



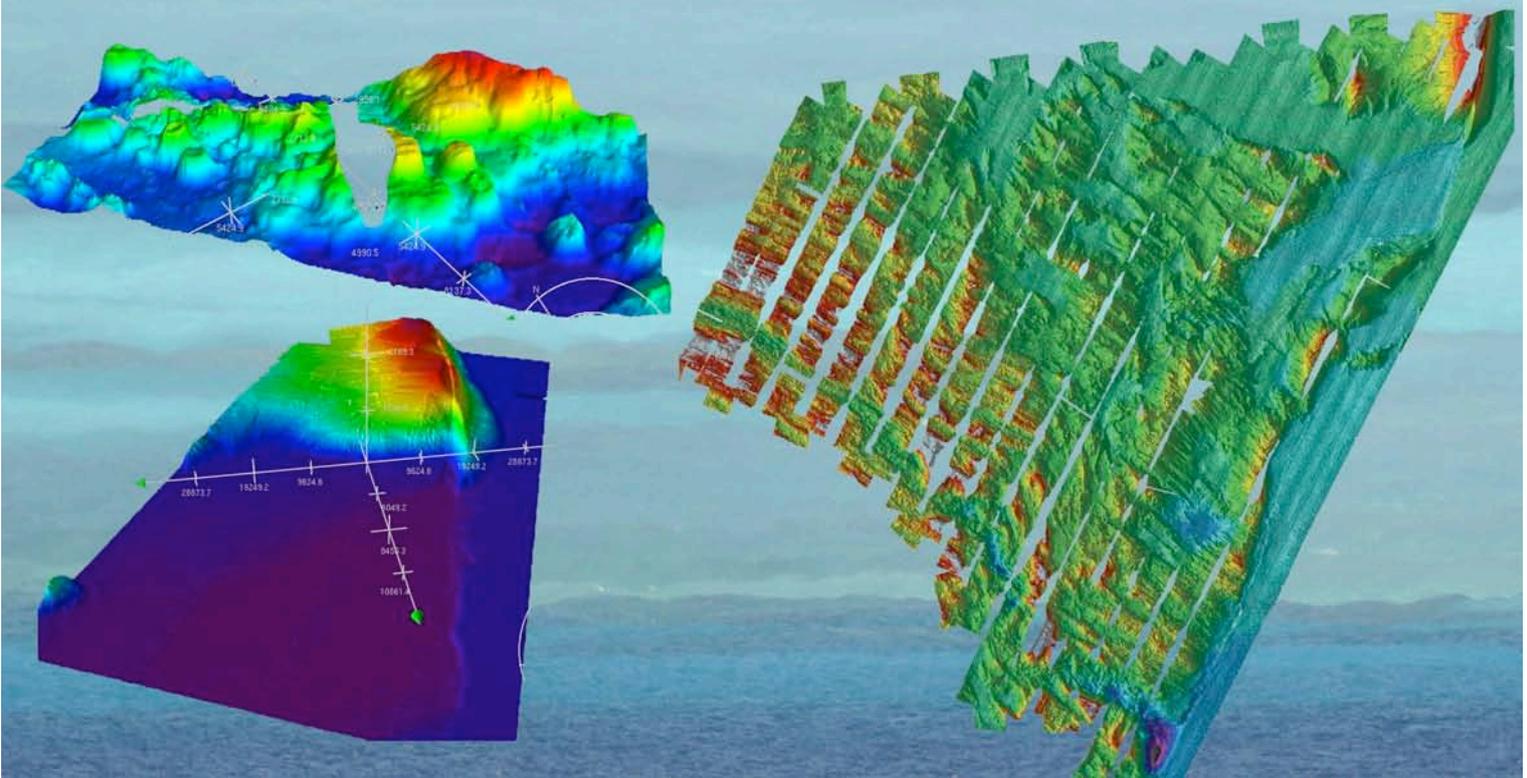
Rapport de campagne

AOC

Mahé, Seychelles, 20 Septembre 2006

Djibouti, 10 Octobre 2006

BHO Beaupré-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	12
- Bathymétrie	12
- Profils du sondeur de sédiments	18
- Cartes gravimétriques	19
- Anomalies magnétiques	21
- Réflectivité	26
- Interprétation structurale	26
Acquisition et traitement	30
- Bathymétrie et imagerie	30
- Gravimétrie	34
- Magnétométrie	36
- Sondeur de sédiment SBP 120	40
Conclusions générales	47

AVANT-PROPOS

La campagne océanographique AOC (Aden-Owen-Carlsberg) s'est déroulée du 20 septembre au 10 octobre 2006 entre Mahé (Seychelles) et Djibouti 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 la reconnaissance de la géométrie et de la cinématique du point triple Arabie-Inde-Somalie réunissant la dorsale de Sheba, la dorsale de Carlsberg, et la zone de fracture d'Owen.

Le plan d'action adopté pour cette campagne a consisté à cartographier la zone triangulaire du point triple par une série de profils orientés parallèlement à la direction d'ouverture du golfe d'Aden (N27°) et espacés de 9 milles nautiques à l'est et 7 milles à l'ouest. 3445 milles ont été parcourus dans la zone de travail, 11.489.671 sondes bathymétriques valides ont été mesurées, 186.070 mesures gravimétriques ont été effectuées, ainsi que des mesures magnétiques et des sondages acoustiques de sub-surface.

La campagne a été réalisée par une équipe de 7 chercheurs et enseignant-chercheurs relevant de quatre organismes partenaires (Université Pierre et Marie Curie-Paris6, Ecole Normale Supérieure, Université de Cergy-Pontoise, Université de Besançon) et du CNRS-INSU, sous la direction de Marc Fournier, chef de mission. Les travaux ont été menés à bien grâce aux moyens fiables et performants du BHO Beautemps-Beaupré mis en œuvre par l'équipe des hydrographes du SHOM (Mission Océanographique Atlantique) sous la conduite de l'ingénieur Simon Blin, et grâce au concours du commandant du bâtiment, le capitaine de frégate Alain Le Bail, de ses officiers et de son équipage. L'ensemble de l'équipage y compris une équipe de fusiliers marins du GIR chargés de la sécurité du navire dans ce secteur à risques, les membres de la MOA (SHOM), et l'équipe scientifique, comprenait 55 personnes. Il faut souligner la disponibilité constante des uns et des autres, l'harmonie régnant entre les équipes avec comme conséquence une grande efficacité. 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.

Le sérieux de la vie à bord est allé de pair avec la bonne humeur générale. Celle-ci s'est très vite installée du fait du rituel passage de la ligne peu après l'appareillage des Seychelles. C'est en effet, toutes origines confondues, un total de 23 "néophytes" qui ont dû rendre hommage à Neptune et se soumettre aux rites du "baptême" à coups de breuvages très spéciaux, de badigeonnages en règle avec pour finir la nécessaire immersion plusieurs fois répétée !

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 dans la foulée. Après l'exposé préliminaire des objectifs, des points réguliers ont été faits à l'occasion du briefing journalier ainsi que des exposés permettant à chacun de juger 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'une 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 : **Marc Fournier**¹
 Nicolas Chamot-Rooke²
 Olivier Fabbri³
 Philippe Huchon¹
 Claude Lepvrier¹
 Bertrand Maillot⁴
 Carole Petit¹

Equipe MOA :

Chef ingénieur hydrographe : **Simon Blin (IETA)**
 Yves-Marie Tanguy – *Ingénieur électronicien (IETA)*
 Jacques Le Poulain – *Hydrographe (MJR)*
 Olivier Feuillas – *Hydrographe (PM)*
 Ludovic Sorgues – *Hydrographe (PM)*
 Régis Brillet – *Informaticien (MTS)*
 Rémy Duviella – *Hydrographe (MTS)*
 Romain Le Guyadec – *Hydrographe (MTS)*
 Daniel Le Borgne – *Hydrographe (MT)*
 Erwan Abily – *Secrétaire (SM)*
 Christophe Cadour – *Hydrographe (SM)*
 Richard Venot – *Mécanicien (SM)*

G.I.R. :

Chef fusilier marin : **Laurent Lebris (MTS)**
 Frédéric Vegscheider – *Fusilier (SM)*
 Guillaume Boileve – *Fusilier (QM1)*
 Régis Coursimaud – *Fusilier (QM1)*
 Steven Lorzil – *Fusilier (QM1)*
 Alexandre Penec – *Fusilier (QM2)*
 Florian Didelot – *Fusilier (MOT)*

Bord :

Commandant : **Alain Le Bail (CF)**
 Jean Francizos – *Second (CC)*
 Pierre Ginefri – *Chef mécanicien (EVI)*
 Xavier Nicolas – *Communication-santé (EVI)*
 Daniel Thepaut – *Cdt adjoint équipage (EVI)*
 Jean-Marc Sacavini – *Mécanicien (MP)*
 Claude L’Hostis – *Transmetteur radio (MP)*
 Jean-Luc Burnet – *Capitaine d’armes (PM)*
 Louis Caroff – *Navigateur (PM)*
 Daniel Favennec – *Bosco (PM)*
 Pascal Grijol – *Mécanicien (PM)*
 Christophe Trabac – *Electricien (PM)*
 François Autret – *Cuisinier (MTS)*
 Yohann Roy – *Infirmier (MTS)*
 Fabien Royer – *Navigateur (MTS)*
 François Rabilloud – *Transmetteur radio (MTS)*
 Yann Bodin – *Electricien (SM)*
 Tony Durand – *Manœuvrier (SM)*
 Emmanuel Floch – *Maître d’hôtel (SM)*
 Mathieu Mariel – *Cuisinier (SM)*
 Frédéric Loustalot – *Commis (SM)*
 Sébastien Pennec – *Electro-mécanicien (SM)*
 Michel Poyer – *Mécanicien (SM)*
 Guillaume Smetryns – *Manœuvrier (SM)*
 Anthony Dorat – *Navigateur (QM2)*
 Cedric Kerneis – *Restauration (QM2)*
 Jérôme Halipre – *Manœuvrier (QM2)*
 Mehdi Belkebir – *Opération navale (MOT)*
 Alexandre Govin – *Opération navale (MOT)*

1 – Lab. Tectonique, UMR 7072, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, CNRS, 4 Place Jussieu BP 129, 75252 PARIS CEDEX 05

2 – Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

3 – EA 2642 Géosciences, Université de Franche-Comté, 16 route de Gray, 25030 Besançon

4 – Lab. Tectonique, UMR 7072, Université de Cergy-Pontoise, 5, Mail Gay Lussac, Neuville/Oise, 95 031 Cergy-Pontoise Cedex

Grades de la Marine :

CF : Capitaine de frégate ; *CC* : Capitaine de corvette ; *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.

□ Plan de position

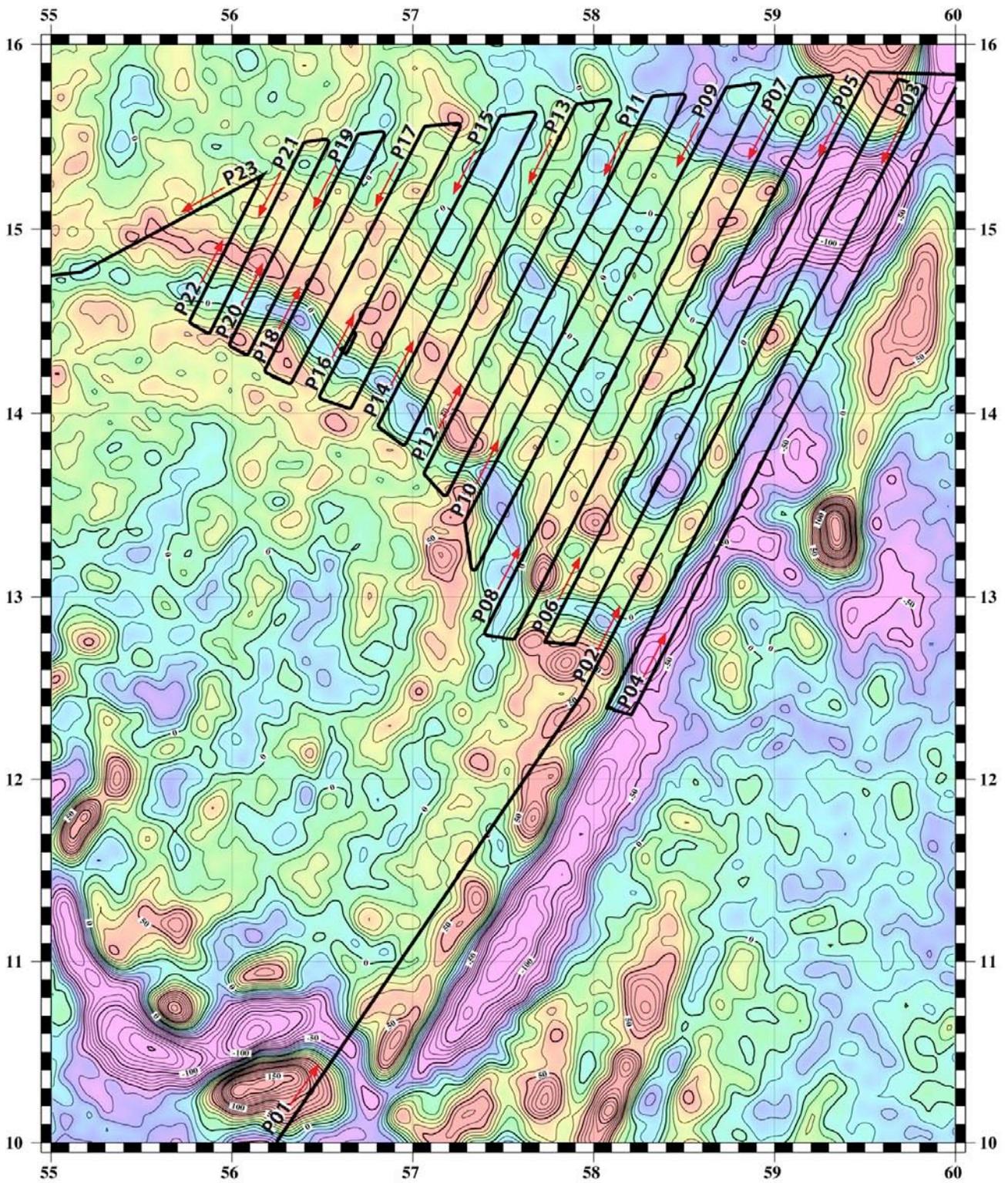


Figure 1. Plan de position de la campagne AOC.

 **Tableau de déroulement**

N° profil	Début de profil			Fin de profil			Distance		Cap °E	Vitesse Nds	Commentaires
	Latitude °N	Longitude °E	Date - Heure GMT	Latitude °N	Longitude °E	Date - Heure GMT	n.m.	km			
T010-T040	-4,382	55,483	20-sep 6:28	3,000	53,250	22-sep 0:10	463,1	857,6	343	11,1	Départ Mahé
T050-T060	3,000	53,250	22-sep 0:10	10,000	56,250	23-sep 22:46	456,8	846,0	23	9,8	Passage ligne
P010	10,000	56,250	23-sep 22:46	12,455	57,930	24-sep 15:33	177,5	328,8	34	10,6	
P020	12,455	57,930	24-sep 15:33	15,817	59,683	25-sep 11:51	226,2	418,9	27	11,1	
R020	15,817	59,683	25-sep 11:56	15,768	59,838	25-sep 12:42	9,4	17,5	108	11,8	
P030	15,768	59,838	25-sep 12:46	12,392	58,066	26-sep 9:34	227,5	421,3	207	10,9	
R030	12,392	58,066	26-sep 9:41	12,352	58,207	26-sep 10:26	8,6	15,9	106	11,2	
P040	12,352	58,207	26-sep 10:27	15,833	60,017	27-sep 7:30	234,1	433,5	27	11,0	
R040	15,833	60,017	27-sep 7:40	15,850	59,522	27-sep 10:16	28,6	53,0	272	9,5	
P050-P051	15,850	59,522	27-sep 10:21	12,737	57,895	28-sep 6:24	209,5	388,0	207	10,6	Panne SMF
R050	12,737	57,895	28-sep 6:26	12,750	57,727	28-sep 7:22	9,9	18,3	275	10,2	
P060-P062	12,750	57,727	28-sep 7:34	15,833	59,330	29-sep 2:00	207,3	383,9	27	11,1	pêcheur iranien
R060	15,833	59,330	29-sep 2:02	15,815	59,127	29-sep 3:00	11,8	21,8	265	11,6	
P070	15,815	59,127	29-sep 3:01	12,764	57,559	29-sep 21:37	204,6	379,0	206	11,0	
R070	12,764	57,559	29-sep 21:42	12,790	57,388	29-sep 22:26	10,1	18,8	279	10,7	
P080	12,790	57,388	29-sep 22:34	15,793	58,930	30-sep 16:28	201,4	373,0	26	11,2	
R080	15,793	58,930	30-sep 16:40	15,765	58,732	30-sep 17:30	11,6	21,5	262	10,5	
P090	15,765	58,732	30-sep 17:36	13,108	57,328	1-oct 10:23	179,2	331,9	207	10,7	50 ans P. Huchon
R090	13,108	57,328	1-oct 10:30	13,408	57,286	1-oct 11:52	18,2	33,7	352	11,3	
P100	13,408	57,286	1-oct 12:00	15,733	58,517	2-oct 2:19	156,9	290,5	27	11,0	Panne magnéto
R100	15,733	58,517	2-oct 2:29	15,717	58,322	2-oct 3:17	11,3	21,0	265	10,9	
P110	15,717	58,322	2-oct 3:21	13,539	57,179	2-oct 16:27	146,6	271,5	207	11,1	
R110	13,539	57,179	2-oct 16:37	13,670	57,059	2-oct 17:23	10,5	19,5	318	11,7	
P120	13,670	57,059	2-oct 17:31	15,705	58,105	3-oct 5:25	136,5	252,7	26	11,5	
R120	15,705	58,105	3-oct 5:35	15,675	57,903	3-oct 6:30	11,8	21,8	261	10,7	
P130	15,675	57,903	3-oct 6:31	13,817	56,952	3-oct 17:38	124,5	230,5	206	11,2	
R130	13,817	56,952	3-oct 17:48	13,929	56,804	3-oct 18:35	11,0	20,3	308	10,4	
P140	13,929	56,804	3-oct 18:41	15,638	57,692	4-oct 4:53	114,8	212,7	27	11,3	
R140	15,638	57,692	4-oct 5:00	15,612	57,483	4-oct 5:54	12,2	22,5	262	10,9	
P150	15,612	57,483	4-oct 6:00	14,022	56,655	4-oct 15:34	106,9	197,9	207	11,2	
R150	14,022	56,655	4-oct 15:42	14,082	56,476	4-oct 16:30	11,0	20,5	289	10,2	
P160-P161	14,082	56,476	4-oct 16:39	15,575	57,273	5-oct 3:04	100,9	186,9	27	9,7	Panne SMF
R160	15,575	57,273	5-oct 3:16	15,555	57,063	5-oct 4:07	12,2	22,6	264	10,8	
P170	15,555	57,063	5-oct 4:13	14,155	56,322	5-oct 12:40	94,4	174,9	207	11,2	
R170	14,155	56,322	5-oct 12:50	14,226	56,176	5-oct 13:30	9,5	17,6	297	10,2	
P180	14,226	56,176	5-oct 13:36	15,533	56,853	5-oct 21:13	87,8	162,6	27	11,5	
R180	15,533	56,853	5-oct 21:28	15,512	56,697	5-oct 21:58	9,1	16,9	262	9,8	
P190	15,512	56,697	5-oct 22:09	14,313	56,085	6-oct 5:12	80,3	148,7	206	11,4	
R190	14,313	56,085	6-oct 5:20	14,367	55,981	6-oct 6:02	6,9	12,8	298	8,0	
P200	14,367	55,981	6-oct 6:04	15,491	56,546	6-oct 12:39	75,0	138,9	26	11,4	
R200	15,491	56,546	6-oct 12:50	15,470	56,397	6-oct 13:22	8,7	16,1	262	10,6	
P210	15,470	56,397	6-oct 13:28	14,429	55,874	6-oct 19:41	69,5	128,7	206	11,2	
R210	14,429	55,874	6-oct 19:46	14,493	55,761	6-oct 20:16	7,6	14,1	301	10,6	
P220	14,493	55,761	6-oct 20:24	15,293	56,170	7-oct 1:02	53,6	99,2	26	11,6	
P230	15,293	56,170	7-oct 1:10	14,767	55,167	7-oct 6:48	66,2	122,6	242	11,5	
P240	14,767	55,167	7-oct 6:48	14,633	54,000	7-oct 13:00	68,2	126,4	263	11,0	Arrêt SBP
	14,633	54,000		11,641	43,277		652,2	1207,9	254		
	11,641	43,277		11,639	43,130		8,7	16,0	269		
	11,639	43,130		11,606	43,127		2,0	3,6	185		Arrivée Djibouti

RAPPEL DES OBJECTIFS

▣ Survol du projet

La campagne A.O.C. dans le NW de l’Océan Indien avait pour but de déterminer la géométrie actuelle du point triple Arabie-Inde-Somalie et sa cinématique depuis le début de l’océanisation dans le Golfe d’Aden il y a environ 20 Ma. La position et la nature du point triple qui connecte les dorsales d’Aden-Sheba, de Carlsberg, et la zone de fracture d’Owen, sont actuellement mal connues. Le point triple a longtemps été positionné à la jonction de la zone de fracture d’Owen avec la dorsale d’Aden-Sheba et la faille transformante d’Owen (12,5°N, 58°E ; e.g., Gordon et DeMets, 1989). Il était alors considéré comme un point triple FFR ("transform-transform-ridge"). Nos travaux récents suggèrent qu’il se trouve 300 km à l’ouest et qu’il est de type RRR ("ridge-ridge-ridge" ; Fournier et al., 2001). L’objectif de la campagne A.O.C. était d’effectuer un relevé bathymétrique, magnétique et gravimétrique de la zone du point triple pour déterminer sa position, sa nature, et sa cinématique. Une reconstitution de l’évolution du point triple depuis le début de l’ouverture du golfe d’Aden pourra ainsi être réalisée. Elle permettra de tester (1) les modèles d’ouverture du golfe d’Aden pour préciser le processus moteur de la déchirure lithosphérique et (2) la stabilité des points triples FFR (et RRF) sur Terre.

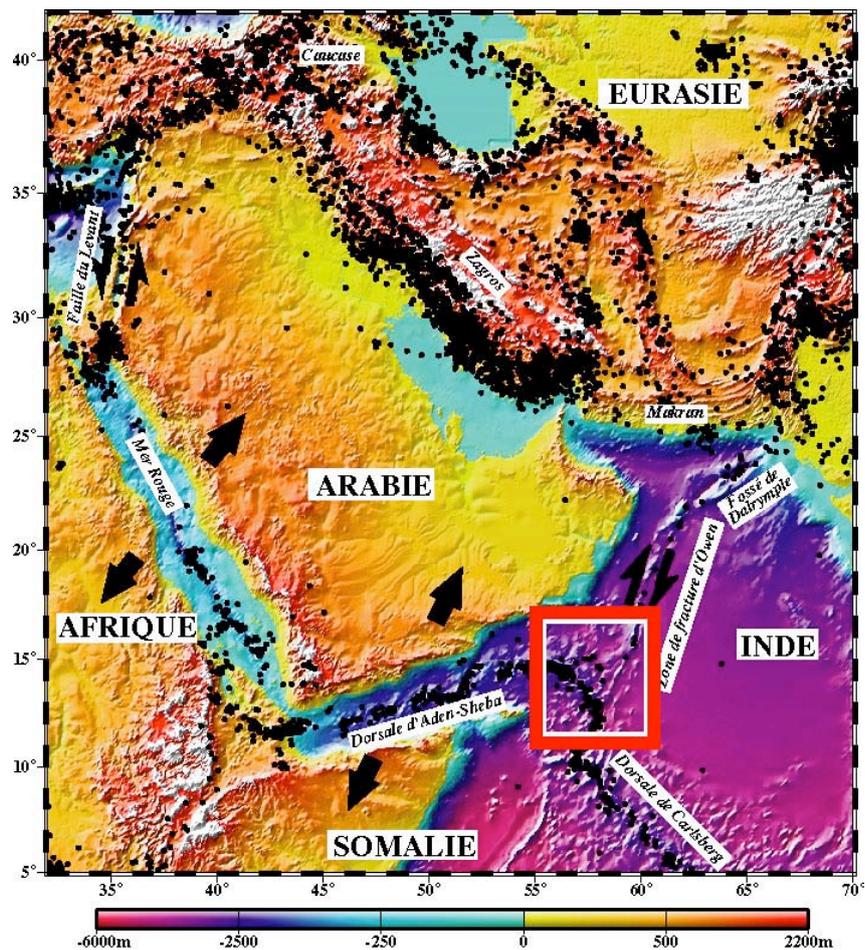


Figure 2. Localisation du point triple A.O.C. (Aden-Owen-Carlsberg) à la jonction des plaques Arabie, Inde et Somalie.

□ Objectifs

➤ Localisation, configuration et cinématique actuelle du point triple A.O.C.

La figure 3 montre une carte de la sismicité superficielle et des mécanismes au foyer extraite de l'article de Gordon et DeMets (1989). L'interprétation de Gordon et DeMets (1989), comme celle des modèles cinématiques globaux (Minster et Jordan, 1978 ; Chase, 1978 ; DeMets et al. ; 1990, 1994) et des études régionales (Cochran, 1981 ; Jestin et al., 1994 ; Manighetti et al., 1997), situe le point triple Arabie-Inde-Somalie à 12,5°N et 58°E, à la jonction entre la dorsale de Sheba, la faille transformante d'Owen (OTF sur la Figure 3) et la zone de fracture d'Owen. Cependant, la sismicité montre que la zone de fracture d'Owen est sismiquement silencieuse au sud de 15°N jusqu'à la transformante d'Owen (Figure 4), tandis qu'une zone de sismicité diffuse relie la zone de fracture d'Owen depuis 15°N jusqu'au coude de la dorsale d'Aden-Sheba dans le golfe d'Aden oriental, approximativement à 14,5°N et 56,4°E. La connexion a lieu au niveau d'un important essaim sismique qui coïnciderait avec le point triple AOC. Celui-ci se situerait ainsi à près de 300 km de sa position précédente et serait de type RRR ("ridge-ridge-ridge") plutôt que FFR ("transform-transform-ridge" ; Figure 4).

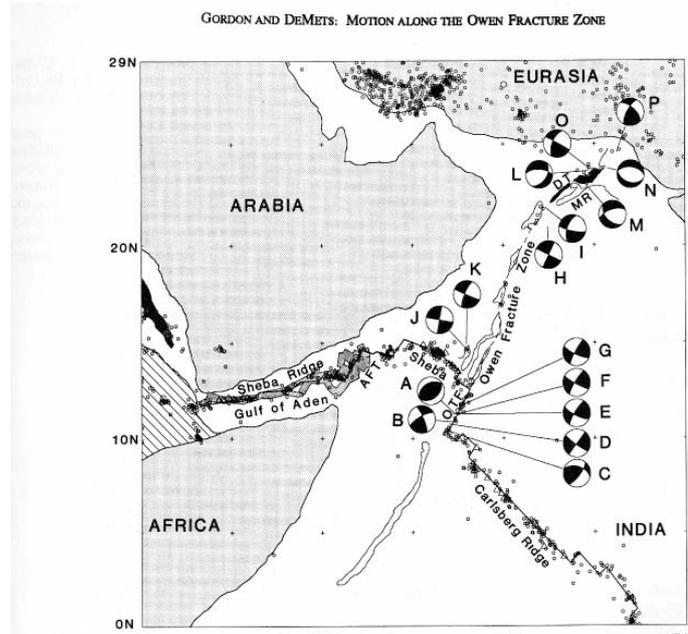


Figure 3. Carte de la sismicité superficielle et des mécanismes au foyer dans la zone du point triple Arabie-Inde-Somalie, extraite de l'article de Gordon et DeMets (1989).

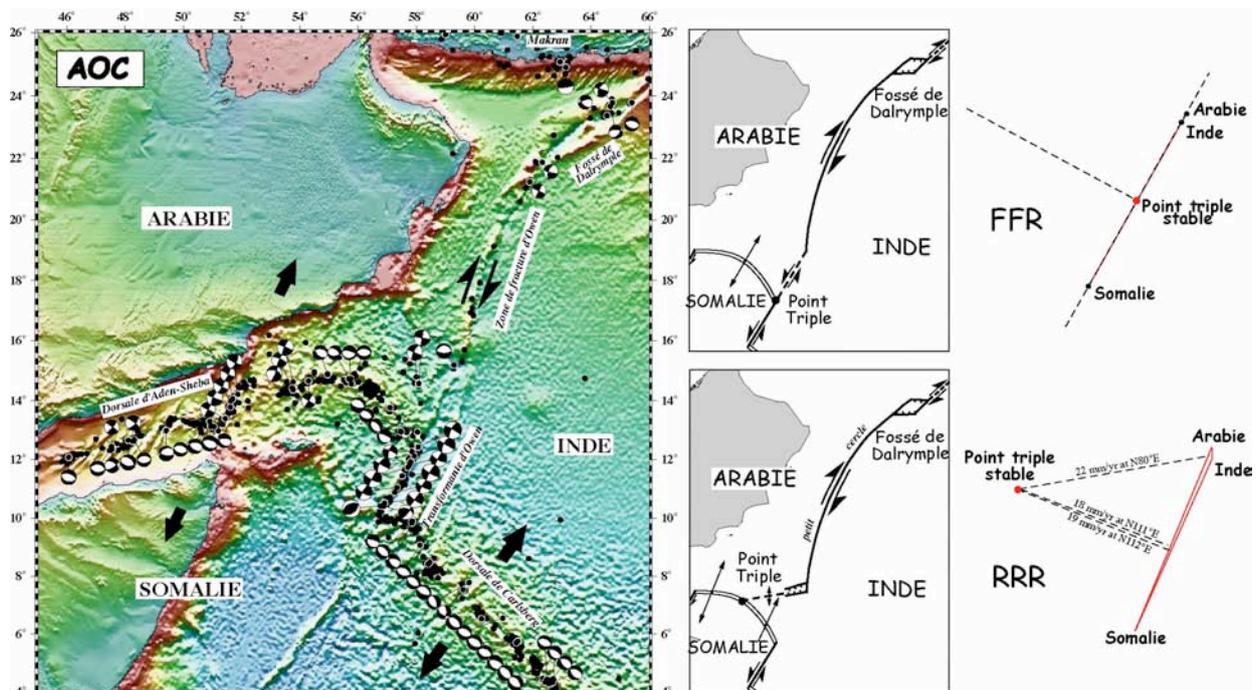


Figure 4. Sismicité superficielle et mécanismes au foyer dans la zone du point triple A.O.C. La localisation du point triple, sa géométrie, son triangle de vitesses et sa stabilité sont montrés pour les configurations FFR et RRR.

➤ **Evolution du point triple A.O.C. depuis ~20 Ma : implications pour l'ouverture du golfe d'Aden**

Le point triple entre les plaques Arabie-Inde-Somalie s'est formé il y a environ 20 Ma quand l'accrétion a débuté dans le golfe d'Aden et que l'Arabie a commencé à se séparer de l'Afrique. Où le point triple est-il apparu et comment a-t-il évolué, telles sont les questions posées. Elles permettent d'aborder le problème du processus moteur de la déchirure lithosphérique dans le golfe d'Aden.

L'originalité du golfe d'Aden est de recouper la plaque Afrique à la fois dans son domaine continental (à l'ouest) et dans son domaine océanique (à l'est). L'état final (actuel) de la déformation montre une dorsale d'orientation moyenne N75°E dans l'ancienne lithosphère continentale, et d'orientation N130°E dans l'ancienne lithosphère océanique (Figure 4). Ces orientations peuvent avoir été acquises dès le début de l'accrétion par une propagation non rectiligne de la dorsale de Sheba vers le point chaud Afar. Deux modèles ont été proposés dans ce sens (Figure 5). Dans le premier modèle, la propagation de la dorsale s'effectue d'abord en direction du NW dans la lithosphère océanique puis en direction du SW dans la lithosphère continentale (Manighetti et al., 1997). Un second modèle de propagation de la dorsale dans un milieu élastique homogène précontraint permet de rendre compte de la courbure de celle-ci (Hubert-Ferrari et al., 2003).

Un scénario différent peut être envisagé : en réponse aux sollicitations par les forces de traction en champ lointain générées par le système de collision-subduction Zagros-Makran, la lithosphère africaine (continentale et océanique) s'est d'abord déchirée de manière quasi rectiligne et une dorsale d'orientation N75°E s'est mise en place. Par la suite, cette dorsale a progressivement été remplacée à son extrémité orientale par la dorsale de Carlsberg, par migration vers l'ouest du point triple Arabie-Inde-Somalie (Fournier et al. 2001).

Dans chacun des cas, le rôle des forces aux limites dans la déchirure lithosphérique est en balance avec la propagation active de la dorsale vers le point chaud Afar. Cette discussion s'inscrit donc dans le débat "rifting actif contre rifting passif". Un test cinématique original est proposé pour discriminer entre les modèles.

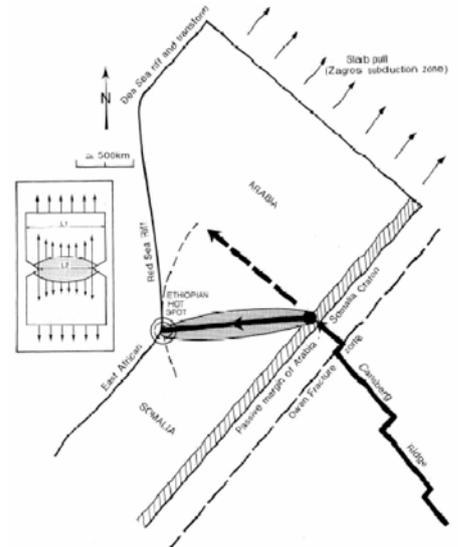


Figure 11. Relationship between initial shape of Arabia-Somalia plate and overall propagation path of Aden ridge. Predominant boundary forces, parallel to ARA-SOM motion vectors, is taken to be slab pull along Zagros subduction zone. Passive margin of Arabia-Somalia craton is dashed. Solid circle is point where Aden rift hit Arabia-Somalia plate ~30 Myr ago. Solid thick line represents propagation path of Aden ridge. Propagation direction is marked by arrow. Stippled area is necking zone, with maximum tensile stress concentration. Dashed thick line outlines simplest propagation path perpendicular to ARA-SOM motion. This dashed circular arc has radius equal to shortest path across the plate. Inset shows increased tension across north in thin plate under uniaxial tension. L1 is plate width; L2 is narrower width of attached section. Size of arrow is proportional to tension. Zone of maximum stress concentration is stippled.

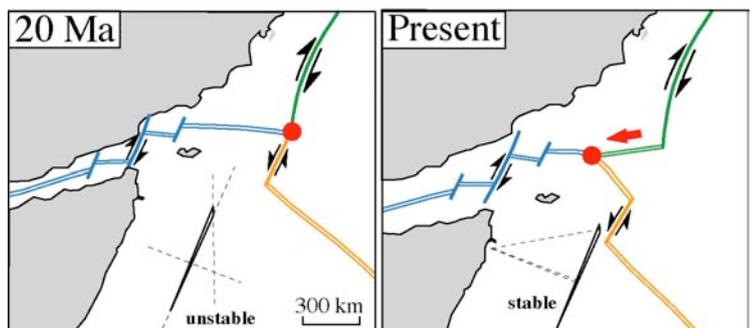
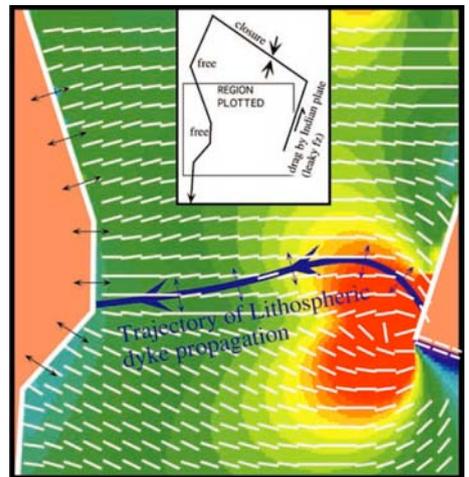


Figure 5. Trois modèles d'ouverture du golfe d'Aden et d'évolution du point triple A.O.C.

➤ Existe-t-il des points triples FFR sur Terre ?

La reconstitution du mouvement des plaques lithosphériques à partir des anomalies magnétiques du plancher océanique a longtemps permis de conclure à l'existence de points triples RRF connectant une frontière transformante à une dorsale océanique. Les exemples connus de telles connections se trouvent (1) au point triple AOC (Aden-Owen-Carlsberg) qui connecte la zone de fracture d'Owen aux dorsales de Carlsberg et d'Aden-Sheba, (2) au point triple des Açores qui connecte la faille Gloria à la dorsale médio-Atlantique (MAR ; Figure 6), et (3) au point triple Juan Fernandez qui connecte la transformante du

Chili à la dorsale Est Pacifique (EPR ; Figure 7). En théorie, dans l'hypothèse où l'accrétion est orthogonale et symétrique, un point triple RRF n'est stable que dans le cas exceptionnel où les deux dorsales sont perpendiculaires (triangle des vitesses rectangle), et doit évoluer en point triple FFR, stable si le triangle des vitesses est isocèle ou plat. En réalité, dans les trois exemples précités la frontière transformante évolue en frontière divergente au voisinage du point triple. Dans les deux premiers cas, le point triple RRF est probablement remplacé par un point triple RRR (Figures 4 et 6), et dans le dernier cas intervient la formation de la microplaque Juan Fernandez.

Ainsi, les points triples RRF, dont on pensait connaître plusieurs exemples sur Terre, semblent ne jamais exister. Le remplacement d'un point triple RRF (ou FFR) dont les conditions de stabilité sont complexes par un point triple RRR toujours stable est sans doute la réponse mécanique de la lithosphère à des conditions cinématiques aux limites qui varient sensiblement au cours du temps.

La campagne A.O.C. permettra de confirmer si le point triple Arabie-Inde-Somalie est de type RRR. En l'absence de point chaud, on peut espérer de meilleures conditions d'observation sur la branche ultra-lente du point triple A.O.C. qu'aux Açores.

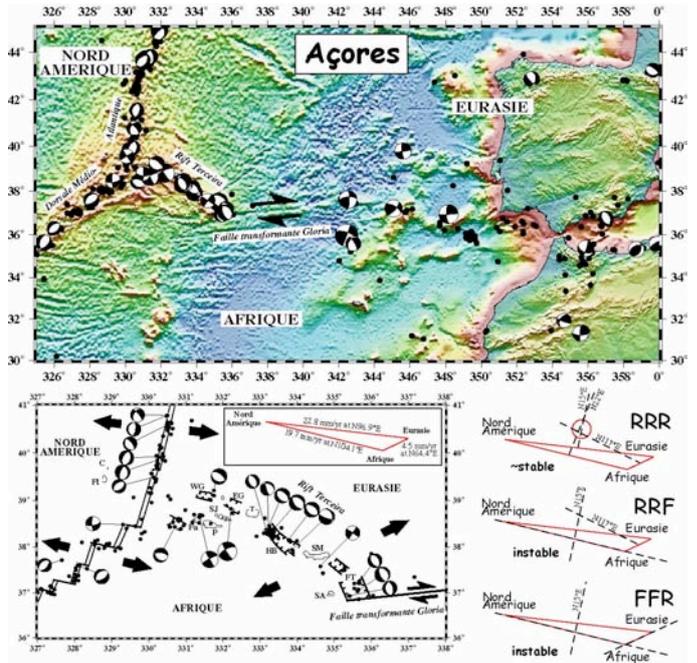


Figure 6. Sismicité, mécanismes au foyer et principales structures dans la zone du point triple des Açores. La localisation précise du point triple et sa nature sont indéterminées. Trois configurations sont envisagées (RRR, RRF, FFR). Seule la configuration RRR est stable (dans l'hypothèse où l'accrétion est symétrique et orthogonale sur la MAR).

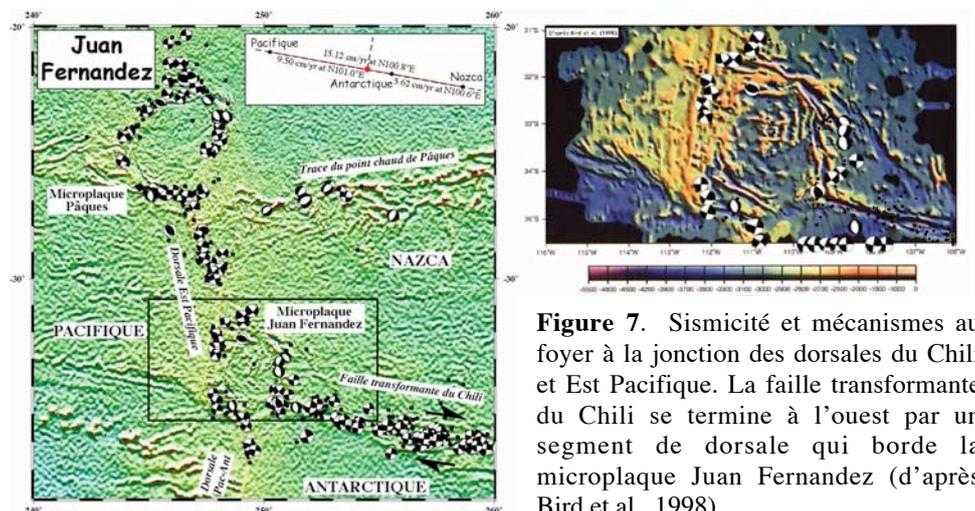


Figure 7. Sismicité et mécanismes au foyer à la jonction des dorsales du Chili et Est Pacifique. La faille transformante du Chili se termine à l'ouest par un segment de dorsale qui borde la microplaque Juan Fernandez (d'après Bird et al., 1998).

□ Bibliographie

- d'Acremont, E., S. Leroy, M.-O. Beslier, N. Bellahsen, M. Fournier, C. Robin, M. Maia, and P. Gente, Structure and evolution of the eastern Gulf of Aden conjugate margins from seismic reflection data, *Geophys. J. Int.*, 160, 669-690, 2005.
- Audin, L., I. Manighetti, P. Tapponnier, F. Métivier, E. Jacques, and P. Huchon, Fault propagation and climatic control of sedimentation on the Goubbet Rift Floor : insights from the Tadjouraden cruise in the western Gulf of Aden, *Geophys. J. Int.*, 144, 391-414, 2001.
- Bellahsen, N., C. Faccenna, F. Funiello, J.M. Daniel, and L. Jolivet, Why did Arabia separate from Africa? Insights from 3-D laboratory experiments, *Earth and Planetary Science Letters*, 216, 365-381, 2003.
- Bird, R.T., Naar, D.F., Larson, R.L., Searle, R. C., and C. R. Scotese, Plate tectonic reconstructions of the Juan Fernandez microplate : Transformation from internal shear to rigid rotation, *J. Geophys. Res.*, 103, 7049-7067, 1998.
- Chamot-Rooke, N., F. Jestin, B. De Voogd, and Phèdre Working Group, Intraplate shortening in the central Indian ocean determined from a 2100-km-long north-south deep seismic reflexion profile, *Geology*, 21, 1043-1046, 1994.
- Chase, C.G., Plate kinematics: the Americas, East Africa and the rest of the world, *Earth Planet. Sci. Lett.* 37 (1978) 355-368.
- Cochran, J.R., The Gulf of Aden : structure and evolution of a young ocean basin and continental margin, *J. Geophys. Res.* 86 (1981) 263-287.
- Courtillot, V., Jaupart, C., Manighetti, I., Tapponnier, P. and Besse, J., On causal links between flood basalts and continental breakup, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 166, 177-195, 1999.
- DeMets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus, S. Stein, Current plate motion, *Geophys. J. Int.* 101 (1990) 425-478.
- Dauteuil, O., P. Huchon, F. Quemeneur, and T. Souriot, Propagation of an oblique spreading centre: the western Gulf of Aden, *Tectonophysics*, 332, 423-442, 2001.
- DeMets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus, S. Stein, Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plates motions, *Geophys. Res. Lett.* 21 (1994) 2191-2194.
- Fournier, M., P. Patriat, and S. Leroy, Reappraisal of the Arabia-India-Somalia triple junction kinematics, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 184, 103-114, 2001.
- Fournier, M., N. Bellahsen, O. Fabbri, and Y. Gunnell, Oblique rifting and segmentation of the NE Gulf of Aden passive margin, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5, Q11005, doi:10.1029/2004GC000731, 2004.
- Gordon, R.G., C. DeMets, Present-day motion along the Owen fracture zone and Dalrymple trough in the Arabian Sea, *J. Geophys. Res.* 94 (1989) 5560-5570.
- Hébert, H.-C. Deplus, P. Huchon, K. Khanbari, and L. Audin, Lithospheric structure of a nascent spreading ridge inferred from gravity data: The western Gulf of Aden, *J. Geophys. Res.*, 106 , 26,345-26,363, 2001.
- Hubert-Ferrari, A., G. King, I. Manighetti, R. Armijo, B. Meyer, and P. Tapponnier, Long-term elasticity in the continental lithosphere; modelling the Aden Ridge propagation and the Anatolian extrusion process, *Geophys. J. Int.*, 153, 111-132, 2003.
- Huchon, P., and K. Khanbari, Rotation of the syn-rift stress field of the northern Gulf of Aden margin, Yemen, *Tectonophysics*, 364, 147-166, 2003.
- Jestin, F., P. Huchon, J.M. Gaulier, The Somalia plate and the East African rift system: Present-day kinematics, *Geophys. J. Int.* 116 (1994) 637-654.
- Kreemer, C., W.E. Holt, and A.J. Haines, An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation, *Geophys. J. Int.*, 154, 8-34, 2003
- Lallemant, S. J., N. Chamot-Rooke, X. Le Pichon, C. Rangin, Zenisu Ridge : a deep intraoceanic thrust related to subduction, off southwest Japan, *Tectonophysics*, 160, 151-174, 1989.
- Larson, R.L., R.C. Searle, M.C. Kleinrock, H. Schouten, R.T. Bird, D.F. Naar, R.I. Rusby, E.E. Hoof, H. Lasthiotakis, Roller-bearing tectonic evolution of the Juan Fernandez microplate, *Nature* 356 (1992) 571-576.
- Lepvrier, C., M. Fournier, T. Bérard, and J. Roger, Cenozoic extension in coastal Dhofar (southern Oman): Implications on the oblique rifting of the gulf of Aden, *Tectonophysics*, 357, 279-293, 2002.
- Leroy, S., P. Gente, M. Fournier, E. d'Acremont, N. Bellahsen, M.-O. Beslier, P. Patriat, M. Maia, A. Blais, J. Perrot, A. Al-Kathiri, S. Merkouriev, P.-Y. Ruellan, J.-M. Fleury, C. Lepvrier, and P. Huchon, From rifting to spreading in the eastern Gulf of Aden: a geophysical survey of a young oceanic basin from margin to margin, *Terra Nova*, 16, 185-192, 2004.
- Ligi, M., E. Bonatti, G. Bortoluzzi, G. Carrara, P. Fabretti, D. Gilod, A.A. Peyve, S. Skolotnev, N. Turko, Bouvet Triple Junction in the South Atlantic: Geology and evolution, *J. Geophys. Res.*, 104, 29,365-29,385, 1999.
- Lonsdale, P., Structural pattern of the Galapagos microplate and evolution of the Galapagos triple junction, *J. Geophys. Res.* 93 (1988) 13,551-13,574.
- Manighetti, I., P. Tapponnier, V. Courtillot, S. Gruszow, P.Y. Gillot, Propagation of rifting along the Arabia-Somalia plate boundary: The Gulfs of Aden and Tadjoura, *J. Geophys. Res.* 102, (1997) 2681-2710.
- McKenzie, D.P., W.J. Morgan, Evolution of triple junctions, *Nature* 224 (1969) 125-133.
- Mercuriev, S., P. Patriat, N. Sochevanova, Evolution de la dorsale de Carlsberg: évidence pour une phase d'expansion très lente entre 40 et 25 Ma (A18 à A7), *Oceanologica Acta* 19 (1996) 1-13.
- Mitchell, N.C., R.A. Livermore, The present configuration of the Bouvet triple junction, *Geology* 26 (1998) 267-270.
- Mitchell, N.C., Distributed extension at the Indian Ocean triple junction, *J. Geophys. Res.* 96 (1991) 8019-8043.
- Minster, J.B., T.H. Jordan, Present-day plate motions, *J. Geophys. Res.* 83 (1978) 5331-5354.
- Quittmeyer, R.C., A.L. Kafka, Constraints on plate motions in southern Pakistan and the northern Arabian Sea from the focal mechanisms of small earthquakes, *J. Geophys. Res.* 89 (1984) 2444-2458.
- Royer, J.Y., and T. Chang, Evidence for relative motions between the Indian and Australian plates during the last 20 myr from plate tectonic reconstructions. Implications for the deformation of the Indo-Australian plates, *J. Geophys. Res.*, 96, 11,779-11,802, 1991.
- Sandwell, D.T., W.H.F. Smith, Marine gravity anomaly from Geosat and ERS-1 satellite altimetry, *J. Geophys. Res.* 102 (1997) 10039-10054.
- Searle, R., Tectonic pattern of the Azores spreading center and triple junction, *Earth Planet. Sci. Lett.* 51 (1980) 415-434.
- Wiens, D.A., S. Stein, C. DeMets, R.G. Gordon, and C. Stein, Plate tectonic models for Indian Ocean intraplate deformation, *Tectonophysics*, 132, 37-48, 19.
- Wilson, T. W., A new class of faults and their bearing on continental drift, *Nature*, 207, 343-347, 1965.

PREMIERS RESULTATS

□ Bathymétrie

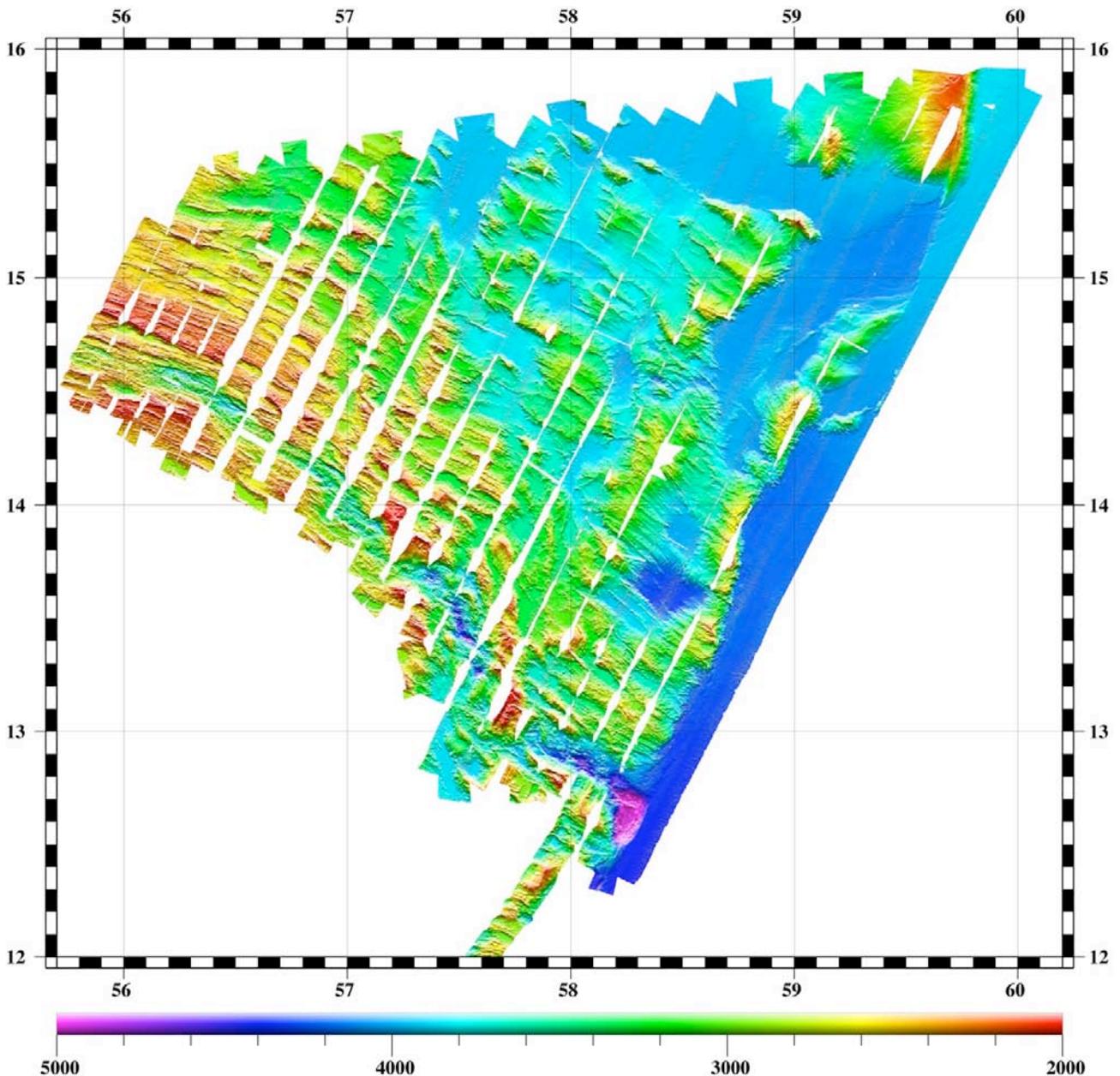


Figure 8. Couverture bathymétrique de l'ensemble de la zone AOC. A la pointe sud du triangle couvert par les données, on distingue un bassin nodal profond (en violet) à la jonction de la faille transformante d'Owen et du rift axial de la dorsale de Sheba. Le rift est sinueux et probablement segmenté par des discontinuités non transformantes. Au sud de la zone, les reliefs arrondis striés de cannelures orientées N27°E qui bordent le rift sont des mégamullions. A la pointe nord du triangle, la terminaison sud de la zone de fracture d'Owen de direction N-S décale dans un sens dextre le relief qu'elle recoupe et se connecte au sud à un bassin losangique. A l'est, la prolongation vers le sud de la zone de fracture d'Owen, jusqu'à la transformante d'Owen, montre un tracé sinueux qui ne correspond pas à la signature rectiligne caractéristique d'une faille décrochante.

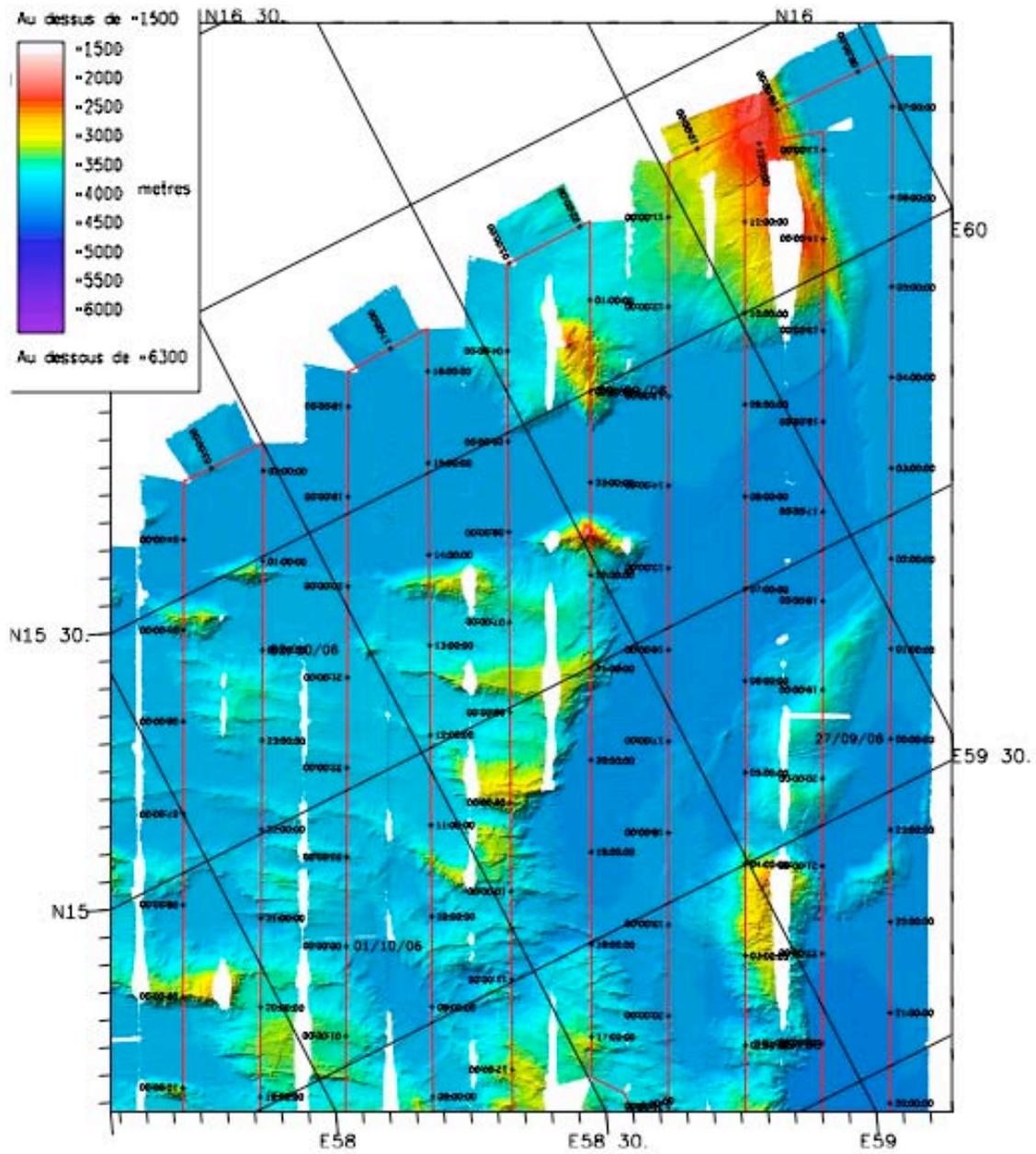


Figure 9. Vue de détail du NE de la zone avec le bassin losangique en terminaison sud de la zone de fracture d'Owen. Au sud du relief principal, la zone de fracture se branche sur une série de failles normales orientées N70°E à E-W qui bordent le bassin au nord et au sud.

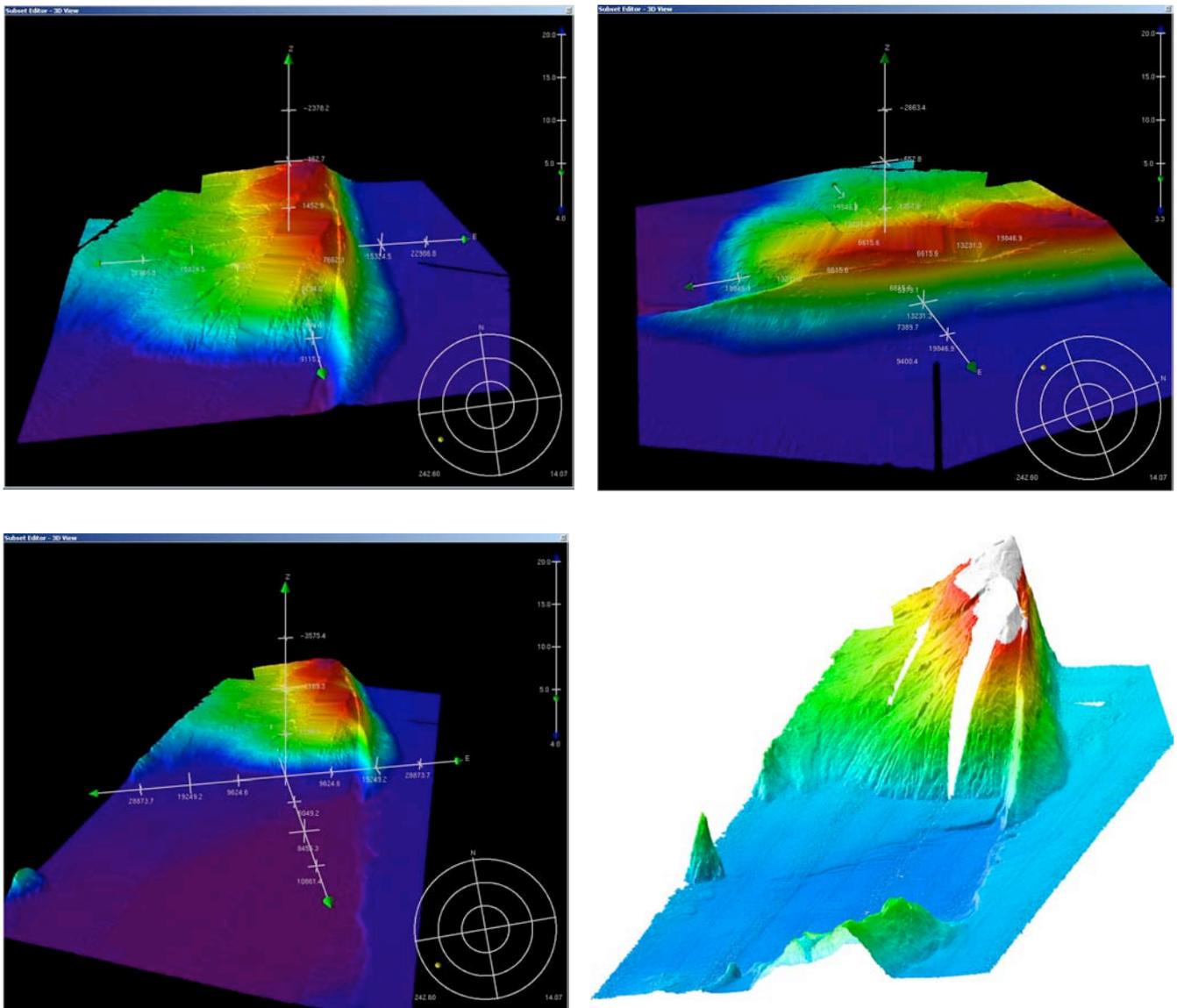


Figure 10. Blocs-diagrammes 3D de la terminaison S de la zone de fracture d’Owen avec son relief bordier et son bassin (vues du sud et de l’est). Noter le décalage dextre du relief d’environ 12 km.

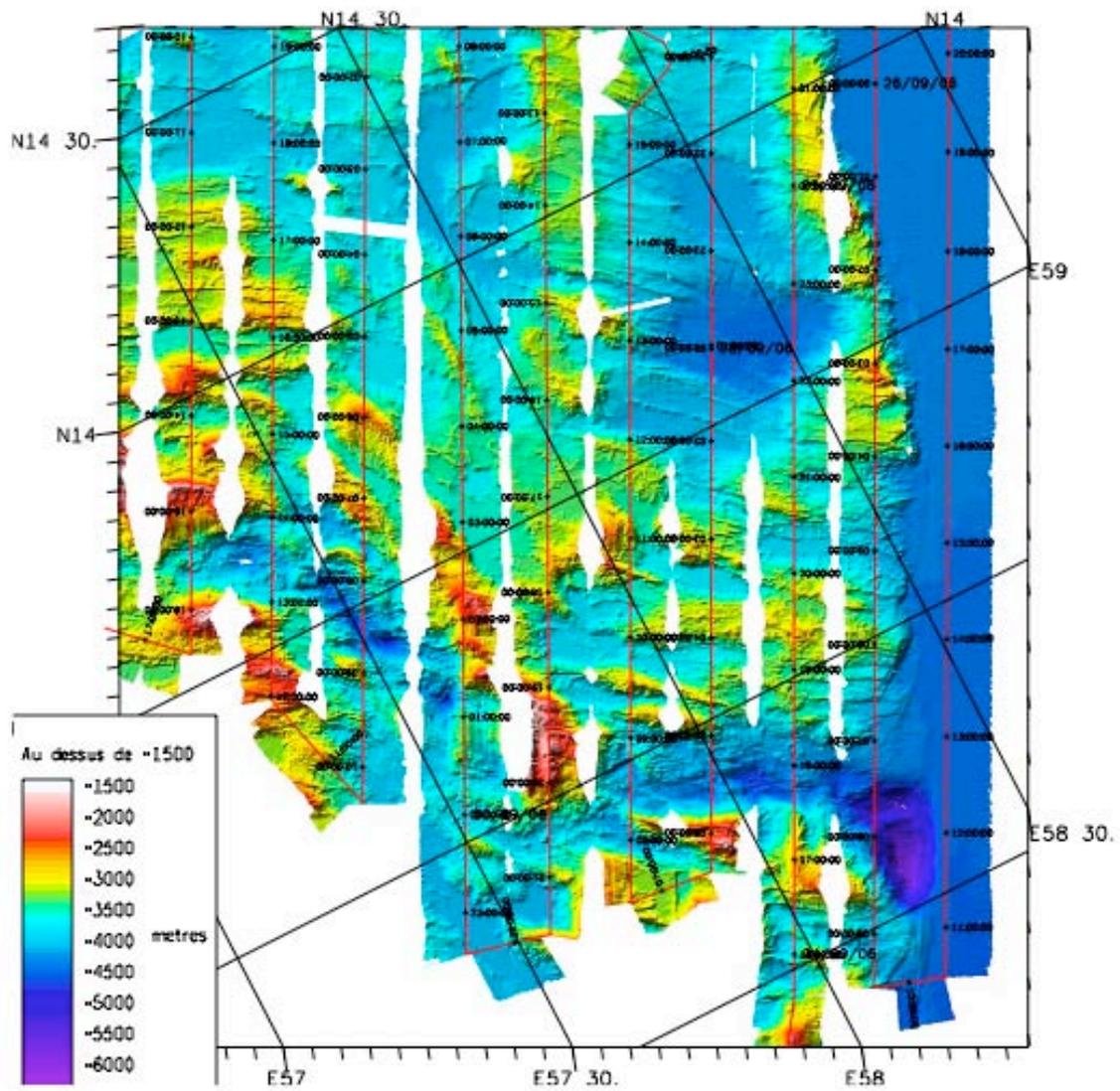


Figure 11. Vue de détail du sud de la zone. Au SE, le bassin nodal connecte le rift axial à la transformante d'Owen. Le rift a un tracé sinueux et se décale progressivement vers le nord. Les mégamullions bordent le rift au sud et au nord dans sa partie SE.

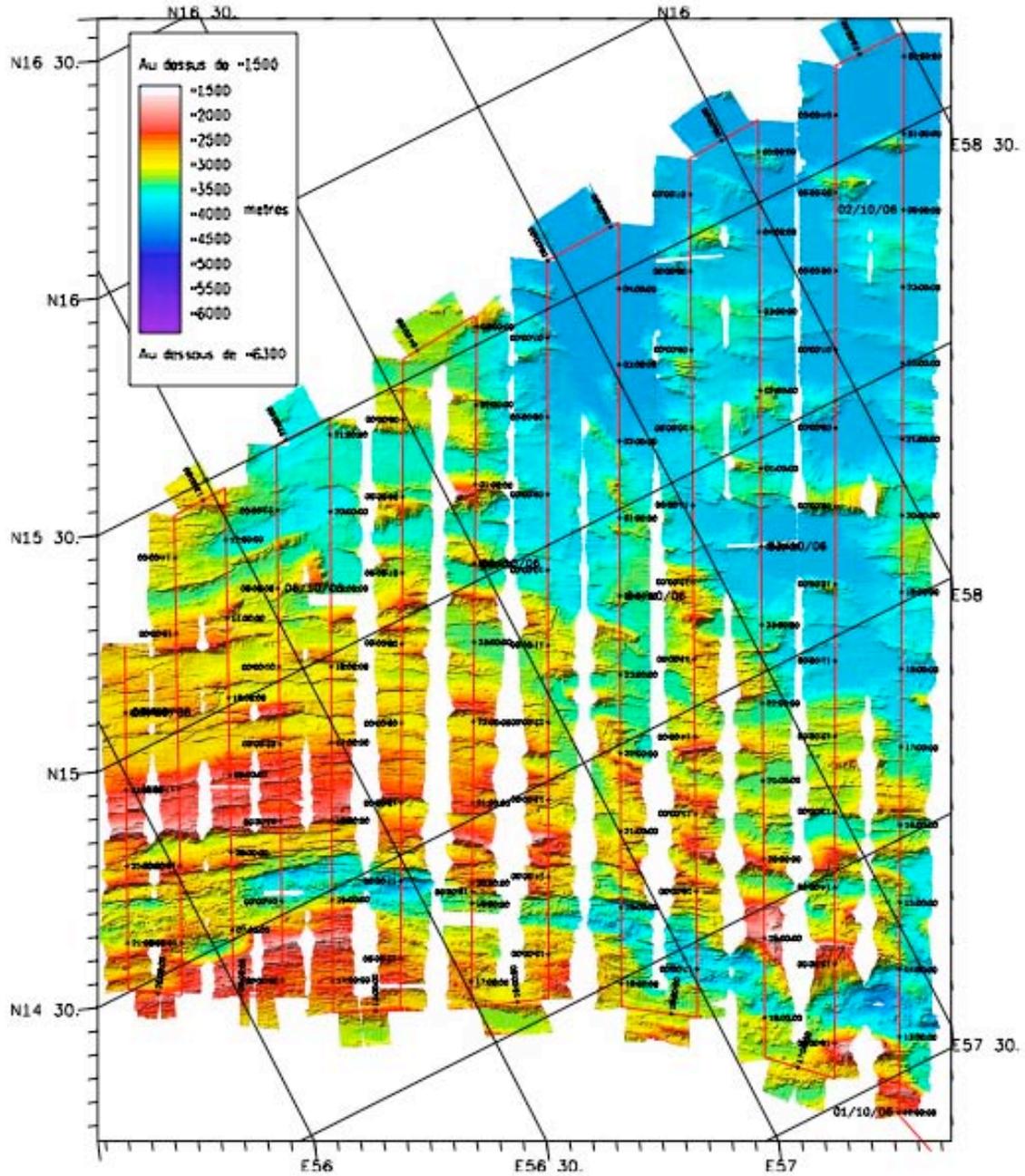


Figure 13. Vue de détail de la partie nord-ouest de la zone d'étude. Le rift axial, de profondeur variable, est limité par ses épaulements bordiers. Sur les flancs de la dorsale, un grain structural parallèle au rift (~N130°E) lié à la présence d'escarpements de faille est observable.

□ Profils du sondeur de sédiments

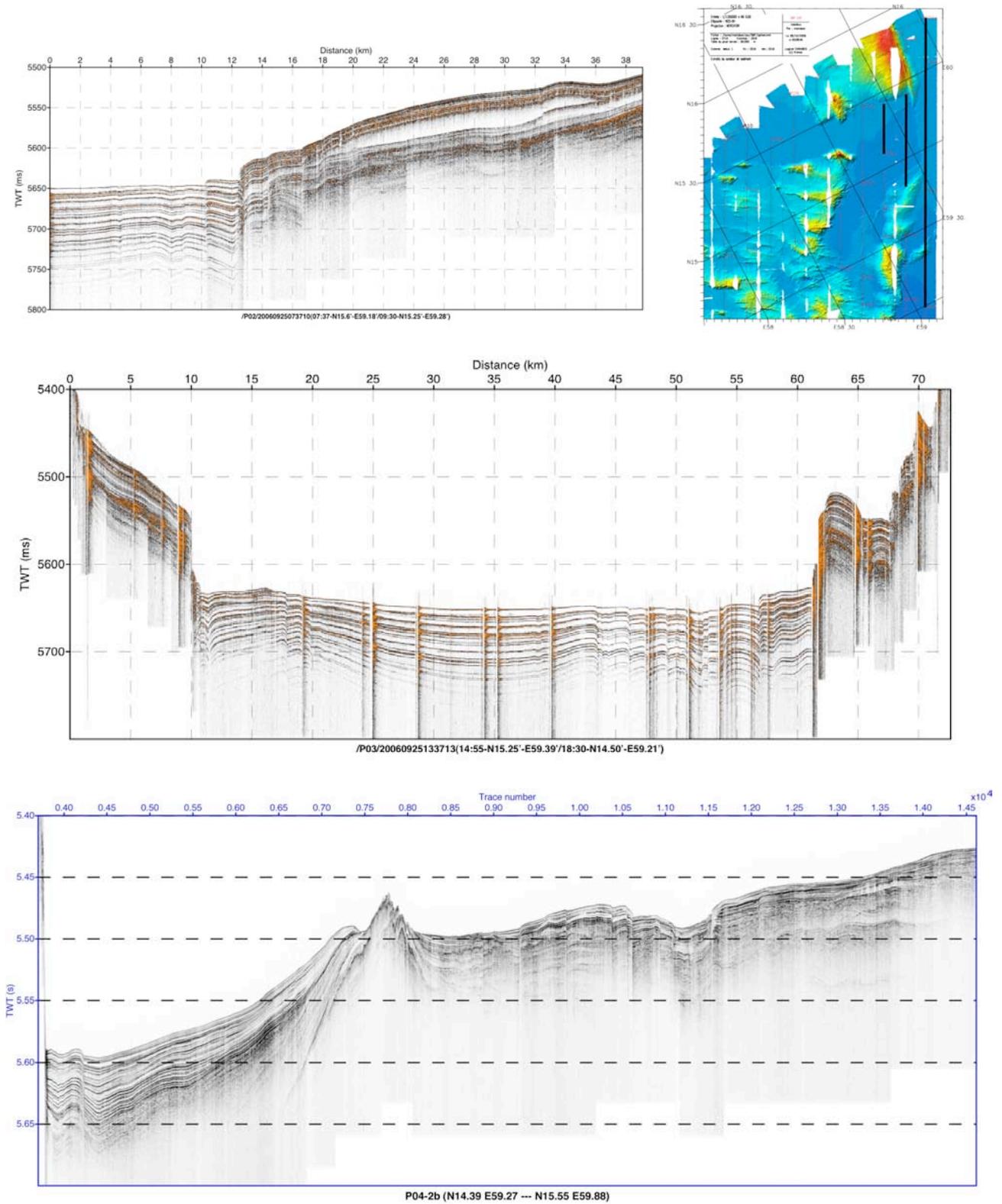


Figure 14. Trois exemples de profils du SBP120 localisés sur la carte en encart. Deux profils du haut : failles normales en bordure et dans le bassin rhomboédrique du NE de la zone d'étude. En bas : profil à travers la plaine abyssale à l'est de la zone de fracture d'Owen, montrant un pointement de socle et des failles normales au nord.

□ Cartes gravimétriques

Les anomalies gravimétriques à l'air libre (Figure 15) et de Bouguer (Figure 16) 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), par exemple au NE et au SE de la zone d'étude. L'anomalie de Bouguer est calculée en effectuant une correction de plateau avec une différence de densité eau/croûte de 1.84. L'effet du remplissage sédimentaire n'est pas pris en compte, ce qui se traduit par une anomalie plus faible dans les bassins précédemment cités. Autour de la dorsale, une zone triangulaire d'anomalies plus faibles (en bleu) qui va en s'élargissant vers l'ouest, traduit probablement l'épaississement progressif de la croûte océanique depuis l'extrémité du segment (au SE) vers le centre (au NW).

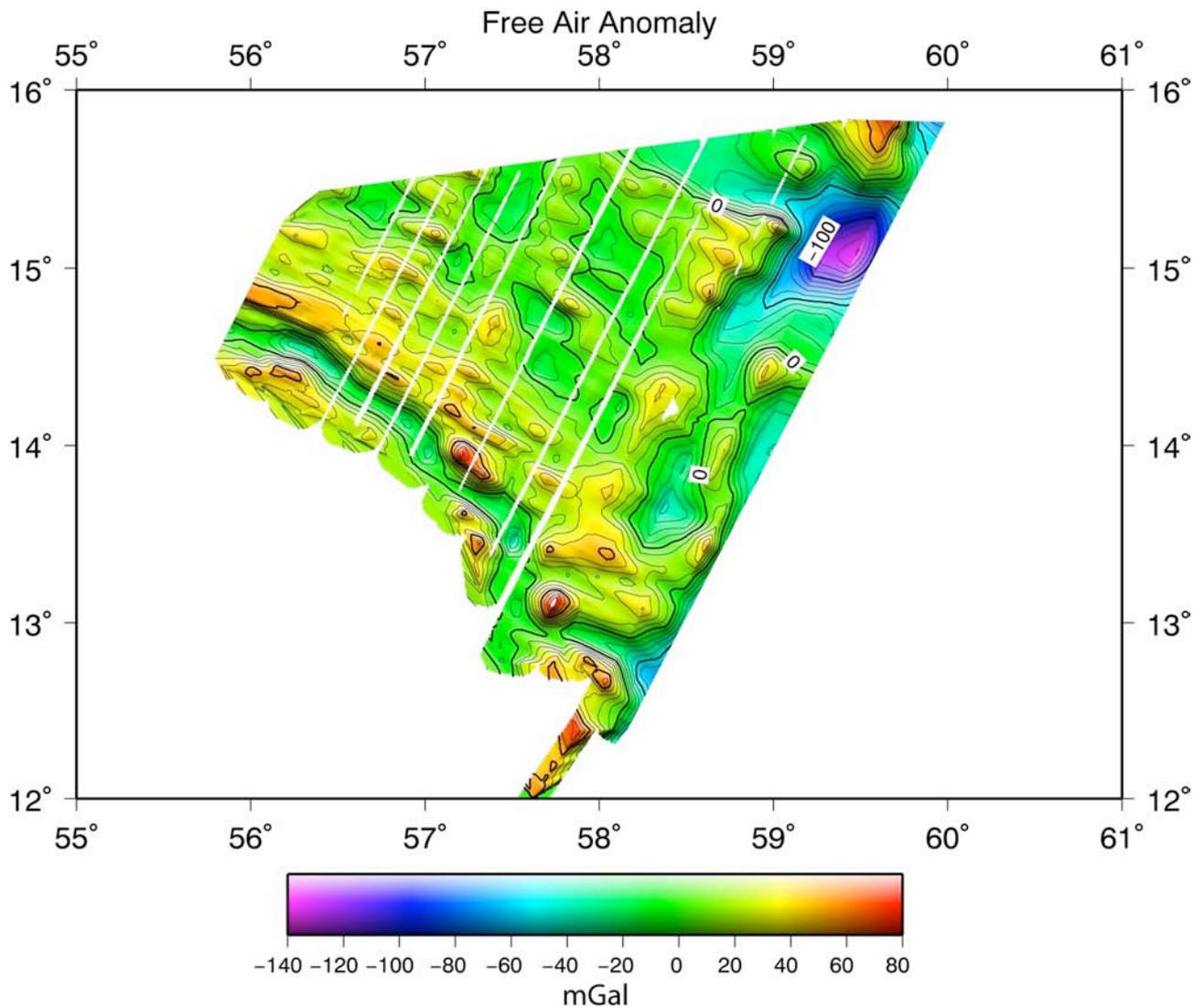


Figure 15.

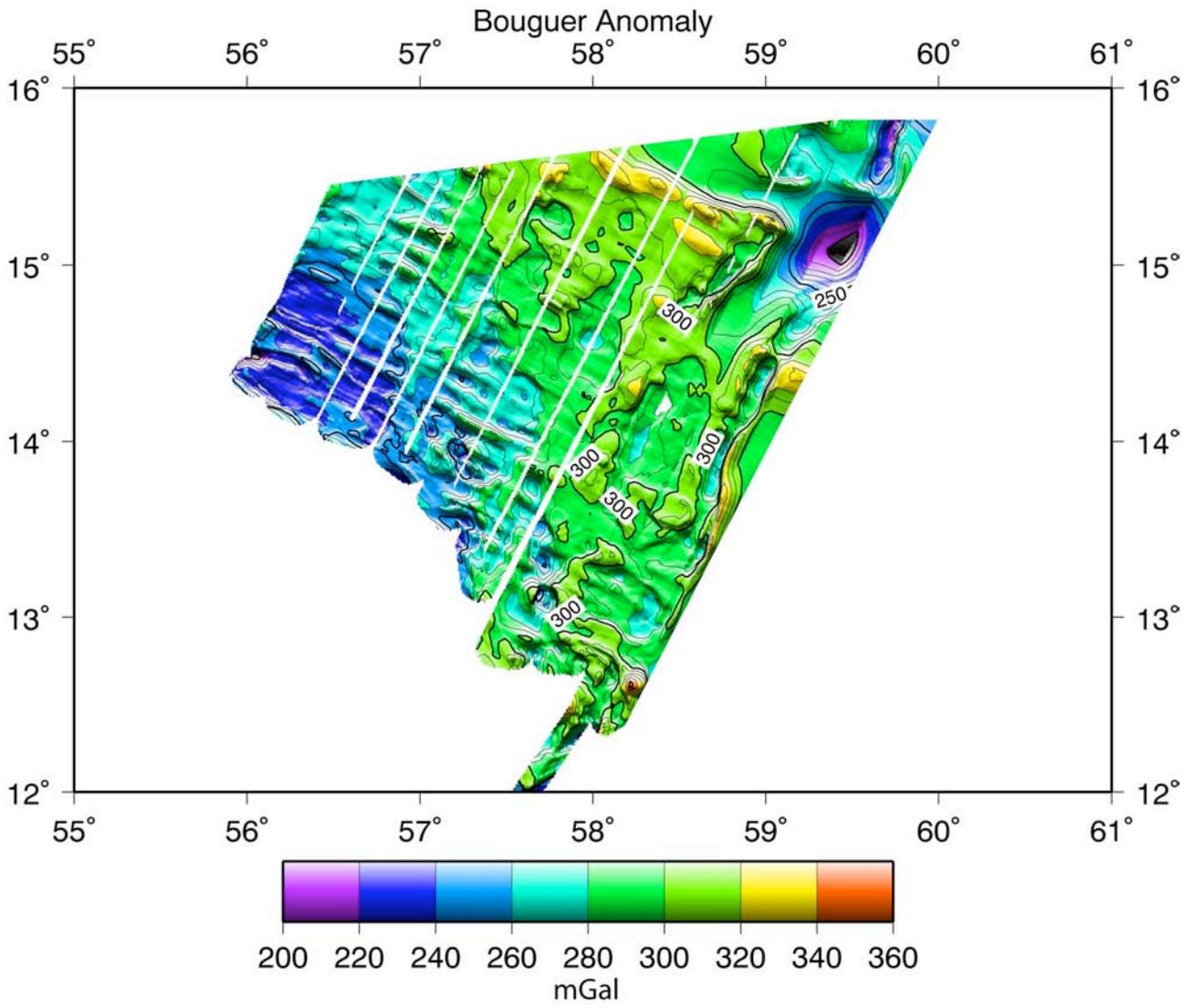


Figure 16.

☐ Anomalies magnétiques

Une interprétation préliminaire a été effectuée en termes d'identification des isochrones en utilisant les profils anomalie-distance le long du profil (programme de Philippe Patriat) et les rabattus le long de la route. Chaque profil a été comparé visuellement à des profils synthétiques calculés pour des vitesses variables (10, 12 et 14 mm/an en demi-taux) et corrélé aux profils adjacents.

Le plus souvent, les anomalies caractéristiques ont pu être identifiées (les chrons 2A, 3A, 5, etc.). L'anomalie 6 a pu être identifiée sur quelques profils, ce qui porte à 20 Ma l'âge de la plus ancienne croûte océanique formée le long de la dorsale de Sheba. Les anomalies se corrélaient en général aisément, sauf dans les zones complexes. Du fait de la forte distorsion anomalique, il sera nécessaire de calculer des anomalies réduites au pôle et/ou de tester l'effet de facteurs de skewness variables afin de « redresser » au mieux les anomalies pour faciliter leur interprétation.

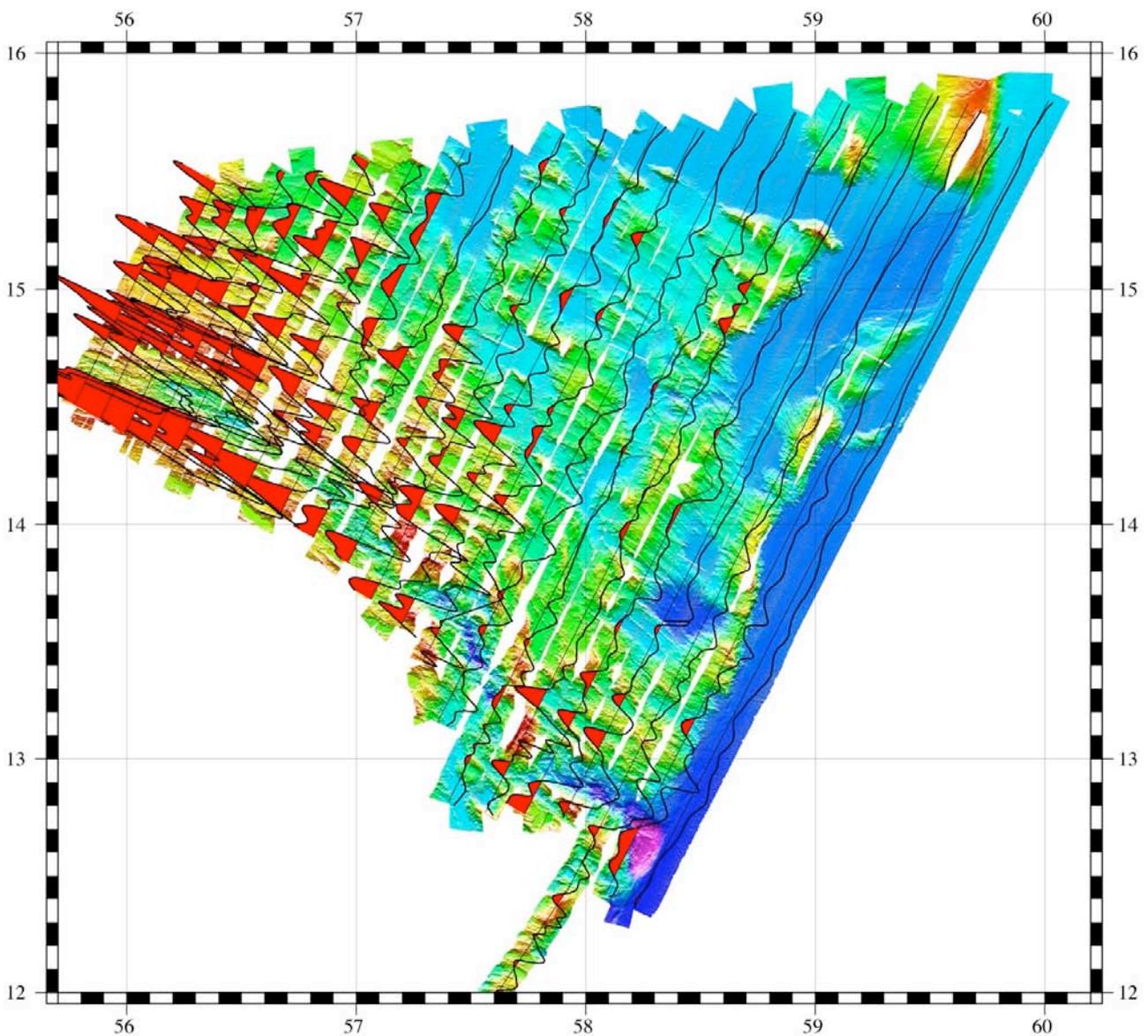
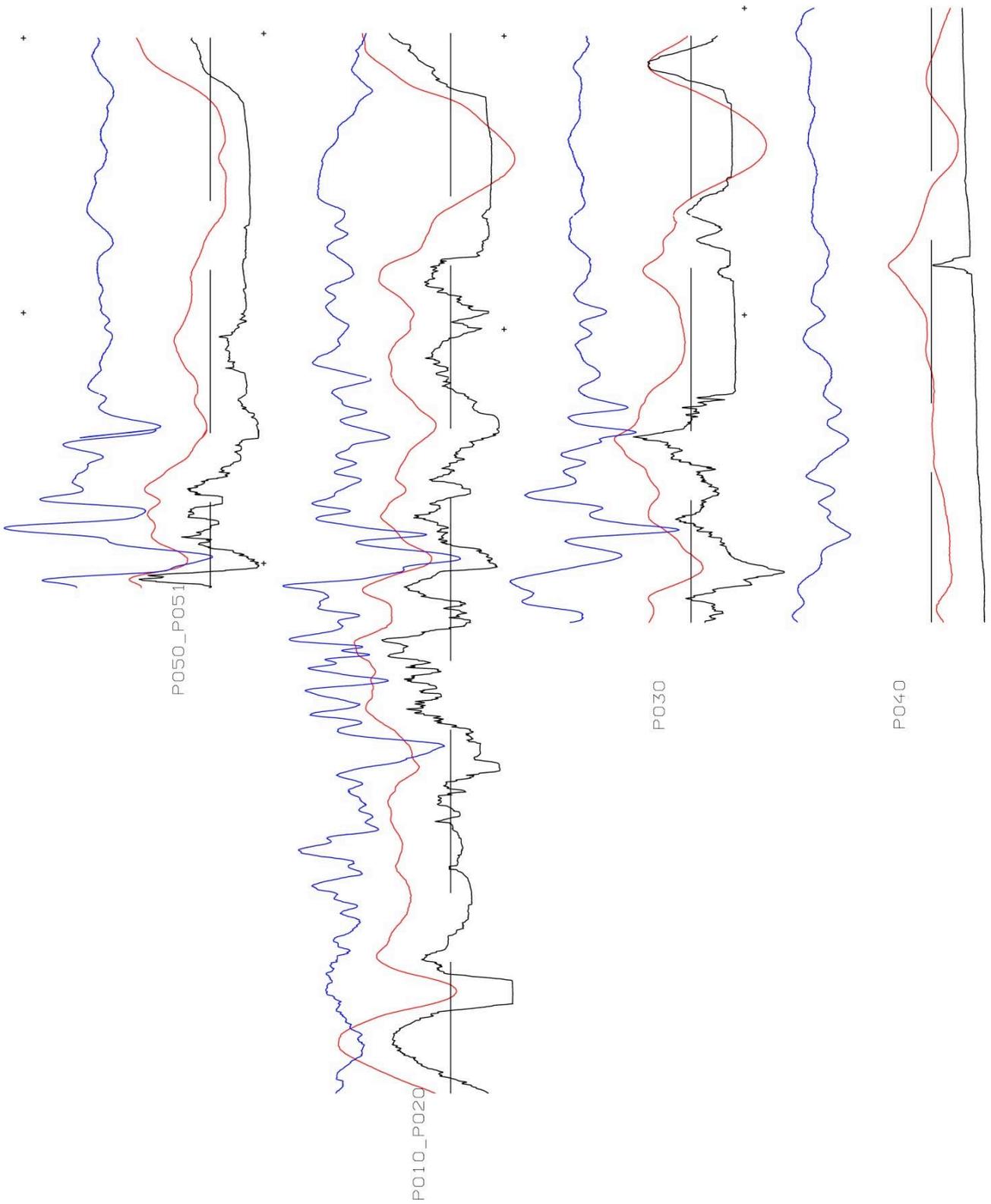
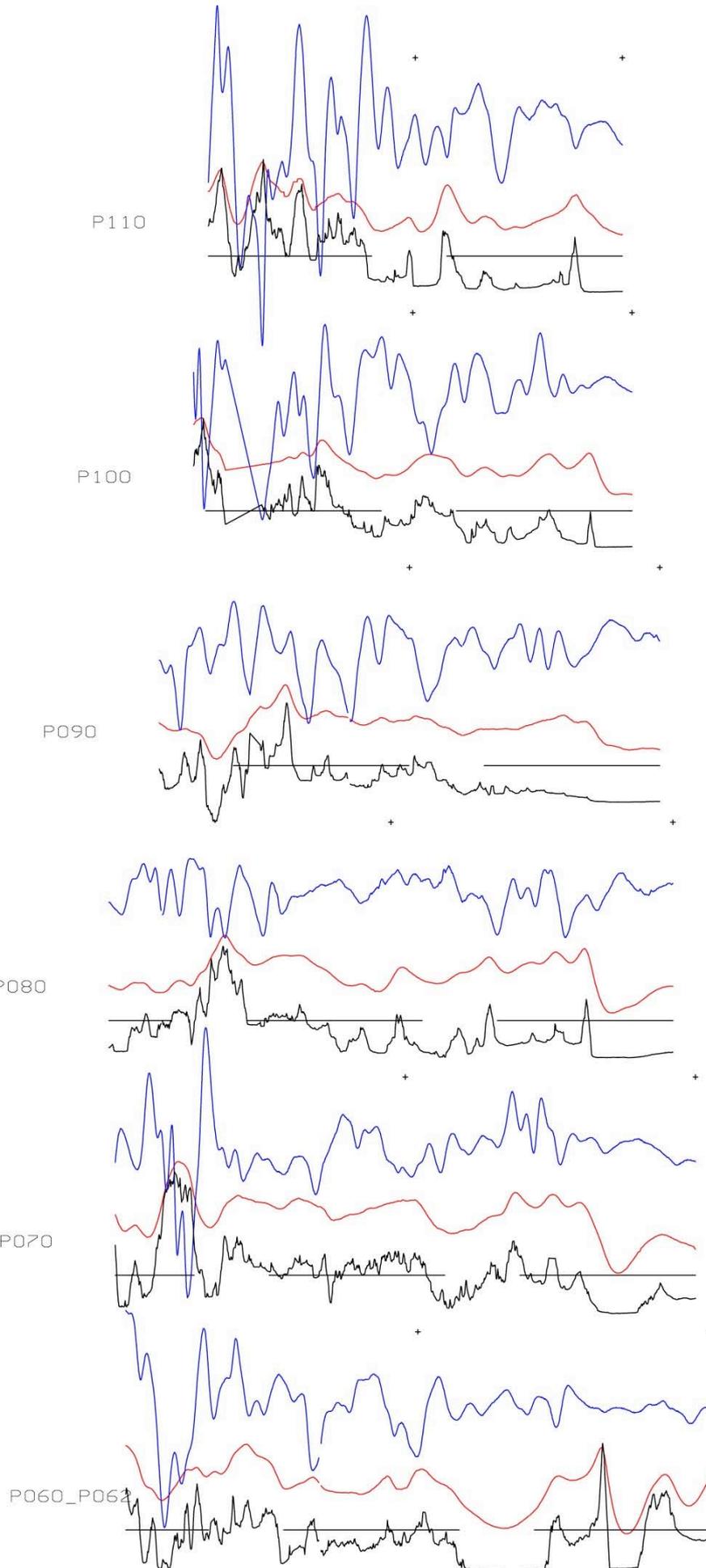


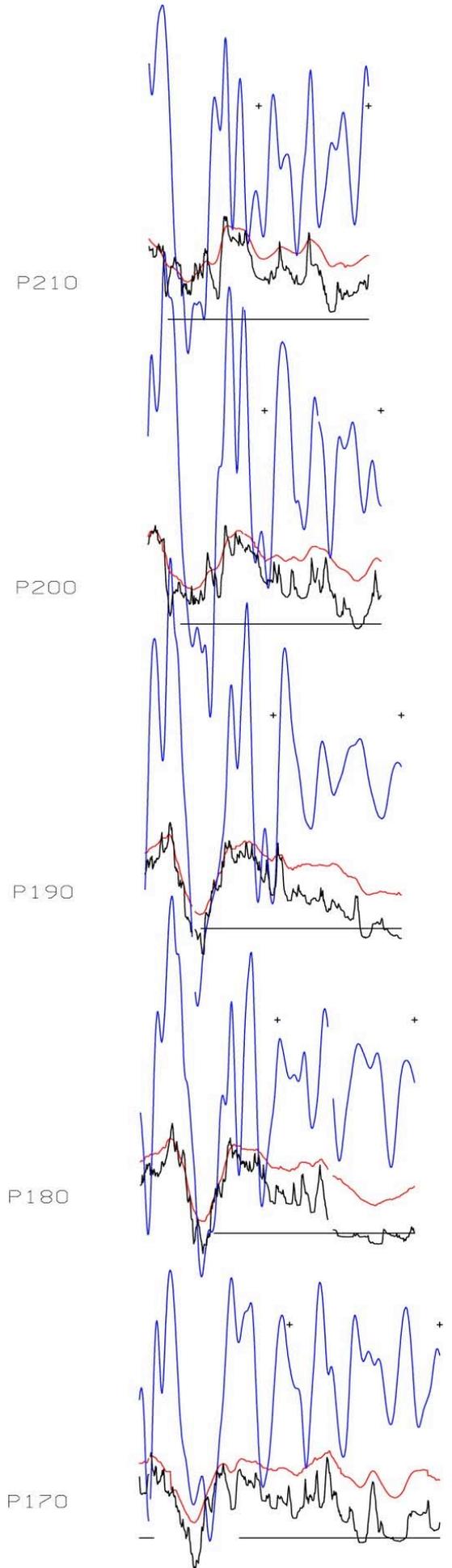
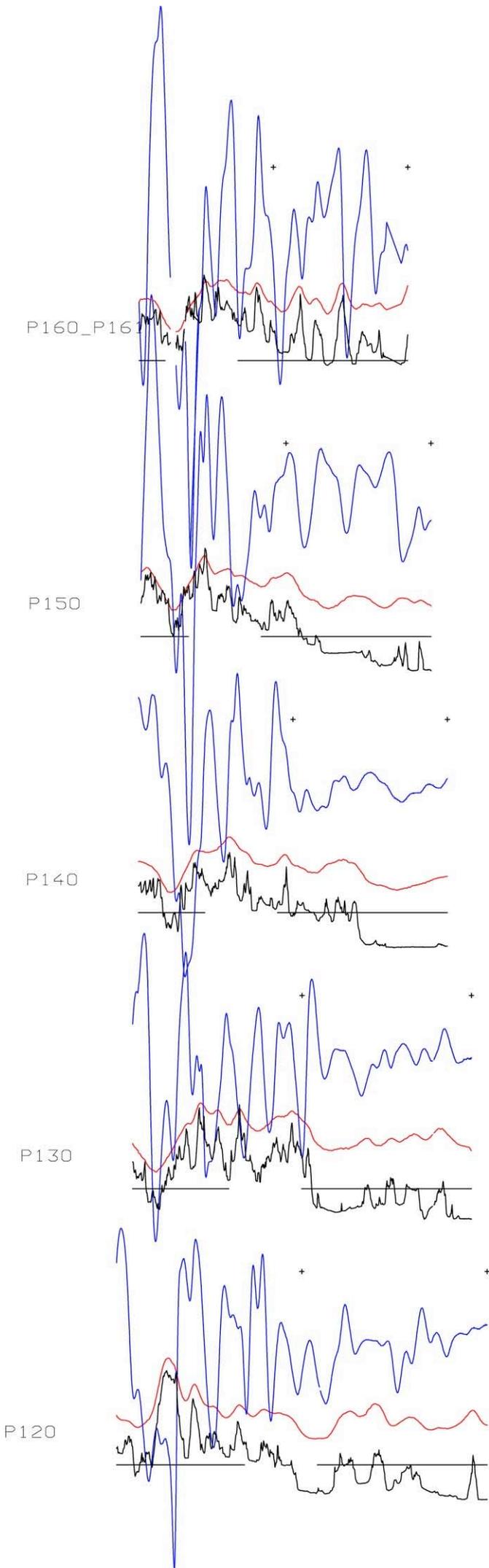
Figure 17. Carte des anomalies magnétiques rabattues le long des profils. L'intensité des anomalies est plus forte à l'ouest de la zone, ce qui traduit l'existence d'une croûte océanique plus épaisse et moins profonde à l'ouest qu'à l'est, conformément aux résultats de la gravimétrie (anomalie de Bouguer, Figure 16).

L'analyse préliminaire montre que la vitesse d'accrétion est sensiblement constante depuis 20 Ma et est de l'ordre de 15 mm/an (demi-taux). Les isochrones sont globalement parallèles au grain structural de la croûte océanique, sauf dans les zones un peu complexes. Les isochrones sont décalées en dextre de part et d'autre de la limite entre le domaine de grain structural N120°E à l'ouest et celui de grain N130°E à l'est (voir le chapitre sur l'analyse structurale).

Figure 18. Pages suivantes : ensemble des profils magnétiques (bleu), bathymétriques (noir), et gravimétriques. La profondeur de référence (tirets longs) est 3500 m.







□ Réflectivité

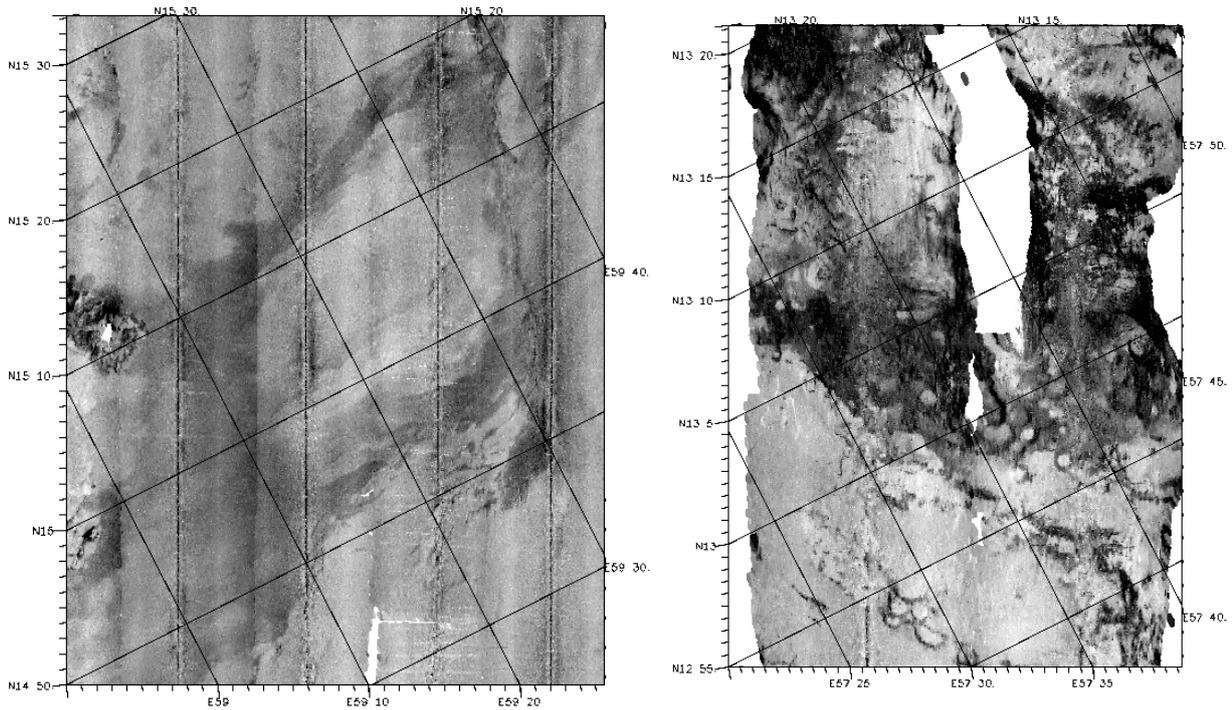


Figure 19. Gauche : carte de réflectivité du bassin en pull-apart en terminaison sud de la zone de fracture d'Owen. Droite : rift axial volcanique bordé au nord par un megamullion.

□ Interprétation structurale

Méthode

Une carte structurale préliminaire a été réalisée en temps légèrement différé (+24 à 48 heures) à partir des données bathymétriques et très partiellement des données du sondeur de sédiments (SBP120). Y ont été reportés les escarpements de failles, les dykes et édifices volcaniques, ainsi que les mégamullions identifiés près de l'axe de la dorsale. Diverses informations ont été superposées pour aider à l'interprétation : sismicité et mécanismes au foyer, isochrones magnétiques, anomalies gravimétriques à l'air libre et de Bouguer.

Description sommaire

Les deux traits morphologiques majeurs dans la zone cartographiée sont la dépression et l'escarpement associés à la zone de fracture d'Owen (et à la faille transformante active) à l'est, et la dorsale de Sheba au sud.

La dorsale de Sheba

La morphologie de cette dernière est typique des dorsales lentes, avec un réseau serré de failles normales à regard vers l'axe. Le volcanisme est omniprésent, avec de nombreux cônes et caldeiras, ainsi que des chaînons volcaniques allongés. Des essaims de dykes sont visibles grâce à la très bonne résolution du

sondeur. Plusieurs mégamullions ont été identifiés, essentiellement dans la partie sud-est du levé. Cinq sont situés en bordure du plancher axial et sont présents aussi bien au nord (trois) qu’au sud (deux). Les cannelures de leur surface indiquent une direction de mouvement N27°E. Trois ou quatre autres mégamullions sont également suspectés hors axe, il s’agit donc dans ce cas de structures fossiles.

Carte structurale de la jonction triple AOC

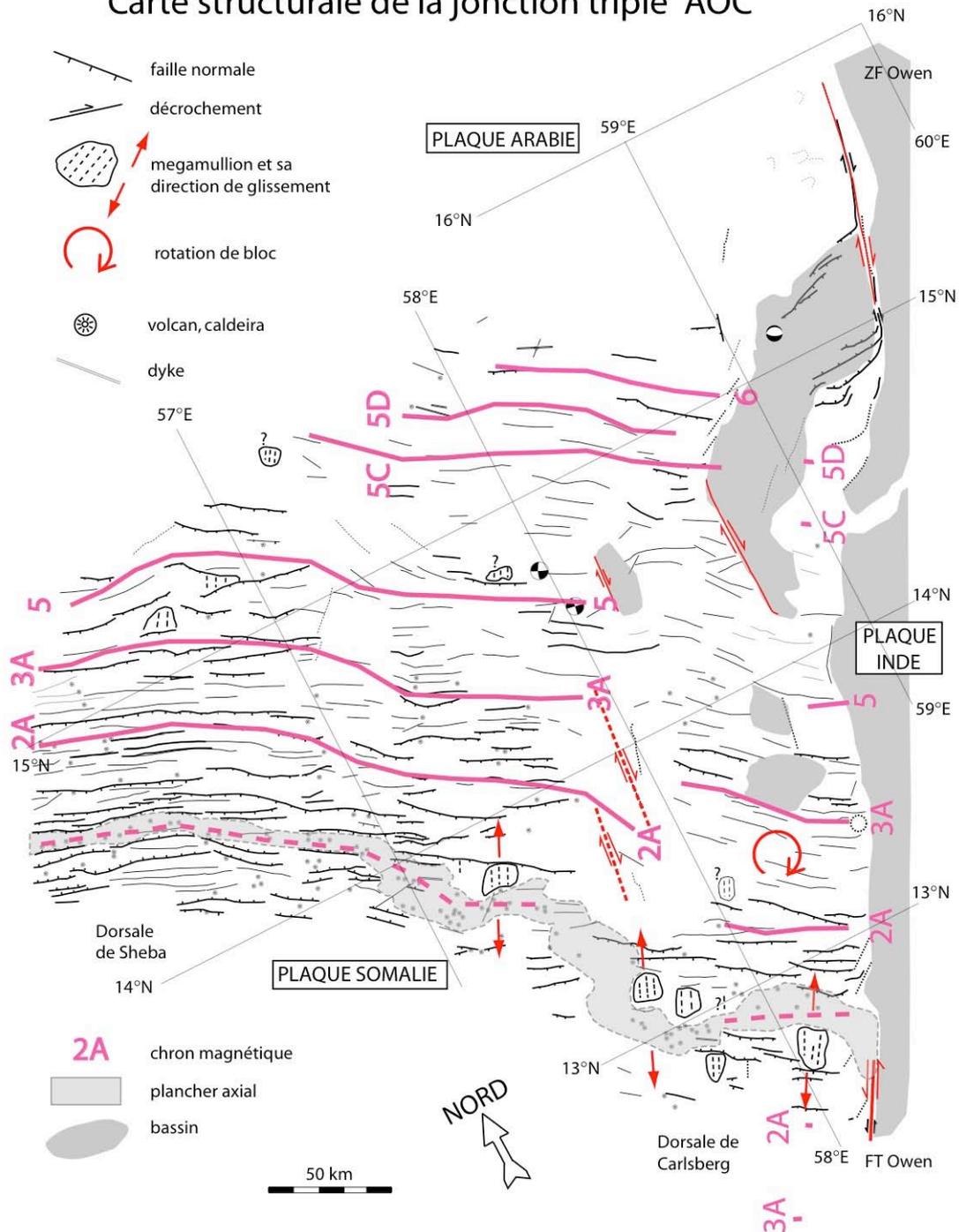


Figure 20

La dorsale présente dans ce secteur une structure caractéristique des dorsales lentes en ouverture oblique, avec une série de bassins en échelon et des discontinuités non-transformantes. La direction générale de l'axe est N130°E, qui se décompose en fait en deux ensembles de segments orientés N115°E, perpendiculaires à la direction de mouvement indiquée par les mégamullions, segments séparés vers 13°20'N, 57°30'E par une zone de relais non-transformant.

La zone de fracture d'Owen

Elle présente une morphologie très marquée, avec un dénivelé d'environ 2000 m entre le fond du bassin et le relief bordier. Une faille active, orientée N-S, a été identifiée. Curieusement, elle n'est pas située à la base de l'escarpement, mais à mi-pente. Cette faille décale la topographie suivant un jeu dextre (qui correspond au sens de mouvement indiqué par les mécanismes au foyer des séismes situés plus au nord le long de la zone de fracture d'Owen). Le rejet horizontal est d'environ 12 km. Elle débouche au sud dans un vaste bassin qui s'exprime très bien dans la morphologie mais aussi dans l'anomalie gravimétrique à l'air libre, attestant d'un important remplissage sédimentaire. La faille se poursuit vers le sud le long de la bordure orientale du bassin et se branche vers le sud-ouest sur des failles normales NE-SW à E-W, présentes sur les bords nord et sud du bassin (Figure 14). Il s'agit donc d'un bassin transtensif en pull-apart. La continuation du décrochement dextre au sud du bassin est moins claire, bien que la signature morphologique soit toujours notoire.

Au sud-est, la zone de fracture d'Owen est toujours très nette mais sa trace n'est pas rectiligne et elle ne présente pas de signes d'activité récente. Dans le « coin » sud-est du levé, la terminaison nord de la faille transformante d'Owen est soulignée à la jonction avec la dorsale par un bassin nodal.

La zone déformée

La partie ouest du levé montre des directions de failles normales parallèles à l'axe. Par contre, les failles de la zone orientale sont systématiquement tournées d'environ 10° dans le sens horaire, sauf près de l'axe où les failles lui restent parallèles. Vers 14°30'N, 58°15'E, un petit bassin semble structuré par des failles bordières N-S. Deux séismes situés à proximité ont des mécanismes au foyer en décrochement dextre N-S. Il est donc tentant d'interpréter ce bassin comme un bassin en pull-apart. Plus au sud, d'autres structures N-S correspondent peut-être à des décrochements dextres. L'ensemble est situé dans une bande orientée N25°E séparant les deux zones dont le grain structural diffère d'environ 10° en orientation. Cette bande coïncide au sud avec le coude de la dorsale décrit plus haut. Par ailleurs les isochrones déduites des anomalies magnétiques sont décalées en jeu dextre d'environ 40 km. Ce décalage est donc supérieur au décalage de 12 km situé au débouché de la zone de fracture d'Owen dans le grand bassin en pull-apart au nord. Il est probable que le bloc oriental ait subi une extension N-S concomitante des décrochements dextres et de la rotation horaire associée. La bande de déformation dextre de direction N-S semble se greffer sur le système en accretion de façon à accommoder un taux d'ouverture un peu plus rapide à l'ouest (Arabie/Somalie) qu'à l'est (Inde/Somalie). Cependant, d'autres zones de déformation ont été identifiées à

l'ouest de celle-ci, ce qui suggère qu'elle ne définit pas à elle seule la limite de plaque Arabie/Inde. Tout indique que s'installe une nouvelle configuration des frontières de plaques dans la zone du point triple.

Où est le point triple AOC ?

Les données recueillies lors de cette campagne AOC montrent donc que le point triple AOC n'est pas situé à la jonction de la dorsale de Sheba avec la faille transformante d'Owen (au sud) et la zone de fracture d'Owen (au nord), confirmant l'analyse de Fournier et al. (2001). Par contre, il n'existe pas de rift ultra-lent bien localisé joignant la zone de fracture d'Owen à la dorsale de Sheba vers 14.5°N, 56.4°E. La zone de jonction triple est marquée par une déformation diffuse, avec un début de localisation dans la partie nord-est sous la forme d'un bassin en pull-apart. A l'intérieur de la zone déformée, les décrochements N-S semblent dominer, assurant le relais entre la dorsale de Sheba et la zone de fracture d'Owen. Le point triple se situerait donc actuellement au niveau du coude de la dorsale. Cependant, compte tenu de la sismicité présente plus à l'ouest, il est probable que la frontière de plaques soit encore dans un état transitoire. Il est donc préférable de parler de zone triple plutôt que de point triple. Concernant l'aspect temporel, nous disposons d'assez peu de contraintes. La vitesse sur la zone de fracture d'Owen est mal connue. Si l'on retient le chiffre de 2 mm/an, le décalage dextre de 12 km au nord du grand bassin en pull-apart correspondrait à son initiation il y a 6 Ma. Quant au décalage de 40 km des anomalies magnétiques, il ferait remonter le début du système à 20 Ma, ce qui est conforme à l'âge du début de l'ouverture océanique attesté par la présence de l'anomalie 6. Cette interprétation préliminaire devra cependant être testée par une analyse fine d'une part des anomalies magnétiques, afin d'établir une cinématique, et d'autre part des données de sondeur de sédiment qui permettront de cartographier les zones de déformation active ou récente.

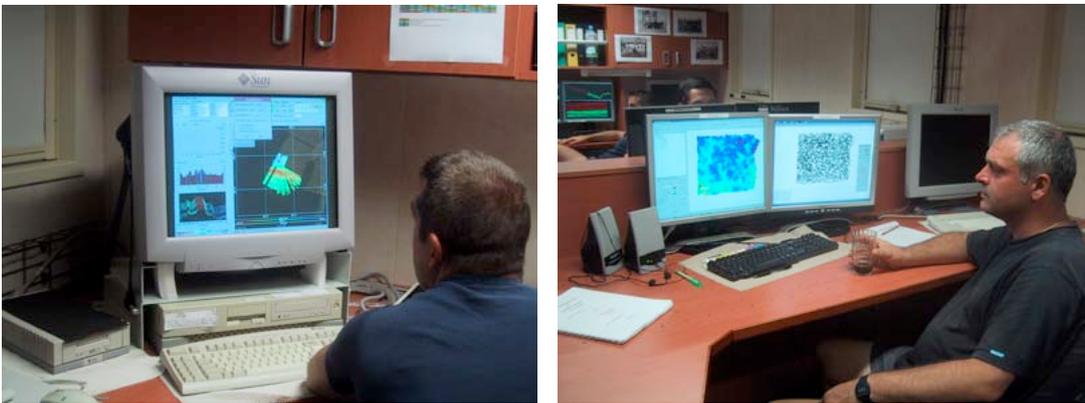
ACQUISITION ET TRAITEMENT

❑ Bathymétrie et imagerie

A- Le sondeur et son équipe

Le sondeur du BHO Beautemps-Beaupré (Simrad EM-120, maintenant Kongsberg/Simrad) 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 les deux, c'est la technique de la gondole sous coque qui a été retenue.

Par ailleurs, la particularité du BHO Beautemps-Beaupré est la présence d'une équipe d'hydrographes du SHOM (MOA – Mission 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 diverses, principalement historiques, le SHOM et l'IFREMER semblent diverger sur le choix du logiciel de traitement des données multifaisceaux. Le SHOM a fait le choix d'un logiciel commercial canadien – Caris – qui semble faire l'unanimité parmi les hydrographes. IFREMER a choisi de développer son logiciel propre – Caraibes – largement et gratuitement diffusé dans les laboratoires de l'Université et du CNRS.

Au total, les sondes de la campagne AOC auront été passées au crible de 3 logiciels : Caris pour le nettoyage par les hydrographes du SHOM, GMT et Caraibes 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 Caraibes.

C- Découpe des données en profils

Le flux de données brutes (à l'entrée de Caris et de Caraibes) 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 P22 – parfois notés P01-0, à P22-0 pour des raisons de compatibilité avec les fichiers de magnétisme et de gravimétrie) et profils de ralliements (R01 à R21). Des

profils de type transit (T*) ont également été réalisés à l’approche et à la sortie de la zone AOC proprement dite. Cette structure a été conservée pour le traitement sous Caraïbes.

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). L’épuration des données bathymétriques par le personnel MOA est effectuée à l’aide du logiciel Caris. Le module d’invalidation Caris est bien adapté à ce travail, par sa convivialité et son efficacité. 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).

2006 265 00:50:16.615 3 90 5104.100

2006 265 00:50:16.615 3 102 5104.500

2006 265 00:50:50.784 5 90 5106.290

...

Année / Julien / Time / Profile / Beam / Depth

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



La navigation sur profil est automatisée par le système DP du bord (Positionnement Dynamique). En cas de saut de réception GPS, le bateau est automatiquement dévié de sa route (directement basée sur les données GPS), ce qui nécessite un recalage « manuel ». Ces sauts sont également présents dans les fichiers Simrad bruts (*_raw.all), et donc dans les fichiers de navigation .nvi générés à partir de ceux-ci. Les traitements de la navigation réalisés par la MOA à l’aide du logiciel Caris ne peuvent pas être exportés vers Caraïbes. Les .nvi générés ont donc – en général – été validés après d’éventuelles corrections par des modules de navigation de Caraïbes (Ananav en particulier).

En ce qui concerne la célérité, celle-ci n’a été importé qu’une seule fois, en raison d’une erreur d’application en amont (nord du profil P04 pare), toujours à partir des mêmes fichiers raw de Simrad (option

dans le module). Un nouveau fichier de célérité a pu être réintroduit à l'aide du module Modcel, à partir d'un fichier au format ascii tout simple (profondeur/célérité)

```
0.00 1538.80
28.00 1539.40
...
8500.00 1602.80
12000.00 1669.00
```



La structure pour chaque profil après import est donc la suivante:

```
-rw-r--r-- 1 martaban users 2042068 Oct  2 23:11 P04_rejected.txt
drwxr-xr-x 2 martaban users  8304 Sep 28 22:20 bigIM
drwxr-xr-x 2 martaban users   232 Sep 28 20:56 cel
drwxr-xr-x 3 martaban users   152 Sep 28 21:41 ima
drwxr-xr-x 2 martaban users    80 Sep 27 12:01 mbb
drwxr-xr-x 2 martaban users   136 Sep 28 21:27 mbg
drwxr-xr-x 2 martaban users    96 Sep 27 18:32 mnt
drwxr-xr-x 2 martaban users    72 Sep 27 11:58 nvi
```

E- Découpe en feuilles

Outre la découpe en profil, nous avons opté pour une découpe en trois feuilles pour l'ensemble de la zone : zone nord, zone sud, zone ouest. Caraibes a la bonne idée de produire des cartes à cadre oblique (N27° pour les trois feuilles), dommage que le module de fabrication des mnt obliques soient bogué...

Boite nord:

```
point 1 N14 38.000 E 57 35.000
point 2 N16 36.070 E 58 37.090
point 3 N15 50.100 E 60 10.470
point 4 N13 51.590 E 59 08.390
```

Boite sud:

```
point 1 N12 57.000 E 56 43.000
point 2 N14 41.020 E 57 37.510
point 3 N13 54.190 E 59 11.770
point 4 N12 09.500 E 58 17.360
```

Boite ouest:

```
point 1 N14 13.000 E 55 32.000
point 2 N16 35.010 E 56 46.930
point 3 N15 40.690 E 58 37.260
point 4 N13 17.420 E 57 22.510
```

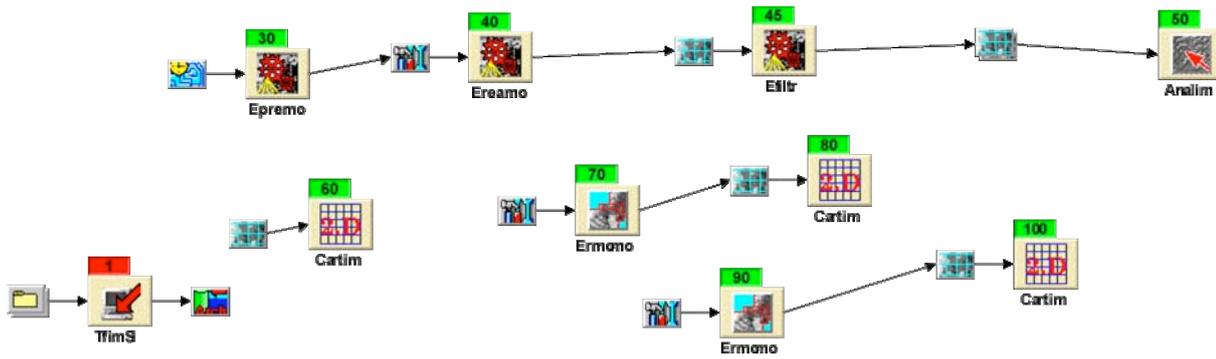


F- Traitement de la bathymétrie

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, le plus souvent sans opération particulière sur les mnt. Les principaux modules Caraïbes utilisés sont donc : Batmul et Odice (pour la validation et l'épuration de sondes), Modcel (pour les corrections de célérité). L'excellent nettoyage effectué par l'équipe du SHOM n'a pas nécessité d'épuration complémentaire, sauf ponctuellement et souvent en relation avec des problèmes de navigation résolus par Caris mais non importés dans Caraïbes.

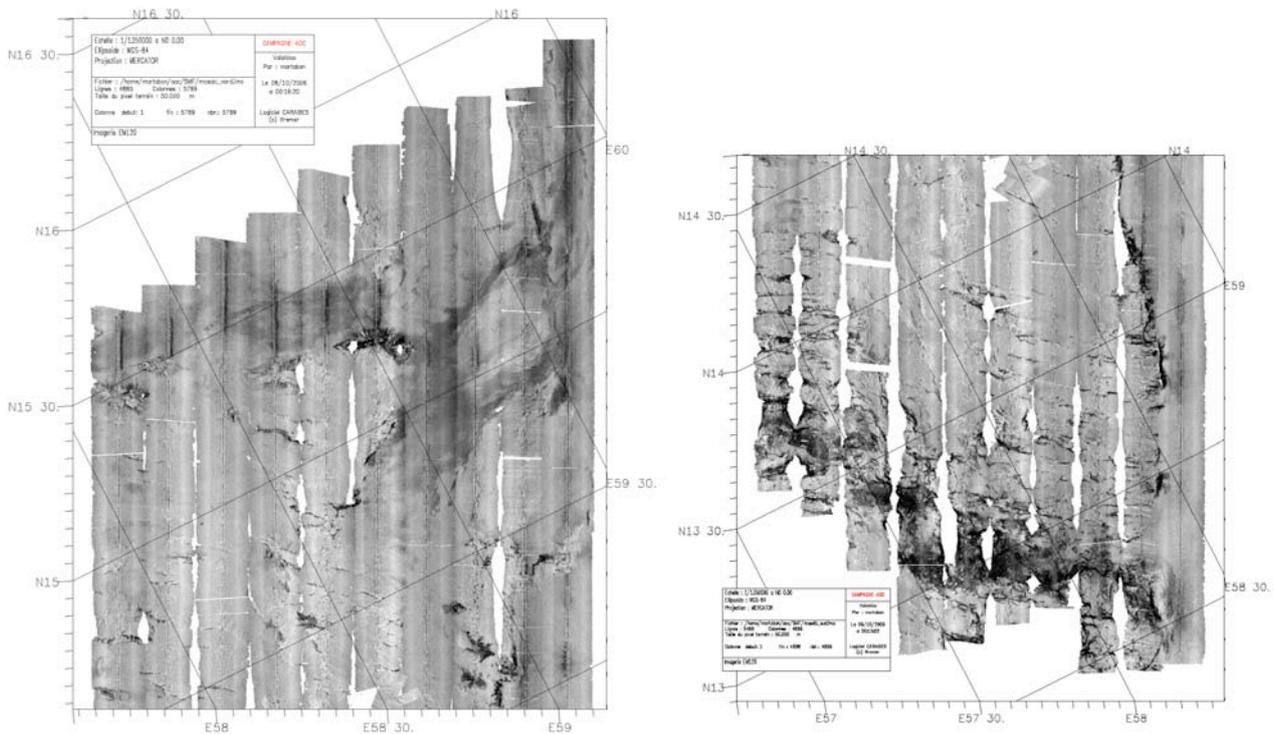
Des mnt bathymétriques au pas de 90m ont été produits pour les 3 zones (sud/nord/ouest). Un mnt global au pas de 100m a également été réalisé. Quelques blocs 3D ont été réalisés, mais limités compte tenu du manque de puissance/mémoire de la machine utilisée (PC portable sous Linux).

G- Traitement de l'imagerie



La chaîne de traitement utilisée comprend les modules classiquement mis en œuvre pour l'imagerie acoustique. Deux mosaïques ont été générées (zone nord et sud), la mosaïque pour la zone ouest restant à compléter, faute de temps. 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 (Caroline Huguen). Les mosaïques (.imo) ont été générées en conservant les valeurs de dB.



□ 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

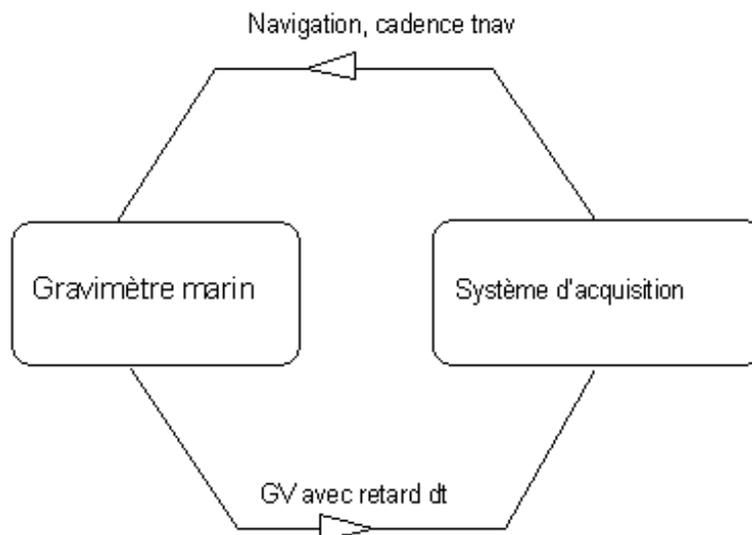
- Un capteur de pesanteur constitué d'une masse et d'un ressort dont l'élongation est directement proportionnelle à la force appliquée et donc à g. On ne mesure pas directement les variations de longueur du ressort mais la tension nécessaire pour maintenir la masse immobile à l'aide d'un champ magnétique 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'Eötvos (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 ordinateur (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 250 mètres et le déport à l'antenne GPS est de 290 mètres. 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 très 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).

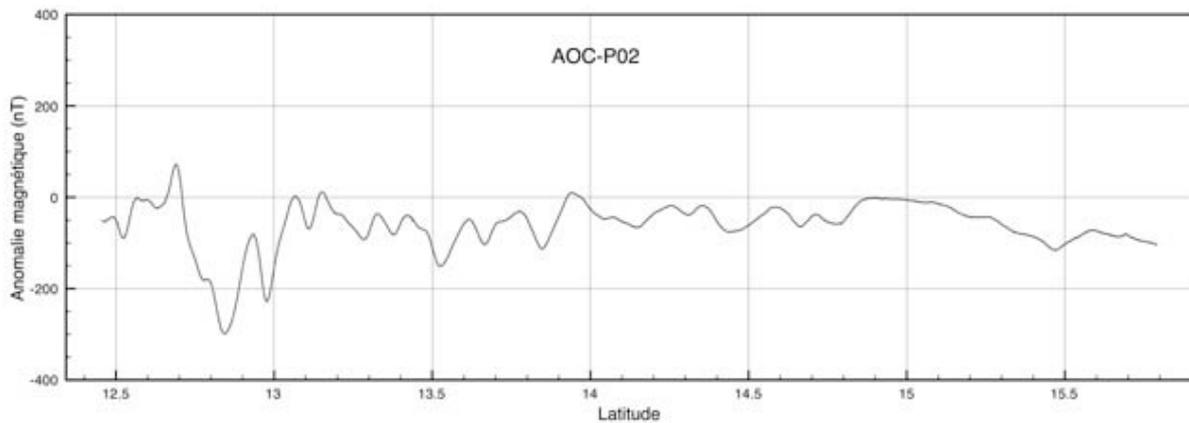
C- Traitement des données

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 (rares) valeurs aberrantes, calcul de la position du capteur en tenant compte du déport à l'antenne GPS et soustraction du champ de référence (DGRF 2005). Les fichiers (en ASCII) sont découpés par profils et contiennent pour chaque valeur, la date, l'heure et la valeur de l'anomalie. Les valeurs brutes (c'est à dire sans soustraction du DGRF) nous ont également été fournies pour recalcul éventuel.

2006/09/23	22:45:01Z	10.00410	56.24815	-36.18
2006/09/23	22:45:02Z	10.00413	56.24817	-37.39
2006/09/23	22:45:03Z	10.00417	56.24818	-37.70
2006/09/23	22:45:04Z	10.00420	56.24820	-36.11
2006/09/23	22:45:05Z	10.00424	56.24821	-36.62
2006/09/23	22:45:06Z	10.00428	56.24823	-36.93
2006/09/23	22:45:07Z	10.00432	56.24824	-36.55
2006/09/23	22:45:08Z	10.00436	56.24826	-36.96
2006/09/23	22:45:09Z	10.00440	56.24827	-36.88

Portion de fichier d'anomalie magnétique

Du fait de l'absence de points de croisement, aucune analyse directe de l'effet de la variation diurne du champ n'a pu être effectuée. La réalisation d'une carte magnétique permettra cependant d'estimer qualitativement cet effet, qui reste cependant de longueur d'onde 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). La longueur des profils était comprise entre 150 et 400 km et il existe plusieurs configurations où le « pic » diurne sur un profil côtoie un « creux » nocturne sur le profil adjacent.



Exemple de profil d'anomalie magnétique

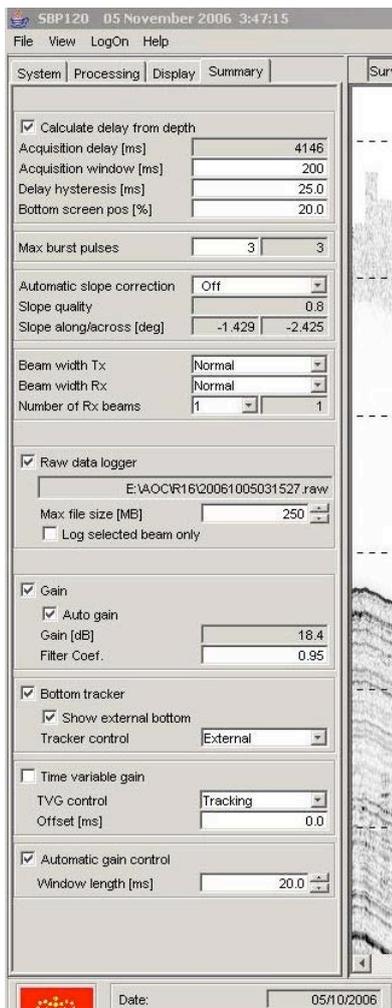
❑ Sondeur de sédiment SBP 120

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 fortement pentées 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.

Nous avons surtout utilisé le troisième document.



B Mise en oeuvre et acquisition

Cette partie est sous le contrôle de l'équipe du SHOM qui nous a fournit 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 20060925073710.raw a été créé le 25 septembre 2006 à 7h37m10s en heure Zulu, ou GMT. Quand un fichier atteint environ 250 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 microsecondes, soit

Fig. 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



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 étapes :

Gain correction

transmission loss [dB/...] 0

Filters

Filter type : Matched

Corner frequencies : Auto

Replica shaping activé

Gain

Auto Gain activé

Gain [%] chiffre variable en "read only"

Filter coefficient 0.95

Attribute processing

Attributes Inst. amplitude

Bottom tracker

Show external bottom activé

Tracker control External

Mute

Mute [ms] 5

Automatic gain control

Window length [ms] 20

Apply point [%] 0

Amp. scaling [%] 80

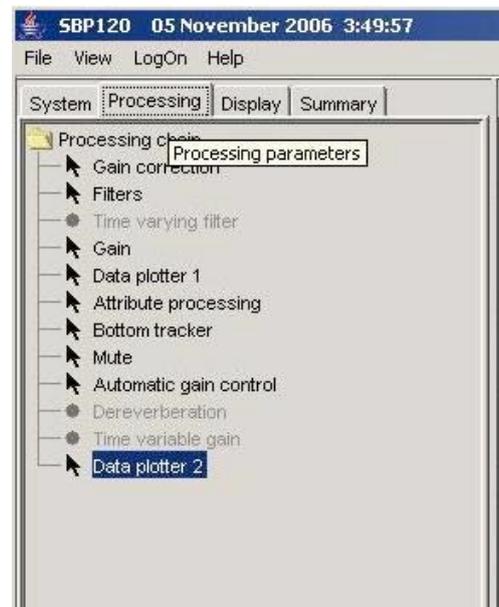


Fig. 2. Copie d'écran de la chaîne de traitement des données brutes.

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. Les paramètres ci-dessus ont été exactement recopiés sur ceux du PC d'acquisition et aucun autre réglage n'a été testé car la visualisation en temps réel des traces traitées sur le PC d'acquisition était satisfaisante.

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'échogram 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". Nous avons choisi de traiter et sauvegarder en SEG-Y systématiquement l'ensemble des données acquises. 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).

D. Traitements complémentaires et production d'images Post-Script

Comme l'équipe de la campagne Medor Simed, nous avons effectué cette phase avec la suite logicielle libre Seismic Unix (SU). Voici un script csh.auto-explicatif. "trdebut", "trfin" sont les numéros de trace déterminés à l'étape précédente, et "tpsdebut", "tpsfin" définissent la fenêtre temporelle.

```
#!/bin/csh -f
# Extraction et affichage d'une fenetre dans les donnees traitees
# seg-y du SBP120.

# Fichier d'entree :
set infile=P06/20060928163518_traite.seg
set infname=P06-3b

# Parametres de la fenetre : ("tr ": No. de trace; "tps ": temps en sec.).
```

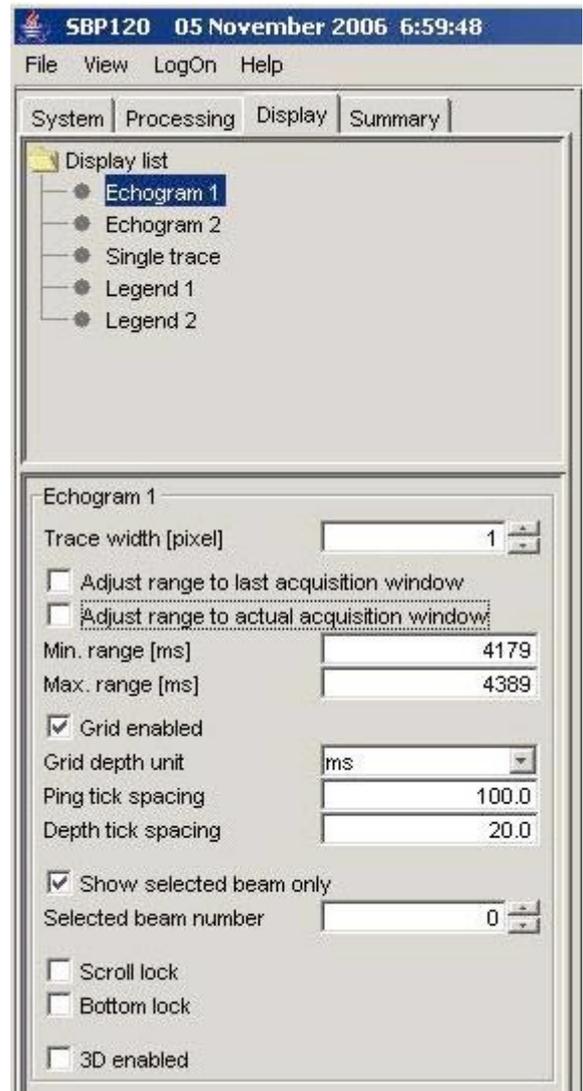


Fig.3. Copie d'écran des réglages du mode display.

```

set trdebut=10000
set trfin=11400
set tpsdebut=5.3
set tpsfin=5.7

# Lecture du fichier
segypread > tt.su endian=0 tape=$infile over=1 format=5

# Determination des coordonnees de la premiere et de la derniere trace
# de la fenetre desiree.
#selection de la premiere trace:
suwind <tt.su >ttb.su key=tracr min=$trdebut max=$trdebut
#Position de la premiere trace extraite de son header:
sugethw <ttb.su >ttc.txt key=sx,sy output=geom
#Facon laborieuse de calculer les positions en degrades decimaux sous csh:
set sx1=`more ttc.txt | awk '{print $1}'`
set sy1=`more ttc.txt | awk '{print $2}'`
echo "scale=2;$sx1/3600000" | bc -l > toto
set sx1=`more toto | awk '{print $1}'`; rm -f toto
echo "scale=2;$sy1/3600000" | bc -l > toto
set sy1=`more toto | awk '{print $1}'`; rm -f toto
rm -f ttb.su

# idem pour la derniere trace:
suwind <tt.su >ttb.su key=tracr min=$trfin max=$trfin
sugethw <ttb.su >ttc.txt key=sx,sy output=geom
set sx2=`more ttc.txt | awk '{print $1}'`
set sy2=`more ttc.txt | awk '{print $2}'`
echo "scale=2;$sx2/3600000" | bc -l > toto
set sx2=`more toto | awk '{print $1}'`; rm -f toto
echo "scale=2;$sy2/3600000" | bc -l > toto
set sy2=`more toto | awk '{print $1}'`; rm -f toto
rm -f ttb.su
echo 'sx1, sy1 : ' $sx1 ' '$sy1; ; echo 'sx2,sy2 : ' $sx2 ' '$sy2

# Ajout d'un gain variable en temps et extraction de la fenetre :
# (gpow=1 n'ajoute aucun gain).
sugain <tt.su gpow=0.5 \
lsuwind key=tracr min=$trdebut max=$trfin \
lsushift >fenetre.su tmin=$tpsdebut tmax=$tpsfin

#Determiner le nouveau nombre d'echantillons (nsamp) et de traces (ntrac)
# de la fenetre (on pourrait aussi faire ca avec sugethw) :
surange <fenetre.su >temp.txt
set titi=`more temp.txt | grep tracr | awk '{print $2}'`
set toto=`more temp.txt | grep tracr | awk '{print $3}'`
set nsamp=`more temp.txt | grep ns | awk '{print $2}'`
set ntrac=`expr $toto - $titi + 1`
echo 'Premiere trace selectionnee : ' $titi
echo 'Derniere trace selectionnee : ' $toto
echo 'Nombre total de traces : ' $ntrac
echo 'Nombre d'echantillons par trace : ' $nsamp

#Affichage a l'ecran :
#echo 'Pour imprimer dans un fichier Post-script, cliquer dans la fenetre X'
#echo 'et taper p au clavier (impression N&b avec pswigb).'
#

```

```
#suximage <fenetre.su n1=$nsamp n2=$ntrac style=seismic verbose=1 bclip=$mybclip wclip=$mywclip \
# hbox=800 wbox=1400 labelsize=12 label1="TWT \(\s\)" label2="Trace number" \
# titlesize=14 title=$infname' \(\N'$sy1' E'$sx1' --- N'$sy2' E'$sx2'\) \
# plotfile=$infname'.ps' \
## cmap=rgb1 threecolor=1 legend=0
### grid1=dash grid2=dash
```

```
# Impression directe en Post-script,
# soit avec psimage precede de segyclean et sustrip :
#
#segyclean <fenetre.su | sustrip >plotted.su
#psimage <plotted.su >test.ps n1=$nsamp n2=$ntrac bclip=$mybclip wclip=0\
# ybox=0.65 xbox=2.0 height=4. width=7. verbose=1 \
# labelsize=12 label1='TWT (s)' label2='Distance (ntrace)' \
# titlesize=14 title=$infname verbose=1 \
# threecolor=1 legend=1 wrgb=1.0,1.0,1.0 grgb=0,0,0 brgb=1.0,0.5,0
# d1s=0.1 d2s=0.1 (d1s, d2s: options non testées)
#gv test.ps
#rm -f test.ps fenetre.su plotted.su
```

```
# soit avec supsimage, sans faire de segyclan, sustrip :
# Pour transformation en pdf, par ps2pdf, essayer style=normal hbox=7. wbox=4.
# pour que ca tienne sur un A4 !
```

```
supsimage <fenetre.su >$infname'.ps' n1=$nsamp n2=$ntrac style=seismic verbose=1 \
bclip=$mybclip wclip=$mywclip \
hbox=5. wbox=8. labelsize=12 label1='TWT (s)' label2='Distance (ntrace)' \
titlesize=14 title=$infname' \(\N'$sy1' E'$sx1' --- N'$sy2' E'$sx2'\) \
# threecolor=1 bhls=.1,0.1,1. whls=1.,1.,1. ghls=0.,0.8,0. legend=1
# threecolor=1 brgb=1.0,0.5,0. wrgb=1.,1.,1. grgb=0.,0.,0. legend=1
#d1s=0.1 d2s=0.1
```

```
#Remarquer que le titre de l'image contient les positions des premiere et derniere trace
#de l'image. Le signe \ devant les parentheses est inutile pour "suximage"
#mais indispensable pour "psimage" qui produit le post-script. C'est comme ca.
# Il y a trop de traces et d'echantillons par trace pour utiliser xwigb.
# mettre bclip=0.9 peut permettre d'augmenter le contraste.
# "suhistogram" peut aider à determiner les valeurs optimales de bclip et wclip
```

```
gv $infname'.ps'
rm -f binary header temp.txt tt.su ttb.su ttc.txt fenetre.su plotted.su
```

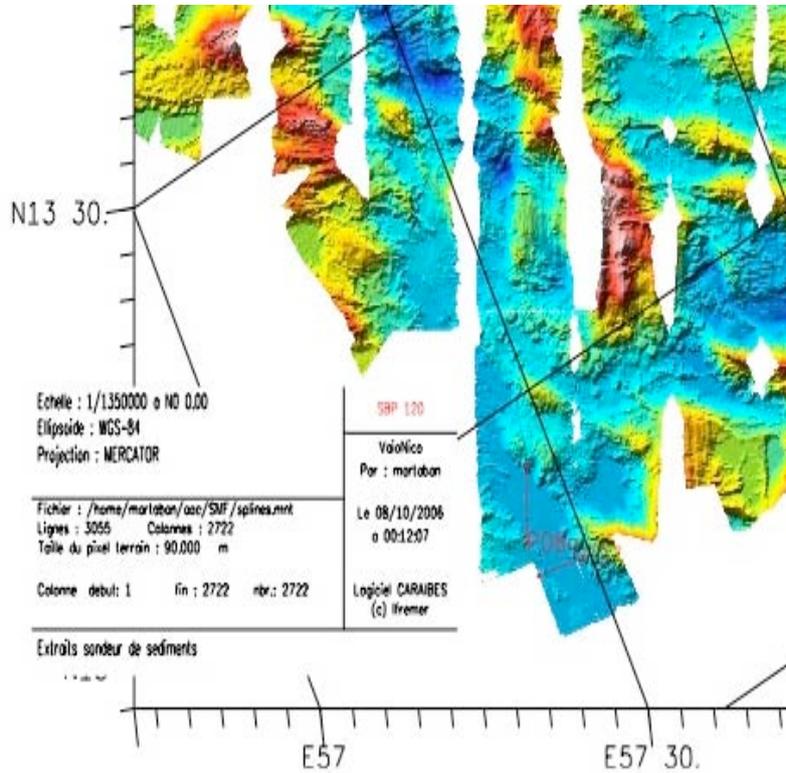
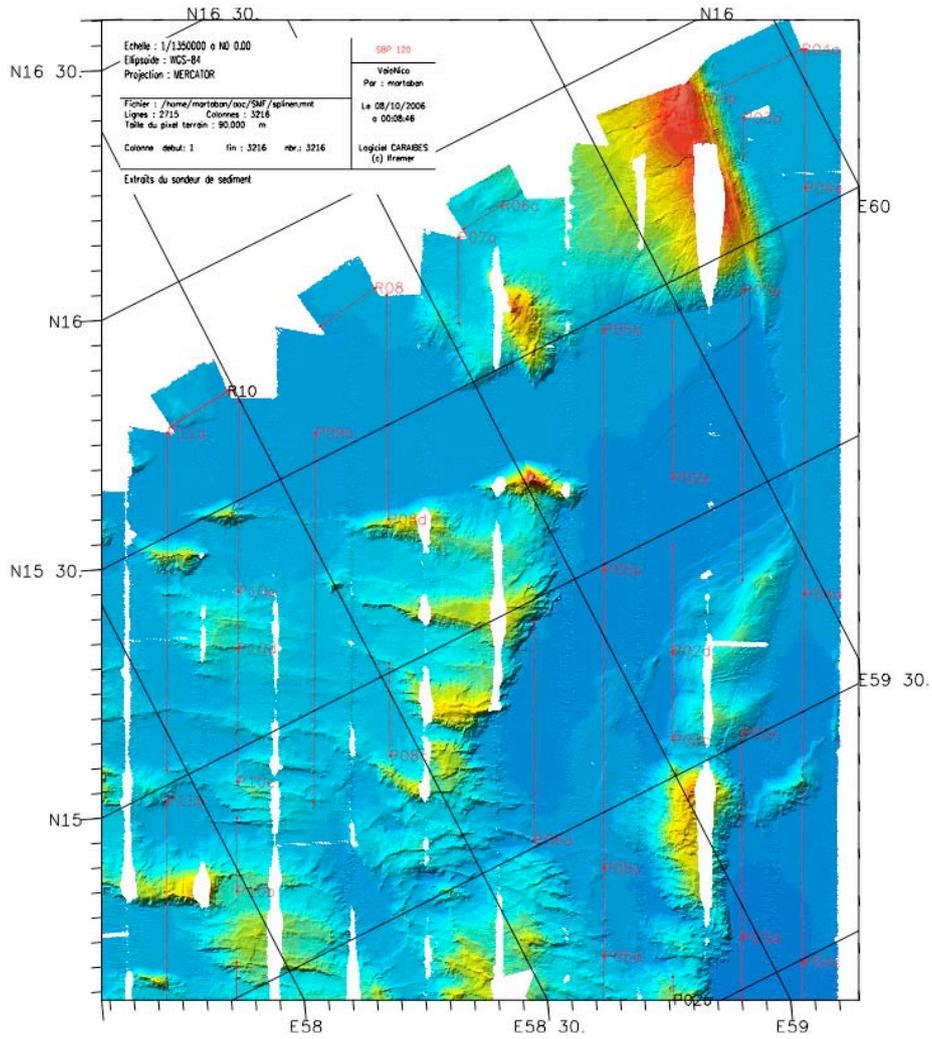
Nous reproduisons enfin une section de programme Fortran qui permet de lire un fichier de traces SBP au format SEG-Y, brutes, ou après traitement par le logiciel SBP. Ceci pour permettre une manipulation directe du fichier, alternative à l'usage des programmes su :

```
c      character*255 name_in,name_out
       integer maxn
       parameter (maxn=200000)
       real*4 x(maxn)
       integer*4 ix(maxn)
       integer*2 ix2(2*maxn)
       real*4 header(60)
```

```

equivalence (x,ix)
equivalence (x,ix2)
equivalence (x,header)
cc Noms des fichiers
c-----
    write(*,*) "name_in name_out"
    read(*,*) name_in,name_out
c Parametres input / output
c-----
    write(*,*) "Nombre echantillons par trace"
    read(*,*) n1
    write(*,*) "Trace min et max"
    read(*,*) itmin,itmax
c Ouverture du fichier input (header de trace=60 mots de 4 bytes)
c-----
    n1p60=n1+60
    open(1,file=name_in,access='direct',recl=n1p60*4)
c Ouverture du fichier output
c-----
    open(2,file=name_out,access='direct',recl=n1p60*4)
c Lecture des traces de itmin a itmax
c-----
c sukeyword -o definition des parametres de traces
do k=itmin,itmax
read(1,rec=k,err=3000) (x(i1),i1=1,n1p60)
iday=ix2(80)
iheure=ix2(81)
iminu=ix2(82)
pas=ix2(59)
ne0=ix2(58)
dy=ix2(55)
sx=ix(19)
sy=ix(20)
enddo
etc etc etc etc etc etc etc etc etc etc
stop
end

```



Cartes de localisation des principaux profils du SBP

CONCLUSIONS GENERALES

- ❑ Les anomalies magnétiques ont été identifiées depuis l'anomalie 2A jusqu'à l'anomalie 6, portant à 20 Ma l'âge du début de l'accrétion océanique dans le golfe d'Aden oriental.
- ❑ Les données bathymétriques mettent en évidence l'existence d'une faille décrochante active majeure en terminaison sud de la zone de fracture d'Owen, de direction N10°E et associée à un décalage apparent dextre d'environ 12 km. La faille est reconnue sur une distance d'environ 110 km.
- ❑ Cette faille se branche à son extrémité sud sur des failles normales de direction N70°E à E-W qui délimitent un bassin rhomboédrique, vraisemblablement en pull-apart, dont la bordure occidentale n'est pas clairement identifiée. Ce bassin est associé à une anomalie gravimétrique négative importante qui témoigne de son épais remplissage sédimentaire. Les profils du SBP120 suggèrent une migration du dépôt-centre vers le sud du bassin.
- ❑ L'extension active est également observable à l'est de la zone de fracture d'Owen, mais elle est moins développée. L'extension affecte donc l'ancienne croûte océanique produite au niveau de la dorsale de Carlsberg et recoupe la trace fossile de la zone de fracture d'Owen.
- ❑ La partie inactive de la zone de fracture d'Owen, comprise entre la bordure sud du bassin et la faille transformante d'Owen, ne montre pas d'indices de déformation active. Le point triple n'est donc pas localisé à la jonction entre la zone de fracture d'Owen, la faille transformante d'Owen et la dorsale de Sheba.
- ❑ D'autres bassins plus à l'ouest, dans la croûte océanique, montrent des indices de déformation récente avec une dominante décrochante.
- ❑ La dorsale présente un tracé sinueux, elle n'est pas décalée par des failles transformantes, et sa profondeur diminue progressivement vers le nord-ouest. Dans sa partie sud-est, le rift est bordé de part et d'autre par des mégamullions, tandis qu'au nord les flancs de la dorsale sont marqués par des escarpements de failles de directions N130°E. La variation de topographie moyenne de la dorsale est observable également dans l'anomalie de Bouguer qui montre un bas relatif dans la partie nord-ouest de la dorsale, et dans le signal magnétique beaucoup plus marqué dans cette région également. L'ensemble de ces données suggère des variations d'épaisseur de la croûte océanique, plus épaisse au NW qu'au SE, d'une amplitude d'environ 3 km. La géométrie en V de la limite croûte épaisse / croûte mince peut traduire la propagation du segment magmatique vers le SE.
- ❑ Aucune structure ne marque de manière claire la jonction entre la dorsale et les bassins précédemment décrits, ce qui suggère que la zone du point triple est une région de déformation diffuse.



ENGAGEZ-VOUS DANS LA MARINE
 POUR VOYAGER. APPRENDRE UN MÉTIER
 VOUS AUREZ: PRIMES. PÉCULES. RETRAITE
 Ecrire (sans affranchir) - MINISTRE DE LA MARINE. PARIS

