

CAMPAGNE EQUALANT 2000

N.O. THALASSA
(24 juillet 2000 – 21 août 2000)

Rapport de campagne à la mer

Responsable Projet : Chantal Andrié, LODYC
Chef de Mission : Bernard Boulès, LEGOS, Centre IRD de Bretagne



Document Scientifique et Technique du Centre IRD de Bretagne, n°89
Décembre 2001

Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie,
UMR 7617 CNRS / IRD / UPMC
Institut Pierre-Simon Laplace



Illustrations de couverture : aquarelles de Chantal Andrié, réalisées à bord du N/O Thalassa.

- en haut : 4 août 2000, à 6°S-9°30'W, «lever de soleil» à 07h.

- en bas : 4 août 2000, à 6°S-9°30'W, «après le lever du soleil», à 07h15'.

Sommaire :

- Présentation générale	4
- Mesures météorologiques et hydrologiques du N/O Thalassa	14
- Bouées dérivantes de surface	24
- Expérience de tirs XBT et XCTD	28
- Mesures de courants par les profileurs à effet Doppler de coque (VM-ADCP)	39
- Mesures avec le profileur de courant à effet Doppler « profond » (L-ADCP)	53
- Calibration des mesures CTDO ₂	75
- Mesures de salinité	88
- Mesures d'oxygène dissous	92
- Mesures des sels nutritifs	98
- Mesures des fréons	115
- Mesures de ¹⁸ O et ¹³ C des eaux de surface	130
- Mesures de turbidité	132

CAMPAGNE EQUALANT 2000

PRESENTATION GENERALE

Chantal Andrié, LODYC, CNRS/IRD/Université Pierre et Marie Curie

et

Bernard Boulès, Centre IRD de Bretagne

1. Le Projet EQUALANT

La campagne EQUALANT 2000, soutenue par le PNEDC (Programme National d'Etude Du Climat) fait partie du programme national ECLAT (Etudes CLimatiques dans l'Atlantique Tropical) dont l'objectif est l'étude de la variabilité de la circulation océanique et des interactions océan-atmosphère en Atlantique Equatorial. C'est une composante du programme international CLIVAR (CLimate VARIability and predictability). Consacrée à la partie Est du bassin Atlantique équatorial, elle fait suite à la campagne EQUALANT 1999 effectuée dans les parties Ouest et centrale un an auparavant à la même période de l'année (voir Rapport de campagne à la mer EQUALANT 99, Rapport Interne LODYC n°2000-01, Décembre 2000 et site internet <http://dataipsl.ipsl.jussieu.fr/EQUALANT/>).

Rappel : le projet EQUALANT initial concernait l'occupation de 5 radiales méridiennes à 35°W, 23°W, 10°W, 0°E et 6°E sur toute la bande de l'Atlantique tropical entre 6°S et 6°N, de façon quasi-synoptique. Le temps bateau n'ayant pu être attribué pour la même année par l'IFREMER, 2 campagnes ont été effectuées, l'une dans le bassin Ouest, l'autre dans le bassin Est, en juillet-août à un an d'intervalle et avec réoccupation de la section 10°W.

Les principaux thèmes scientifiques du projet EQUALANT sont les suivants :

- suivi de la variabilité grande échelle et basse fréquence de la circulation thermohaline ;
- étude, de la surface au fond, de la redistribution des transports d'eau, de chaleur et de traceurs (fréons et sels nutritifs) dans la bande équatoriale 6°S-6°N.
- étude du rôle de processus équatoriaux, tels que l'upwelling et les jets profonds, dans cette redistribution et dans sa variabilité haute fréquence.
- étude de la variabilité des flux de chaleur et de CO₂ à l'interface océan-atmosphère. Ce dernier objectif a été propre à la seule campagne EQUALANT 99 pendant laquelle des mesures de flux atmosphériques (à l'aide d'un mât instrumenté de Météo-France) et des mesures des paramètres du carbone et de biologie ont été réalisées.

Les expériences EQUALANT constituent un maillon du programme ECLAT à partir du suivi de deux situations «instantanées» de la circulation de l'Atlantique tropical. Ces expériences sont étroitement liées à trois autres approches complémentaires :

- le projet PIRATA qui concerne le suivi de l'océan de surface en utilisant un réseau de bouées Atlas (Contact : Jacques Servain / IRD-Centre de Bretagne. Voir également le site internet <http://www.ifremer.fr/ird/pirata/>)
- l'expérience de suivi à long terme de la circulation équatoriale profonde à partir de mouillages à 10°W (Contact : Christine Provost / CNRS-LODYC)
- le projet d'étude concernant la variabilité de l'océan de surface à partir d'un suivi altimétrique (TOPEX-POSEIDON) et d'assimilation de données dans des modèles de circulation générale (Contact : Sabine Arnault / IRD-LODYC).

De maîtrise d'œuvre IRD (Institut de Recherche pour le Développement), les équipes participantes à la campagne EQUALANT 2000 appartiennent aussi au CNRS, à l'IUEM (Institut Universitaire Européen de la Mer – Brest), au LPCM (Laboratoire de Physique et Chimie Marines – Université Paris VI), à l'université de Cocody (Abidjan – Côte d'Ivoire) et au Centre de Recherche Océanographique de Dakar Thiroye (CRODT-Sénégal).

Aux plans scientifique et technique, les mesures des divers paramètres, la production et l'exploitation des résultats sont sous la responsabilité des chercheurs et ITA indiqués dans le tableau suivant :

Navigation - Mesures en continu à partir du navire : Bernard Bourlès	Centre IRD de Bretagne - BP70 - 29280 Plouzané <i>bourles@ird.fr</i>
Mesures d'hydrologie (Bathysonde CTDO ₂) : Rémy Chuchla	Centre IRD de Bretagne - BP70 - 29280 Plouzané <i>chuchla@ird.fr</i> et Bernard Bourlès , Centre IRD de Bretagne - BP70 - 29280 Plouzané <i>bourles@ird.fr</i>
Analyse Salinité-Oxygène : Rémy Chuchla	Centre IRD de Bretagne - BP70 - 29280 Plouzané <i>chuchla@ird.fr</i>
Analyse des sels nutritifs : François Baurand	Centre IRD de Bretagne - BP70 - 29280 Plouzané <i>baurand@ird.fr</i> et Pascal Morin (IUEM / Brest) <i>Pascal.Morin@univ-brest.fr</i>
Analyse des chlorofluorométhane : Chantal Andrié	LODYC/IRD/CNRS/Université P.M. Curie, 4 place Jussieu - Tour 15 - 2ème ét. case 100 75252 Paris Cedex 05 <i>andrie@lodyc.jussieu.fr</i>
Mesures de courants (L-ADCP) : Bernard Bourlès	Centre IRD de Bretagne - BP70 - 29280 Plouzané <i>bourles@ird.fr</i> et Yves Gouriou , Centre IRD de Nouméa, B.P. A5 98848 Nouméa cedex - Nouvelle-Calédonie <i>gouriou@ird.fr</i>
Mesures de courant (VM-ADCP) : Gérard Eldin	LEGOS / GRGS, 14 avenue Ed. Belin, 31401 Toulouse cedex 4 <i>Gerard.Eldin@cnes.fr</i>
Mesures d'XBT-XCTD : Sabine Arnault	LODYC/IRD/CNRS/Université P.M. Curie, 4 place Jussieu - Tour 15 - 2ème ét. case 100 75252 Paris Cedex 05 <i>arnault@lodyc.jussieu.fr</i> et Yves duPenhoat , LEGOS / GRGS, 14 avenue Ed. Belin, 31401 Toulouse cedex 4 <i>Yves.du-Penhoat@cnes.fr</i>
Mesures Isotopiques (¹³ C- ¹⁸ O) : Catherine Pierre (mesures réalisées à terre)	LODYC/IRD/CNRS/Université P.M. Curie, 4 place Jussieu - Tour 15 - 2ème ét. case 100, 75252 Paris Cedex 05 <i>pierre@lodyc.jussieu.fr</i>
Bouées dérivantes : Yves du Penhoat	LEGOS / GRGS, 14 avenue Ed. Belin, 31401 Toulouse cedex 4 <i>Yves.du-Penhoat@cnes.fr</i> et Bernard Bourlès , Centre IRD de Bretagne - BP70 - 29280 Plouzané <i>bourles@ird.fr</i>
Hors projet EQUALANT : Mesures de turbidité Annick Vangriesheim	IFREMER, DRO/EP, BP70 - 29280 Plouzané <i>Annick.Vangriesheim@ifremer.fr</i>

2. Premiers résultats de la campagne.

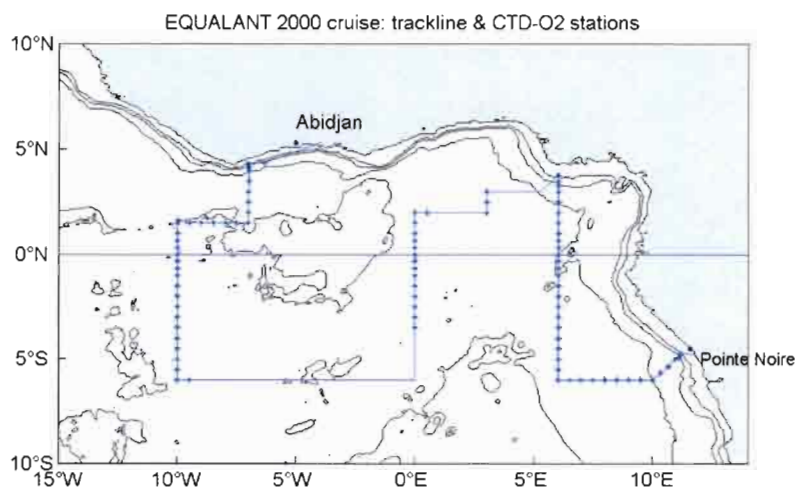
Les premières analyses montrent que les principaux objectifs fixés lors de la conception du projet dans son ensemble pourront être atteints :

- La variabilité grande échelle de la circulation thermohaline est bien mise en évidence à partir des distributions simultanées de vitesses de courants et de traceurs. Les distributions de courant et de fréons dans le bassin Est complètent celles obtenues dans l'Atlantique tropical lors de l'expérience WOCE entre les années 1990 et 1996 (campagnes CITHER et ETAMBOT notamment) et celles de la campagne EQUALANT 1999 (EQ99) dans le bassin Ouest. Elles confirment l'advection de la langue de traceurs vers l'Est au niveau de l'Eau Profonde Nord Atlantique Supérieure (entre 1400m et 2100m environ). La distribution de fréons à 10°W, associée aux mesures de courant, comparée à celle observée lors de la campagne EQ99, confirme la permanence d'une circulation vers l'Est à ces profondeurs et trace son devenir jusqu'au fond du Golfe de Guinée. Un signal en CFC a été mis en évidence à 10°W à des profondeurs excédant 2100m, tant dans le régime des jets équatoriaux que dans le courant extra-équatorial Sud. Ce signal a été échantillonné également à 0°W. Cette information prolonge les résultats de la campagne ETAMBOT 2 (avril 1996) où avait été identifié à 7°N pour la première fois un signal correspondant à l'anomalie climatique de 1990 en mer du Labrador (très forte convection profonde).

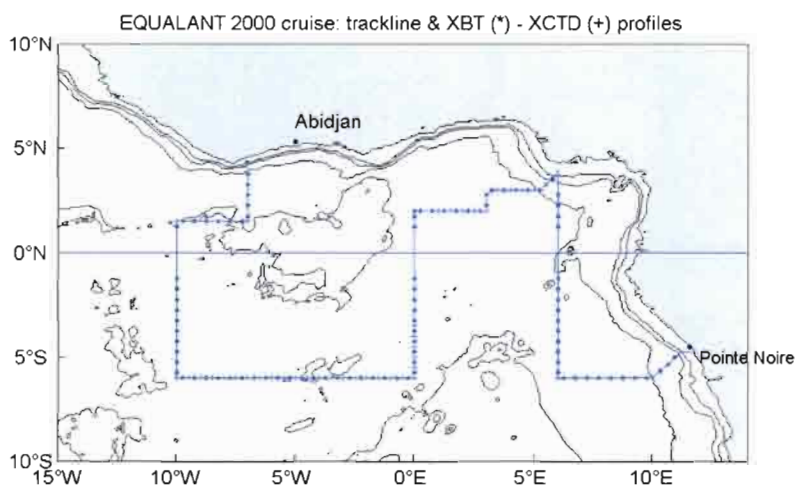
- Les mesures de courant, associées à celles effectuées pendant EQ99, vont permettre de décrire la circulation équatoriale sur tout l'ensemble du bassin équatorial. En profondeur les courants les plus intenses se trouvent entre 3°N et 3°S et les jets équatoriaux sont confinés entre 1°30'N et 1°30'S, de 500 m à 2000 m. La structure feuilletée des jets est clairement visible à 10°W et 0°E. Leur structure très marquée à 10°W, différente de celle observée lors d'EQ99, s'estompe cependant plus à l'Est. En surface les trois radiales vont permettre d'étudier la cohérence zonale dans le Golfe de Guinée du Sous Courant Equatorial, déjà appréhendée grâce à EQ99. Un courant vers l'Est, à la profondeur et la latitude du courant de Subsurface Nord Equatorial, absent lors d'EQ99 à 7°W, est présent pendant EQUALANT 2000. Le courant de Subsurface Sud Equatorial se trouve nettement plus au Nord le long de 10°W que pendant EQ99. A 10°W, les différences observées dans les couches de surface (structures de courants, température, profondeur de la couche de mélange) entre les deux campagnes EQUALANT, effectuées à la même période de l'année, suggèrent l'existence d'une forte variabilité. A 6°E, l'absence du Sous Courant Equatorial à l'équateur est constatée, ce qui constitue un résultat original. A cette longitude, seule la partie profonde de ce courant est suggérée se prolonger de part et d'autre de l'équateur. Enfin, la description de certains courants (branches équatoriale et centrale du Courant Equatorial Sud) pourra être approfondie grâce à la haute résolution spatiale des profils thermiques et halins obtenus grâce aux mesures XBT et XCTD. Ces mesures combinées aux mesures altimétriques du satellite TOPEX-POSEIDON permettront une description de ces courants en surface et de leur variabilité.

3. Plan et chronologie de la campagne.

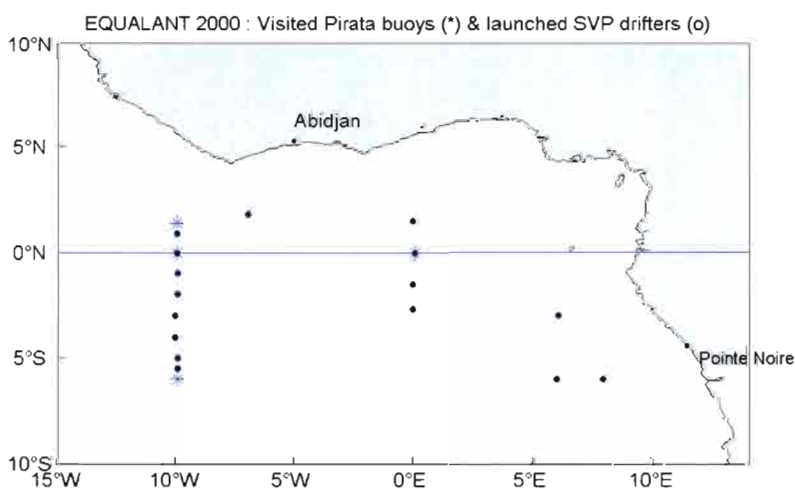
L'emplacement des 89 stations d'hydrologie et de traceurs géochimiques (dont 86 profils courantométriques) est représenté sur la figure ci-dessous :



L'emplacement des profils XBT et XCTD est représenté sur la figure ci-dessous :



L'emplacement des lâchers de bouées SVP et des interventions sur bouées PIRATA est représenté sur la figure ci-dessous :



Le déroulement de la campagne est explicité dans le tableau ci-dessous :

Jour	Date	Position	Travaux et événements principaux
J 1	25/07/2000	5°18'N - 4°00'W	Appareillage d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Route vers station test n°0.
J 2	26/07/2000	4°22'N - 6°20'W	Station test pour divers essais bathysonde - 2 palanquées successives - Quelques problèmes d'enroulement du câble (jusqu'à la station n°3).
J 2	26/07/2000	4°20'N - 7°00'W	Station bathysonde n°1. Début de la radiale méridienne à 7°W.
J 4	28/07/2000	1°30'N - 7°00'W	Fin de la radiale méridienne à 7°W (station n°9). Section zonale vers 10°W.
J 6	30/07/2000	1°38'N - 9°58'W	Station n°15 "test". Fermeture des bouteilles à 3000 db pour suivi de reproductibilité des mesures de fréons, salinité, oxygène et sels nutritifs.
J 6	30/07/2000	1°38'N - 10°00'W	Récupération de la bouée PIRATA, détériorée par vandalisme. Pas de remise à l'eau. Position définitivement abandonnée pour PIRATA.
J 6	30/07/2000	1°30'N - 10°00'W	Station n°16. Début de la radiale méridienne à 10°W.
J 7	31/07/2000	0°00'N - 10°00'W	Intervention sur bouée PIRATA. Changement anémomètre et pluviomètre.
J 10	03/08/2000	6°00'S - 10°00'W	Vérification de la bouée PIRATA "à vue". Pas d'intervention. Station n°33. Fin de la radiale méridienne 10°W.
J 11	04/08/2000	6°00'S - 9°30'W	Station n°34 "test". Fermeture des bouteilles à 3000 db pour suivi de reproductibilité des mesures de fréons, salinité, oxygène et sels nutritifs. Début de transit jusqu'à la section 0°E le long de 6°S.
J 13	06/08/2000	6°00'S - 0°00'E	Fin du transit le long de 6°S. Transit le long de 0°E jusqu'à 3°30'S.
J 13	06/08/2000	3°30'S - 0°00'E	Station n°35. Début de la radiale méridienne à 0°E.
J 15	08/08/2000	0°40'S - 0°00'E	Station n°41. Transit jusqu'à 0°N pour arriver de jour sur site PIRATA.
J 15	08/08/2000	0°00'N - 0°00'E	Mise à l'eau de la bouée PIRATA 'Soul'. Puis retour à 0°20'S.
J 15	08/08/2000	0°20'S - 0°00'E	Station n°42. La station n°43 est faite ensuite à 0°N.
J 17	10/08/2000	2°00'N - 0°00'E	Station n°48. Fin de la section méridienne à 0°E.
J 17	10/08/2000	2°00'N - 0°30'E	Station n°49 "test". Fermeture des bouteilles à 3000 db pour suivi de reproductibilité des mesures de fréons, salinité, oxygène et sels nutritifs. Début de transit jusqu'à la section 3°E le long de 2°N.
J 18	11/08/2000	2°00'N - 3°00'E	Station n°50. Début de la radiale méridienne à 3°E.
J 18	11/08/2000	3°00'N - 3°00'E	Station n°52. Fin de la radiale à 3°E. Transit jusqu'à la section 6°E.
J 19	12/08/2000	3°55'N - 6°00'E	Début de la radiale méridienne à 6°E. Pas de station à 3°55'335N - 5°59'61E. (Fond à 50m au large du Nigeria)
J 19	12/08/2000	3°50'N - 6°00'E	Station n°53.
J 24	17/08/2000	6°00'S - 6°00'E	Station n°76. Fin de la radiale méridienne à 6°E. Début section à 6°S.
J 26	19/08/2000	6°00'S - 10°00'E	Station n°84. Virement pour terminer la radiale perpendiculairement à la bathymétrie au large de Pointe Noire.
J 27	20/08/2000	4°45'S - 11°13'E	Dernière station n°89 sur fond de 220 m.
J 27	20/08/2000	4°47'S - 11°49'E	Arrivée à Pointe Noire (Congo-Brazzaville) à 08:00 TU.

4. Tableau récapitulatif des stations.

Résumé des stations LADCP : Campagne EQUALANT 2000 - N.O. THALASSA

N° Sta	N° Pal	Date début jj/mm/aaaa	Heure début hh:mm:ss	Latitude début	Longitude début	Date fin jj/mm/aaaa	Heure fin hh:mm:ss	Latitude fin	Longitude fin	Fond m	P. Ctd max dbar
1	1	26/07/2000	18:27:34	4°20.350 N	7° 2.010 W	26/07/2000	18:53:00	4°20.400 N	7° 2.456 W	233	237
2	1	26/07/2000	19:59:22	4°16.644 N	6°59.330 W	26/07/2000	21:06:06	4°17.316 N	6°58.412 W	1390	1376
3	1	26/07/2000	23:18:58	4° 9.227 N	6°59.393 W	27/07/2000	01:13:00	4° 7.934 N	6°58.368 W	2371	2493
4	1	27/07/2000	03:05:34	3°59.725 N	6°58.812 W	27/07/2000	05:09:51	3°58.350 N	6°58.075 W	2883	2960
5	1	27/07/2000	08:29:34	3°30.006 N	6°59.389 W	27/07/2000	11:27:35	3°29.113 N	6°58.697 W	4201	4278
6	1	27/07/2000	14:48:00	3°00.220 N	6°59.776 W	27/07/2000	15:17:00	3° 0.460 N	6°59.680 W	4631	501
6	2	27/07/2000	16:06:13	2°59.879 N	6°59.933 W	27/07/2000	19:09:43	3° 1.483 N	6°59.148 W	4631	4682
7	1	27/07/2000	22:29:00	2°29.840 N	7° 0.090 W	27/07/2000	22:56:00	2°29.940 N	7°00.010 W	4813	501
7	2	27/07/2000	23:42:25	2°29.874 N	7° 0.144 W	28/07/2000	03:02:28	2°30.481 N	6°59.789 W	4813	4905
8	1	28/07/2000	06:17:41	2° 0.120 N	7° 0.199 W	28/07/2000	09:07:42	2° 0.073 N	7° 0.060 W	4478	4551
9	1	28/07/2000	12:27:08	1°29.930 N	7° 0.220 W	28/07/2000	12:50:00	1°30.091 N	7° 0.222 W	4807	502
9	2	28/07/2000	13:47:02	1°29.957 N	7° 0.132 W	28/07/2000	17:04:51	1°30.206 N	7° 0.317 W	4807	4945
10	1	28/07/2000	19:49:11	1°30.030 N	7°29.950 W	28/07/2000	20:14:00	1°29.954 N	7°29.990 W	5128	506
10	2	28/07/2000	21:01:05	1°30.113 N	7°30.200 W	29/07/2000	00:16:25	1°30.144 N	7°30.324 W	5128	5225
11	1	29/07/2000	03:16:31	1°30.060 N	8° 0.250 W	29/07/2000	03:37:00	1°30.180 N	8° 0.220 W	4948	502
11	2	29/07/2000	04:35:40	1°29.978 N	8° 0.316 W	29/07/2000	07:46:04	1°29.981 N	8° 0.359 W	4948	5113
12	1	29/07/2000	10:44:38	1°30.107 N	8°30.216 W	29/07/2000	14:01:11	1°30.253 N	8°30.208 W	5029	5134
13	1	29/07/2000	16:51:53	1°30.066 N	9° 0.204 W	29/07/2000	19:11:03	1°30.017 N	9° 0.253 W	3581	3635
14	1	29/07/2000	22:29:53	1°30.180 N	9°30.433 W	30/07/2000	01:48:11	1°30.210 N	9°30.352 W	5194	5305
15	1	30/07/2000	04:33:27	1°38.135 N	9°58.000 W	30/07/2000	06:18:29	1°38.089 N	9°58.038 W	5200	3003
16	1	30/07/2000	11:10:24	1°29.914 N	0° 0.071 W	30/07/2000	11:33:45	1°29.905 N	10° 0.051 W	5199	509
16	2	30/07/2000	12:59:26	1°30.217 N	10° 0.174 W	30/07/2000	16:34:24	1°30.478 N	9°59.976 W	5199	5313
17	1	30/07/2000	20:12:18	1° 0.210 N	10° 0.063 W	30/07/2000	20:34:45	1° 0.228 N	10° 0.002 W	4632	502
17	2	30/07/2000	21:19:13	1° 0.062 N	9°59.983 W	31/07/2000	00:15:32	1° 0.061 N	9°59.898 W	4632	4727
18	1	31/07/2000	02:53:19	0°40.242 N	10° 0.275 W	31/07/2000	05:48:47	0°40.272 N	10° 0.232 W	4573	4575
19	1	31/07/2000	08:09:37	0°20.094 N	10° 0.055 W	31/07/2000	11:09:11	0°20.480 N	9°59.700 W	4645	4713
20	1	31/07/2000	16:16:25	0° 0.080 N	9°59.950 W	31/07/2000	16:40:00	0° 0.280 N	9°59.800 W	4730	502
20	2	31/07/2000	17:22:58	0° 0.174 N	9°59.935 W	31/07/2000	20:24:08	0° 0.254 N	9°59.824 W	4730	4875
21	1	31/07/2000	23:04:44	0°20.066 S	9°59.906 W	01/08/2000	01:49:07	0°19.382 S	9°59.987 W	4031	4093
22	1	01/08/2000	04:14:03	0°39.959 S	10° 0.119 W	01/08/2000	06:49:25	0°39.924 S	10° 0.018 W	4025	4088
23	1	01/08/2000	09:05:11	1° 0.091 S	10° 0.055 W	01/08/2000	11:50:06	1° 0.110 S	9°59.896 W	4265	4325
24	1	01/08/2000	14:50:25	1°29.970 S	10° 0.110 W	01/08/2000	15:15:00	1°29.870 S	10° 0.610 W	4767	4857
24	2	01/08/2000	16:14:20	1°29.862 S	9°59.980 W	01/08/2000	19:16:58	1°30.025 S	9°59.999 W	4767	4857
25	1	01/08/2000	22:28:36	2° 0.179 S	10° 0.238 W	02/08/2000	01:16:54	2° 0.029 S	10° 0.030 W	4365	4436
26	1	02/08/2000	04:24:49	2°30.124 S	10° 0.167 W	02/08/2000	07:09:17	2°30.031 S	10° 0.078 W	4306	4377
27	1	02/08/2000	11:27:06	2°59.969 S	10° 0.128 W	02/08/2000	13:58:25	3° 0.097 S	10° 0.232 W	3787	3788
28	1	02/08/2000	17:15:54	3°29.844 S	10° 0.247 W	02/08/2000	19:44:10	3°29.879 S	10° 0.138 W	3820	3864
29	1	02/08/2000	23:32:50	3°59.958 S	10° 0.022 W	03/08/2000	01:56:58	3°59.916 S	10° 0.150 W	3578	3613
30	1	03/08/2000	05:37:27	4°29.843 S	10° 0.065 W	03/08/2000	07:59:50	4°29.778 S	9°59.839 W	3687	3727
31	1	03/08/2000	11:45:12	4°59.902 S	10° 0.020 W	03/08/2000	14:02:01	4°59.459 S	9°59.483 W	3266	3330
32	1	03/08/2000	17:46:25	5°29.850 S	9°59.951 W	03/08/2000	19:55:53	5°29.600 S	9°59.681 W	3374	3405
33	1	03/08/2000	23:57:55	6° 0.631 S	9°58.898 W	04/08/2000	02:17:58	6° 0.520 S	9°58.740 W	3539	3572
34	1	04/08/2000	05:29:39	6° 0.080 S	9°30.014 W	04/08/2000	07:16:09	5°59.896 S	9°29.951 W	3569	3002
35	1	06/08/2000	17:48:01	3°30.127 S	0° 0.119 W	06/08/2000	19:10:26	3°30.168 S	0° 0.078 W	1832	1901
36	1	06/08/2000	22:17:15	2°59.915 S	0° 0.005 W	07/08/2000	01:11:18	3° 0.025 S	0° 0.071 W	4446	4536
37	1	07/08/2000	04:29:38	2°29.983 S	0° 0.091 W	07/08/2000	07:25:10	2°30.270 S	0° 0.001 W	4547	4621
38	1	07/08/2000	10:30:54	2° 0.066 S	0° 0.162 W	07/08/2000	13:35:05	2° 0.071 S	0° 0.056 W	4705	4772
39	1	07/08/2000	16:41:36	1°29.954 S	0° 0.208 W	07/08/2000	19:38:36	1°29.954 S	0° 0.000 E	4714	4808
40	1	07/08/2000	22:40:49	0°59.868 S	0° 0.136 W	08/08/2000	01:52:37	0°59.970 S	0° 0.065 E	4810	4898
41	1	08/08/2000	04:00:15	0°39.940 S	0° 0.125 W	08/08/2000	04:22:00	0°39.953 S	0° 0.170 W	4852	502
41	2	08/08/2000	05:03:13	0°39.984 S	0° 0.005 W	08/08/2000	08:02:02	0°39.884 S	0° 0.036 E	4852	4948
42	1	08/08/2000	17:29:26	0°19.940 S	0° 0.240 W	08/08/2000	17:51:00	0°19.900 S	0° 0.220 W	4860	501
42	2	08/08/2000	19:08:08	0°19.850 S	0° 0.335 W	08/08/2000	22:15:14	0°19.920 S	0° 0.034 W	4860	4952
43	1	09/08/2000	00:22:56	0° 0.280 N	0° 0.267 W	09/08/2000	00:47:37	0° 0.430 N	0° 0.350 W	4904	514
43	2	09/08/2000	01:24:41	0° 0.180 N	0° 0.162 W	09/08/2000	04:38:59	0° 0.198 N	0° 0.064 E	4904	5000
44	1	09/08/2000	06:48:00	0°20.050 N	0° 0.060 E	09/08/2000	07:09:00	0°20.010 N	0° 0.000 E	4903	502
44	2	09/08/2000	07:52:25	0°19.998 N	0° 0.005 E	09/08/2000	09:22:19	0°19.999 N	0° 0.012 E	4903	5001
45	1	09/08/2000	13:23:40	0°40.070 N	0° 0.113 W	09/08/2000	13:47:08	0°40.050 N	0° 0.100 W	4910	506
45	2	09/08/2000	15:13:49	0°39.967 N	0° 0.042 E	09/08/2000	18:17:11	0°40.032 N	0° 0.218 E	4910	5008
46	1	09/08/2000	20:22:24	1° 0.080 N	0° 0.010 E	09/08/2000	20:44:15	1° 0.120 N	0° 0.070 E	4892	503
46	2	09/08/2000	21:30:11	1° 0.025 N	0° 0.082 W	10/08/2000	00:38:43	1° 0.124 N	0° 0.192 E	4892	4989
47	1	10/08/2000	03:44:19	1°30.180 N	0° 0.111 E	10/08/2000	04:07:00	1°30.270 N	0° 0.190 E	4863	502

47	2	10/08/2000	04:49:43	1°29.994 N	0° 0.002 E	10/08/2000	07:52:00	1°29.994 N	0° 0.228 E	4863	4959
48	1	10/08/2000	10:54:14	1°59.980 N	0° 0.040 E	10/08/2000	11:15:34	1°59.960 N	0° 0.060 E	4834	501
48	2	10/08/2000	11:59:32	1°59.965 N	0° 0.090 E	10/08/2000	15:03:02	1°59.987 N	0° 0.479 E	4834	4928
49	1	10/08/2000	18:04:11	2° 0.026 N	0°29.962 E	10/08/2000	19:48:06	1°59.910 N	0°30.187 E	4740	3002
50	1	11/08/2000	09:27:15	1°59.942 N	2°59.916 E	11/08/2000	12:11:08	1°59.426 N	3° 0.377 E	4304	4364
51	1	11/08/2000	15:25:46	2°29.982 N	3° 0.174 E	11/08/2000	18:05:23	2°29.750 N	3° 0.166 E	4251	4314
52	1	11/08/2000	21:10:43	2°59.996 N	3° 0.070 E	11/08/2000	23:48:18	2°59.874 N	3° 0.332 E	4135	4192
53	1	12/08/2000	18:14:59	3°45.060 N	6° 0.210 E	12/08/2000	18:25:00	3°44.960 N	6° 0.270 E	172	167
54	1	12/08/2000	20:11:19	3°29.995 N	6° 0.131 E	12/08/2000	20:44:08	3°29.828 N	6° 0.172 E	739	737
55	1	12/08/2000	22:30:37	3°15.076 N	6° 0.030 E	12/08/2000	23:34:11	3°15.022 N	6° 0.025 E	1631	1625
56	1	13/08/2000	01:17:34	3° 0.064 N	6° 0.191 E	13/08/2000	02:39:21	2°59.942 N	6° 0.450 E	1911	1907
57	1	13/08/2000	05:57:00	2°30.148 N	6° 0.292 E	13/08/2000	07:49:15	2°29.910 N	6° 0.263 E	2946	2965
58	1	13/08/2000	11:03:40	2° 0.077 N	5°59.984 E	13/08/2000	13:13:03	1°59.916 N	6° 0.067 E	3374	3393
59	1	13/08/2000	16:22:22	1°29.978 N	5°59.960 E	13/08/2000	18:31:20	1°29.952 N	5°59.920 E	3412	3442
60	1	13/08/2000	21:36:52	1° 0.002 N	5°59.900 E	13/08/2000	23:46:47	1° 0.006 N	5°59.795 E	3424	3457
61	1	14/08/2000	01:55:07	0°40.015 N	5°59.891 E	14/08/2000	04:04:06	0°39.818 N	5°59.982 E	3333	3361
62	1	14/08/2000	06:14:21	0°19.988 N	5°59.934 E	14/08/2000	08:17:51	0°20.112 N	6° 0.162 E	3240	3266
63	1	14/08/2000	10:31:30	0° 0.085 S	5°59.876 E	14/08/2000	12:27:02	0° 0.282 S	5°59.850 E	3032	3051
64	1	14/08/2000	14:37:59	0°20.059 S	6° 0.144 E	14/08/2000	16:29:56	0°20.129 S	6° 0.264 E	2828	2852
65	1	14/08/2000	18:34:13	0°40.008 S	5°59.960 E	14/08/2000	20:42:31	0°39.835 S	6° 0.174 E	3359	3386
66	1	14/08/2000	22:55:24	1° 0.054 S	5°59.999 E	15/08/2000	01:06:02	0°59.670 S	6° 0.006 E	3409	3432
67	1	15/08/2000	04:19:19	1°30.036 S	6° 0.026 E	15/08/2000	06:29:21	1°29.996 S	6° 0.070 E	3439	3469
68	1	15/08/2000	09:35:26	2° 0.119 S	6° 0.000 E	15/08/2000	11:57:04	2° 0.215 S	6° 0.084 E	3596	3632
69	1	15/08/2000	15:01:08	2°29.952 S	6° 0.059 E	15/08/2000	17:27:28	2°30.152 S	6° 0.190 E	3941	3993
70	1	15/08/2000	20:35:10	3° 0.012 S	5°59.978 E	15/08/2000	23:20:56	3° 0.014 S	5°59.993 E	4229	4289
71	1	16/08/2000	02:29:51	3°29.950 S	6° 0.008 E	16/08/2000	05:18:10	3°30.120 S	6° 0.260 E	4552	4523
72	1	16/08/2000	08:23:23	4° 0.031 S	5°59.942 E	16/08/2000	11:23:12	4° 0.041 S	5°59.900 E	4594	4674
73	1	16/08/2000	14:31:22	4°29.882 S	6° 0.061 E	16/08/2000	17:23:26	4°29.906 S	5°59.996 E	4673	4754
74	1	16/08/2000	20:33:09	4°59.950 S	5°59.870 E	16/08/2000	20:56:04	4°59.910 S	5°59.857 E	4683	501
74	2	16/08/2000	21:39:18	4°59.987 S	5°59.902 E	17/08/2000	00:44:32	5° 0.032 S	5°59.891 E	4683	4763
75	1	17/08/2000	03:55:24	5°30.040 S	6° 0.020 E	17/08/2000	04:18:00	5°30.070 S	6° 0.060 E	4732	501
75	2	17/08/2000	04:58:23	5°30.055 S	6° 0.120 E	17/08/2000	07:54:57	5°30.120 S	6° 0.031 E	4732	4818
76	1	17/08/2000	10:55:20	6° 0.040 S	5°59.970 E	17/08/2000	11:17:52	6° 0.037 S	6° 0.012 E	4704	501
76	2	17/08/2000	12:05:07	6° 0.065 S	6° 0.005 E	17/08/2000	15:09:02	6° 0.156 S	6° 0.336 E	4704	4790
77	1	17/08/2000	18:07:04	6° 0.065 S	6°29.940 E	17/08/2000	20:53:45	6° 0.026 S	6°30.110 E	4553	4627
78	1	17/08/2000	23:53:05	5°59.914 S	6°59.892 E	18/08/2000	02:53:35	5°59.892 S	7° 0.172 E	4458	4530
79	1	18/08/2000	05:59:01	6° 0.030 S	7°29.992 E	18/08/2000	08:40:53	5°59.989 S	7°30.012 E	4274	4337
80	1	18/08/2000	11:43:14	5°59.951 S	7°59.844 E	18/08/2000	14:19:06	5°59.852 S	7°59.994 E	4092	4145
81	1	18/08/2000	17:20:07	5°59.965 S	8°29.950 E	18/08/2000	19:41:54	6° 0.018 S	8°30.022 E	3857	3901
82	1	18/08/2000	22:47:45	5°59.993 S	8°59.954 E	19/08/2000	01:05:05	6° 0.118 S	9° 0.072 E	3632	3667
83	1	19/08/2000	04:01:41	6° 0.005 S	9°29.986 E	19/08/2000	06:08:09	5°59.921 S	9°30.310 E	3334	3362
84	1	19/08/2000	09:06:05	5°59.905 S	9°59.960 E	19/08/2000	11:12:02	5°59.935 S	10° 0.014 E	3070	3089
85	1	19/08/2000	13:59:25	5°39.985 S	10°20.000 E	19/08/2000	15:36:41	5°40.062 S	10°19.990 E	2435	2492
86	1	19/08/2000	18:26:11	5°19.910 S	10°40.000 E	19/08/2000	19:46:41	5°19.981 S	10°39.984 E	1990	1988
87	1	19/08/2000	22:39:07	4°59.477 S	10°56.406 E	19/08/2000	23:51:03	4°59.502 S	10°56.462 E	1749	1743
88	1	20/08/2000	01:42:25	4°47.010 S	11° 8.192 E	20/08/2000	02:20:04	4°47.116 S	11° 8.059 E	849	852
89	1	20/08/2000	03:16:25	4°44.890 S	11°12/930 E	20/08/2000	03:34:12	4°44.930 S	11°13.080 E	212	214

5. Travaux en route.

Le long du trajet de la campagne :

- Les courants ont été mesurés en continu grâce aux deux VM-ADCP du navire, entre 0 et 750 m (VM-ADCP NB 75kHz) et entre 0 et 300 m (VM-ADCP BB 150 kHz) ;
- La température et la salinité de surface ont été mesurées en continu avec le thermosalinographe du bord ;
- 101 sondes XBT et 46 XCTD ont été lancées (voir plan).
- 16 bouées dérivantes de surface ont été larguées (voir plan).

Il est à noter que, lors des transits du navire entre Salvador de Bahia (Brésil) et Abidjan (Côte d'Ivoire), avant la campagne, puis entre Pointe Noire (Congo-Brazzaville) et Vigo (Portugal), après la campagne, les mesures des courantomètres VM-ADCP et du thermosalinomètre ont été enregistrées (ainsi que les paramètres de navigation et météorologiques enregistrés par la centrale du bord), sur la demande des responsables de la campagne. Ces mesures ne sont pas présentées dans ce rapport.

6. Travaux en station.

Lors de la campagne EQUALANT 2000, les opérations suivantes en station ont été réalisées :

- Des sections hydrologiques sous la forme de radiales méridiennes entre le continent africain et 6°S à 10°W (répétition de la section effectuée pendant la campagne EQUALANT 99, dont une partie à 7°W en raison d'absence d'autorisation de travail dans les eaux sous juridiction libérienne), 0°E (dont la partie nord à 3°E en raison d'absence d'autorisation de travail dans les eaux sous juridiction ghanéenne), et 6°E, ainsi qu'une section zonale le long de 6°S entre 6°E et Pointe Noire (voir plan de campagne).

- Le long de ces sections, 89 stations hydrologiques profondes ont été réalisées. Au cours de ces stations la pression, la température, la conductivité (salinité), la concentration en oxygène dissous (avec une sonde CTD-O₂) et la turbidité* (avec un néphélomètre) ont été mesurées en continu de la surface au fond. La vitesse absolue du courant (avec un courantomètre à effet Doppler -LADCP- placé sur le châssis de la bathysonde -voir photo ci-dessous-) a également été mesurée de la surface au fond en 86 stations. Lors des stations, des prélèvements d'eau sur 24 niveaux en général (jusqu'à 32 niveaux lorsque les fonds excédaient 4700m, à l'aide de doubles palanquées) ont été faits entre la surface et le fond.



* mesures et exploitation de données sous la responsabilité de Annick Vangriesheim (IFREMER - Brest).

- Les mesures suivantes ont été effectuées à bord :

- La salinité (environ 2300 prélèvements)
- L'oxygène (environ 2300 prélèvements)
- Les sels nutritifs (phosphates, nitrates, silicates – environ 2300 prélèvements)
- Les fréons 11 et 12 (plus de 3200 prélèvements)

Les mesures suivantes ont été faites à terre :

- Carbone-13 et Oxygène-18 prélevés sur la bouteille de surface (84 prélèvements)

- Interventions sur des bouées météo-océaniques ATLAS du programme PIRATA (voir plan).

- Des capteurs défectueux ont été remplacés sur la bouée ATLAS située à 10°W-0°N (un anémomètre et un pluviomètre) ;
- La bouée ATLAS située à 1.38°N-10°W détériorée suite à un acte de vandalisme (mât instrumenté arraché) a été relevée,
- Une bouée ATLAS a été déployée à 0°E-0°N (il est à noter que c'est la 1^{ère} fois qu'une équipe française prend intégralement en charge le déploiement d'une telle bouée, sans l'assistance technique d'ingénieurs des Etats-Unis spécialisés sur ce type d'intervention).
- Une inspection visuelle (de nuit) a été effectuée sur la bouée ATLAS située à 6°S-10°W.

7. Participants à la campagne (équipe scientifique et observateurs).

PERSONNEL EMBARQUE	SPECIALITE	LABORATOIRE
NOM et PRENOM		
AMAN Angora	Physique	Université de Cocody (Abidjan)
ANDRIE Chantal	Chimie	IRD/LODYC-Paris VI
BANHORO Rigobert	Chimie	IRD-Bouaké
BAURAND François	Chimie	IRD-Brest
BOURLES Bernard	Physique	IRD-Brest
CHUCHLA Rémy	Physique	IRD-Brest
DEWITTE Boris	Physique	IRD/LEGOS-Toulouse
DU PENHOAT Yves	Physique	IRD/LEGOS-Toulouse
ELDIN Gérard	Physique	IRD/LEGOS-Toulouse
ELENGA Camara	Observateur	(Brazzaville-Congo)
FREUDENTHAL Sébastien	Chimie	LODYC-Paris VI
GALLOIS Francis	Electronique	IRD-Nouméa
GUERMEUR Glen	Chimie	IRD-Brest
KOUADIO Georges	Physique	Université de Cocody (Abidjan)
LE VU Briac	Chimie	LPCM-Paris
MAHIA Achinge	Observateur	(Lagos-Nigéria)
NDOUR Cheick	Chimie	IRD-Brest / CRODT-Dakar
PAULMIER Aurélien	Chimie	LPCM-Paris
WILLIAMS Akambi B.	Observateur	(Lagos-Nigéria)

8. Remerciements.

Cette campagne a été financée par l'IRD, l'IFREMER et le CNRS/INSU, et a également bénéficié du soutien du PNEDC (Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat) et du PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale).

Nous tenons à remercier :

- L'INSU pour le prêt d'une CTD SEABIRD 911+, d'une rosette SEABIRD 24 bouteilles et d'un container de transport.
- Le LPO (Laboratoire de Physique des Océans) pour le prêt d'un courantomètre à effet Doppler (L-ADCP).

Nous sommes particulièrement reconnaissants aux personnes suivantes qui ont participé activement, de près ou de loin, ou qui nous ont aidés à la préparation du matériel utilisé lors du programme (soit lors de cette campagne soit lors de la campagne Equalant-1999) : Claudie Bournot-Marec et Yves l'Herrou (INSU-Brest), André Billant, Pierre Brannelec, Philippe LeBot, Stéphane Leizour, Jean-Pierre Gouillou et Olivier Peden (LPO-Brest).

Nous tenons à remercier le Commandant du N/O Thalassa, M. Hervé PITON, ainsi que tout l'équipage, qui se sont montrés particulièrement attentifs et attentionnés tout au long de la campagne.

Un grand merci au personnel du service de reprographie du Centre IFREMER de Brest, qui nous a permis d'imprimer et de relier ce rapport.

Merci à Karine Lambert et Yvonne Vernon (Bureau des Voyages, IRD-Paris), à Josette Berduck, Pedro Vergé-Dépré et Laurent Veysseyre (IRD-Pointe Noire, Congo Brazzaville), et à Sacy Nadaradjane et Alain Morlière (IRD-Abidjan, Côte d'Ivoire) qui nous ont assurés soutien et aide logistique précieux avant et pendant la campagne.

MESURES METEOROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES EFFECTUEES PAR LES INSTRUMENTS DU N/O THALASSA

**(NAVIGATION, BATHYMETRIE,
CENTRALE METEOROLOGIQUE, VENT, THERMOSALINOGRAPHE)**

Bernard Boulès, Centre IRD de Bretagne

I. MESURES BRUTES.

I.1 - NAVIGATION.

Le N/O THALASSA est équipé de deux GPS (Global Positioning System) de type SERCEL NR 103, et de deux gyrocompas BROWN SG 1000S, localisés à la passerelle. Les paramètres relatifs à la navigation sont acquis par la centrale de navigation et de cartographie intégrée CINNA (Genavir ; Allenou et Violette, Informatique embarquée – L'ATALANTE-, Centrale intégrée de navigation CINNA – Généralités et principes, *Rapport GENAVIR IFREMER*, 45pp, 1992). Pendant la campagne EQUALANT-2000, la navigation était enregistrée toutes les 10 secondes (position et temps). La navigation enregistrée était vérifiée et 'rejouée' (en intégrant tous les paramètres de positionnement GPS, loch etc.) quotidiennement à bord avec le système TRINAV (TRaitement Interactif de la NAVigation). Le fichier global de la navigation 'rejouée' a été fourni après la campagne, dont le tracé est représenté sur la figure 1. Ces mesures ont été enregistrées du 25 juillet 2000 à 18h30'30'' au 20 août 2000 à 07h54'00''. Cependant, en raison d'un problème rencontré avec la station d'archivage, aucune mesure de navigation n'a été enregistrée le 26 juillet 2000 entre 08h07' et 09h02'40''. Le fichier ASCII 'nav.dat' fourni avec l'ensemble des données comprend la navigation complète (à raison d'un point toutes les 10 secondes, soit 220300 mesures).

I.2 – BATHYMETRIE.

Le N/O THALASSA est équipé de différents sondeurs 'petits' et 'grands' fonds. Lors de la campagne, seul le sondeur 'grands fonds' de type SIMRAD EK 500 a été utilisé. En raison d'une interférence de fréquence avec le pinger, appareil acoustique utilisé afin de connaître la position de la bathysonde par rapport au fond lors des profils hydrologiques, le sondeur était interrompu pendant les stations.

L'acquisition de la profondeur du fond était effectuée toutes les 3 secondes par le système TERMES (Centrale d'acquisition TEMps Réel des MESures Scientifiques ; Anonyme, Recueil des logiciels embarqués sur le N/O ATALANTE, *Rapport DITI/DSI/GEN/MCJ/92-043, IFREMER*, 1992). Toutes les mesures valides, donc acquises navire en route, sont présentes dans le fichier ASCII 'bathy.dat' fourni avec l'ensemble des données (soit 542 905 mesures). Ces mesures ont été enregistrées du 25 juillet 2000 à 20h04'49'' au 20 août 2000 à 03h07'59''. Il est à noter que, pour un problème rencontré avec la station d'archivage, aucune mesure n'a été sauvegardée le 26 juillet entre 06h30'18''TU et 08h42'06''TU. De même, pour une raison inconnue, le sondeur n'a pas fonctionné correctement le 06 août entre 12h53'20''9 et 13h08'50'8. Les profondeurs seraient effectivement passées en quelques secondes à des valeurs d'environ 16m, alors que les fonds sont aux alentours supérieurs à 5300m... Elles ont donc été mises à la valeur par défaut '-9.'

I.3 - THERMOSALINOGRAPHE.

Les mesures de température et de salinité de surface sont particulièrement intéressantes pour étudier les échanges océan-atmosphère. Le navire N/O THALASSA est équipé d'un thermosalinographe Seabird SBE-21 qui a été calibré quelques semaines avant la campagne lors d'une escale technique du navire. Le système de récupération de l'eau de surface est installé vers l'avant du navire, et l'eau de mer est acheminée au thermosalinographe à l'aide d'une pompe. La température est mesurée à la prise d'eau, ainsi qu'au niveau du thermosalinographe. Une pompe auxiliaire est installée au niveau du thermosalinographe afin d'éviter les bulles d'air qui peuvent perturber les mesures de conductivité (voir *Hénin et Grelet, A merchant ship thermo-salinograph network in the Pacific ocean, Deep-Sea Res., 43, No 11-12, 1833-1855, 1996*).

L'acquisition des mesures (à savoir la pression –toujours à 0-, la conductivité, la température à la prise d'eau, la salinité, l'anomalie de densité, la vitesse du son et la température dans la cuve du thermosalinographe) était effectuée toutes les 6 secondes par le système TERMES. Ces mesures ont été enregistrées du 25 juillet 2000 à 20h04'52'' au 20 août 2000 à 03h07'58''. De même que pour les mesures bathymétriques, il est à noter que, pour un problème rencontré avec la station d'archivage, aucune mesure n'a été sauvegardée le 26 juillet entre 06h30'15''TU et 08h42'09''TU.

De ces mesures, seules celles de la température mesurée à la prise d'eau et de la salinité ont été retenues. Ces mesures sont présentes dans le fichier ASCII 'thsal.dat' fourni avec l'ensemble des données (soit 3620676 mesures).

ATTENTION : Ayant constaté des écarts de salinité supérieurs à 0.3 entre les mesures fournies par le thermosalinographe et par la sonde CTD en surface, il a été procédé à un nettoyage des capteurs, le 29 juillet, entre 16h51' et 17h15', soit pendant la station CTD n°13. De ce fait, les mesures de salinité issues du thermosalinographe avant cette date (29/07/2001, 17h15'29'', enregistrement n°54339 sur le fichier 'thsal.dat') ne doivent pas être utilisées.

I.4 - METEOROLOGIE.

I.4.a. Paramètres de surface.

Le N/O THALASSA est équipé d'une station météorologique permettant de mesurer les paramètres suivants :

- Température de l'air (°C)
- Température de la mer (°C)
- Humidité relative (%)
- Pression atmosphérique (mbar)
- Radiation solaire incidente (mW/cm²)
- Point de rosée (°C).

Ces mesures ont été enregistrées par le système TERMES avec la même fréquence et en même temps que les mesures du thermosalinographe, soit toutes les 6 secondes, du 25 juillet 2000 à 10h54'07'' au 20 août 2000 à 03h07'56''. De même, pour un problème rencontré avec la station d'archivage, aucune mesure n'a été sauvegardée le 26 juillet entre 06h30'17''TU et 08h43'11''TU. Après suppression des mesures erronées (défaut d'appareil ou de réception), nous disposons de 368 418 mesures, disponibles dans le fichier ASCII 'meteo.dat' fourni avec l'ensemble des données.

I.4.b. Vents.

Le N/O THALASSA est équipé de capteurs Vaisala MILOS 500. Ces capteurs mesurent la direction et l'intensité du vent apparent (par rapport au cap et à la vitesse du navire), enregistrés par le système TERMES. Ces mesures ont été enregistrées par le système

TERMES avec la même fréquence et en même temps que les mesures météorologiques et du thermosalinographe, soit toutes les 6 secondes, du 25 juillet 2000 à 10h54'07'' au 20 août 2000 à 03h07'56''. De même, pour un problème rencontré avec la station d'archivage, aucune mesure n'a été sauvegardée le 26 juillet entre 06h30'17''TU et 08h42'04''TU.

Ces données sont traitées et combinées à bord avec les paramètres de navigation pour en déduire l'intensité et la direction du vent vrai. Seules ces mesures ont été retenues. Nous disposons ainsi de 368 418 mesures, disponibles dans le fichier ASCII 'vent.dat' fourni avec l'ensemble des données. A noter que les mesures de l'intensité du vent effectuées le 26 juillet, entre 04h14'17'' et 04h20'47'' présentent des valeurs aberrantes (supérieures à 100 m/s) et ont donc été mises à la valeur par défaut '-9.'.

II. CONSTITUTION DE FICHIERS GLOBAUX.

Afin de constituer des fichiers de travail consistants et moins coûteux en espace disque, tous les paramètres précédents ont été regroupés dans des fichiers dits 'globaux', selon différents pas de temps.

II.1. Fichiers tous les ¼ d'heure.

Pour constituer ce fichier, les mesures météorologiques de surface et les mesures de température et de salinité obtenues par le thermosalinographe ont été moyennées tous les ¼ d'heure. Pour cela, nous avons appliqué un filtre aux mesures. Ce filtre consiste, sur une fenêtre de 15 minutes, à éliminer les mesures dont l'écart à la moyenne calculée sur l'intervalle est supérieur à 5 écarts-type, puis à rechercher la valeur médiane des mesures restantes dans la fenêtre que l'on affecte à l'enregistrement central. Nous avons choisi de conserver la valeur médiane de ces paramètres plutôt que la valeur moyenne car elle est plus représentative du signal dans les zones de forts gradients. Par exemple, cela est particulièrement vrai pour la salinité et la température de surface en présence de lentilles d'eaux dessalées (*Hénin et Grelet, 1996*). Ensuite, nous avons recherché dans les fichiers de navigation, de bathymétrie et de vent, de résolution temporelle fine (3 à 6 secondes) les mesures obtenues aux instants les plus proches des valeurs moyennes ainsi obtenues.

Lorsque les mesures bathymétriques ne sont pas disponibles (en station ou trop près des côtes), la valeur est mise par défaut à '-9.'.

Nous disposons ainsi de 2404 mesures, disponibles dans le fichier ASCII 'enroute.dat', qui contient les paramètres suivants :

- Indice de la mesure
- Date : jour, mois, année
- Heure : heure, minute, seconde
- Position : longitude, latitude (degrés.centièmes, négatif à l'ouest et au sud respectivement)
- Profondeur du fond (m)
- Température de l'air (°C)
- Température de la mer (mesure météo, °C)
- Humidité relative (%)
- Pression atmosphérique (mbar)
- Radiation solaire (mW/cm²)
- Température du point de rosée (°C)
- Vitesse du vent (m/s)
- Direction du vent (degrés par rapport au nord géographique, direction d'où vient le vent)
- Température de la mer (mesure thermosalinographe, °C)
- Salinité

Les figures 2 à 12 présentées ci-dessous ont été élaborées à partir de ce fichier.

II.2. Fichiers ‘ en station’.

Les paramètres précédents ont également été regroupés dans un fichier ‘en station’, c’est-à-dire avec les mesures obtenues au début de chaque station hydrologique. En cas de plusieurs palanquées (doubles palanquées avec première palanquée jusqu’à 500 m de profondeur), seules les palanquées profondes ont été considérées. A noter que la station ‘0’ a été considérée.

Nous disposons ainsi d’une liste de 90 séries d’informations, (89 stations + station 0), comprenant en 1^{ère} information l’indice de la série et la 2^{nde} information l’indice réel de la station, disponibles dans le fichier ASCII ‘enstation.dat’.

Il est à noter que les informations (thermosalinographe, météorologie, vent) fournies pour la station 89 sont en réalité les dernières mesures obtenues par les appareils (donc le 20 août vers 03h07’), ceux-ci ayant été stoppés avant la station qui a commencé vers 03h10’, soit 3 minutes après !

ATTENTION : Comme cela a été mentionné dans le chapitre ‘THERMOSALINOGRAPHE’, les mesures de salinité de cet appareil obtenues avant et pendant la station CTD n°13 sont erronées (soit avant les enregistrements n°363 du fichier ‘enroute.dat’, et n°14 du fichier ‘enstation.dat’).

Précision : tous les fichiers ASCII mentionnés ici sont lisibles en format ‘flottant’.

Figure 1 : Tracé de la campagne obtenu à partir du fichier de navigation.

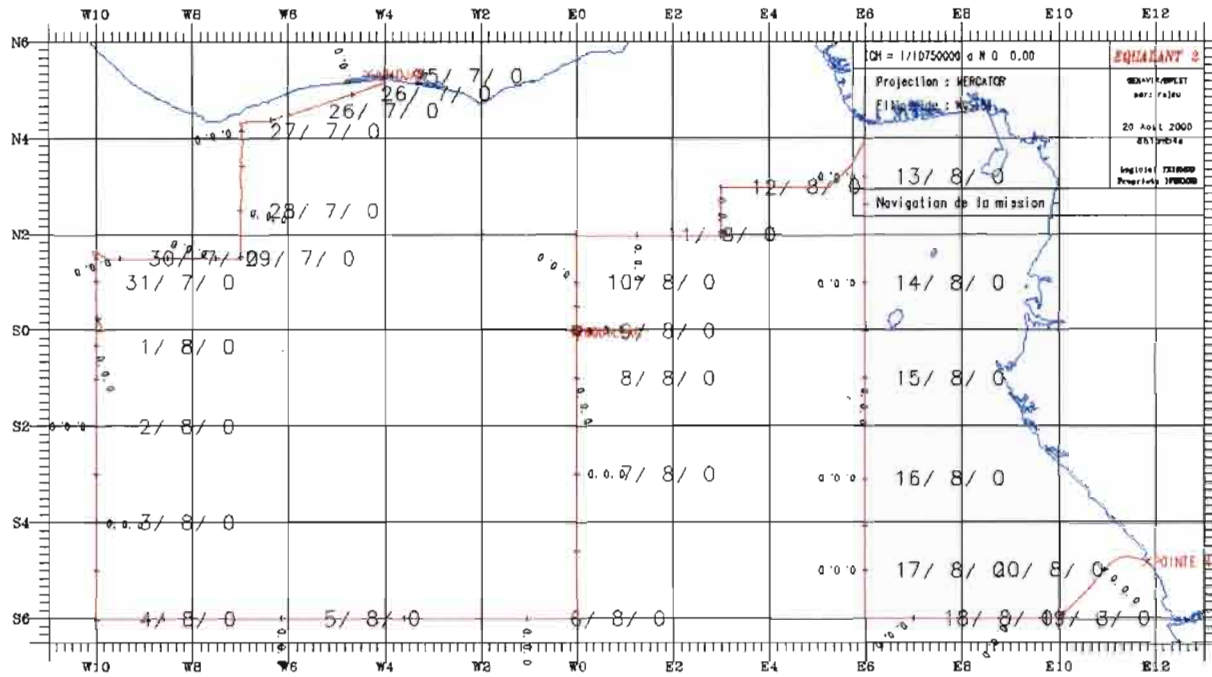


Figure 2 : Tracé de la bathymétrie (m).

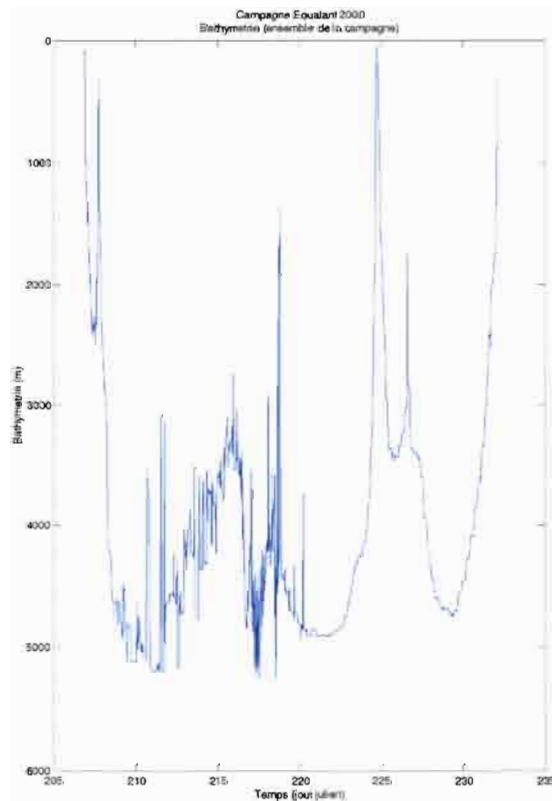


Figure 3 : Température de surface de la mer mesurée avec le thermosalinographe.

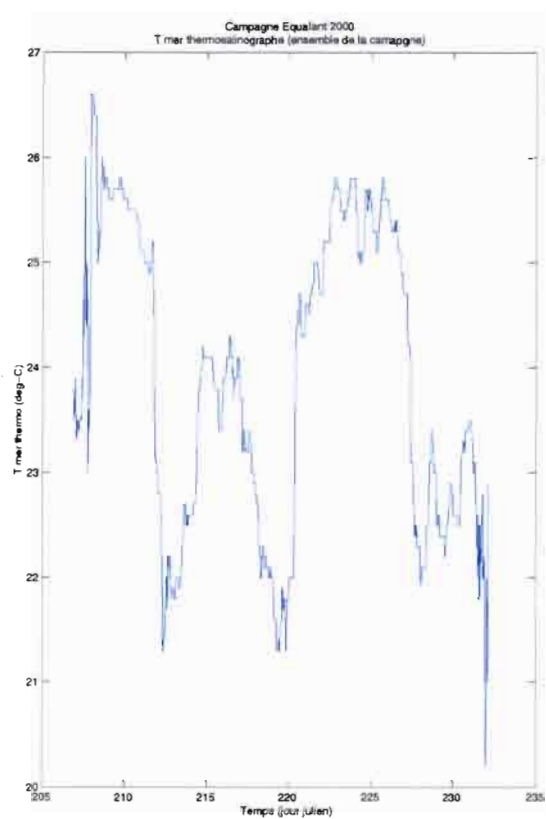


Figure 4 : Salinité de surface de la mer mesurée avec le thermosalinographe.

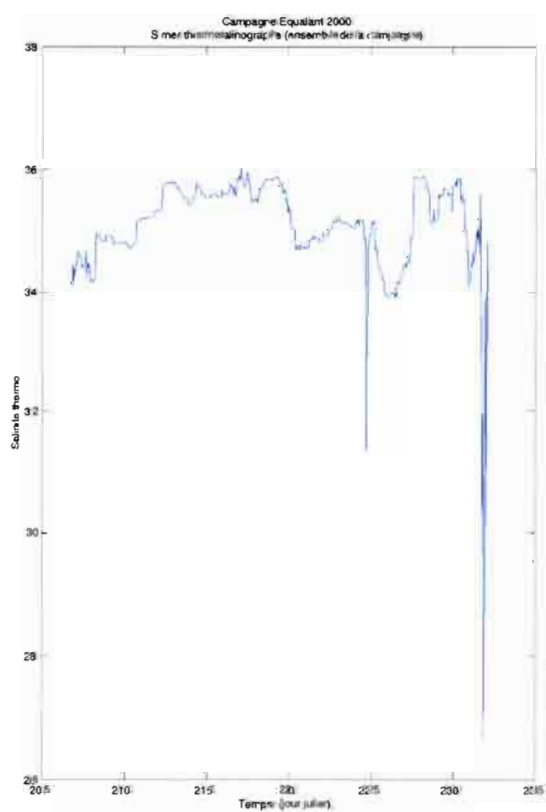


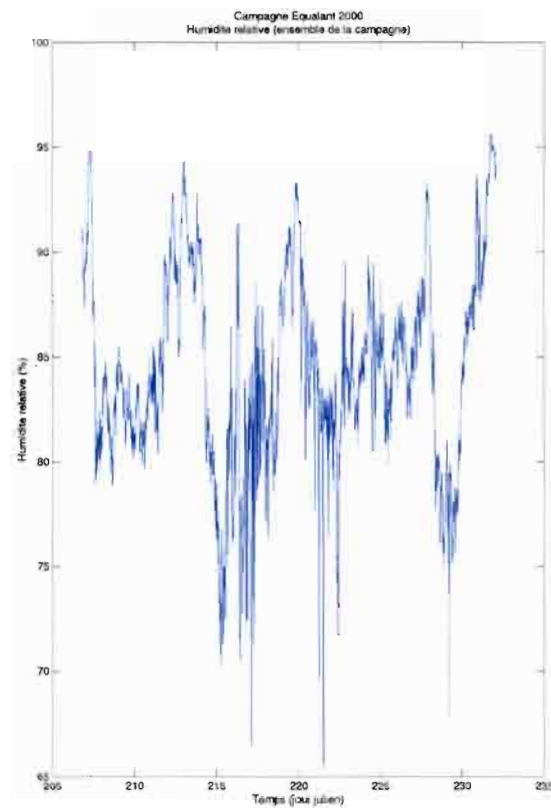
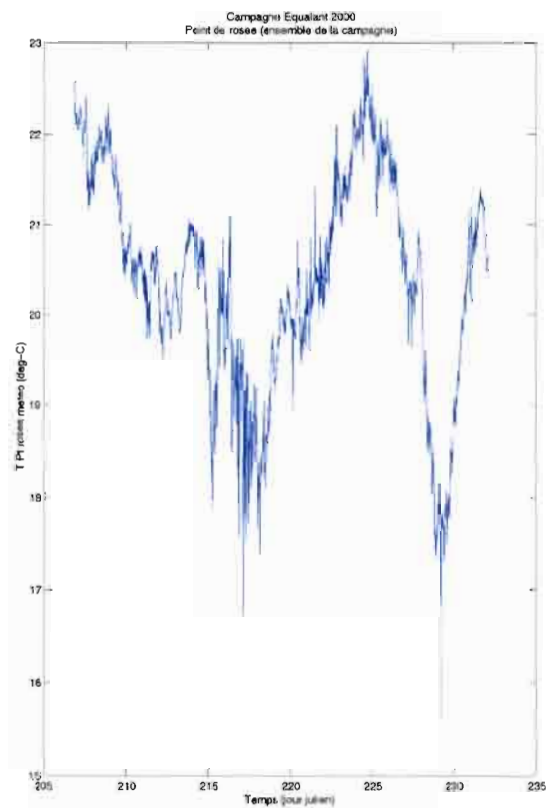
Figure 5 : Humidité relative (%).**Figure 6 :** Température du point de rosée (°C).

Figure 7 : Pression atmosphérique (mbar).

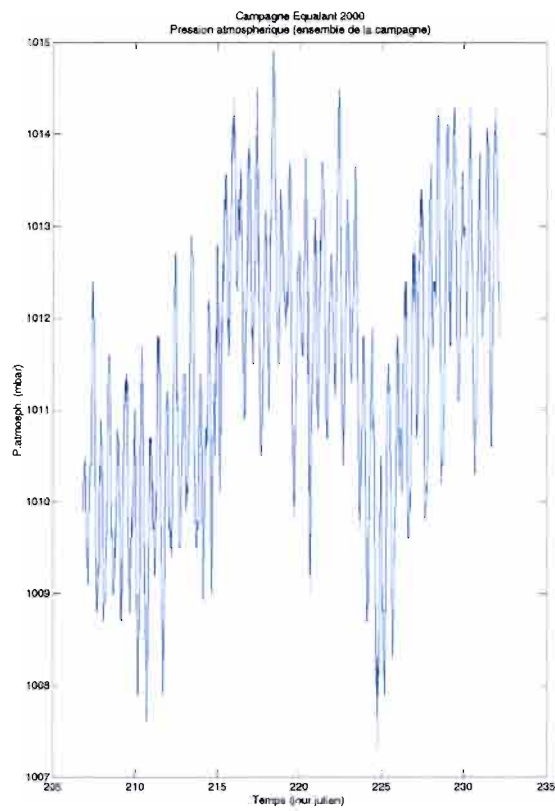


Figure 8 : Radiation solaire incidente (mW/cm²).

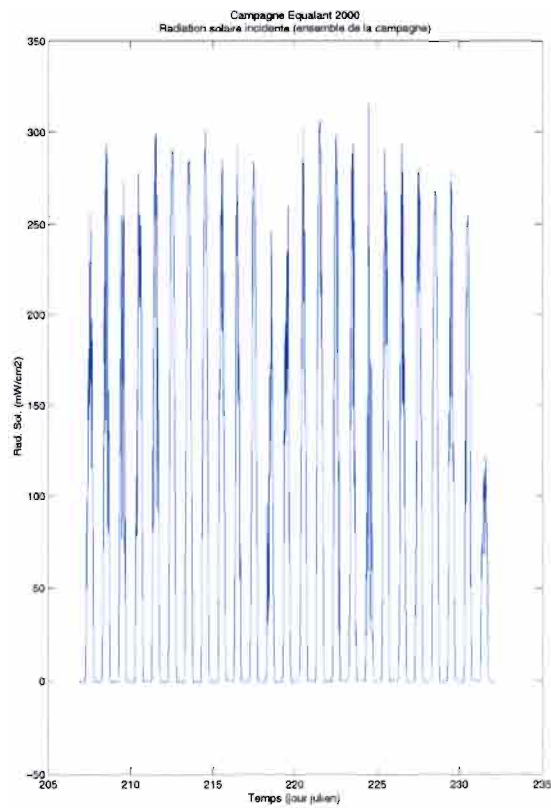


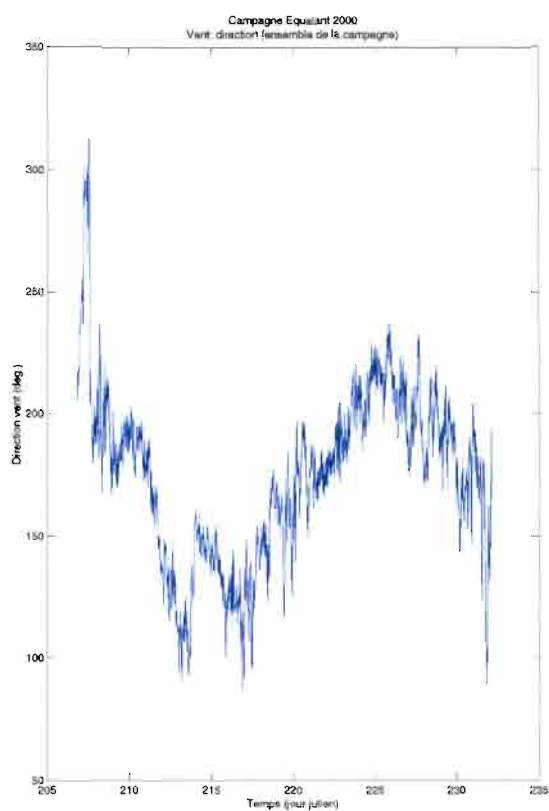
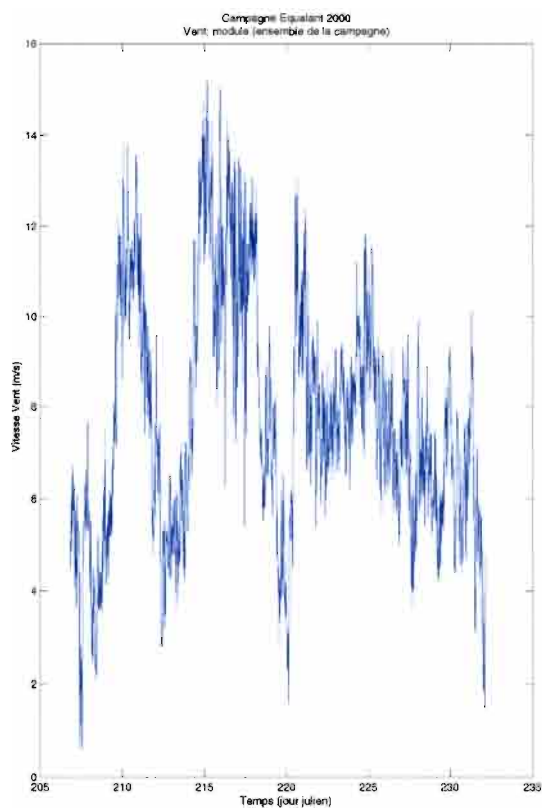
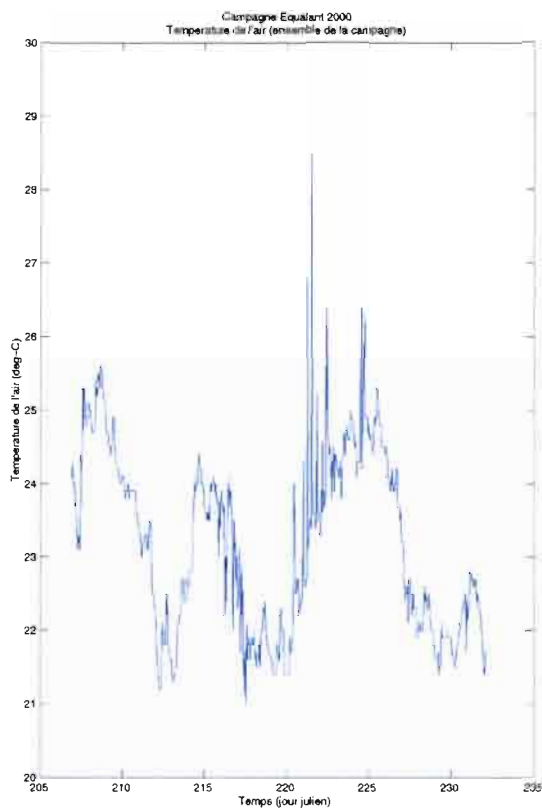
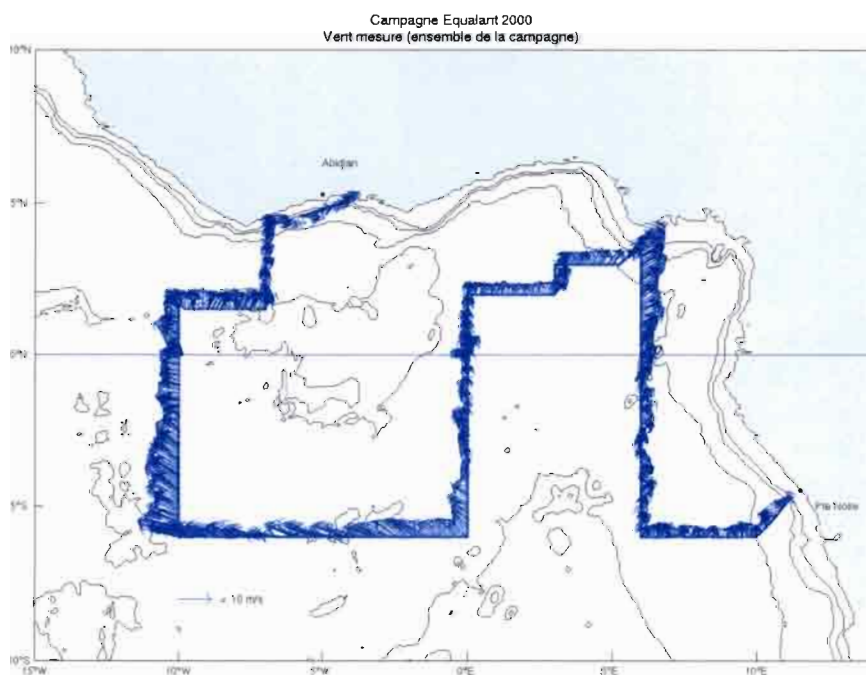
Figure 9 : Cap du vent (degrés).**Figure 10 :** Module du vent (m/s).

Figure 11 : Température de l'air (°C).**Figure 12 : Vecteurs du vent mesuré.**

Bouées dérivantes

Yves duPenhoat (LEGOS, Toulouse) et Bernard Boulès (Centre IRD de Bretagne)

Seize bouées dérivantes de surface ont été déployées au cours de la campagne (voir tableau ci-après). Elles possèdent une ancre flottante centrée à 15 mètres de profondeur et suivent donc les courants de la couche de surface. Elles sont équipées d'un capteur qui mesure la température océanique à 1 m de profondeur. Les données des capteurs sont envoyées au satellite qui positionne la bouée et retransmet les informations au Service ARGOS. Les bouées dérivantes donnent des séries temporelles lagrangiennes avec une résolution temporelle tous les 3 jours.

Les bouées dérivantes ont été fournies par l'AOML (Atlantic Oceanographic and Meteorologic Laboratory de la NOAA-Miami) dans le cadre du Global Drifter Program du GOOS (Global Ocean Observing System; P.I. Dr R.L. Molinari).

Les informations relatives à ce programme peuvent être obtenues sur le site: www.aoml.noaa.gov/phod/dac/gdc.html.

N° bouée	N° WMO	Mise à l'eau			Fin des enregistrements			Perte de drogue le	Code fin de vie
		Date	Latitude	Longitude	Date	Latitude	Longitude		
18827	13906	28/07/00	1°52,20 N	7°00,03 W	06/03/01	6°25,8 N	3°43,8 E	0/0/0	2
18826	13907	31/07/00	0°59,34N	10°01,55 W	31/05/01	6°40,2 S	12°17,4 W	15/12/00	0
19091	15912	31/07/00	0°00,449 N	9°59,791 W	15/12/00	5°52,2 N	4°34,2 E	15/12/00	2
19032	13909	01/08/00	1°00,508 S	9°59,868W	06/11/00	6°32,4 S	32°12,6 W	06/11/00	3
19082	15505	02/08/00	2°01,538 S	10°00,289 W	31/05/01	16°58,2 N	60°36,6 W	19/03/01	0
19035	31500	02/08/00	3°01,022 S	10°00,368 W	16/11/00	2°20,4 S	39°39 W	16/11/00	1
19112	15612	03/08/00	4°01,21 S	10°00,129W	10/01/01	0°00,6 N	44°45 W	10/01/01	3
18825	15613	03/08/00	5°00,715 S	9°59,52 W	14/03/01	7°01,8 S	34°30,6 W	14/03/01	2
18994	15614	03/08/00	5°30,227 S	9°59,674 W	16/04/01	13°25,2 S	21°10,2 W	16/04/01	3
19114	15506	07/08/00	2°41,13 S	0°00,0 E	31/05/01	9°48,6 S	25°39,6 W	0/0/0	0
19113	15615	07/08/00	1°19,15 S	0°00,1 W	31/05/01	8°24,6 S	29°21,6 W	0/0/0	0
18824	13911	09/08/00	0°00,3 N	0°00,04 W	31/05/01	11°25,2 S	35°31,2 W	0/0/0	0
18995	13913	10/08/00	1°30,3 N	0°00,2 E	04/12/00	2°46,8 N	20°28,8 W	25/11/00	3
19037	15911	15/08/00	3°00,834 S	5°59,99 E	18/02/01	2°10,2 N	1°01,2 W	07/01/01	1
19090	15912	17/08/00	6°00,08 S	6°03°66 E	06/05/01	7°40,8 S	13°47,4 W	0/0/0	3
19030	15913	18/08/00	5°59,88 S	8°00,65 E	31/05/01	13°49,8 S	14°,14,4 W	0/0/0	0

Codes :

1= Bouée échouée ; 2= Bouée récupérée par un navire ; 3 = Arrêt de transmission ;
0/0/0 comme date de perte de drogue signifie que la drogue est toujours présente ;
Mis à jour jusqu'au 31/05/2001. A cette date, 6 bouées dérivantes fonctionnaient encore.

Les trajectoires des bouées dérivantes de la date de déploiement lors de la campagne Equalant 2000 jusqu'au 31 mai 2001 (ou jusqu'à leur date de fin de transmission) sont représentées sur les Figures 1,2 et 3. L'échelle de couleur indique la température de surface mesurée par la bouée le long de sa trajectoire.

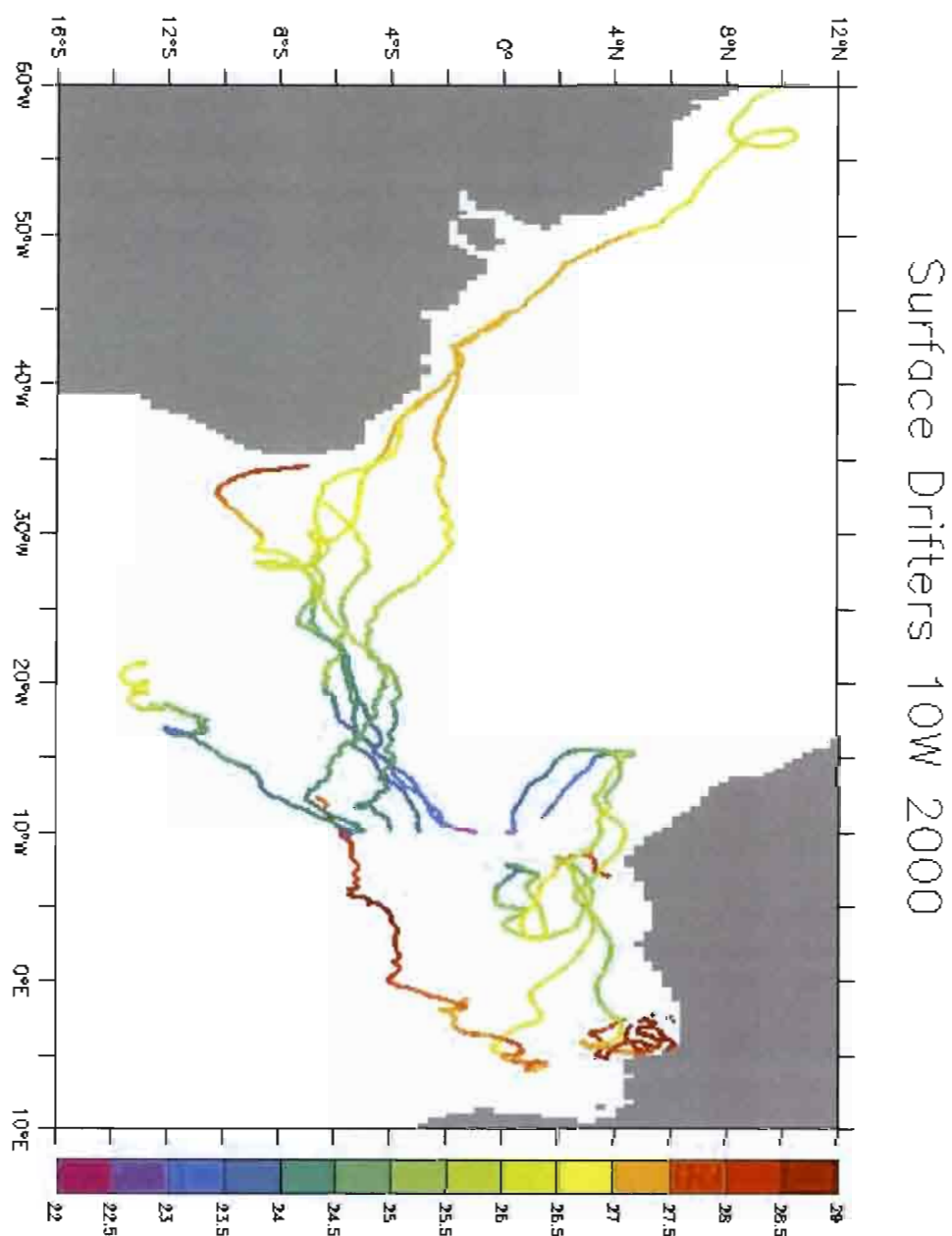


Figure 1 : Trajectoires des bouées dérivantes déployées le long de 10°W lors de la campagne Equalant 2000, jusqu'au 31 mai 2001. L'échelle de couleur indique la température de surface mesurée par la bouée le long de sa trajectoire.

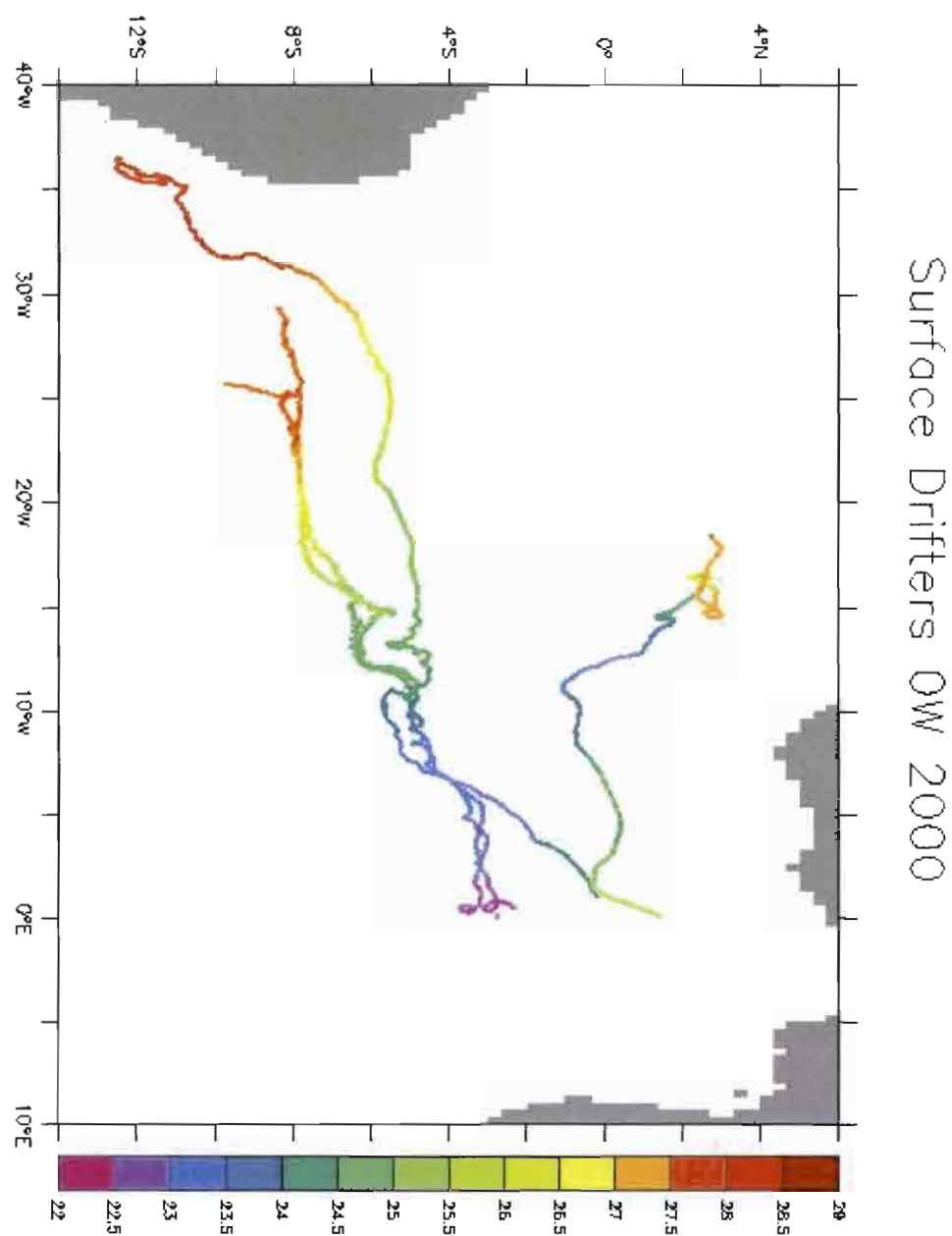


Figure 2 : Trajectoires des bouées dérivantes déployées le long de 0°W lors de la campagne Equalant 2000, jusqu'au 31 mai 2001. L'échelle de couleur indique la température de surface mesurée par la bouée le long de sa trajectoire.

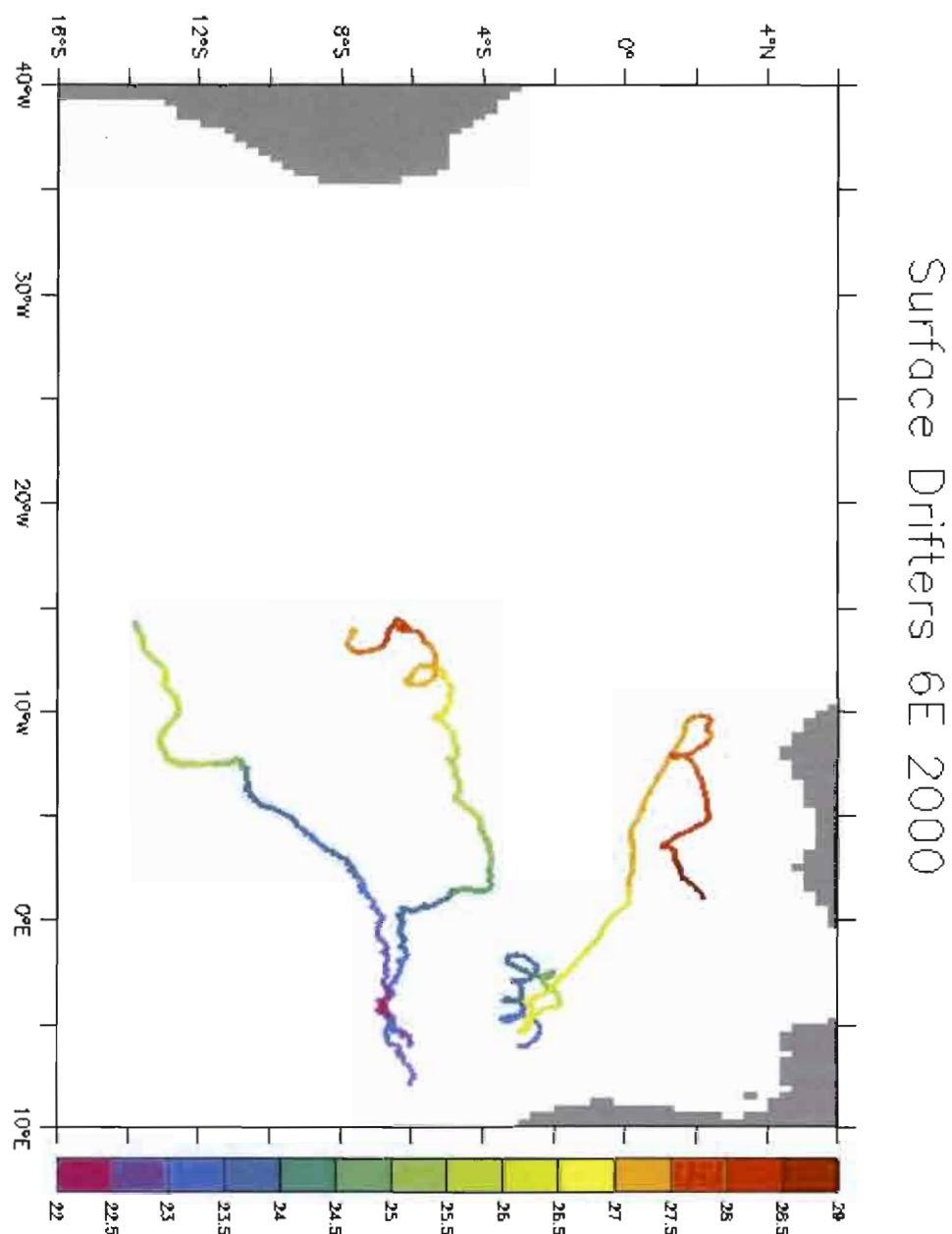


Figure 3 : Trajectoires des bouées dérivantes déployées le long de 6°E lors de la campagne Equalant 2000, jusqu'au 31 mai 2001. L'échelle de couleur indique la température de surface mesurée par la bouée le long de sa trajectoire.

EXPERIENCE DE TIRS XBT ET XCTD LORS DE LA CAMPAGNE EQUALANT2000

Sabine ARNAULT (IRD/LODYC)

Participants: A. AMAN, B. BOURLES, R. CHUCHLA, B. DEWITTE, Y. DU PENHOAT, G. ELDIN, F. GALLOIS, G. KOUADIO, S. FREUDENTHAL, B. LE VU, A. PAULMIER

1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES DE L'OPERATION

Lors de la campagne EQUALANT2000 en Atlantique tropical, du 25 juillet au 21 août 2000, une expérience de lâchers de sondes jetables XBT (Expendable Bathythermograph) et XCTD (Expendable Conductivity Temperature Depth) a été menée, d'une façon similaire à l'expérience 99.

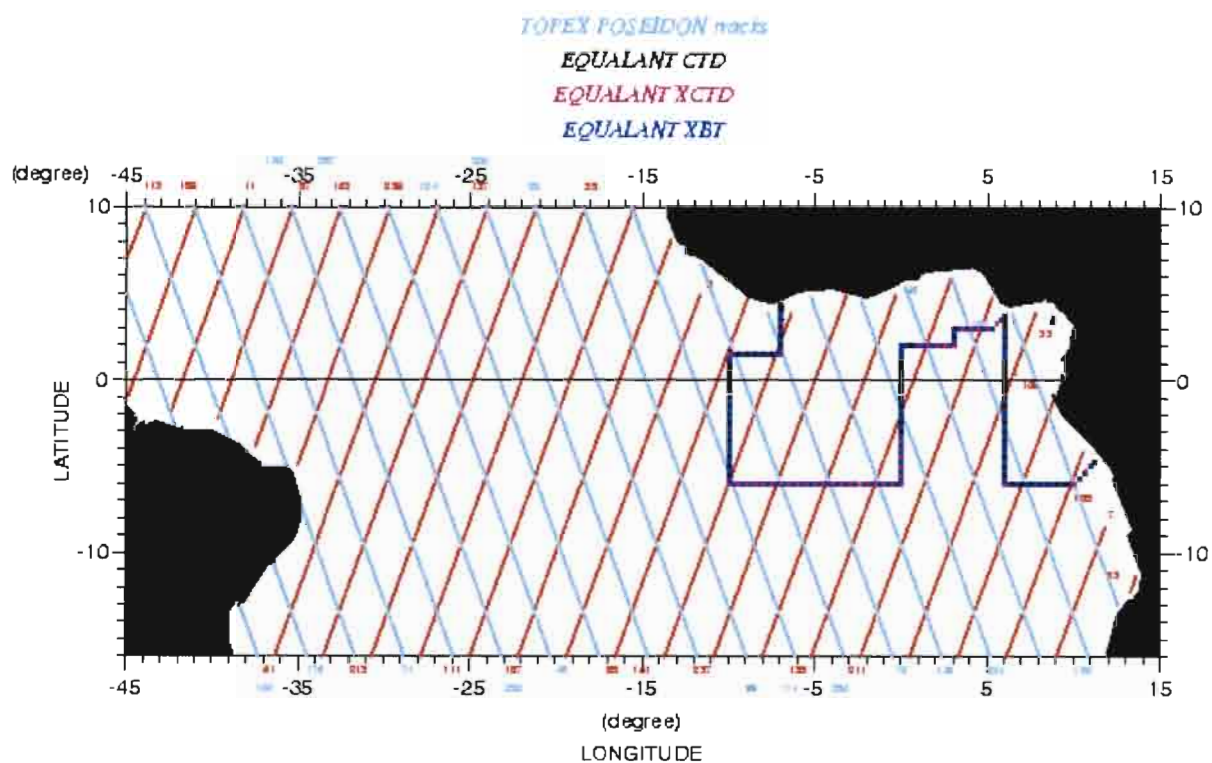
Outre de tester la faisabilité d'une acquisition réaliste d'information sur la salinité 0-1000m en "routine", les buts de ces opérations sur le plan "scientifique" sont de:

- Diagnostiquer lors de la campagne la circulation géostrophique méridienne à 2°N et 6°S (Région du Courant Equatorial Sud).
- Comparer cette circulation avec la circulation donnée par Vessel-Mounted ADCP et la circulation géostrophique de surface déduite de l'altimétrie satellitale TOPEX/POSEIDON.
- Suivre l'évolution des masses d'eaux 0-1000m le long des radiales 10°W, 0°E, 6°E et des transections 2°N et 6°S.
- Aider à l'interprétation des résultats de modèles de circulation océanique.

2. DEROULEMENT DE L'OPERATION

93 XBT (type "Deep Blue Sippican" 0-760m et 44 XCTD (type "CT01 Sippican" 0-1000m, financement Programme National Etude de la Dynamique du Climat 1999-2000) ont été lancées lors d'EQUALANT2000.

La figure et le tableau suivants donnent la localisation des tirs en comparaison avec les positions des stations bathysonde.



CTD	XBT	XCT	LAT	LON	DATE	Etat	Remarque
0			4,22	46,20	25/07 11h		
1			4,20	-7,02	26/07		
	T10-0		4,20	-7,00	26/07	0,65-200m	
2			4,16	-6,59	26/07		
3			4,09	-7,00	26/07		
4			4,00	-6,59	27/07		
	1		3,45	-7,00	27/07	0,65-760m	
5			3,30	-6,59	27/07		
	2		3,15	-7,00	27/07	0,65-760m	
6			3,00	-7,00	27/07		
	3		2,45	-7,00	27/07	0,65-760m	
7			2,30	-7,00	27/07		
	4		2,15	-7,00	28/07	0,65-760m	
8			2,00	-7,00	28/07		
	5		1,45	-7,00	28/07	0,65-760m	
9			1,30	-7,00	28/07		
		0	1,30	-7,00		perdue	
	6		1,30	-7,15	28/07	0,65-760m	
10			1,30	-7,30	28/07		
	7		1,30	-7,45	29/07	0,65-760m	
11			1,30	-8,00	29/07		
	8		1,30	-8,15	29/07	0,65-760m	
12			1,30	-8,30	29/07		
	9		1,30	-8,45	29/07	0,65-760m	
13			1,30	-9,00	29/07		
	10		1,30	-9,15	29/07	0,65-760m	
14			1,30	-9,30	29/07		
	11		1,30	-9,45	30/07	0,65-760m	
15			1,38	-9,58	30/07		
16			1,30	-10,00	30/07		

		12	1,30	-10,00	30/07	13-999m	
	T10-12		1,15	-10,00	30/07	0,7-200m	Indic. Date pos.
	13		1,12	-10,00	30/07	0,65-760m	
17			1,00	-10,00	30/07		
18			0,40	-10,00	31/07		
19			0,20	-10,00	31/07		
20			0,00	-10,00	31/07		
21			-0,20	-10,00	31/07		
22			-0,40	-10,00	01/08		
23			-1,00	-10,00	01/08		
	14		-1,15	-10,00	01/08	0,65-760m	
24			-1,30	-10,00	01/08		
	15		-1,45	-10,00	01/08	0,65-760m	
25			-2,00	-10,00	01/08		
	16		-2,15	-10,00	02/08	0,65-760m	
26			-2,30	-10,00	02/08		
	17		-2,47	-10,00	02/08	0,65-760m	
27			-3,00	-10,00	02/08		
	18		-3,15	-10,00	02/08	0,65-760m	
28			-3,30	-10,00	02/08		
	19		-3,45	-10,00	02/08	0,65-760m	
29			-4,00	-10,00	02/08		
	20		-4,15	-10,00	03/08	0,65-760m	
30			-4,30	-10,00	03/08		
	21		-4,45	-10,00	03/08	0,65-760m	
31			-5,00	-10,00	03/08		
	22		-5,15	-10,00	03/08	0,65-760m	
32			-5,30	-10,00	03/08		
	23		-5,45	-10,00	03/08	0,65-760m	
33			-6,00	-10,00	03/08		
	24		-6,00	-10,00	04/08	6-999m	
	25		-6,00	-9,45	04/08	0,65-760m	
34			-6,00	-9,30	04/08		
	26		-6,00	-9,30	04/08	9-999m	
	27		-6,00	-9,15	04/08	0,65-760m	
	28		-6,00	-9,00	04/08	7-952m	
	29		-6,00	-8,45	04/08	0,65-760m	
	30		-6,00	-8,30	04/08	3-940m	
	31		-6,00	-8,15	04/08	0,65-760m	
	32		-6,00	-8,00	04/08	8-930m	
	33		-6,00	-7,45	04/08	0,65-760m	
	34		-6,00	-7,30	04/08	17-945m	
	35		-6,00	-7,15	04/08	0,65-760m	
	36		-6,00	-7,00	04/08	8-950m	
	37		-6,00	-6,45	04/08	0,65-760m	
	38		-6,00	-6,30	04/08	15-940m	
	39		-6,00	-6,15	04/08	0,65-760m	
	40		-6,00	-6,00	05/08	4-930m	
	41		-6,00	-5,45	05/08	0,65-760m	
	42		-6,00	-5,30	05/08	3-915m	
	43		-6,00	-5,15	05/08	0,65-760m	
	44		-6,00	-5,00	05/08	10-890m	
	45		-6,00	-4,45	05/08	0,65-760m	
	46		-6,00	-4,28	05/08	4-938m	
	47		-6,00	-4,15	05/08	0,65-760m	
	48		-6,00	-3,59	05/08	3-947m	
	49		-6,00	-3,45	05/08	0,65-760m	
	50		-6,00	-3,29	05/08	4-918m	
	51		-6,00	-3,15	05/08	0,65-760m	
	52		-6,00	-3,00	05/08	12-934m	shifté de 10m ?
	53		-6,00	-2,45	05/08	0,65-760m	

		54	-6,00	-2,30	05/08	7-902m	
	55		-6,00	-2,12	05/08	0,65-760m	
		56a	-6,00	-2,00	05/08	perdue	
		56	-6,00	-1,57	05/08	2-887m	
	57		-6,00	-1,44	05/08	0,65-760m	
		58	-6,00	-1,30	05/08	11-924m	
	59		-6,00	-1,15	05/08	0,65-760m	
		60	-6,00	-1,00	06/08	11-904m	
	61		-6,00	-0,45	06/08	0,65-760m	
		62	-6,00	-0,30	06/08	10-903m	
	63		-6,00	-0,15	06/08	0,65-760m	
		64	-6,00	0,00	06/08	4-923m	
	65		-5,45	0,00	06/08	0,65-760m	
		66	-5,30	0,00	06/08	11-999m	shifté de 10 m ?
	67		-5,15	0,00	06/08	0,65-760m	
		68	-5,00	0,00	06/08	2-999m	
	69		-4,45	0,00	06/08	0,65-760m	
		70	-4,30	0,00	06/08	2-985m	
	71		-4,15	0,00	06/08	0,65-760m	
		72	-4,00	0,00	06/08	2-999m	
	73		-3,45	0,00	06/08	0,65-540m	
35			-3,30	0,00	06/08		
		74	-3,30	0,00	06/08	3-999m	
	75		-3,15	0,00	06/08	0,65-760m	
36			-3,00	0,00	06/08		
	76		-2,45	0,00	07/08	0,65-760m	
37			-2,30	0,00	07/08		
	77		-2,15	0,00	07/08	0,65-760m	
38			-2,00	0,00	07/08		
	78		-1,45	0,00	07/08	0,65-760m	Couche homog.
39			-1,30	0,00	07/08		
	79		-1,15	0,00	07/08	0,65-760m	
40			-1,00	0,00	07/08		
41			-0,40	0,00	08/08		
42			-0,20	0,00	08/08		
43			0,00	0,00	09/08		
44			0,20	0,00	09/08		
45			0,40	0,00	09/08		
46			1,00	0,00	09/08		
	80		1,15	0,00	10/08	0,65-760m	
47			1,30	0,00	10/08		
	81		1,45	0,00	10/08	0,65-760m	
48			2,00	0,00	10/08		
		82	2,00	0,00	10/08	4-999m	
	83		2,00	0,00	10/08	0,65-760m	
	84		2,00	0,14	10/08	0,65-760m	
49			2,00	0,30	10/08		
	85		2,00	0,45	10/08	0,65-760m	
		86	2,00	1,00	10/08	4-999m	
	87		2,00	1,15	10/08	0,65-760m	
		88	2,00	1,30	11/08	3-999m	
	89		2,00	1,45	11/08	0,65-760m	
		90	2,00	2,00	11/08	18-923m	
	91		2,00	2,15	11/08	0,65-760m	
		92	2,00	2,30	11/08	10-999m	
	93		2,00	2,45	11/08	0,65-760m	
50			2,00	3,00	11/08		
		94	2,00	3,00	11/08	4-999m	
	95		2,15	3,00	11/08	0,65-760m	
51			2,30	3,00	11/08		
	96		2,45	3,00	11/08	0,65-760m	

52			3,00	3,00	11/08		
	97		3,00	3,15	12/08	0,65-760m	
		98	3,00	3,30	12/08	23-969m	
	99		3,00	3,45	12/08	0,65-760m	
		100	3,00	4,00	12/08	8-946m	
	101		3,00	4,15	12/08	0,65-760m	
		102	3,00	4,30	12/08	7-968m	
	103		3,00	4,45	12/08	0,65-760m	
		104	3,00	5,00	12/08	10-945m	
	105		3,00	5,15	12/08	0,65-760m	
		106	3,15	5,30	12/08	2-999m	
		107	3,30	5,45	12/08	2-999m	
	108		3,30	5,45	12/08	0,65-760m	
53			3,45	6,00	12/08		
54			3,30	6,00	12/08		
55			3,15	6,00	12/08		
56			3,00	6,00	13/08		
	109		2,45	6,00	13/08	0,65-760m	
57			2,30	6,00	13/08		
	110		2,15	6,00	13/08	0,65-760m	
58			2,00	6,00	13/08		
	111		1,45	6,00	13/08	0,65-760m	
59			1,30	6,00	13/08		
	112		1,15	6,00	13/08	0,65-760m	
60			1,00	6,00	13/08		
61			0,40	6,00	14/08		
62			0,20	6,00	14/08		
63			0,00	6,00	14/08		
64			-0,20	6,00	14/08		
65			-0,40	6,00	14/08		
66			-1,00	6,00	14/08		
	113		-1,15	6,00	15/08	0,65-760m	
67			-1,30	6,00	15/08		
	114		-1,45	6,00	15/08	0,65-760m	
68			-2,00	6,00	15/08		
	115		-2,15	6,00	15/08	0,65-760m	
69			-2,30	6,00	15/08		
	116		-2,45	6,00	15/08	0,65-760m	
70			-3,00	6,00	15/08		
	117		-3,15	6,00	16/08	0,65-760m	
71			-3,30	6,00	16/08		
	118		-3,45	6,00	16/08	0,65-760m	
72			-4,00	6,00	16/08		
	119		-4,15	6,00	16/08	0,65-760m	
73			-4,30	6,00	16/08		
	120		-4,45	6,00	16/08	0,65-760m	
74			-5,00	6,00	16/08		
	121		-5,15	6,00	17/08	0,65-760m	
75			-5,30	6,00	17/08		
	122		-5,45	6,00	17/08	0,65-760m	
76			-6,00	6,00	17/08		
		123	-6,00	6,00	17/08	4-999m	
	124		-6,00	6,15	17/08	0,65-760m	
77			-6,00	6,30	17/08		
	125		-6,00	6,45	17/08	0,65-760m	
78			-6,00	7,00	17/08		
	126		-6,00	7,15	18/08	0,65-760m	
79			-6,00	7,30	18/08		
	127		-6,00	7,45	18/08	0,65-760m	
80			-6,00	8,00	18/08		
	128		-6,00	8,15	18/08	0,65-760m	

81			-6,00	8,30	18/08		
	129		-6,00	8,45	18/08	0,65-119m	
82			-6,00	9,00	18/08		
	130		-6,00	9,15	19/08	0,65-760m	
83			-6,00	9,30	19/08		
	131		-6,00	9,45	19/08	0,65-760m	
84			-6,00	10,00	19/08		
		132	-6,00	10,00	19/08	3-999m	
85			-5,40	10,20	19/08		
	133		-5,40	10,20	19/08	0,65-760m	
86			-5,20	10,40	19/08		
		134	-5,16	10,42	19/08	4-998m	
87			-5,00	10,56	19/08		
	135		-5,00	10,56	20/08	0,65-760m	
88			-4,47	11,08	20/08		
89			-4,45	11,13	20/08		

Répartition temporelle et géographique des tirs XBT/XCTD et des stations lors de la campagne EQUALANT2000, et résultat des profils obtenus.

Les lâchers de sondes XBT ont été effectués de façon à renforcer l'acquisition de profils de température entre les stations bathysonde le long de 10°W, 0°E et 6°E. La résolution ainsi obtenue est d'environ 15'.

Les lâchers de sondes XCTD ont été effectués principalement le long des transits à 6°S et 2°N, en alternance avec les tirs XBT. La résolution finale est de 15'. Le choix de la position de lancers des XCTD par rapport aux XBT s'est fait de façon à assurer un maximum de couverture des points de croisement TOPEX/POSEIDON par les XCTD. 9 XCTD ont également été tirées à 10°W-1°30'N, 10°W-6°S, 9°30'W-6°S, 0°E-3°30'S, 0°E-2°N, 3°E-2°N, 6°E-6°S, 10°E-6°S, 10°40'E-5°20'S, dans un délai temporel minimum par rapport à des stations CTD (de 15 mn à quelques heures) pour fournir une inter-calibration sur les mesures.

Par rapport à la campagne EQUALANT99, le taux d'échec est moins élevé puisque seules 2 XCTD ont été perdues.

3. TRAITEMENT DES DONNEES

XBT

Les profils ou parties de profil douteux ont été éliminés visuellement. Les fichiers résultant sont au format "export" (.edf).

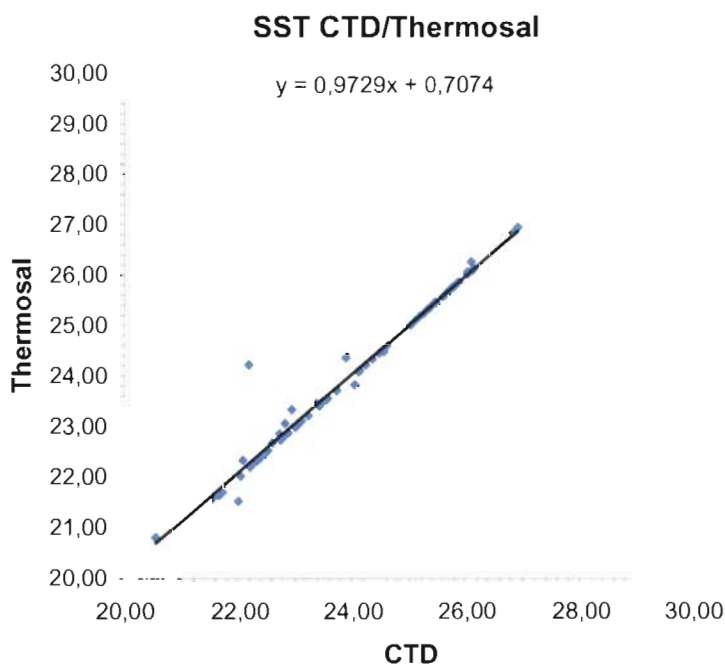
Ces profils ont été interpolés tous les mètres à partir de la surface (immersion 1m) jusqu'à 760m. Les fichiers résultant sont également au format "export" (.i.edf).

XCTD

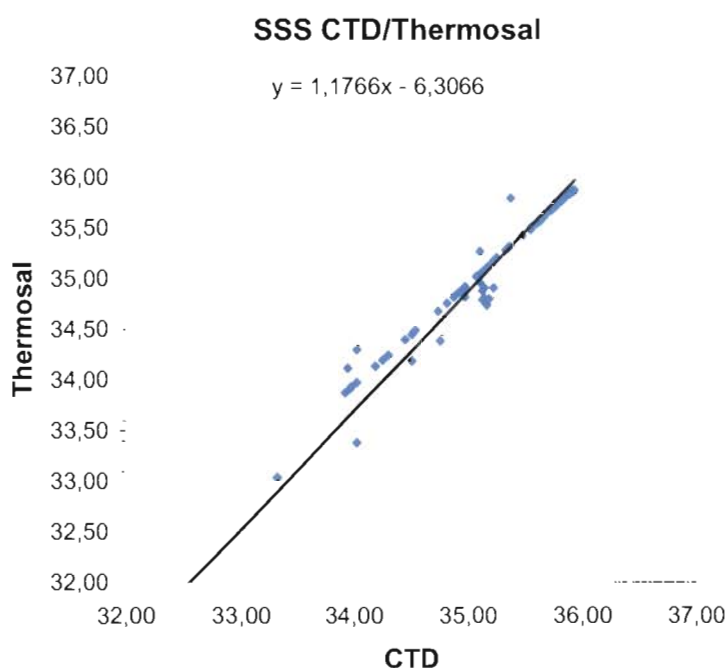
Les profils ou parties de profil douteux ont été éliminés visuellement. Les fichiers résultant sont au format "export" (.edf). Une deuxième validation visuelle a servi à éliminer certains "pics" ponctuels de salinité ou de données de surface aberrantes (fichiers .edf.2).

Le capteur de conductivité étant parfois plus lent à s'équilibrer (d'où une perte de signal sur les premiers mètres) que le capteur de température, l'indication des température et salinité de surface données par le thermosalinographe de bord au même instant temporel que l'acquisition XCTD a été systématiquement ajoutée en première ligne (0.0m) des fichiers "export" (.edf et .edf.2). Cette valeur peut ainsi au choix, être utilisée ou non.

En effet, les valeurs données par le thermosalinographe semblent un bon palliatif à ce manque d'information en surface. Les figures suivantes donnent les diagrammes de dispersion entre valeurs de température de surface (a) et de salinité de surface (b) échantillonnées lors des stations par les capteurs de la bathysonde, et par le thermosalinographe. A noter le biais systématique, en début de mission, entre les salinités CTD et thermosalino de 0.3 environ (les valeurs du thermosalinographe sont trop faibles ; voir le chapitre relatif aux mesures « navire », p.14), qui disparaît après nettoyage des capteurs du thermosalinographe à bord à partir du 29 juillet 2000, 17h (station CTD 14). Ce biais n'altère en rien les interpolations des XCTD qui ont toutes été tirées après le 29 juillet.



Température de Surface (SST) observée à partir du capteur de la bathysonde CTD ou du thermosalinographe de bord.



Salinité de Surface (SSS) observée à partir de la bathysonde CTD ou du thermosalinographe de bord.

Les profils validés ont été interpolés tous les mètres de profondeur, entre 0 et 999m. Deux interpolations ont été effectuées : en tenant compte de l'information thermosalinographe (.isal.edf, .isal.edf.2) ou non (.i.edf, .i.edf.2).

Enfin, les profils de salinité présentant un "bruit" de mesure (de l'ordre de 0.05), celui-ci peut être éliminé par un filtre de Hanning (.isal.edf.f, .isal.edf.2f).

4. COMPARAISON XCTD/XBT/CTD

Les 9 points concomittants XBT/XCTD ont été analysés avec les données de la bathysonde. Les tableaux ci-dessous résument en terme statistique ces comparaisons.

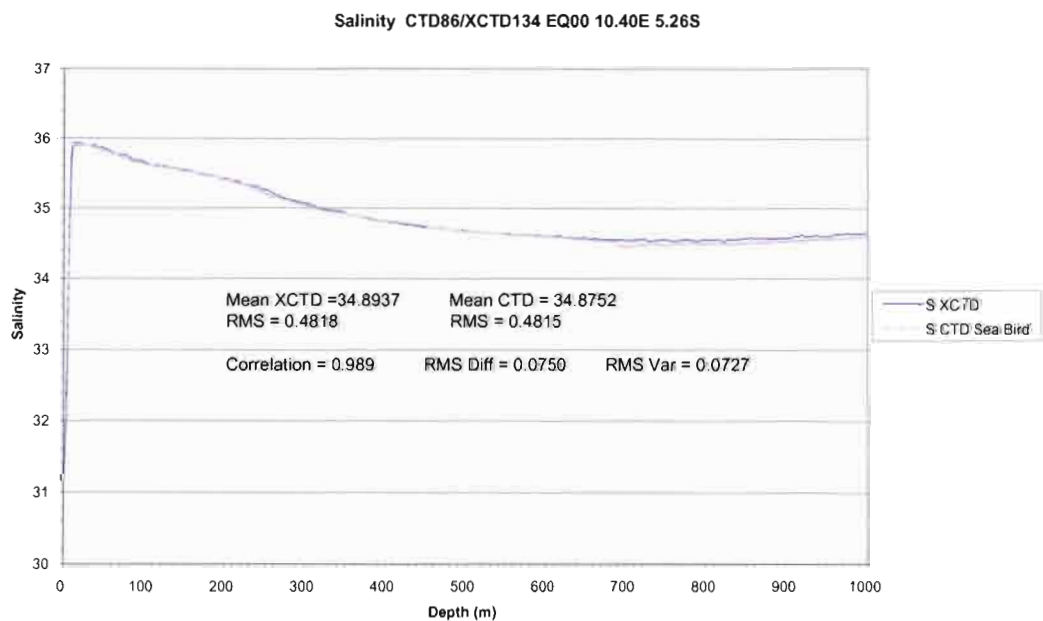
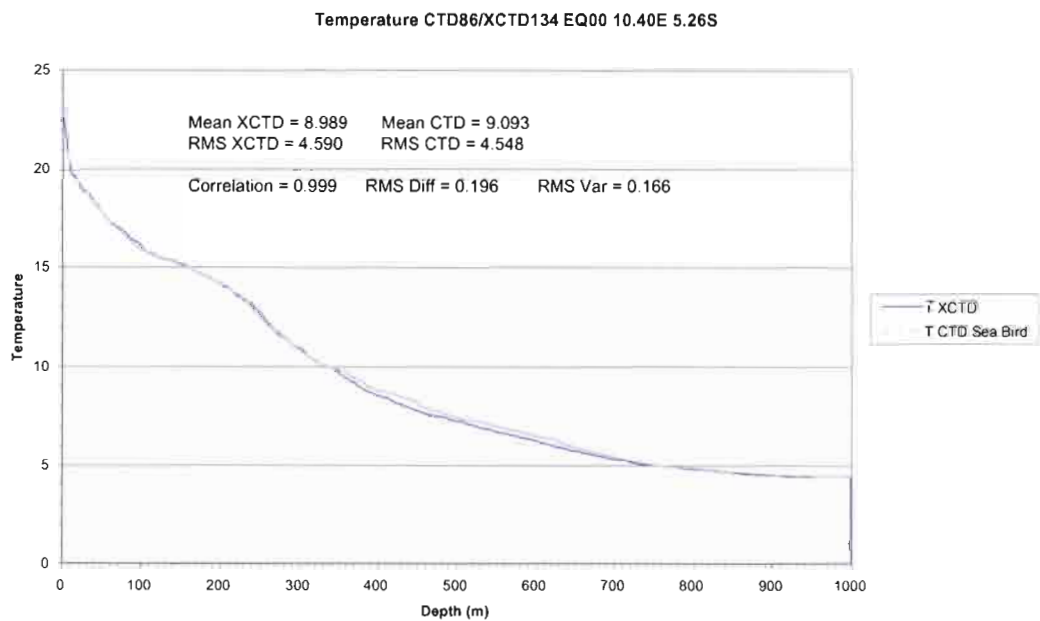
Températures

POSITION XCTD	XCTD Moy T (°C)	CTD Moy T (°C)	XCTD σ (T) (°C)	CTD σ (T) (°C)	Corrélation XCTD/CTD	Différence RMS XCTD/CTD
10°W-1°30'N	8.921	9.083	5.169	4.995	0.996	0.490
10°W-6°S	8.850	8.662	5.626	5.255	0.992	0.761
9°30W-6°S	8.626	8.811	5.349	5.322	0.999	0.178
0°E-3°30'S	8.605	8.558	4.483	4.163	0.994	0.583
0°E-2°N	9.216	9.249	5.383	5.326	0.999	0.173
3°E-2°N	9.451	9.506	5.424	5.228	0.997	0.435
6°E-6°S	8.630	8.642	4.494	4.441	0.998	0.276
10°E-6°S	8.891	9.006	4.508	4.525	1.	0.088
10°40E-5°26S	8.989	9.093	4.590	4.548	0.999	0.166

Salinités

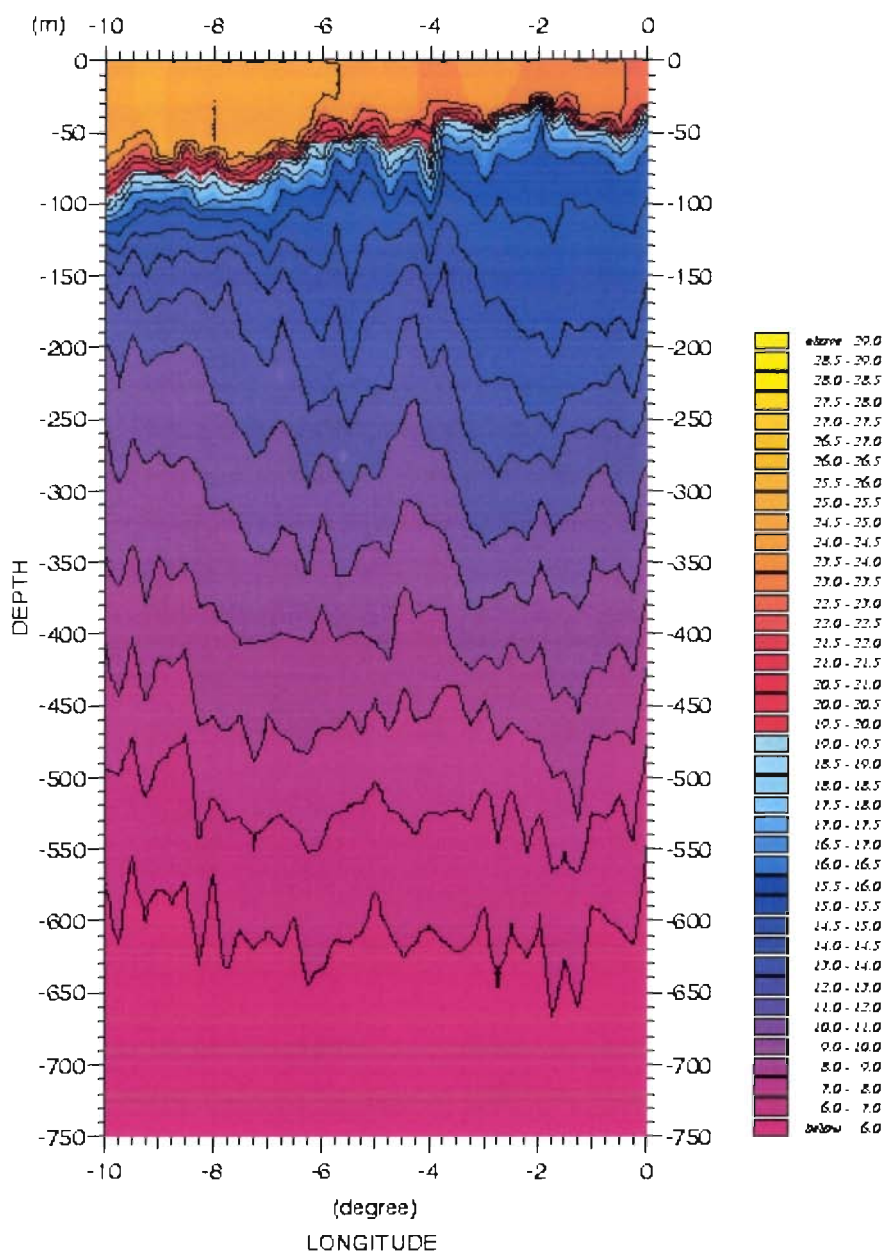
POSITION XCTD	XCTD Moy S	CTD Moy S	XCTD σ (S)	CTD σ (S)	Corrélation XCTD/CTD	Différence RMS XCTD/CTD
10°W-1°30'N	34.8598	34.8533	0.3889	0.3968	0.993	0.0478
10°W-6°S	34.8042	34.7954	0.4193	0.3939	0.986	0.0723
9°30'W-6°S	34.8050	34.8092	0.3971	0.3930	0.997	0.0280
0°E-3°30'S	34.8776	34.8384	0.4305	0.4195	0.997	0.0321
0°E-2°N	34.8786	34.8518	0.3892	0.3871	0.997	0.0300
3°E-2°N	34.9043	34.8858	0.4014	0.4007	0.992	0.0490
6°E-6°S	34.8695	34.8546	0.4071	0.4135	0.999	0.0196
10°E-6°S	34.9022	34.8833	0.4323	0.4376	0.997	0.0359
10°40'E-5°26'S	34.8937	34.8752	0.4818	0.4815	0.989	0.0727

Un exemple de ces comparaisons est donné sur les deux figures ci-dessous.

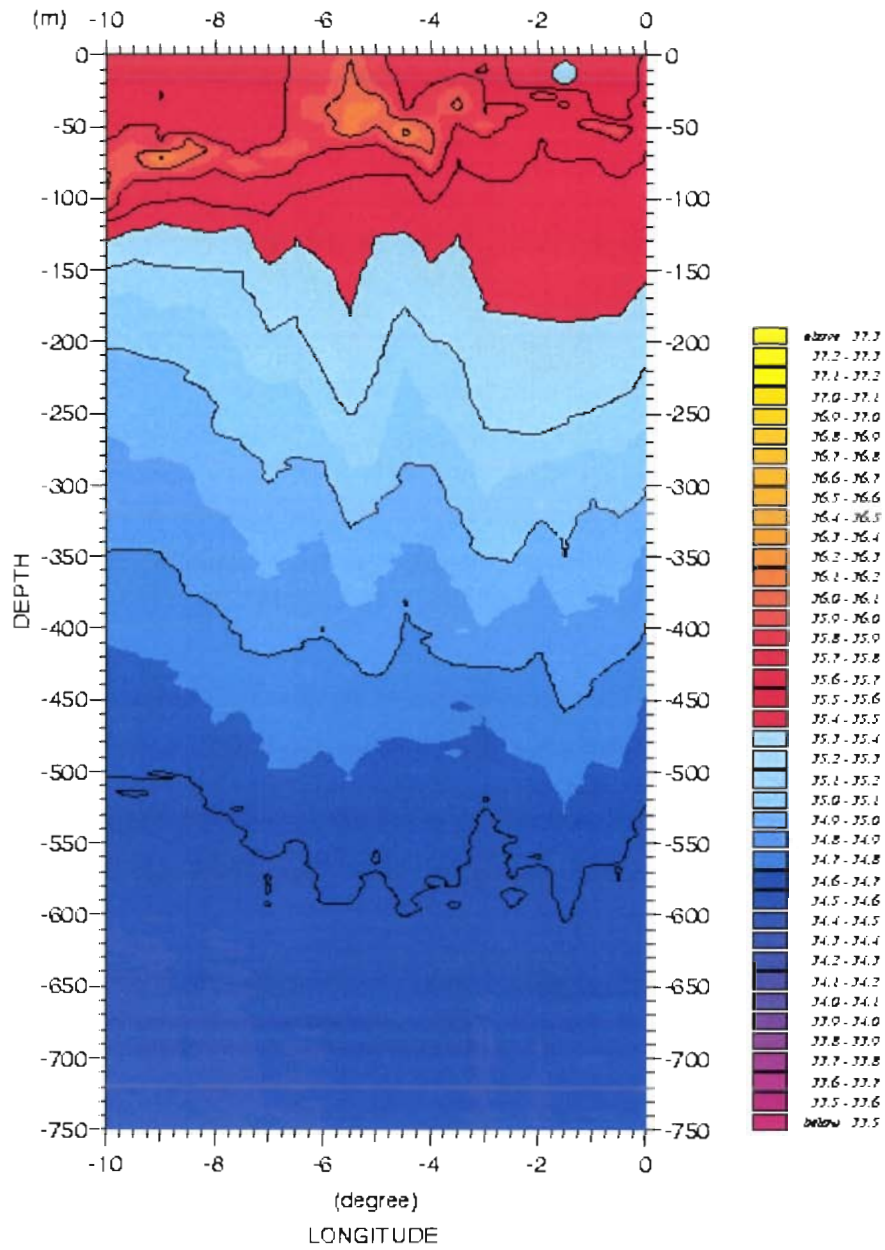


Les deux figures ci-dessous représentent les coupes de la température et de la salinité obtenues le long de 6°S, entre 10°W et 0°E, à partir des mesures des XBT/XCTD.

T EQUALANT00 6°S



S EQUALANT00 6°S



Mesures de courants par les profileurs à effet Doppler de coque (S-ADCP)

Gérard ELDIN (LEGOS, Toulouse)

1. Introduction.

Les mesures de courant dans les premières centaines de mètres de l'océan apportent des informations indispensables pour l'étude du transport d'Ekman, composante essentielle du transport de masse et de chaleur (*Hall and Bryden, 1982*), et permettent de décrire précisément la circulation océanique de surface associée à la variabilité climatique dans les tropiques. Pour cela, les profileurs à effet Doppler de coque procurent des profils de courant en continu le long de la route du navire. De plus, ces mesures permettent une intercomparaison avec les mesures du courant effectuées par le profileur Doppler installé sur la bathysonde (L-ADCP, voir chapitre correspondant).

2. Equipement.

Le N.O. Thalassa est équipé de deux S-ADCP fabriqués par la société RDI. Le modèle NB-75, de technologie « narrowband » à fréquence de 75 kHz, offre une portée élevée (~700m) à basse résolution (16 m). Le BB-150 (« broadband », 150 kHz) est à plus courte portée (~200-300 m), avec une résolution supérieure (~ 4-8 m). Pendant toute la durée de la campagne EQUALANT 2000, les deux appareils ont fonctionné simultanément. Les embases émetteur/récepteur sont placées dans des puits remplis d'eau douce, à une profondeur moyenne de 6 m sous la surface, isolées du milieu marin par des fenêtres acoustiques en fibre composite (Kevlar/epoxy). Les unités de pont sont interfacées au gyroscope « scientifique » du navire par liaisons synchro 1/1. Le récepteur GPS Sercel NR-103 de passerelle fournit aux PC d'acquisition des trames de navigation GPGLA par liaisons directes RS-232. Les données d'un récepteur GPS d'attitude Sercel NR-230 et d'une centrale d'attitude MRU sont enregistrées séparément sur le réseau du bord et seront utilisées pour le traitement *a posteriori*.

3. Acquisition.

L'acquisition pour chacun des appareils se fait sur un PC de classe Pentium 100, avec enregistrement des données sur disques réseau. Les configurations d'acquisition sont résumées dans le **Tableau 1**. Avant le départ de la campagne, les tests logiciels des ADCP ont été effectués avec succès.

L'acquisition s'est déroulée sans problème particulier ni interruption notable ; cependant, l'acquisition du BB150 a été suspendue le 05/08/2000 de 10 à 14h pour des essais logiciels. La dérive d'horloge interne des ADCPs a été vérifiée tous les deux jours et est restée négligeable. Les données de positionnement GPS ont aussi été obtenues sans interruption et stockées dans les fichiers « navigation » de Transect. Une différence notable par rapport à EQUALANT 99 a été la disponibilité depuis le 02/05/2000 du signal GPS en précision maximale (suppression du brouillage sélectif par les autorités états-uniennes). Des interruptions de plusieurs heures chaque jour ont été constatées dans l'acquisition des données du GPS d'attitude. En revanche la centrale d'attitude MRU a fonctionné sans interruption.

	NB-75	BB-150
Programme d'acquisition	Transect v. NB 1.82	Transect v. BB 3.04
Longueur de « bin »	16 m	4 m
Longueur de « pulse »	16 m	n/a
« Blanking interval »	8 m	4 m
Mode d'acquisition	n/a	7
Durée d'ensemble	300 s	300 s
Passage en coordonnées géographiques à chaque « ping »	oui	oui
Corrections roulis/tangage	non	non
Calcul vitesse du son à chaque « ping »	oui	oui
Prof. du premier « bin »	30 m	16 m
Premier profil	25/07/2000 19:39 TU	25/07/2000 19:39 TU
Dernier profil	20/08/2000 06:33 TU	20/08/2000 06:35 TU

Tableau 1 : Caractéristiques d'acquisition des ADCP de coque.

4. Traitement des données.

Le traitement est basé sur le logiciel CODAS-3 (Common Oceanographic Data Access System, version 3), développé à l'Université d'Hawaii (i.e. *Bahr et al.*, 1990). Une partie est effectuée à bord au fur et à mesure de l'acquisition. Après la campagne le traitement est repris et un étalonnage des appareils peut être fait. Les étapes sont identiques pour les deux ADCP :

4.1 Constitution d'une base de données

Les fichiers « processed » issus de Transect sont chargés dans une base de données au format CODAS. Au passage une correction de dérive d'horloge peut être appliquée, elle n'est pas nécessaire ici.

4.2 Vérification des profils relatifs

L' ADCP fournit des profils de vitesse de l'eau relative au navire. Avant de calculer les courants absolus, il convient de vérifier la qualité de ces profils.

La vitesse du son utilisée pour le calcul de l'effet Doppler dépend de la température mesurée au niveau de l'embase et de la valeur de salinité entrée dans le logiciel d'acquisition. Un tracé de cette température (**Figure 1**) permet de vérifier que les valeurs sont correctes.

Les profils peuvent être entachés de diverses erreurs provenant d'un niveau de bruit excessif ou de réflexions sur le fond ou des objets. Des tests statistiques sur les dérivées verticales des vitesses ou d'autres paramètres permettent de détecter, de visualiser et de corriger les profils s'écartant de la moyenne. Pour le NB-75 il arrive souvent que des réflexions sur les appareils mis à l'eau pendant les stations provoquent des pics erronés de

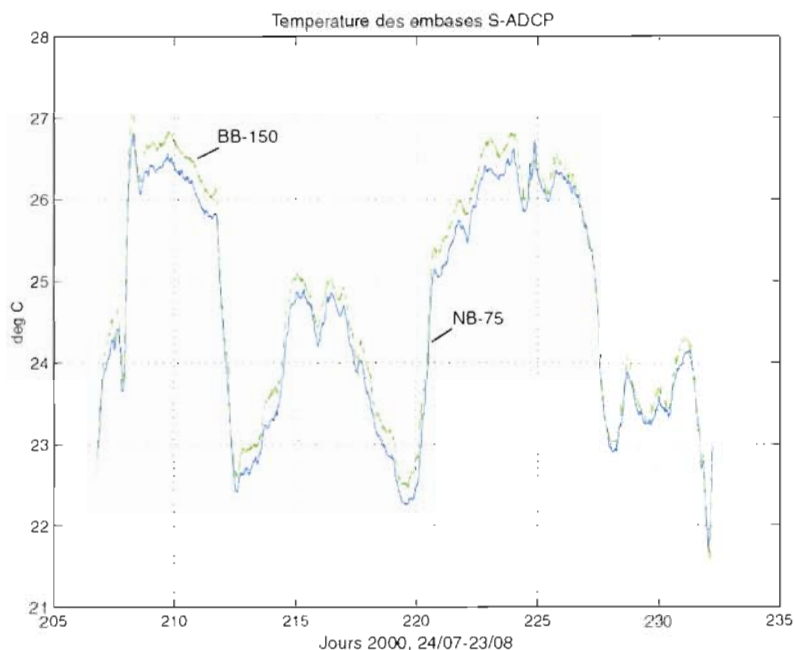


Figure 1 : Séries temporelles des températures des deux embases. Le léger décalage ($<0.5^\circ$) n'est pas significatif pour le calcul de la vitesse du son.

pour BB-150). Ce courant est filtré (filtre de Blackman de $\frac{1}{2}$ largeur 20 mn) et la vitesse du navire par rapport à cette couche lissée est stockée dans la base. Le courant absolu pourra être calculé à chaque niveau à partir de cette vitesse. Le GPS en pleine précision permet de diminuer l'erreur aléatoire sur la vitesse barotrope de chaque profil d'un facteur 5 environ par rapport à précédemment. Cette précision améliorée laisse apparaître des erreurs ponctuelles (liées aux accélérations/décélérations du navire) auparavant noyées dans le bruit GPS : celles dues à des dérives d'horloge de seulement quelques secondes, ou à la différence de position entre l'antenne GPS et l'embase ADCP. La **Figure 2** présente un exemple de ces erreurs et de leur correction sur les enregistrements du NB75.

4.4 Etalonnage

Outre les erreurs ponctuelles citées ci-dessus, deux types d'erreur systématiques interviennent dans le calcul des vitesses absolues de courant : l'erreur sur l'orientation horizontale de l'embase en coordonnées géographiques et l'erreur sur le module de la vitesse calculé par effet Doppler. L'erreur d'orientation provient de l'erreur sur les indications du gyrocompas (variable) et d'une éventuelle erreur sur l'orientation de l'embase au montage (fixe). L'erreur sur le module peut être associée à un problème d'électronique ou de calcul de l'effet Doppler (vitesse du son).

La partie variable de l'erreur d'orientation associée aux erreurs gyro est estimée par différence entre les caps gyro et les caps fournis par la centrale d'attitude MRU, moyennés sur la durée de chaque profil. Les données MRU ont été préférées ici à cause des nombreuses pertes d'acquisition du GPS d'attitude. La **Figure 3** présente cette différence pour le NB-75, brute et après filtrage médian et lissage : on constate une variation du gyro de l'ordre de 0.3° à chaque arrivée/départ de station, ou aux changements de route. Les valeurs lissées de cette différence sont utilisées pour effectuer une rotation de signe inverse de chaque profil relatif. Après cette correction il ne doit subsister théoriquement qu'une erreur d'orientation constante (angle résiduel entre l'axe de l'ADCP et la ligne de foi de la MRU).

vitesse, les « bins » correspondants sont supprimés. Le BB-150 est moins sensible à ce phénomène ; en revanche, il est par construction plus sensible à la qualité du signal, et certains profils doivent être supprimés pendant les accélérations du navire (variations du niveau de bruit et de l'écoulement autour de la coque).

4.3 Intégration de la navigation

Les positions GPS GPBGA enregistrées à la fin de chaque profil et les vitesses relatives ADCP permettent de calculer le courant absolu dans une couche de référence (100-300 m pour NB-75, 40-90 m

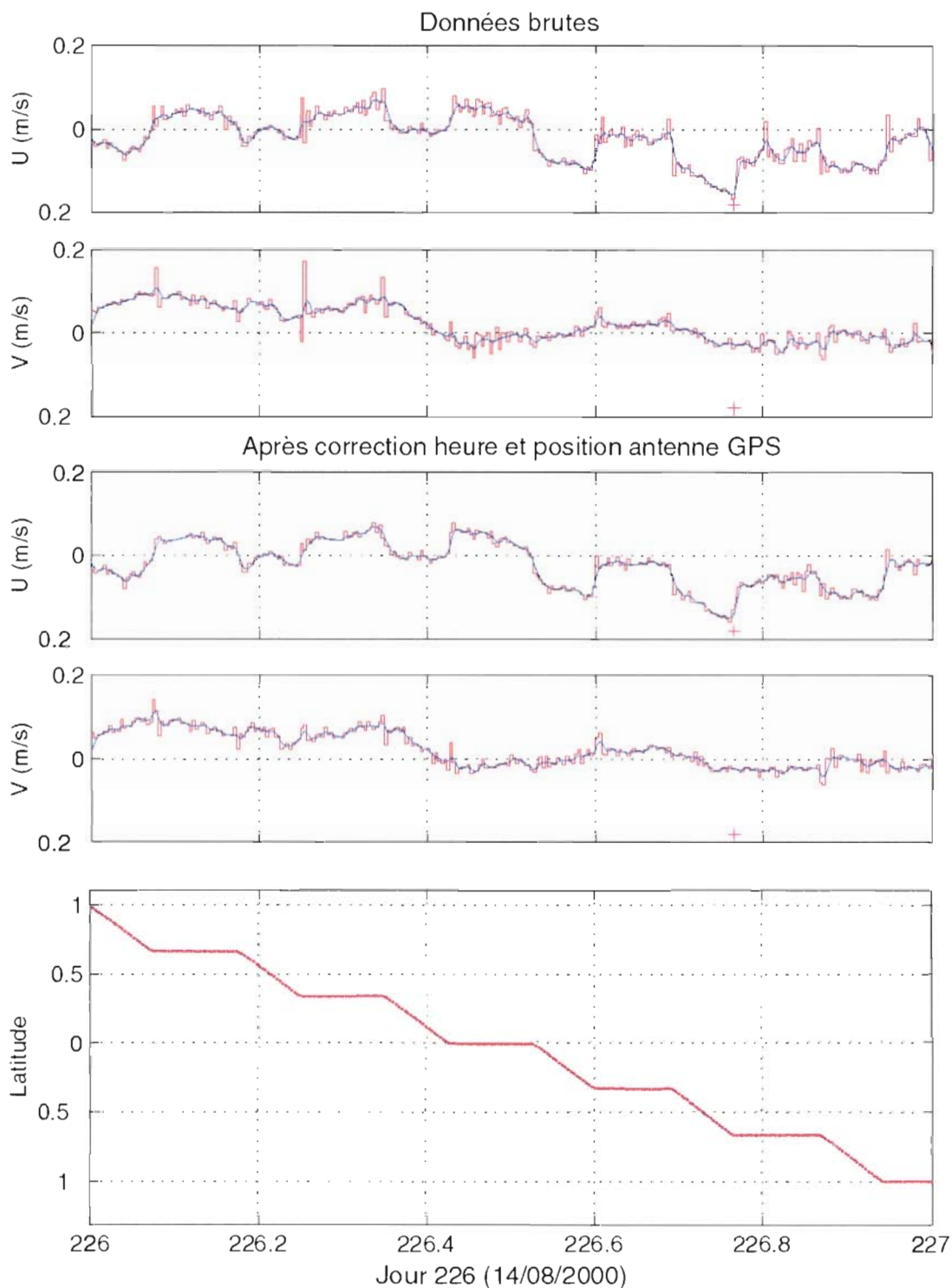


Figure 2 : Courant dans la couche 100-300m le long de 6°E, 1°N-1°S, NB-75, profils individuels et après lissage. Les corrections d'heure et de position d'antenne éliminent la plupart des pics associés aux accélérations du navire ou à ses changements d'allure. Les erreurs gyro et de module causent les décrochements à chaque station (voir § 4.4)

Il a été montré (*Pollard et Read, 1989*) que la comparaison des vitesses de courant absolu avant/après les changements importants de vitesse du navire (lors des arrivées et départs aux stations hydrologiques) permet une estimation statistique des deux erreurs et le calcul d'un angle de rotation ϕ et d'un facteur multiplicatif A à appliquer aux profils relatifs. Ce calcul est

fait pour les deux ADCP après correction des erreurs gyro et les valeurs sont données dans le **Tableau 2**. Les rotation et homothétie correspondantes sont appliquées aux profils relatifs et le calcul de navigation (§ 4.3) est de nouveau effectué.

	NB-75	BB-150
A	0.999	1.022
ϕ	-0.22°	+0.01°

Tableau 2 : Valeurs des coefficients d'étalonnage constants déterminés après correction des erreurs variables dues au gyro du navire.

Pour le NB-75, les valeurs sont très similaires à celles d'EQUALANT 99 (1.000 et -0.29). Pour le BB150, A est identique (1.022 aussi en 1999), mais ϕ est plus faible (+0.38 en 1999). La valeur élevée de A pour le BB-150, déjà relevée en 1999, se confirme. Son origine est pour l'instant indéterminée. La variation de ϕ en l'absence d'une manipulation de l'embase est anormale ; elle peut être due à une plus grande incertitude sur le calcul de cet angle due au niveau de bruit plus élevé dans les données du BB-150, par rapport au NB-75. La **Figure 4** présente les histogrammes des valeurs calculées de ϕ (179 au total) avant et après application de la correction d'erreur « gyro ». On constate une normalisation de la distribution après cette correction, donc une diminution des erreurs non-aléatoires dues aux variations du gyro.

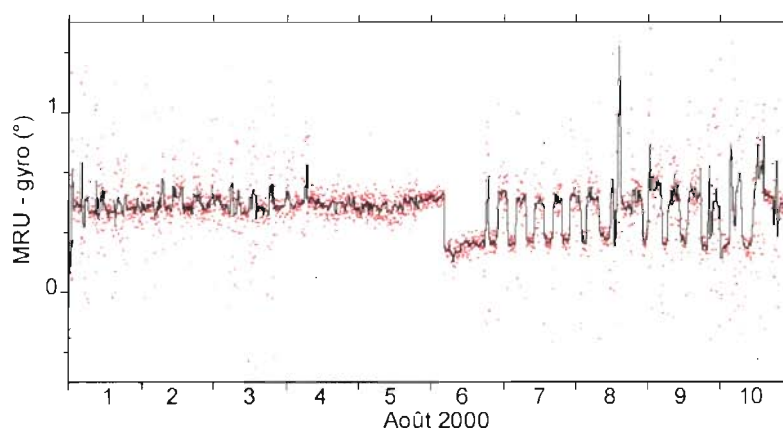


Figure 3 : Différence de cap MRU-gyro pendant 10 jours de la campagne, pour chaque profil (points) et après filtrage. On note la variation de 0.3° du gyro au début de la radiale à 0°E (06/08) et celles, du même ordre, à chaque station.

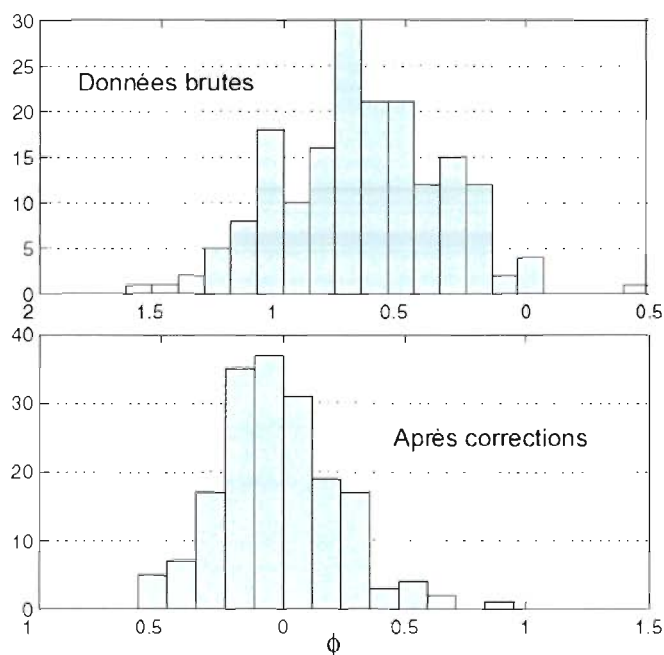


Figure 4 : Histogrammes de l'angle de correction d'orientation ϕ , avant et après correction gyro sur le NB-75. Après correction des erreurs variables du gyro l'histogramme se normalise.

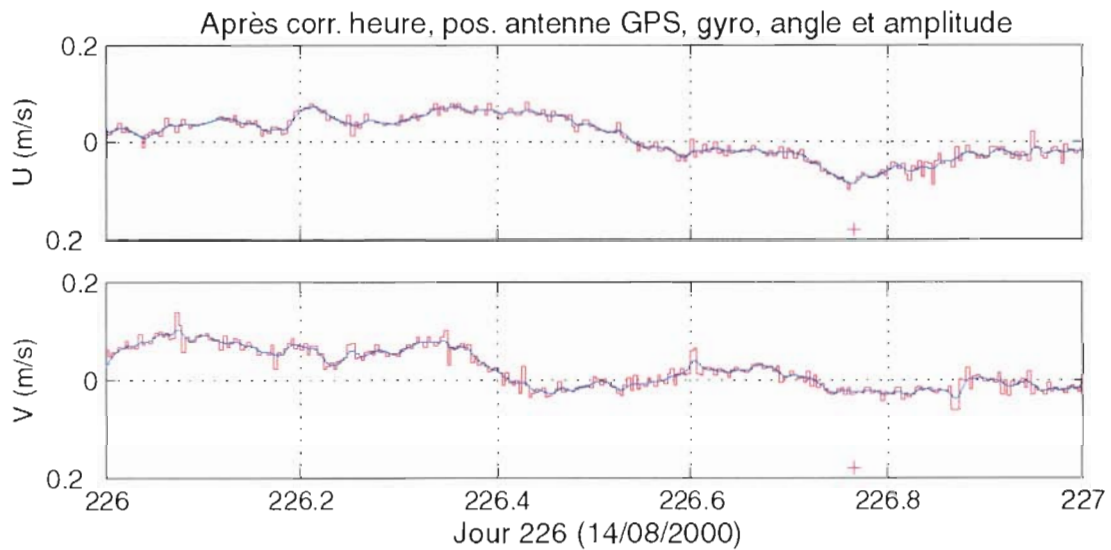


Figure 5 : Courant dans la couche de référence comme sur la Figure 2, après application de toutes les corrections. Il subsiste un bruit ponctuel qui est corrigé par le lissage sur 20 mn ;

La **Figure 5** montre le résultat final de toutes les corrections sur la couche de référence 100-300m, sur le NB-75, pour la même journée de mesures que sur la Figure 2.

4.5 Contrôle de qualité

Des statistiques sur les profils sont calculées pour estimer la qualité des données et avoir un suivi des performances de l'appareil. En particulier, les valeurs moyennes de l'intensité sonore et du pourcentage de bon « pings » en fonction de la profondeur (PGOOD) renseignent sur la portée utile des appareils (**Figure 6**). Pour le NB-75 les portées en route et en station sont de 620 et 720 m, respectivement (définies comme la profondeur où PGOOD = 30%). Pour le BB-150, le PGOOD n'est pas significatif à cause d'une erreur de configuration de Transect. Le profil d'amplitude montre cependant que le niveau de bruit (quand l'amplitude ne varie plus avec la distance) est atteint vers 200-250 m.

4.6 Comparaison des résultats des deux appareils

Une comparaison des profils moyens de vitesse sur l'ensemble des stations est effectuée (**Figure 7**). L'accord est bon, étant donnée la différence de résolution des deux appareils. Cependant, on constate un écartement systématique des courbes en dessous de 200 m, ainsi qu'une augmentation du bruit dans les mesures du BB-150. Pour cette raison, on déconseillera d'utiliser les données du BB-150 en dessous de 150 m.

5 . Produits.

Le logiciel CODAS permet d'obtenir des sections et séries temporelles pour tracés de coupes ou de vecteurs. En outre, des fichiers ASCII ont été constitués, comprenant pour les deux appareils :

- § Les profils individuels de U et V (soit un profil toutes les 5 minutes) sur l'ensemble de la campagne. Ce 'jeu' de profils est dense, mais utile pour étudier la variabilité à petite échelle et les structures fines aux abords des côtes.
- § Les moyennes et écart-type horaires des profils U et V (soit une moyenne sur 12 profils, à raison d'un profil acquis toutes les 5 minutes).
- § Les moyennes et écarts-type tous les $\frac{1}{4}$ de degré (de latitude ou de longitude selon la route du navire) des profils U et V.
- § Les moyennes et écarts-type à chaque station CTD des profils U et V (profils moyennés sur chaque palanquée).
- § Les moyennes et écarts-type entre chaque station CTD des profils U et V. Ces profils moyens sont utiles pour comparer avec les courants géostrophiques calculés entre deux stations CTD successives.

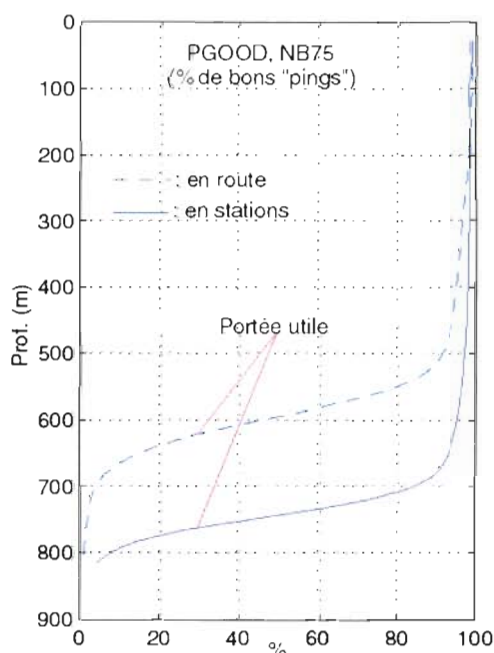


Figure 6 : Pourcentage moyen de « pings » valides par profil pour le NB75

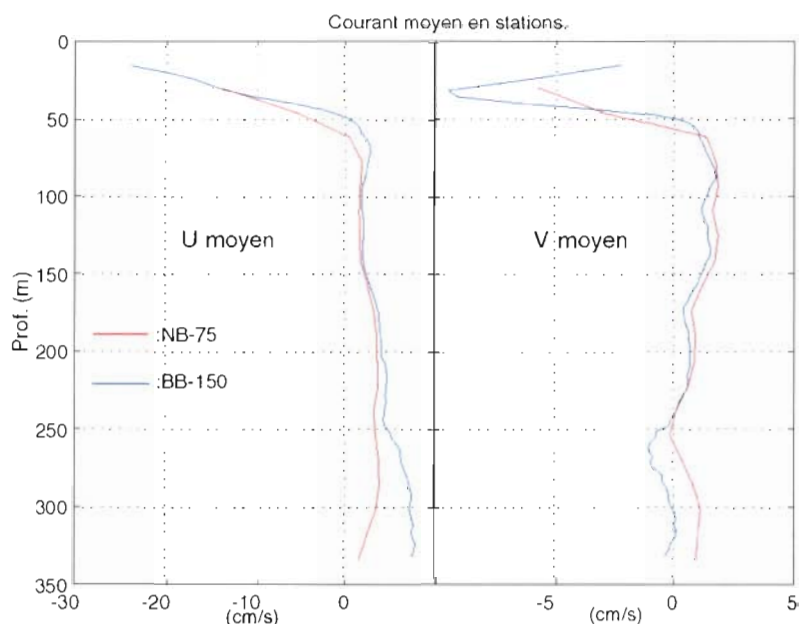


Figure 7 : Profil de courant moyen sur l'ensemble des stations, obtenu par le NB75 et le BB150. Au dessus de 200 m, l'accord entre les 2 appareils est meilleur que 5 cm/s.

§

6. Présentation graphique des résultats.

- Des coupes des distributions verticales des composantes de la vitesse zonale et méridienne sont présentées pour les 4 principales sections de la campagne :

de 5°N à 6°S, le long de 7°W et 10°W ;

de 6°S à 2°N, le long de 0°E ;

de 4°N à 6°S le long de 6°E ;

de 10°W à 12°E le long de 6°S.

Ces coupes sont présentées ont été établies à partir des mesures du BB-150 (pour la couche 16-150 m) et du NB-75 moyennées ensemble, tous les 0.20 degré en latitude ou longitude (1^{er} niveau à 17 m). Elles sont présentées dans les pages suivantes, sur 0-800 m et 0-300m pour une meilleure définition dans les couches de surface.

- Des vecteurs de courant horizontal, sur 8 niveaux de profondeur (données BB-150 et NB-75), moyennés tous les 0.25 degré de latitude ou de longitude sont présentés dans les pages suivantes, sur les couches 17-50m, 50-200m, 200-400m, 400-650m.

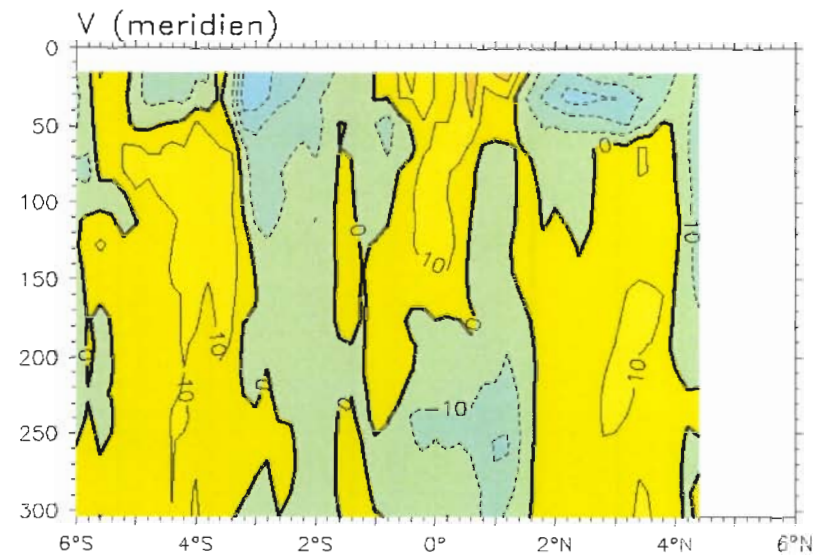
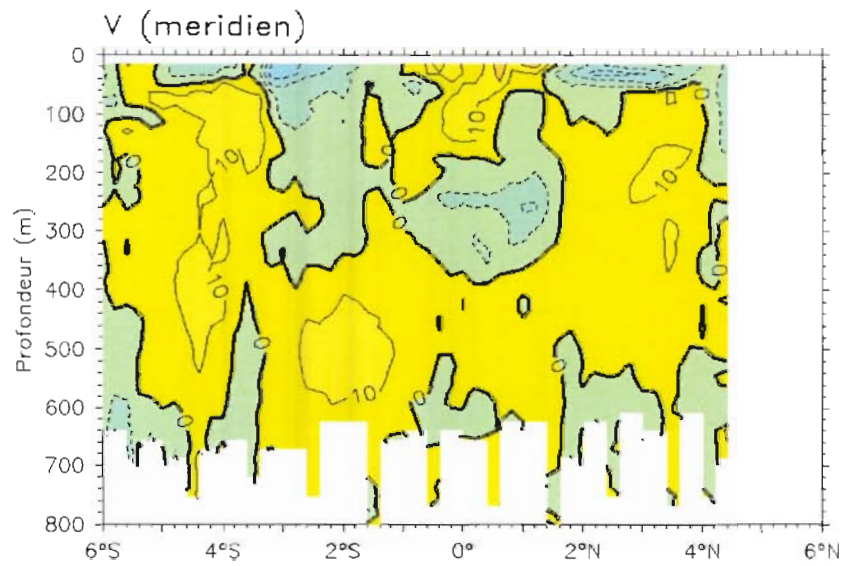
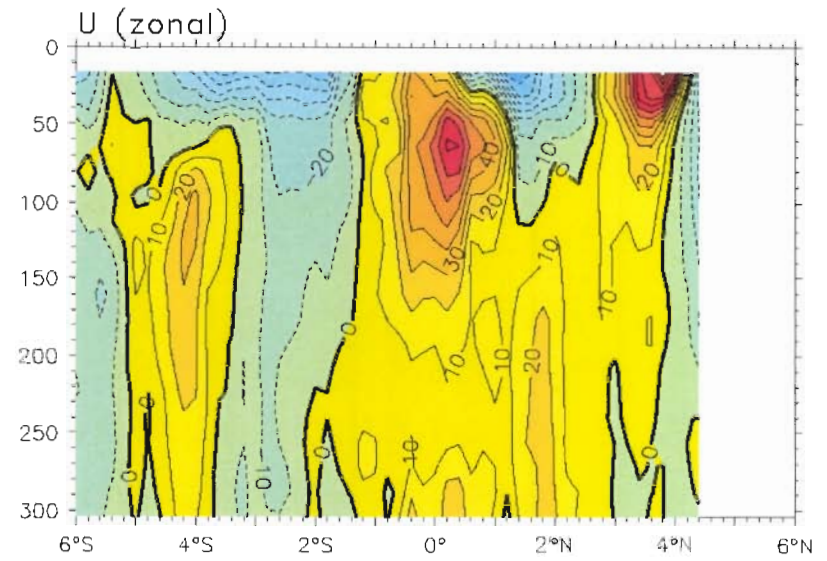
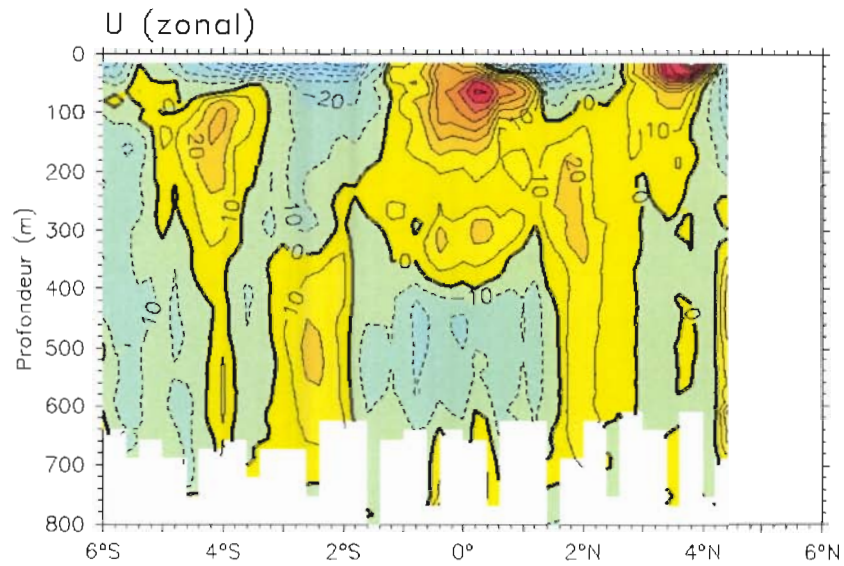
7 Références.

Bahr, F., E. Firing and S. Jiang, Acoustic Doppler current profiling in the western Pacific during the US-PRC TOGA Cruises 5 and 6, *JIMAR Contr.* 90-0228, *U. of Hawaii*, 162 pp., 1990.

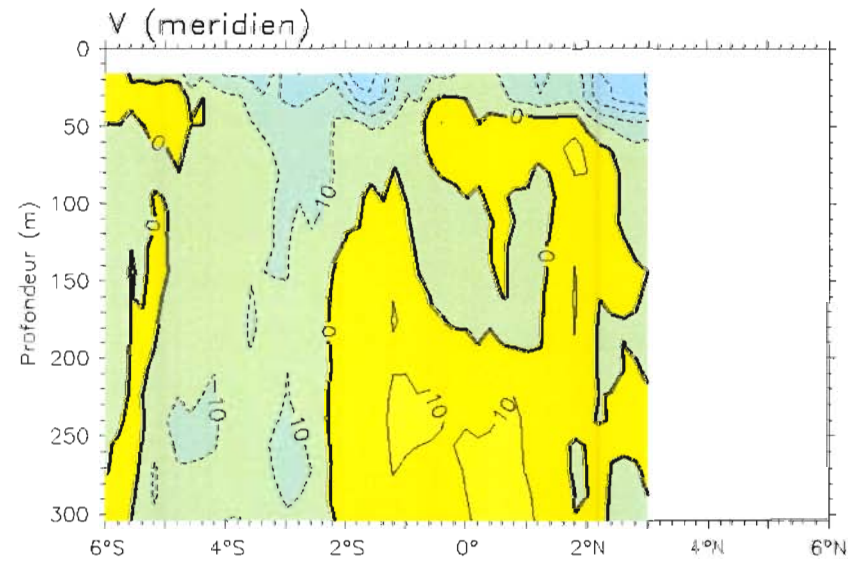
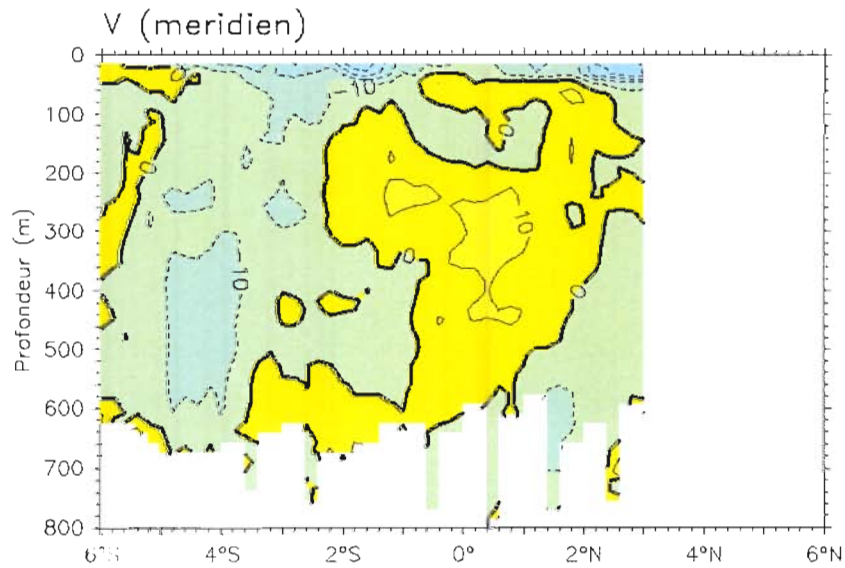
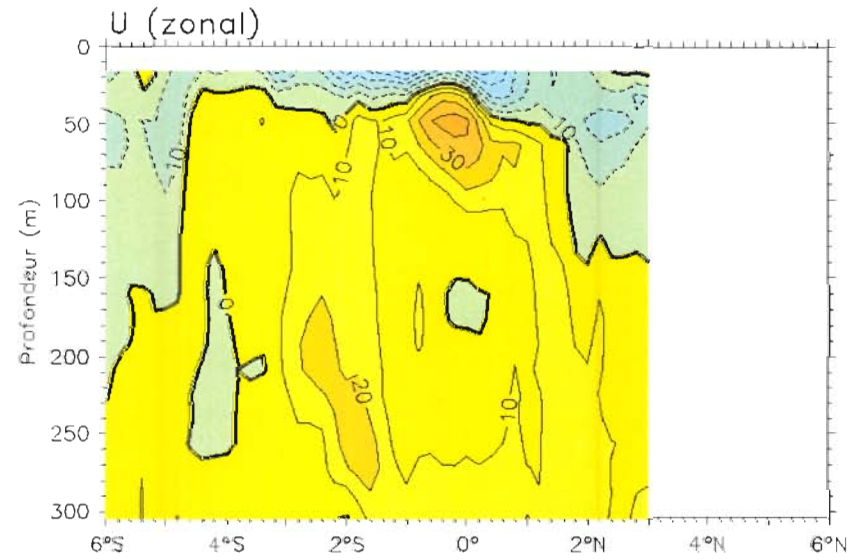
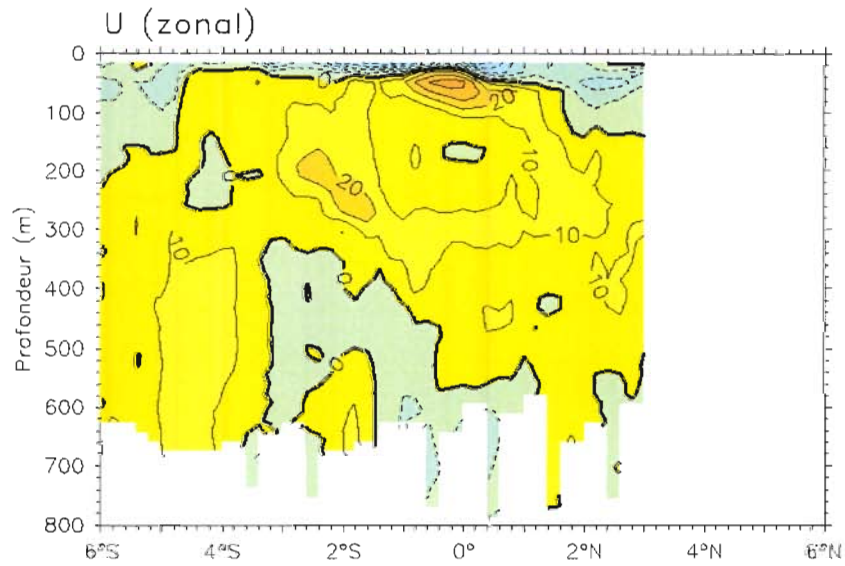
Hall M.M. and H.L. Bryden, Direct estimates and mechanisms of ocean heat transport, *Deep-Sea Res.*, 29, 339-359, 1982.

Pollard, R. and J. Read, A method for calibrating shipmounted acoustic Doppler profilers, and the limitations of gyro compasses, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 6, 859-865, 1989.

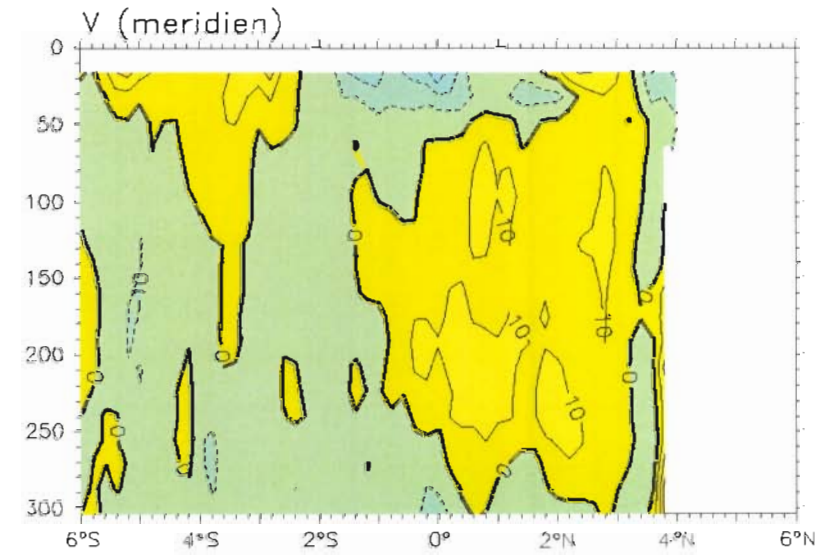
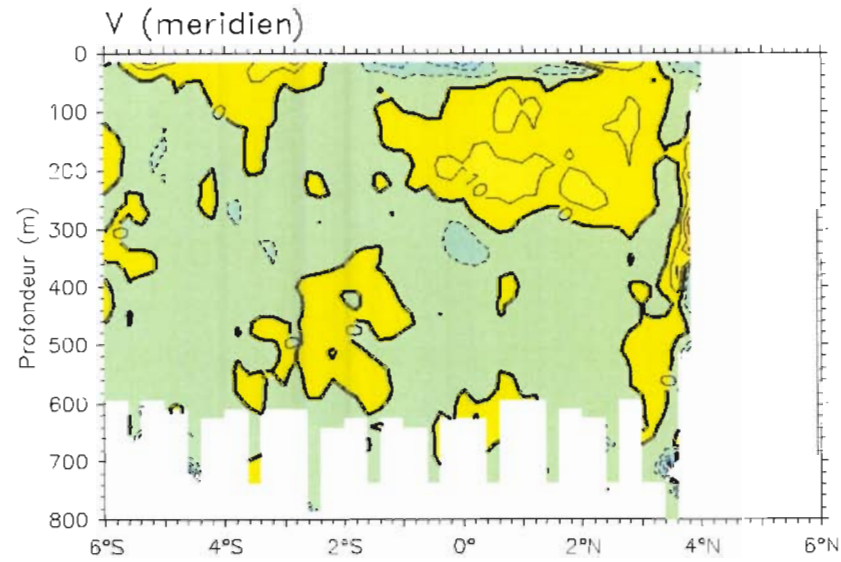
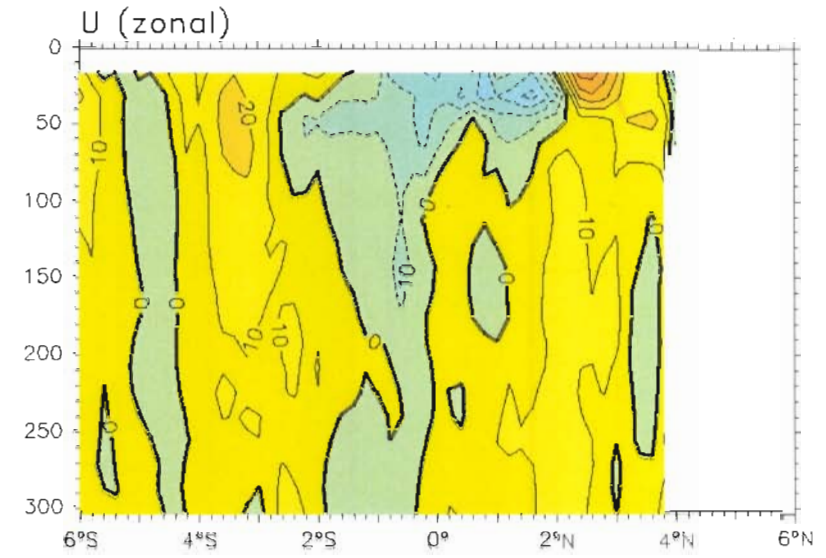
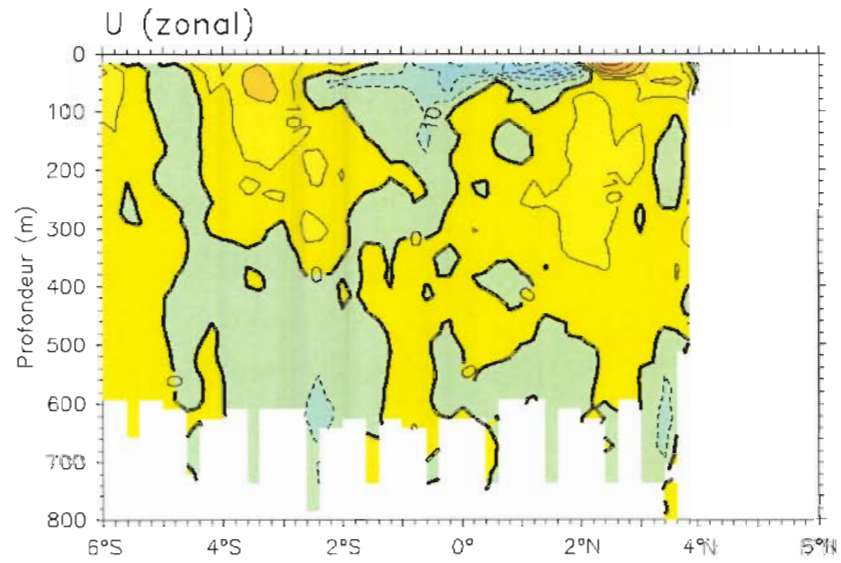
Section à 7°W-10°W



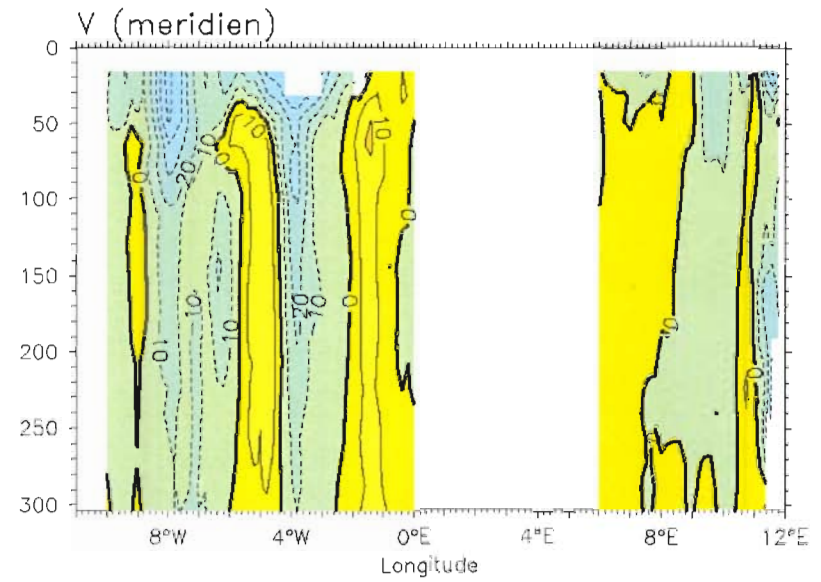
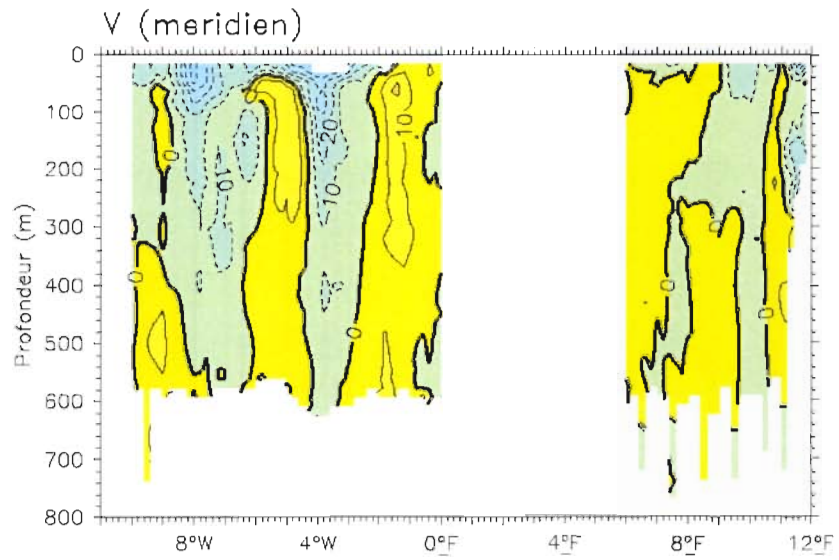
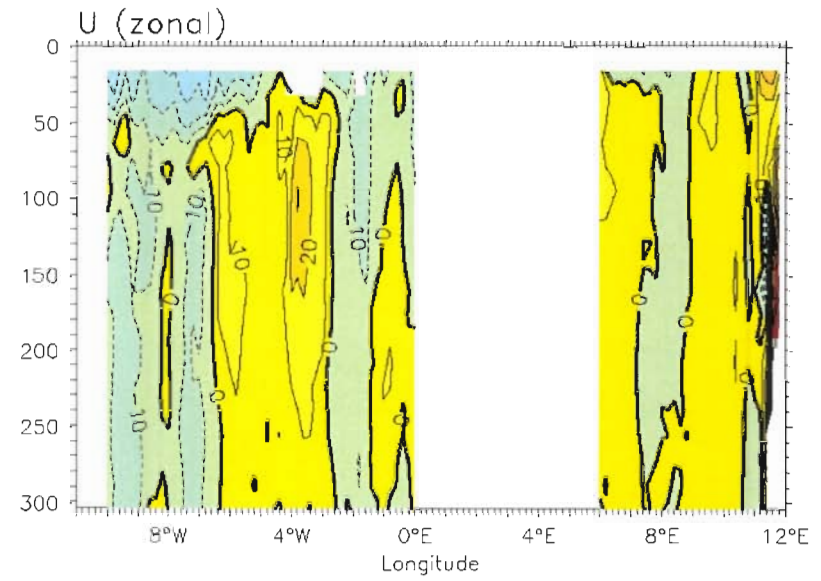
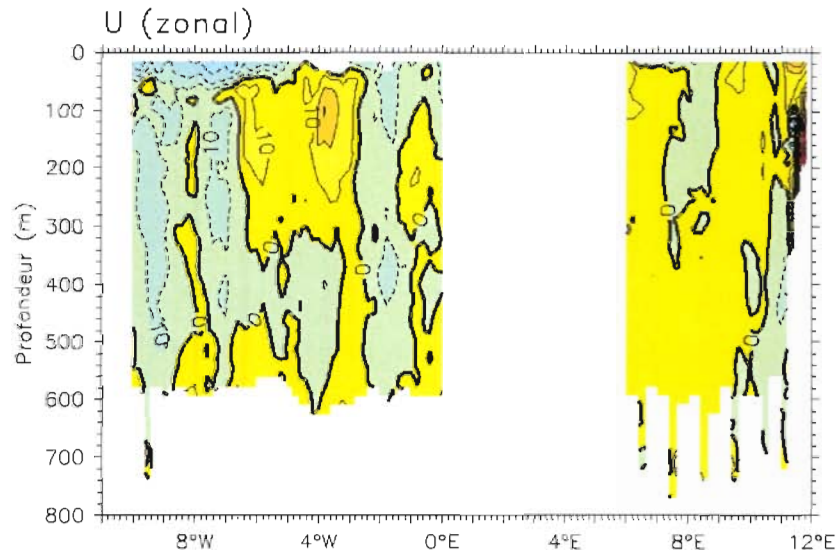
Section à 0°E



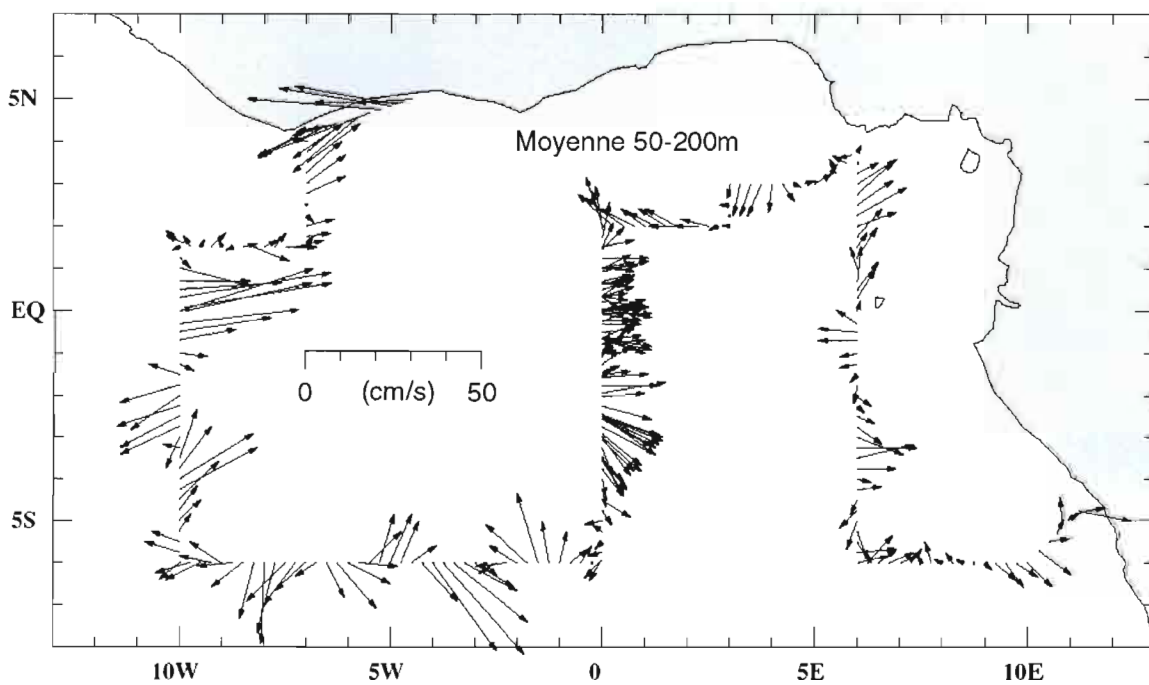
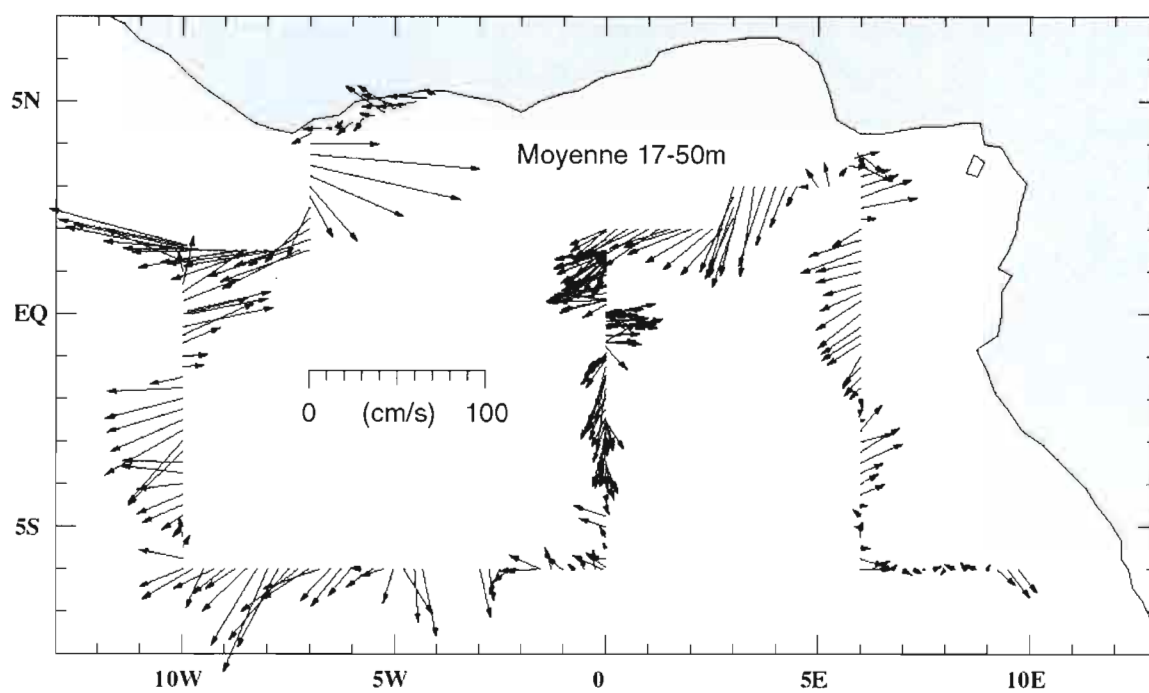
Section à 6°E



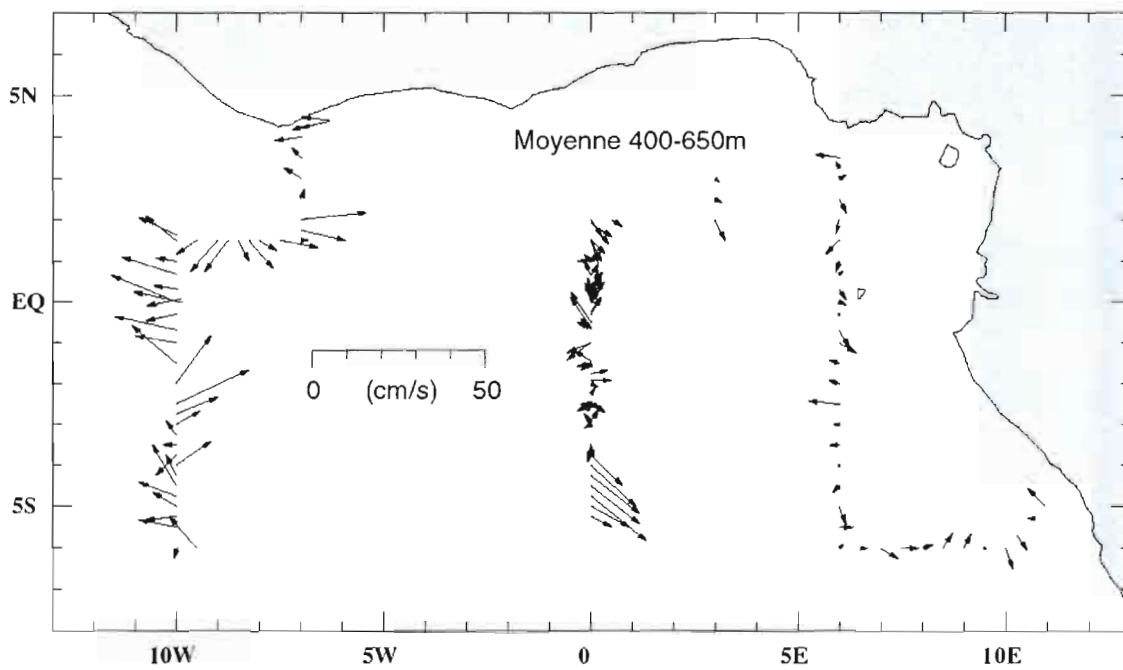
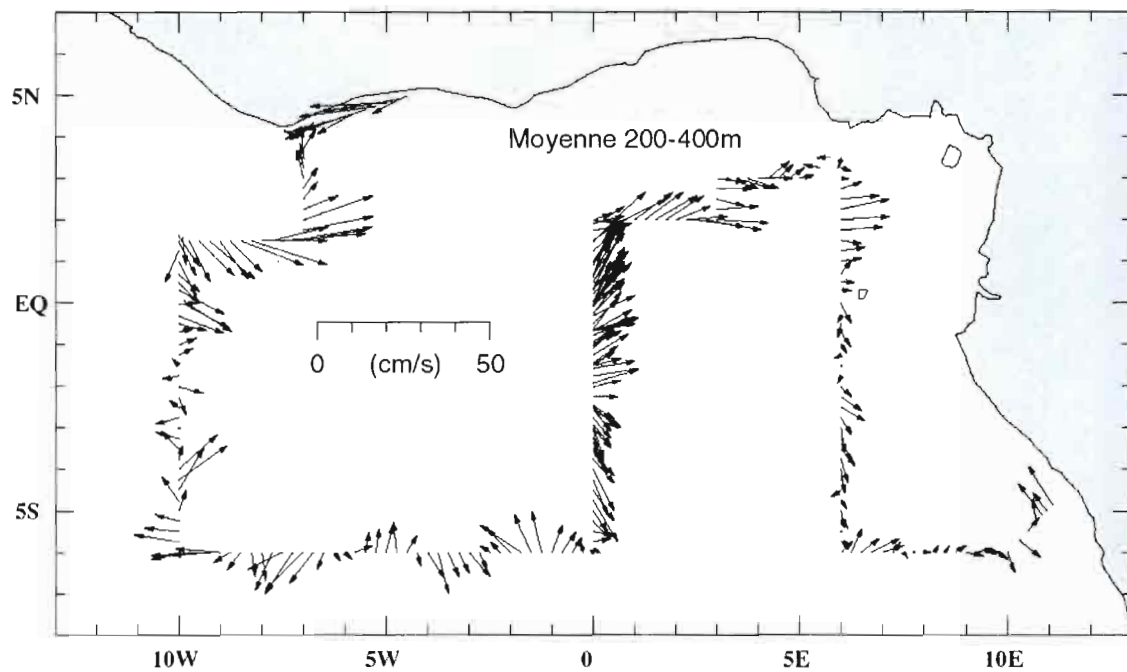
Section à 6°S



Vecteurs courant



Vecteurs courant (suite)



MESURES AVEC LE PROFILEUR DE COURANT A EFFET DOPPLER 'PROFOND' (L-ADCP)

Bernard Bourlès (IRD, Centre de Bretagne) et Yves Gouriou (IRD, Nouméa)

Ce rapport consiste en une adaptation directe du rapport L-ADCP de la campagne EQUALANT 1999 (Gouriou, 2000) aux mesures obtenues pendant EQUALANT 2000.

1. *Introduction*

Des mesures de courant absolu en continu de la surface au fond de l'océan sont accessibles depuis quelques années grâce à un courantomètre à effet Doppler fixé à une bathysonde, le « Lowered Acoustic Doppler Current Profiler », ou L-ADCP (*Fischer and Visbeck, 1993*). L'IRD a acquis un tel appareil avant le programme ETAMBOT (1995-1996), afin de mesurer les courants dans la région Ouest de l'Atlantique équatorial. A l'IRD, cet appareil a depuis été utilisé pendant toutes les campagnes hauturières d'océanographie physique, tant dans l'Atlantique (ETAMBOT, EQUALANT) que dans le Pacifique (WESPALIS). Nous rappelons ici brièvement le principe des mesures effectuées par cet appareil et de leur traitement, avant de présenter les résultats obtenus.

2. *Principes de la mesure*

a) Description de l'appareil

Le courantomètre à effet Doppler est un appareil BroadBand (BB) de la marque RD Instruments (RDI), fonctionnant à une fréquence de 150 kHz. Cet appareil est fixé à la bathysonde utilisée lors des profils hydrologiques et effectuée lors de la descente et de la remontée de celle-ci des mesures de courant simultanément à la sonde CTD-O₂. Cet appareil émet une onde sonore ('ping') qui se réfléchit sur les particules en suspension dans l'eau de mer, supposées sans mouvement propre. Leur mouvement est donc assimilé au mouvement des masses d'eau dans lesquelles elles se trouvent. La fréquence de l'onde émise est modifiée par ces particules en mouvement. La différence entre la fréquence émise et réfléchi (effet Doppler) est proportionnelle à la composante de la vitesse des particules suivant l'axe de propagation de l'onde. Ainsi, pour connaître les différentes composantes de la vitesse, 4 ondes sonores sont utilisées, émises par 4 faisceaux ('beam') inclinés différemment.

b) Principe de fonctionnement

Le L-ADCP a la possibilité de réaliser une moyenne des impulsions ('ping') émises dans un certain intervalle de temps afin de diminuer le bruit. Cet intervalle de temps correspond à un cycle de mesures (ou 'ensemble') pour lequel nous obtenons le résultat de la moyenne de plusieurs 'pings'. Cependant, l'utilisateur peut choisir de conserver tous les 'pings' lors de la configuration de l'appareil; dans ce cas, un cycle de mesures correspond à une impulsion ('ping'). Pour chaque cycle de mesures, le L-ADCP évalue les composantes horizontales et verticale du courant, corrigées du roulis et du tangage, et ce sur un profil dont la profondeur, ou portée, et la résolution verticale dépendent de la configuration de l'appareil. Le L-ADCP découpe chaque profil individuel de vitesse en segments uniformes, appelés cellules ('bins'); la

vitesse associée à chaque cellule est une moyenne des vitesses mesurées sur l'épaisseur de la cellule.

Pour chaque cycle de mesures, le L-ADCP enregistre différents paramètres : l'indice du cycle de mesures, le nombre de cellules, l'heure de l'acquisition (année, mois, jour, heure, minute, seconde, centièmes de seconde), la température du capteur interne, le cap du capteur interne, le tangage et le roulis du L-ADCP mesurés par le capteur interne, la vitesse du son utilisée et la vitesse verticale de la bathysonde lors de l'acquisition.

Pour chaque cellule, le L-ADCP calcule et enregistre d'autres paramètres que les trois composantes de la vitesse : l'erreur de vitesse, l'intensité d'écho des ondes sonores, l'amplitude de corrélation et le pourcentage de données correctes. La mesure de ces paramètres enregistrés est explicitée en détail dans la documentation technique *RDI* (1995). Ces paramètres sont indispensables pour déterminer la qualité des mesures lors du traitement. Lors de l'acquisition, les mesures de vitesse sont transformées et enregistrées en coordonnées terrestres.

3. *Traitement des mesures.*

a) Logiciel de traitement utilisé

Le traitement des mesures L-ADCP a été effectué à l'aide de la chaîne de traitement initialisée par *Ogier* (1995) au centre IRD de Cayenne, dont l'algorithme est inspiré du logiciel transmis par J.Fischer de l'Institut Für Meereskunde (IFM) de Kiel et décrit en détail dans *Fischer and Visbeck* (1993). Les détails techniques et informatiques de la chaîne de traitement sont explicités dans *Gouriou and Hémon* (1997). Depuis 1997, la chaîne de traitement a subi quelques améliorations notables, dont la prise en compte des données CTD simultanées (pour le calcul de la vitesse du son et de la profondeur).

b) Principes du traitement

(1) *Généralités*

Contrairement au VM-ADCP (voir Chapitre 6), le L-ADCP, au cours de son mouvement vertical avec la bathysonde, va enregistrer des profils successifs; ainsi, nous obtenons plusieurs mesures pour une même profondeur. Lors du traitement, la constitution d'un profil unique des courants horizontaux de la surface au fond se fait en prenant en compte toutes les mesures effectuées, c'est-à-dire en associant tous les profils effectués au cours du mouvement vertical du L-ADCP.

(2) *Calcul de la profondeur*

Le L-ADCP n'est pas muni de capteur de pression. La profondeur du L-ADCP, et donc des mesures, doit être déterminée *a posteriori*. Deux méthodes permettent d'avoir accès à la profondeur de chaque mesure :

- 1. Par intégration de la vitesse verticale mesurée par le L-ADCP. Cela implique que les mouvements verticaux des particules d'eau sont supposés très faibles par rapport à la vitesse de descente de l'appareil.
- 2. En utilisant les mesures de la pression fournies par la sonde CTD-O₂. La comparaison des mesures de temps de l'horloge interne du L-ADCP et l'enregistrement du temps GPS à chaque mesure de la sonde permet d'attribuer une profondeur à chaque mesure du L-ADCP (en réalité, le temps GPS est acquis au début du profil de la sonde, et le temps de chaque mesure est déduit de la fréquence d'acquisition de celle-ci -ici, 24Hz-).

(3) Vitesse du son

Pour chaque cycle de mesures, les vitesses et l'épaisseur de chaque cellule dépendent de la vitesse du son. Lors de l'acquisition, la vitesse du son est supposée égale à 1500 m.s^{-1} , valeur imposée lors de la configuration préalable de l'appareil. La vitesse du son réelle variant entre la surface et le fond, il est nécessaire de corriger les vitesses et l'épaisseur des cellules en tenant compte des variations de la vitesse du son. Celle-ci est donc recalculée lors du traitement pour chaque cycle de mesures à partir de la profondeur, de la température et de la salinité sonde CTD-O₂.

(4) Réflexion sur le fond

Lorsque la bathysonde approche du fond, les ondes sonores réfléchies par celui-ci perturbent le signal reçu et masquent le signal dû à la réflexion sur les particules en suspension. Ainsi, la mesure de l'intensité d'écho présente un pic ou de fortes valeurs dans les cellules perturbées par le fond. Les mesures de ces cellules sont éliminées du traitement. Lorsque le L-ADCP est très proche du fond, toutes les mesures sont perturbées par les réflexions sur le fond. Dans ce cas, le profil d'intensité d'écho ne présente plus de maximum et tout le cycle de mesures est éliminé du traitement.

(5) Suppression du mouvement propre de l'appareil

Les mesures effectuées par le L-ADCP sont la résultante de la vitesse des masses d'eau et de son propre mouvement, lié à celui de la bathysonde. Pour chaque cycle de mesures, le mouvement propre de l'appareil, étant identique pour les différentes cellules du cycle, peut être éliminé par différenciation des vitesses entre cellules adjacentes. Cependant, cette différenciation élimine également la composante moyenne de la vitesse.

(6) Obtention d'un profil de vitesse absolue

En raisonnant d'une façon intégrale, c'est-à-dire en considérant l'ensemble des mesures obtenues pendant la descente et la montée lors du traitement, la composante moyenne de la vitesse peut être reconstituée en connaissant parfaitement la position du L-ADCP en début et en fin de la station (*Fischer and Visbeck, 1993; Gouriou and Hémon, 1997*). Cette position doit être déterminée précisément à l'aide d'un GPS lors de la mise à l'eau et de la récupération de la bathysonde.

Le traitement moyenne les mesures effectuées au cours de différents cycles de mesures par couches de profondeur, d'épaisseur égale à la taille des cellules. De plus, le fait de procéder de manière intégrale dans le traitement implique que les mesures des profils de montée et de descente sont confondues. Ainsi, une station pouvant durer plus de 3 heures, on obtient donc en quelque sorte un profil 'lissé', dans lequel le signal des ondes internes, notamment dans les couches de surface, est atténué.

4. Acquisition des mesures et résultats.

Le L-ADCP est fixé au corps de la bathysonde. Il est alimenté par une batterie externe, rechargée durant le transit entre 2 stations hydrologiques successives. Le L-ADCP est muni d'une mémoire interne lui permettant d'enregistrer jusqu'à 20Mo de données. Systématiquement après chaque profil, les enregistrements sont récupérés sur PC via une liaison RS-232 et sauvegardés sur un PC; la mémoire du L-ADCP est ensuite vidée et la charge des batteries vérifiée. Les résultats bruts sont prévisualisés afin de contrôler prioritairement l'allure générale des profils des différents paramètres enregistrés et le comportement des différents faisceaux.

Les valeurs des paramètres définis lors de la configuration préalable du L-ADCP pendant la campagne EQUALANT 2000 sont les suivantes :

- Nombre d'impulsions ('ping') par cycle de mesures ('ensemble') :	1
- Temps entre deux impulsions (en secondes) :	1
- Nombre de cellules ('bins') par cycle de mesures :	19
- Epaisseur des cellules (en mètres) :	16
- Vitesse du son (en m.s ⁻¹) :	1500
- Salinité de l'eau de mer :	35

L'extension verticale du profil d'un cycle de mesures est alors d'environ 300 m.

Lors de la campagne, 86 profils L-ADCP ont été effectués de la surface au fond. Aucun problème d'acquisition notable n'a été à déplorer durant l'ensemble de la campagne. Lors des premières stations, plusieurs fichiers de mesures étaient créés, un seul contenant effectivement les valeurs du profil effectué. Ce phénomène a déjà été mentionné au début de la campagne EQUALANT 99, et il est probable que les fichiers 'parasites' étaient générés lors du branchement (ou débranchement) du câble liant le L-ADCP aux batteries de recharge. Par ailleurs, seul le profil de descente de la station n° 44 est disponible; en effet, les mesures n'ont été réalisées qu'à la descente et jusque vers 1500 m lors de la remontée, en raison d'une recharge préalable insuffisante de l'appareil. Enfin il n'y a pas de profil L-ADCP associé aux stations hydrologiques n°1 et 53, situées sur des fonds d'environ 200 m (donc à la portée des VM-ADCP du navire) au large de la Côte d'Ivoire et du Nigeria. La station test (n°0) n'a pas été incluse dans le traitement.

Les mesures de la sonde CTD-O₂ ont été systématiquement utilisées pour retrouver la profondeur de chaque ensemble de mesures du L-ADCP (voir par.3.b.2).

Le compas et les capteurs de roulis et tangage placés dans le L-ADCP permettent d'avoir une image du comportement du châssis de la bathysonde lors des profils, ce comportement étant pris en compte lors du traitement. Ces mesures sont reportées sur la **figure 1** pour la station n°14, représentative de la plupart des stations. Cette figure montre une stabilité du châssis relativement bonne avec des inclinaisons faibles (valeurs de tangage, généralement négatives, et de roulis inférieures à 5°), avec toutefois une exception près de la surface, où les valeurs peuvent excéder 10°. Il est à noter que ces paramètres ont fortement varié lors des toutes premières stations, avec des valeurs supérieures (jusqu'à 20°) et de signes opposés lors des profils de descente et de remontée. On note également que le châssis a subi plusieurs rotations au cours du profil (cap). Les principales variations du tangage, du roulis et du cap sont clairement identifiées lors du profil de remontée, lorsque le châssis est stoppé pour la fermeture des bouteilles hydrologiques.

Les variations de la température du capteur interne sont très régulières. Cependant, ces mesures de température n'ont pas été utilisées dans le calcul de la vitesse du son intervenant dans la correction des vitesses, et ce sont les mesures de température et de salinité de la bathysonde CTD-O₂, plus précises, qui ont été utilisées pour les calculs nécessitant ces paramètres.

Toutes les cellules ont été retenues et considérées pour le calcul des vitesses (la première cellule avait été supprimée lors du traitement d'Equalant 1999), en raison d'une relative stabilité du châssis. L'erreur maximale de l'erreur de vitesse retenue (estimée par le logiciel interne au L-ADCP) est de 10 cm/s (elle était de 15 cm/s pour le traitement des données d'Equalant 1999).

La **figure 2** donne le nombre de mesures retenues pour le calcul de la vitesse à chaque immersion, lors du profil de descente et de montée de la station n°14. La vitesse à chaque immersion est estimée à partir d'une moyenne des mesures obtenues lors des profils de descente

et de montée. Noter l'augmentation du nombre de valeurs par tranche d'eau lors des arrêts dus à la fermeture des bouteilles hydrologiques pendant le profil de remontée.

En absence de mesures de vitesse du courant indépendantes disponibles en profondeur, il est impossible d'évaluer quantitativement l'erreur sur les vitesses calculées. Une indication de la qualité des mesures est donnée par la comparaison entre les profils de descente et de montée en chaque station. Cette comparaison ne donne cependant qu'une indication imparfaite de la qualité du profil final, car celui-ci utilise l'ensemble des mesures du profil de montée et du profil de descente en les moyennant. Nous montrons (**figures 3, 4 et 5**) les 3 profils réalisés le long de l'équateur, à 10°W (station n°20), 0°E (station n°43) et 6°E (station n°63). Les plus fortes différences sont observées au-dessus de 500 m, où les cisaillements verticaux sont importants. En dessous de 500 m les différences sont généralement inférieures à 5 cm/s.

Ce sont les profils de la stations n°46 (**figure 6**) qui présentent les différences les plus fortes. En effet, les profils de montée et de descente de la composante méridienne se croisent vers 3000m de profondeur. Ce type de profils, dits en X, ne sont pas rares. Pendant cette campagne, le profil de la station 71, mais dans une mesure nettement moindre, présente également une telle structure en X. Pour l'instant aucune explication n'a été trouvée à ce type de comportement. Nous ne savons pas non plus quelle est la qualité du profil final en profondeur.

Un autre moyen de se rendre compte de la qualité des profils L-ADCP est de les comparer à ceux obtenus à partir des mesures du VM-ADCP (75 kHz) effectuées pendant la durée de chaque station. Il faut cependant bien prendre en considération qu'il existe des différences de base entre les 2 types de mesures. En effet, le VM-ADCP permet des profils à intervalle de temps réguliers (5 mn), à des immersions fixes. Dans la gamme de profondeur des profils VM-ADCP, le L-ADCP effectue quant à lui des mesures en début et fin de profils, soit approximativement à 3 heures d'intervalle.

Les profils moyens VM-ADCP sont comparés avec les profils L-ADCP pour les stations équatoriales à 10°W, 0°E et 6°E (**Figures 7, 8 et 9**). Les barres horizontales représentent la variabilité (écart-type) des mesures VM-ADCP pendant la durée de la station. De même, les profils obtenus pour la station n°46 sont présentés (**Figure 10**).

Nous observons que :

- La référence absolue des profils est généralement correcte. Des biais systématiques peuvent parfois être présents, comme par exemple sur la composante méridienne de la station n°63, qui présente un biais d'environ 2.4 cm/s.
- Les cisaillements verticaux de courant sont bien reproduits; notamment, les extrêmes sont présents aux mêmes profondeurs.
- Le profil L-ADCP de la station n°46 se superpose relativement bien au profil VM-ADCP alors que nous avons vu précédemment que les différences observées en profondeur entre le profil de montée et le profil de descente étaient maximales (profil de la composante méridienne en X).

Le résultat de la comparaison entre les profils L-ADCP et VM-ADCP, effectuée en dessous de 50 m, est présenté sur la **Figure 11**. Sur ce graphique sont reportées la différence moyenne entre 50 m et la profondeur commune la plus profonde des deux types de profil (en général à 750 m) ainsi que la variabilité (écart-type) associée. Il est remarquable que, pour les deux composantes de la vitesse du courant, les différences moyennes n'excèdent qu'exceptionnellement 4 cm/s et les écart-type 2 cm/s. Ces valeurs nous confortent quant à la bonne qualité relative des mesures de courant obtenues pendant cette campagne.

5. *Format des fichiers résultats.*

Il y a un fichier par profil L-ADCP. Les noms de fichier sont écrits de la manière suivante :
Eq2xxxyy.prf

Eq2 : 2^{nde} campagne EQUALANT
xxx : numéro de la station
yy : indice de la palanquée

Les fichiers sont écrits en ASCII. Ils comportent une entête puis les mesures de vitesse. Il y a une mesure tous les 16 m. Les mesures valides débutent à 40 m. Les valeurs mentionnées pour la première couche ont été obtenues par extrapolation (couche constante –slab layer- à 8 m).

Exemple de début de fichier :

```
STNBR 082 CASTNO 1 NOMBRE ENR. = 224
DATE DEBUT : 18/08/2000 HEURE DEBUT : 22:47:45
DATE FIN : 19/08/2000 HEURE FIN : 01:05:05
LAT. DEBUT : -5.99988 LON. DEBUT : 8.99924
LAT. FIN : -6.00196 LON. FIN : 9.00120
DERIVE NAVIRE EN CM/S
U = 2.6 V = -2.8
```

```
PROF. U V NOMBRE
M CM/S CM/S OBS.
*****
8.0 5.1 2.8 0.0
24.0 5.1 2.8 0.0
40.0 5.7 2.1 126.5
```

.....	
STNBR	Numéro de station.
CASTNO	Indice de palanquée.
NOMBRE ENR.	Nombre de niveaux du profil.
DATE DEBUT (jj/mm/aaaa)	Date de début de profil.
HEURE DEBUT (hh:mm:ss)	Heure de début de profil.
DATE FIN (jj/mm/aaaa)	Date de fin de profil.
HEURE FIN (hh:mm:ss)	Heure de fin de profil.
LAT. DEBUT	Latitude de début de profil en degré décimaux.
LON. DEBUT	Longitude de début de profil en degré décimaux.
LAT. FIN	Latitude de fin de profil en degré décimaux.
LON. FIN	Longitude de fin de profil en degré décimaux.
DERIVE NAVIRE EN CM/S	
U	Composante zonale de la dérive du navire en cm/s entre le début et la fin du profil.
V	Composante méridienne de la dérive du navire en cm/s entre le début et la fin du profil.
PROF.	Profondeur de la mesure en m.
U	Composante zonale de la vitesse en cm/s.
V	Composante méridienne de la vitesse en cm/s.
NOMBRE	Nombre de mesures ayant permis de calculer les composantes de la vitesse.

Les latitudes Est (respectivement Ouest) sont positives (respectivement négatives).

Les vitesses vers le nord et vers l'est sont positives. Les vitesses vers le sud et vers l'ouest sont négatives.

6. *Présentation de sections verticales.*

Sur les **Figures 12, 13, 14 et 15**, les distributions verticales de la composante zonale du courant sont représentées le long des trois sections méridiennes parcourues pendant la campagne, à savoir le long de 10°W (de 6°S à 1°30'N, et le long de 7°W entre 1°30'N et 5°N), 0°E (de 3°S à 2°N, et à 3°E de 2°N à 3°N) et 6°E (de 6°S à 4°N), ainsi que la composante méridienne le long de la section 6°S, de 6°E au large des côtes du Congo-Brazzaville (Pointe – Noire). Les vitesses sont comptées positives (négatives) vers l'est (ouest) et le nord (sud).

NOTA : Il n'a été tenu aucun compte dans le traitement de l'influence éventuelle de la marée barotrope sur les résultats. En conséquence, les mesures présentées ici n'ont fait l'objet d'aucune correction *a posteriori*.

7. *Références bibliographiques*

Fischer, J., and M. Visbeck: Deep velocity profiling with self_contained ADCPs, *J. Atmos. Oceanic Technol*, 10(5), 764-773, 1993.

Gouriou, Y., and C. Hémon: Traitement des données L-ADCP, *Centre ORSTOM de Cayenne, documents scientifiques n° O.P. 21*, 56pp, 1997.

Gouriou, Y., Mesures avec le profileur de courant à effet Doppler (L-ADCP), Campagne EQUALANT 1999, N.O. Thalassa, 13juillet-21 août 1999, Rapport de campagne à la mer, *Rapport interne LODYC n°2000-01*, 2000.

Ogier, I.: Elaboration de la chaîne d'analyse et de traitement des données d'un courantomètre à effet Doppler, *Rapport de stage ISITV, Centre ORSTOM de Cayenne*, 66pp, 1995.

RD Instruments: Direct reading and self-containing Broadband acoustic Doppler current profiler, *RDI, Technical manual*, 1995.

Figure 1 : Paramètres mesurés par le L-ADCP. Ex. pour la station n°14.

Equalant 2000 station n°014

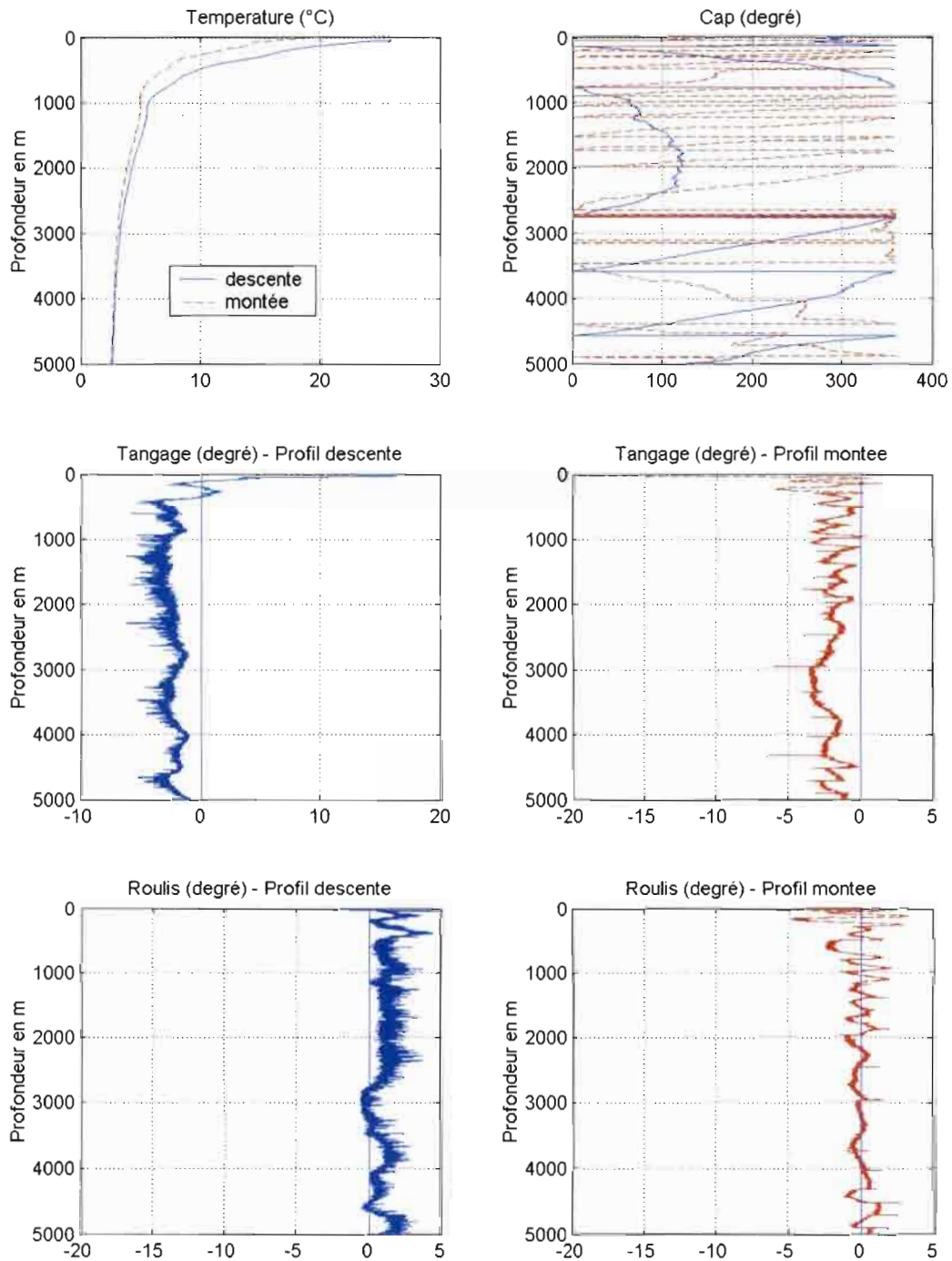


Figure 2 : Nombre de valeurs utilisées par tranche d'eau. Ex. pour la station n°14.

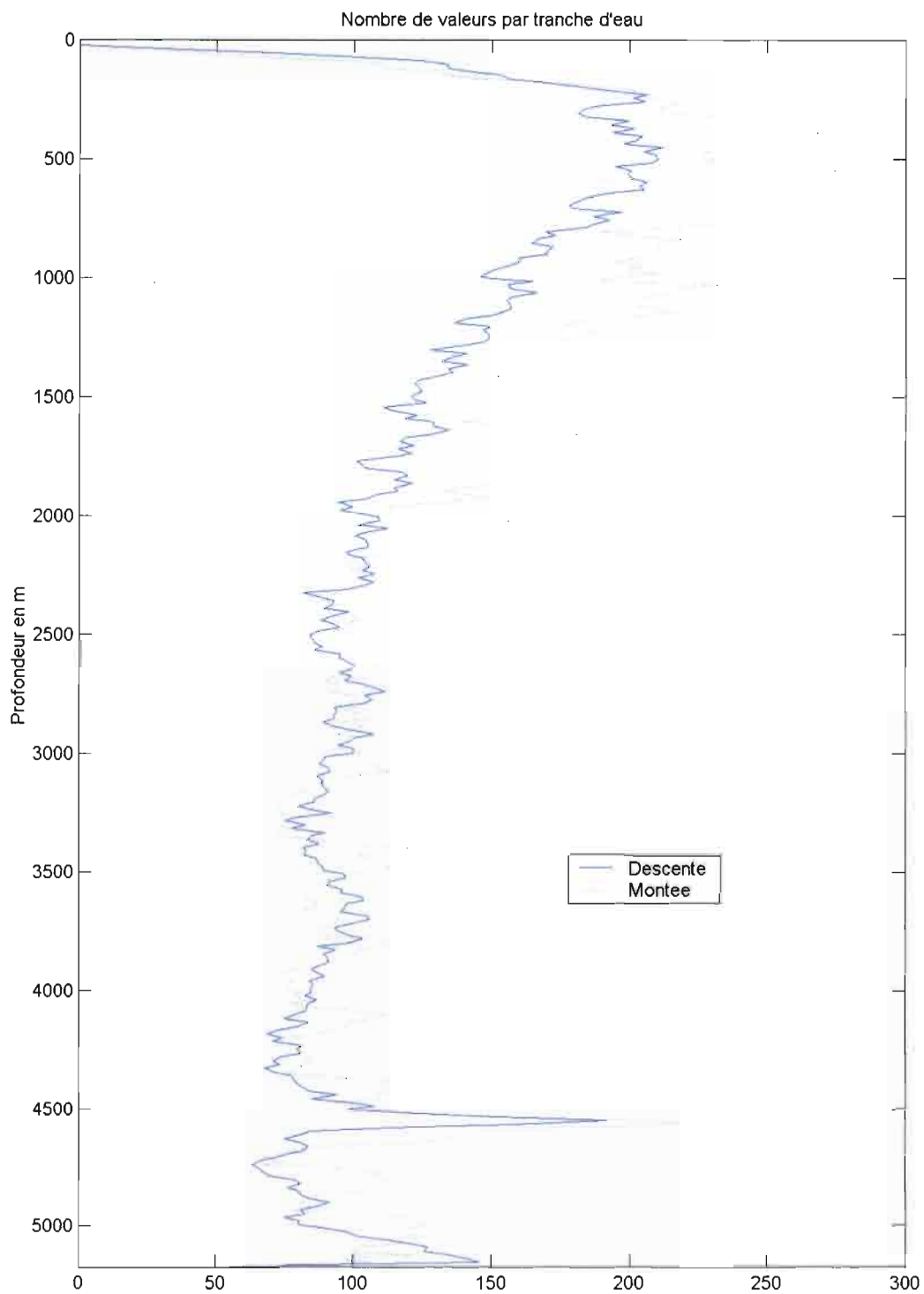


Figure 3. Composantes zonale et méridienne des profils de montée et de descente, ainsi que la différence entre ces profils pour chaque composante, pour la station 20 (0°N, 10°W).

EQUALANT 2000 station 020

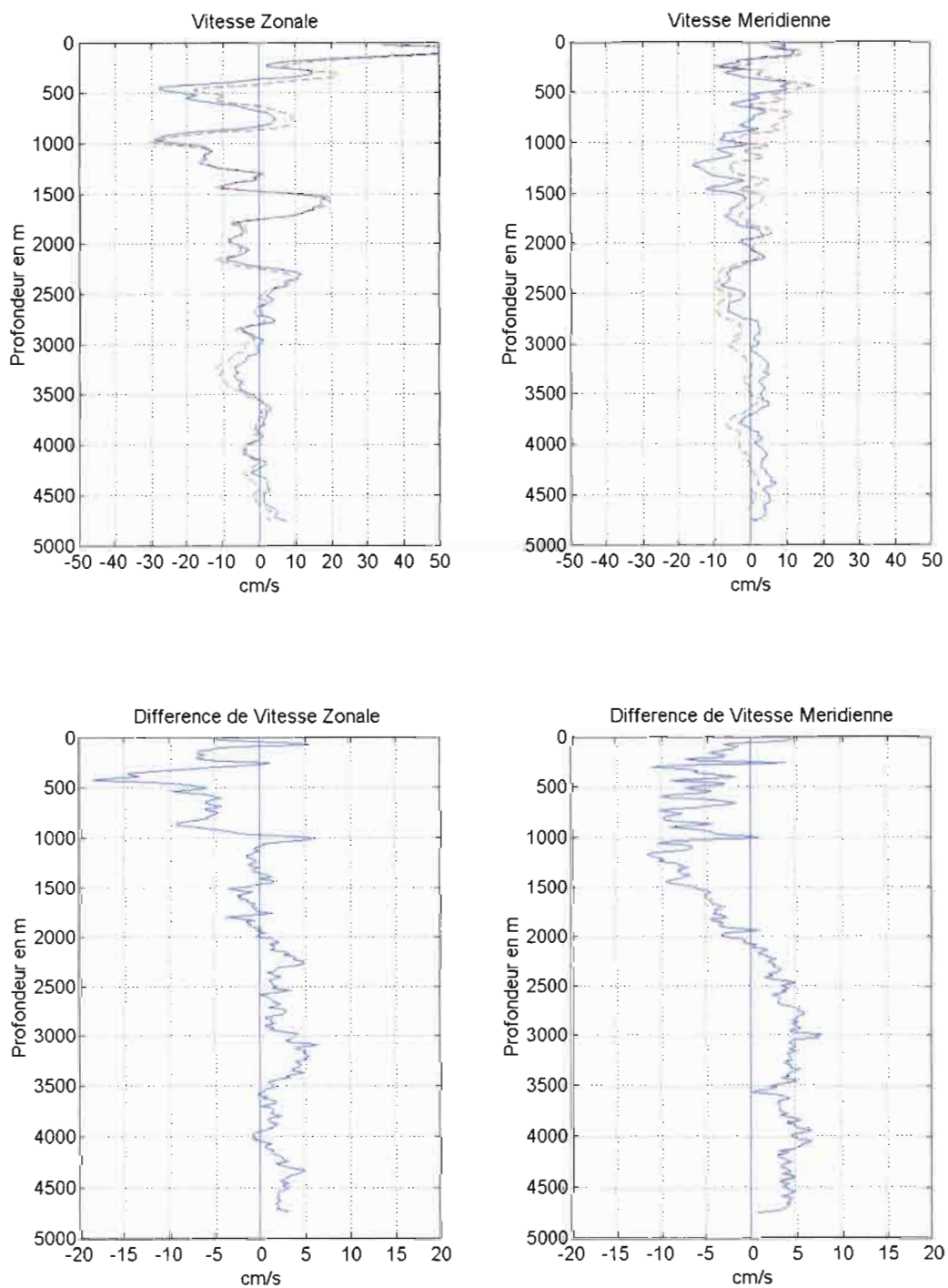


Figure 4. Composantes zonale et méridienne des profils de montée et de descente, ainsi que la différence entre ces profils pour chaque composante, pour la station 43 (0°N, 0°E).

EQUALANT 2000 station 043

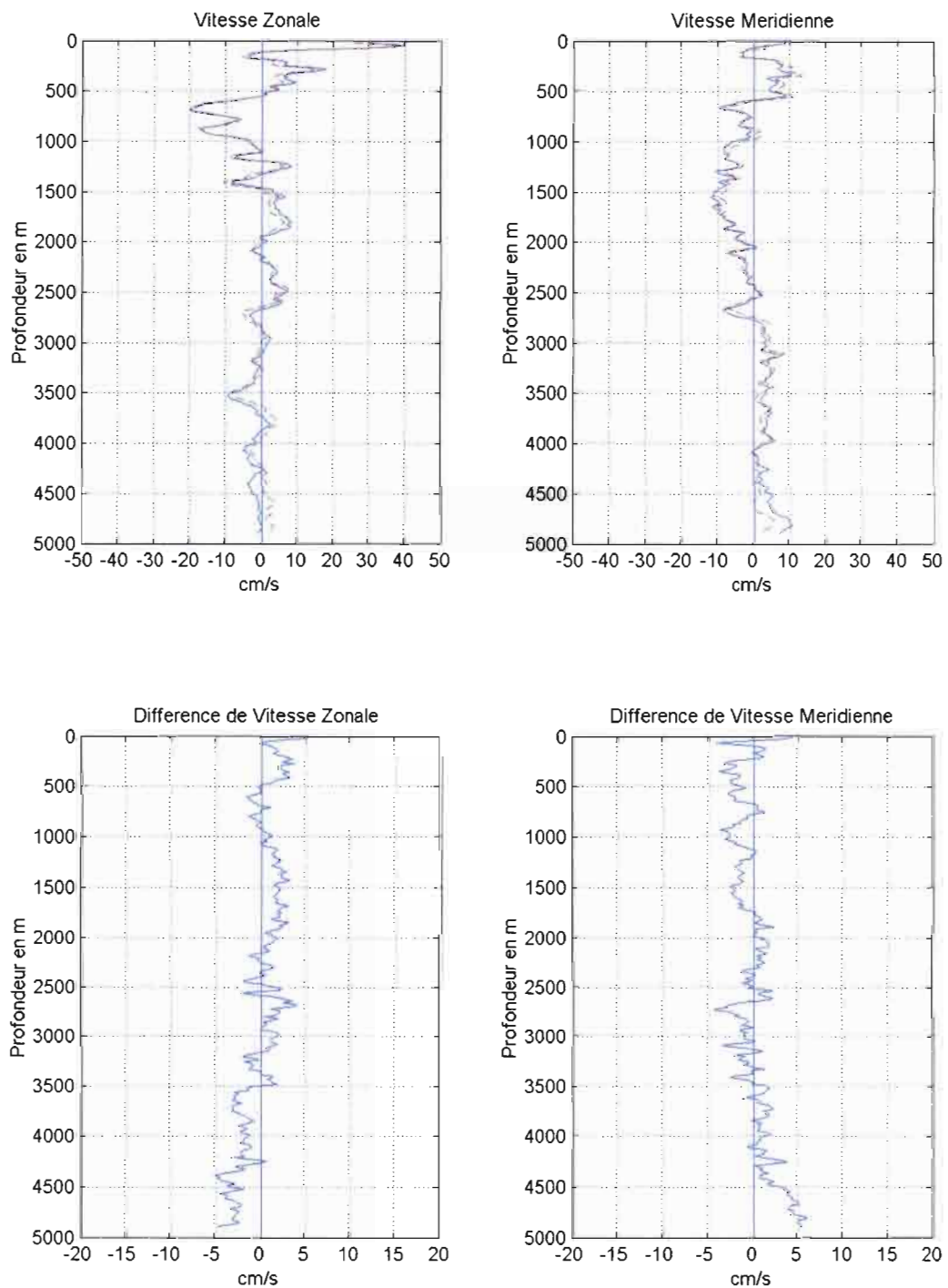


Figure 5. Composantes zonale et méridienne des profils de montée et de descente, ainsi que la différence entre ces profils pour chaque composante, pour la station 63 (0°N, 6°E).

EQUALANT 2000 station 063

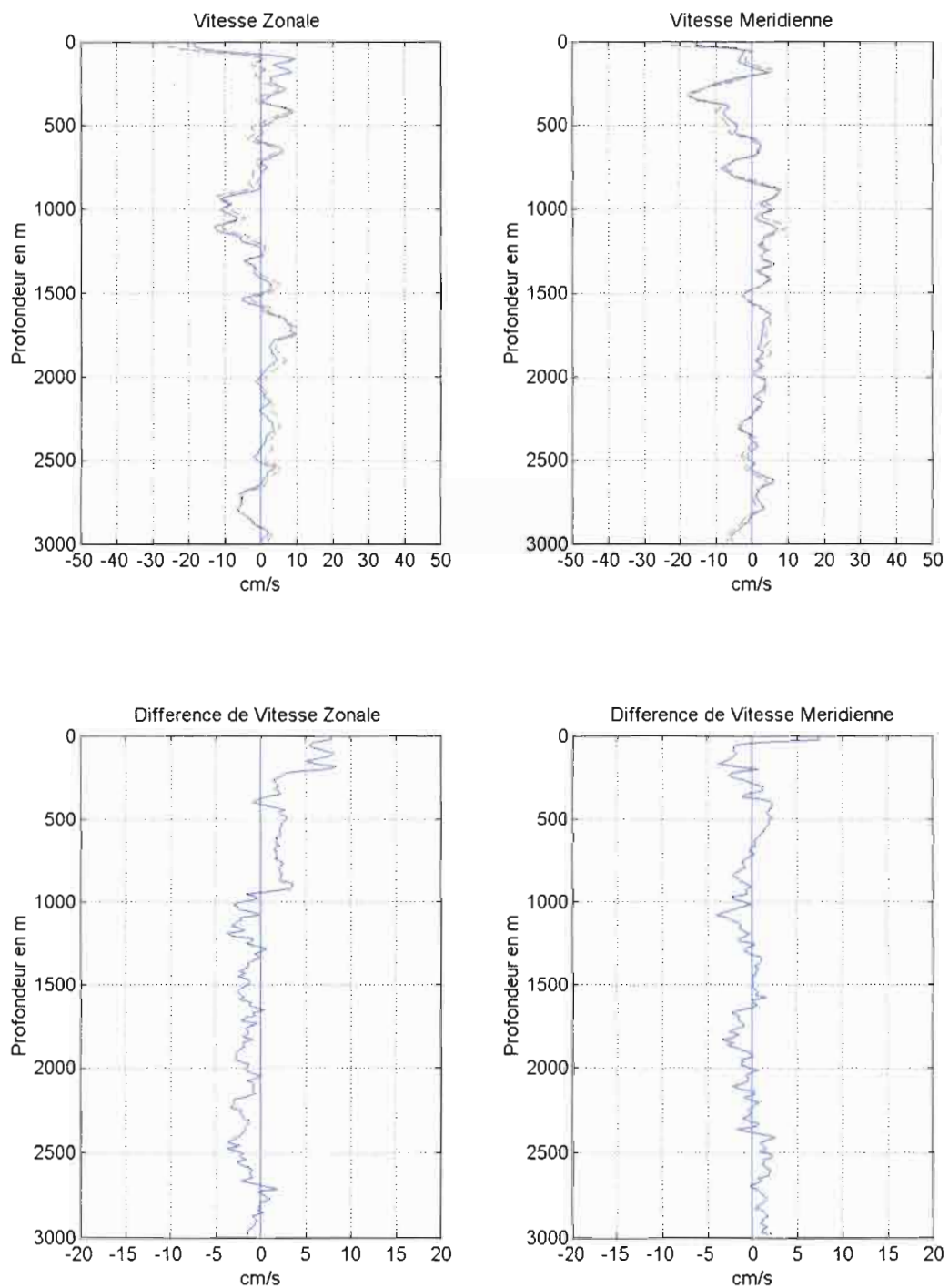


Figure 6. Composantes zonale et méridienne des profils de montée et de descente, ainsi que la différence entre ces profils pour chaque composante, pour la station 46 (1°N, 0°E).

EQUALANT 2000 station 046

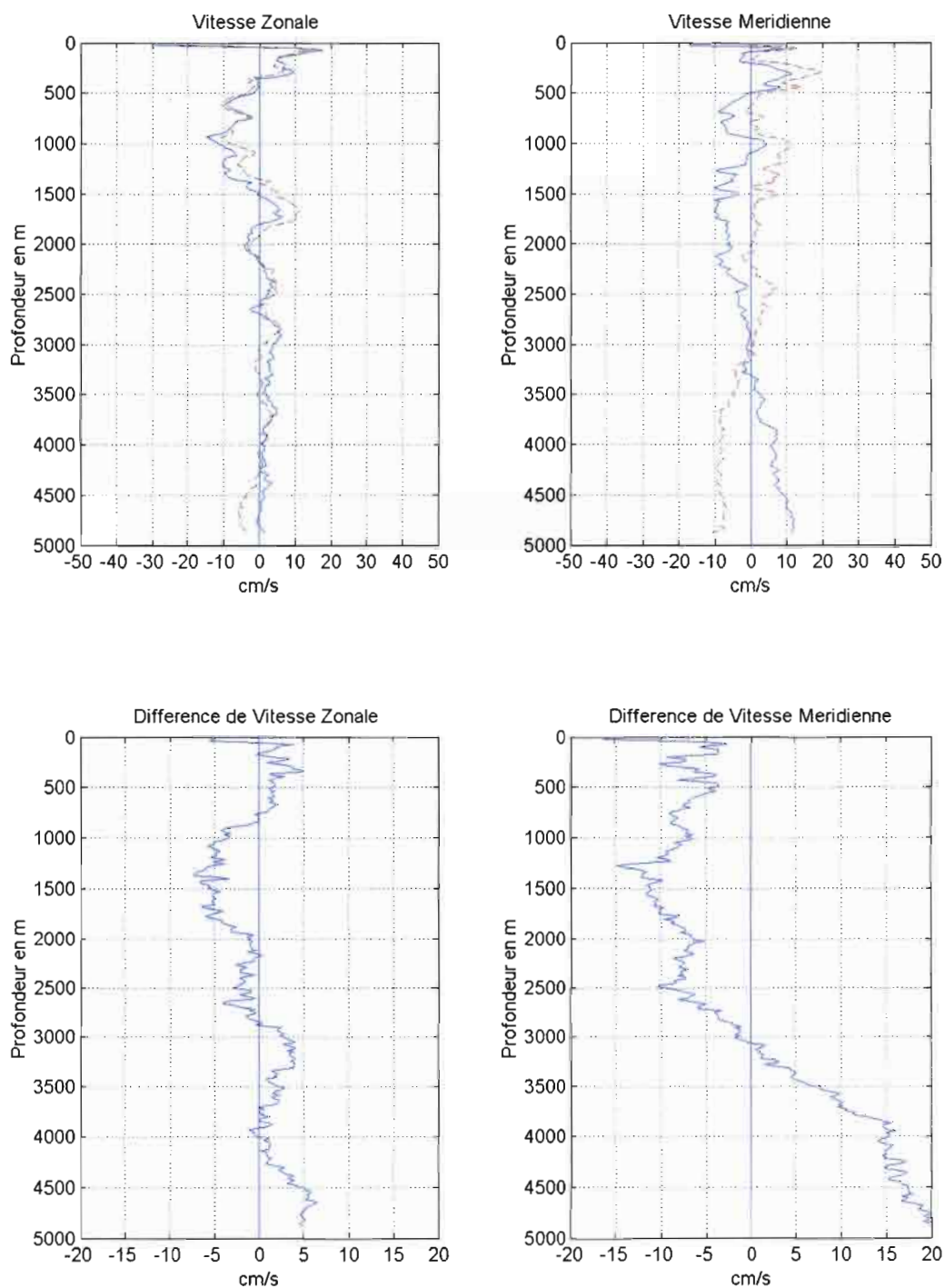


Figure 7. Comparaisons des composantes zonale et méridienne des profils obtenus à partir du L-ADCP et du VM-ADCP (75 kHz) pour la station 20 (0°N, 10°W).

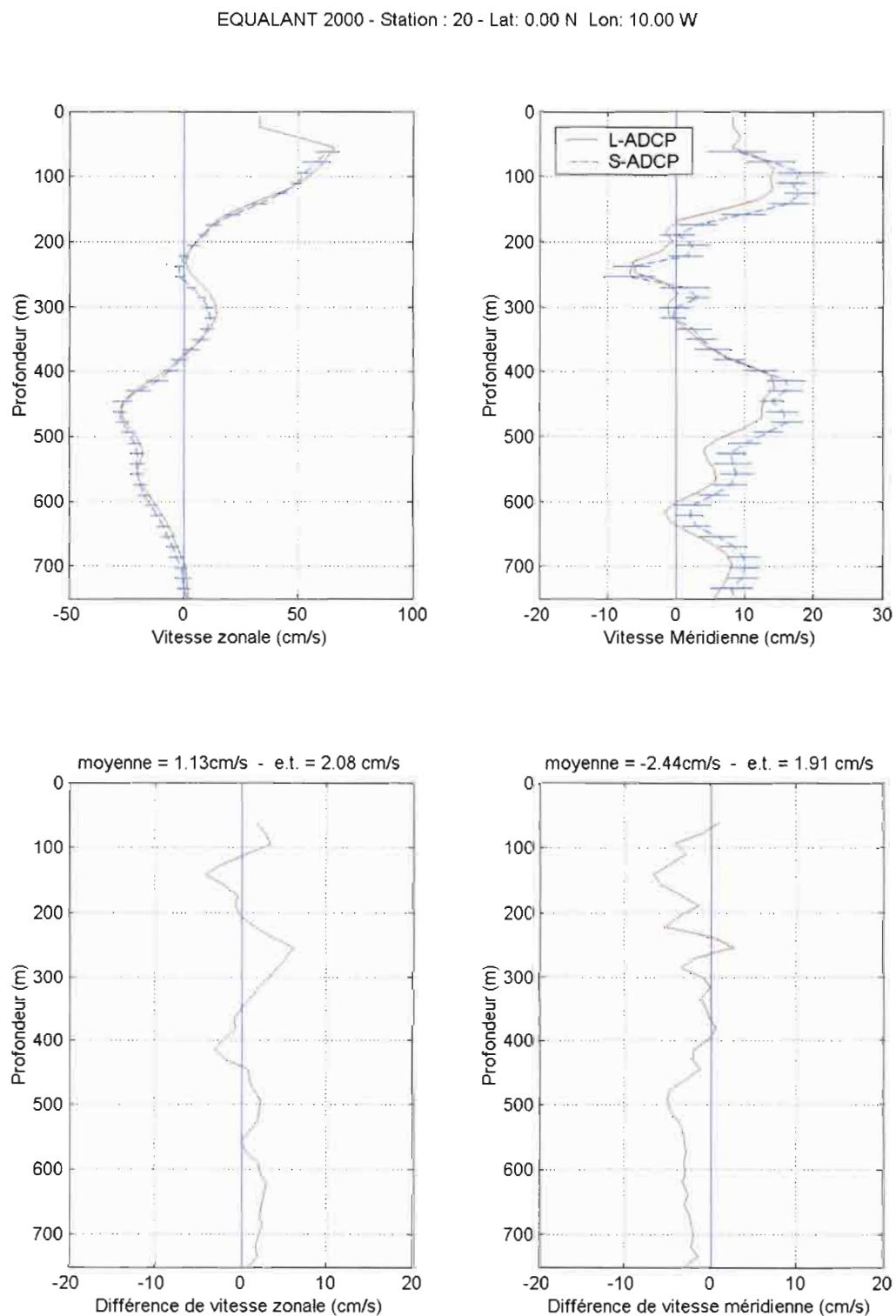


Figure 8. Comparaisons des composantes zonale et méridienne des profils obtenus à partir du L-ADCP et du VM-ADCP (75 kHz) pour la station 43 (0°N, 0°E).

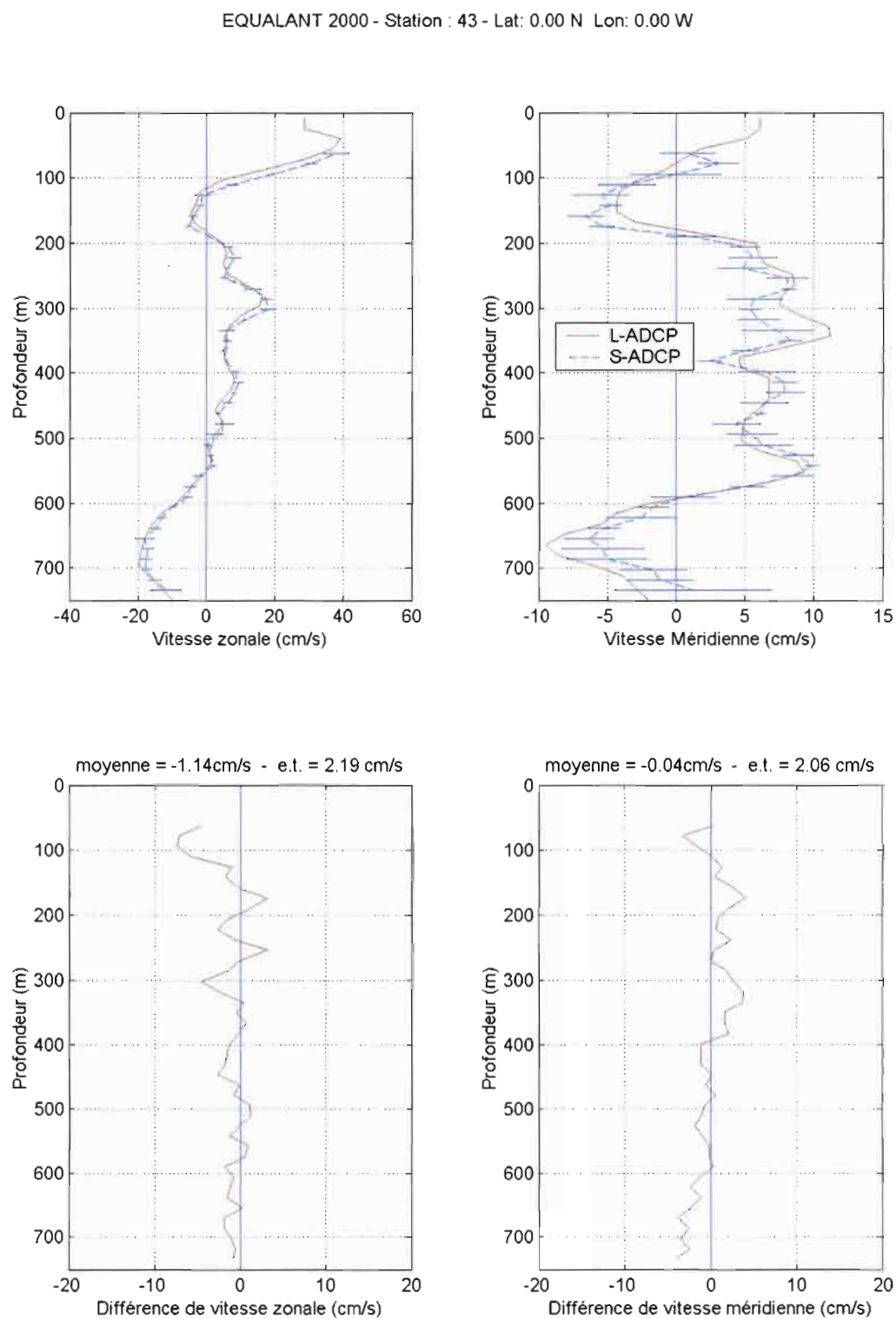


Figure 9. Comparaisons des composantes zonale et méridienne des profils obtenus à partir du L-ADCP et du VM-ADCP (75 kHz) pour la station 63 (0°N, 6°E).

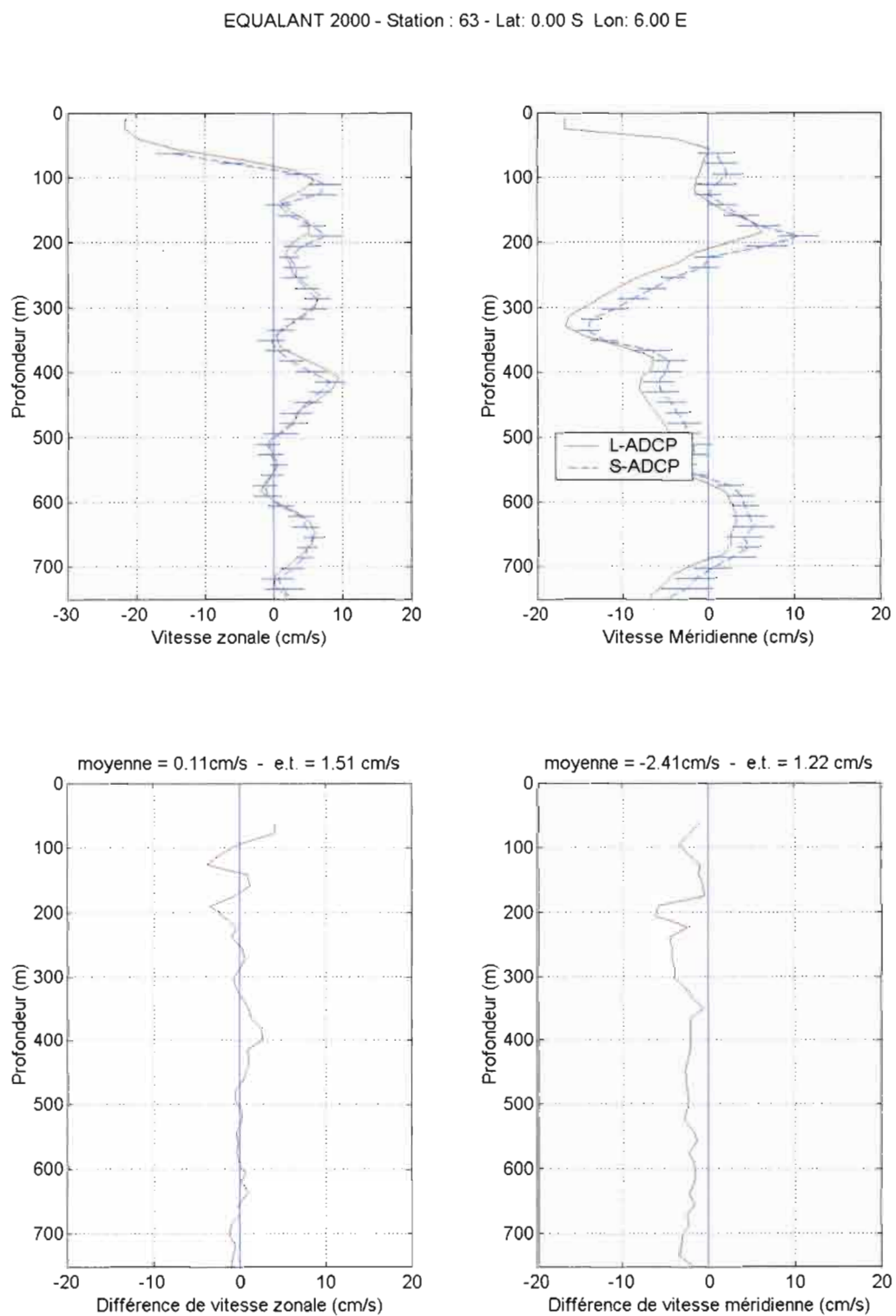


Figure 10. Comparaisons des composantes zonale et méridienne des profils obtenus à partir du L-ADCP et du VM-ADCP (75 kHz) pour la station 46 (1°N, 0°E).

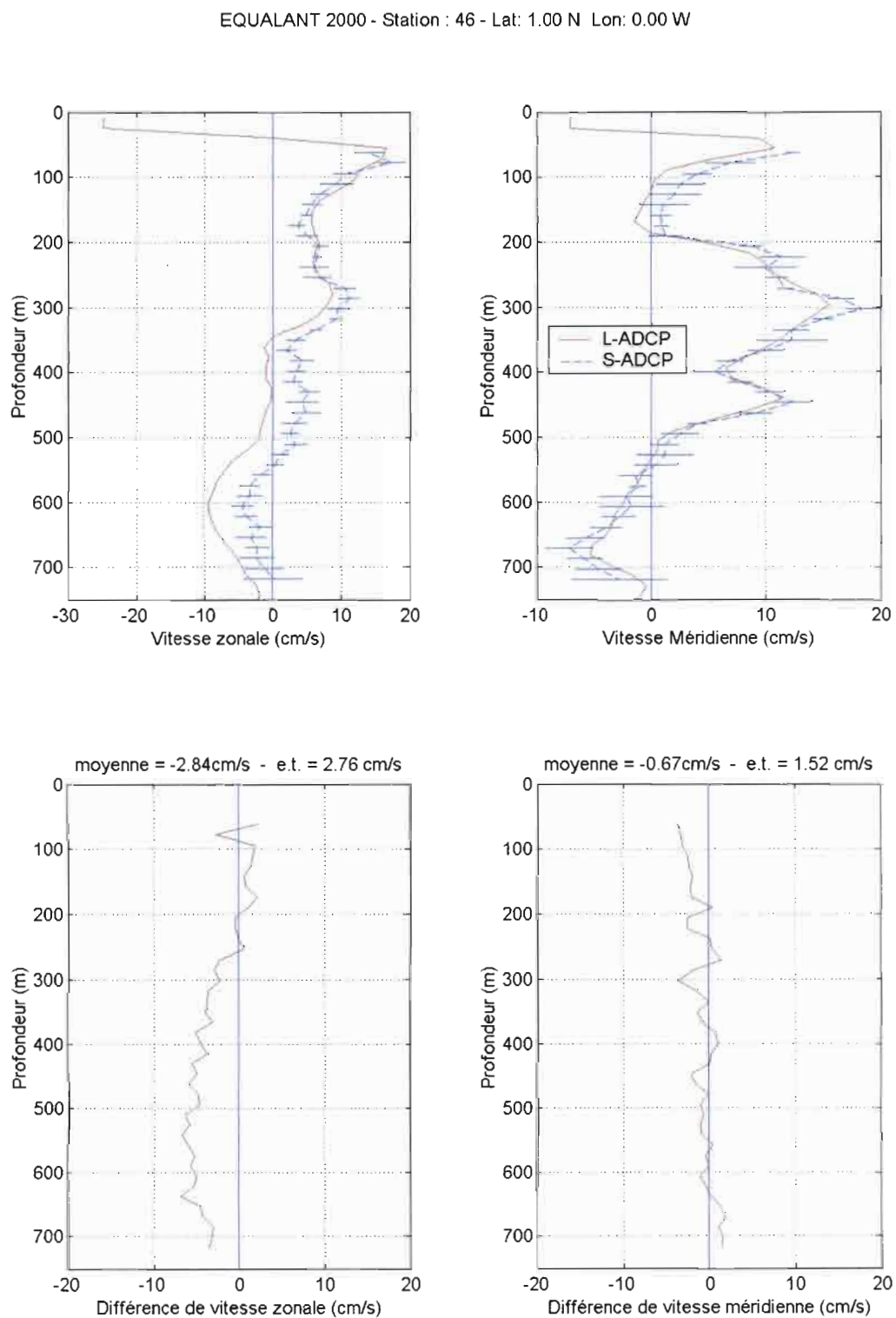


Figure 11. Différences moyennes et écarts-type des composantes zonale et méridienne des profils obtenus à partir du L-ADCP et du VM-ADCP (75 kHz), pour l'ensemble des profils.

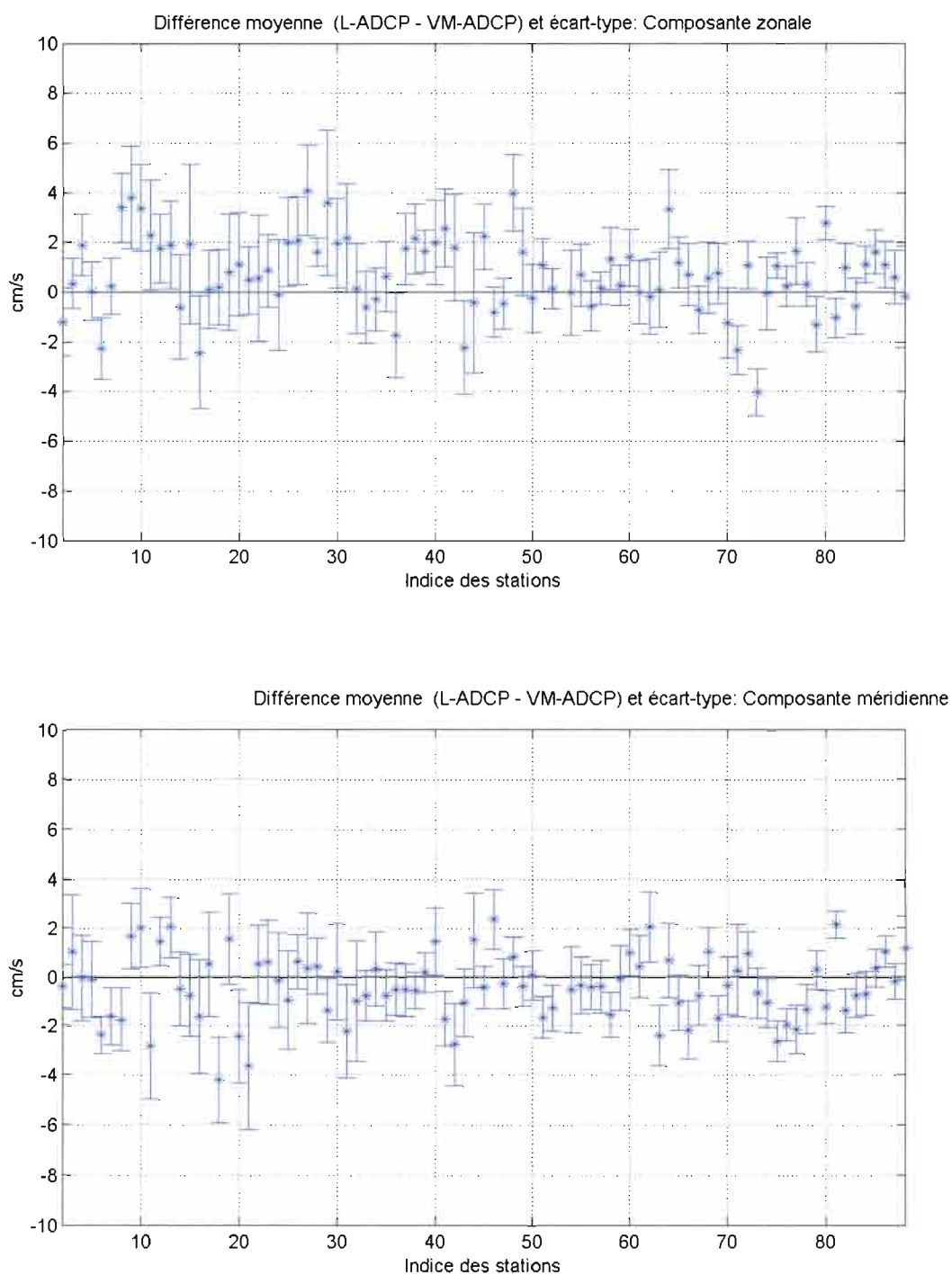


Figure 12. Section verticale de la composante zonale du courant (en cm/s) mesurée le long de la section méridienne 10°W (valeurs positives vers l'est).

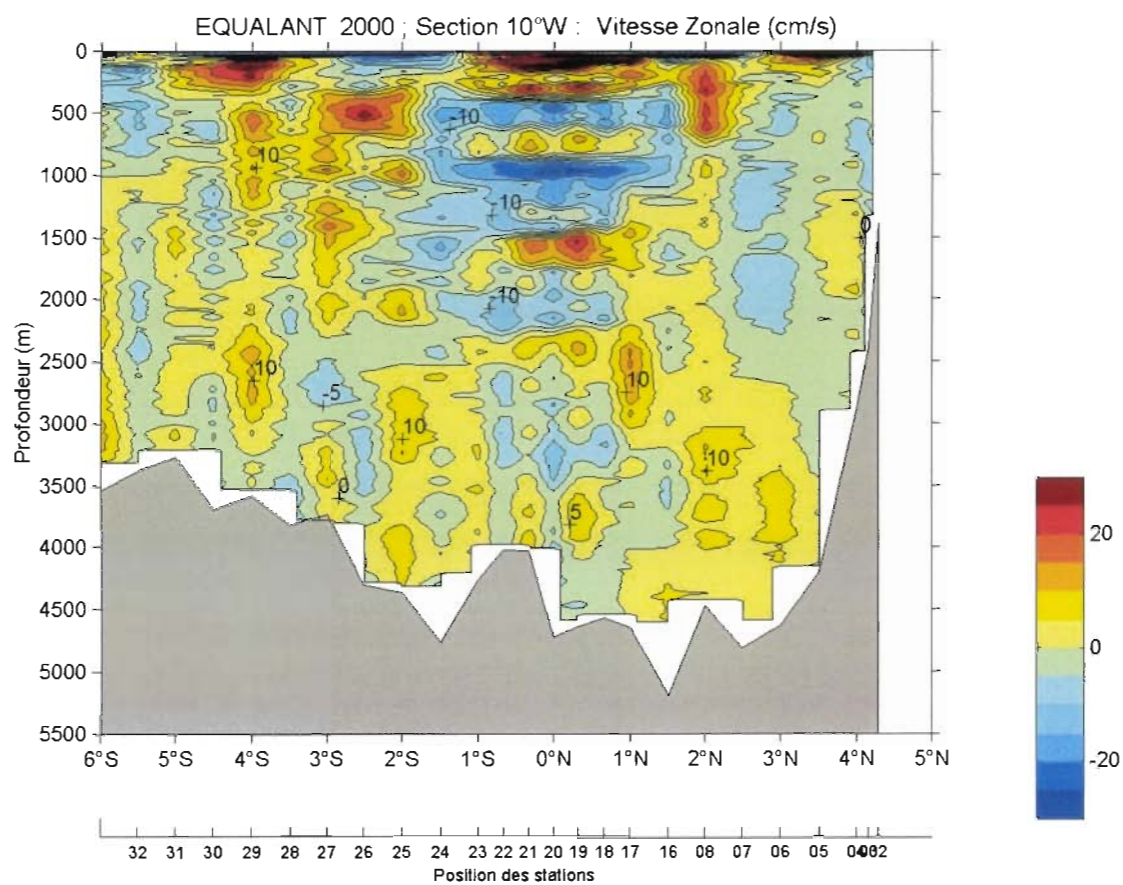


Figure 13. Section verticale de la composante zonale du courant (en cm/s) mesurée le long de la section méridienne 0°E (valeurs positives vers l'est).

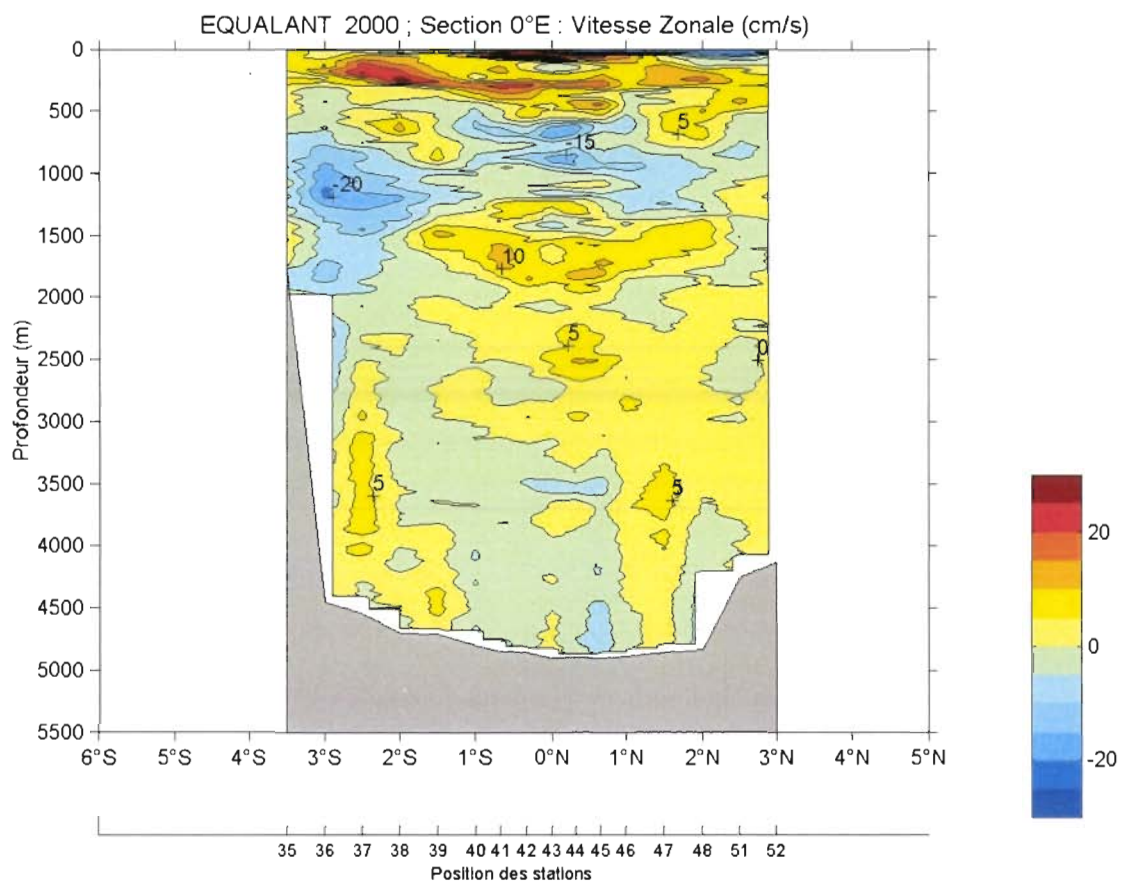


Figure 14. Section verticale de la composante zonale du courant (en cm/s) mesurée le long de la section méridienne 6°E (valeurs positives vers l'est).

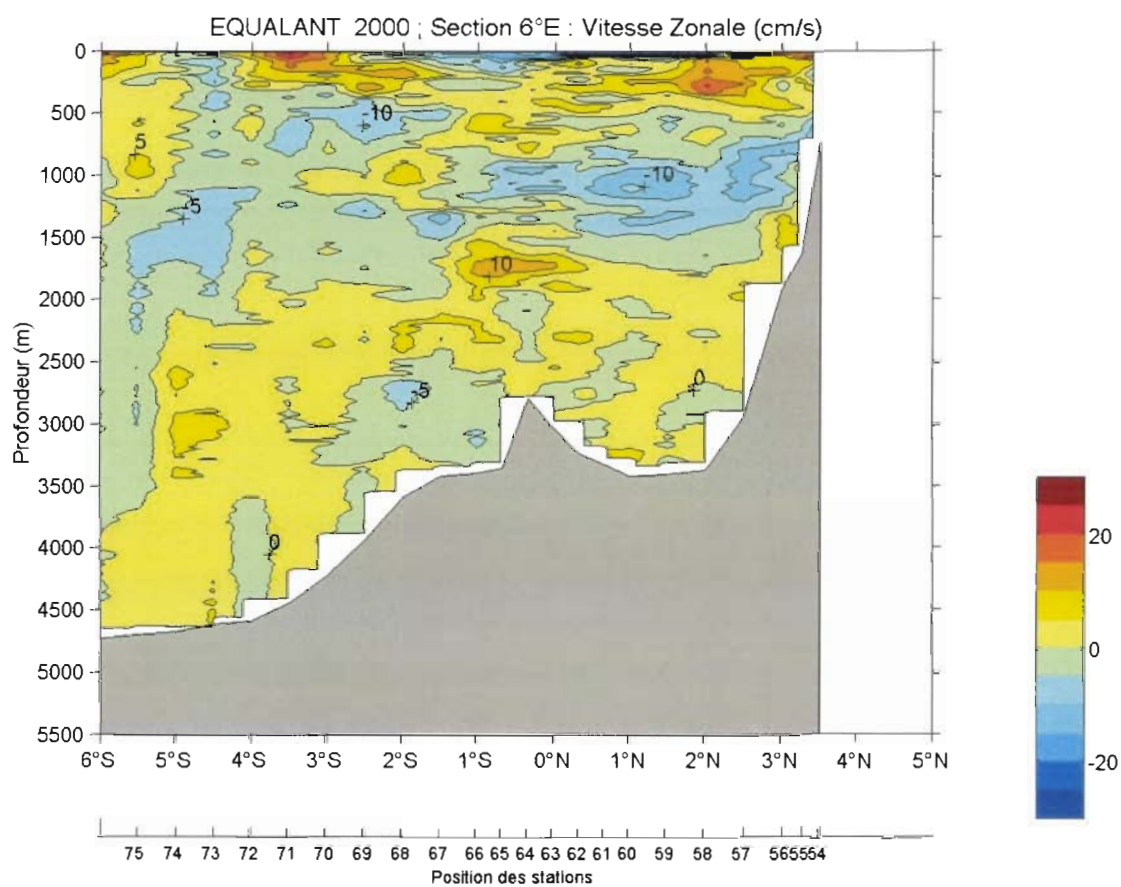
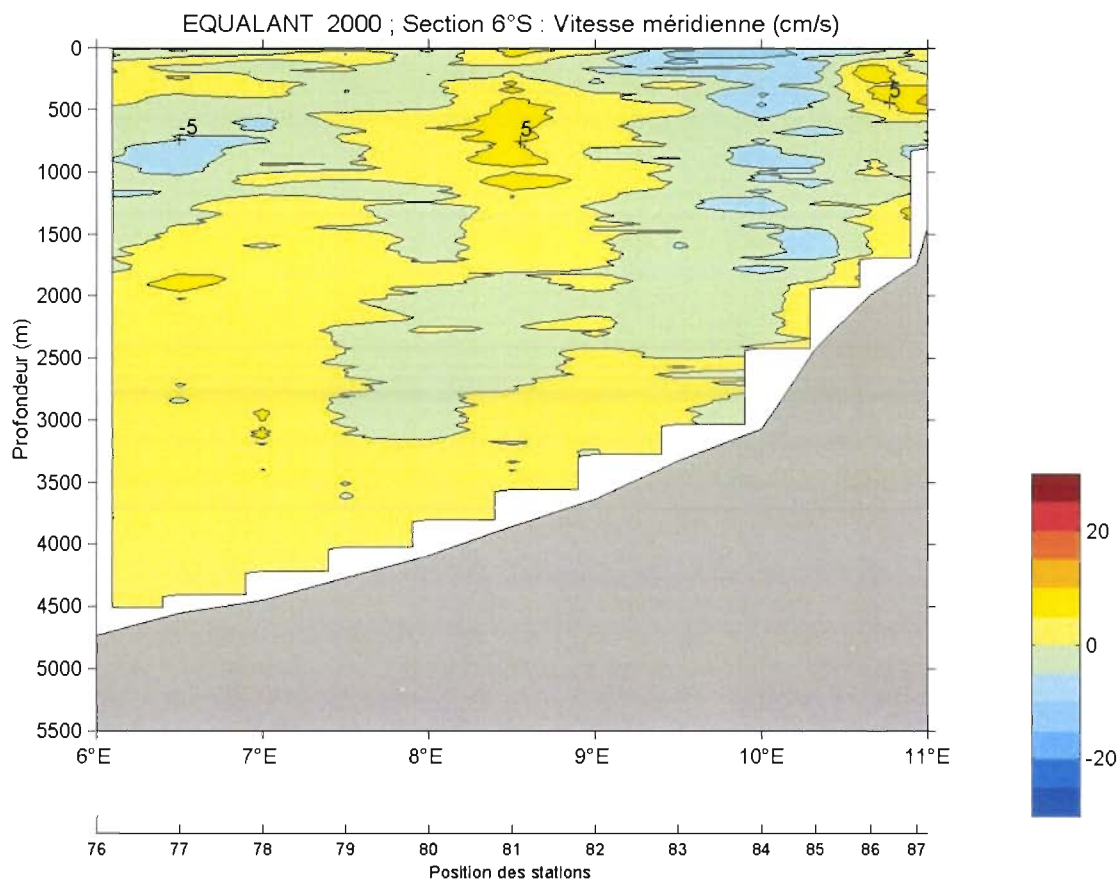


Figure 15. Section verticale de la composante zonale du courant (en cm/s) mesurée le long de la section zonale 6°S (valeurs positives vers le nord).



CALIBRATION DES MESURES CTD-O₂

Rémy CHUCHLA et Bernard BOURLES (Centre IRD de Bretagne)

1- Contributions à l'acquisition des données d'hydrologie.

L'ensemble du matériel utilisé pendant la campagne EQUALANT 2000 est rigoureusement le même que celui utilisé lors d'EQUALANT 1999 (voir *Chuchla et al.*, 2000). La base du châssis avait cependant été remodelé (changement et augmentation du nombre de silentblocs) et le pinger MORSE remis en état (ayant pris l'eau lors d'EQUALANT 1999 en raison de la présence nouvelle, et non mentionnée dans la documentation, de trous d'aération et de dégazage au niveau de la prise de recharge des batteries). La sonde hydrologique SEABIRD ayant pris l'eau dès le début de la campagne EQUALANT 1999 (*Chuchla et al.*, 2000), une sonde neuve a été expédiée à Nouméa en automne 1999 pour la campagne WESPALIS. C'est cette nouvelle sonde qui a été ensuite utilisée pendant la campagne.

La préparation, le regroupement et le suivi technique de l'ensemble du matériel d'hydrologie ont été assurés à Brest par Rémy CHUCHLA et Bernard BOURLES, avec l'assistance de François BAURAND et de Francis GALLOIS.

L'équipe EQUALANT tient à remercier l'INSU, pour le prêt de matériel (sonde et Deck Unit SEABIRD, châssis et bouteilles hydrologiques, en guise de matériel de secours) et d'un conteneur, et plus particulièrement Claudie BOURNOT-MAREC et Yves L'HERROU pour leur disponibilité, leur assistance et la parfaite préparation du matériel prêté.

Les différents programmes informatiques permettant la calibration des mesures de la sonde ont été mis au point par Rémy CHUCHLA lors du traitement des données de la campagne EQUALANT 1999, en partie à partir des codes développés par Yves GOURIOU et David NOWICKI à Cayenne pour une sonde NEIL-BROWN lors du programme ETAMBOT (voir *Gouriou*, 1997a, b).

Les personnes ayant participé lors de la campagne à l'acquisition des mesures 'sonde', que ce soit sous forme de quarts ou d'assistance électronique, sont les suivantes :

<u>Nom :</u>	<u>Laboratoire :</u>
Angora AMAN	Université de Cocody (Abidjan-CÔTE D'IVOIRE)
Bernard BOURLES	IRD-Brest
Rémy CHUCHLA	IRD-Brest
Boris DEWITTE	IRD-LEGOS-Toulouse
Gérard ELDIN	IRD-LEGOS-Toulouse
Francis GALLOIS	IRD-Nouméa
Georges KOUADIO	Université de Cocody (Abidjan-CÔTE D'IVOIRE)
Yves du PENHOAT	IRD-LEGOS-Toulouse

2- Présentation des sondes utilisées et de l'acquisition des mesures.

La sonde hydrologique CTD-O₂ utilisée est une sonde SEABIRD de type SBE 911+, (numéro de série SBE09P17569-0525). La sonde a parfaitement fonctionné sur l'ensemble de la campagne et la sonde SEABIRD de secours appartenant à l'INSU n'a pas eu à être utilisée. La sonde comporte :

- un capteur de pression ; ce capteur est un capteur à quartz développé par la société Paroscientific Inc. Il est muni d'un capteur de température interne pour pouvoir effectuer une correction de température sur la mesure de pression. Il permet des mesures de 0 à 10000 psia ('pound per square inch, absolute' soit 6800 dbar, avec 1 dbar=1.4503774 psia) avec une résolution de 0.001% de la pleine échelle (soit 0.068 dbar) et une précision de 0.015% de la pleine échelle (soit environ 1 dbar).
- deux capteurs de température ; ces capteurs à sonde de platine permettent des mesures entre -5°C et +35°C, avec une résolution de 0.0002°C et une précision de 0.002°C.
- deux capteurs de conductivité ; ces capteurs à électrodes sont placés dans un tube en verre et mesurent la conductivité absolue. La gamme de mesure se situe de 0 à 7 S/m (Siemens par mètre, équivalent à 0-70 mmho/cm), avec une résolution de 4.10⁻⁵ S/m et une précision de 0.0003 S/m.
- un capteur d'oxygène, à membrane polarographique de type Beckman, permettant des mesures de 0 à 15 ml/l, avec une précision de 0.1 ml/l et une résolution de 0.01 ml/l (soit approximativement 600 µmol/kg, 4 µmol/kg et 0.4 µmol/kg respectivement).

Une pompe externe relie les différents capteurs, afin d'assurer une meilleure synchronisation de leurs réponses. De même, chaque capteur de température est relié à un capteur de conductivité par un conduit, afin qu'ils mesurent exactement la même eau. Ainsi, on dispose de deux ensembles de capteurs T/C (température-conductivité).

Pour les études de répartition des particules un néphélomètre était également relié à la sonde. Les mesures de ce dernier appareil ne sont pas considérées ici.

Pour plus de détails sur les différents capteurs de la SEABIRD 911, prière de se référer au site internet du constructeur : <http://www.seabird.com/911plus.htm>.

Les numéros de série des différents capteurs utilisés pendant la campagne sont reportés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 :

Stations	1-89
Temp_0	32552
Temp_1	35551
Cond_0	42343
Cond_1	42340
Pression	75674
Oxygène	130511

Les capteurs de température et de conductivité de la sonde IRD avaient été calibrés par SEABIRD avant la campagne. Les mesures de conductivité du profil de montée sont ensuite calibrées à l'aide des mesures effectuées à partir des échantillons d'eau de mer prélevés pendant la remontée lors de chaque profil. Les capteurs d'oxygène sont calibrés une fois pour toutes en usine lors de leur fabrication. Les mesures 'brutes' d'oxygène de la sonde ne peuvent *a priori* être utilisées que pour visualiser les variations de la concentration en

oxygène selon la verticale. Cependant, le logiciel d'acquisition de SEABIRD prend en compte un algorithme (*Owens et Millard, 1985*) qui permet de corriger la mesure du capteur d'oxygène de l'influence de la pression. La correction des mesures est alors affinée par les comparaisons avec les mesures *in-situ*; en effet, les concentrations 'absolues' d'oxygène sont obtenues à partir d'une calibration effectuée à partir des dosages chimiques des échantillons d'eau de mer prélevés pendant la remontée lors de chaque profil.

Les données mesurées par la sonde ont été acquises à l'aide du logiciel SEASOFT (version 4.234) fourni par le constructeur de la sonde. Lors d'un profil les mesures de la sonde, effectuées à la fréquence de 24 Hz, sont transmises à un micro-ordinateur (de type PC) d'acquisition via le programme SEASAVE. Une fois la station terminée, une procédure de traitement préalable préconisée par le constructeur est appliquée aux données des profils de descente et de montée (voir le document joint au logiciel et indiqué en référence). La procédure exécute à la suite les programmes suivants :

- DATCNV : ce programme convertit les mesures brutes de la sonde en données physiques (pression, température, conductivité et les paramètres permettant de déduire l'oxygène dissous, qui sont le courant et la température).
- ALIGNCTD : ce programme avance de 3 secondes les mesures relatives à l'oxygène afin de les recalculer par rapport aux mesures de pression.
- WILDEDIT : ce programme vérifie les mesures et repère les mesures a priori incorrectes (s'écartant de plus de deux écart-types d'une moyenne calculée sur 24 mesures, soit toutes les secondes).
- CELLTM : ce programme applique une correction de l'inertie thermique pour le calcul de la conductivité.
- FILTER : ce programme applique un filtre 'passe-bas' à la conductivité (0.03 s) et à la pression (0.15s).
- LOOPEDIT : ce programme vérifie si le déplacement vertical de la sonde est correct pour effectuer les mesures. Il repère les mesures 1) dont la variation de pression est opposée au déplacement vertical moyen (descente ou montée) ou 2) pour lesquelles la vitesse verticale est inférieure à 25 cm/s.
- ROSSUM : ce programme lit dans un fichier de type '.ROS', généré par DATCNV, et inscrit dans un fichier de type '.BTL' des informations relatives aux mesures effectuées lors de la fermeture des bouteilles hydrologiques et préalablement repérées pendant l'acquisition.
- DERIVE : calcul de la dérivée en fonction du temps du courant d'oxygène et de la teneur en oxygène (en ml/l et en $\mu\text{mol/kg}$)
- BINAvg : ce programme effectue une moyenne des mesures et supprime les mesures 'mauvaises' repérées par BINAvg. Ici, la moyenne est effectuée en fonction de la pression tous les décibars.
- DERIVE : ce programme calcule la salinité pour les deux capteurs.
- SPLIT : ce programme sépare les profils de descente et de montée et ne conserve que le profil de descente.
- ASCIIOUT : ce programme crée un fichier sous le format « ascii » contenant les résultats des mesures pour tous les paramètres choisis.

Pour plus de détails sur ces procédures, prière de se référer au document SEABIRD relatif au logiciel, mentionné dans les références bibliographiques.

Après chaque palanquée de chaque station hydrologique, l'ensemble des mesures (brutes, et issues de ce traitement préliminaire) est systématiquement enregistré en double sur des disques magnéto-optiques.

3- Déroulement des travaux.

89 stations hydrologiques profondes ont été effectuées. En raison des multiples doubles palanquées (une de 0 à 500 m, l'autre jusqu'au fond) effectuées lors de stations très profondes (fond à plus de 4700 m), nous disposons de 109 profils hydrologiques. Une station 'zéro' a été effectuée entre Abidjan et la station n°1 située le long de 5°N au large de Tabou, afin notamment de vérifier les différents appareils installés sur le châssis de la bathysonde et les différentes chaînes d'analyse. Toutes les bouteilles ont été fermées à 2000 dbar (zone de gradient vertical minimum de la salinité et de l'oxygène). Trois autres stations 'tests' ont été effectuées pour permettre la réalisation de 'blancs' et tester la reproductibilité des analyses (salinité, oxygène, sels nutritifs et chlorofluorocarbones –fréons 11 et 12-). Au cours des trois stations 'test' (15, 34 et 49), les 24 bouteilles ont été fermées à 3000 dbar. 9 stations (stations 1 à 9) ont été effectuées le long de 7°W, entre 4°20'N et 1°30'N; 5 stations (stations n°10 à 14) ont été effectuées le long 1°30'N, entre 7°W et 10°N; 19 stations (stations n°14 à 33) ont été effectuées le long de la section méridienne 10°W, entre 1°30'N et 6°S; 14 stations (stations n°35 à 48) ont été effectuées le long de la section méridienne 0°E, entre 3°30'S et 2°N; 3 stations ont été effectuées le long de la méridienne 3°E (stations n°50 à 52), entre 2°N et 3°N; 24 stations ont été effectuées le long de la méridienne 6°E (stations 53 à 76) entre 3°45'N et 6°S, 8 stations (76 à 84) le long de 6°S et enfin, 4 stations (stations 85 à 89) ont été effectuées entre ce dernier point et Pointe Noire. A noter que, lors de la première palanquée de la station 43, les mesures de salinité et d'oxygène ne sont pas disponibles, les bouchons des capteurs n'ayant pas été retirés avant la mise à l'eau de la sonde...

La rosette SEABIRD est prévue pour supporter 24 bouteilles de prélèvement (des bouteilles de 8 litres ont été utilisées pendant la campagne) en PVC de type Niskin. Lors de doubles palanquées, généralement 6 bouteilles sont fermées lors de la première palanquée, de la surface à 500 m. Les prélèvements de la surface au fond (environ 20 mètres au-dessus) se répartissent ainsi :

- 30 bouteilles en 20 stations profondes (doubles palanquées).
- 24 bouteilles en 69 stations.

4- Calibration de la pression.

Les résultats des campagnes précédentes, et plus particulièrement d'EQUALANT-1999 et WESPALIS pendant lesquelles le même type de capteur de pression avait été utilisé, ont montré la précision et la fiabilité de celui-ci. Pendant toute la campagne WESPALIS, la pression a été contrôlée en surface et aucune dérive n'a été observée. Ainsi, il n'a pas été effectué d'étalonnage supplémentaire du capteur de pression, celui ayant été étalonné quelques mois avant la campagne lors de l'acquisition de la sonde.

5- Calibration de la température.

Les deux capteurs utilisés simultanément pour tous les profils ont été calibrés par SEABIRD le 2 Juin 2000 (soit un mois avant le début de la campagne).

Dès le début de la campagne le capteur de température n°32552 indiquait une augmentation brutale de 4/100° de °C à partir de 3000db. Cette brusque variation est probablement causée par un problème de compensation en pression au niveau du capteur. Aussi nous avons conservé pour toutes les calibrations que le capteur n° 32551 associé au capteur de conductivité n° 42340 (T1 et C1).

6- Calibration de la salinité.

6a. Principe :

La calibration des capteurs de conductivité est faite en comparant au niveau de fermeture des bouteilles les mesures de conductivité de la CTD lors du profil de montée avec la conductivité *in situ* des échantillons d'eau de mer prélevés dans ces bouteilles. La salinité de l'échantillon est convertie en conductivité *in situ* en utilisant les mesures de pression et de température calibrées de la sonde au niveau du prélèvement. Les mesures de conductivité de la sonde sont calibrées en utilisant un polynôme de degré 1 qui minimise les écarts d'une station ou d'un groupe de stations. Le calcul des coefficients du polynôme se fait par itérations successives. A chaque itération l'écart en conductivité entre l'échantillon et le modèle est comparé à l'écart-type de l'ensemble des écarts. Les échantillons qui s'écartent de plus de 2,8 fois l'écart-type sont rejetés et le processus de minimisation est repris. Ce dernier est arrêté lorsque tous les écarts sont inférieurs à ce seuil. Le modèle issu de la comparaison avec les mesures CTD du profil de montée est appliqué aux conductivités du profil de descente.

6b. Calibration :

Etant donné i) que seul le second capteur (T1) de température est pris en compte, et que ii) le capteur de conductivité (C1) associé au capteur T1 s'est bien comporté et n'a pas été changé pendant la campagne (voir tableau 1), le capteur de conductivité généralement considéré par la suite correspond à ce capteur C1. La visualisation des écarts entre les conductivités des échantillons d'eau de mer et les mesures brutes de conductivité du profil de montée de la sonde ([figure 1](#) ci-après) permet de choisir une stratégie de regroupement des stations pour le calcul des polynômes de calibration.

Campagne EQUALANT 2000

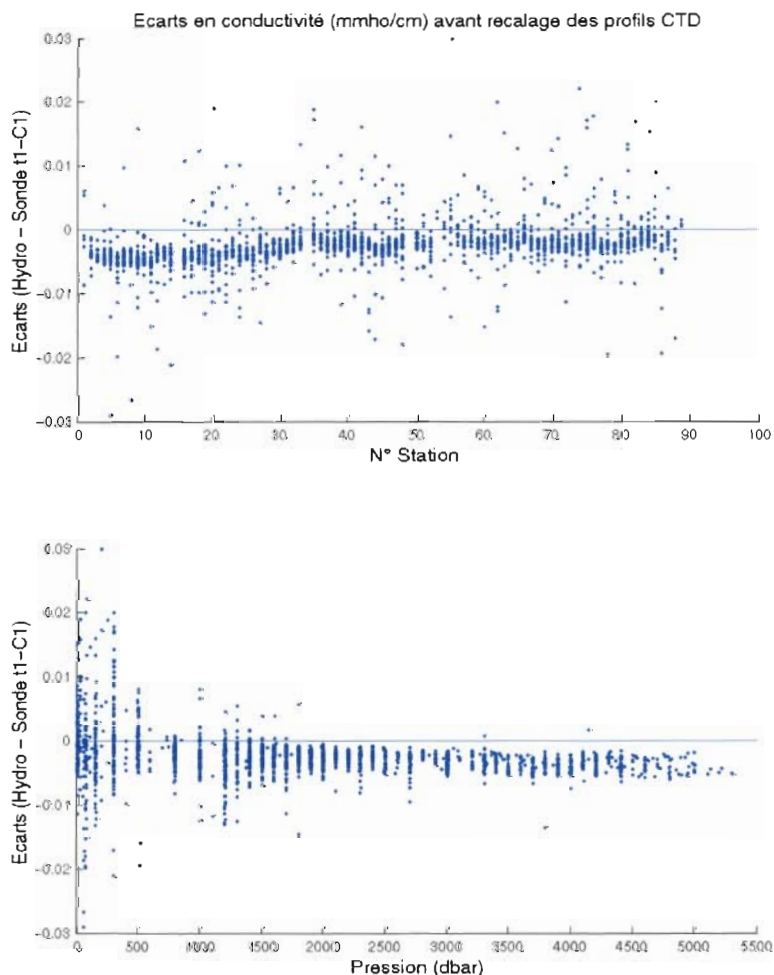


Figure 1: Ecart en conductivité, en mmho cm^{-1} , entre les mesures des échantillons et les mesures de la sonde lors du profil de remontée, avant calibration; en fonction du temps (numéro de station, en haut) et de la pression (en bas).

Le tableau 2 ci-après présente le découpage retenu ainsi que la déviation standard et les coefficients utilisés pour chaque groupe de stations. La conductivité C ainsi calibrée est obtenue par l'équation linéaire $C_{\text{corrigée}} = A \times C_{\text{mesurée}} + A0$.

A noter que la station 53 a été traitée à part, en raison d'un problème rencontré, et inexplicable, sur le capteur d'oxygène.

Tableau 2 :

Groupe de Stations	Déviation standard	A	A0
0-3	0.0009425	1.0001687	-0.0096047
4-11	0.0008981	1.0000501	-0.0061587
12-14	0.0009671	1.0000521	-0.0060311
16-21	0.0010858	0.9999947	-0.0041144
22-26	0.0008705	1.0000251	-0.0047308
27-33	0.0012068	1.0000337	-0.0038524
35-40	0.000989	1.0001745	-0.0078443
41-43	0.000587	1.0002284	-0.0099708
44-45	0.000641	1.000139	-0.007773
46-48	0.001005	1.0004396	-0.017062
50-76	0.000937	1.0002364	-0.009869
77-80	0.000723	1.0002049	-0.0092653
81-82	0.001005	1.0011874	-0.0409386
83-89	0.001467	1.0000966	-0.0045242

La figure 2 ci-dessous représente les écarts obtenus après la calibration des mesures de la sonde. Les valeurs des écarts sont très satisfaisantes, et n'indiquent aucune dérive au cours du temps ni de dépendance en pression.

Campagne EQUALANT 2000

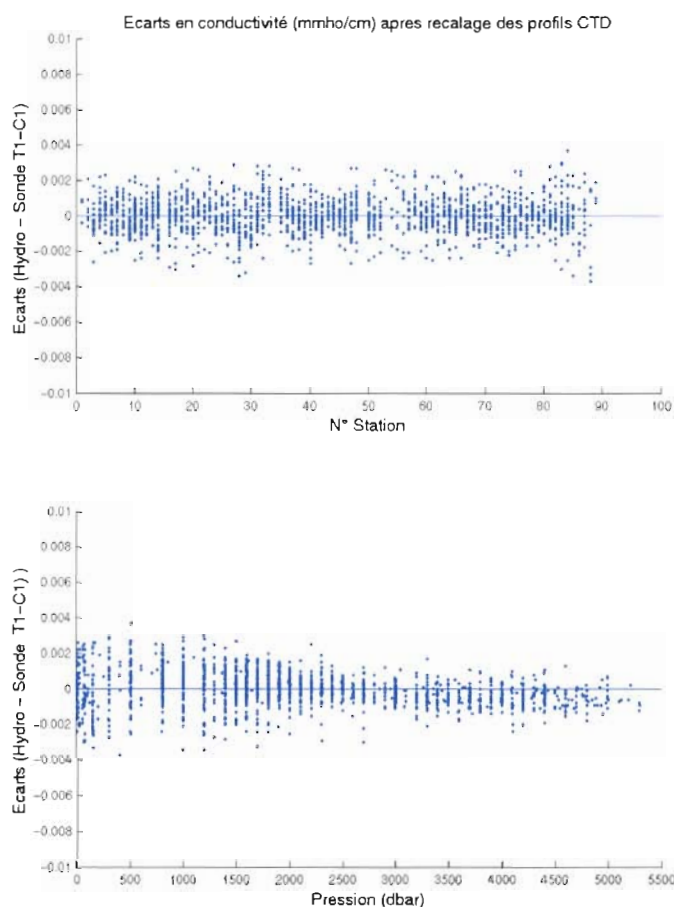


Figure 2 : Ecart en conductivité, en mmho cm^{-1} , entre les mesures des échantillons et les mesures de la sonde lors du profil de remontée, après calibration; en fonction du temps (numéro de station, en haut) et de la pression (en bas).

Les histogrammes présentés sur la figure 3 montrent que la distribution des écarts est bien centrée. De la surface au fond, l'écart est inférieur à $0.002 \text{ mmho cm}^{-1}$ dans 74% des cas, et inférieur à $0.001 \text{ mmho cm}^{-1}$ dans 35% des cas. Si l'on considère les mesures aux pressions supérieures à 1000 dbar, ces pourcentages deviennent respectivement 88% et 44%. Ces résultats sont plus satisfaisants que lors des deux campagnes ETAMBOT (ETAMBOT-1, en septembre-octobre 1995 et ETAMBOT-2, avril-mai 1996) et équivalents à ceux des deux campagnes EQUALANT 1999 et CITHER-1 (janvier-mars 1993), pour laquelle respectivement 26%, 17% et 38% des écarts considérés de la surface au fond étaient inférieurs à $0.001 \text{ mmho cm}^{-1}$ (Gouriou, 1997a, 1997b ; Billant et Brannelec, 1994).

Campagne EQUALANT 2000

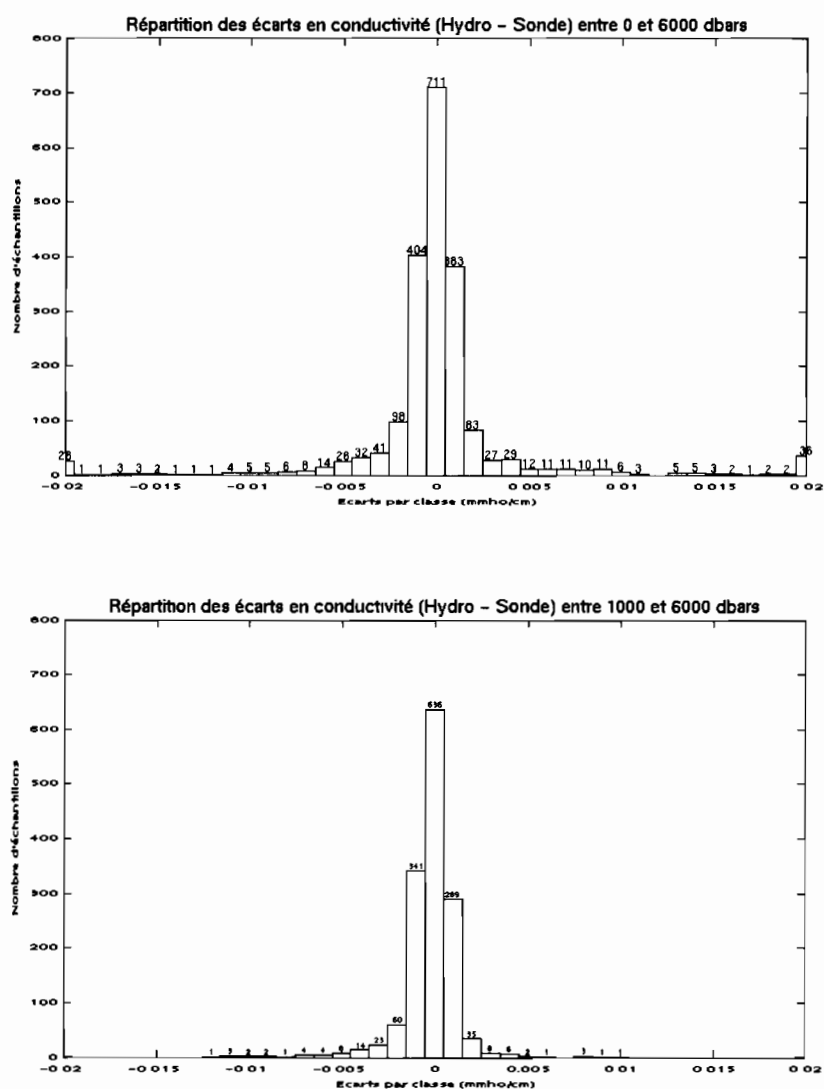


Figure 3: Histogramme des écarts entre les valeurs de conductivité issues de l'analyse des échantillons et des mesures de la sonde après calibration. Ces écarts sont considérés de la surface au fond (en haut) et de 1000 dbar au fond (en bas).

6c. Vérification des résultats :

Hormis les résultats statistiques, le contrôle de la qualité de la calibration du capteur de conductivité de la sonde peut être effectué de plusieurs manières :

- Par comparaison des diagrammes θ -S des profils 'descente' entre stations successives, afin de vérifier s'il n'y a pas de sauts dans la calibration.
- Par comparaison des diagrammes θ -S de la campagne EQUALANT 2000 avec ceux de profils effectués aux mêmes positions géographiques lors de campagnes antérieures.

6c.1 Comparaison des diagrammes θ -S entre stations successives.

Les diagrammes θ -S de toutes les stations de la campagne ont été contrôlés en comparant toutes les paires de stations voisines successives. En analysant les écarts de salinité observés à des températures potentielles inférieures à 2°C (3°C lorsque le fond est moins profond), il s'avère que les écarts excèdent exceptionnellement 1/1000^{ème}.

6c.3 Comparaison des diagrammes θ -S avec des campagnes antérieures.

Certaines stations de la campagne EQUALANT 2000, notamment le long de la section méridienne 10°W, répètent exactement des stations des campagnes CITHER-1 (à 4°30'S, en janvier 1993) et EQUALANT 1999 (août 1999). Au total, 14 comparaisons de diagrammes θ -S ont été effectuées, et les écarts ont été estimés à vue pour des températures potentielles inférieures à 2°C, et plus généralement inférieures à 1,5°C. Il s'avère que 84% des écarts observés sont inférieurs à 0.0015, comme cela est illustré sur la [figure 4](#) ci-dessous (ce qui correspond à la précision, indiquée par le constructeur, de l'appareil d'analyse PORTASAL utilisée pour la mesure de la salinité).

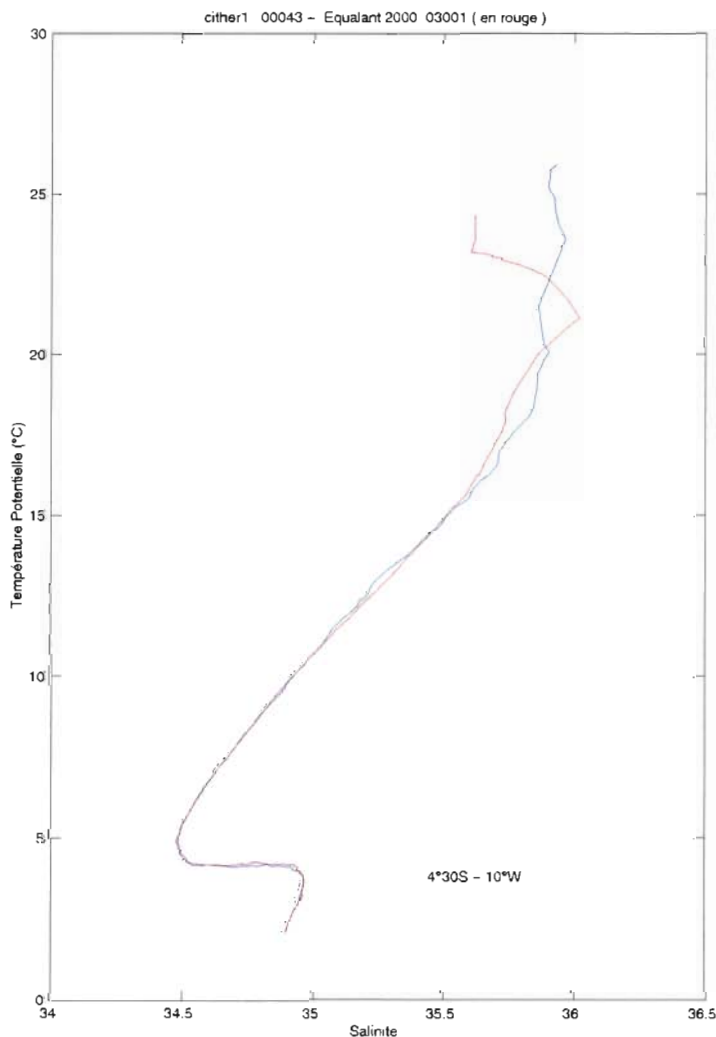


Figure 4: Diagrammes θ -S des profils 43 de Cither-1 (en bleu) et 30 d'Equalant 2000 (en rouge) obtenus à 10°W-4°30'S.

7- Calibration de l'oxygène.

7a. Calibration :

Les mesures du capteur d'oxygène de la sonde sont calibrées en comparant les résultats des analyses chimiques avec les mesures de la sonde obtenues à la même pression, en prenant en compte le profil de descente. En effet la calibration effectuée en prenant en compte le profil de remontée a été abandonnée d'une part à cause d'un phénomène d'hystérésis (de l'ordre de 5 $\mu\text{mol/kg}$) et d'autre part à cause des turbulences engendrées par la fermeture des bouteilles, les capteurs se trouvant au niveau inférieur de la rosette.

La calibration se fait en utilisant la méthode de *Owens et Millard* (1985). Le modèle d'ajustement nécessite une technique de régression non linéaire. Comme pour la calibration de la conductivité, les coefficients du modèle sont déterminés par itérations successives, pour un ensemble de stations.

La figure 5 montre les écarts, en $\mu\text{mol/kg}$, entre les mesures des échantillons et les mesures de la sonde extraites du profil de descente, avant la calibration des profils. Ce type de schéma aide notamment à choisir une stratégie de regroupement des stations pour le calcul des polynômes de calibration des mesures d'oxygène.

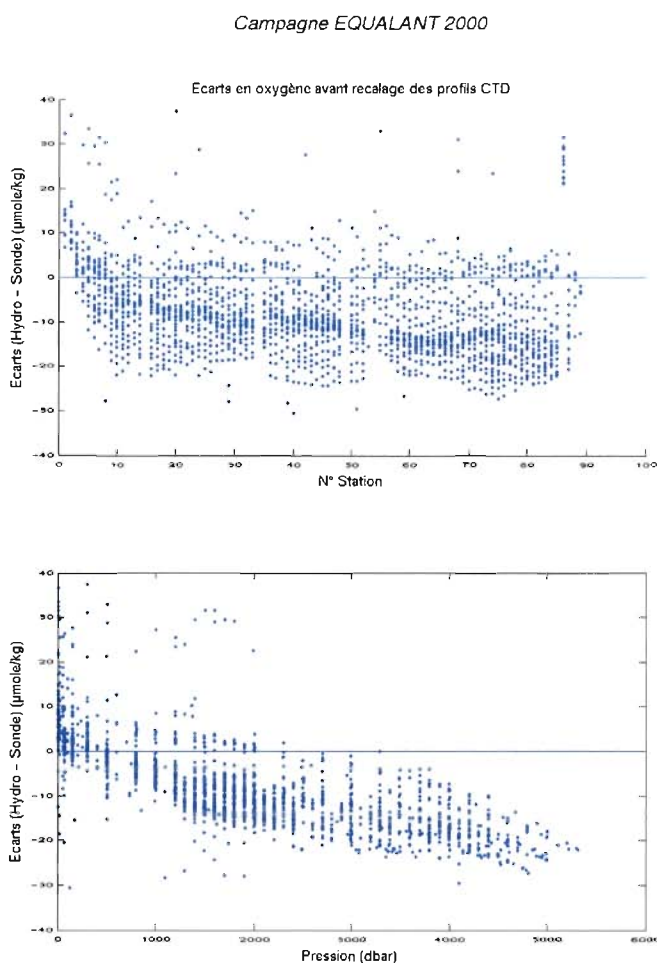


Figure 5: Ecart d'oxygène dissous (en $\mu\text{mol/kg}$), entre les mesures des échantillons et les mesures de la sonde lors du profil de descente, avant calibration; en fonction du temps (numéro de station, en haut) et de la pression (en bas).

Le tableau 3 ci-après présente le découpage retenu ainsi que le nombre d'échantillons utilisés pour le calcul, le nombre de ceux retenus lors de la minimisation, et la déviation standard pour chaque groupe de stations. Au total, 2003 échantillons ont été utilisés; 1844 ont été retenus, soit 92,1 % des mesures initiales.

Tableau 3 :

Groupe de Stations	Nombre d'échantillons considérés	Nombre d'échantillons retenus par le calcul	Déviati on standard
1-2	20	20	2.0
3-4	38	37	1.4
5-9	138	133	2.7
10-14	131	117	1.3
16-38	543	495	1.7
39-48	281	259	1.4
50	24	24	1.8
51-52	47	44	0.8
53	3	3	-
54	9	9	1.1
55-85	722	657	1.4
86	15	14	2.4
87	14	14	2.8
88	7	7	0.7
88-89	11	11	4.6

La figure 6 montre les écarts, en $\mu\text{mol/kg}$, entre les mesures des échantillons et les mesures de la sonde extraites du profil de descente, après la calibration des profils. Ces écarts sont tout-à-fait acceptables sur l'ensemble des stations et de la colonne d'eau. Ainsi, les histogrammes de la figure 7 montrent que la distribution des écarts est relativement bien centrée. Celle-ci l'est d'autant plus, et moins dispersée, que l'on considère les données situées à des profondeurs supérieures à 1000 dbars. Ainsi, l'écart est inférieur à 1 $\mu\text{mol/kg}$ dans 34 % des cas, et inférieur à 2 $\mu\text{mol/kg}$ dans 76 % des cas. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus pendant les campagnes ETAMBOT, pour lesquelles ces pourcentages sont de 33% et 74%, et de 27% et 65% pour ETAMBOT-1 et 2 respectivement (*Gouriou, 1997a, 1997b*) et également à ceux obtenus pendant la campagne EQUALANT 1999 (*Chuchla et al., 2000*).

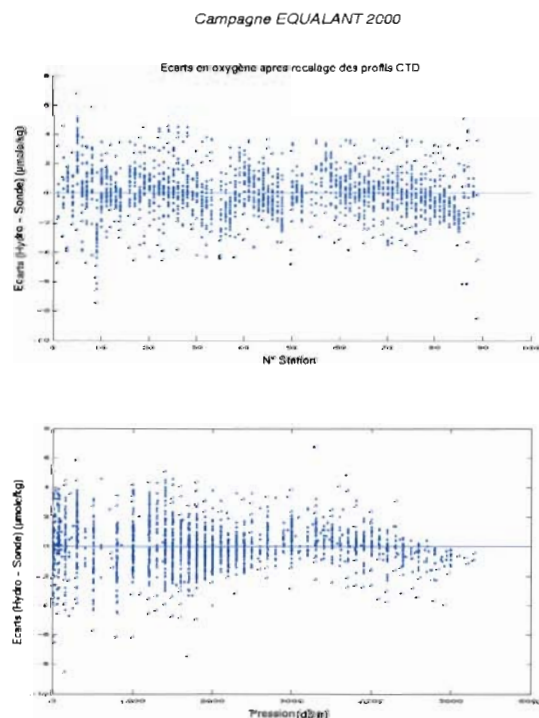


Figure 6 : Ecart s d'oxygène dissous (en $\mu\text{mol/kg}$), entre les mesures des échantillons et les mesures de la sonde lors du profil de descente, après calibration; en fonction du temps (numéro de station, en haut) et de la pression(en bas).

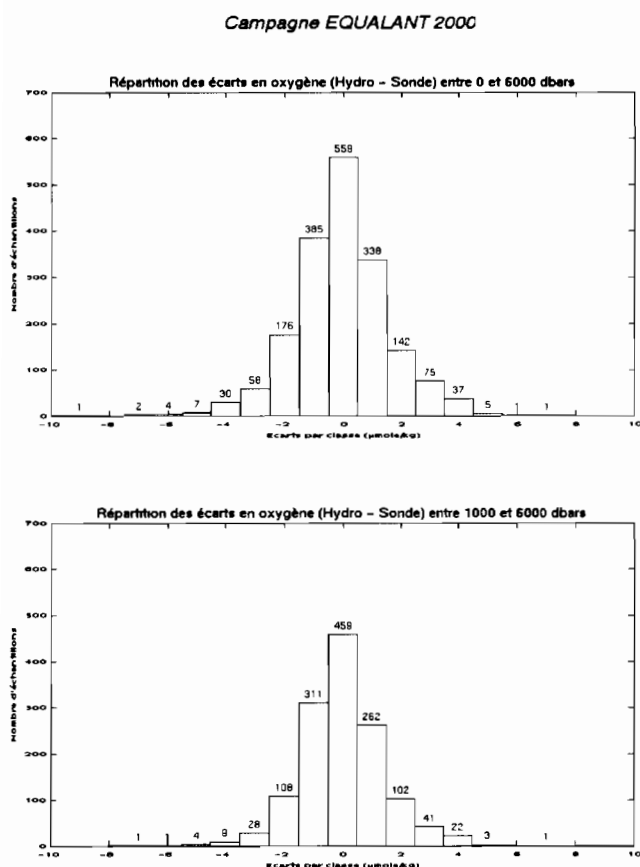


Figure 7 : Histogramme des écarts entre les valeurs d'oxygène dissous issues de l'analyse des échantillons et des mesures de la sonde après calibration. Ces écarts sont considérés de la surface au fond (en haut) et de 1000 dbar au fond (en bas).

7b. Vérification des résultats :

Le contrôle de qualité de la calibration du capteur d'oxygène a été effectué comme pour la conductivité, en comparant les diagrammes θ -O₂ des profils 'descente' entre stations successives (vérification de l'absence de sauts dans la calibration) et par comparaison des diagrammes θ -O₂ de la campagne Equalant2000 avec ceux effectués aux mêmes positions géographiques lors de campagnes antérieures.

7b.1 Comparaison des diagrammes θ -O₂ entre stations successives.

Les diagrammes θ -O₂ de toutes les stations ont été contrôlés en comparant toutes les paires de stations voisines successives. En analysant les écarts observés à des températures potentielles inférieures à 3°C, il s'avère que les écarts sont inférieurs à 2 µmol/kg, sauf pour les couples 6-7, 7-8, 8-9 et 9-10 (soit le long de 7°W au nord de 1°30'N), pour lesquels les écarts sont compris entre 3 et 5 µmol/kg.

7b.2 Comparaison des diagrammes θ -O₂ avec les campagnes antérieures.

Les profils d'oxygène ont été comparés avec des profils réalisés en des mêmes positions lors de campagnes antérieures, à savoir CITHER-1 (février 1993), et EQUALANT 1999 le long de 10°W. Au total, 20 comparaisons de diagrammes θ -O₂ ont été effectuées, et les écarts ont été estimés à vue pour des températures potentielles inférieures à 2°C, et plus généralement inférieures à 1,5°C. Il s'avère que tous les écarts observés sont inférieurs à 2 µmol/kg, comme cela est illustré sur la [figure 8](#) ci-dessous.

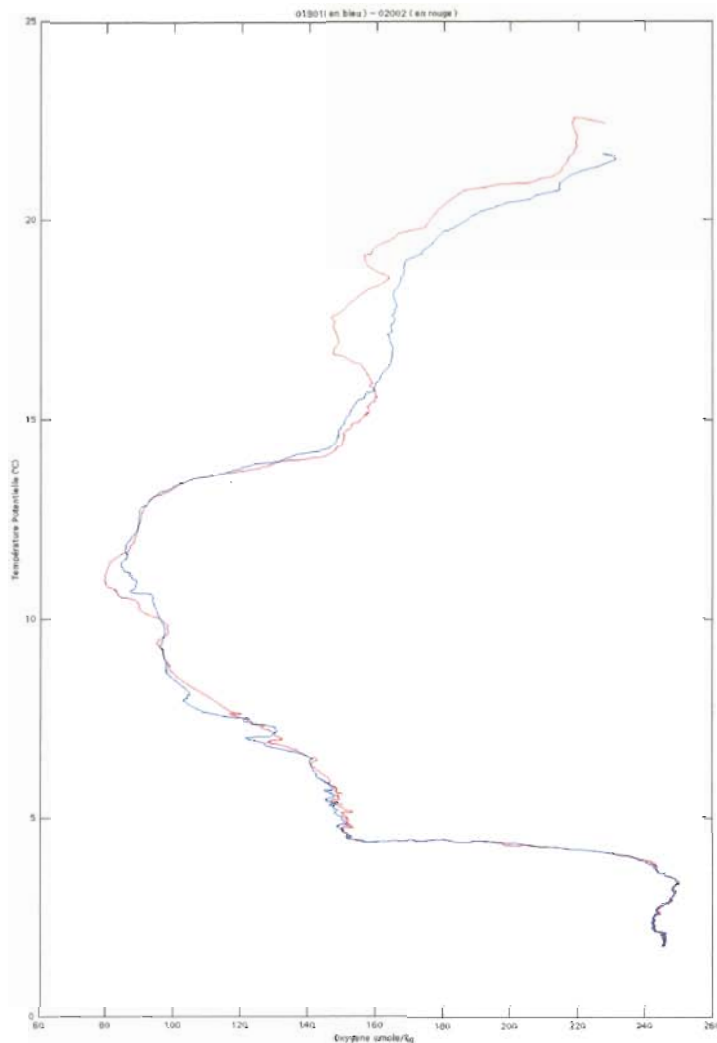


Figure 8 : Diagramme θ -O₂ des profils 24 d'Equalant 1999 (en bleu) et 85 d'Equalant 2000 (en rouge), obtenus à 10°W-2°S.

8- Contenu et format des fichiers générés.

Les fichiers, à raison d'un fichier par palanquée (ainsi, il y a 2 fichiers relatifs aux stations profondes ayant nécessité 2 palanquées), sont en ASCII à un type de format analogue (mais non identique - la position ici est fournie, mais le type d'instrument utilisé et la fréquence d'acquisition ne le sont pas -) à celui préconisé par le WHP (*Joyce et Corry, 1994*). Un exemple de début de fichier est fourni ci-dessous.

```

EQUALANT 2000
STRNBR 30 CASTNO 9 NO.RECORDS 151
DATE: 25/07/2000 05:09:23
LATITUDE: 0 1.9700 S LONGITUDE : 35 1.5300 W
CTDPRS CTDTMP CTDSAL CTD OXY NUMBER QUALT1
DBAR ITS-90 PSS-78 UMOL/KG OBS.
*****
0.00 27.5849 35.5149 156.90 45 2999
1.00 27.5849 35.5149 156.90 45 2999
2.00 27.5849 35.5149 156.90 45 2999
3.00 27.5849 35.5149 156.90 45 2222
4.00 27.5855 35.5178 185.73 58 2222
5.00 27.5863 35.5174 184.51 37 2222
6.00 27.5839 35.5149 184.89 31 2222
7.00 27.5898 35.5188 183.86 44 2222
8.00 27.5915 35.5197 184.46 34 2222

```

avec :

- 1^{ère} ligne : intitulé de la campagne.
- 2^{nde} ligne : indices de la station et de la palanquée, et nombre de données du profil.
- 3^{ème} ligne : date, et heure (TU).
- 4^{ème} ligne : position (degrés, minutes, centièmes).
- 5^{ème} ligne : code des paramètres (p, T, S, O₂, nombre de mesures considérées pour le calcul des valeurs, code de qualité des valeurs)
- 6^{ème} ligne : unité des paramètres.

La signification des codes de qualité est la suivante :

<u>Code</u>	<u>Définition</u>
1	Non calibré
2	Mesure acceptable
3	Mesure douteuse
4	Mauvaise mesure
5	Non reporté
6	Interpolé sur un intervalle supérieur à 2 bar
7	Pics anormaux éliminés
8	Pas défini pour les mesures CTD-O ₂
9	Non échantillonné

A noter que :

- les mesures sont fournies tous les décibars.
- les valeurs les plus proches de la surface sont extrapolées (de façon constante) jusqu'à la surface p=0 lorsqu'elles ne se trouvent pas initialement à ce niveau.
- les valeurs du néphélomètre ne sont pas mentionnées dans les fichiers.

9- Références bibliographiques.

- Billant, A., et P. Brannelec, Calibration des mesures CTD-O₂; Campagne CITHER-1 N/O ATALANTE (2 janvier – 19 mars 1993), Recueil de données, Vol.2 : CTD-O₂, Rapport Interne LPO (94-04), 1994.
- Chuchla, R., B. Bourlès et Y. Gouriou, Calibration des mesures CTD-O₂, Campagne EQUALANT 99, N.O. Thalassa 13 juillet – 21 août 1999, Rapport de campagne à la mer, Rapport interne LODYC n°2000-01, décembre 2000.
- Gouriou, Y., Calibration des mesures CTD-O₂, dans « Campagne ETAMBOT 1, Recueil de données, Vol.1/2 : Introduction, Mesures 'en route', Courantométrie ADCP, mesures CTDO₂, Coupes de distributions verticales », Doc. Scient. du Centre ORSTOM de Cayenne, O.P. 22, 1997a.
- Gouriou, Y., Calibration des mesures CTD-O₂, dans « Campagne ETAMBOT 2, Recueil de données, Vol.1/2 : Introduction, Mesures 'en route', Courantométrie ADCP, mesures CTDO₂, Coupes de distributions verticales », Doc. Scient. du Centre ORSTOM de Cayenne, O.P. 24, 1997b.
- Joyce, T., et C. Corry, Requirements for WOCE hydrographic programme data reporting, WHP Office Report 90-1, WOCE Report n°67/91, Woods Hole, Mass., USA, 1994.
- Owen, W.B., et R.C. Millard, A new algorithm for CTD oxygen calibration, Journal of Physical Oceanography, 15, 621-631, 1985.
- Seabird Electronics, Inc., CTD Data Acquisition software, SEASOFT, version 4.234, Washington, USA, 2 octobre 1998 (email : seabird@seabird.com).
- World Ocean Circulation Experiment : WOCE Experiment Manual, WHP Office Report 90-1, WOCE Report No. 67/91, Rev.2, Woods Hole, Mass., USA, May 1994.

Mesures de salinité

Rémy Chuchla(*), Briac Le Vu(**)

(* Centre IRD de Bretagne

(**) Université Paris 6 - LBCM (Laboratoire de Biogéochimie et Chimie Marines)

Définition

La salinité est représentée par un rapport de conductivité, qui pour une *eau de mer standard* à 15°C, contenant par définition 32,4356g de KCL (UNESCO, 1981), a pour valeur 35,0000 PSU (*Practical Salinity Unit*). C'est à partir de cette définition que la relation permettant de calculer la salinité a été établie:

$$S = a_0 + a_1R_T^{1/2} + a_2R_T + a_3R_T^{3/2} + a_4R_T^2 + a_5R_T^{5/2} \\ + (T-15) / (1+k(T-15)) * (b_0 + b_1R_T^{1/2} + b_2R_T + b_3R_T^{3/2} + b_4R_T^2 + b_5R_T^{5/2})$$

avec:

$a_0 = 0,0080$	$b_0 = 0,0005$	$k = 0,0162$
$a_1 = -0,1692$	$b_1 = -0,0056$	
$a_2 = 25,3851$	$b_2 = -0,0066$	
$a_3 = 14,0941$	$b_3 = -0,0375$	
$a_4 = -7,0261$	$b_4 = 0,0636$	
$a_5 = 2,7081$	$b_5 = -0,0144$	
$\Sigma a_i = 35,0000$	$\Sigma b_i = 0,0000$	

R_T : Rapport de conductivité mesuré

T: Température du bain thermostaté du salinomètre

Remarque: Cette relation n'est valable que pour des mesures effectuées à une pression de 1 atm, pour une échelle de température comprise entre -2°C et 35°C et pour une salinité comprise entre 2 et 42 PSU.

Les mesures de salinité ont été effectuées et analysées selon les mêmes procédures que pour la campagne EQUALANT-99 (voir *Chuchla et Marin, 2000*).

Prélèvement des échantillons

Les échantillons sont recueillis dans des flacons de 200 ml dont l'étanchéité est assurée par une capsule en plastique et un bouchon en bakélite. Avant chaque prélèvement trois rinçages des flacons, des capsules et des bouchons sont effectués. Les échantillons sont entreposés dans le laboratoire biologique de N/O Thalassa, dont la température est régulée (21°C). Les échantillons sont analysés dans les 24 heures qui suivent leur prélèvement.

Equipement

a) Appareils de mesure

Les mesures sont faites avec deux salinomètres Guildline de type Portasal modèle 8410.

La résolution de ces appareils est de 0,0003 équivalent PSU, à 15°C et pour une salinité de 35 PSU.

Salinomètre utilisé	Stations analysées
S001 (IRD 1991)	0-47, 48-55, 57, 59 à 65, 67 à 84, 87 à 89
S002 (IRD 1999)	47 à 48, 56, 58, 66, 85, 86

Suite aux problèmes techniques rencontrés au cours de cette campagne et pour ne pas interrompre le rythme des analyses nous avons été conduits à utiliser les deux appareils à notre disposition.

b) Eau Normale

La calibration du salinomètre est effectuée grâce à des ampoules d'eau normale (IAPSO, Standard Seawater) du lot P134 ($K_{15}=0,99989$ du 4 juin 1998 utilisé pour l'étalonnage des stations 0 à 31, 44-2 à 55, 57, 59 à 65 ,67 à 84 et 87 à 89) et du lot P136 ($K_{15}=0,99992$ du 9 février 1999 utilisé pour les stations 32 à 44-1, 56, 58, 66, 85 et 86) fabriquées par Ocean Scientific International à Wormley (Royaume Uni).

Mesures

c) Calibration ou standardisation du salinomètre

La température du bain thermostaté est fixée pour cette campagne à 23°C, c'est à dire 2°C de plus que la température ambiante du laboratoire, et ceci afin d'améliorer les conditions d'analyses.

Initialement le salinomètre est standardisé en utilisant au moins deux ampoules d'eau normale. Ensuite tous les jours, avant de commencer une série d'analyses, la standardisation est vérifiée puis ajustée si la valeur de la salinité s'écarte de plus de 0,0005 PSU de la valeur de la standardisation précédente. Deux ampoules d'eau normale, au moins, sont utilisées dans le cas où il est nécessaire de refaire la standardisation.

d) Analyse des échantillons

Au cours de la journée, après l'analyse de deux stations, la stabilité du salinomètre est contrôlée en vérifiant la standardisation avec une nouvelle ampoule d'eau normale. La nouvelle valeur lue est notée sur la feuille d'analyse de la station. En cas de dérive du salinomètre, les valeurs de salinité notées lors de l'analyse des échantillons sont corrigées en admettant une dérive linéaire. Puis une nouvelle standardisation est effectuée avec au moins deux ampoules d'eau normale. La dérive moyenne entre deux standardisations (après analyse de deux stations) est de $-2,1.10^{-5} \pm 0,00045$ PSU.

L'opération de rinçage de la cellule de mesure du salinomètre avec de l'eau de l'échantillon est répétée trois fois avant de faire une première lecture. Après une nouvelle évacuation et remplissage de la cellule, une deuxième mesure est effectuée. Si l'écart de salinité entre les deux mesures est supérieur à 0,0002 PSU, une autre lecture est nécessaire. La mesure est considérée comme bonne quand elle est reproductible au moins deux fois avec un écart de salinité de moins de 0,0002 PSU.

La mesure retenue est la moyenne de ces deux lectures.

Pendant cette campagne les valeurs obtenues lors des vérifications en fin d'analyse étant satisfaisantes, nous n'avons pas effectué de corrections sur les mesures.

Résultats

e) Précision

La précision des résultats de mesure est principalement appréciée par la répétabilité des résultats sur des séries d'échantillons identiques prélevés à un même niveau de profondeur au cours de 3 stations "tests" présentées ci-après:

Les prélèvements, lors des stations 0, 15, 34 et 49 ont été faites à des pressions égales à 2000 et 3000 dbar (zones de gradient vertical minimal de la salinité), ce qui nous permet de mieux estimer la répétabilité des résultats au cours de la campagne EQUALANT 2000.

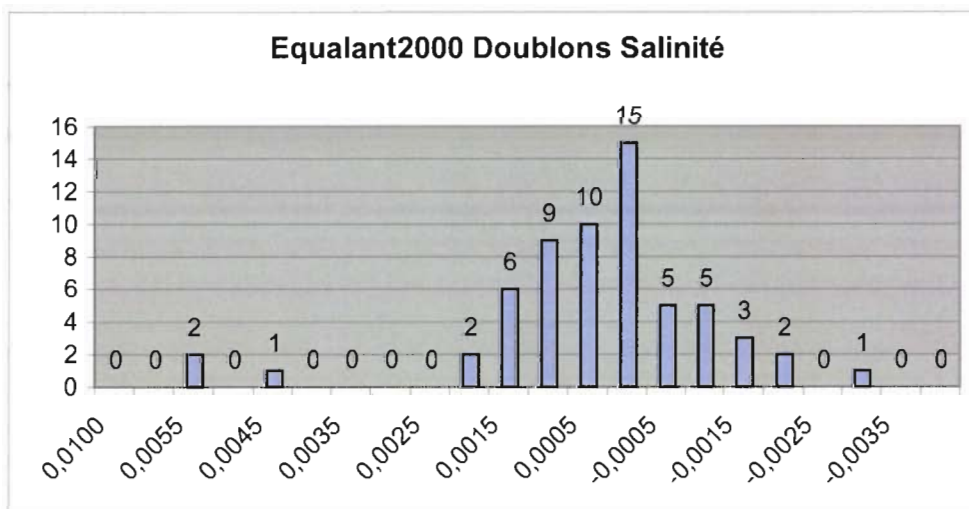
STATION	0	15	34	49
Niveau de fermeture des bouteilles	2000	3000	3000	3000
Nombre de bouteilles	21	22	23	24
Valeur moyenne de salinité	34.9566	34.9105	34.8963	34.9113
Ecart maximum à la moyenne	0,000594	0,0004415	0,0003974	0.0004021
Ecart type des valeurs mesurées	0,0006622	0,0003393	0,0004836	0.0005376

On peut donc considérer d'après les résultats de l'ensemble des stations "tests", que la précision des mesures de salinité durant EQUALANT 2000 est en moyenne 0,0005 PSU.

Pour la station 15, 1 point s'écartant anormalement des autres points a été rejeté. Si l'on prend l'ensemble des 24 mesures la moyenne est de 34.9115, l'écart à la moyenne de 0.0018 et l'écart type de 0.0023, ces valeurs restant dans les normes de précision de l'appareil.

La précision des mesures est également estimée par l'analyse de doublets d'échantillons obtenus à partir de deux bouteilles fermées au même niveau tout au long de la campagne.

L'analyse nous montre que pour les 61 doublets effectués à une pression comprise entre 0 et 5000 dbar, 64% des écarts entre doublets sont inférieurs à 0,001 PSU et 93% inférieurs à 0,003 PSU.



Le tableau suivant compare les résultats de la campagne à ceux obtenus lors de campagnes WOCE (CITHER 1, ETAMBOT 1 et ETAMBOT 2) et EQUALANT 99.

	CITHER1	ETAMBOT1	ETAMBOT2	EQUALANT99	EQUALANT2000
Pression de 0 à 5000 dbar					
Ecart type	0,0026	0,0009	0,0010	0.0015*	0.0025
Ecarts inférieurs à 0.001 PSU	51%	78%	73%	81%	64%
Ecarts inférieurs à 0.003 PSU	85%	94%	97%	97%	93%

Tableau de comparaison des résultats obtenus par le traitement des doublets pour les campagnes CITHER1 (1993), ETAMBOT 1 (1995), ETAMBOT 2 (1996), EQUALANT 99 (1999) et EQUALANT 2000 (2000).

*La valeur (0.0006) mentionnée dans ce tableau du rapport d'EQUALANT 99 est erronée.

Le calcul de l'écart type ('Standard deviation' selon le *manuel DOE*, 1994), sur le lot de 61 doublets, par la formule:

$$S = \{ \sum d_i^2 / 2n \}^{1/2}$$

d_i: écart entre les doublets
n_i: nombre de doublets

permet d'estimer la répétabilité des résultats de salinité à 0.0019 PSU.

Références bibliographiques

- A. Billant et P. Branellec, 1994. Mesures de salinité et oxygène dissous. In : Recueil de données, Campagne CITHER1, volume ¾ : Traceurs Géochimiques, *Doc Scient. ORSTOM Cayenne*, N°O.P. 15, 7-30.
- R. Chuchla et F. Marin, 2000. Mesures de salinité, Campagne EQUALANT-99, N.O. Thalassa, 13 juillet-21 août 1999, Recueil de données, Rapport Interne LODYC n°2000-01.
- DOE, 1994. Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water ; version 2. A.G. Dickson & C. Goyet, eds.
- WOCE, 1994. WOCE Operations Manual. Vol. 3, Part 3.1.3 : WHP Operations and methods. WHP Office Report WHPO 91-1, WOCE report N°68/91, Revision 1, November 1994.
- P.Fournier et C. Oudot, 1997 - Mesures de salinité, Campagne ETAMBOT-1, Recueil de données, volume 2/2, Documents Scientifiques du Centre ORSTOM de Cayenne, n°O.P. 23.
- P.Fournier et C. Oudot, 1997 - Mesures de salinité, Campagne ETAMBOT-2, Recueil de données, volume 2/2, Documents Scientifiques du Centre ORSTOM de Cayenne, n°O.P. 25.
- UNESCO, 1981. Background papers and supporting data on the practical Salinity Scale 1978.
- UNESCO Technical Papers in marine Science, N°37, 144 p.

Mesures d'oxygène

Rémy Chuchla (), Aurélien Paumier (**), Banhoro Rigobert (***)
et François Baurand (*)*

() Centre IRD de Bretagne*

*(**) Lodyc / Paris*

*(***) Centre IRD de Bouaké (Côte d'Ivoire)*

Les mesures de l'oxygène ont été effectuées et analysées selon les mêmes procédures que pour la campagne Equalant 99 (voir *Chuchla et al.*, 2000).

1. Technique d'échantillonnage

Les échantillons sont recueillis dans des flacons, en verre à collerette et munis d'un bouchon plongeur, d'environ 120 ml. Lors du prélèvement, une prise de température est effectuée avant de laisser déborder trois fois l'équivalent de volume du flacon.

Après addition successive de 1 ml de chaque réactif de fixation ($MnCl_2$, puis $NaOH/NaI$), le flacon est hermétiquement fermé et agité pendant 30 secondes environ. Lorsque l'ensemble des échantillons a été prélevé, les flacons sont retournés un à un pour remise en suspension du précipité, puis on remplit leurs collerettes avec de l'eau distillée pour éviter l'entrée d'air et ensuite ils sont entreposés à l'abri de la lumière dans le conteneur laboratoire à la température ambiante de $22 \pm 1^\circ C$ pendant un minimum de 3 heures avant d'être analysés dans un délai maximum de 12 heures.

2. Analyse des échantillons

a) Mode opératoire

Les conditions opératoires et la méthode d'analyse mise au point au centre IRD de Brest sont conformes aux recommandations du manuel d'opération WOCE (*WOCE Opération Manual*, 1991). Elle est identique à celle suivie pendant les campagnes WOCE CITHER 1, ETAMBOT 1 et ETAMBOT 2 (*Billant et Branellec*, 1994, *Fournier et al.*, 1997a,b) et la campagne EQUALANT 99 (*Chuchla et al.*, 2000).

Les analyses sont effectuées dans le conteneur laboratoire dont la température est contrôlée et fixée à $22 \pm 1^\circ C$. Cette valeur n'a pas été stable : elle a pu varier entre $18^\circ C$ et $27^\circ C$ au cours d'une journée. Pendant l'analyse d'une série d'échantillons des stations l'écart en température n'a pas dépassé $3^\circ C$ et est restée comprise entre 20 et $22^\circ C$ lors des étalonnages.

La totalité de l'échantillon est acidifiée dans le flacon de prélèvement et l'iode libéré est dosé par une solution de thiosulfate de sodium dont la normalité est de l'ordre de 0.02N.

Nous avons utilisé le titroprocesseur 751 GPD Titrimo Metrohm. Cet appareil a été adopté lors de la campagne EQUALANT 99 et a remplacé l'ancien système utilisé lors des précédentes campagnes CITHER 1, ETAMBOT 1 et ETAMBOT 2 (burette à piston Dosimat 665 Metrohm et Titroprocesseur 682 Metrohm associé à une électrode de platine).

La vitesse d'injection du thiosulfate est maximale jusqu'à détection du début de saut de potentiel, puis ralentie et se fait pas à pas par injection de $0,001 \text{ cm}^3$ autour du point

d'équivalence. La stabilisation du potentiel, après dépassement de l'équivalence, provoque l'arrêt de l'injection du thiosulfate et le titroprocesseur détermine automatiquement le point d'inflexion sur la courbe de potentiel et le volume de thiosulfate associé, qu'il suffit de noter.

La méthode de dosage présente une très bonne répétabilité des résultats car entièrement automatisée. La qualité des mesures est néanmoins très dépendante des précautions prises au cours des prélèvements des échantillons, de la vérification de la volumétrie et de la concentration des réactifs.

b) Précautions particulières

(1) Volumétrie

La verrerie utilisée (flacons de prélèvement, dispensettes pour réactifs, pipette automatique, ...) est calibrée suivant le principe de la double pesée et les indications de la balance sont vérifiées puis corrigées par comparaison avec deux séries de poids étalons. Toutes les corrections recommandées par WOCE (température, poussée de l'air,...) ont été appliquées aux pesées.

Le volume des flacons de prélèvement est déterminé à $\pm 0,003 \text{ cm}^3$ en répétant trois fois l'opération de double pesée. Le volume moyen des flacons utilisés est de $116,98 \pm 1.78 \text{ cm}^3$.

Le volume des 2 dispensettes (introduction des réactifs de fixation dans les prélèvements) est déterminé à $0,998 \text{ cm}^3$ (MnCl_2) et $0,994 \text{ cm}^3$ (NaOH/NaI) à 20°C ; on apporte donc une correction de $-0,008 \text{ cm}^3$ sur le volume théorique (2 cm^3 à 20°C) des réactifs introduits dans l'échantillon.

Le volume de la burette automatique délivrant l'iodate de potassium pour déterminer la normalité du thiosulfate de sodium est égal à $5,0019 \text{ cm}^3$ à 20°C (volume théorique: 5 cm^3). Une correction de $0,0019 \text{ cm}^3$ est par conséquent appliquée sur chaque volume de iodate de potassium délivré, rapporté à une température de 20°C .

L'indication de volume de la burette à piston qui délivre le thiosulfate de sodium pour le dosage a été vérifiée en plusieurs points dans la gamme utile comprise entre 1 et 10 cm^3 . Pour un volume théorique de 5 cm^3 , le volume délivré par la burette est: $4,99985 \text{ cm}^3$ à 20°C . Une correction de $-0,00015 \text{ cm}^3$ est aussi appliquée sur chaque volume de thiosulfate de sodium délivré rapporté à une température de 20°C . Toutefois cette correction n'est pas indispensable, le volume affiché par la burette Dosimat l'étant à 0.001 cm^3 près.

(2) Concentration des réactifs

La concentration des réactifs de fixation de l'oxygène est celle indiquée par Carpenter (1965). Ils sont préparés avec des produits de pureté garantie "pour analyse".

La solution de iodate de potassium qui sert de référence pour les mesures est préparée à partir d'une pesée de cristaux dont le degré de pureté ($100 \pm 0,05\%$) est garanti par un certificat d'analyse du fournisseur (BAKER). La dissolution de $3,5671 \text{ g}$ de KIO_3 dans une fiole jaugée de 5000 cm^3 fournit une solution de référence dont la normalité est de $1,99958.10^{-2} \text{ N} \pm 0,0005.10^{-2}$ à 20°C .

L'incertitude admise dans la valeur de la normalité correspond à la somme de l'incertitude sur le volume de la fiole jaugée indiquée par le fournisseur ($1,2 \text{ cm}^3$ à 20°C), soit 2.10^{-6} et de celle sur la pesée ($\pm 0,01 \text{ mg}$), soit 3.10^{-6} . Cette solution de référence est conservée dans trois flacons ambrés d'un litre, à l'abri de la lumière, en attente d'utilisation pendant la campagne.

(3) Contrôle des réactifs pendant la campagne

(a) Détermination du blanc d'analyse

Quotidiennement, avant la série d'analyses des échantillons, 3 dosages successifs permettent de déterminer le blanc des réactifs en mélangeant 1cm^3 de chacun des trois réactifs à 100cm^3 d'eau distillée. Pendant toute la campagne la valeur moyenne du blanc obtenue est $0,005 \pm 0,003\text{cm}^3$.

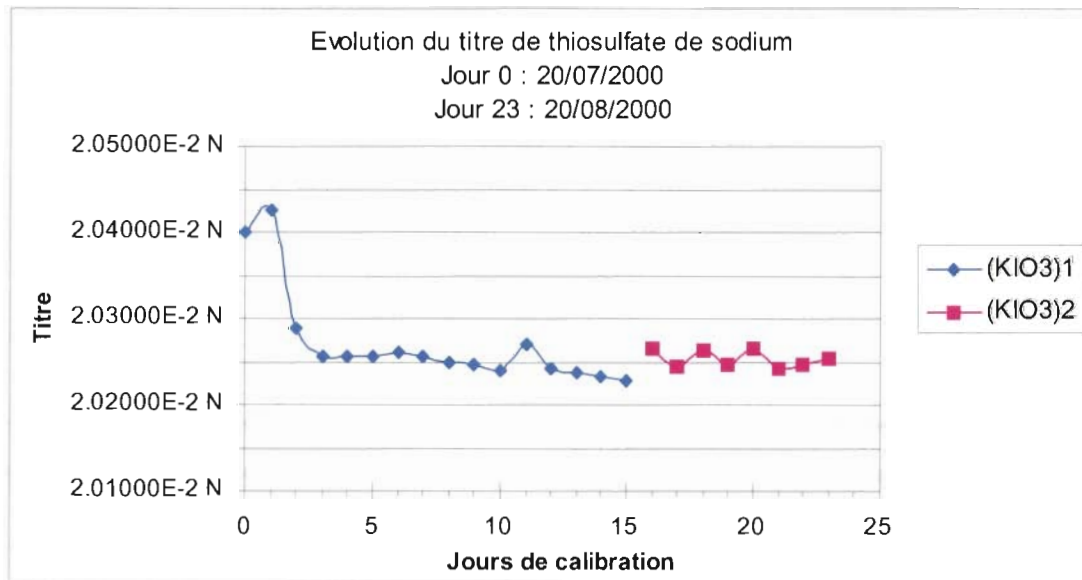
(b) Détermination de la normalité du thiosulfate de sodium

Une solution de 25 litres de thiosulfate a été préparée en début de campagne. La préparation donne une normalité voisine de 0,02 N. Chaque jour, la burette automatique qui délivre le thiosulfate est complétée à 1 litre avec la solution de stockage. La normalité du thiosulfate est obtenue par un dosage quotidien de 5 prises d'essai d'iodate de potassium de référence.

La moyenne de ces 5 dosages permet de déterminer la "valeur journalière" de la normalité si l'écart type est jugé acceptable. Dans le cas contraire, une nouvelle série est effectuée. Le suivi quotidien de l'évolution de la normalité du thiosulfate permet de détecter toute anomalie et de procéder à toutes les vérifications avant d'admettre cette valeur applicable aux analyses du jour.

La courbe présentée ci-après permet de visualiser l'évolution "journalière" du titre du thiosulfate.

On remarque que le titre n'a pas évolué sur l'ensemble de la durée de la campagne, si ce n'est légèrement ($1/10.000^{\circ}$) en tout début. A titre de comparaison il avait évolué de 1% en 40 jours pendant la campagne EQUALANT 99 (*Chuchla et al.*, 2000), de 0,07% en 28 jours pendant la campagne ETAMBOT 1 (avec addition de borate *Fournier et al.*, 1997a) et de 1,6% en 40 jours durant CITHER 1, (sans addition de borate, *Billant et Branellec*, 1994).



c) Détermination de la concentration d'oxygène des échantillons

Les dosages sont effectués à une température moyenne de 22°C , ce qui oblige à effectuer les corrections de température sur les volumes des réactifs de iodate et de thiosulfate délivrés. La totalité du volume prélevé étant dosée directement dans le flacon, la

concentration d'oxygène est obtenue en utilisant la formule recommandée dans le document WOCE Opération Manual (1991).

$$O_2 \text{ (ml l}^{-1}\text{)} = \frac{(V_x - V_{\text{blk,dw}}) * V_{IO_3^-} * N_{IO_3^-} * 5598}{(V_{\text{std}} - V_{\text{blk,dw}})} - 1000 * DO_{\text{reg}} \\ (V_{\text{bot}} - V_{\text{reg}})$$

avec:

V_x	= volume de thiosulfate pour le dosage de l'échantillon (cm ³)
$V_{\text{blk,dw}}$	= volume de thiosulfate pour le blanc avec eau distillée (cm ³)
V_{std}	= volume de thiosulfate pour la détermination de la normalité (cm ³)
V_{bot}	= volume du flacon de prélèvement (cm ³)
V_{reg}	= volume des réactifs introduits dans l'échantillon (cm ³)
$V_{IO_3^-}$	= volume de la prise d'essai du iodate de référence (cm ³)
$N_{IO_3^-}$	= normalité de l'iodate
DO_{reg}	= 0.0017 cm ³ , valeur absolue de l'apport d'oxygène par les réactifs (Murray et al, 1968).

Dans le cas d'EQUALANT 2000, nous avons les valeurs suivantes :

$V_{\text{blk,dw}}$	= " valeur journalière"
V_{std}	= " valeur journalière"
V_{reg}	= 2 cm ³ à 20°C (après correction)
$V_{IO_3^-}$	= 5 cm ³ à 20°C (après correction)
$N_{IO_3^-}$	= 1.99959.10 ⁻² N

Le résultat du calcul de concentration d'oxygène est converti en micromoles par kilogramme (μmol kg⁻¹), et tous les contrôles sont effectués dans cette unité.

La température des échantillons étant notée au moment des prélèvements, la masse d'échantillon sur laquelle est fixé l'oxygène est connue.

Le calcul suivant permet de transformer toutes les valeurs, exprimées en ml l⁻¹, en micromoles par kilogramme (μmol kg⁻¹) en utilisant la formule :

$$O_2 \text{ (}\mu\text{mol kg}^{-1}\text{)} = \frac{44.660 * O_2 \text{ (ml l}^{-1}\text{)}}{\rho_{\text{sw}}}$$

dans lequel ρ_{sw} correspond à la densité de l'échantillon à la température de prélèvement (Millero and Poisson, 1981).

3. Résultats

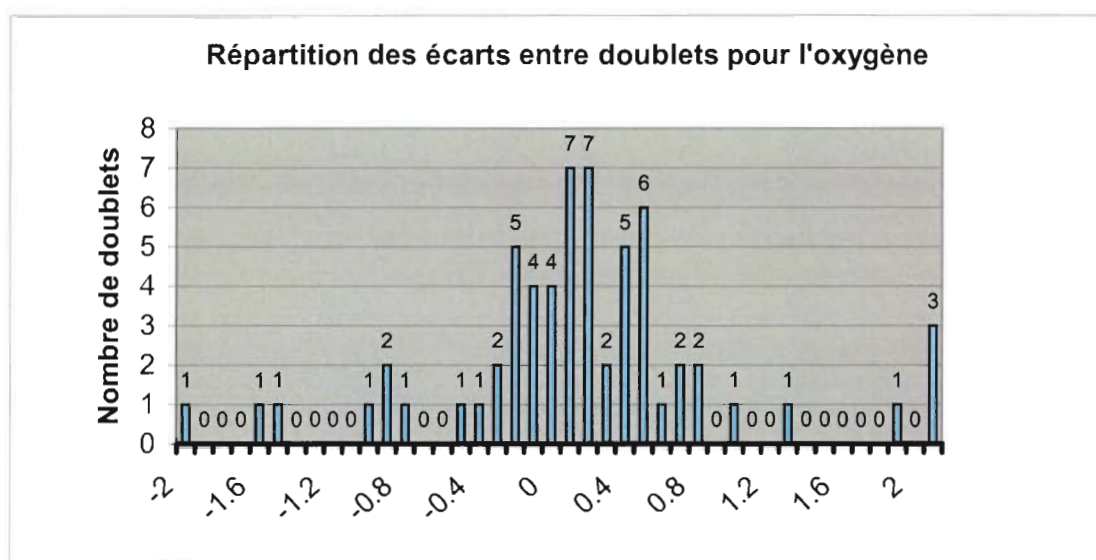
La précision des résultats de mesure est appréciée principalement par la répétabilité des résultats sur des séries d'échantillons identiques prélevés à un même niveau de profondeur au cours de 3 stations "tests" présentées ci-après:

Les stations 0, 15, 34, et 49 ont été prélevées à des pressions égales à 2000 et 3000 dbar (zones de gradient vertical minimale d'oxygène), ce qui nous permet de mieux estimer la répétabilité des résultats au cours de la campagne EQUALANT 2000.

Station	0	15	34	49
Niveau de fermeture des bouteilles	2000	3000	3000	3000
Nombre de bouteilles	20	23	21	24
Valeur moyenne de l'Oxygène ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	241.47	244.1	239.0	240.3
Ecart maximum à la moyenne ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	.434	.349	.353	.344
Ecart type des valeurs mesurées ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	.694	.294	.495	.475

On peut donc considérer d'après les résultats de l'ensemble des stations "tests", que la précision des mesures de concentration en oxygène dissous durant EQUALANT 2000 est en moyenne $0,49 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

La précision des mesures est également estimée par l'analyse de doublets d'échantillons obtenus à partir de deux bouteilles fermées au même niveau à différentes stations: 62 doublets ont ainsi été réalisés pendant la campagne EQUALANT 2000. L'analyse montre que pour les 60 doublets retenus (deux doublets présentant des valeurs aberrantes probablement suite à des incidents lors des prélèvements ont été rejetés) à une pression comprise entre 0 et 5000 dbar, 23% des écarts entre doublets sont inférieurs à $0,1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ et 73% inférieurs à $0,5 \mu\text{mol kg}^{-1}$.



Le calcul de l'écart-type ('Standard deviation' selon le manuel *DOE*, 1994), sur le lot des 60 doublets, par la formule:

$$S = \left\{ \frac{\sum d_i^2}{2n} \right\}^{1/2}$$

d_i : écarts entre les doublets

n : nombre de doublets

permet d'estimer la répétabilité des résultats de concentration en oxygène dissous à $0,41 \mu\text{mol kg}^{-1}$, résultat qui corrobore celui obtenu avec les stations "tests".

Le tableau suivant compare les résultats de la campagne à ceux obtenus lors des campagnes WOCE (CITHER 1, ETAMBOT 1 et ETAMBOT 2) et EQUALANT 99.

	ETAMBOT 1	ETAMBOT2	EQUALANT99	EQUALANT2000
Pression de 0 à 5000 dbar				
Ecart-type en $\mu\text{mol kg}^{-1}$	0.5	0.4	0.4	0.4
Ecart inférieurs à $0,1 \mu\text{mol kg}^{-1}$	37%	22%	22%	21%
Ecart inférieurs à $0,3 \mu\text{mol kg}^{-1}$	76%	48%	52%	50%
Ecart inférieurs à $0,5 \mu\text{mol kg}^{-1}$	80%	77%	68%	63%

4. Références bibliographiques

- Billant A. et P. Branellec, 1994. Mesures de salinité et oxygène dissous. In : Recueil de Données, Campagne CITHER1, volume 3/4 : Traceurs Géochimiques, *Doc Scient. ORSTOM* Cayenne, N°O.P. 15,7-30.
- Carpenter J.H.,1965. The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method. *Limnol. Oceanogr.*, 10, 141-143.
- Chuchla, R., E. Kertenare et F. Baurand, 2000. Mesures d'oxygène, Campagne EQUALANT-99, N.O. Thalassa, 13 juillet-21 août 1999, Recueil de données, Rapport Interne LODYC n°2000-01.
- DOE, 1994. Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water ; version 2. A.G. Dickson & C. Goyet, eds.
- Fournier P., C. Oudot et F.Baurand, 1997a - Mesures d'Oxygène dissous, Campagne ETAMBOT-1, Recueil de données, volume 2/2, Documents Scientifiques du Centre ORSTOM de Cayenne, n°O.P. 23.
- Fournier P., C. Oudot et F.Baurand, 1997b - Mesures d'Oxygène dissous, Campagne ETAMBOT-2, Recueil de données, volume 2/2, Documents Scientifiques du Centre ORSTOM de Cayenne, n°O.P. 25.
- Millero F. J., and A. Poisson, 1981. International one-atmosphere equation of the state of Sea Water. *Deep Sea Res.*, 28, 625-629.
- Murray C. N., J. P. Riley and T.R. S. Wilson, 1968. The solubility of oxygen in Winkler reagents used for the determination of dissolved oxygen. *Deep Sea Res.*, 15,237-238.
- WOCE, 1994. WOCE Operations Manual. Vol. 3,Part 3.1.3 : WHP Operations and methods. WHP Office Report WHPO 91-1, WOCE report N°68/91, Revision 1, November 1994.

MESURES DES SELS NUTRITIFS

François Baurand¹, Cheikh N'Dour², Glen Guermeur¹, Pascal Morin³

¹Centre IRD de Bretagne - ²CRODT de Dakar - ³CNRS Roscoff & IUEM UBO

Participants

Les mesures de sels nutritifs (silicate, phosphate, nitrate + nitrite) durant la campagne EQUALANT 2000 ont été assurées par Cheikh N'Dour du Laboratoire d'Océanographie du Centre de Recherche Océanographique de Dakar Thiaroye (Sénégal) et par Glen Guermeur, stagiaire à l'Institut de Recherche pour le Développement de Bretagne.

1- EQUIPEMENT - TECHNIQUES D'ANALYSE – PRELEVEMENT – ACQUISITION ET TRAITEMENT

Les mesures des trois sels nutritifs (nitrate, phosphate et silicate) ont été réalisées dans le laboratoire-conteneur de l'IRD, simultanément sur une chaîne d'analyse à trois voies du type A3[®] de chez BRAN+LUEBBE. C'est la nouvelle génération de chaîne d'analyse en flux continu. Cette chaîne était pilotée par le logiciel AACE[®] version 5.24. C'était la première fois qu'une équipe européenne utilisait pendant une campagne océanographique ce type de matériel.

1-1 Particularités techniques de l'AutoAnalyser A3[®]

La chaîne d'analyse en flux continu AutoAnalyser A3[®] est développée et commercialisée par la Société Bran+Luebbe. Le concept de l'AutoAnalyser A3[®] se repose sur celui de AutoAnalyser II[®] (plus communément appelé Technicon) utilisé jusqu'alors par la communauté océanographique pour l'analyse des sels nutritifs. Cependant chaque module de la chaîne A3[®] intègre maintenant les technologies modernes comme :

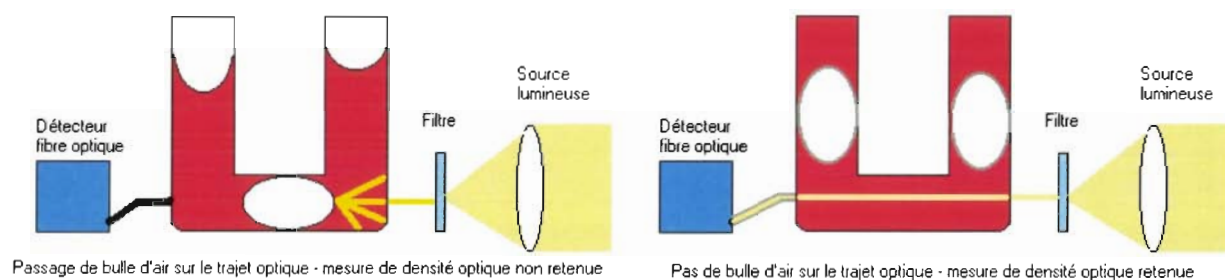
l'informatique (pilotage des colorimètres, acquisition et traitement des résultats)

la fibre optique pour le trajet du faisceau

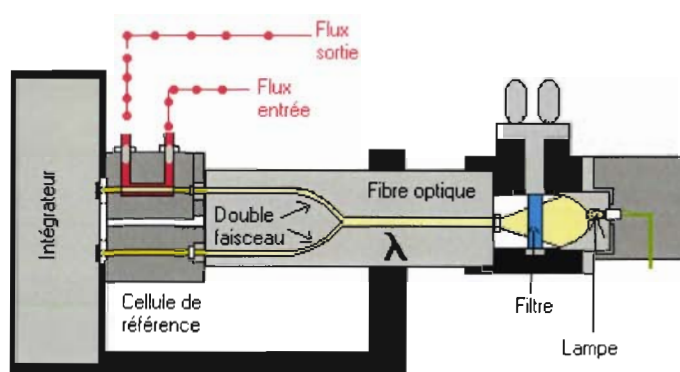
la robotisation des pompes et de l'échantillonneur.

1-1-1 Le colorimètre numérique A3[®]

Pièce maîtresse de la chaîne d'analyse, ce module se distingue nettement de l'ancienne génération. Ce nouveau colorimètre est un spectromètre digital de très haute sensibilité dont toutes les fonctions sont contrôlées par le logiciel AACE[®]. Son système numérique accepte aujourd'hui un flux non débullé. Un microprocesseur est intégré au détecteur. Ce dernier comprend et identifie le passage des bulles d'air dans le chemin optique. La densité optique de l'échantillon est mesurée en continu mais seule les mesures comprises entre deux bulles sont retenues. L'unique contrainte pour mesurer la densité optique réelle du fluide étudié est la distance entre deux bulles. Celle-ci doit être au minimum de la longueur de la cuve de mesure. Voir schéma ci dessous.



Son fonctionnement en double faisceau avec la même longueur d'onde donne une faible dérive même à de très hautes sensibilités. Voir schéma ci dessous.



Module optique A3 à longueur d'onde identique pour double faisceau

La haute sensibilité du colorimètre a été testée à terre avant la campagne. Voir Tableau 1.

Tableau 1 : Sensibilité du colorimètre A3

	<i>Phosphate</i>	<i>Nitrate</i>	<i>Silicate</i>
	0.005 μ mole	0.01 μ mole	0.01 μ mole

La géométrie de la cellule à faces planes et le couplage de fibre optique assurent une transmission de lumière parallèle à travers l'échantillon. Ces particularités permettent une linéarité des gammes d'étalonnage plus étendues. Les essais lors de la préparation de la campagne EQUALANT 2000 ont permis de confirmer ces observations. Pendant EQUALANT 2000, et quel que soit le paramètre étudié, toutes les courbes d'étalonnage utilisées étaient linéaires (voir exemple station 15 ci-dessous).

De plus, le débullage en amont des cellules de mesures des colorimètres SCII® de l'ancienne génération étaient souvent sources de problèmes pour le travail en mer. L'équilibre des débits entre l'arrivée du fluide principal segmenté de bulles, l'entrée de la cuve de mesure du fluide débullé et la sortie vers l'évier des bulles plus l'excès de fluide, était très sensible et souvent perturbé. D'une part, ces perturbations pouvaient provenir de la gîte du bateau. En effet certaines bulles passaient à travers la cellule, lorsque celle ci se trouvait suffisamment désaxée. D'autre part le travail analytique souvent ininterrompu au cours d'une campagne pouvait provoquer un dépôt de particules sur les voies. Celui ci perturbait inévitablement les flux. La nouvelle technologie du non débullage permet de nous affranchir de tous ces problèmes.

1-1-2 La pompe péristaltique

Le concept de la pompe péristaltique de l'AutoAnalyzer A3® est le même que celui des systèmes AutoAnalyzer II®. Son moteur à vitesse variable et ses vannes d'injection d'air sont les principales améliorations techniques.

Le système A3 dispose maintenant de deux vitesses de pompage. Une vitesse normale pour l'analyse et une vitesse rapide pour l'amorçage et le rinçage des circuits. Cette particularité a été très appréciée pendant EQUALANT 2000. En effet lors de la mise en route de la chaîne, la vitesse rapide avait été choisie pour un amorçage rapide. Il en était de même pour le rinçage des circuits en fin d'analyse. Ces opérations étaient un gain de temps non négligeable. De plus il était possible de programmer un temps de fonctionnement et un temps de pause de la pompe. Cette alternance s'est révélée précieuse pour éviter des arrêts successifs toujours sources possibles de perturbations (mauvais branchements, erreurs de réactifs, connections usées et défectueuses). Pendant EQUALANT 2000 une alternance de 20/100 était choisie entre deux stations. Cette alternance correspondait à un fonctionnement de la pompe pendant 20 secondes, puis une pause de 100 secondes et ainsi de suite. Cette option permettait de laisser sous réactifs tous les circuits et éviter ainsi un rinçage en fin d'analyse et un

réamorçage au redémarrage. De plus la colonne réductrice de cadmium restait connectée sans risque d'un contact avec l'air. Cette alternance était programmée par le logiciel AACE® avec une très grande aisance.

1-1-3 Le passeur d'échantillon Compact Sampler®

Le passeur d'échantillon Compact Sampler® est un passeur à accès programmable par le logiciel AACE®. Il est commercialisé habituellement avec un plateau de 100 godets de 5 ml maximum. Cette configuration générale n'était pas adaptée aux exigences demandées pour une campagne océanographique. Un plateau a donc été développé pour EQUALANT 2000 afin de recevoir directement les flacons de prélèvements de 50 ml. Voir paragraphe 1-3

Lors d'EQUALANT 2000, le pas du bras de prélèvement sur les axes X et Y a été programmé avec une grande facilité pour que l'aiguille plonge au centre des flacons de 50 ml. La programmation du passeur Compact Sampler® permettait donc d'éviter les modifications mécaniques apportées à l'ancien passeur le SamplerIV® décrite dans F. Baurand et al (2000).

1-2 Méthodes d'analyses

Les méthodes d'analyse suivent les méthodes standards décrites dans *Tréguer et Le Corre* (1975).

1-2-1 Silicate

Selon la méthode de *Mulin et Riley* (1955) revue par *Fanning et Pilson* (1973), le "silicate" dissous dans l'eau de mer et présent principalement sous forme d'acide orthosilicique $\text{Si}(\text{OH})_4$ réagit en milieu acide ($1 < \text{pH} < 2$) avec le molybdate d'ammonium pour former un complexe silicomolybdique jaune. En présence d'un mélange de "métol" et sulfite de sodium, le complexe jaune est réduit en bleu de molybdène dont l'intensité de la coloration est mesurée à 880 nm. L'interférence des ions phosphate et arséniate est supprimée en ajoutant de l'acide oxalique qui décompose les complexes colorés formés avec ces ions. La réaction est accélérée en opérant à 37°C. Un étage de dilution inséré en amont du manifold d'origine est prévu pour les échantillons les plus concentrés en silicate. Aussi le courant échantillon se trouve dilué avec de l'eau distillée additionnée de LEVOR IV (rapport de dilution = 1/2,5). Cependant cet étage de dilution n'a pas été utilisé pendant EQUALANT 2000, la totalité des échantillons ayant pu être analysés en direct.

1-2-2 Phosphate

Selon la méthode de *Murphy et Riley* (1962), le "phosphate" présent dans l'eau de mer sous forme d'ions orthophosphates, principalement HPO_4^{2-} et PO_4^{3-} , réagit avec le molybdate

d'ammonium en milieu acide pour former un complexe jaune de phosphomolybdate d'ammonium. Le complexe jaune est réduit avec l'acide ascorbique en complexe bleu, plus sensible, dont l'intensité de la coloration est mesurée à 880 nm. L'addition d'un catalyseur, l'antimonyl-tartrate de potassium, et l'utilisation d'un bain-marie (37°C) accélèrent le développement de la coloration.

1-2-3 Nitrate + nitrite :

Selon la méthode de *Wood et al.* (1967), le nitrate est réduit (dans une proportion de 98 % d'après les auteurs) en nitrite qui est à son tour déterminé par colorimétrie (longueur d'onde = 550 nm) après diazotation avec la sulfanilamide et copulation avec le naphtyl-éthylène diamine suivant la technique de *Bendschneider et Robinson* (1952). Le réducteur est une colonne de cadmium "cuppérisé". Le manifold "nitrate" utilisé pour EQUALANT 2000 est identique à celui utilisé pendant la campagne EQUALANT 99. Rappelons que la taille des grains de cadmium utilisée à l'intérieur de la colonne réductrice est comprise entre 0,25 et 0,35, selon le protocole de préparation de la colonne de cadmium décrit par *Tréguer et Le Corre* (1975). Le débit "échantillon" est de 0,80 ml mn⁻¹, celui du chlorure d'ammonium est de 2,90 ml mn⁻¹. Afin de limiter au maximum un flux non segmenté d'air, le débulleur du mélange "échantillon + chlorure d'ammonium + air" est placé juste avant la pompe péristaltique. Le débit "échantillon + chlorure d'ammonium" passant dans la colonne est de 1,60 ml mn⁻¹. La longueur de la colonne est limitée à environ 10 cm. La solution de chlorure d'ammonium qui sert de dilution est tamponnée à pH = 8,5 avec de l'ammoniaque liquide RP et sa concentration est ajustée à 50 g l⁻¹ de NH₄Cl. La concentration de la solution non tamponnée de chlorure d'ammonium qui sert de lavage en début et fin de journée est de 34,5 g l⁻¹ de NH₄Cl. La colonne est conditionnée par le passage en continu d'une solution de nitrate à 100 µmol kg⁻¹ pendant 10 mn. Ces différents points méthodologiques ont pour but d'améliorer l'efficacité et la stabilité de la réduction des colonnes de cadmium durant la campagne. Un contrôle du rendement de la réduction des colonnes est également effectué au début de chaque journée. Celui-ci est réalisé sur deux concentrations de nitrate (20 et 30 µmol kg⁻¹) en comparant les signaux obtenus avec ceux de deux solutions de nitrite, de concentrations identiques, sur la voie nitrate.

1-3 Les prélèvements

Le prélèvement des échantillons, au nombre de 22 à 24 pour les stations à simple palanquée et de 28 à 30 pour les stations à deux palanquées, a eu lieu parmi les derniers juste avant celui de la salinité. Il est réalisé par les différents quarts bathysonde dans des flacons en polystyrène haute-densité de 50 ml. Entre les stations, les flacons ont été rincés à l'eau distillée (distillateur AUTOSTIL) et mis à égoutter. Les chaînes d'analyses fonctionnent en continu de 4 heures du matin à minuit (heure du bord). Après leur prélèvement, les échantillons ont été

stockés dans le conteneur-laboratoire climatisé dans l'attente de leur analyse (temps d'attente maximum = 6 heures). Le plateau de l'échantillonneur de type Compact[®] qui équipe les chaînes d'analyses A3[®] est modifié de façon à pouvoir recevoir directement les flacons de prélèvements (16 flacons sur le plateau), évitant ainsi un transfert des échantillons dans les traditionnels godets en plastique, source inévitable de pollutions. Le logiciel AACE[®] permet de choisir à volonté le cycle du temps d'échantillonnage et de rinçage : pendant EQUALANT 2000 la cadence d'échantillonnage est différente de celle choisie pendant EQUALANT 99 et ETAMBOT 1 & 2. Elle est de 24 échantillons par heure. Les temps de prélèvement et rinçage sont de 100 s et 50 s respectivement (rapport temps "prélèvement" / temps "rinçage" = 2).

1-4 Acquisition et traitement des signaux.

L'acquisition et le traitement des analyses ont été effectués par le logiciel AACE[®] version 5.24 commercialisé par Bran+Luebbe.

2 - CALIBRATIONS

La calibration des méthodes d'analyses a été faite régulièrement au début de chaque station ou pour deux stations quand celles ci se trouvent très rapprochées, par le passage d'une gamme de 11 solutions "étalons" avant les échantillons. Les concentrations des étalons (voir tableau 2 ci-après) ont été choisies afin de couvrir l'étendue des concentrations rencontrées sur les échantillons et leur préparation a été réalisée à chaque début de journée. Les étalons de sels nutritifs ont été préparés à partir de sels (produits Baker p.a. certifiés purs à 99,99 %) séchés à l'étuve à 105°C pendant 2 heures. Les pesées de sels ont été faites sans tenir compte de la correction de flottabilité de l'air car les résolutions des méthodes décrites au paragraphe 1-2 sont largement supérieures aux termes de correction éventuellement apportés aux pesées par la correction de flottabilité. Les volumes des fioles et les burettes automatiques (Dosimat METROHM) ont été contrôlés par pesée (WOCE, 1991). La température dans le conteneur-laboratoire est restée proche (23°C) de celle à laquelle fût calibrée la verrerie au laboratoire à terre, avant la campagne, et aucune correction de volume ne fût donc appliquée.

Tableau 2 : GAMME ETALONS (concentrations en $\mu\text{mol l}^{-1}$)

	<i>Std1</i>	<i>Std2</i>	<i>Std3</i>	<i>Std4</i>	<i>Std5</i>	<i>Std6</i>	<i>Std7</i>	<i>Std8</i>	<i>Std9</i>	<i>Std10</i>	<i>Std11</i>
Phosphate	0,5	1	2	3							
Silicate		5	10	20	30	40	50	60			
Nitrate							5	10	20	30	40

Deux solutions primaires ($S1_{\text{NO}_3}$, $S1_{\text{PO}_4}$), dites "de forte concentration" ont été préparées avant la campagne. $S1_{\text{NO}_3}$ a été préparée en dissolvant 12,63875 g de nitrate de potassium dans 1 litre d'eau déminéralisée. Cette solution a été stabilisée avec 2 ml de chloroforme et conservée dans un flacon en verre à température ambiante et à l'abri de la lumière. $S1_{\text{PO}_4}$ a été préparée en dissolvant 0,85056 g de dihydrogénophosphate de potassium dans 1 litre d'eau déminéralisée. Cette solution a été également stockée dans un flacon en verre après addition de

2 ml de chloroforme dans les mêmes conditions de conservation. La concentration de ces deux solutions primaires a été considérée comme stable pendant toute la campagne. Cette hypothèse a été vérifiée au retour de campagne. Une solution unique ($S_{Si(OH)_4}$) a été préparée avant la campagne également en dissolvant 2,35075 g de silicofluorure de sodium (supposé rigoureusement pur) dans 5 litres d'eau déminéralisée. Cette solution a été stabilisée avec 10 ml de chloroforme et a été stockée à l'abri de la lumière et à température ambiante dans un flacon en polyéthylène de cinq litres. Une solution secondaire de phosphate, $S2_{PO_4}$ a été préparée aussi le premier jour de campagne en diluant 50 ml de $S1_{PO_4}$ dans cinq litres d'eau distillée. Cette solution a été stabilisée avec 10 ml de chloroforme et a été stockée à l'abri de la lumière et à température ambiante dans la fiole en verre de cinq litres utilisée pour la dilution. Une solution secondaire de nitrate $S2_{NO_3}$ a été préparée en suivant le même protocole que pour la solution secondaire de phosphate : 50 ml de $S1_{NO_3}$ dans cinq litres d'eau distillée + 10 ml de chloroforme, stockage à l'abri de la lumière et à température ambiante dans la fiole en verre de cinq litres. Une solution secondaire de contrôle de nitrate et une de phosphate ont été préparées à 3 reprises pendant la durée de la campagne en diluant respectivement 10 ml de $S1_{NO_3}$ et 10 ml de $S1_{PO_4}$ dans un litre d'eau distillée. Ces solutions, de même concentration que les solutions $S2_{NO_3}$ et $S2_{PO_4}$ avaient pour but de contrôler une éventuelle variation de la concentration en nitrate ou en phosphate des solutions S2.

Afin de contrôler l'exactitude de la concentration des solutions $S2_{NO_3}$, $S2_{PO_4}$ et $S_{Si(OH)_4}$, deux solutions de contrôles de même concentration pour chaque sel ont été préparées par pesées directes avant la campagne. Une gamme étalons de "travail" et deux de "contrôle" ont été alors analysées simultanément. Il a été procédé de même au retour de la campagne.

L'eau distillée a été fournie par un appareil AUTOSTILL délivrant une eau de résistivité égale à 4 M Ω . Les solutions étalons de travail ont été préparées quotidiennement dans une solution de chlorure de sodium à 40 g l⁻¹ à partir des solutions $S2_{NO_3}$, $S2_{PO_4}$ et $S_{Si(OH)_4}$. La solution de chlorure de sodium a été préparée en dissolvant 1 kg de NaCl p.a. dans 5 litres d'eau distillée (obtenue à l'aide du distillateur AUTOSTILL), puis étendue à 25 litres et stockée en bidon polyéthylène à l'abri de la lumière (WOCE, 1991).

Les courbes d'étalonnage du phosphate et du nitrate sont parfaitement linéaires avec un coefficient de corrélation généralement égal à 1,000. Celles du silicate sont également très proches de la linéarité avec un coefficient de corrélation égal à 0,9990 en moyenne. Ce léger écart à la linéarité n'entraîne pas de différences significatives sur les résultats de silicates.

Exemple station 15 :

	Courbe linéaire	Courbe exponentielle	Ecart entre expo. et linéaire
Moyennes	38.78	38.82	0.04
Ecart type	0.04	0.04	0.04

n Pour le *phosphate*, le double contrôle effectué avant la campagne a confirmé l'exactitude de la concentration des solutions S2_{PO4} et S1_{PO4} en phosphate. La stabilité de la concentration de la solution S2_{PO4} en phosphate a été confirmée par les trois contrôles effectués en cours de campagne. Celle de la solution S1_{PO4} a été confirmée par le double contrôle effectué au retour de campagne.

n Il en a été de même pour le *nitrate* et le *silicate*.

3 - CALCULS

La nouvelle géométrie de la cellule de mesure des colorimètres numériques permet un trajet optique identique dans l'eau déminéralisée et dans l'eau de mer. Aucune correction d'effet de sel n'a été apportée.

Les résultats d'analyses exprimés en micromoles par litre ($\mu\text{mol l}^{-1}$) ont été ensuite convertis en micromoles par kilogramme ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) d'eau de mer en prenant comme température de l'échantillon au moment de l'analyse 25 °C (température moyenne du laboratoire) et une salinité moyenne de 35 pour tous les échantillons. La masse volumique ρ de l'eau de mer à 25°C et pour une salinité de 35 à 1 atmosphère est de 1.02334306 g/cm³ selon l'équation suivante :

$$\rho_{sw} = \rho_w + AS + BS^{1.5} + CS^2$$

où **S** est la salinité (35) et **t** la température en °C (25), et :

$$\rho_w = 0.999842594 + 6.793952 \times 10^{-5} t - 9.095290 \times 10^{-6} t^2 + 1.001685 \times 10^{-7} t^3 - 1.120083 \times 10^{-9} t^4 + 6.536332 \times 10^{-12} t^5$$

$$A = 8.24493 \times 10^{-4} - 4.0899 \times 10^{-6} t + 7.6438 \times 10^{-8} t^2 - 8.2467 \times 10^{-10} t^3 + 5.3875 \times 10^{-12} t^4$$

$$B = -5.72466 \times 10^{-6} + 1.0227 \times 10^{-7} t - 1.6546 \times 10^{-9} t^2$$

$$C = 4.8314 \times 10^{-7}$$

4 - PRECISIONS

La précision des mesures est appréciée comme la **reproductibilité** des résultats sur des séries d'échantillons identiques prélevés à un même niveau au cours de deux **stations "test"**. Les résultats sont montrés dans le tableau 3. Comme pour les campagnes CITHER 1, ETAMBOT 1 et 2, et EQUALANT 99 l'incertitude sur les mesures de silicate reste inférieure à $0,1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (soit 0,3 % pour les concentrations mesurées les plus élevées), celle sur les mesures de nitrate + nitrite est inférieure à $0,05 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (soit 0,25 % pour les concentrations mesurées les plus élevées), par contre celle sur les mesures de phosphate est plus importante que pour les campagnes précédentes $0,10 \mu\text{mol kg}^{-1}$) (soit 0,8 % pour les concentrations mesurées les plus élevées). L'incertitude pour EQUALANT 99 était de $0,01 \mu\text{mol kg}^{-1}$. Rapportées à la pleine échelle définie par le WHP (1991), les précisions (Tableau 2 : C.V. (%) P.E. WHP) sont excellentes concernant le silicate et le nitrate et nettement inférieures aux normes retenues par le WHP (0,1 % pour le silicate, et 0,2 % pour le nitrate + nitrite). L'appréciation de la précision relative au phosphate est faussée par une contamination des premières mesures. Si les premières mesures sont éliminées la précision se rapproche de celle retenue par les normes du WHP (0,3 % pour le phosphate) mais reste cependant très médiocre.

D'autre part, la précision des mesures a été contrôlée, en moyenne à chacune des stations et à toutes profondeurs, à partir de **l'analyse de doublets** obtenus en fermant deux bouteilles au même niveau. La distribution des écarts entre les doublets est représentée en fonction du numéro de station, de la pression et sous forme d'histogramme de fréquence pour chacun des trois sels nutritifs (Fig. 3, 4 et 5).

Concernant le silicate et le nitrate l'écart entre doublets est indépendant du numéro de la station, c'est à dire que la répétitivité des mesures est la même d'un bout à l'autre de la campagne. L'écart entre doublets ne dépend pas de la profondeur, c'est à dire de la concentration de l'échantillon. L'analyse des histogrammes montre que 98 % des écarts entre doublets sont inférieurs à $0,04 \mu\text{mol kg}^{-1}$ pour le silicate ($0,4 \mu\text{mol kg}^{-1}$ pour EQUALANT 99), 100 % sont inférieurs à $0,04 \mu\text{mol kg}^{-1}$ pour le nitrate ($0,3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ pour EQUALANT99). La précision est donc environ 10 fois meilleure que pour EQUALANT 99 pour ces deux paramètres.

Pour le phosphate, les difficultés d'analyse rencontrées lors d'EQUALANT 2000 se répercutent également sur l'analyse des doublets. L'analyse de l'histogramme du phosphate montre que les écarts entre doublets sont inférieurs à $0,04 \mu\text{mol kg}^{-1}$. (soit de l'ordre de 2,5 % d'une concentration moyenne à 3000m)

La répétitivité S, selon l'expression (DOE, 1994): $S = \{ \sum d_i^2 / 2n \}^{1/2}$, avec d_i = écarts entre les doublets et n_i = nombre de doublets des mesures, estimée par l'écart-type (déviatoin standard) sur les différences entre les mesures sur chaque doublet et calculée pour les 70 doublets est de 0,014 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ pour le silicate (0,14 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ pour EQUALANT 99), 0,009 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ pour le nitrate (0,06 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ pour EQUALANT 99) et 0,010 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ pour le phosphate (0,005 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ pour EQUALANT 99) (voir Tableau 4).

Tableau 3 : Précision des mesures de sels nutritifs par l'analyse d'échantillons prélevés à un même niveau aux stations "test". Le coefficient de variation est indiqué par rapport à la pleine échelle (P.E.) définie par le *WHP* (1991).

SILICATE				
Numéro de station	000	015	034	049
Pression (dbar)	2000	3000	3000	3000
Nombre d'échantillons	21	24	24	24
Concentration moyenne ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	24,83	37,89	42,78	39,17
Ecart -type ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	0,04	0,04	0,05	0,09
C.V. (%)	0,17	0,10	0,12	0,23
C.V. (%) P.E. <i>WHP</i> ($250 \mu\text{mol kg}^{-1}$)	0,02	0,01	0,02	0,04
PHOSPHATE				
Numéro de station	049	049 – 8 premier points supprimés		
Pression (dbar)	3000	3000		
Nombre d'échantillons	24	17		
Concentration moyenne ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	1,59	1,64		
Ecart -type ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	0,10	0,03		
C.V. (%)	6,23	1,54		
C.V. (%) P.E. <i>WHP</i> ($5 \mu\text{mol kg}^{-1}$)	1,98	0,51		
NITRATE				
Numéro de station	000	015	034	049
Pression (dbar)	2000	3000	3000	3000
Nombre d'échantillons	21	24	24	24
Concentration moyenne ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	20,54	21,7	22,89	22,18
Ecart -type ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	0,02	0,01	0,03	0,05
C.V. (%)	0,12	0,05	0,14	0,23
C.V. (%) P.E. <i>WHP</i> ($47 \mu\text{mol kg}^{-1}$)	0,05	0,03	0,07	0,11

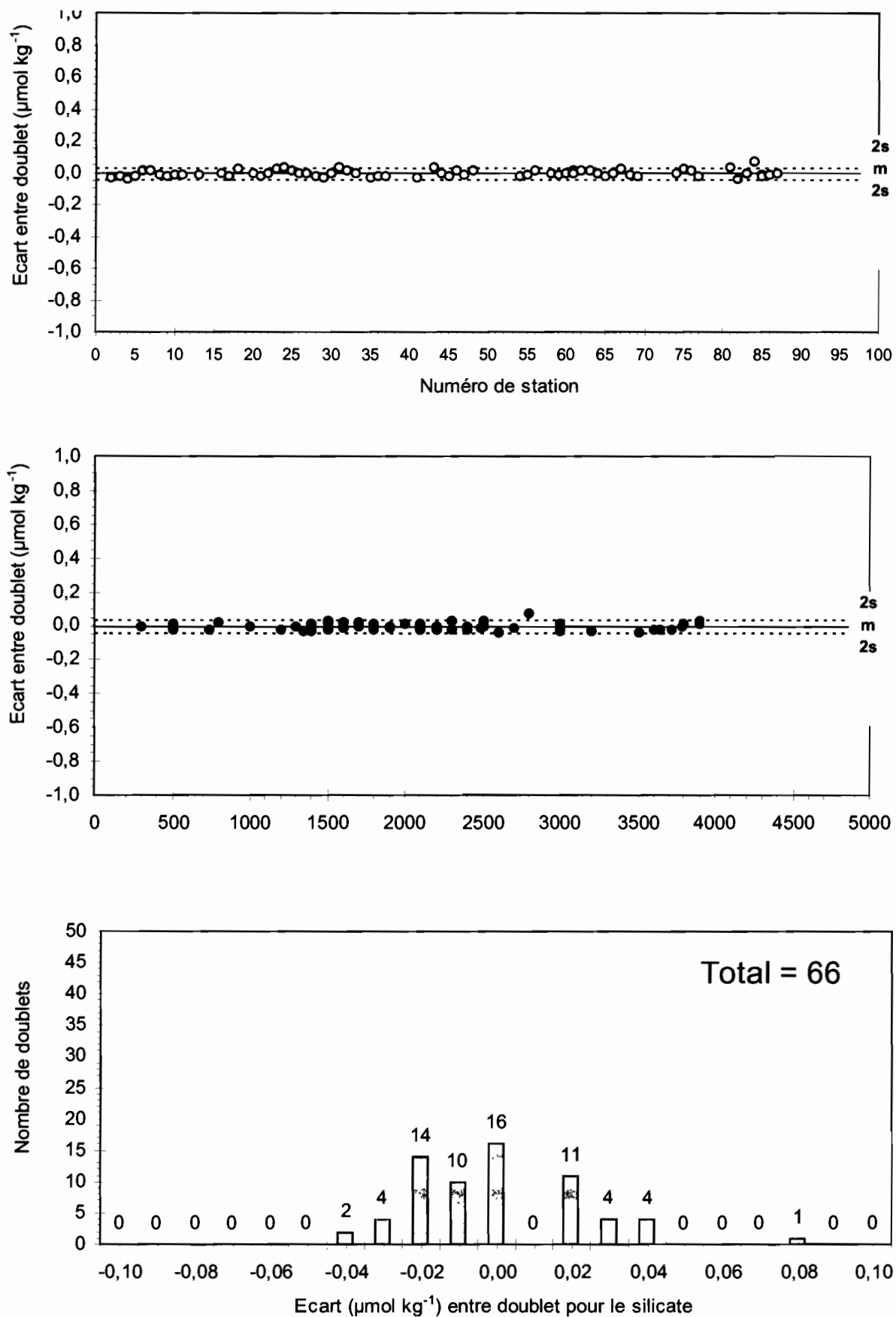


Figure 3 : Ecarts entre les concentrations de silicate mesurées sur deux bouteilles fermées au même niveau : (a) en fonction du numéro de la station; (b) en fonction de la pression de fermeture des bouteilles; (c) nombre de doublets par classe d'écart.

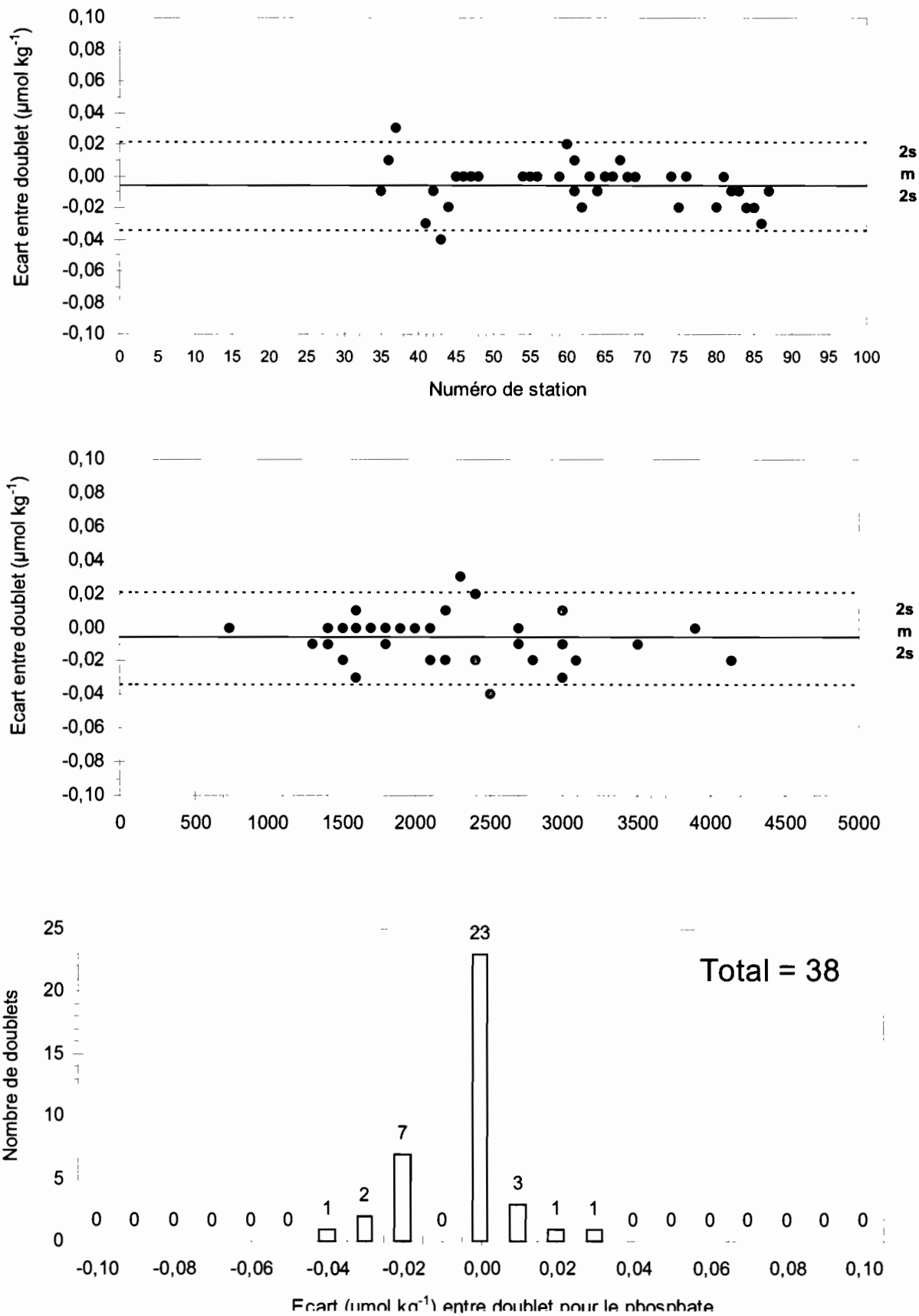


Figure 4 : Ecarts entre les concentrations de phosphate mesurées sur deux bouteilles fermées au même niveau : (a) en fonction du numéro de la station; (b) en fonction de la pression de fermeture des bouteilles; (c) nombre de doublets par classe d'écart.

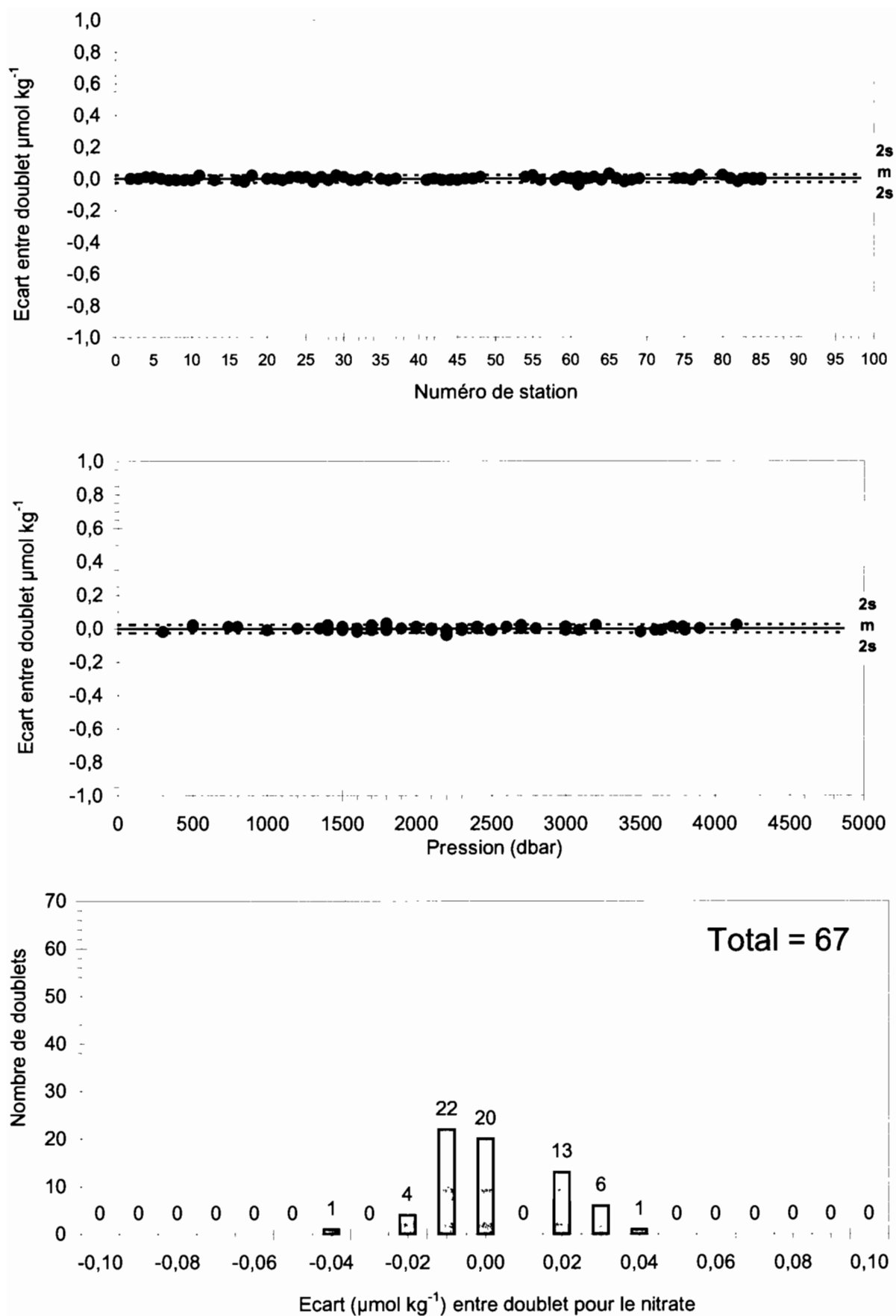


Figure 5 : Ecarts entre les concentrations de nitrate mesurées sur deux bouteilles fermées au même niveau : (a) en fonction du numéro de la station; (b) en fonction de la pression de fermeture des bouteilles; (c) nombre de doublets par classe d'écart.

5 – Bilan général sur l'utilisation de la nouvelle chaîne de flux continu A3®

5.1. – Problèmes rencontrés pour l'analyse du PHOSPHATE

Des interférences ont été observées pour le travail en haute sensibilité sur la voie d'analyse du phosphate. Les raisons de cette mauvaise stabilité du signal sont encore à ce jour à l'étude. Les inévitables vibrations inhérentes au moteur d'un bateau entraînant des perturbations sur le système optique paraissent être la cause la plus probable. Les analyses lors de la préparation de la chaîne, ainsi que celles réalisées régulièrement par d'autres laboratoires français et étrangers sur ce même type d'appareil, avaient été toutes effectuées en conditions normales, à terre. Ces travaux n'avaient alors jamais mis en évidence de perturbations pour les faibles concentrations.

Il semblerait que les vibrations du bateau se répercutent sur le filament de la lampe au tungstène. La lumière blanche émise par cette lampe est canalisée par la fibre optique. La moindre perturbation de la lumière (vibration du filament) est amplifiée par la fibre optique. En conséquence, le chemin lumineux se trouve en fait pénalisé par sa trop haute performance. Ce phénomène entraîne inévitablement une instabilité de la source lumineuse et une mesure optique perturbée. La conception moins performante des anciens colorimètres de la génération des AutoAnalyseur® II présentaient l'avantage de rendre invisible ces vibrations.

EQUALANT 2000 a permis de mettre en lumière ces problèmes analytiques rencontrés uniquement lors d'une utilisation en mer. La concentration du phosphate rencontrée dans les eaux des zones de travail d'EQUALANT 2000 était comprise entre 0 et 3 $\mu\text{mole kg}^{-1}$. Cette gamme de concentrations est celle rencontrée généralement en milieu hauturier. Cependant à ces concentrations, le signal de la mesure de la densité optique du complexe phosphomolybdique est très faible et il doit être plus amplifié que pour l'analyse des autres sels. Ces réglages d'amplification s'appellent au niveau du logiciel AACE® le gain du colorimètre. Mais le gain affecte en fait le rapport signal / bruit. Cependant afin d'obtenir des résultats de phosphate malgré ces difficultés, la gamme de travail des étalons fut étendue. Les concentrations des étalons étaient alors comprises entre 0 et 5 $\mu\text{mole l}^{-1}$. L'amplitude du signal fut donc moins importante. Ce réglage permettait d'être moins gêné par les bruits de fond, mais en perdant inévitablement de la sensibilité et la précision sur les mesures de ce paramètre. L'analyse du phosphate a été réalisée à partir de la station 35.

De plus l'analyse approfondie des résultats du phosphate sur la station test permet d'observer un effet de contamination d'un pic sur l'autre. Cette contamination est probablement due à un rinçage inter-échantillon trop rapide (Pour EQUALANT 99 le rinçage

était de 80 secondes, pour EQUALANT 2000 il était de 50 secondes). Il serait judicieux de revenir à un temps de rinçage plus long pour les futures campagnes.

5.2. Amélioration du système par rapport à l'ancien système "TECHNICON®":

L'utilisation de la nouvelle chaîne d'analyse à flux continu A3® pendant une campagne océanographique fut une première lors d'EQUALANT 2000. Cette nouvelle chaîne d'analyse a permis d'obtenir une amélioration sur la précision et la répétabilité de la détermination de la concentration du silicate et du nitrate comme le montre le tableau 4.

Tableau 4 : Comparaison de la précision et la répétabilité des mesures de sels nutritifs entre EQUALANT 99 ET EQUALANT 2000.

CAMPAGNES	EQUALANT 99			EQUALANT 2000		
Type de chaîne utilisée	AutoAnalyseur AII			AutoAnalyseur A3		
	déviations standard %	Répétabilité		déviations standard %	Répétabilité	
		(en $\mu\text{mol. Kg}^{-1}$)	%		(en $\mu\text{mol. Kg}^{-1}$)	%
SILICATE	0.04	0.14	0.056	0.02	0.014	0.0056
NITRATE	0.11	0.06	0.13	0.06	0.009	0.019
PHOSPHATE	0.20	0.010	0.2	0.51	0.005	0.1

Cette amélioration est due à la nouvelle technologie apportée à l'optique du colorimètre A3® décrite au chapitre 1-1-1.

A l'exception du phosphate, la qualité des mesures des autres sels nutritifs a été nettement améliorée malgré les perturbations optiques existantes aussi sur ces voies.

Suite aux observations de l'équipe d'EQUALANT 2000, la Société Bran+Luebbe a développé et commercialise à ce jour un module optique adapté spécifiquement à l'analyse sur un bateau. Les nouvelles technologies comme l'utilisation de lampes adaptées au travail en mer (diodes électroluminescentes) nous laissent envisager d'excellents résultats sur l'ensemble des sels nutritifs pour les prochaines campagnes (pas de vibrations du filament, etc...). La facilité de travail apportée par la programmation des pompes, du passeur et l'acquisition sont des éléments déterminants pour le travail long et répétitif effectué en mer. Le traitement en temps réel est également un élément appréciable pour obtenir un jeu de données brutes utilisables en cours de campagne.

5 – REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baurand F., Elisabete de Santis Braga et P.Morin, Mesures des sels nutritifs. Campagne EQUALANT 1999, N.O. Thalassa, 13 juillet-21 août 1999, Rapport de campagne à la mer, Rapport interne LODYC n°2000-01, 2000.
- Bendschneider K. and R.J. Robinson, A new spectrophotometric determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.*, 11 : 87-96, 1952.
- DOE, Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water; version 2. A. G. Dickson & C. Goyet, eds, 1994.
- Fanning K.A. and M.E.Q Pilson, On the spectrophotometric determination of dissolved silica in natural waters. *Analyt. Chem.*, 45 : 136-140, 1973.
- Mullin J.B. and J.P. Riley, The spectrophotometric determination of silicate-silicon in natural waters with special reference to sea water. *Anal. Chim. Acta*, 12 : 162-170, 1955.
- Murphy J. and J.P. Riley, A modified simple solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27 : 31-36, 1962.
- Oudot C. et F. Baurand, Mesures de sels nutritifs. In : Recueil de données, Campagne CITHER 1, volume ¾ : Traceurs Géochimiques. *Doc. Scient. ORSTOM Cayenne*, N°O.P. 15, 31-66, 1994.
- Tréguer P. et P. Le Corre, Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer (utilisation de l'AutoAnalyzer II Technicon). *Université de Bretagne Occidentale, Brest*, 2^{ème} édition., 110 p., 1975.
- WOCE Operations Manual, Volume 3 : The Observational Program Section 3.1 WOCE Hydrographic Program Part 3.1.3 : *WHP Operations and Methods*. WOCE Report n°68/91, July 1991, 1991.
- Wood E.D., Armstrong F.A.J. and F.A. Richards, Determination of nitrate in sea-water by cadmium-copper reduction to nitrite. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 47 : 23-31, 1967.

Remerciements

Nous tenons à remercier Alain Aminot et Roger Kerouel du laboratoire d'Environnement Littoral de l'IFREMER pour nous avoir permis de calibrer nos solutions standards au sein de leur service.

Analyse des chlorofluorométhanés

C. Andrié¹, F. Baurand² et S. Freudenthal¹

¹ *LODYC, Paris* - ² *Centre IRD de Bretagne, Plouzané*

1. Généralités :

1.1. Analyses réalisées et incidents :

Toutes les stations ont été échantillonnées de la surface au fond sauf les stations 7, 10, 14, 21, et 41 pour lesquelles les échantillons au-dessus de 800m n'ont pas été prélevés faute de temps pour l'analyse.

Des analyses d'air ont été réalisées en moyenne tous les 2 jours à partir de prélèvements en seringues afin de valider les données de surface.

Au total 3157 analyses ont été réalisées incluant standards, "blancs", calibrations et prélèvements d'air. Trois stations tests 15, 34 et 49 ont été échantillonnées afin de calculer la limite de détection de la méthode et les niveaux de pollution moyens.

La chaîne d'analyse a dû être arrêtée lors de 3 interventions pour débouchage de vannes. L'un de ces incidents est imputable aux particules prélevées dans la bouteille n°1 sur le fond de la station 36.

Le volume calibré de la ligne d'échantillonnage a été cassé lors des analyses de la station 49. Il a été remplacé à partir de la station 50 par un nouveau volume. Les calibrations tiennent compte de ce changement. En fin de campagne, des instabilités de la ligne de base sont intervenues à la remise en route d'un moteur du navire après chaque station et ont imposé des temps de stabilisation avant reprise des analyses en fin de stations hydrologiques.

Les résultats présentés ici concernent prioritairement les données relatives à l'eau profonde (en dessous de 800m de profondeur).

1.2. Organisation à bord et recommandations nouvelles :

Les précautions habituelles ont été prises avant et lors de l'embarquement :

- les bouteilles Seabird (12 litres) ont été lavées à bord au détergent Decon et rincées à l'eau douce sous pression. Elles ont été équipées de ressorts métalliques qui ont donné toute satisfaction au niveau des "blancs".

L'absence de contamination en fréons via les ressorts Seabird (ressorts noirs métalliques téflonisés) a été testée en fin de campagne sur 4 doublés de bouteilles de prélèvement utilisant soit un ressort Seabird soit un ressort métallique (stations 84 et 85).

- Les joints toriques en caoutchouc et les ressorts ont été démontés, lavés à l'alcool et étuvés 24 h sous vide à 60°C, à bord, en début de campagne.

- La chaîne d'analyse a été installée dans le laboratoire humide (laboratoire d'hydrologie), à la même place que lors d'EQUALANT 99. La proximité de la coursive "hydro" et son accès direct ont largement contribué à minimiser tout risque de pollution par l'atmosphère du bord.

- Afin de minimiser les risques de contamination, les **seringues de prélèvement** étaient stockées dans deux réservoirs alimentés d'eau de mer de surface renouvelée en permanence. A

noter que des fuites sur les **robinets métalliques** nouvellement rodés et non graissés et la non utilisation de **pistons percés** (alourdis d'eau de mer) a compromis les analyses des 5 premières stations (pollution d'eau de surface dans les seringues après prélèvements). Des tests plus critiques sur les taux de fuite des robinets et la qualité des pistons et corps de seringues s'imposeront à l'avenir.

- Les prélèvements ont été réalisés dès la remontée de la rosette à bord par les analystes-fréons. Les précautions habituelles ont été prises pour minimiser toute pollution éventuelle. En plus des doublés-bouteilles prévus sur la rosette, des doublés-seringues ont parfois été réalisés à l'aide de seringues échantillonnées sur la même bouteille dans les cas "suspects" de teneurs mesurées anormales afin d'identifier le type de contamination (seringue ou bouteille).

Trois personnes à bord avaient la charge de la totalité des prélèvements et des analyses chromatographiques. La chaîne d'analyse a fonctionné quasiment sans interruption, à la charge de l'analyste de quart. Pendant la journée les prélèvements étaient assurés par l'un des analystes hors quart.

Pendant toute la campagne l'heure du bord était l'heure TU (horloge du PC de la chaîne d'analyse à TU + 2). L'heure du bord a été changée de TU+2 à TU+1 dans la nuit du 17 au 18 août 2000.

2. Protocole analytique :

2.1. Analyses chromatographiques :

Le protocole d'analyse est similaire à celui d'EQUALANT 99 (*Andrié et al.*, 2000), inspiré de *Bullister and Weiss* (1988) et *Andrié et Ternon* (1994).

Les principales caractéristiques sont :

a) chromatographie :

- gaz vecteur : azote ultrapur
- température colonne 80°C
- température ECD 270°C - courant 1nA
- débit GC environ 50 cc/min

Une optimisation de la réponse du détecteur en fonction du débit de gaz vecteur a été faite en début de campagne (**Figure 1**). Un compromis dans la recherche d'une bonne sensibilité et d'une bonne reproductibilité à la fois sur F11 et F12 nous a conduit à utiliser pour toute la campagne une pression d'azote à l'entrée du chromatographe de 3 bar soit un débit en sortie de détecteur voisin de 60 cm³/min. Bien que nous n'observons pas de plateaux, la pression retenue correspond à une situation de faible gradient des courbes de sensibilité F11 et F12 afin d'éviter des risques de mauvaise reproductibilité en cas de variation de pression d'entrée. Ces réglages initiaux ont considérablement amélioré la reproductibilité des mesures, avec une sensibilité équivalente à celle d'EQUALANT 99.

b) ligne de piégeage-extraction :

- les tubes 1/8" de la ligne ont été raccourcis de 1m sur toutes les branches de circuit.
- débit de la ligne d'extraction (sortie V6) > entre 110 et 200 cm³/min. Après 3 jours de campagne, la perte de charge en sortie de la vanne V6 a été fermée (pour économies de gaz vecteur). Il s'est avéré par la suite que cette configuration était défavorable à la minimisation des blancs F11. La perte de charge a été réouverte à partir de la station 67.
- durée de transfert volume calibré-chambre de dégazage = 1,5 min.
- temps de piégeage supplémentaire = 4 min.

- température du bain d'alcool = -40°C (plus basse qu'à EQ99).
- chambre de dégazage neuve.
- piège à CFCs neuf (construit en mars 2000 à l'IUEM).
- piège à oxygène installé en mars 2000.
- détecteur ECD installé en juin 1998 (ayant servi pour EQ99).
- volume calibré = 38,884 cm³ jusqu'à la station 49 (volume utilisé pour EQ99).
- volume calibré = 35,62 cm³ (à partir de la station 50).
- volumes des boucles de standard = 1,118 cm³ pour 1S et 3,387 cm³ pour 1L.
- pièges MgClO₄ de diamètre 10-15.

c) les méthodes d'intégration du logiciel BORWIN utilisent les mêmes paramétrisations que celles utilisées lors des retraitements d'EQ99 :

* EQ2.PKM pour standards et échantillons d'air :

penne minimale = 10

V/V = 1

Lissage = 15

Table des pics EQ10W

* EQ3.PKM pour tous les échantillons eau de mer (y compris les blancs) :

penne minimale = 0.1

lissage = 5

V/V = 0.001

Table des pics = EQ10W

Malgré l'utilisation de ces méthodes optimisées il a parfois été nécessaire de retraiter les pics F12 « à la main ».

2.2. Calibration du standard secondaire :

Deux séries de calibration du standard secondaire atmosphérique (Air Liquide AL99) par rapport au standard primaire de la Scripps (SIO) ont été réalisées lors de la station 17 et en fin de campagne à Pointe Noire après la station 89.

Les teneurs calculées par comparaison sont reportées suivant l'échelle **SIO1993** (Cunnold et al., 1994).

n	Calibration	F12 (ppt)	F11 (ppt)
	standard		
	primaire SIO (SIO86)	592,4 ± 0,35%	315,2 ± 0,7%
	SIO (échelle SIO 93)	600 ± 0,35%	307,5 ± 0,7%
4	station 17 30/07/00 AL99 (SIO93)	808,4 ± 1,4 %	439,3 ± 1,3 %
4	station 89 20/08/00 AL99 (SIO93)	806,8 ± 1 %	438,3 ± 1,4%

Compte tenu du faible nombre d'analyses pour chaque série la moyenne des 2 séries est considérée pour l'exploitation de l'ensemble des données soit :

807,6 ppt pour F12 (SIO93)

438,8 ppt pour F11 (SIO93)

2.3 . Suivi des teneurs atmosphériques :

Des mesures des teneurs atmosphériques ont été réalisées tous les 2 jours en moyenne lors de 55 stations (**Figure 2**).

Les analyses d'air à partir de prélèvements seringues ont été réalisées face au vent (c'est à dire en général à tribord, la station étant tenue au vent côté treuil ; chaque série a consisté en au moins deux injections de deux prélèvements seringue) après 3 rinçages du volume total balayé par le piston. Il n'y avait pas de desséchant en amont des boucles d'échantillonnage (IS en général). Les données sont exprimées par référence à l'échelle SIO 1993.

On a observé de très faibles accroissements des teneurs atmosphériques à l'approche des côtes Nigérianes et Congolaises, mais à peine supérieurs à la précision de la mesure et donc difficilement attribuables à la pollution atmosphérique continentale et urbaine. A l'approche du Nigeria (3°45' N - 6°E) les teneurs mesurées étaient de 536,4 ppt en F12 et 263,1 ppt en F11 à comparer aux valeurs moyennes au Nord de la section 6°E de 529,8 ppt ($\pm 0,8 \%$) en F12 et 257,8 ppt ($\pm 1,4 \%$) en F11. A l'approche du Congo (4°45'S - 11°10'E) les valeurs mesurées étaient 522,1 ppt en F12 et 243,1 ppt en F11 à comparer aux valeurs moyennes de la section 6°S de 531 ppt ($\pm 2,3 \%$) en F12 en 260 ppt ($\pm 4,3 \%$) en F11.

La finalisation de ces traitements devra être confirmée lors de l'exploitation des résultats.

L'utilisation de courbes de calibration non linéaires à 4 niveaux, permettra d'accéder à des paramètres concernant l'étude des eaux de surface et de subsurface telles que les valeurs de sous saturations en F11 et F12, notamment dans des situations d'upwelling.

Les teneurs atmosphériques mesurées sur l'ensemble de la campagne sont de **535,3 ppt en F12** (dispersion de 0,9 %) et **258,7 ppt en F11** (dispersion de 1,2 %) (échelle SIO93). Le gradient interhémisphérique attendu (de 1,6% en F12 et de 1,2 % en F11, Walker et al., 2000) est inclus dans la dispersion mesurée (**Figure 2**). La table ci-dessous permet de comparer les teneurs mesurées à celles obtenues lors des campagnes antérieures et à celles prévues en 1998 par Walker et al. (2000) : l'accroissement atmosphérique persistant des teneurs en F12 et la diminution associée de la teneur en F11 correspondent bien à l'évolution temporelle attendue (**Figure 3**).

échelle SIO93	F12 (ppt)	F11 (ppt)	F11/F12
CITHER 1 mars 1993	516,5 \pm 5	267,3 \pm 3	0,518
ETAMBOT1 oct. 1995	520,5 \pm 8	263,4 \pm 9	0,506
ETAMBOT 2 mai 1996	530,7 \pm 5	260,5 \pm 3	0,491
Walker et al., 2000 (pour mi 1998)	540 \pm 0,7 Nord 531 \pm 0,3 Sud	262,3 \pm 0,4 Nord 259,1 \pm 0,3 Sud	0,485 Nord 0,488 Sud
EQUALANT août 1999	533,7 \pm 13	253 \pm 10	0,475
EQUALANT août 2000	535,3 \pm 5	258,7 \pm 3	0,483

2.4 . Calibration des échantillons d'eau de mer :

Les échantillons profonds ont été calibrés linéairement par rapport à des injections à intervalle régulier de 1,118 cm³ de standard AL99 (boucle 1S), en début de chaque station et tous les 10 échantillons en moyenne. Une mesure de "blanc" a été réalisée après chaque analyse de standard. Le traitement des échantillons profonds a été réalisé en utilisant des calibrations linéaires en F12 et en F11.

Les coefficients d'étalonnage utilisés pour des analyses d'eau de mer par rapport aux injections 1S de standard secondaire AL99 sont déterminés à partir des valeurs numériques suivantes :

- volume d'air de standard injecté = **1,118 cm³**
- teneurs respectives en F12 et F11 du standard secondaire AL99 (échelle SIO93), respectivement **807,6 ppt** et **438,8 ppt**.
- paramètres atmosphériques : pression atmosphérique normale, température moyenne du laboratoire d'hydrologie = **25°C**
- constante des gaz parfaits = 0,082 l.atm. °K⁻¹
 - **avant la station 50** : volume calibré de l'ampoule de verre utilisée pour le prélèvement des échantillons d'eau de mer = **38,884 cm³** à 1% près (calibration faite lors d'ETAMBOT 2).

Les coefficients d'étalonnage obtenus à partir de ces paramètres pour calculer les concentrations des échantillons d'eau de mer à partir des aires intégrées des pics F12 et F11 pour les standards 1S de AL99 sont :

avant la station 50 :

0,950 pmol/kg/unité d'aire pour F12

0,516 pmol/kg/unité d'aire pour F11

Le nouveau volume calibré **utilisé à partir de la station 50 a été mesuré égal à 35,62 cm³** à 0,06 % près (calibration post-campagne faite à l'IUEM en octobre 2001). Une correction du fichier est intervenue en octobre 2001 suivant laquelle toutes les teneurs en **F12 et F11 à partir de la station 50** ont été multipliées par le facteur **1,0916** (= 38,884/35,62).

Une correction à la non linéarité du F11 sera nécessaire pour comparer les résultats des teneurs océaniques de surface avec les valeurs théoriques correspondant à l'équilibre de solubilité (*Warner and Weiss*, 1985) et de valider ainsi globalement la méthode d'analyse sur toute la gamme échantillonnée.

Pour le F12, la réponse du détecteur étant linéaire dans la gamme de concentration étudiée, aucune correction n'est nécessaire.

3 - Performances de la méthode d'analyse :

3.1. Répétabilité des mesures :

3.1.1. Reproductibilité des standards :

Prises séparément, les séries d'analyses alternées du standard secondaire AL99 et du standard primaire SIO permettent d'accéder à la **reproductibilité** sur les injections d'une même quantité de standard.

	n	reproductibilité F12	reproductibilité F11
1S AL99 st17	4	0,63 %	1,36 %
1S SIO st17	4	1,4 %	1,3 %
1S AL99 st24	2	0,33 %	1,24 %
1S SIO st24	2	1,4 %	0,87 %
1S AL99 st89	4	1,1 %	1,4 %
1S SIO st47	4	0,95 %	1,46 %

En moyenne, la reproductibilité sur les standards est de **0,97 %** ($\pm 0,4$ %) sur F12 et **1,1 %** ($\pm 0,33$ %). La meilleure répétabilité que celle obtenue lors d'Equalant 99 et des campagnes Etambot peut provenir :

- des meilleurs réglages de pression d'entrée du chromatographe qui ont permis d'obtenir une courbe de réponse du détecteur plus stable,
- du fait que l'ECD est resté sous tension pendant toute la durée de la campagne, sans possibilité de génération d'instabilité lors de sa remise sous tension.

3.1.2. Stations-tests et limite de détection :

Généralement le niveau de contamination des analyses de fréons a trois composantes:

- le "blanc de ligne" correspondant à une contamination interne à la ligne ou au chromatographe et au taux de fuite de la chaîne d'analyse,
- le "*stripper-blank*" ou "blanc de dégazage" correspondant au résidu de dégazage d'un échantillon d'eau de mer,
- le "blanc bouteilles" correspondant au niveau moyen de contamination des bouteilles et des seringues de prélèvement : une estimation peut en être faite à partir des "doublés-bouteilles" réalisés lors du déclenchement de 2 bouteilles au même niveau lors de certaines stations afin de tester successivement les 24 bouteilles.

La **limite de détection** de la méthode d'analyse est accessible statistiquement par l'écart-type obtenu sur la moyenne d'une série de mesures de concentrations proches de zéro. Ces mesures sont réalisées lors de "**stations-tests**" pour lesquelles toutes les bouteilles sont échantillonnées à la même profondeur, dans un niveau de concentration le plus bas possible.

Stations-tests	F12 (pmol/kg)	\pm F12 (pmol/kg) limite de détection F12	F11 (pmol/kg)	\pm F11 (pmol/kg) limite de détection F11
15 (3000m)	0,022	0,008	0,053	0,021
34 (3000m)	0,0134	0,008	0,041	0,011
49 (3000m)	0,0098	0,006	0,041	0,0086
Limite de détection moyenne (pmol/kg)		0,0073 (\pm 0,001)		0,0135 (\pm 0,005)

La limite de détection obtenue est meilleure que celle des résultats d'Equalant 99, grâce aux réglages optimisés des paramètres chromatographiques et au choix plus judicieux du niveau du minimum de fréons (3000 m au lieu de 1000 m). Nous retenons les valeurs les plus faibles (colonnes \pm F12 et \pm F11) pour la limite de détection de **0,006 pmol/kg pour F12 et 0,0086 pmol/kg pour F11**.

La mesure des concentrations d'échantillons collectés dans une masse d'eau "sans fréons" lors des stations-tests permet aussi d'accéder au **niveau de contamination moyen** des bouteilles (colonnes F12 et F11). Lors de CITHER 1 cette approche a été applicable dans le bassin Atlantique équatorial Est (à la station 200), non encore "naturellement contaminé" en fréons. On observe une diminution régulière du taux de contamination moyen en F11 de la station 15 à la station 49 qui est due probablement à une réelle diminution des concentrations en F11 d'Ouest en Est au niveau 3000 m.

3.1.3. Doublés bouteilles :

Un moyen d'évaluation de la reproductibilité de la méthode peut être appréhendé par l'exploitation des doublés de prélèvements échantillonnés lors d'une même station. Lorsque la logistique le permettait (compromis en faveur d'un doublé bouteilles plutôt qu'un niveau d'échantillonnage supplémentaire) deux bouteilles consécutives ont été fermées au même niveau lors de la remontée de la rosette.

La **Figure 4a** indique les concentrations en F11 mesurées sur tous les doublés bouteilles lors de la campagne, en fonction du numéro de station. La comparaison avec la distribution des doublés salinité (**Figure 4b**) montre que les écarts les plus importants observés en F11, associés à de forts écarts en salinité, correspondent à des eaux échantillonnées dans des zones de forts gradients (entre la UNADW et la AAIW, par exemple). Ceci est particulièrement net pour les stations 2, 22, 23, 25, 26, 54, et 77.

La moyenne des valeurs absolues des écarts entre les 2 valeurs mesurées pour les doublés est de **0,011 \pm 0,01 pmol/kg pour F12** et de **0,0047 \pm 0,0036 pmol/kg pour F11**. La similitude entre les moyennes et l'écart-type sur les moyennes de chaque série conforte les résultats obtenus.

3. 2. Niveaux de contamination moyens :

3.2.1. Blancs de ligne :

La **Figure 5** donne les distributions des concentrations en F11 et F12 correspondant aux blancs de ligne tout au long de la campagne.

A la différence d'Equalant 99, les courbes d'évolution temporelle des « blancs » de F12 et F11 est stable. On ne constate pas de contamination particulière en F12.

Il n'y a pas de corrélation significative entre F11 et F12 (**Figure 5b**). Ceci est le signe du comportement indépendant des 2 fréons au niveau de la ligne d'extraction (taux de fuite) et des analyses chromatographiques (paramètres d'intégration).

Les valeurs moyennes des blancs de ligne sont **0,015 ± 0,011 pmol/kg** en F12 et **0,010 ± 0,008 pmol/kg** en F11, soit très similaires à la reproductibilité estimée sur les doublés bouteilles. Ceci indique que la méthode de prélèvement (bouteilles Niskin, seringues et robinets) ne rajoute pas ou peu de contamination sur les échantillons.

3.2.2. Evolution des teneurs au niveau de l'eau circumpolaire « sans fréons »:

Moyennes au niveau 1000 m :

L'eau circumpolaire supérieure autour de 1000 m correspond au niveau des eaux les plus vieilles de l'Eau Circumpolaire supérieure (UCPW), la moins contaminée en fréons.

Les moyennes des teneurs en CFCs à ce niveau pour l'ensemble des stations sont **0,016 ± 0,011 pmol/kg en F12** et **0,036 ± 0,014 pmol/kg en F11**, soit assez proches des teneurs moyennes mesurées à 3000 m (CPW) lors des stations tests (voir Table stations tests).

Cependant l'épaisseur du noyau de UCPW étant très fine (environ 200m) et les masses d'eau avoisinantes (AAIW et UNADW) étant enrichies en CFCs, l'unique niveau échantillonné dans la gamme 800-1200 m ne correspond pas forcément au minimum « vrai » en fréons pour chaque station.

La **Figure 6** indique l'évolution des moyennes des teneurs à 1000m depuis 1993. Une tendance positive semble montrer un enrichissement progressif à cette profondeur depuis une dizaine d'année.

Recherche du minimum « vrai » entre 2500 m et 3500 m :

Comme pour Equalant 99, une étude statistique de l'évolution des minima mesurés à chaque station permet de localiser plutôt dans la gamme 2500-3500m les valeurs mesurées les plus faibles.

La **Figure 7** compare les teneurs mesurées à 1000 m avec les minima obtenus au niveau de l'eau Circumpolaire entre 2500 et 3500 m. Les profondeurs où sont le plus souvent observés les minima sont 2700 m et 3300 m, le niveau 3000 m étant parfois enrichi en CFCs.

Pour toute l'épaisseur d'eau comprise entre 2500 et 3500 m, les valeurs moyennes sont de **0,0095 ± 0,0085 pmol/kg en F12** et de **0,015 ± 0,008 pmol/kg en F11**.

Les moyennes mesurées pour les stations tests ont montré une décroissance des concentrations d'ouest en est.

Le tableau ci-dessous montre que ceci n'est pas observé pour les minima de la CPW, signe que cette masse d'eau n'a pas encore été mélangée, soit par mélange vertical, soit avec une eau originaire de l'ouest (à la différence de l'eau Circumpolaire supérieure).

	F12	± F12	F11	± F11
7°W- 10°W	0,004	0,006	0,009	0,005
0°E	0,005	0,003	0,014	0,004
6°E-10°E	0,006	0,006	0,015	0,004

Les concentrations moyennes des **minima de la CPW** sont **0,0061 ± 0,0065 pmol/kg** en F12 et **0,013 ± 0,006 pmol/kg** en F11, soit plus de 2 fois plus faibles que les teneurs à 1000 m.

La **Table** ci-dessous compare les évaluations de bas niveaux en CFCs lors d' Equalant 2000 suivant différentes approches.

(pmol/kg)	F12	± F12	F11	± F11
blancs de ligne	0,015	0,011	0,010	0,008
1000m - UCPW	0,016	0,011	0,036	0,014
2500-3500 m	0,0095	0,0085	0,015	0,008
mini CPW 2500-3500 m	0,0061	0,0065	0,013	0,006
doublés bouteilles	0,011	0,01	0,0047	0,0036
limite de détection		0,006		0,0086

Nous retenons comme niveau de contamination moyen les valeurs les plus basses évaluées (hors blancs de ligne) qui correspondent au minima de la CPW.

Ces valeurs, ainsi que les écarts types associés, sont très proches de la limite de détection évaluée à partir de la dernière station-test #49. Nous n'avons pas d'obligation de retrancher de blancs de contamination en F12 comme en F11, pour l'ensemble de la campagne.

4 – Références bibliographiques :

- Andrié C. et J.F. Ternon, Mesures des chlorofluoromethanes in : Campagne CITHER 1. Recueil de données CTDO2, traceurs géochimiques et courantométrie. Volume 3/4, traceurs géochimiques (1), Documents Scientifiques du Centre ORSTOM de Cayenne N°O.P.15, 67-77, 1994.

- Andrié C., F. Baurand et S. Freudenthal, Analyse des chlorofluoromethanes, Rapport de Campagne à la mer, Campagne EQUALANT 99, Rapport Interne LODYC n°2000-01, 2000.

- Bullister and Weiss, Determination of CCl₃F and CCl₂F₂ in seawater and air, *Deep-Sea Res.*, 35, 5, 839-853, 1988.

- Cunnold D.M., P.J. Fraser, R.F. Weiss, R.G. Prinn, P.G. Simmonds, S.R. Miller, F.N. Alyea and A.J. Crawford, Global trends and annual releases of CCl₃F and CCl₂F₂ estimated from ALE/GAGE and other measurements from July 1987 to June 1991, *Journal of Geophysical Res.*, 99, 1107-1126, 1994.

- Walker S., R. Weiss and P. Salameh, Atmospheric histories for the halocarbons CFC-11, CFC-12, CFC-113 and carbon tetrachloride, *Journal of Geophysical Res.*, 105, 14285-14296, 2000.

- Warner M. and R. Weiss, Solubilities of chlorofluorocarbons 11 and 12 in water and seawater, *Deep-Sea Res.*, 32, 12, 1485-1497, 1985.

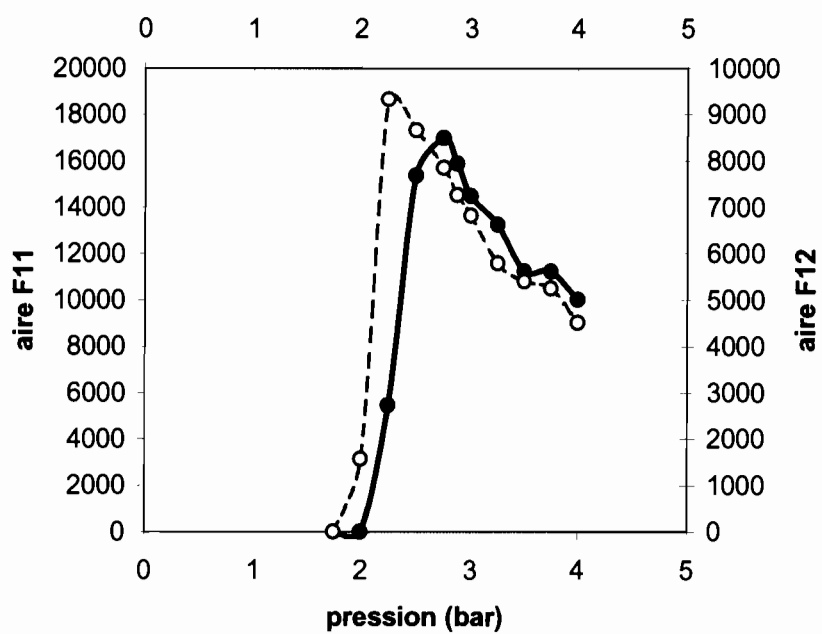


Figure 1 : Influence de la pression d'entrée chromato sur la sensibilité du détecteur ECD.

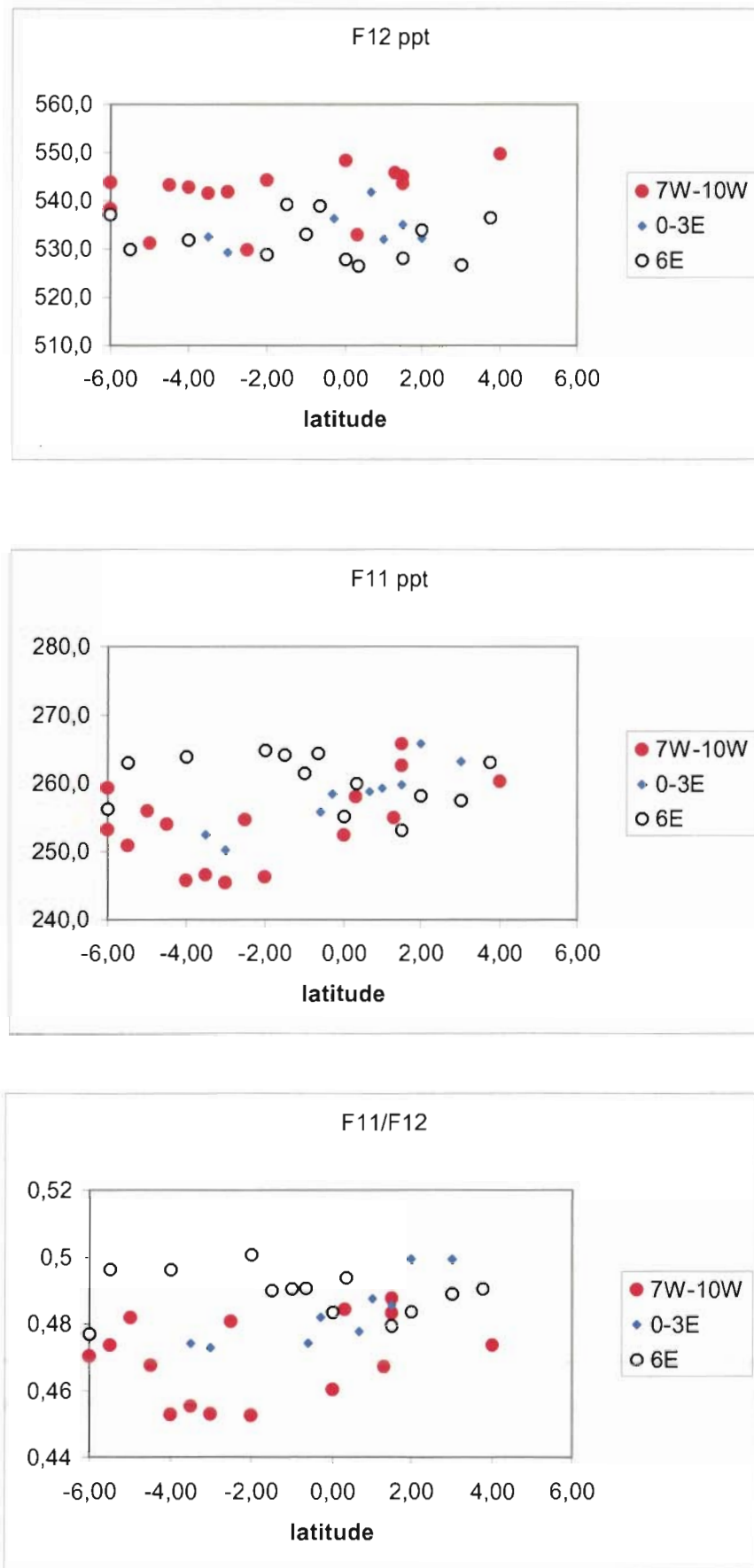


Figure 2 : Distributions méridiennes des teneurs atmosphériques en F11 et F12 et du rapport F11/F12.

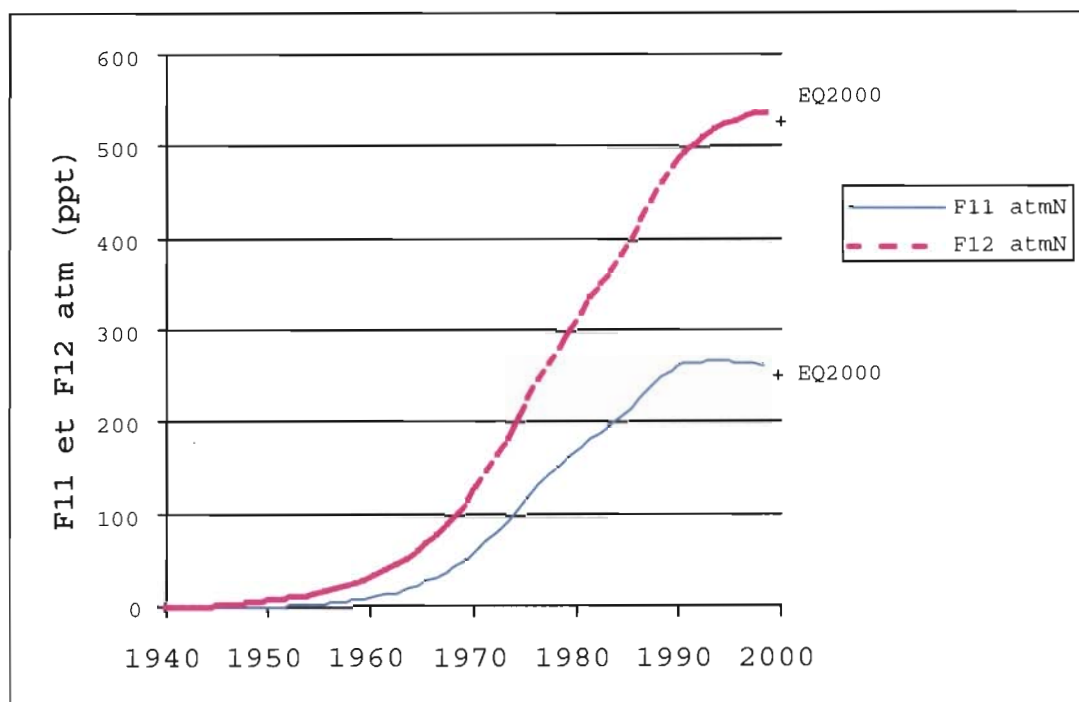


Figure 3 : Comparaison des teneurs atmosphériques mesurées pendant EQ2000 à la valeur attendue par le modèle de Walker et al. (2000).

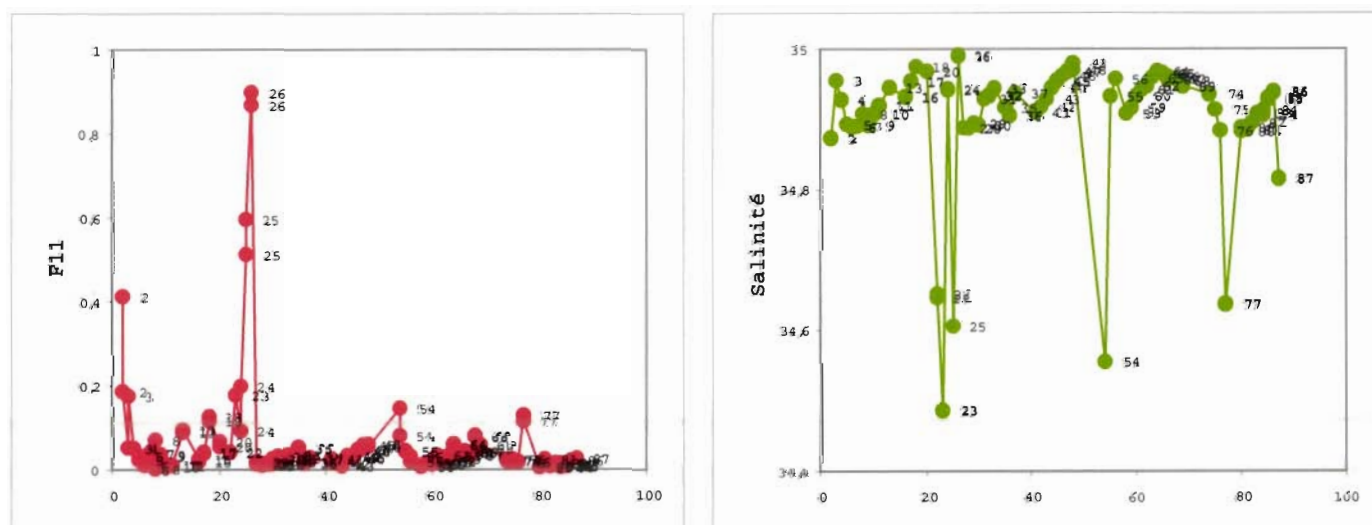
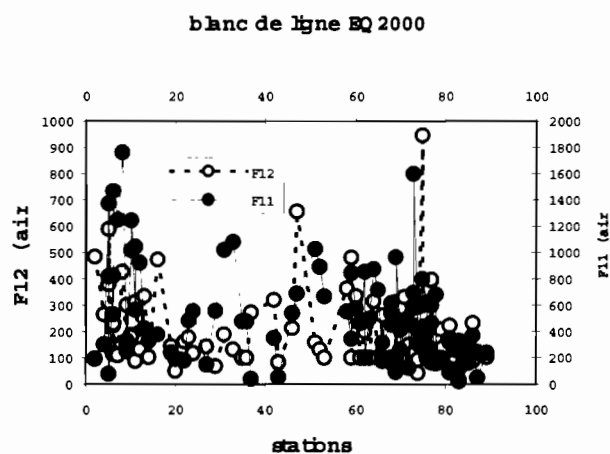


Figure 4 : Concentrations en F11(a) et en salinité (b) mesurées sur tous les doublés bouteilles lors de la campagne.

a)



b)

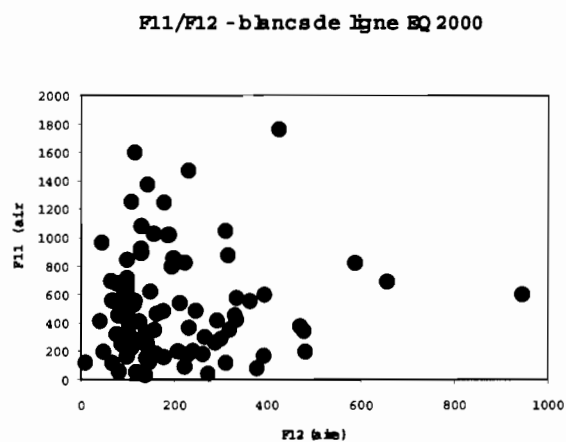


Figure 5 : distributions des concentrations en F11 et F12 (a) correspondant aux blancs de ligne tout au long de la campagne. Diagramme F11-F12 correspondant (b).

évolution blancs F11 & F12

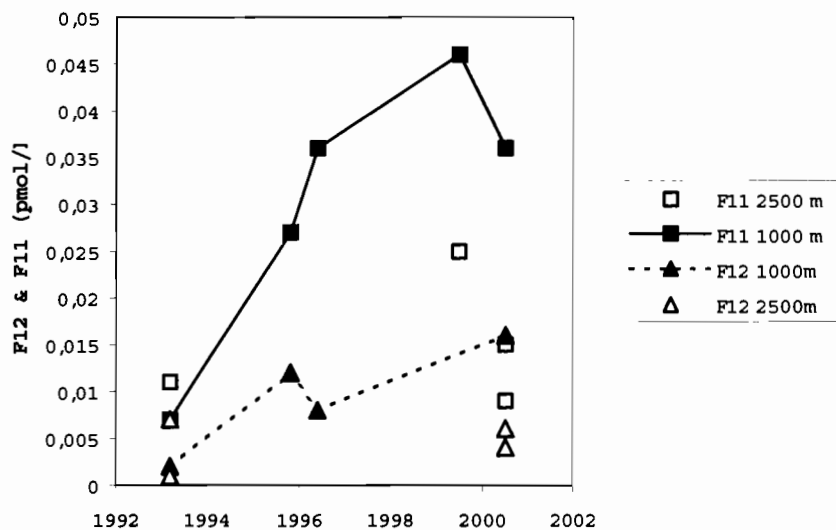
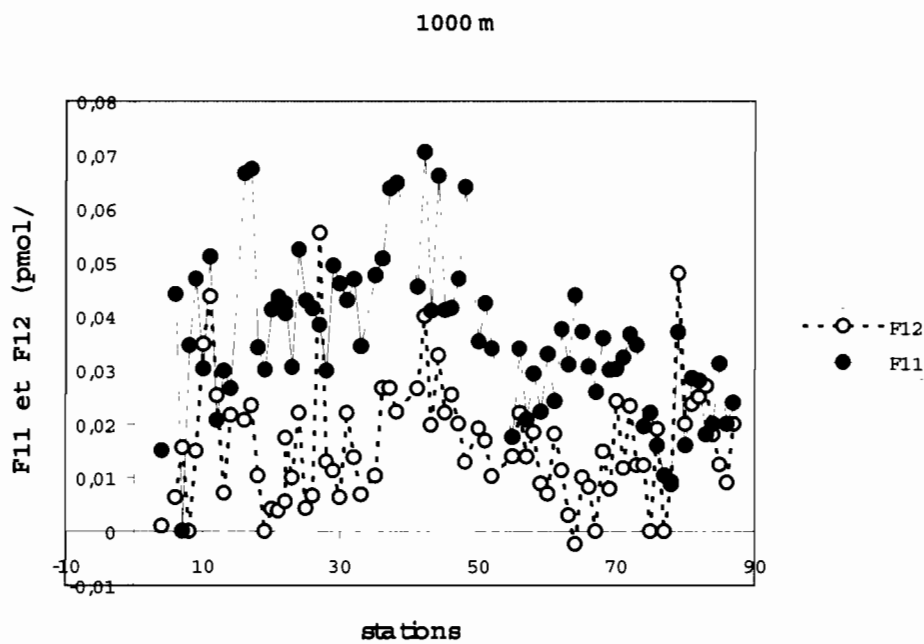
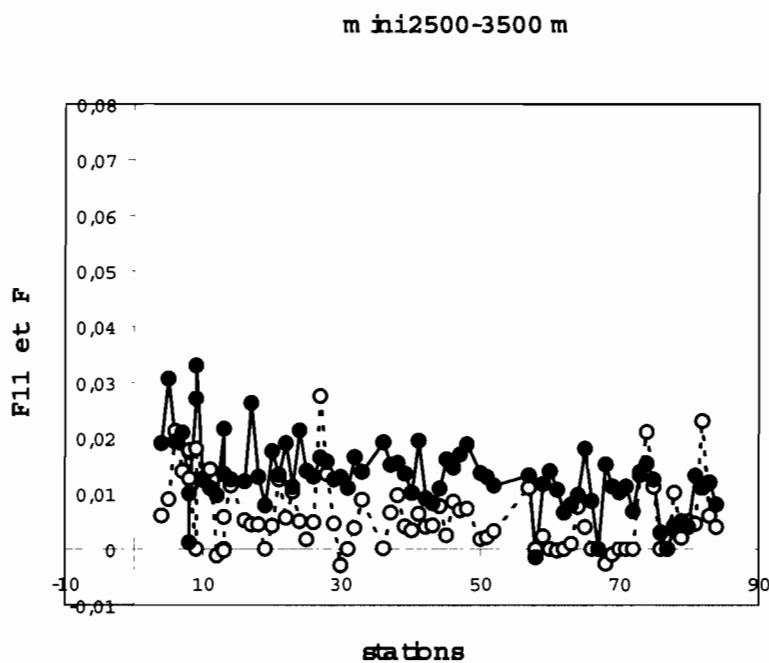


Figure 6 : évolution des moyennes des teneurs à 1000m depuis 1993.



$\langle F12 \rangle = 0,0061 \pm 0,0065 \text{ pmol/kg}$; $\langle F11 \rangle = 0,013 \pm 0,006 \text{ pmol/kg}$.



$\langle F12 \rangle = 0,016 \pm 0,011 \text{ pmol/kg}$; $\langle F11 \rangle = 0,036 \pm 0,014 \text{ pmol/kg}$.

Figure 7 : comparaison des teneurs mesurées à 1000 m avec les minima obtenus au niveau de l'eau Circumpolaire entre 2500 et 3500 m.

Variabilité isotopique (^{18}O et ^{13}C) des eaux océaniques de surface dans l'Atlantique équatorial

Catherine Pierre, LODYC, Paris.

Au cours de la campagne EQUALANT 2000, des prélèvements d'eau de surface dédiés aux analyses des isotopes stables ont été systématiquement réalisés en chaque station des radiales à 10°W, 0° et 6°E, et selon le transect latitudinal à 6°S. Pour chaque station, deux échantillons d'eau pour les analyses isotopiques du carbone du ΣCO_2 ont été recueillis dans des flacons de 125 ml et ont été immédiatement empoisonnés avec 1 ml d'une solution saturée en chlorure mercurique, et un échantillon d'eau pour l'analyse isotopique de l'oxygène de l'eau a été recueilli dans un flacon de 20 ml.

Au LODYC, les protocoles analytiques de traitement des échantillons sont dérivés de :

3. la technique d'équilibration eau- CO_2 de Epstein et Mayeda (1953) pour l'analyse isotopique de l'oxygène de l'eau.
4. la technique d'extraction acide du ΣCO_2 de Kroopnick (1974) pour l'analyse isotopique du carbone du ΣCO_2 de l'eau.

Les compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ sont exprimées dans la notation conventionnelle ($\delta = [(R_e/R_r) - 1] \times 1000$, où $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, et $e =$ échantillon et $r =$ référence) respectivement par rapport aux références internationales SMOW pour $\delta^{18}\text{O}$ (Craig, 1961) et PDB pour $\delta^{13}\text{C}$ (Craig, 1957). La précision analytique 2σ est égale à 0,01‰ et la reproductibilité analytique est de 0,02‰.

Les échantillons ont été traités au LODYC dans le cadre du stage de DEA de Frédéric Chaillan dont le sujet était : « composition isotopique de l'oxygène et du carbone des eaux de surface de l'Atlantique équatorial (campagnes EQUALANT 1999-2000) ». L'ensemble des résultats isotopiques actuellement disponibles concerne

les mesures des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ de 175 échantillons des trois radiales d'EQUALANT 99 et des trois radiales plus le transect d'EQUALANT 2000. Les analyses complémentaires des échantillons prélevés aux points fixes au cours d'EQUALANT 99 devraient être réalisées prochainement.

Les résultats montrent une faible variabilité des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ (de 0,4 à 0,8‰) sur l'ensemble du transect équatorial, à l'exception de la zone du Golfe de Guinée dont les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ s'abaissent jusqu'à 0‰ par suite de la dilution par les eaux du fleuve Zaïre. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont sensiblement plus élevées à l'Ouest (moyenne 1,7‰) qu'à l'Est (moyenne 1,4‰) par suite de l'influence de l'upwelling dans la partie orientale de l'Atlantique équatorial. Un des résultats importants de cette étude concerne la variabilité interannuelle entre 1999 et 2000 le long de la radiale à 10°W ; les paramètres de la dynamique océanique ont montré que l'upwelling était plus actif en 2000 qu'en 1999; on remarque également que les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont systématiquement plus basses en 2000 par rapport à 1999, ce qui confirme que l'activité de l'upwelling plus forte augmentait le flux ascendant de sels nutritifs.

Références :

- Chaillan F. 2001. Composition isotopique de l'oxygène et du carbone des eaux de surface de l'Atlantique équatorial (campagnes EQUALANT 99-00). Rapport du DEA "Météorologie et Environnement", 46 pp.
- Craig H., 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 12, 133-149.
- Craig H., 1961. Standards for reporting concentration of deuterium and oxygen 18 in natural waters. *Science*, 133, 1833-1834.
- Epstein S., et Mayeda T.K., 1953. Variations of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio in natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4, 212-224.
- Kroopnick P., 1974. The dissolved O_2 - CO_2 - ^{13}C system in the Eastern Equatorial Pacific. *Deep Sea Res.*, 32,1, 57-84.

DONNEES DE TURBIDITE

Annick Vangriesheim (IFREMER, DRO/EP)

L'étude des couches néphéloïdes (= couches où la diffusion de la lumière augmente du fait de l'augmentation de la teneur en particules) dans les océans peut fournir des informations complémentaires sur l'origine et la circulation des masses d'eau ainsi que sur l'existence de resuspension, d'apports latéraux, etc ... Si on observe presque partout des couches néphéloïdes de fond liées à la proximité du fond, elles ont un développement très variable en fonction de l'activité des courants près du fond et de la nature du fond. Des couches néphéloïdes intermédiaires traduisent l'existence d'un transport latéral (transitoire ou permanent) de couches néphéloïdes de fond formées dans des régions moins profondes.

L'IFREMER a mis en place ces dernières années un programme d'études en géologie, biologie en relation avec la physique locale dans la zone de l'Atlantique équatorial située au large du Gabon, du Congo et de l'Angola (programme Zaïango). Un des phénomènes originaux au niveau de cette marge est la présence des importants apports particulaires liés au fleuve Congo-Zaïre. L'existence de la radiale 6° Sud de la campagne EQUALANT située au large de l'estuaire du fleuve Congo-Zaïre a été l'occasion d'une collaboration avec IFREMER DRO/EP (A. Vangriesheim) pour l'étude des couches néphéloïdes en relation avec les autres paramètres hydrologiques et chimiques de la campagne.

Un capteur additionnel a donc été ajouté à la CTD de manière à obtenir des profils verticaux de turbidité (directement liée à la quantité de particules en suspension). Il s'agissait d'un LBSS (Light Back-Scattering Sensor) commercialisé par WETLabs aux USA. Le capteur, alimenté en 12 volts par la CTD émet un fin rayon de lumière rouge (880 nm) qui est diffusée par les particules en suspension. La lumière diffusée vers l'arrière ("back-scattering") est captée par une diode réceptrice placée tout près de la diode émettrice et transformée en une tension électrique comprise entre 0 et 5 volts. Cette tension qui est linéairement reliée à la quantité de particules en suspension est enregistrée sur la voie 4 de la CTD.



Traitement des données :

- La diffusion par les particules dépend non seulement de la quantité de particules mais aussi de leur répartition en taille, de leur forme et de leur nature (organiques, minérales). Pour obtenir les bons paramètres de la droite d'étalonnage, il faudrait donc effectuer des étalonnages avec les mêmes natures de suspensions que celles rencontrées lors de chaque campagne. Du fait de sa complexité expérimentale, ce travail n'a pas été fait pour la campagne EQUALANT 2000. Les données ont donc été traitées en volts (comme le font de nombreux auteurs) et gardent donc un caractère de données "en relatif".

- Les mesures d'optique étant des mesures très bruitées (notamment par le passage de grosses particules qui font saturer le signal), les profils bruts contenaient de très nombreuses valeurs aberrantes dont le seuil évolue sur la verticale rendant leur élimination automatique impossible. Ce travail a été réalisé (sous Excel) de façon semi-automatique, en éliminant les valeurs qui s'écartaient de plus d'une certaine valeur de la moyenne des 5 valeurs précédentes. Après quelques essais, on a choisi d'éliminer les valeurs qui s'écartaient de plus de 0.005 de la moyenne des 5 valeurs précédentes. Les données ainsi filtrées ont ensuite été lissées par moyenne courante sur 5 valeurs et sur 11 valeurs. Sauf pour les stations de petite profondeur, c'est le profil moyenné sur 11 qu'il conviendra de conserver pour analyser les résultats. Les graphiques ci-dessous de la station 80 montrent ces différents stades du traitement.

- Sur presque toutes les stations entre la 68 et la fin, un décalage est apparu dans le signal à environ 150 mètres à la descente suivi d'un décalage opposé à la remontée à une profondeur analogue. La comparaison avec les autres profils indique que c'est la partie comprise entre la surface et cette immersion qui est erronée. Un recalage a donc été effectué pour tous ces profils. Les graphiques ci-dessous de la station 80 montrent ce recalage.

- Par ailleurs, le profil de la station 72 était erroné entre 428 m et 2292 m. Ces valeurs ont été éliminées et constituent un "trou" dans ce profil.

