traitement de l'imagerie

La chaîne de traitement utilisée comprend les modules classiquement mis en œuvre pour l'imagerie acoustique. Cinq mosaïques ont été générées (une pour chaque feuille). La taille du pixel est de 50m (module Ereamo), estimée comme la résolution la plus adéquate pour le traitement de l'imagerie EM120 acquise à une vitesse d'environ 10 nœuds (voir le rapport de Caroline Huguen pour la campagne SIMED).

L'interpolation a été réalisée avec une fenêtre de 3*10, par « médiane des voisins proches », paramètre qui est apparu après essais le mieux préserver la précision des données. Les mosaïques (.imo) ont été générées en conservant les valeurs de dB. Des essais de drapage de la réflectivité sur la bathymétrie ont été réalisés et se sont avérés utiles pour interpréter le sondeur de sédiments.

▣ Gravimétrie

A- Le gravimètre

L'appareil de mesure embarqué est un gravimètre marin Bodenseewerk Geosystem KSS31 qui permet de mesurer les variations du champ de pesanteur terrestre (g) avec une précision de 0.02 mGal (sensibilité 2×10^{-8}). Ces données sont ensuite recalées à l'aide des valeurs absolues de g mesurées aux stations de référence à terre avant et après la campagne. Le recalage terrestre est effectué à l'aide d'un gravimètre portable de marque Scintrex.

La mesure du champ de pesanteur ou de ses variations sur un mobile (bateau ou avion) est entachée d'accélération parasites liées au déplacement de ce mobile sur la surface terrestre et aux oscillations de courte période (tangage, roulis) qu'il peut subir. Le système de mesure est donc équipé d'une série de capteurs et de filtres destinés à éliminer ces artefacts. Il peut être décomposé en trois parties :

- une plate-forme stabilisée contrôlée par un gyroscope et deux accéléromètres horizontaux qui permettent de s'affranchir respectivement des oscillations rapides de la plateforme (roulis, tangage) et des variations lentes de la verticale (mouvement du navire, rotation de la Terre).



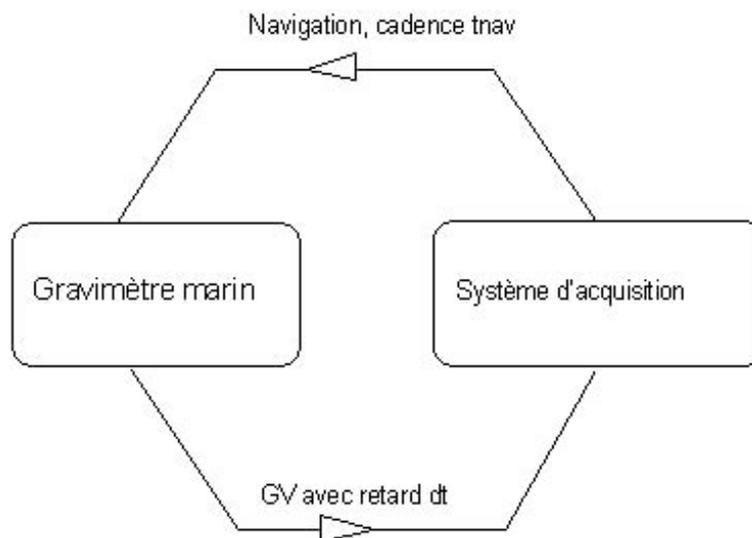
Vue de dessus du gravimètre dans son enceinte thermostatée et pressurisée



- Un capteur de pesanteur constitué d'une masse et d'un ressort dont l'élongation est directement proportionnelle à la force appliquée et donc à g . On ne mesure pas directement les variations de longueur du ressort mais la tension nécessaire pour maintenir la masse immobile à l'aide d'un champ magnétique créé par une bobine. La tension appliquée est alors transformée en fréquence.
- L'ensemble est placé dans une enceinte thermostatée, pressurisée et abritée des champs magnétiques parasites.
- Un système électronique de contrôle et de traitement qui assure la stabilisation de la plateforme, l'alimentation du capteur, le traitement des données et la commande de l'ensemble des éléments du système.

B- Acquisition et traitement des données

La chaîne acquisition-traitement est constituée d'allers-retours permanents entre le système d'acquisition et le gravimètre : le système d'acquisition fournit au gravimètre les informations sur la navigation avec une cadence de 1 s, qui en retour lui renvoie les mesures gravimétriques avec un retard dt lié aux différentes corrections (navigation, roulis-tangage).



Outre les données brutes, le gravimètre peut donc fournir la mesure corrigée de l'effet d'Eötvös (mouvement du bateau), l'anomalie à l'air libre (différence entre la mesure et la valeur théorique de g sur l'ellipsoïde de référence) et l'anomalie de Bouguer (valeur corrigée des effets topographiques). Mais en pratique, seules les données brutes sont conservées et l'ensemble des corrections est effectué en post-traitement.

Les fluctuations parasites de hautes fréquences sont directement éliminées par une série de filtres agissant au niveau du capteur (filtre passe-bas) ou au niveau du calculateur (filtre de Bessel).

□ **Magnétométrie**

A- Acquisition des données

L'instrument utilisé est un magnétomètre marin Thomson Sintra SMM II du type scalaire à effet Overhauser, équipé d'un capteur omnidirectionnel. Il mesure donc le champ total. Le poisson magnétomètre

est relié à une console opérateur de type «UCMAG» par un câble coaxial d'une longueur totale de 350 mètres (en comptant le câble de remorquage, le câble pont et le câble d'interconnexion). La longueur filée (au tableau arrière) est de 240 mètres et le déport à l'antenne GPS est de 270 mètres (+30 m du tableau arrière à l'antenne GPS). La donnée est transmise au système d'acquisition Techsas (développé par l'IFREMER) par liaison série type RS232 à une cadence de 1 Hz à 9600 bauds.



B- Précision et qualité des données

La cadence de mesure de ce magnétomètre est de 1 Hz avec une résolution de 0,01 nT. Compte tenu du niveau de bruit généré par le bâtiment et les mouvements du capteur, la résolution est de l'ordre de 0,1 nT. L'instrument allie forte sensibilité et faible bruit. Les mesures aberrantes sont peu nombreuses. La résolution finale de la mesure est de l'ordre de 0.1 à 0.2 nT (voir le rapport de la campagne Simed/Medor).

C- Traitement des données

Le traitement des données à bord avec le logiciel TIMICA du SHOM a été entièrement assuré par l'équipe du SHOM, qui nous a fourni les valeurs de l'anomalie magnétique au pas de temps initial de l'acquisition (1 seconde), après suppression des valeurs aberrantes, calcul de la position du capteur en tenant compte du déport à l'antenne GPS (270 m) et soustraction du champ de référence (IGRF 2005). Les fichiers (en ASCII) sont découpés par profils au format : date, heure, longitude, latitude, champ magnétique mesuré, champ magnétique IGRF, anomalie calculée par rapport à l'IGRF, nom du profil.

20090304	132501Z	059.556073	15.334593	39801.20	39902.02	-100.82	OWN2P001
20090304	132502Z	059.556091	15.334643	39801.60	39902.04	-100.44	OWN2P001
20090304	132503Z	059.556106	15.334692	39802.40	39902.06	-99.66	OWN2P001
20090304	132505Z	059.556138	15.334789	39801.50	39902.10	-100.60	OWN2P001

Portion de fichier d'anomalie magnétique

Du fait du peu de points de croisement, aucune analyse directe de l'effet de la variation diurne du champ n'a pu être effectuée. Par ailleurs, aucune donnée d'observatoire magnétique proche et fiable n'a pu

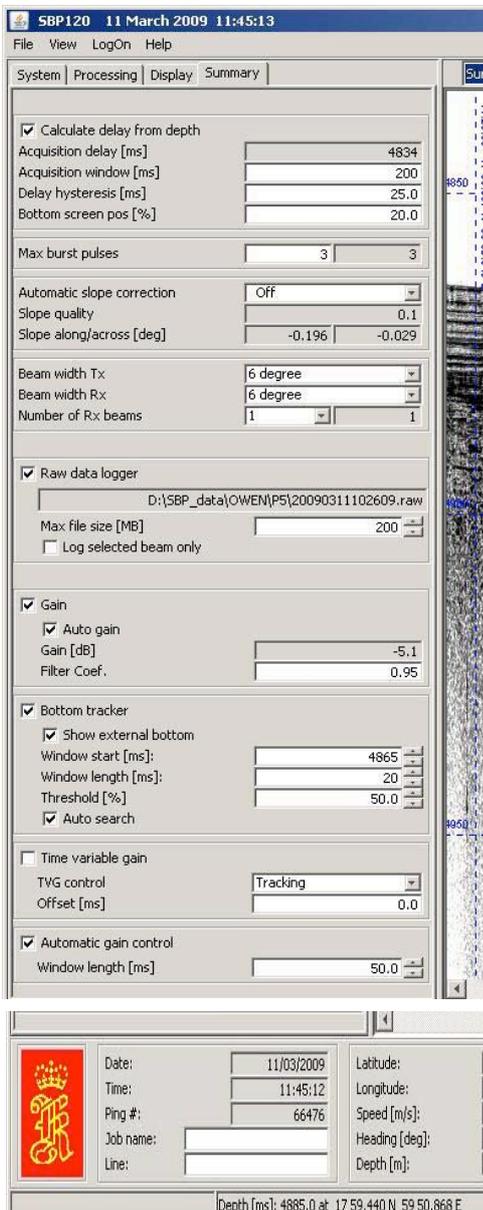
être obtenue. Cependant, la longueur d'onde de cet effet reste très supérieure à celle des anomalies (à 11 nœuds, la longueur d'onde entre deux pics diurnes consécutifs est de 490 km alors que les « pics » magnétiques sont larges d'environ 10 km en moyenne à la vitesse d'ouverture océanique considérée). L'absence de correction des variations diurnes, si elle altère la qualité d'une carte contournée, ne gêne donc pas l'identification des anomalies sur profil.

❑ Sondeur de sédiment SBP 120

A Introduction

Nous présentons ici notre utilisation du sondeur acoustique de sédiments SBP120 depuis l'acquisition jusqu'à la production d'images en Post-Script. Le sondeur est resté en acquisition continue pendant toute la campagne, sauf pendant les transits. La fenêtre temporelle d'enregistrement est de 200 ms temps double (TWT), correspondant à environ 150 m, mais les couches sont visibles sur environ 70 m de profondeur. En général, les zones de forte pente ne donnent aucun signal utilisable. Trois documents sont disponibles pour apprendre à se servir du SBP :

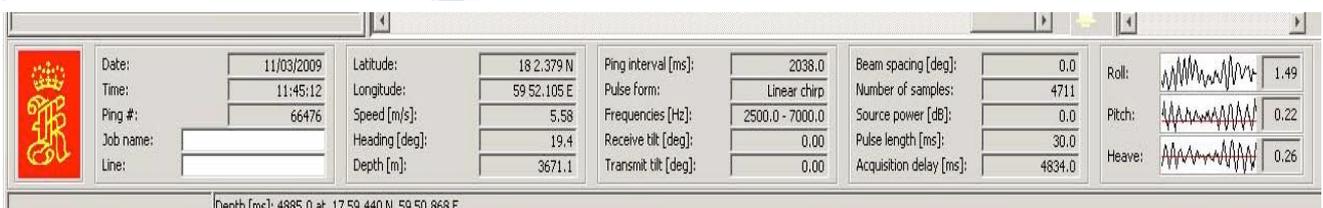
1. Kongsberg Simrad SBP120 Sub Bottom Profiler. Operator Manual - Base Version. Manuel du constructeur disponible à bord.
2. Mise en oeuvre du pénétrateur de sédiments Simrad SBP120. Document de la Mission Océanographique de l'Atlantique disponible à bord.
3. Aide en ligne du logiciel SBP120.



B Mise en oeuvre et acquisition

Cette partie est sous le contrôle de l'équipe du SHOM qui nous a fourni des données brutes non traitées au format propriétaire SBP .raw. Les fichiers sont rangés dans des répertoires portant le nom du profil en cours suivant le plan de position de la campagne. Dans chaque répertoire, les fichiers sont nommés suivant leur date de création (année-mois-jour-hh-mm-ss.raw). Par exemple, le fichier 20090306055123.raw a été créé le 6 mars 2009 à 5h51m23s en heure Zulu, ou GMT. Quand un fichier atteint 200 Mo, un autre fichier est créé suivant la même convention de nom. Pour information nous reproduisons les principaux réglages du SBP en cours d'acquisition en figure 1. Ceux-ci n'ont pas changé pendant la campagne. En particulier, la source est un signal chirp linéaire de 2,5KHz à 7KHz d'une durée de 10 ms et d'amplitude -3dB (cf document 1 pour plus d'infos, ainsi que le rapport technique sur le SBP de la campagne Medor Simed). Le taux d'échantillonnage du signal de retour est de 48.8

Figure 1. Copies d'écran des principaux paramètres du SBP120 en cours d'acquisition. Sur l'écran, la partie horizontale est sous la partie gauche, le logo Kongsberg servant de point de repère



microsecondes, soit 20480 Hz. Comme la fenêtre temporelle d'acquisition est de 200 ms, il y a 4301 échantillons par trace.

C Relecture, traitement, visualisation et conversion des données brutes

Ces phases ont été réalisées avec le logiciel SBP120, sur un PC distinct du PC d'acquisition pour ne pas perturber l'acquisition.

Relecture. Le logiciel SBP120 est mis en mode "replay" (par opposition au mode "survey") par un bouton à droite de l'onglet "Summary". On ouvre le fichier désiré .raw en cliquant sur le bouton de lecture (petit triangle noir).

Traitement. La chaîne de traitement des données brutes est représentée en figure 2. Dans le logiciel SBP120, on la trouve à l'onglet « Processing ». Nous donnons ici les paramètres de chacune des étape :

Gain correction

transmission loss [dB/...] 0

Filters

Filter type : Matched
 Corner frequencies : Auto
 Replica shaping activé

Time varying filter (inactivé)

Gain

Auto Gain activé
 Gain [%] chiffre variable en "read only"
 Filter coefficient 0.95

Data plotter 1 (activé)

Attribute processing

Attributes Inst. amplitude

Bottom tracker

Show master depth activé
 Window start (ms) 3201
 Window length (ms) 20
 Threshold 10.0
 Auto search activé

Mute

Mute [ms] 3

Automatic gain control

Window length [ms] 50
 Apply point [%] 0
 Amp. scaling [%] 70

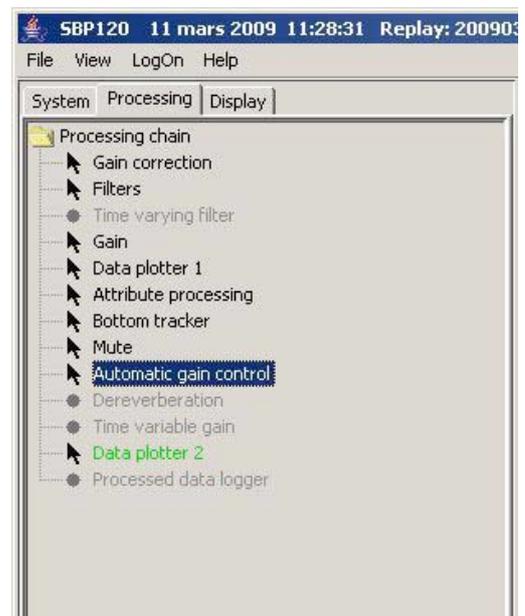


Figure 2. Copie d'écran de la chaîne de traitement des données brutes.

Les champs "Data plotter" 1 et 2 n'ont pas été utilisés. Ils ne servent qu'à visualiser l'état d'une trace à des étapes intermédiaires du traitement.

Visualisation. Pour voir les données traitées nous n'avons utilisé que la fenêtre principale "echogram 1" (figure 3). Les autres fenêtres ont été retirées de l'écran par le menu "View". Elles servent principalement quand on désire mettre au point la chaîne de traitement. Pour l'echogram 1, il existe trois modes de display qui résolvent de trois manières différentes le problème de la visualisation d'une fenêtre de 200 ms dont l'origine varie de plusieurs secondes à cause des variations bathymétriques. Ces modes sont indiqués en figure 3 : "Adjust range to last acquisition window"; "Adjust range to actual acquisition window"; ou enfin, "min. range; max. range" ajustés manuellement. On laisse au lecteur le soin de choisir celui qu'il préfère. Les changements de réglages n'affectent pas l'export des données traitées décrit ci-dessous.

Conversion des données brutes. Les données brutes lues, traitées, et visualisées peuvent être sauvegardées au format SEG-Y en appuyant sur le bouton d'enregistrement (point rouge en haut de la fenêtre). Nous conseillons de faire quelques tests préalables car l'usage des deux boutons de lecture et d'enregistrement demande un peu de pratique. Ce bouton d'enregistrement est équivalent au menu "Processed data logger" de la chaîne de traitement "Processing chain". La taille du fichier exporté (.seg) peut y être définie, à fixer à 0 pour conserver inchangée la taille du fichier en entrée (.raw). Les données ont été systématiquement sauvegardées pendant la campagne en SEG-Y après application de la chaîne de traitement décrite ci-dessus (nom_fichier_acquisition.seg). L'option 'Inst. Amplitude' dans l'étape 'Attribute processing' permet une visualisation optimale des données (amplitude négative du signal non représentée). Pendant cette étape, nous avons noté manuellement les zones intéressantes (No. de profile sur le plan de position, No. de trace de début et de fin de zone, fenêtre temporelle de la zone) et crée via SU (Seismic Unix) des fichiers postscripts de ces zones après application du délai.

En fin de campagne, deux autres types de fichiers SEG-Y ont été systématiquement créés :

- un jeu de fichiers SEG-Y équivalent au précédent mais pour lesquels l'étape 'Attribute processing' a été supprimée, de façon à garder la totalité du signal (fichiers Px_replay.seg, avec x n° du profil) ;
- un jeu de fichiers SEG-Y via le menu 'Convert' (Px_convert.seg, avec x n° du profil). Cette option permet de sauvegarder les données au format SEG-Y sans appliquer la chaîne de traitement, et donc d'avoir un jeu de données brutes pour un éventuel traitement post-campagne

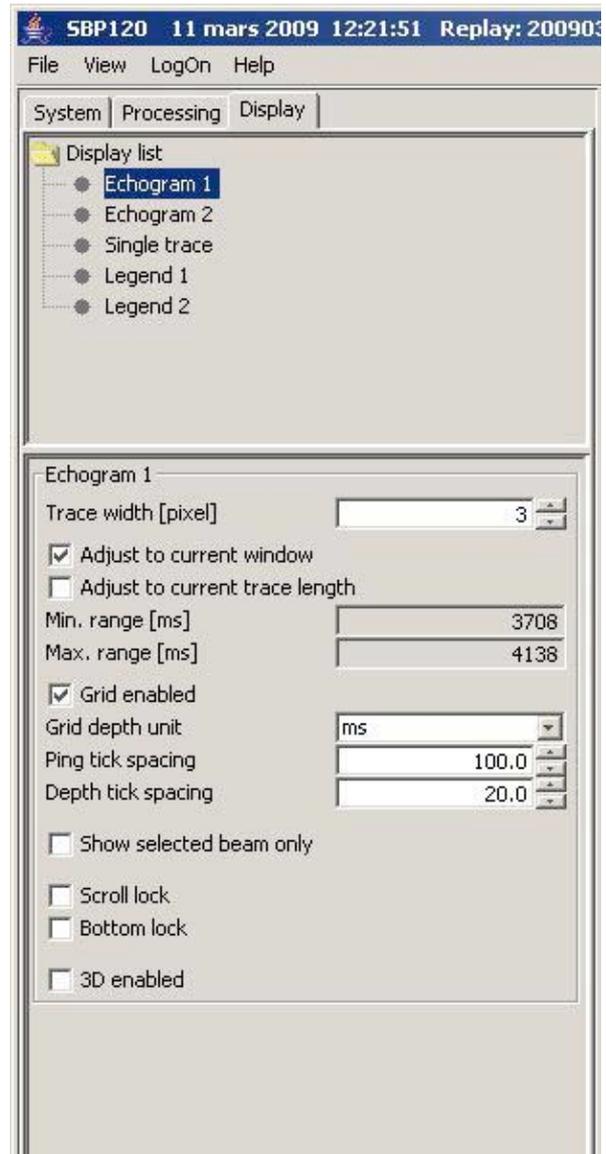


Figure 3. Copie d'écran des réglages du mode display.

D Traitements complémentaires et production d'images Post-Script

Comme les équipes des campagnes Medor Simed et AOC, nous avons effectué cette phase avec la suite logicielle libre Seismic Unix (SU). Un script csh auto-explicatif est disponible dans le rapport de campagne AOC. De même, un programme Fortran qui permet de lire un fichier de traces SBP au format SEG-Y, brutes ou après traitement par le logiciel SBP, est disponible dans ce rapport.

CONCLUSIONS PRELIMINAIRES

- ❑ Les données de bathymétrie multifaisceaux mettent en évidence un système de failles actives sur près de 800 km entre le bassin de Beautemps-Beaupré au sud et le fossé de Dalrymple au nord, qui correspond à la zone de fracture d'Owen (ZFO). Par endroits, les failles recoupent les reliefs de la ride d'Owen tandis qu'à d'autres elles se localisent au pied des reliefs.
- ❑ La ride topographique d'Owen est formée de 3 portions distinctes séparées par des seuils :
 - (1) au sud, une portion culminant à 2000 m au-dessus du plancher océanique environnant, très asymétrique avec un flanc raide à regard est et un flanc en pente douce vers l'ouest. Le flanc ouest correspond à la surface structurale d'une série monoclinale peu pentée portant de nombreuses cicatrices d'arrachement de glissements de terrain.
 - (2) au centre, une portion en dôme, érodée sur son flanc est par de nombreux canyons. Les portions méridionale et centrale de la ride d'Owen sont amagnétiques.
 - (3) au nord, une portion peu profonde (< 300 m) correspondant au mont sous-marin Qalhat, avec une forte signature magnétique suggérant une origine volcanique. Un système de dunes hydrauliques spectaculaires a été mis en évidence au sommet du mont Qalhat à une profondeur d'environ 450 m.
- ❑ Le système de failles est constitué de quatre segments principaux séparés par des relais transtensifs marqués par des bassins, dont un majeur à 20°N. Aucun relais transpressif majeur n'a été mis en évidence. Du sud au nord, les quatre segments principaux sont :
 - (1) un long segment de 430 km entre l'extrémité sud du bassin de Beautemps-Beaupré et un petit bassin en pull-apart (bassin de Peanut) à 18,7°N. Au sud, ce segment borde à l'est le bassin de Beautemps-Beaupré, puis recoupe et décale la ride d'Owen de 12 km, puis court au pied des reliefs de la ride d'Owen. La faille active ne se suit pas de manière continue le long du segment qui est vraisemblablement segmenté en plusieurs sous segments. Vers 17°30'N, un léger changement d'orientation anti-horaire de la faille est associé à la formation de petits reliefs à l'est dans la plaque indienne (restraining bend).
 - (2) Un segment rectiligne de 180 km entre le bassin de Peanut et un grand bassin en pull-apart situé à 20°N (bassin 20°N) long de 80 km et large de 20-30 km. Ce segment recoupe la partie centrale de la ride d'Owen et la décale de 10 km.
 - (3) Un segment de 160 km au nord du 20°N-Bassin, souligné au sud par deux petits bassins allongés, qui borde à l'est le mont Qalhat.
 - (4) Un dernier segment au nord qui se termine par une spectaculaire structure en queue-de-cheval à l'entrée du fossé de Dalrymple.
- ❑ La cinématique de la zone de fracture d'Owen est indiquée par la géométrie d'ensemble du système de faille et de ses relais en pull-apart qui mettent en évidence un mouvement décrochant dextre.
- ❑ D'importantes instabilités sédimentaires ont été mises en évidence, principalement sur la portion sud de la ride d'Owen qui est massivement affectée sur son flanc ouest par des glissements de terrain à la faveur de niveaux de décollement préférentiels relativement superficiels (< 500m). Le matériel glissé est évacué dans la plaine du bassin d'Owen sur de grandes distances (corps transparents identifiés au 3,5 kHz). Le flanc est de cette portion de la ride d'Owen est aussi affecté par d'importants effondrements de terrain.
- ❑ Nous avons cartographié une portion significative d'un chenal actif provenant du cône de l'Indus débouchant dans le bassin 20°N. Les dépôts de ce bassin présentent un faciès sismique particulier

constitué d'une alternance de niveaux épais transparents et de fins niveaux très réfléchissants, vraisemblablement représentatifs de turbidites distales. Par ailleurs, un système complexe de chenaux fossiles est mis en évidence, dont certains sont clairement repris par la déformation liée à la faille.

À l'heure actuelle, il n'y a pas de transport de sédiments depuis le cône de l'Indus vers le bassin d'Owen par les seuils de la ride d'Owen.

Les profils sismiques 3.5 kHz montrent de nombreuses manifestations de sorties de fluides (diapirisme de sable ou de boue).

- Dans son ensemble et de façon remarquable, la faille suit presque parfaitement un petit cercle centré sur le pôle Arabie-Inde le plus récemment établi à partir des données d'AOC et de mesures GPS. Les décalages observés en 3 endroits différents sont de l'ordre de 10 km. Le système actuel est donc représentatif du mouvement Inde-Arabie des derniers millions d'années.

