



HAL
open science

Hydrologie et hydrodynamisme dans les bouches de Bonifacio : mesures in-situ, modélisation, influence sur la biomasse

Olivia Gerigny

► To cite this version:

Olivia Gerigny. Hydrologie et hydrodynamisme dans les bouches de Bonifacio : mesures in-situ, modélisation, influence sur la biomasse. Planète et Univers [physics]. Université Pascal Paoli, 2011. Français. NNT: . tel-00603946

HAL Id: tel-00603946

<https://theses.hal.science/tel-00603946>

Submitted on 27 Jun 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE DE CORSE-PASQUALE PAOLI
ECOLE DOCTORALE ENVIRONNEMENT ET SOCIETE
UMR CNRS 6134 (SPE)
- M²PE -



**Thèse présentée pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE CORSE**
Mention : Biologie des populations et Ecologie

Soutenue publiquement par

Olivia GERIGNY

le 19 novembre 2010

**Hydrologie et hydrodynamisme dans les bouches de
Bonifacio : mesures in-situ, modélisation, influence sur la
biomasse.**

Jury

Rapporteurs :

Mr Frédéric GARABETIAN, Professeur, Université de Bordeaux 1
Mr Joaquim GARRABOU, Dr-HDR, Institut de Ciencies del Mar

Examineurs :

Mr Gérard PERGENT, Professeur, Université de Corse

Directeur(s) :

Mr Bernard DI-MARTINO, Dr-HDR, Université de Corse
Mr Jean-Claude ROMANO, Directeur de recherche, Université de Corse

**Hydrologie et hydrodynamisme dans les bouches de Bonifacio :
Mesures *in-situ*, modélisation, influence sur la biomasse**

Résumé :

Les bouches de Bonifacio (Corse du Sud) sont connues pour leur hydrodynamisme violent et la présence d'écosystème marin riche et complexe, géré par la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio. Pour avoir une bonne connaissance des eaux où vit cette biomasse, des mesures *in-situ* (courantologiques et hydrologiques) ont été faites lors de 7 missions océanographiques (CYRCE). Grâce à des enregistrements de courant, par deux ADCP (profileurs de courants), l'un mouillé et l'autre embarqué sur le N/o Tethys II (INSU-CNRS), les conditions de courant régissant le milieu sont décrites, globalement et par l'étude de différents cas en relation avec les deux vents dominants (est et ouest). Le traitement statistique des données et leur intégration par un maillage numérique de la zone a permis une première approche des phénomènes majeurs du système des courants. Les données de température, salinité, oxygène dissous, turbidité et fluorescence ont montré les structures caractéristiques et leur variabilité dans l'espace et le temps. Enfin le modèle de simulation 3D Symphonie (laboratoire POC-CNRS-Toulouse) a été adapté aux bouches de Bonifacio sur près d'une année. Ce modèle, a d'abord élargi notre vision de la courantologie sur les parties non couvertes par les mesures *in-situ*, et permis de comparer les données réelles et simulées. De plus, des outils d'application du modèle, ont permis des simulations de la dispersion de larves à partir des cantonnements de réserve et de dilution de matière, par lâchers de traceurs virtuels et d'en suivre l'évolution sur plusieurs jours, sous différentes configurations.

Mots-clés : courant, hydrologie, CYRCE, modèle, ADCP, biomasse, Bonifacio

**Hydrology and hydrodynamism in Strait of Bonifacio:
In-situ measurements, modelisation, affect on biomass**

Straits of Bonifacio (south of Corsica) are known for their strong hydrodynamic and the presence of an elaborate and complex marine ecosystem, managed by the Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio. To have a good knowledge of the water where lives this biomass, the in-situ measurements (currentologic and hydrologic) have been made during 7 oceanographic cruises (CYRCE). Thanks to the current recordings, made by two ADCP (current profiler), one moored, and the other boarded on N/o Tethys II (INSU-CNRS), the current conditions managing the environment are described, on the whole, and by the study of different cases connected with two prevailing winds (east and west). The statistic processing of data and their integration by a numeric meshing of the area has allowed a first approach of the current system main phenomenon. The temperature, salinity, dissolved oxygen, turbidity and fluorescence data have showed the characteristic structures and their variability in space and time. Finally the 3D simulation model Symphonie (laboratoire POC-CNRS-Toulouse) is adapted to strait of Bonifacio on nearly one year. This model, has first broaden our currentologic view on the parts not covered by the in-situ measurements, and second has allowed to compare the in-situ and simulated data. Moreover, the implemented tools of the model, have allowed simulations of larvae dispersion from protected areas and simulations of the material dilution. These simulations were done by virtual tracer releases, whose evolution is followed during several days, under different configurations.

Key words: current, hydrology, CYRCE, model, ADCP, biomass, Bonifacio

Thèse de doctorat a été préparée au laboratoire des Sciences Physiques de l'Environnement, Campus Grimaldi, 20250 Corte, France

Auteur : Olivia Gerigny, sous la direction de Bernard Di-Martino (Université de Corse) et de Jean-Claude Romano (Université de Corse).

Soutenance de thèse prévue en novembre 2010

Ce mémoire doit être cité de la manière suivante :
GERIGNY, O., 2010. Hydrologie et hydrodynamisme dans les bouches de Bonifacio : mesure in-situ, modélisation, influence sur la biomasse. Thèse de doctorat, Université de Corse – Pascal Paoli, 241 p + annexes.

Thèse de doctorat financée par la Collectivité Territoriale de Corse



*«Le poète a inventé la nymphe mais
la nature avait déjà créé l'océan»*

Anatole France

Une thèse, c'est avant tout une grande aventure et la mienne n'aurait pu se faire sans la participation, le travail, le soutien, la présence, la joie et la bonne humeur des personnes qui m'ont entourés durant ces trois années.

Dans un premier temps, je voudrais exprimer toute ma reconnaissance aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer mon travail. Je souhaite remercier en particulier Frédéric Garabetian et Joaquim Garrabou qui ont eu la lourde tâche d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je souhaite remercier, Bernard Di Martino et Jean-Claude Romano sans qui cette thèse n'aurait pu se faire. Merci à tous les deux pour la confiance que vous m'avez accordée et les connaissances que vous m'avez transmises tant au niveau scientifique, professionnel, qu'humain.

Bernard merci pour ta gentillesse, ta disponibilité, ta bonne humeur toujours présente, pour toutes ces programmations ou codes Matlab, LaTeX. Pour ton courage d'avoir pris une doctorante biologiste. Et pour les bons moments passés à la récupération du courantomètre.

Jean-Claude, merci, pour cette aventure qui a commencé il y a plus de trois ans sur le port d'Ajaccio. Cette mission CYRCE restera un grand moment pour moi... Merci pour votre écoute et ces discussions aussi bien scientifiques que culturelles, pour toutes ces journées de travail sur Ajaccio, pour votre gentillesse et votre disponibilité malgré la distance.

Merci à l'équipe de Vignola qui m'a toujours accueillie avec une grande gentillesse et qui m'a fait me sentir toujours en joie de descendre les voir. Un grand merci à Cathy Lugrezi, pour sa gentillesse et ses nombreux encouragements.

Je remercie l'équipe du Pôle Océanographique Côtier de Toulouse de m'avoir accueillie durant la semaine de stage Sirocco, de leur gentillesse et de leur disponibilité.

Je remercie Vincent Dutreuil de sa disponibilité et de son travail pour avoir fourni les données Téthys

Je remercie la Collectivité Territoriale de Corse pour son soutien financier durant ces trois années.

Je remercie Madame et Monsieur Pergent, pour leur gentillesse et leurs bons conseils, ainsi que l'équipe EqEL pour avoir toujours laissé leur porte ouverte.

Merci Maylis pour ta présence et ta douceur, d'avoir toujours su trouvé les bons encouragements et de ton soutien durant ces trois ans. De tous ces moments passés ensemble, les bons comme les plus étonnants.

Merci Céline pour toute l'aide que tu m'as apportée, surtout pour tout le temps que tu as passé avec moi sur des statistiques et tous ces logiciels dont tu maîtrisais si bien la logistique. Merci pour tous les moments partagés.

Merci ma petite Marina, pour ta présence, ton aide, tes longues corrections, les discussions scientifiques, mais également tous

les moments au soleil ou en terrasse ou autres...qui resterons toujours des moments remplis d'humour et de gentillesse.

Une pensée pour Cécilia, qui malgré la distance a toujours répondu présente.

Aurélie merci pour ta présence, pour tous ces moments passés ensemble, souvent devant un café, merci de ton soutien. Merci d'avoir su, quand cela était nécessaire trouver les bons mots.

Merci Pauline, pour toutes ces pauses et cafés. Les moments d'humour où tu trouvais des pics de CO₂ avant ta combustion. Courage il ne te reste plus qu'un an...

Merci Marie, pour ta bonne humeur toujours présente et d'avoir mis du mouvement la nuit dans l'université. Ces moments resteront pour moi des instants de partage.

Merci Bernard, quel courage de m'avoir supporté pendant ces deux ans, et d'avoir fait tant d'aller-retour Corte/Bastia, à 5 h du matin.

Merci Cynthia et Vanina d'avoir partagé ce bureau avec moi, merci pour votre gentillesse et surtout pour vos bons conseils.

Un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et qui ont apporté un soutien scientifique ou humain durant cette période des trois ans. Merci : Roselyne, Rachelle, Morgane, Christophe, Émilie, Laurianne.

Antoine Pieri, Yves Thibaudat, Alex, Isabelle, Xavier, Pierre, Anne-Marie, Marianne, Caroline, Marie-Anne, Florian, Stéphanie, Léon, Jennifer, Agathe, Françoise

Je remercie ma famille et mes proches de leur présence, de leur soutien, de leur encouragement. Patrick, Anny, Malika, Maxime et Gaël, sans vous cette aventure n'aurait pas été la même. Peu de mots peuvent vraiment exprimer mon ressenti donc un grand merci à tous.

Sincèrement à vous tous un grand merci.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
Chap I. Matériels et méthodes	9
I.1. Bonifacio	9
I.1.1. Localisation	9
I.1.2. Géologie, fond marin bathymétrie	9
I.1.3. Étude du vent.....	12
I.1.4. Réserve Naturelle Internationale des Bouches de Bonifacio (RNBB)	14
I.1.5. Effet venturi entre la Corse et la Sardaigne	14
I.2. Campagnes à la mer	18
I.2.1. Campagnes Courants et hYdrologie pour la Région Corse et l'Environnement (CYRCE)	18
I.2.2. Système SAVED du Téthys II -ADCP mobile.....	19
I.2.3. Capteurs hydrologiques	20
I.2.4. Autres missions.....	23
I.2.5. Données d'un ADCP mouillé aux îles Lavezzi : opération de la Direction Départementale de l'Equipement (D.D.E.)	24
I.2.6. Les données de vent durant les missions CYRCE.....	25
I.3. Outils informatiques et traitement des données.....	25
I.3.1. Outils informatiques	25
I.3.2. Méthode de traitement de données.....	25
Chap II. Études des courants : données in-situ et simulations.....	29
II.1. Données disponibles	29
II.1.1. Le vent de la zone- Pertusato- station de référence.....	29
II.1.2. Circulation générale	30
II.1.3. Données courantologiques du système SAVED antérieures aux missions CYRCE	32
II.1.4. Récapitulatif des données météo des missions précédant CYRCE	32
II.1.5. Données biologiques (espèces indicatrices des courants).....	38
II.1.6. Données courantologiques prises pour l'installation de la station d'épuration	39
II.1.7. Carte SeaWiff.....	40
II.1.8. Quelques modèles de courantologie.....	41
II.2. Éléments de courantologie mesurés.....	42
II.2.1. Diminution de la variabilité de l'intensité des courants en fonction de la profondeur.....	44
II.2.1.1. Diminution de la variabilité de l'intensité des courants en fonction de la profondeur pour l'ADCP mouillé	44
II.2.1.2. Diminution de la variabilité de l'intensité des courants en fonction de la profondeur pour l'ADCP mobile	47
II.2.2. Comportement des directions en profondeur	49
II.2.2.1. Comportement des directions en profondeur pour l'ADCP mouillé....	49
II.2.2.2. Comportement des directions en profondeur pour l'ADCP mobile	54
II.3. Diminution de la variabilité des directions de courant avec augmentation de l'intensité du courant.....	56

II.3.1. Diminution de la variabilité des directions de courant avec augmentation de l'intensité du courant pour l'ADCP mouillé	56
II.3.2. Diminution de la variabilité des directions de courant avec augmentation de l'intensité du courant pour l'ADCP mobile	58
II.3.3. Diminution de la variabilité des directions de courant avec augmentation de l'intensité du vent	59
II.4. Éléments de courantologie acquis par deux appareils différents. Comparaison	61
II.4.1. Détermination des 5 cas types	63
II.4.1.1. Vent Faible	64
II.4.1.2. Vent d'ouest (Libeccio)	67
II.4.1.3. Vent d'est (Gregal)	68
II.5. Étude de la corrélation vent courant pour les données de l'ADCP fixe	69
II.6. Comparaison ADCP mouillé et système SAVED	74
II.6.1. Fréquence des événements des catégories de vent	74
II.6.2. Comparaison des deux systèmes -ADCP mouillé et ADCP SAVED-	75
II.6.3. Etude des courants issus de l'ADCP mobile pour les deux vents dominants	78
II.6.3.1. Profils horizontaux durant les deux vents dominants	78
II.6.3.2. Profils verticaux durant les deux vents dominants	82
II.6.4. Étude de la corrélation vent Pertusato vs courant ADCP Téthys	84
II.6.5. Différence des données de vent issues du cap Pertusato entre l'hiver et l'été	85
II.6.6. Différence de vent Pertusato et Téthys	85
II.7. The current dynamics inside the Strait of Bonifacio: impact of the wind effect in a little coastal strait	87
II.8. Description cas majeurs.	88
II.8.1. Le courant orienté sud du côté est de Bonifacio et la zone de cisaillement (côté est) en se rapprochant des côtes	88
II.8.2. Deux cas de circulation dans le détroit	90
II.9. Methodology to build a local current map using sets of inboard ADCP data ..	94
II.10. Application du Modèle Symphonie aux Bouches de Bonifacio.	95
II.10.1. Le modèle Symphonie	95
II.10.2. Application du modèle Symphonie pour les deux configurations de vent	96
II.10.2.1. Application du modèle Symphonie pour un vent d'ouest	96
II.10.2.2. Application du modèle Symphonie pour un vent nord-est	98
II.10.3. Comparaison des courants issus de Symphonie entre CYRCE	100
Chap III. Hydrologie	103
III.1. Norme des données des missions CYRCE	103
III.1.1. Tableau récapitulatif des données	103
III.1.2. Comparaison avec d'autres sites méditerranéens	104
III.2. Les facteurs les plus déterminants par mission et par saison	107
III.3. Description des trois structures hydrologiques rencontrées dans la colonne d'eau au cours de l'année	109

III.3.1. Température et salinité	110
III.3.1.1. Description des trois situations rencontrées dans la colonne d'eau pour la température et la salinité	110
III.3.1.2. Comparaison des températures de CYRCE avec les sites Med Change	113
III.3.2. Oxygène dissous et pourcentage de saturation	115
III.3.3. Fluorescence et Transmission	120
III.4. La thermocline d'été	126
III.5. Les floraisons phytoplanctoniques dans les bouches de Bonifacio : un exemple de poussée printanière classique (mars 2005-CYRCE 3)	132
III.5.1. ACP sur CYRCE 3	132
III.5.2. Différences entre les variables est et ouest	135
III.5.3. Description des variables rencontrées sur différents profils	137
III.6. Les floraisons phytoplanctoniques dans les bouches de Bonifacio : un exemple de floraison exceptionnelle (juillet 2005-CYRCE 4)	140
III.6.1. ACP sur CYRCE 4	140
III.6.2. Répartition géographique de la fluorescence pendant la poussée phytoplanctonique de CYRCE 4 (juillet 2005)	143
III.7. Différence est et ouest	147
III.7.1. Température au cours du temps en hiver pour deux jeux de données ..	147
III.7.2. Différence de température et salinité entre l'est et l'ouest du détroit pour la période estivale et hivernale	150
III.7.2.1. Différence en période hivernale	150
III.7.2.2. Différence en période estivale	152
III.7.2.3. Différence est ouest durant CYRCE 2	152
III.7.3. Comparaison des températures à une série à long terme disponibles (CYRCE et RNBB)	156
III.8. Cas particulier des stations de cantonnement	159
III.8.1. Étude des stations dans les zones de cantonnement (CYRCE 2) en surface	159
III.8.2. Test Kruskal Wallis sur les zones de cantonnement	163
III.8.3. Étude des stations dans les zones de cantonnement en profondeur (mars 2005 -CYRCE 2)	163
Chap IV. Impact de l'hydrodynamisme sur les espèces biologiques, Utilisation des connaissances acquises et des outils disponibles pour la gestion de l'écosystème	167
IV.1. Introduction	167
IV.2. Comportement de nage des poissons	169
IV.3. Étude des déplacements des espèces en fonction des mouvements des masses d'eau phénomènes majeurs et vitesses et directions de courants	181
IV.4. Étude des déplacements des espèces en fonction des masses d'eau grâce à l'utilisation du modèle Symphonie	183
IV.5. Validité du modèle	186
IV.5.1. Variabilité dans l'espace du modèle	186
IV.5.2. Variabilité dans le temps du modèle	192

IV.6. Applications du modèle dans les deux configurations de vent (d'ouest et de nord-est) pour vent fort et vent faible	197
IV.7. Cas d'export de larve avec traceur du modèle	206
IV.8. Application du modèle Symphonie pour la gestion de la réserve et la prévention des risques.....	212
Conclusion et Perspectives	220
Bibliographie	236
Table des Figures et Tableaux.....	244
Annexes	263

Table des annexes

Annexe 1 : les divisions topographiques de l'océan, d'après J.M Pérès.	264
Annexe 2 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant les missions CYRCE	265
Annexe 3 : Analyse de Kruskal-Wallis sur les données de vent, issues du sémaphore de Pertusato, enregistrée durant les missions CYRCE	269
Annexe 4 : Résultats des ACP effectuées sur toutes les missions CYRCE individuellement	271
Annexe 5 : Récapitulatif des ACP de toutes les missions CYRCE pour toutes les variables.....	280
Annexe 6 : Résultats des ACP effectuées sur toutes les missions CYRCE individuellement, du côté ouest et est de Bonifacio, sans Sigma T00.....	281
Annexe 7 : ACP effectuée pour connaître les variables dominantes sur la saison hiver à partir de la mission CYRCE 2 (sans sigma T00 =densité)	300
Annexe 8 : ACP effectuée pour connaître les variables dominantes sur la saison printemps à partir de la mission CYRCE 3 (sans sigma T00 =densité).....	302
Annexe 9 : ACP effectuée pour connaître les variables dominantes sur la saison d'été à partir de la mission CYRCE 1, 4 et 6 (sans sigma T00 =densité)	304
Annexe 10 : ACP effectuée pour connaître les variables dominantes sur la saison d'automne à partir de la mission CYRCE 5 (sans sigma T00 =densité).....	308
Annexe 11 : Profils hydrologiques réalisés durant les missions CYRCE	310
Annexe 12:The current dynamics inside the strait of Bonifacio: Impact of the wind effect in a little coast strait.....	423
Annexe 13 : methodology to build a local current map using sets of inboard ADCP data	424

INTRODUCTION GENERALE

L'océanographie est un domaine pluridisciplinaire qui recourt à l'étude, entre autres disciplines, de la courantologie, de l'hydrologie et de la biologie des organismes marins. Un des premiers facteurs déterminants de cette discipline est l'étude de la dynamique des courants, cause explicative d'une partie de l'hydrologie et de la biologie. Cette dynamique des courants doit se comprendre à deux échelles : l'une concerne la circulation générale, l'autre, la réalité locale.

Dans la plupart des régions, la circulation générale est le principal facteur régissant la circulation des eaux sur le plateau continental et en zone côtière : elle conditionne donc, en grande partie, la distribution des caractéristiques hydrologiques, biologiques, chimiques, sédimentologiques et de pollution dans l'ensemble de la mer (Millot, 1989 [46]). En Méditerranée nord-occidentale, région qui nous intéresse tout particulièrement pour ce sujet, la circulation générale a fait l'objet de nombreuses études et est à présent bien connue. Cette dynamique fait intervenir essentiellement trois types de masse d'eau – l'eau atlantique modifiée (MAW), l'eau levantine intermédiaire (LIW), l'eau profonde de méditerranée (MDW). La MAW pénètre en surface dans le bassin méditerranéen, circule le long des côtes du Maghreb, remonte vers le nord et s'intègre dans un circuit cyclonique dans le bassin nord-occidental (Millot, 1989 [46]). Plus vers l'est, une partie de MAW rentre en mer Tyrrhénienne, remonte et longe la côte italienne, puis une partie franchit le canal de Corse (Courant Est), et l'autre partie entoure les côtes de la Sardaigne vers le sud pour remonter vers le Nord. Ces deux courants fusionnent et donnent naissance au Courant Nord (Millot, 1987 [45] ;Ovchinnikov, 1966 [53]). La LIW est créée dans le bassin oriental, revient dans le bassin occidental et tourne vers sa droite en mer Tyrrhénienne, puis suit en grande partie le chemin de MAW (Figure II.1).

Ces dix dernières années l'analyse de la circulation générale, mais également de nombreux processus physiques et biologiques, ont fait de grandes avancées notamment grâce à l'utilisation d'outils modernes et performants tels que les observations depuis l'espace grâce aux satellites, les instruments lagrangiens, les profileurs de courants, mais aussi l'utilisation de modèles. La technique de la mesure

spatiale et altimétrique permet entre autres d'observer, depuis l'espace, la température des eaux de surface, les variations du niveau de la mer permettant de déduire une partie de la dynamique des courants ou encore les concentrations en chlorophylle. Cependant, ces outils connaissent des limites dans la description de processus à haute variabilité, par exemple la réponse du niveau de la mer à un coup de vent, qui se déroule sur un intervalle de temps restreint de l'ordre d'une journée (Jacobs, 1998 [36]), ou pour la description des profondeurs de la colonne d'eau. C'est à ce moment que, couplés à des instruments de mesures de validation à petite échelle de temps et d'espace, les modèles numériques s'avèrent d'une grande utilité pour décrire l'hydrodynamisme d'une zone. L'ensemble des mécanismes physiques responsables de l'hydrodynamisme peut alors être mis en équations et calculé de manière approchée avec des moyens de calcul adaptés. On parle alors de modèles numériques qui sont capables de calculer en chaque endroit, différentes composantes telles que la vitesse et direction des courants, du vent, la température et la salinité de la mer, le suivi de traceurs ... Les modèles numériques appliqués à l'océanographie ne sont pas parfaits et ne prétendent pas reproduire la réalité à chaque instant à chaque endroit. Mais aujourd'hui, leurs résultats à méso ou grande échelle peuvent être considérés comme fiables, utilisables et surtout applicables par la communauté scientifique à d'autres domaines, comme l'écologie des organismes marins. C'est pourquoi ils tiennent une place significative dans ce travail.

En revanche, l'étude de la circulation devient beaucoup plus complexe en zone côtière, car la circulation générale sera naturellement perturbée par de nombreux facteurs dont la topographie, la bathymétrie, la nature des mécanismes qui force la circulation... (Millot, 1989 [46] ; Millot, 1999 [48]) comme par la forte variabilité des processus physiques à de petites échelles d'espace et de temps. Ces processus côtiers sont donc souvent mal représentés dans des modèles de circulation générale, car ils nécessitent des résolutions suffisamment importantes, la prise en compte de nombreux éléments comme la topographie et les forçages (Ulses, 2005 [73]). Ces forçages mis en jeu dans l'élaboration d'un modèle numérique en zone côtière sont nombreux comprenant entre autres la marée, la pression atmosphérique, l'impact du vent, les apports hydrologiques continentaux et le forçage de la circulation à grande échelle (Lamouroux, 2006 [39]). Les modèles de circulation générale ne sont souvent pas adaptés à la méso-échelle des zones

côtières, et à fortiori de leur composante locale, et leurs résultats sont difficilement explicatifs de la dynamique.

C'est pourquoi l'étude de ces zones passe par des études ponctuelles de terrain pour mesurer *in situ* les processus dynamiques, couplées à des adaptations des modèles de circulation générale. Ces dernières années de gros efforts ont été menés dans cette optique à travers de nombreuses campagnes océanographiques, notamment en Méditerranée nord-occidentale, zone ciblée par notre travail, par exemple les campagnes MOOGLI organisées dans le golfe du Lion (Petrenko, 2003 [64]) en plusieurs campagnes. Différentes données y sont enregistrées telles que les profils de courants ou de données hydrologiques mesurant différents paramètres tout au long de la colonne d'eau. Ces données permettent d'obtenir des premières notions de dynamique dans les zones côtières, mais également de comparer les données obtenues par les modèles numériques. L'organisation de ces missions ponctuelles n'étant pas aisée, car elles nécessitent de gros moyens humains et techniques, les mesures *in situ* peuvent également être recueillies par l'installation d'appareils permanents ou ponctuels sur un lieu dit. Il reste cependant primordial d'affiner des modèles numériques et d'augmenter les données *in situ* pour mieux connaître l'hydrodynamisme complexe des zones côtières, qui sont des zones d'importance primordiale aussi bien sur le plan socio-économique qu'écologique.

Les zones côtières représentent 19% de la surface continentale mondiale et abritent une grande part de la population (Small and Nicholls, 2003 [71]), regroupant en 1997 sur les bandes littorales 37 % de la population mondiale (Cohen, *et al.*, 1997 [17]). Ce chiffre augmentant d'année en année jusqu'à atteindre 60% de la population vivant à moins de 50 km des côtes en 2001 (UNESCO, 2001 [75]). Ce sont également des zones de grande importance écologique, car elles correspondent environ à 10% de la surface océanique (Ver, *et al.*, 1999 [78]), elles abritent près de 2/3 de la phytobiomasse marine (Smith, 1981 [72]) et contribuent de 18 à 33% à la production primaire océanique (Wollast, 1991 [80] ; Bensoussan, 2004 [7]). Elles sont aussi une zone d'interface entre le continent et l'océan hauturier, ayant un rôle important de zone tampon entre les deux. Leur grande diversité biologique (richesse stock), leur grande hétérogénéité géomorphologique, leur activité biologique intense, leur exposition à l'influence anthropique et la forte variation des conditions environnementales, à petites échelles de temps et d'espace, expliquent le grand

intérêt de l'étude de leur fonctionnement, mais aussi de sa difficulté, rendue pourtant nécessaire par leur grande fragilité. Car les zones côtières sont fragiles et menacées (PAM/Plan Bleu., 2005 [55]), de par leur contact direct avec l'activité anthropique souvent source de dégradation, de pression et de pollution sur l'écosystème, mais aussi par des processus naturels, comme les phénomènes d'érosion ou de réchauffement climatique qui menacent « toutes » les populations, quelles soient humaines ou non. Leur évolution et en particulier leur qualité environnementale va déterminer les conditions de beaucoup d'activités économiques (tourisme et pêche par exemple). Depuis une trentaine d'années une prise de conscience internationale se met en place dans l'optique de protéger et gérer ces zones, tout d'abord à travers l'élaboration de lois (Loi littoral, obligation de résultat contenue dans la directive européenne sur l'eau, Chapitre 8 de la Convention sur la Biodiversité (1992), chapitre 17 de l'Agenda 21 : sommet de la Terre de Rio de Janeiro (1992) mais également à travers certains concepts : nous citerons par exemple la GIZC (Gestion Intégrée des Zones Côtières) qui est définie comme « Processus dynamique qui réunit gouvernements (...) en vue de la protection et du développement des systèmes et ressources côtières » (Cicin-Sain and Knecht, 1998 [16]). Mais la connaissance des zones côtières et littorales est une étape fondamentale pour la mise en place d'une gestion intégrée efficace (Petragallo, *et al.*, 2004 [63]) car c'est souvent leur méconnaissance qui est le principal obstacle à une gestion efficace (Pergent, *et al.*, 1995 [62])

Au niveau méditerranéen, les zones côtières représentent des écosystèmes particulièrement riches en termes de biodiversité (Pergent-Martini, *et al.*, 2006 [61]), mais en contrepartie elles subissent de fortes pressions en recevant plus de cent millions de visiteurs par an (Gosselin, *et al.*, 2006 [29]) sur la bande littorale, mais également au niveau de la surexploitation des ressources côtières (PAM/Plan Bleu., 2005 [55]). La connaissance des fonctionnements de ces zones, et ceci sur tous les points de vue, qu'ils soient physiques, chimiques, biologiques apparaît comme un élément clef à la gestion de l'espace côtier.

C'est dans cette optique d'acquérir des connaissances dans cette zone côtière sensible qui est celle des bouches de Bonifacio, que dans le cadre de l'UMR CNRS n° 6134 (Université de Corse), ont été initiées, depuis 2004 les campagnes CYRCE de mesures hydrologiques et courantologiques dans les Bouches de Bonifacio. A cette date en effet, ce type de données y étaient extrêmement rares, dans cette

zone, comme en témoignaient tant la littérature que la base nationale de données SISMER. Ce constat était d'autant plus étonnant que ce détroit a une grande importance pour les communications mais aussi pour les risques. Situé entre la Corse et la Sardaigne, le détroit des bouches de Bonifacio est un passage maritime étroit parsemé d'îles et d'îlots, par lequel communiquent les bassins liguro provençal et tyrrhénien. C'est une zone à forte valeur patrimoniale avec la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio (RNBB) et la perspective d'un futur parc marin international entre la France et l'Italie et c'est le point le plus méridional des côtes méditerranéennes françaises. Mais c'est également une zone sensible en matière de transport maritime, avec la menace éventuelle de pollutions de l'environnement. A ce jour, sept missions CYRCE ont été réalisées sur une base saisonnière. Lors de chaque mission, une vingtaine de stations hydrologiques ont été réalisées souvent en répétition à quelques heures d'intervalle et le système SAVED du Téthys II a enregistré les courants pendant la marche du navire.

L'objectif de ce travail réside donc dans une meilleure compréhension de l'hydrodynamisme de la zone à partir de données *in situ* (grâce à un traitement approprié sur les données obtenues) et de l'utilisation conjointe de la modélisation. Ces questions de circulation hydrodynamique (variable sur une petite échelle de temps et d'espace) sont cruciales surtout dans un espace où des enjeux économiques et écologiques se côtoient. Nous nous sommes intéressé ici à quelques processus physiques et hydrologiques qui gouvernent la dynamique des eaux de la zone mais aussi à leurs impacts sur des populations d'espèces marines et en particulier, pour les gestionnaires et les pêcheurs, le problème de l'export des larves et juvéniles produits dans les cantonnements de réserve et dont le devenir dépend des courants et des contraintes hydrodynamiques, (Hecq, 2003 [32]).

Circonscrit à une aire marine de dimension restreinte, ce travail se donnait par contre plusieurs objectifs : documenter des éléments courantologiques et hydrologiques (indisponibles quand nous l'avons entrepris) permettant de constituer une banque d'archives ; appliquer un modèle de circulation, et le valider, pour aider, dans le futur, à la gestion des risques et de la protection de l'environnement dans ce détroit.

Cette approche interdisciplinaire s'organise autour de différentes parties.

Dans le premier chapitre sont exposés les matériels et méthodes utilisés au cours de ce travail comprenant tout d'abord une présentation du site d'étude, les moyens utilisés durant les campagnes océanographiques CYRCE ainsi que les instruments de mesure installés en permanence sur le site.

Le second chapitre s'organise autour de l'analyse de la courantologie, faisant une synthèse de tous les outils et données courantologiques disponibles. Ensuite sont exposés les premiers résultats de la dynamique rencontrée sur la zone, à partir d'enregistrement d'un ADCP mouillé installé en milieu du détroit de Bonifacio. Ceux-ci seront notamment axés sur une simple analyse statistique du courant. Cette analyse passera par une étude du comportement vent vs courant à travers des cas rencontrés durant la période d'enregistrement de cet ADCP (environ un mois). Puis ces résultats seront comparés à ceux obtenus par l'ADCP de coque du Téthys II, afin d'élargir la vision de la dynamique à l'entièreté du détroit. Cela permettra également de faire une comparaison des deux types d'appareil pour valider l'utilisation de l'ADCP embarqué dans une zone côtière. Enfin, ces résultats seront comparés à des résultats obtenus à partir d'un modèle numérique.

Le troisième chapitre est une approche des données hydrologiques, avec pour commencer un récapitulatif des données obtenues durant les missions CYRCE. Des analyses statistiques permettront de fixer les normes de la zone à un pas saisonnier pour chaque variable (notamment température, salinité, oxygène dissous, fluorescence, turbidité). Puis seront indiquées les trois structures rencontrées dans la colonne d'eau (système homogène, système bicouche et système de transition). Les données CYRCE seront ensuite comparées à d'autres données obtenues sur Bonifacio et d'autres sites de Méditerranée nord-occidentale. Ce chapitre mettra un accent sur certains phénomènes rencontrés généralement en Méditerranée, appliqués au cas de Bonifacio, tel que la situation de thermocline lors de la période estivale ou la poussée printanière du phytoplancton. Cette étude a permis de mettre également en évidence des situations propres aux Bouches de Bonifacio comme la présence d'une poussée phytoplanctonique estivale inhabituelle, une variabilité des paramètres conservatifs sur une petite échelle d'espace et une étude sur les cantonnements de réserve.

Le quatrième chapitre est une démarche d'utilisation des connaissances et des outils pour aider à la gestion. Ce chapitre expose en premier lieu l'impact de l'hydrodynamisme des bouches de Bonifacio sur certaines populations de poisson et

intègre les adaptations des individus à ces contraintes. La gestion de la ressource dans une réserve naturelle étant primordiale, tant au niveau économique qu'écologique, elle demande la réponse à certaines questions, notamment celle de la production (l'export de biomasse) à partir des cantonnements de pêche. Ce chapitre est tout d'abord composé d'un récapitulatif bibliographique sur les comportements et vitesse de nage des poissons. Ces vitesses de nage sont ensuite comparées aux vitesses de courants auxquels les individus présents dans la réserve sont soumis. Pour compléter cette vision et répondre aux questions de dispersion de biomasse, nous utiliserons un modèle simplifié afin de simuler la trajectoire d'individus passifs, censés représenter des larves ou juvéniles à faible capacité de nage, produit dans un cantonnement de pêche. Puis nous présenterons certaines options du modèle, qui n'ont pas fait l'objet d'une étude ou d'une utilisation poussée dans ce mémoire, mais qui restent applicables à des fins de gestion ou de protection. Nous verrons notamment l'utilisation d'un module pouvant simuler des panaches de rivière, des nappes de pétrole ou encore des individus passifs.

Chap I. Matériels et méthodes

I.1. Bonifacio

I.1.1. Localisation

La Corse se situe dans le bassin nord-occidental de la mer Méditerranée (Figure I.1). C'est au sud de la Corse que se trouve le détroit des Bouches de Bonifacio (détroit maritime du *mare nostrum*), large de 13 km, il sépare la Corse de la Sardaigne, c'est un passage étroit parsemé d'îles et d'îlots dans lequel communiquent les deux bassins de la mer Liguro-Provençale à l'ouest de la mer Tyrrhénienne à l'est. À l'ouest la bathymétrie est abrupte et accidentée, l'isobathe -20 m est souvent proches de la côte et la profondeur de -100 m est atteinte en moyenne à 12 km du rivage. Cette plate forme se décompose en une marge interne à la topographie séparée d'une marge externe par une rupture de pente assez nette entre -60/-80 m et -120 m. Sur la partie est, où le plateau continental s'étend plus loin de la côte, la profondeur de -100 m est atteinte en moyenne à 25 km du rivage, la morphologie est plus douce, la pente est régulière et les plus grandes profondeurs sont rapidement atteintes. Il y a donc deux traits morphologiques très distincts des plates formes est et ouest des Bouches de Bonifacio. Dans l'axe du détroit, l'endroit le plus resserré, le seuil topographique se situe à -70 m.

I.1.2. Géologie, fond marin bathymétrie

L'hydrodynamisme influe sur les éléments, tant sur le milieu lui-même, y compris la géomorphologie des fonds que sur les biocénoses. Un travail de thèse, effectué par Pluquet, a étudié l'évolution et la sédimentation des plates-formes continentales de la Corse, notamment celles de Bonifacio. Lors de ce travail, les plates-formes et leur nature ont été décrites, mais également certaines interactions entre le courant et la nature des substrats ont été mises en évidence. Nous faisons ici un bref récapitulatif des descriptifs des plates-formes et sédiments présents à Bonifacio, d'après les travaux effectués par Pluquet et les illustrations issues de ce travail (Figure I.3 et Figure I.5), en mettant un accent particulier sur les figures et reliefs qui se forment sous conditions hydrodynamiques particulières. A ce titre, certains de ces aspects géomorphologiques peuvent être des indices indirects de l'orientation et de la force moyenne des courants dominants.

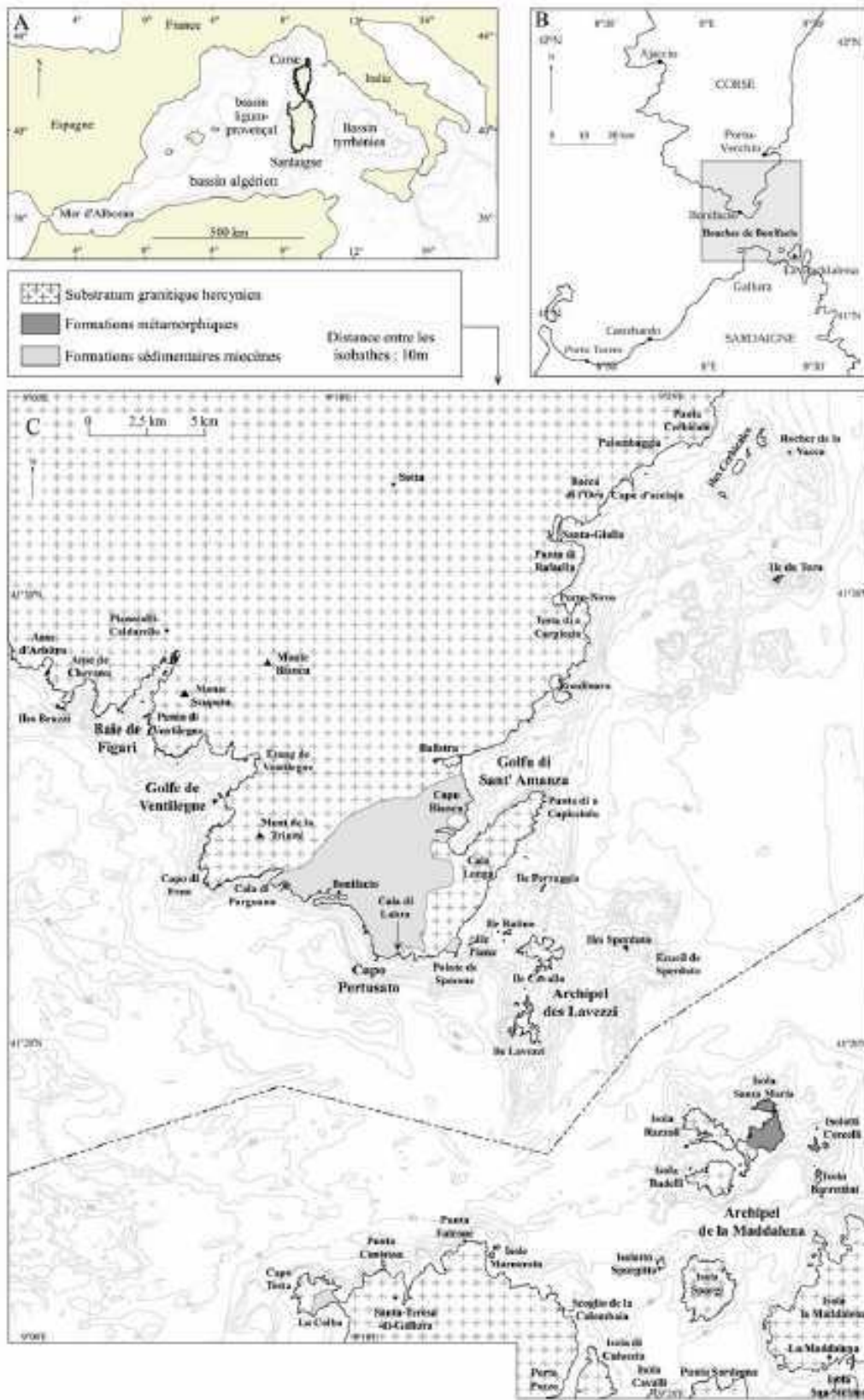


Figure 1.1: Localisation de la zone d'étude. À : positionnement de la Corse et de la Sardaigne dans le cadre Méditerranéen, B: situation du secteur de part et d'autre des bouches de Bonifacio, C: présentation de la zone et cadre géologique (Pluquet, 2006 [66])

Les fonds rocheux à l'ouest du détroit sont localisés en bordure du littoral ou présents sous la forme de vastes plateaux vers le large. Des formations calcaires sont situées en continuité des falaises de Bonifacio. A l'est de cette partie du détroit, une transition avec le socle granitique a pu être observée et sur le reste de la zone côtière, le socle granitique affleure au niveau des principaux caps et autour des îlots. A l'est, la nature des roches est essentiellement hercynienne (période géologique d'orogénèse s'étalant du dévonien (-400 millions d'années) au permien (-245 millions d'années)). Les formations calcaires sont absentes du milieu marin et deux rides granitiques sont présentes (Lavezzi et Sperduto) mais ensuite, comme le dit l'auteur : *«vers le large, les fonds augmentent progressivement (et) la morphologie d'ensemble de la plate forme devient plus régulière»*.

Le domaine circalittoral (domaine toujours immergé, sa limite profonde est la limite compatible avec la vie des algues pluricellulaires sciaphiles plus tolérantes pour les faibles éclaircements, Annexe 1) est caractérisé par une faible épaisseur de la couverture en sédiments meubles et la présence de nombreuses figures longitudinales. Ces figures sédimentaires longitudinales sont la conséquence de courants forts au niveau du fond et leurs orientations principales correspondent aux fréquences majeures de ces courants. Leurs emplacements et leurs orientations seront donc une information pour la validation indirecte de nos futurs résultats, en particulier de leurs extrapolations à une plus grande échelle de temps. En effet, les formes de ces figures sont le résultat des mouvements de particules sur le fond sous la contrainte d'agents hydrodynamiques. A l'ouest, la biocénose des Sables Grossiers sous influence des courants de fonds (SGCF, Pérès and Picard, 1964 [58]) fortement liée au facteur hydrodynamique est omniprésente. Sa présence au-delà de -60 à -70 m dans l'axe du détroit témoigne de courants fréquents et de leur force puisque le sédiment a été débarrassé de sa fraction la plus fine d'une accélération du courant. La présence de figures sédimentaires longitudinales (appuyées par des mesures ponctuelles de courants) et leur orientation, traduit un passage très fréquent des masses d'eaux de l'ouest vers l'est, à travers les Bouches de Bonifacio ainsi qu'un gyre anticyclonique à l'ouest de Capo Testa. Ce faciès (SGCF) est souvent associé à la présence de *Spatangus purpureus* Müller, 1776, une espèce indicatrice des courants vifs (Néraudeau, *et al.*, 1998 [51]) ainsi que l'amphioxus (*Branchiostoma lanceolatum*) indicateur d'eau limpide et bien oxygénée (Pérès and Picard, 1964 [58]).

L'herbier à *Posidonia océanica* (particulièrement bien développé grâce aux eaux claires de ce secteur de la Méditerranée) occupe une large part de l'étage infralittoral. Ces prairies forment une ceinture continue de 125 km² sur le littoral étudié, sa limite inférieure est généralement située à -30 m de profondeur, mais peut atteindre parfois -45 m. Plusieurs études ont montré l'influence des mouvements de l'eau sur les herbiers de magnoliophytes marines. Les facteurs physiques influencent le développement des herbiers tout au long du cycle de vie, que se soit les cycles de reproduction, de croissance, de répartition... (Fonseca and Kenworthy, 1987 [25]). En effet, *Posidonia oceanica* craint un hydrodynamisme trop intense, mais à l'inverse la présence d'un herbier peut amortir l'hydrodynamisme (houle et courant) au niveau des fonds (Boudouresque, *et al.*, 2006 [12]).

Les graviers et cailloutis occupent une surface très restreinte sous la limite inférieure de l'herbier.

Les sables grossiers et fins graviers sous l'influence des courants de fond (SGCF) qui marquent le passage à l'étage circalittoral, se rencontre, nous l'avons vu à l'ouest des bouches où il forme de larges bancs, mais il est présent également dans la partie la plus resserrée du détroit et sur sa partie orientale, où il forme une frange continue bordant la limite inférieure de l'herbier.

Les sables du détritique côtier s'étendent entre -50 m et -90 m de profondeur. Compte tenu de son spectre granulométrique, ce faciès est rarement un indice de la courantologie au niveau du fond, ou du moins de forts courants dominants. A l'ouest des Bouches, ils occupent une surface plutôt restreinte, mais à l'est ce faciès est plus présent et recouvre une large part des fonds au-delà de -50m.

Les sables détritiques envasés se rencontrent au niveau des centres des circuits tourbillonnaires ou dans les zones de plus grands fonds (au –delà de -80 m).

I.1.3. Étude du vent

Le vent joue un rôle primordial dans la dynamique des eaux de surface, car son action sur la mer «*s'exerce par un frottement de l'air en mouvement au contact avec la surface de l'eau, auquel il transfère d'importantes quantités d'énergie mécanique. Des courants marins superficiels se forment, engendrant une agitation désordonnée à la surface puis des vagues dont l'amplitude et la période varient en fonction de l'intensité et de la durée du vent* » (Giorgetti, 2009 [28]).

Or la région de Bonifacio est particulièrement ventée. Les données enregistrées au Sémaphore de Pertusato sur le plateau de Bonifacio indiquent que le vent souffle 328 jours par an, souvent avec violence (171 jours de vent $>16 \text{ m.s}^{-1}$ soit 57.6 km/h). Les fortes fréquences de vents de vitesse supérieure à 8 m.s^{-1} s'accompagnent d'un aspect bimodal presque exclusif des directions ouest (280°) et est (80°). Ces deux directions de vent se qualifient par des noms régionaux : Libeccio pour le vent d'ouest et Gregale pour le vent d'est. Le Libeccio est un vent violent de secteur ouest à sud-ouest. En hiver il est accompagné de fortes précipitations, alors qu'en été il est associé à un temps sec et doux. Le Gregale est un vent d'est qui s'accompagne de forte précipitation (Pluquet, 2006 [66]). Ce régime de vent régi de manière bimodale est donc une particularité intéressante de la zone (Office de l'Environnement de la Corse, 2007 [52]) et va fortement influencer notre stratégie d'analyse de l'étude des courants.

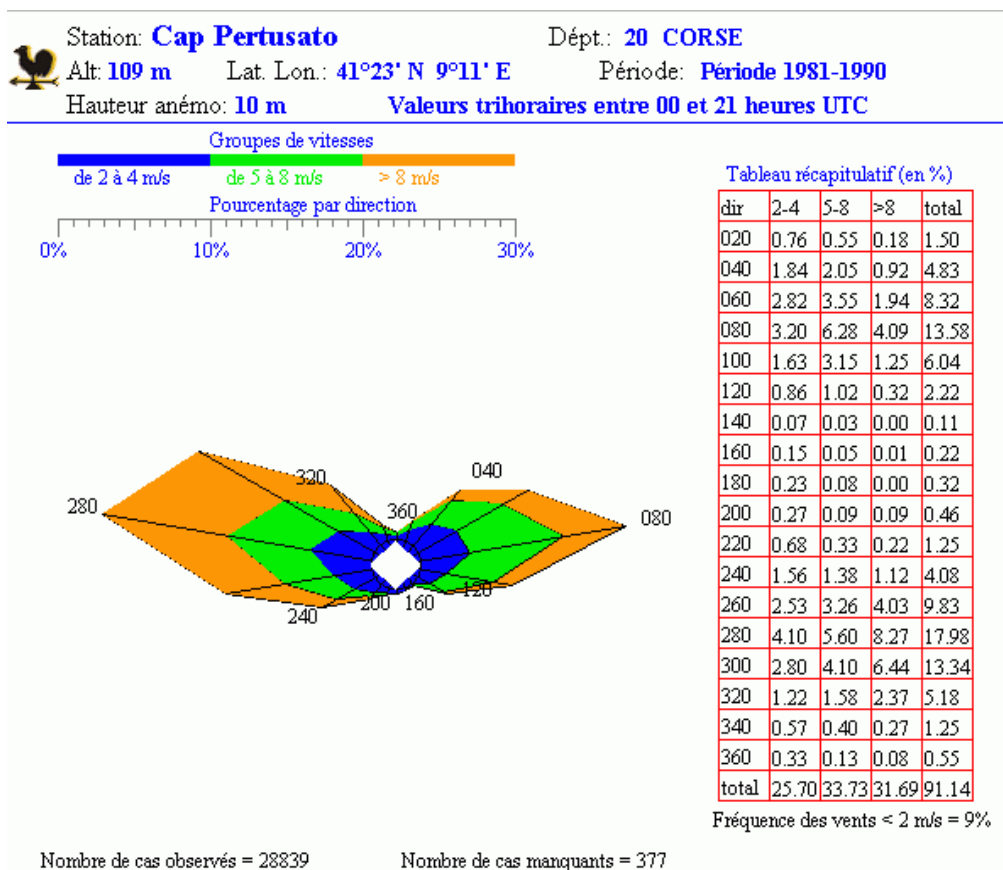


Figure I.2: Données de vent issues du sémaphore de Pertusato entre 1981 et 1990. Rose des vents, tableau récapitulatif en pourcentage des directions et intensités des vents. . Source MétéoFrance *Le climat de la France (2000)*

I.1.4. Réserve Naturelle Internationale des Bouches de Bonifacio (RNBB)

Les Bouches de Bonifacio sont un milieu fragile qui subit une forte pression anthropique (pêche, tourisme, aquaculture...) et qui est sous la menace constante du trafic maritime et surtout du transport de matière dangereuse qui ne peut être interdit par la France et l'Italie car c'est un détroit international. Pour protéger ce milieu à fort intérêt écologique et économique, la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio (RNBB) a été créée par décret en septembre 1999, protégeant ainsi une zone de 80 000 ha où les activités sont régies par le droit commun. Mais cette zone d'une grande richesse avait déjà fait l'objet d'une protection particulière en 1981 (date de création de la réserve naturelle des îles Cerbicales). La réserve s'articule autour de trois niveaux de protection (Figure I.4):

- Zone de Protection Renforcée (ZPR) couvrant 12 000 ha,
- Zone de Non Prélèvement (ZNP) représentant 1 200 ha inclus dans la zone de ZPR
- Deux cantonnements de pêches (décret ministériel de 1982) où toutes formes de pêches et de plongées sous-marines sont interdites. Le cantonnement de Bonifacio, d'une superficie de 1228 ha, se superpose aux deux zones de protection.

I.1.5. Effet venturi entre la Corse et la Sardaigne

La configuration du détroit à l'endroit le plus resserré provoque un effet Venturi qui influence fortement les courants. Le rétrécissement du passage provoque une accélération du courant. «En cas de resserrement de l'espace horizontal, l'effet d'entonnoir provoque l'accélération du flux (...)». Cet effet Venturi est en partie responsable des grandes différences d'intensité et de direction du courant que l'on peut observer entre deux points seulement séparés de quelques kilomètres.

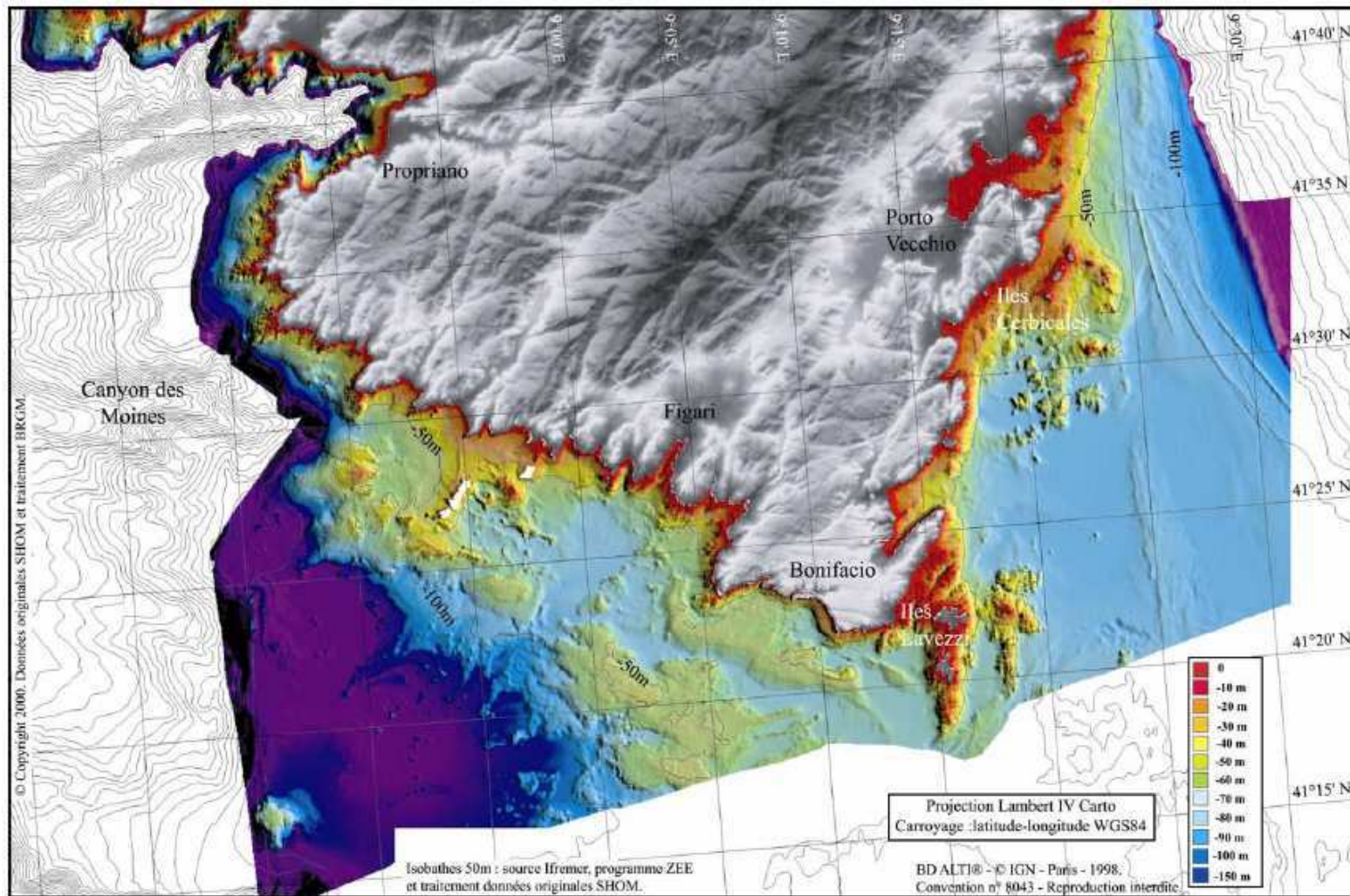


Figure I.3: Morphologie des plates formes occidentale et orientale des Bouches de Bonifacio (ombrage couleur du Modèle. Numérique. de Terrain au pas de 50 m) et isobathes 50 mètres. (Pluquet, 2006).

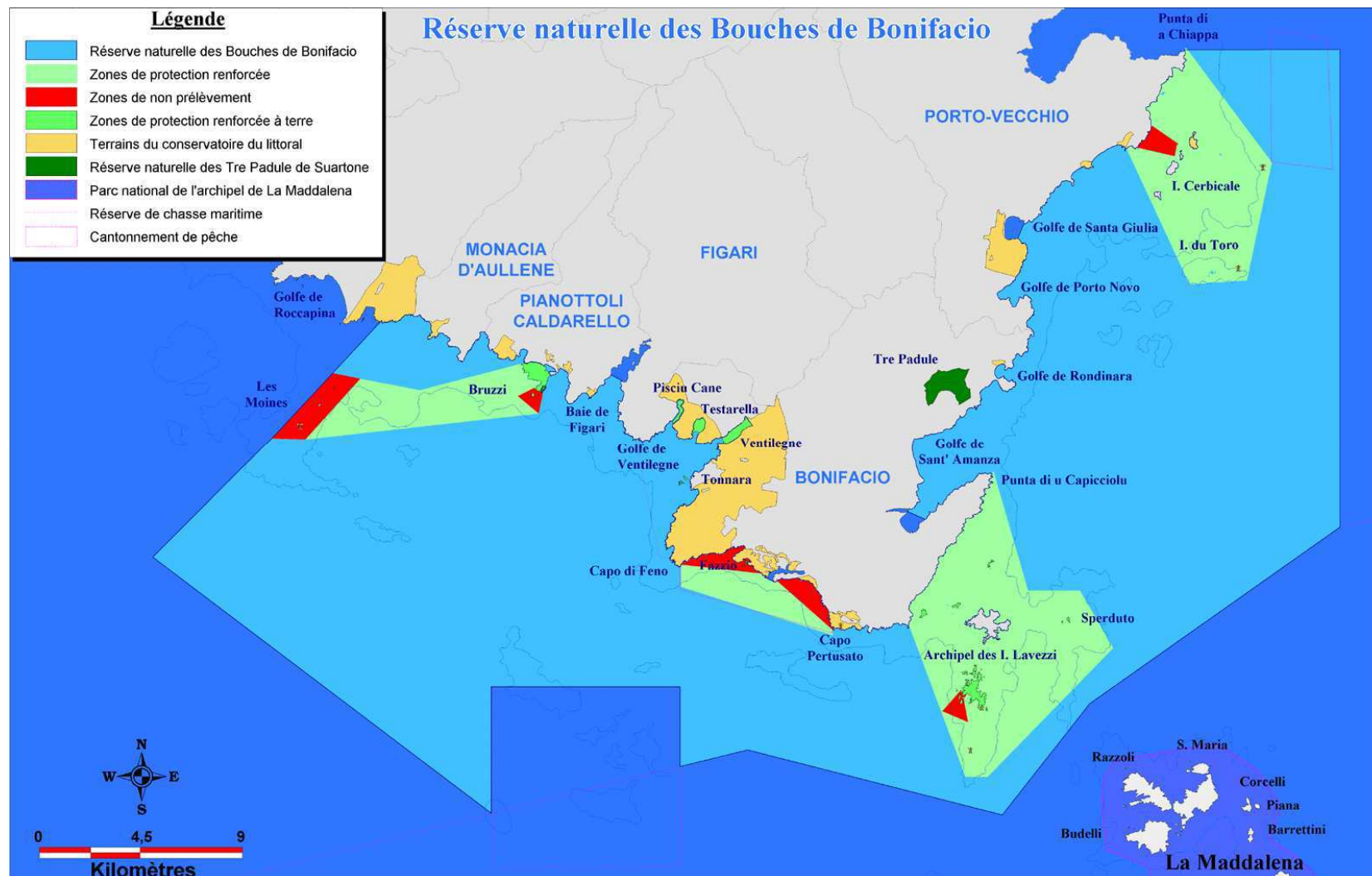


Figure I.4: Carte de la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio, emplacement des zone de protection (office de l'environnement de la Corse, 2007).

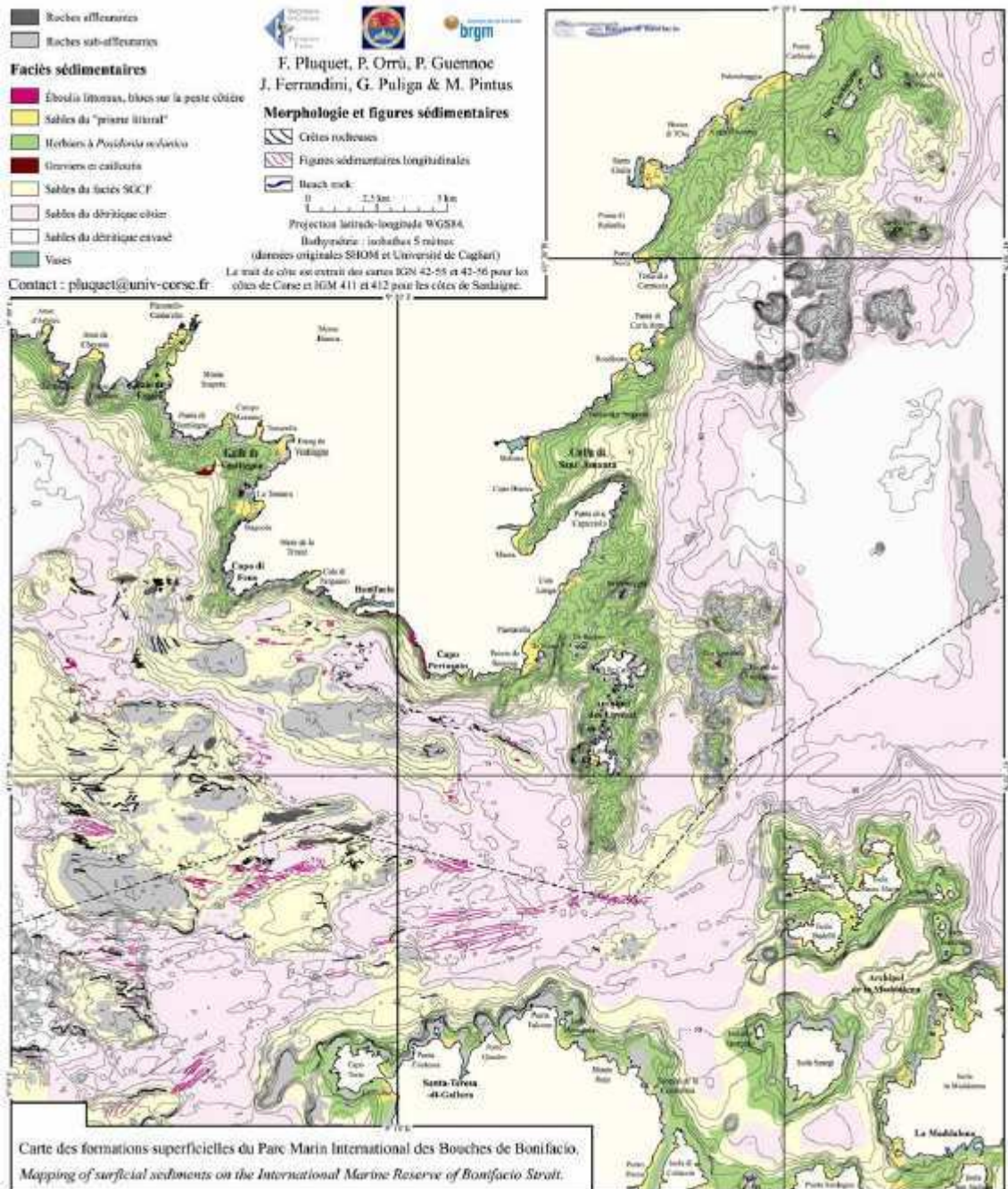


Figure I.5: Carte des formations superficielles du détroit des Bouches de Bonifacio (Pluquet, 2006)

I.2. Campagnes à la mer

I.2.1. Campagnes Courants et hYdrologie pour la Région Corse et l'Environnement (CYRCE)

Afin de constituer une base de données courantologique et hydrologique sur le site de Bonifacio, à l'initiative de J.-C. Romano (l'UMR-CNRS n°134 -université Pascal Paoli) ont été réalisées à partir de 2004 les campagnes hydrographiques CYRCE, à bord du Téthys II (appartenant à l'INSU). A ce jour, sept missions CYRCE ont été réalisées sur une base saisonnière dont le récapitulatif est donné dans le Tableau I.1.

Tableau I.1 : Date de mission et durée des missions, donnée de vent durant ces missions (station météo MétéoFrance Pertusato)

	Saison	Date de mission	Nombre de jours	Nombre d'heures	Moyenne des vents (m.s ⁻¹)	Écart type des vents	Vents max (m.s ⁻¹)
CYRCE 1	Eté	1 au 4 août 04	4	96	5.39	2.52	12
CYRCE 2	Hiver	8 au 14 mars 05	7	168	6.38	4.9	19
CYRCE 3	Printemps	19 au 23 avril 05	5	120	8.05	4.45	18
CYRCE 4	Eté	20 au 26 juillet 05	7	168	6.96	3.01	14
CYRCE 5	Automne	25 au 30 novembre 05	6	144	7.46	4.15	20.1
CYRCE 6	Eté	12 au 18 septembre 06	7	168	7.2	3.16	14.8
CYRCE 7	Automne	5 au 9 décembre 06	5	120	6.99	4.78	19.1
Total	-	-	41	984	-	-	-

Lors des missions, des enregistrements permanents de courants et de paramètres météorologiques sont réalisés pendant la marche du navire. Dans la zone des Bouches de Bonifacio, ces données courantologiques ont été complétées par un réseau de stations hydrologiques. Il faut noter que les missions CYRCE se déroulant de Toulon vers Bonifacio et retour, nous n'utiliserons pas les données du système SAVED portant sur le trajet îles des moines jusqu'à Galeria, le long de la

côte occidentale, ni le transit Galeria-Toulon à travers le canal de Corse. Elles pourront faire l'objet d'un travail ultérieur.

I.2.2. Système SAVED du Téthys II -ADCP mobile

Système d'Acquisition Validation Exploitation de Donnée du Téthys II (SAVED) est un projet de l'INSU dont l'objectif est de déterminer des profils de courant en Méditerranée Nord Occidentale. Ces profils s'effectuent à l'aide d'un ADCP de coque et de capteurs associés (température, salinité, fluorescence, météorologique).

L'ADCP réalise, toutes les minutes en faisant route à 7 nœuds, un profil des courants avec une configuration définie par 60 cellules (appelé bin) de 4 mètres de profondeur (Gatti, *et al.*, 2006 [27]; Petrenko, *et al.*, 2005 [65]). Les données d'ADCP du Téthys II sont gérées par l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers). La division technique de l'INSU effectue elle-même un premier niveau de correction des données brutes puis fournit toutes les données ayant subi ce premier niveau de correction. Ces données sont ensuite exploitées grâce au logiciel «V.4.lite», mis au point par l'INSU, utilisable sur MATLAB permettant soit d'accéder directement aux données numériques, soit de tracer des cartes de représentation des courants. Ces cartes matérialisent les courants grâce à des vecteurs, soient par projection dans l'espace des données d'une cellule, soient par projection verticale des données d'un point de mesure. L'utilisateur scientifique peut donc en fonction de ses besoins utiliser la base de données numérique et tracer ses propres représentations. Nous allons ici mettre un exemple d'une projection de carte horizontale.

Les données de l'ADCP sont valides 12 m au-dessus du fond (due aux interférences et réflexions acoustiques) et à partir de 16 m en dessous de la surface (en raison de l'espace de la coque du bateau et de l'appareil acoustique (**blanking**, Leredde, *et al.*, 2007 [44])). Pour ces raisons, les profils seront traités à partir du bin 3 (16m) qui est le premier bin significatif et jusqu'au bin le plus significatif en profondeur. Cependant la validation des données de l'ADCP du Téthys, ont été faite en pleine mer et non pas en milieu côtier comme c'est le cas dans les bouches de Bonifacio, ce qui conduit à garder à l'esprit cette source d'erreur potentielle.

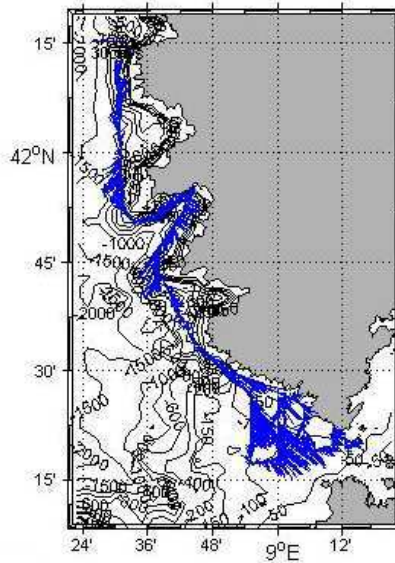


Figure I.6: Exemple de carte horizontale des courants; session effectuée durant CYRCE 5, le 29 novembre 2005 de 6h42 à 20h11.

I.2.3. Capteurs hydrologiques

Durant les six premières missions CYRCE, 223 profils hydrologiques ont été réalisés, souvent en répétition à quelques heures d'intervalle entre eux afin de pouvoir étudier la variabilité dans l'espace et le temps des différents paramètres. Ces profils s'opèrent sur un ensemble de 24 stations réparties de manière à couvrir la totalité du détroit.

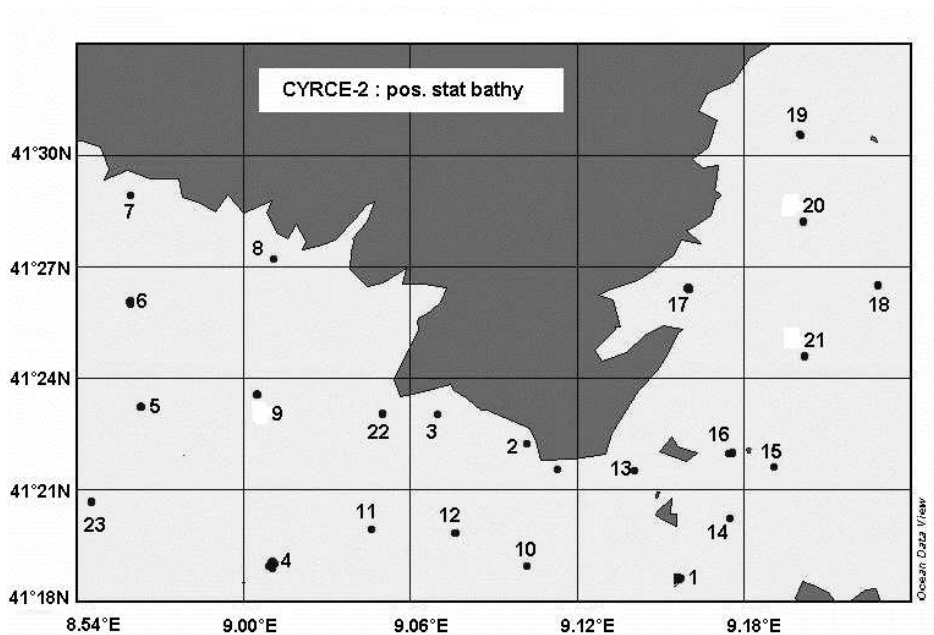


Figure I.7: Carte des emplacements des stations hydrologiques effectuées durant les missions CYRCE.

Tableau I.2 : Distance de chaque station par rapport à la côte, ou à l'île la plus proche

Station	Distance en kilomètre	Distance îles en kilomètre
1	6.75	4
2	1.25	
3	1.5	
4	11.5	8.25
5	13	3.5
6	9	1.75
7	3.75	
8	2	
9	7.5	
10	5.5	
11	7.25	
12	7.25	
13	1.75	
14	6.75	2.5
15	7.75	3.5
16	5	2
17	1.5	
18	9.75	
19	4	
20	5	
21	7.75	
22	7.75	
23	16.5	
24	0.75	

Plusieurs paramètres sont mesurés grâce à une bathysonde Sea-Bird (mod 911) sur laquelle divers capteurs sont installés en effectuant un échantillonnage tous les 0.50 m. Les paramètres mesurés sont: la température, la salinité, l'oxygène dissous, la fluorescence, la turbidité, la conductivité, la densité.

- La température est mesurée par un thermomètre enregistreur à thermistance (système actif et autonome), elle est exprimée en degrés Celsius.

- La salinité est mesurée par un conductimètre et est exprimée sans unité d'après le système international.

- L'oxygène dissous est mesuré par un capteur utilisant le principe de la cellule de Clarke et est exprimé en ml/l. «Dans l'étude de la répartition spatiale des gaz dissous dans l'eau de mer, il est admis que tout élément de volume d'eau s'est trouvé à un moment donné en contact avec l'atmosphère et qu'un équilibre s'est alors établi entre cette dernière et les gaz dissous par l'élément de volume d'eau considéré. Pour l'oxygène dissous cet équilibre est régi par la loi d'Henry (selon

laquelle la concentration de chaque gaz dissous et proportionnelle à la pression de ce gaz dans l'atmosphère) le coefficient de proportionnalité, appelé coefficient ou pourcentage de saturation, dépend du gaz considéré, de la température, et de la salinité.» (Ivanoff, 1972 [34] ; Ivanoff, 1975 [35]). L'oxygène dissous dans l'eau de mer provient de plusieurs processus : d'abord des échanges entre l'atmosphère et les couches de surface, mais il est également formé lors de la photosynthèse par les organismes autotrophes tels que les magnoliophytes, essentiellement pour les eaux côtières et littorales et le phytoplancton pour le reste des eaux marines. La solubilité des divers gaz et c'est le cas de l'oxygène dissous, décroît lorsque la température et la salinité augmentent, la température étant néanmoins le facteur prédominant. Donc, toutes choses égales par ailleurs, la concentration en oxygène dissous est inversement proportionnelle à la température et la salinité. Cet oxygène dissous est également consommé de diverses façons : tout d'abord par l'action de respiration des organismes vivants, mais aussi par divers processus tel que l'oxydation des déchets (Ivanoff, 1972 [34]). L'oxygène dissous est donc un paramètre fondamental dans l'étude du milieu puisqu'il est le reflet de l'activité biologique.

- Le pourcentage théorique de saturation en d'oxygène dissous (concentration maximale que l'eau de mer peut contenir en fonction de la température et la salinité) ainsi que le pourcentage de saturation en d'oxygène dissous sont calculés à partir de la formule empirique de Weiss (1970), on exprime alors le pourcentage de saturation en oxygène dissous par rapport à cette concentration théorique.

$$\ln(DO) = A1 + A2 * 100 / T + A3 * \ln(T / 100) + A4 * T / 100 + S * [B1 + B2 * T / 100 + B3 * (T / 100)^2]$$

$$A1 = -173.4292 \quad B1 = -0.033096$$

$$A2 = 249.6339 \quad B2 = 0.014259$$

$$A3 = 143.3483 \quad B3 = -0.001700$$

$$A4 = -21.8492$$

$$T = \text{temperature (kelvins)} \quad S = \text{salinity (g/kg)}$$

Figure I.8 : Formule de calcul du pourcentage de saturation en oxygène dissous (Weiss, 1970), source : Wikipédia (http://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen_saturation)

- La fluorescence est obtenue avec un fluorimètre et exprimée en unité arbitraire (u.a). Le principe d'un fluorimètre est de mesurer l'émission de fluorescence par la chlorophylle du phytoplancton.

- La turbidité est mesurée par un transmissiomètre, elle est exprimée en pourcentage de transmission d'un signal lumineux : ce pourcentage est d'autant plus élevé que l'eau est claire, et inversement.

Le système TSG disponible sur le Téthys II permet également l'enregistrement en continu de la température, la salinité, la fluorescence en surface (-1m50) le long du trajet du bateau.

I.2.4. Autres missions

Les données courantologiques et hydrologiques des missions CYRCE ont été complétée par celles du système SAVED du Téthys II acquises lors d'autres missions du navire ayant transitées dans la zone des bouches de Bonifacio et enregistrées dans la base de données INSU. Le choix a été effectué sur ces cartes en raison de leur position géographique se trouvant approximativement dans un rectangle compris entre les latitudes 41°18 et 41°33 et les longitudes 8°54 et 9°24. Cette sélection est présentée dans le tableau suivant.

Tableau I.3: Date de mission et durée des missions

	Saison	Date de début de mission	Date de fin de mission	Nombre d'heures	Chefs de mission
Bocca 1	Eté	30 juin 99	9 juillet 99	240	J. Ferrandini
Bocca 2	Automne	8 octobre 00	14 octobre 00	168	J. Ferrandini
DeaDyn 1	Automne	19 octobre 01	22 octobre 01	96	F. Michaud
DeaDyn 2	Automne	18 octobre 02	20 octobre 02	72	F. Michaud
GeoBrest 1	Printemps	21 mai 00	24 mai 00	96	J. Deverchere
GeoBrest 2	Hiver	7 mars 01	10 mars 00	96	J. Deverchere
Geocorse	Printemps	3 mai 03	10 mai 03	192	J. Ferrandini
Geodys	Eté	6 septembre 02	8 septembre 02	72	X
Mytilos	Eté	3 juillet 05	4 juillet 05	48	B. Andral
ViveBB	Printemps	2 mai 04	3 mai 04	48	J.L Fuda

I.2.5. Données d'un ADCP mouillé aux îles Lavezzi : opération de la Direction Départementale de l'Équipement (D.D.E.)

C'est au milieu du détroit de Bonifacio que se trouvent les îles Lavezzi (Figure I.4). Au sud de ces îles, un courantomètre fixe ou courantomètre mouillé a été installé par la DDE (Direction Départementale de l'Équipement), pendant 40 jours (du 24 novembre 2004 à 09h50 au 07 janvier 2005 à 09h50) dans le but d'étudier les courants marins dans cette partie la plus étroite du détroit où se posaient des problèmes de déplacement des bouées de signalisation. Son implantation, ainsi que les données recueillies ont été gérées par le CETMET, une division du ministère de l'équipement, qui a eu la grande amabilité de nous les fournir.

A la différence de l'ADCP du Téthys II, cet instrument fixe (ou "mouillé") fournit, lui, à partir du fond vers la surface, des profils de courants (en direction et intensité) sur l'ensemble de la colonne d'eau. Il a été mouillé sur un fond de 37m et donne une mesure pour les 30 niveaux toutes les 30 minutes, ce qui représente 2112 mesures pour les deux mois d'enregistrements. Ces données se répartissent sur 30 niveaux (ou cellules) allant de C30 à C1 (C30 étant le niveau de surface). Le niveau C1 est situé 1.40m au-dessus du capteur, le niveau C2, 1m au dessus du niveau C1 (2.40m au dessus du capteur) jusqu'au niveau C30 qui est 30.40m au dessus du capteur (Figure I.9).

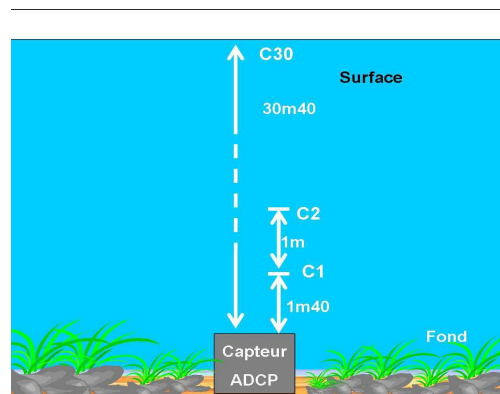


Figure I.9 : Schéma de positionnement de l'ADCP mouillé

Il faut noter que cette opération d'essais a abouti à la mise en place, en 2008-2009, par la DDE, d'une bouée permanente sur le site, équipée de différents capteurs sous-marins, dont un ADCP, et dont les données feront sans doute l'objet d'un accord entre partenaires institutionnels, dont dans doute l'INSU. Cela pourrait

constituer, dans le futur, un équipement très utile pour l'océanographie et la gestion de l'environnement.

I.2.6. Les données de vent durant les missions CYRCE

Deux sources de données de vent sont à disposition, tant pour les missions CYRCE, que pour les autres missions SAVED du Téthys II, voir ci-dessous. En premier, celles fournies par la station du sémaphore de Pertusato avec une fréquence horaire d'acquisition. Puis celles fournies par la station météorologique embarquée sur le Téthys II, avec une fréquence d'acquisition d'une par heure et donnant également les directions et intensités de vent dans les mêmes unités que la précédente. Ces deux stations sont toutes les deux « agrées » Météo France. Pour des questions pratiques ce sont surtout les premières qui ont été utilisées dans ce travail quoique le sémaphore de Pertusato soit distant d'une dizaine de kilomètres des points extrêmes, est et ouest des transit CYRCE.

I.3. Outils informatiques et traitement des données

I.3.1. Outils informatiques

La plupart des traitements de données courantologiques se font à l'aide des logiciels MATLAB R2007b et Microsoft Office Excel 2003 (à partir du logiciel de macro commande Analysis Tool Kit quand celui-ci est nécessaire pour certaines analyses statistiques). Les logiciels R2.6.1 et Statistica sont utilisés pour des analyses statistiques plus poussées.

I.3.2. Méthode de traitement de données

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour traiter les données, nous faisons ici un bref récapitulatif des principales méthodes de traitement utilisées régulièrement. Ces méthodes seront détaillées tout au long du manuscrit lorsqu'elles seront utilisées, c'est pourquoi elles ne seront ici que brièvement abordées.

Afin de travailler correctement pour les calculs de moyennes, variances et écarts type de directions, de courant et de vent, une méthode de calcul circulaire a été utilisée. Cette méthode consiste à calculer séparément les moyennes des sinus et cosinus et à calculer les moyennes, variances et écarts types circulaires grâce à

des formules données par la bibliographie (Fisher, 1993 [24] ; Bowers, *et al.*, 2000 [13]).

Durant CYRCE 4, les capteurs d'oxygène dissous et de turbidité n'étaient pas disponibles. Afin de ne pas biaiser les résultats statistiques, cette mission n'a pas été prise en compte dans les ACP effectuées pour décrire les paramètres de la saison estivale.

Pour tracer tous les profils des différentes variables, le logiciel Matlab a été utilisé. Pour borner les profils, les valeurs minimales et maximales de chaque variable sont prises en compte sauf dans le cas où ces valeurs peuvent être considérées comme "exceptionnelles" selon une distribution normale, ou être attribuée à une erreur d'instrumentation. Dans ce cas, les bornes des graphiques sont calculées avec cette formule : $\mu \pm \sigma \times 2.8$ (moyenne \pm écart type *2.8). De cette façon, toutes valeurs supérieures à la distribution de Gauss sont exclues avec un risque de 1 %.

Pour appuyer le tableau récapitulatif des plages de mesures de chaque paramètre et également celui des plages de mesures situées de part et d'autre de la thermocline, un profil pour chaque variable et pour chaque mission a été tracé à la station 1. Cette station a été choisie comme station de référence. En effet, elle représente un choix stratégique, d'une part grâce à sa position géographique en milieu de détroit elle est considérée comme étant caractéristique de l'ensemble de la zone. D'autre part, c'est aux environs de cette station que l'ADCP fixe a été installé, à une autre période que les missions CYRCE, rendant possible une comparaison des données de courants soit d'un point de vue géographique, soit d'un point de vue des tendances saisonnières.

Afin d'identifier les différences entre les stations (notamment de voir si les stations de cantonnement ont une caractéristique particulière) la moyenne est faite pour chaque profil et chaque variable sur les 35 premiers mètres. Ces moyennes seront utilisées pour réaliser un premier traitement statistique. Pour effectuer ces traitements, il était nécessaire d'utiliser des variables ayant des caractéristiques comparables. Les profils sélectionnés sont donc ceux de CYRCE 2, mission réalisée

en hiver, puisque la variation journalière des paramètres est très atténuée à cette saison. En effet, les profils hydrologiques n'étant pas tous effectués à la même heure durant les missions, ce décalage horaire pouvait être une source d'erreur dans les analyses statistiques. Nous avons en outre choisi de ne faire la moyenne sur les 35 premiers mètres (profondeur moyenne) afin de ne pas biaiser les résultats, car un profil peut aller de 20 m à 130 m de profondeur.

Chap II. Études des courants : données in-situ et simulations

II.1. Données disponibles

Avant de présenter les résultats obtenus durant les missions CYRCE, mais également obtenues par l'ADCP mouillé aux îles Lavezzi, il était important de recueillir et d'analyser les données courantologiques disponibles tant à un niveau général comme la Méditerranée ou la Corse, qu'à une échelle plus locale pour les Bouches de Bonifacio. En effet, les courants sont le résultat de plusieurs phénomènes qui interagissent entre eux, nous citerons par exemple le rayonnement solaire, l'attraction gravitationnelle, la rotation de la Terre pour la circulation des grands courants, mais également la tension du vent, la bathymétrie, le contour des côtes pour la circulation à une échelle côtière. De par la configuration des bouches de Bonifacio, mais également des éléments qui la constituent, nous pouvons nous attendre à certaines valeurs caractéristiques de la couche d'eau. Par exemple, la zone étant connue comme une des zones les plus ventées de Corse et de par sa configuration de détroit (effet Ventury), ces éléments induisent forcément de violents courants. Nous présentons donc ici les données courantologiques disponibles antérieures aux données obtenues durant les campagnes nécessaires à la réalisation de ce travail.

II.1.1. Le vent de la zone- Pertusato- station de référence

Le sémaphore de Pertusato (41°22.23'N – 00.9°10.42'E, altitude 115m) est connu comme étant une station de référence agréée Météo-France. Les données issues de cette station indiquent que Bonifacio fait partie d'une des zones les plus ventées de Corse. L'effet de détroit sur la zone terrestre (accentué par les montagnes renforçant l'effet Ventury) induit des vents soufflant 328 j/an souvent avec violence (171 jours de vent >16 m.s⁻¹ soit 57.6 km/h). Les fortes fréquences de vents de vitesse supérieure à 8 m.s⁻¹ s'accompagnent d'un aspect bimodal presque exclusif des directions ouest (280°) et est (80°).

«L'action du vent sur la mer s'exerce par un frottement de l'air en mouvement au contact avec la surface de l'eau, auquel il transfère d'importantes quantités d'énergie mécanique. Des courants marins superficiels se forment, engendrant une agitation désordonnée à la surface puis des vagues dont l'amplitude et la période varient en fonction de l'intensité et de la durée du vent» (Giorgetti, 2009 [28]). Le vent joue donc un rôle essentiel dans la dynamique des eaux de surface. Par conséquent, les forts régimes de vent doivent induire de forts courants, il fallait donc s'attendre à avoir dans la zone des courants associés à ces vents, en particulier accentués par l'effet de détroit.

II.1.2. Circulation générale

Avant d'étudier l'hydrodynamisme des Bouches de Bonifacio, il est important de comprendre la circulation générale en Méditerranée et plus particulièrement en Méditerranée nord-occidentale puisque c'est un des éléments qui régit également la circulation à l'échelle locale. Nous présentons donc la circulation des eaux de surface sur l'ensemble de la Méditerranée (Figure II.1), puis nous effectuerons un zoom sur la circulation de la Méditerranée Nord occidentale.

De nos jours, la communauté scientifique a une bonne connaissance de la circulation générale en Méditerranée même s'il reste encore beaucoup de mécanismes complexes à comprendre. Il existe en Méditerranée trois types de masse d'eau. L'eau océanique peu salée qui circule en surface dans l'ensemble de la mer, voit ses caractéristiques modifiées essentiellement par interaction avec l'atmosphère, elle prend alors le nom d'Eau Modifiée d'origine Atlantique ou Modified Atlantic Water (MAW). L'augmentation de sa densité (évaporation, refroidissement surtout en hiver...) entraîne dans certaines régions des mouvements de plongée importante. En Méditerranée orientale, ce phénomène de plongée conduit à la formation de l'eau Levantine Intermédiaire ou Levantine Intermediate Water (LIW) qui s'écoule par le détroit de Sicile. En Méditerranée occidentale, LIW participe avec MAW à la formation de l'Eau Profonde Méditerranéenne ou Mediterranean Deep Water (MDW).

La MAW pénètre en surface dans le bassin méditerranéen, circule le long des côtes du Maghreb d'ouest en est pour remonter vers le nord et s'intégrer dans un circuit cyclonique dans le bassin nord-occidental (golf du Lion). «La force de Coriolis qui,

dans l'hémisphère nord, dévie sur leur droite tous les mouvements d'une certaine ampleur est un premier élément fondamental de la dynamique des fluides... (Millot, 1989 [46]). Donc globalement, toute circulation à l'intérieur de la Méditerranée aura tendance à suivre le relief qui se trouve sur sa droite, et fera le tour de la mer dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Cependant, ce schéma global sera naturellement perturbé par la topographie, la bathymétrie, la nature des mécanismes qui force la circulation... (Millot, 1999 [48]).

Plus vers l'est, une partie de MAW après avoir longé les côtes du Maghreb rentre en mer Tyrrhénienne, remonte et longe la côte italienne (le long de la Sicile), puis une partie franchie le canal de Corse (Courant Est), et l'autre entour les côtes de la Sardaigne vers le sud pour remonter vers le Nord tout le long des côtes ouest de Sardaigne et de Corse. Ces deux courants fusionnent et donnent naissance au Courant Nord, qui suit une circulation cyclonique dans le golf du Lyon (Millot, 1990 [47] ; Ovchinnikov, 1966 [53] ; Ovchinnikov, 1974 [54]).

LIW est créée dans le bassin oriental et revient dans le bassin occidental par le détroit de Sicile. Elle tourne vers sa droite en mer Tyrrhénienne, puis suit en grande partie le chemin de MAW.

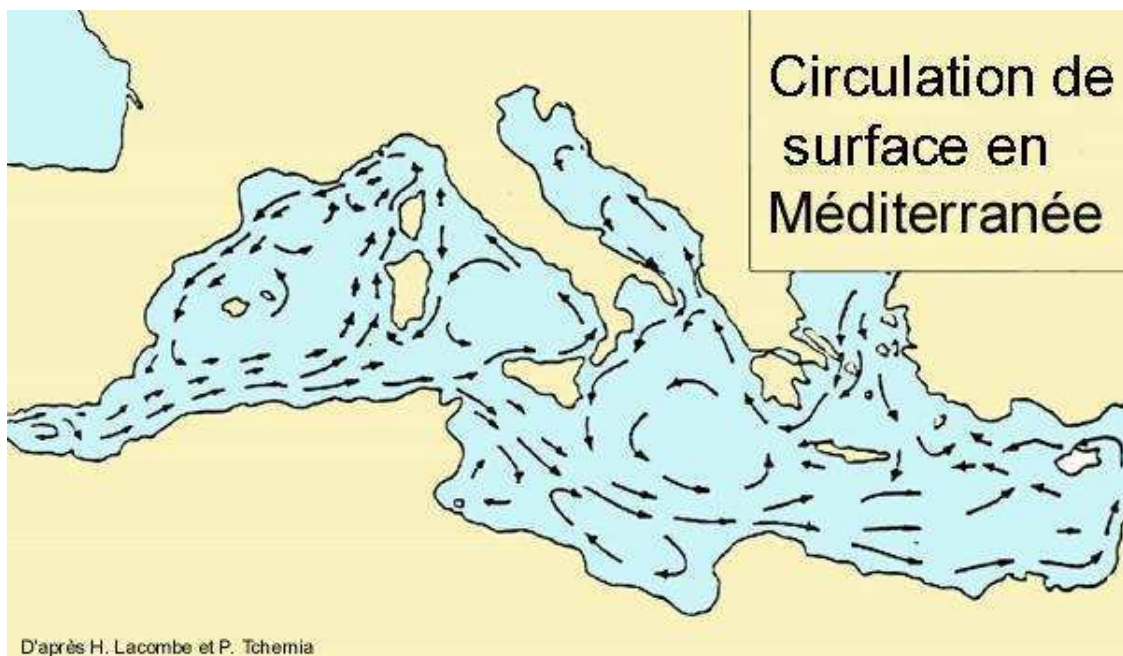


Figure II.1 : Circulation des eaux de surface en Méditerranée. D'après Lacombe et Tchernia, 1972.

II.1.3. Données courantologiques du système SAVED antérieures aux missions CYRCE

D'autres missions antérieures à CYRCE (ViveBB, GeoCorse, GeoBrest, Bocca, DeaDyn, GeoDys) ont été menées dans les bouches de Bonifacio, avec souvent une zone d'étude plus étendue que celle de CYRCE. Nous en donnons un récapitulatif ci-dessous.

Tableau II.1: Date de mission et durée des missions

	Saison	Date de début de mission	Date de fin de mission	Nombre d'heures	Vitesse moyenne Vent (m/s)	Direction moyenne Vent (degrés)	Vitesse moyenne Courant (cm/s)	Chefs de mission
Bocca 1	Eté	30 juin 99	9 juillet 99	240	9	Ouest	25	J. Ferrandini
Bocca 2	Automne	8 octobre 00	14 octobre 00	168	11	Ouest	25	J. Ferrandini
GeoBrest 1	Printemps	21 mai 00	24 mai 00	96	9	Ouest	20	J. Deverchere
GeoBrest 2	Hiver	7 mars 01	10 mars 00	96	12	Ouest	25	J. Deverchere
Geocorse	Printemps	3 mai 03	10 mai 03	192	7	Nord-East	10	J. Ferrandini
Geodys	Eté	6 septembre 02	8 septembre 02	72	7	Ouest	15	X
Mytilos	Eté	3 juillet 05	4 juillet 05	48	5	Ouest	13	B. Andral
ViveBB	Printemps	2 mai 04	3 mai 04	48	6	Ouest/N-E	15	J.L Fuda

II.1.4. Récapitulatif des données météo des missions précédant CYRCE

Nous présentons dans cette partie, des cartes courantologiques recueillies lors de missions dans les Bouches de Bonifacio à bord du Téthys II, navire utilisé pour les missions CYRCE. Ces missions, ayant des buts différents et variés, ne sont pas toutes focalisées dans les Bouches de Bonifacio, puisque certaines enregistrent les courants tout le long de la Corse, d'autres encore présentent des enregistrements de courant dans la partie italienne (ce qui n'est pas le cas pour CYRCE). Afin de nous focaliser sur la zone étudiée nous présentons les cartes précédant les missions

CYRCE, zoomées sur la zone des Bouches de Bonifacio. Ces cartes ont été sélectionnées à -16 m de profondeur en fonction des configurations de vent durant les missions (principalement les deux vents dominants ouest et nord-ouest), de la configuration des courants qu'elles présentaient ou tout simplement de leur emplacement. Nous commençons par présenter les missions Bocca. Trois cartes sont sélectionnées une de part et d'autre du détroit, et une donnant une vision sur le milieu des Bouches de Bonifacio.

Carte des courants session S_00_157 : TCC0009 Bin: 3, Alpha=NaN, Phi=NaN

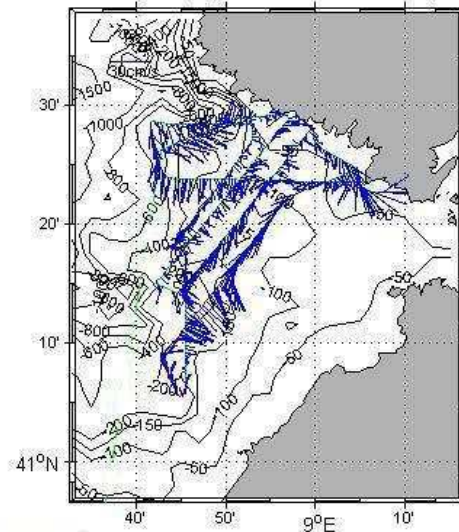


Figure II.2 : Carte effectuée durant les missions Bocca, du 10/10/2000 au 11/10/2000. Vent orienté ouest, compris entre 3 et 25 nd (1.54 et 12.85 m.s^{-1}). Le flux est orienté sud et sud-est, et présente des vitesses comprises entre 12 cm.s^{-1} et 30 cm.s^{-1} . Le flux est assez homogène en direction sur cette carte.

Carte des courants session S_99_108 : TCC9903 Bin: 3, Alpha=NaN, Phi=NaN

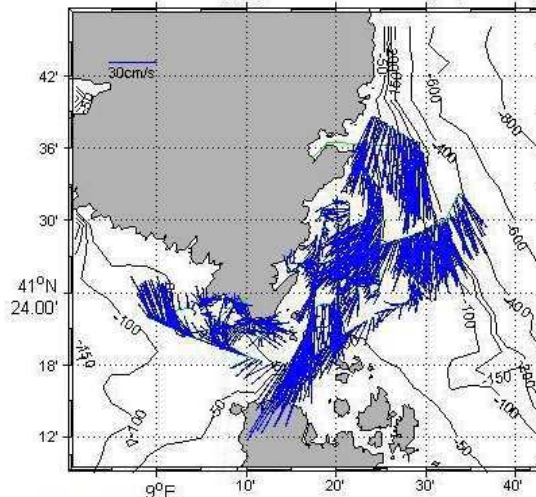


Figure II.3 : Carte effectuée durant les missions Bocca, du 01/07/1999 au 03/07/1999. Vent d'ouest en début d'enregistrement et vent nord-est en fin d'enregistrement, compris entre 1 et 15 nd (0.514 et 7.71 cm.s^{-1}). Cette carte permet d'avoir une bonne vision de l'ensemble des Bouches de Bonifacio, puisqu'elle couvre l'entièreté du golf. Un courant orienté sud (sur la

côte est) est présent avec de fortes intensités au alentour de 38 cm.s^{-1} et présente une direction générale du flux majoritaire orienté sud-sud-ouest.

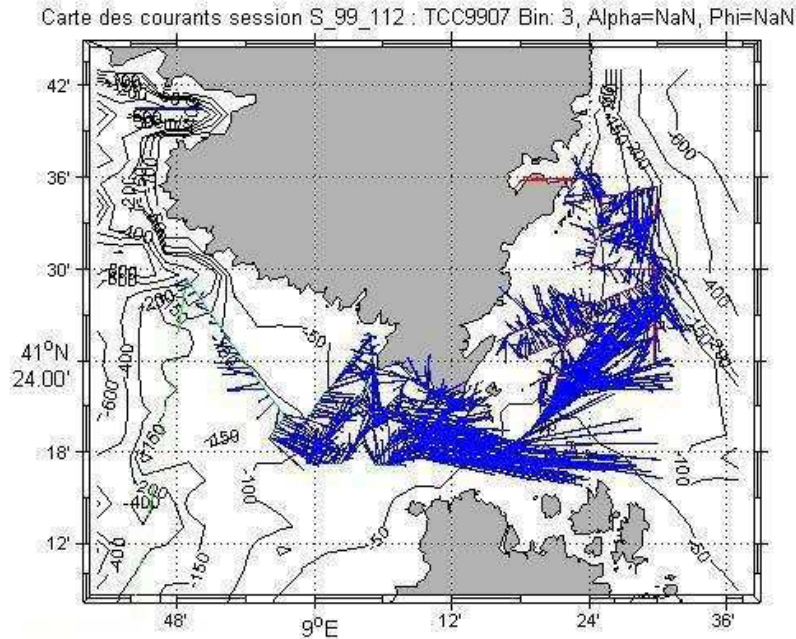


Figure II.4: Carte effectuée durant les missions Bocca, du 05/07/1999 au 09/07/1999. Vent fort orienté nord-est. Cette carte présente un fort courant orienté ouest-est dans le passage le plus resserré du détroit atteignant environ $45 \text{ à } 50 \text{ cm.s}^{-1}$. Côté ouest le profil ne permet pas de dégager une tendance particulière. Côté est, le courant violent traversant le milieu du détroit ne permet pas d'identifier un autre courant.

Nous continuons en présentant les cartes issues de la mission GeoCorse, toujours sélectionnées en fonction des mêmes critères que précédemment.

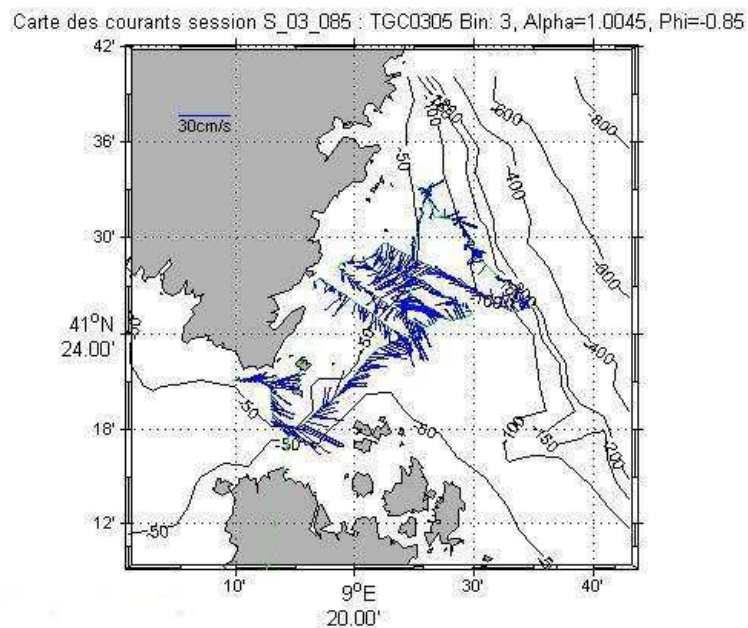


Figure II.5 : Carte effectuée durant les missions GeoCorse, du 09/05/2003 au 10/05/2003. Configuration en vent d'ouest, compris entre 4 et 29 nd ($2 \text{ et } 14 \text{ m.s}^{-1}$). En majorité, les courants

présents sur cette carte sont de faibles intensités comparées aux cartes précédentes (10 cm.s^{-1}). Les courants sont plus homogènes en direction et en intensité. C'est au milieu du détroit qu'apparaît la plus forte intensité (35 cm.s^{-1}).

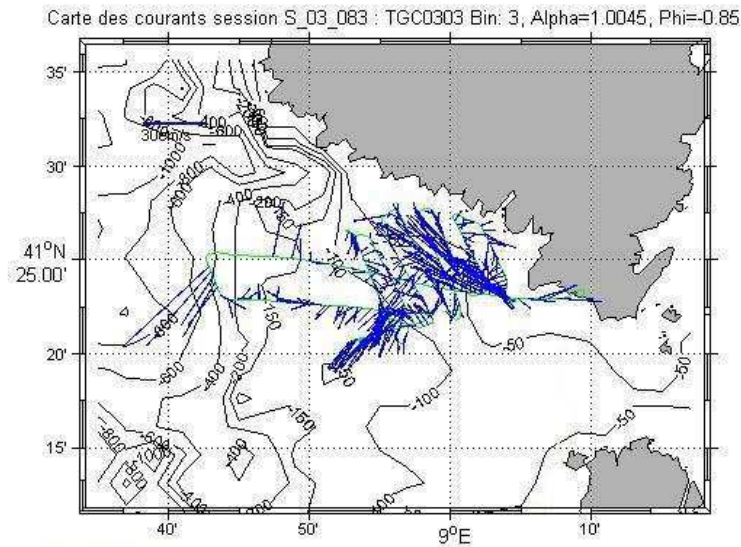


Figure II.6 : Carte effectuée durant les missions GeoCorse, du 05/05/2003 au 06/05/2003. Condition de vent d'ouest, compris entre 10 et 46 nd (5 et 23 m.s^{-1}) considérés comme vent violent. De fortes intensités sont présentes du côté ouest (30 cm.s^{-1}), avec présence de zone de cisaillement.

Nous poursuivons en présentant les missions Geodys, Mytilos et ViveBB. Pour ces missions, une seule carte de courant enregistrée dans la zone était disponible.

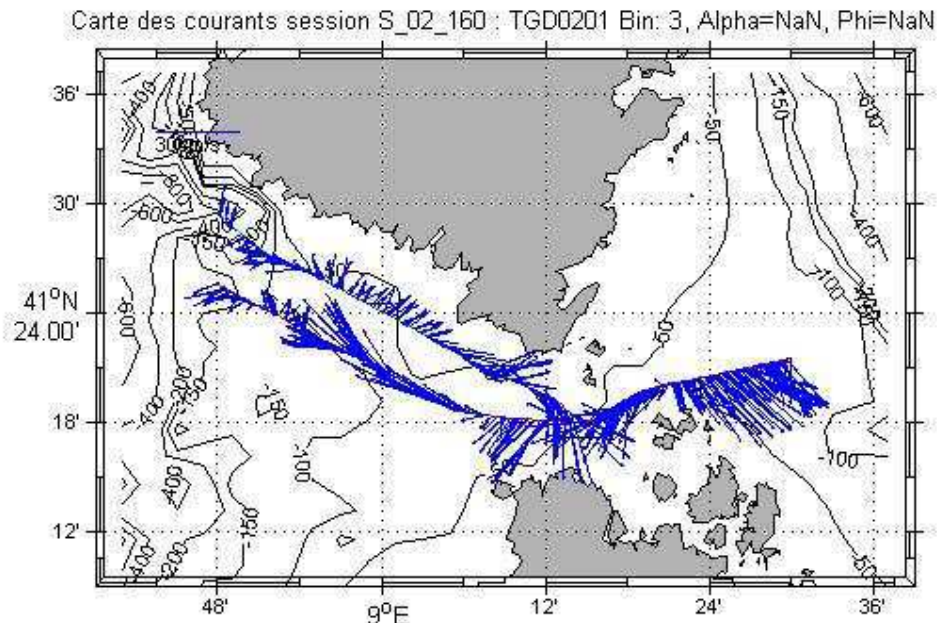


Figure II.7 : Carte effectuée durant les missions Geodys, du 06/09/2002 au 08/09/2002. Condition de vent d'ouest, compris entre 6 et 35 nd (3 et 17 m.s^{-1}). Sur les deux traits de profil parallèle, entre eux du côté ouest, nous constatons une direction opposée entre les deux passages, montrant une forte variabilité du système du côté ouest. L'un, près de la côte avec un courant d'intensité de 6 cm.s^{-1} orienté nord-est et l'autre d'intensité de 33 cm.s^{-1} orienté

ouest-nord-ouest. Au milieu du détroit, les courants sont forts 30 cm.s^{-1} , mais ils ne sont pas orientés dans une direction particulière, alors que du côté est ils sont orientés sud-est avec une intensité de 35 cm.s^{-1} .

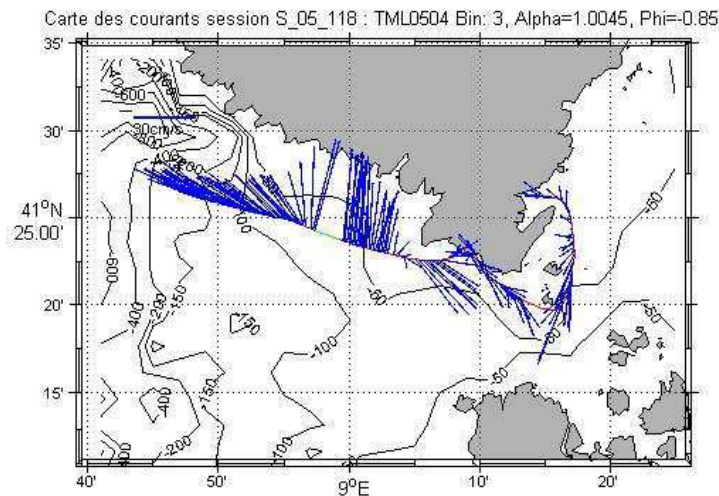


Figure II.8 : Carte effectuée durant les missions Mytilos, du 03/07/2005 au 04/07/2005. Situation de vent d'ouest, sud-ouest, compris entre 3 et 18 nd ($1 \text{ et } 9 \text{ m.s}^{-1}$), vent « relativement » faible par rapport aux autres missions. Du côté ouest, le courant est fort (43 cm.s^{-1}), le courant au milieu du détroit passe d'ouest en est d'après le petit bout de transect effectué sur cette zone et semble rencontré du côté est un courant orienté sud.

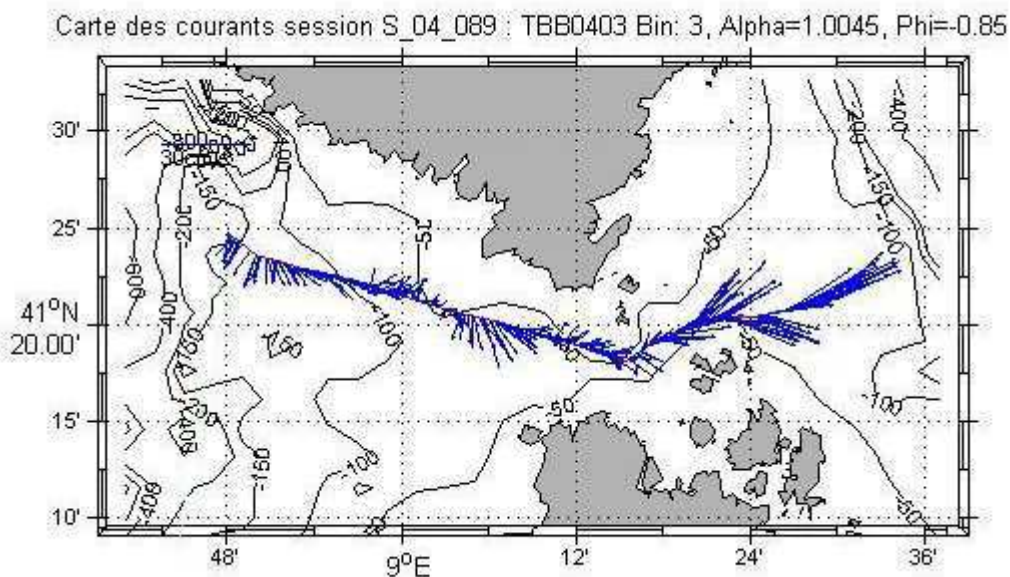


Figure II.9 : Carte effectuée durant les missions ViveBB, du 02/05/2004 au 03/05/2004. Situation de vent nord-est, compris entre 5 et 24 nd ($2 \text{ et } 12 \text{ m.s}^{-1}$). Du côté ouest le courant est de faible intensité (6.6 cm.s^{-1}), mais présente tout de même une certaine variabilité. Le flux est orienté d'ouest en est au milieu du détroit sans intensifier sa vitesse. Puis il augmente en vitesse (30 cm.s^{-1}) à la sortie de la partie la plus resserrée orientée est.

Deux cartes sont sélectionnées pour la mission GeoBrest, en fonction de leur position géographique comprise dans la réserve des Bouches de Bonifacio.

Carte des courants session S_00_088 : TGB0004 Bin: 3, Alpha=NaN, Phi=NaN

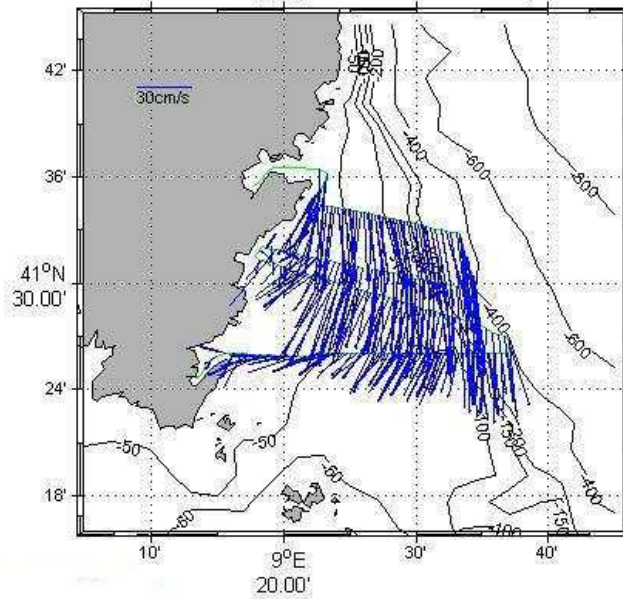


Figure II.10 : Carte effectuée durant les missions GeoBrest, le 21/05/2000. Situation de vent nord-est à sud, compris entre 1 et 23 nd (1 et 11 m.s⁻¹, moyenne de 8 nd ou 4 m.s⁻¹) considérés comme situation de vent faible. Présence d'un courant violent (48 cm.s⁻¹) orienté sud du côté est des Bouches de Bonifacio.

Carte des courants session S_00_090 : TGB0006 Bin: 3, Alpha=NaN, Phi=NaN

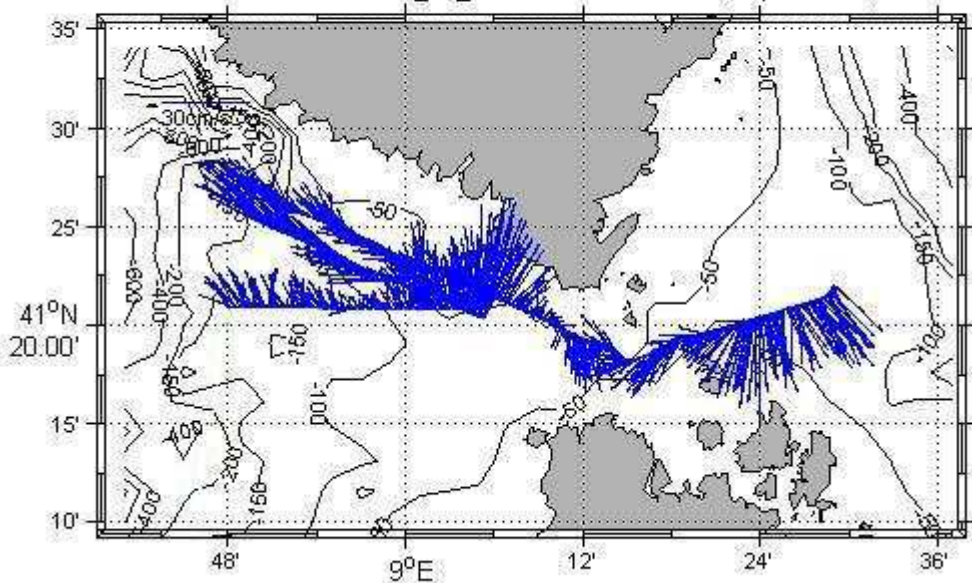


Figure II.11 : Carte effectuée durant les missions GeoBrest, du 23/05/2000 au 24/05/2000. Situation de vent d'ouest, de vitesse moyenne de 11 nd ou 6 m.s⁻¹). Le courant montre une plus forte variabilité du côté est (orientation du flux variable et présence de zone de cisaillement) que du côté est.

D'après les cartes enregistrées durant les missions antérieures à CYRCE, il est possible d'avoir une idée de la configuration des courants présents dans la zone,

cette configuration prenant en compte la situation de vent. Nous distinguons deux configurations souvent très différentes entre l'est et l'ouest du détroit. La partie ouest présente régulièrement une forte variabilité par rapport au côté est, avec des zones de cisaillement, et des flux orientés dans des directions variables. Le côté est apparaît « souvent » plus homogène avec la présence d'un fort courant orienté sud. Ce courant est présent dans les deux configurations de vent, indiquant sûrement une influence de la circulation générale. Les flux de la zone présentent une forte variabilité, ceci peut importe les conditions de vent, traduisant, malgré une influence de la circulation générale et des vents, un fort effet local.

II.1.5. Données biologiques (espèces indicatrices des courants)

Certaines espèces ont également des affinités par rapport à la force du courant, avec certaines préférant des eaux calmes et d'autres préférant des habitats à fort hydrodynamisme, c'est à ces dernières que nous intéresserons particulièrement vu la force des courants présents dans le détroit de Bonifacio. Nous donnons une liste des espèces indicatrices d'un fort hydrodynamisme d'après la classification de Pérès and Picard, 1964 [58], en citant tout d'abord les espèces les plus fréquentes.

Les espèces de *Spatangus purpureus* et *Sphaerechinus granularis* sont deux espèces indicatrices de courants vifs (Néraudeau, *et al.*, 1998 [51]) et souvent rencontrées dans le milieu marin. L'espèce *Venus casina* (Pélécy-pode) est souvent présente dans les biocénoses soumises à un hydrodynamisme violent. L'amphioxus *Branchiostoma lanceolatum* (céphalochordé fusiforme) est lui indicateur d'eaux limpides et bien oxygénées. Il est également possible de trouver toutes les espèces indicatrices de l'hydrodynamisme d'une macrofaune particulière dans l'ouvrage de Pérès and Picard, 1964 [58]. Nous en donnons deux exemples présents à Bonifacio, avec en premier lieu la macrofaune des sables grossiers et fins graviers sous influence des courants de fond : *Ophiopsila annulosa* (Ophiure), pour les mollusques : *Tellina crassa*, *Venus casina*, pour les polychètes *Sigalion squamatum*, *Ophelia roscovensis*, *Armandia polyophtalma*, les crustacés comme *Anapagrus breviaculeatus*, *Processa macrophthalma*, des algues comme *Lithophyllum racemus*, *Lithothamnium calcareum*, pour les céhalopodes : *Branchiostoma lanceolatum*, les poissons ammodytes cicerelus. Comme second exemple nous indiquerons les

espèces indicatrices de l'hydrodynamisme qui accompagnent le faciès à Maërl, avec les Pélécytopodes : *Lima elliptica*, *Venus casina*, *Psammobia costulata*, pour les algues rouges *Lithothamnium calcareum* et *L. solutum*, pour les polychètes : *Euthalenessa* et *Glycera lapidum* ; et pour les échinodermes : *Spatangus purpureus*.

II.1.6. Données courantologiques prises pour l'installation de la station d'épuration

Des études ponctuelles de mesure de courant ont été réalisées durant une étude d'impact pour l'installation d'un nouvel émissaire avec rejet en mer (Pelaprat and Lejeune, 2004 [56]). Cette étude fait l'objet de l'analyse des vents (données issues du Sémaphore de Pertusato, de juin à novembre 2003) et de deux types de données courantologiques; des enregistrements de courant par un courantomètre ANDERAA RCM 7 (installé du 3 septembre 2003 au 28 octobre 2003, à -5 m de profondeur, sur un site de 41 m de fond, à la sortie du goulet de Bonifacio, 41°23'00.9"N et 09°08'42.9"E) mais aussi des données obtenues grâce à des lâchés de flotteurs à drogues. L'étude des vents montre un système de vent binaire avec deux directions majoritaires qui évoluent durant la saison ; un vent d'ouest majoritaire en période estivale et un vent de nord-est (avec un éventail de directions plus élargi que le vent d'ouest) de fréquence égale au premier principalement en automne. Les courants enregistrés par le capteur ANDERAA montrent deux directions préférentielles ouest nord-ouest et est sud est (voir Figure II.12) correspondant à la prédominance des deux vents identifiés durant cette période.

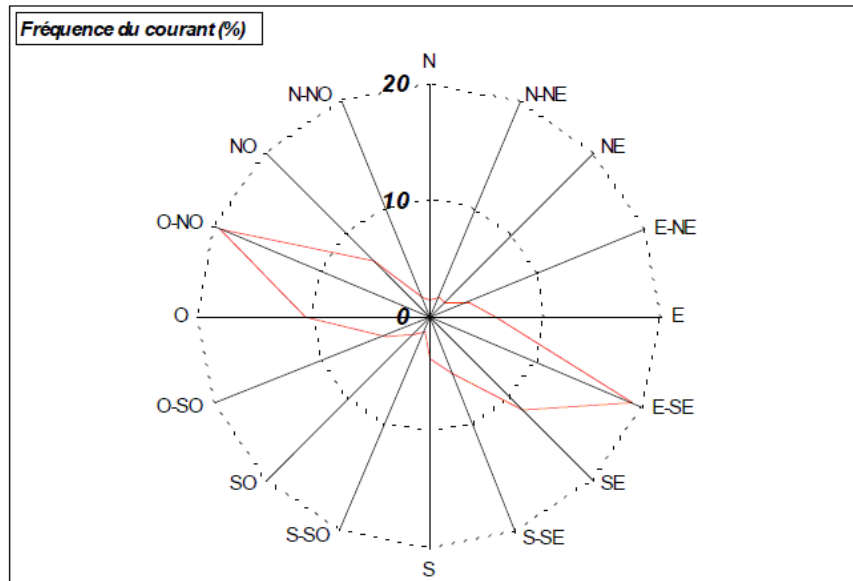


Figure II.12: Représentation des fréquences de direction d'après les données courantologiques enregistrées par le courantomètre positionné à la sortie du goulet de Bonifacio sur la période du 3 septembre au 28 octobre 2003 à 6 m de profondeur sur un fond de 41 m. (Pelaprat and Lejeune, 2004 [56]).

II.1.7. Carte SeaWiff

Le milieu marin est un milieu homogène, connu pour son fort effet tampon. Les paramètres conservatifs, notamment la température et la salinité, ne sont pas influençables par le biologique et sont censés, comparé à des paramètres non conservatifs, être moins variable à petite échelle de temps et d'espace. Cependant, il est possible de constater des exceptions à cette règle. Comme le présente l'image satellite des températures de surface de l'eau de mer issue des données SeaWiFF (Figure II.13). Sur cette dernière nous constatons un hydrodynamisme différent entre l'est et l'ouest des bouches de Bonifacio, où les températures à l'est sont plus chaudes qu'à l'ouest. Mais nous constatons que ces températures plus chaudes du côté est sont perturbées par une intrusion d'eau plus froide due sûrement à la circulation dans le seuil le plus resserré du détroit. Par cet exemple, nous pouvons croire que nous sommes en présence d'un système complexe à forte variabilité spatio-temporelle.

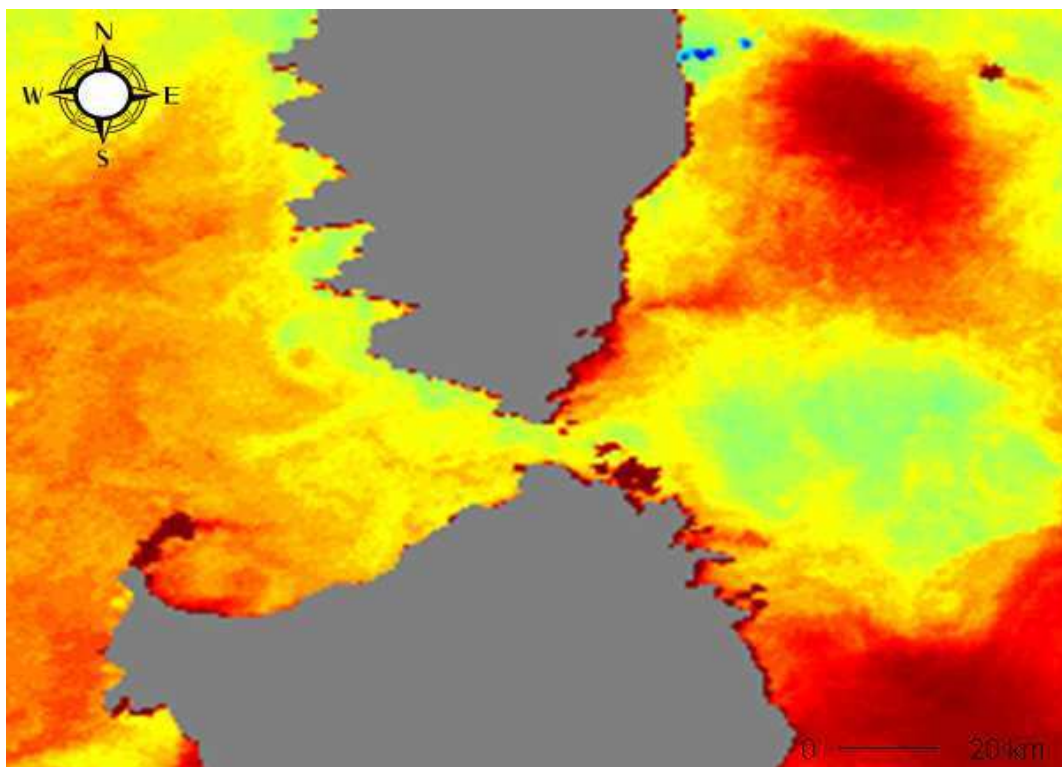


Figure II.13 : Carte des températures, issues du satellite Sea WIFF, le 11/08/2004 (heure inconnue)

II.1.8. Quelques modèles de courantologie

Plusieurs modèles numériques ont été initiés sur l'ensemble du bassin Méditerranéen et plus particulièrement le bassin nord-occidental, et permettent d'obtenir différents éléments tant au niveau physique (vitesse et direction des courants), qu'hydrologique (température et salinité) que biologique (phytoplancton).

Ces modèles sont proposés par différents services souvent qualifiés d'EPIC (Établissement Public à caractère Industriel et Commercial), sauf en ce qui concerne EDF). Parmi ces modèles existent par exemple : le modèle Mars 3D proposé par PREVImer, le modèle TELEMAC proposé par EDF et le modèle OPA proposé par Mercator ...

MERCATOR a pour objectif de développer et de mettre en œuvre un système capable de décrire, de prévoir en temps réel et en trois dimensions l'état de l'océan en tout point du globe, grâce à deux types d'observations : satellite et donnée in-situ. MERCATOR-OCEAN exploite notamment un système de haute résolution $1/12^\circ$ couvrant l'Atlantique et la Méditerranée (<http://www.mercator-ocean.fr>, Drévilion, et *al.*, 2008 [19]). La maille du modèle MERCATOR qui fonctionne à grande échelle est utilisée comme conditions limites dans le modèle numérique issu du modèle Sirocco

initié par le pôle Océanographique Côtier de Toulouse. Ce dernier est opérationnel sur le bassin méditerranéen nord occidental à une maille de 2.5 Km. Par la suite, il servira de maillage « mère » pour les simulations à petites échelles utilisées pour les besoins de ce rapport.

II.2. Éléments de courantologie mesurés

Dans cette section nous allons présenter les différents éléments de courant obtenus à partir de deux appareils différents (ADCP mouillé et ADCP mobile). Comme nous l'avons dit précédemment, les courants des couches de surface sont fortement dépendants du vent, il est donc indispensable de connaître ce dernier dans l'analyse de la dynamique de la zone. Les missions CYRCE étant très ponctuelles, nous ne pouvons pas faire une analyse des vents très poussée, ce qui n'est pas le cas de l'ADCP mouillé qui représente environ 40 jours d'enregistrement (avec un enregistrement horaire totalisant 1104 enregistrements pour chaque niveau de profondeur).

Nous allons donc étudier la distribution de l'intensité du vent durant la durée d'enregistrement de l'ADCP mouillé à travers la moyenne, l'écart type, le minimum et le maximum de l'échantillon (Tableau II.2). Cette analyse permettra également de considérer si le vent enregistré durant cette période est caractéristique ou non de ce qui est classiquement rencontré à Bonifacio. Pour analyser la distribution des intensités et directions du vent et du courant, des histogrammes sont tracés sur les données de vents et de courants (Figure.II.14 à Figure II.16).

Tableau II.2: Moyenne, Écart type, Minimum et Maximum de l'intensité du vent durant la période d'enregistrement de l'ADCP mouillé

Moyenne	7.03
Écart-type	4.10
Minimum	0
Maximum	25
Nb de mesure	1104

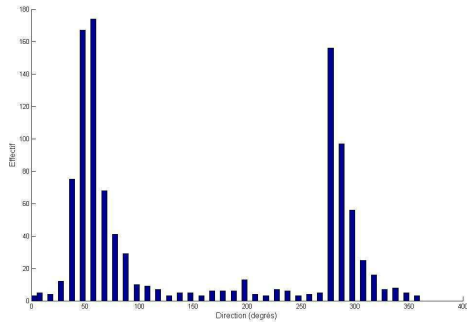


Figure.II.14: Histogramme des directions de vent durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé

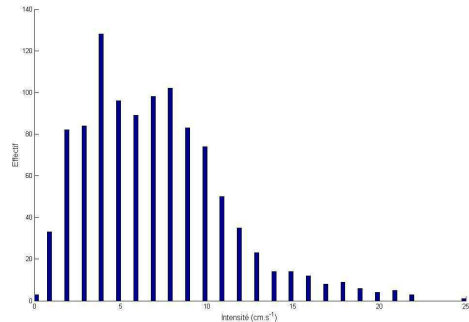


Figure II.16 : Histogramme des intensités de vent durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé

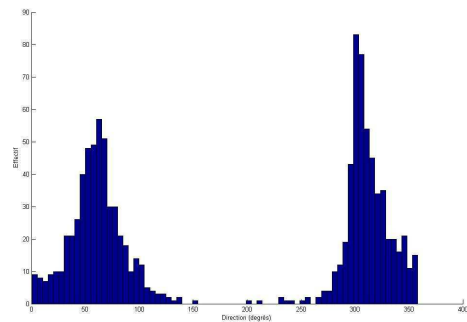


Figure II.15 : Histogramme des directions de courant de surface durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé

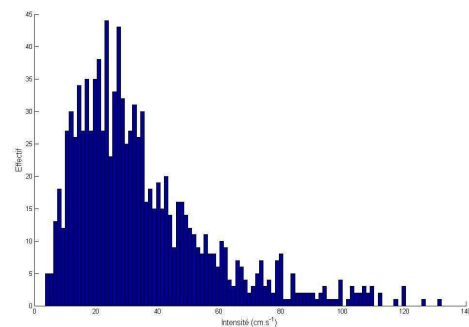


Figure II.17: Histogramme des vitesses de courant de surface durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé

En moyenne les vents soufflants durant la période d'enregistrement de l'ADCP mouillé correspondent à des vents forts (7 m.s-1) et la distribution de leurs directions est principalement bimodale (vent d'ouest et vent de nord-est, Figure.II.14). Ce système correspond bien à ce qui est globalement connu à Bonifacio. Nous pouvons dire que la période d'enregistrement de l'ADCP mouillé se situe dans des conditions de vent classiques.

A présent, présentons un récapitulatif des moyennes, minima, maxima, d'intensité de courant pour chaque niveau d'enregistrement de C1 (fond) à C30 (surface), avec n=2113 individus pour chaque niveau, pour appréhender une première notion des intensités de courant ainsi que des histogrammes de leurs intensités et directions (Figure II.15 & Figure II.17).

Tableau. II.3: Norme des valeurs d'intensité de courant de l'ADCP mouillé

Niveau	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Moyenne	16.07	18.78	20.43	22.09	23.52	24.99
Écart type	12.39	14.30	15.80	16.76	17.69	18.72
MAX	81.40	89.80	99.50	98.70	102.60	113.00
MIN	0.20	0.20	0.40	0.10	0.70	0.70
Niveau	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Moyenne	26.38	27.86	29.31	30.36	31.79	33.26
Écart type	19.62	20.73	21.70	22.46	23.13	23.83
MAX	110.50	123.30	123.30	129.40	127.10	130.40
MIN	0.60	0.20	0.50	0.40	0.80	0.20
Niveau	C13	C14	C15	C16	C17	C18
Moyenne	34.28	35.49	35.06	37.33	37.86	39.75
Écart type	24.15	24.82	23.67	24.30	25.48	26.13
MAX	137.30	141.60	143.20	141.00	149.50	144.60
MIN	0.30	0.40	0.60	1.70	0.80	0.40
Niveau	C19	C20	C21	C22	C23	C24
Moyenne	40.62	41.15	42.81	44.53	45.36	47.01
Écart type	26.41	26.55	26.79	27.23	28.07	28.35
MAX	158.40	145.20	144.00	151.60	170.60	159.60
MIN	1.30	1.00	0.50	0.30	0.90	0.90
Niveau	C25	C26	C27	C28	C29	C30
Moyenne	48.19	48.93	49.76	51.33	51.31	50.41
Écart type	28.61	27.80	28.83	28.85	29.38	27.98
MAX	176.30	154.60	172.10	177.60	162.90	145.90
MIN	0.50	0.40	1.40	0.80	0.90	1.60

C'est au fond que la plus faible moyenne de courant est enregistrée (16 cm.s^{-1}) et en surface que l'on retrouve la moyenne la plus élevée (51 cm.s^{-1}). Ces valeurs enregistrées indiquent la présence de forts courants (50 cm.s^{-1}), comme attendu d'après l'analyse du régime des vents. Tous les niveaux de profondeur affichent de forts écarts-types (de 12 à 29) indiquant une forte variabilité du système. Les directions de courant sont également conditionnées par un système bimodal correspondant à celui du vent. Nous allons donc étudier plus en détail les données de l'ADCP mouillé.

II.2.1. Diminution de la variabilité de l'intensité des courants en fonction de la profondeur

II.2.1.1. Diminution de la variabilité de l'intensité des courants en fonction de la profondeur pour l'ADCP mouillé

Dans un système océanographique classique, on rencontre une diminution de la vitesse du courant, ainsi qu'un changement de direction en profondeur. Ces décroissances de l'intensité du courant avec la profondeur ne sont en rien une règle absolue. Elle va dépendre de nombreux paramètres: existence ou non de courant de fonds indépendants des vents dans les eaux de surface, topographie- soit resserrement de la profondeur, soit resserrement de côtes-, et de l'équilibre de ces différentes influences. Afin de voir si l'hydrodynamisme de Bonifacio correspond dans ce schéma, nous regardons s'il est retrouvé à Bonifacio.

Pour l'ADCP mouillé par la DDE aux îles Lavezzi (Moyenne d'intensité de courant en cm.s-1 pour chaque niveau de profondeur de C30 à C1), il apparait une décroissance de l'intensité du courant en profondeur, et ce, sur toute la colonne d'eau. La Figure II.18 représente la moyenne d'intensité des courants (effectuée sur 2112 individus) pour chaque niveau. Cette intensité moyenne du courant décroît de 54 cm.s-1 à 17 cm.s-1 en profondeur. Cette régression est hautement significative, de type linéaire ($R^2=0.97$); $n= 2112$, avec $p<0.001$ (graphique).

Après avoir rencontré ce phénomène sur les moyennes de vitesse du courant, nous regardons s'il se rencontre également sur toute la période d'enregistrement de l'ADCP mouillé. Pour ce faire, nous utilisons un jeu de couleur matérialisant l'intensité du courant (en cm.s-1) sur un graphique illustrant la profondeur (de C1 à C30) en fonction du temps (en demi-heure) d'enregistrement (Figure II.20). Sur cette figure, plusieurs zones se démarquent où apparait une nette différence d'intensité entre les courants de surface et courants de fond signifiant également une nette décroissance de l'intensité du courant en fonction de la profondeur. Ces zones, bien représentées aux alentours de 600 et 800 heures d'enregistrement, par exemple, correspondent à de forts voir violents coups de vent. Le vent transférant une part de son énergie aux courants de surface ne peut être transmise tout au long de la colonne d'eau, où l'intensité va diminuer régulièrement traduit sur la figure par un changement de couleur le long de la colonne d'eau et donc une diminution d'intensité du courant en fonction de la profondeur.

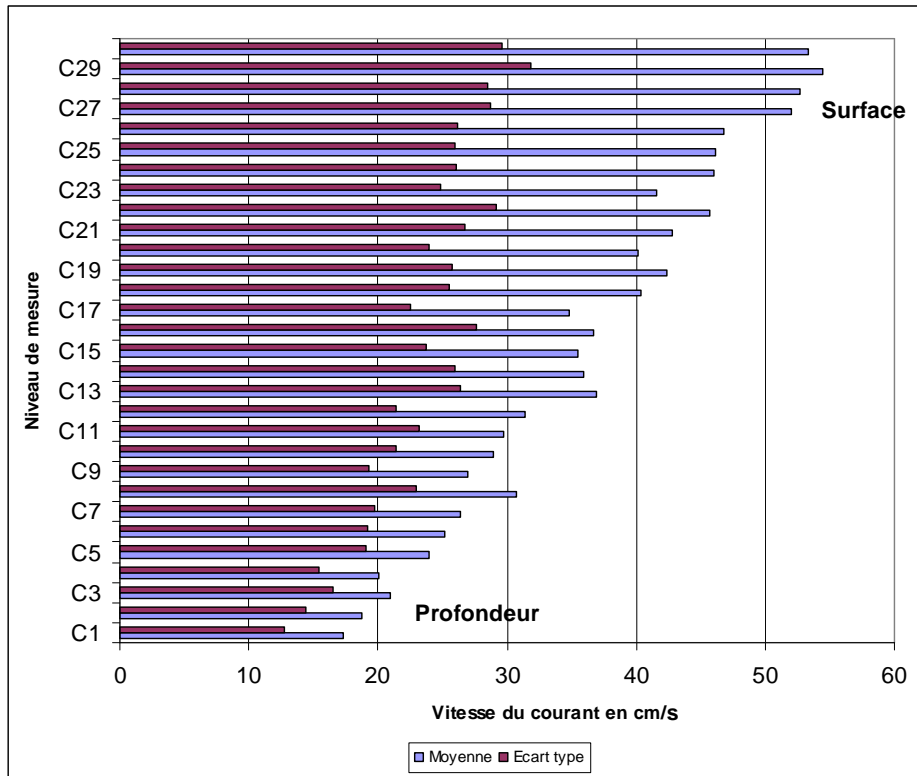


Figure II.18 : Moyenne d'intensité de courant en $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ pour chaque niveau de profondeur de C30 à C1, mesure de l'ADCP fixe

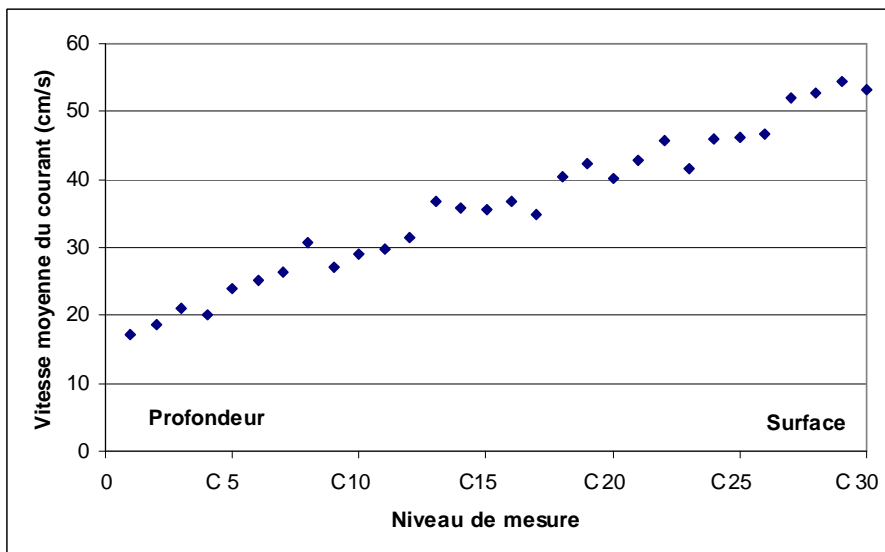


Figure II.19 : Régression linéaire de la vitesse du courant en fonction de la profondeur

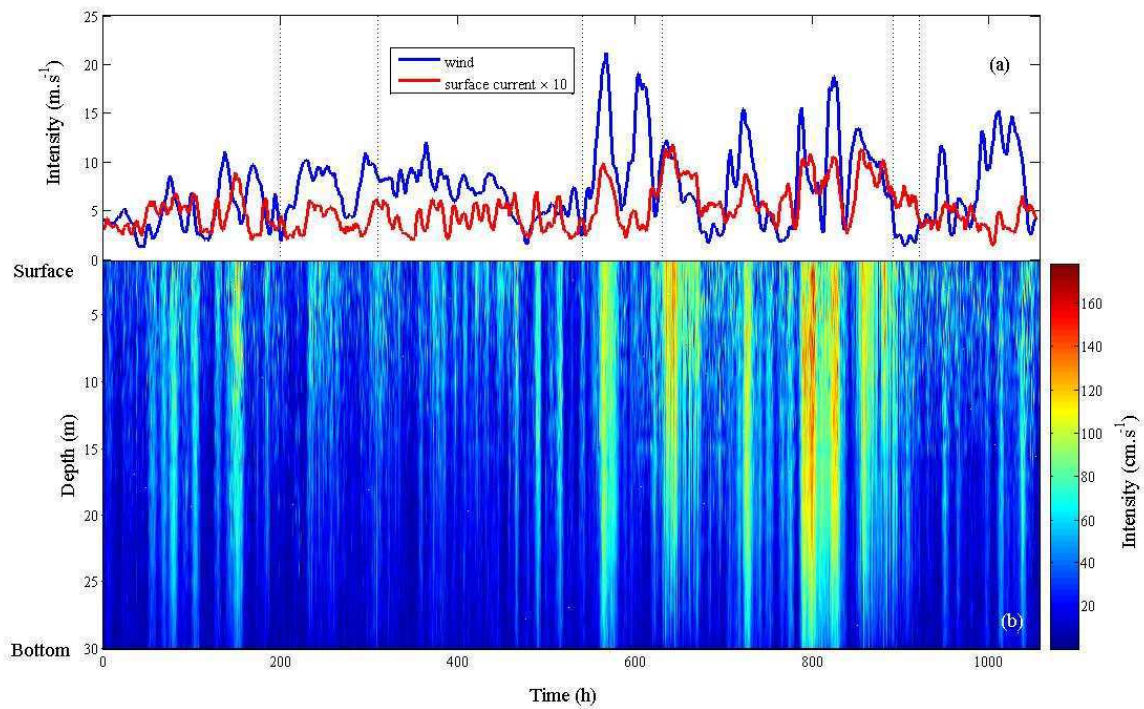


Figure II.20 : Intensité du courant de l'ADCP mouillé

II.2.1.2. Diminution de la variabilité de l'intensité des courants en fonction de la profondeur pour l'ADCP mobile

Nous donnons ci-après, le profil d'un courant réalisé côté est de Bonifacio où la moyenne des vitesses des courants est calculée sur un ensemble de 20 minutes pour chaque bin, pour la mission CYRCE 6 (septembre), sur un trajet correspondant à environ 5 Km au large des côtes à l'est de Bonifacio. Puis ces moyennes sont tracées en fonction de la profondeur (Figure II.21). Effectivement, nous ne pouvons regarder ce phénomène sur un seul et unique point alors qu'il a été observé sur une moyenne pour l'ADCP mouillé.

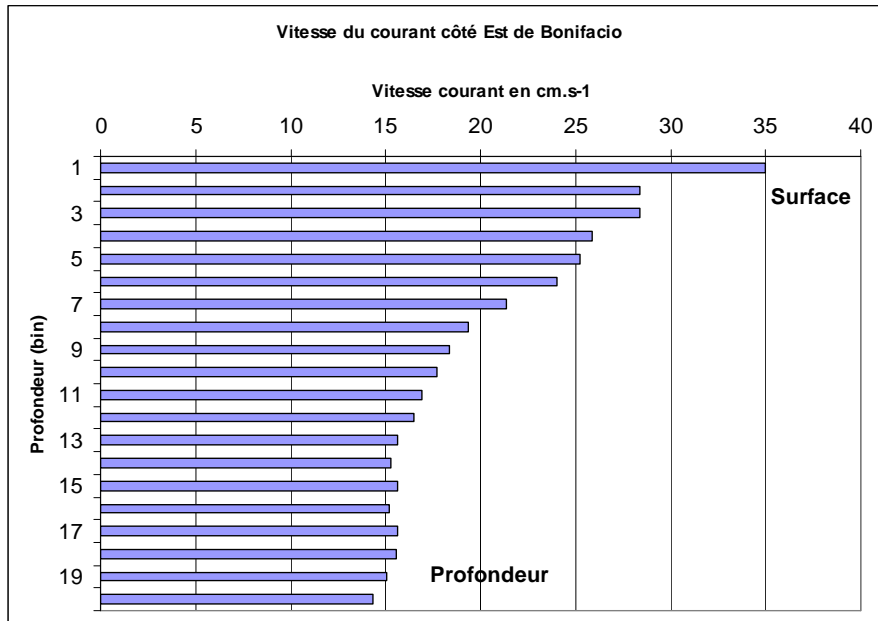


Figure II.21 : Moyenne d'intensité de courant en cm.s⁻¹ du côté est de Bonifacio sur 13 bins, données issues de l'ADCP embarqué du Téthys II

Du côté est la régression, entre la vitesse du courant et la profondeur, est hautement significative (passant de 35 cm.s⁻¹ (au bin 1) à 14.31 cm.s⁻¹ au bin 20 (environ 80 m de profondeur), de type linéaire ($R^2=0.82$), $n=20$, $p<0.001$). Mais ce système n'est pas une généralité puisqu'il est possible de trouver des cas différents. Nous donnons ci-après, le profil d'un courant réalisé au sud des îles Lavezzi, positionné en milieu de détroit non loin du lieu où l'ADCP mouillé était positionné.

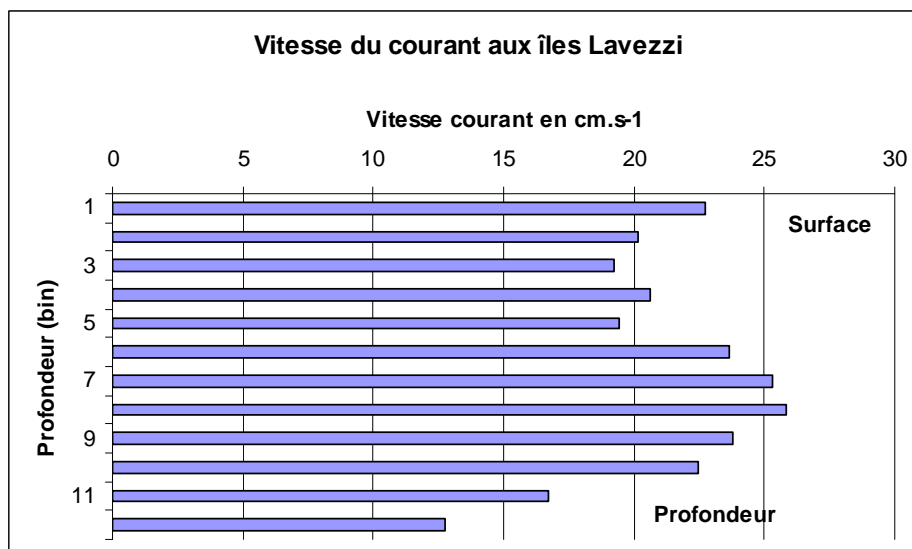


Figure II.22 : Moyenne d'intensité du courant sur la profondeur, aux îles Lavezzi, donnée issue de l'ADCP embarqué du Téthys II

Nous ne constatons pas aux îles Lavezzi (Figure II.22), une décroissance du courant en profondeur (avec des variations de vitesse dans la colonne d'eau) de type linéaire. En effet, le meilleur ajustement pour cette figure serait de type exponentielle ($R^2=0.11$), $n=12$ bien que celle-ci ne soit pas significative.

La régression de type exponentielle ne se retrouve pas pour le profil des îles Lavezzi alors qu'elle était hautement significative pour le profil d'un courant réalisé côté est de Bonifacio. En effet, les contraintes hydrodynamiques exercées sur ces stations sont différentes entre elles. Puisque les îles Lavezzi sont positionnées dans la partie la plus resserrée du détroit qui fait communiquer les deux bassins qui engendrent des courants violents et inégaux du fait du passage du flux. Alors que dans la partie est de Bonifacio il n'y a pas autant de contraintes physiques qu'en milieu de détroit.

Pour les deux outils de mesure, une décroissance de l'intensité du courant en profondeur a été observée sur plusieurs points. Cependant aux îles Lavezzi, l'ADCP mouillé donne un modèle de régression linéaire alors que les données de l'ADCP du Téthys, enregistrées dans la même zone, ne permettent pas de constater ce phénomène. Par ailleurs ce dernier appareil ayant observé une structure de diminution de vitesse du courant en profondeur au large de la côte est de Bonifacio, mais également sur d'autres zones (non présentées ici), nous pouvons en conclure que les fortes contraintes physiques rencontrées par le courant dans la zone (vent, topographie, resserrement) indiquent sûrement une forte variabilité des intensités de courant dans les Bouches de Bonifacio.

II.2.2. Comportement des directions en profondeur

II.2.2.1. Comportement des directions en profondeur pour l'ADCP mouillé

Il est connu qu'un des éléments les plus déterminants pour la formation des courants est la force du vent. Ce sont les couches de surface qui lui sont directement soumises. Au fur et à mesure que la profondeur augmente, les frottements tendent à diminuer l'intensité des courants et à modifier les directions. Ce modèle classique appelé spirale d'Eckman peut être naturellement modifié par l'action d'autres facteurs hydrologiques.

Afin de constater si ce changement de direction du courant en profondeur existe, nous utilisons le même style de graphique que précédemment sur les données d'ADCP mouillé (partie II.2.1.1): un jeu de couleur matérialisant la direction du courant (en degrés) sur un graphique illustrant la profondeur (de C1 à C30) en fonction du temps (en demi-heure) d'enregistrement

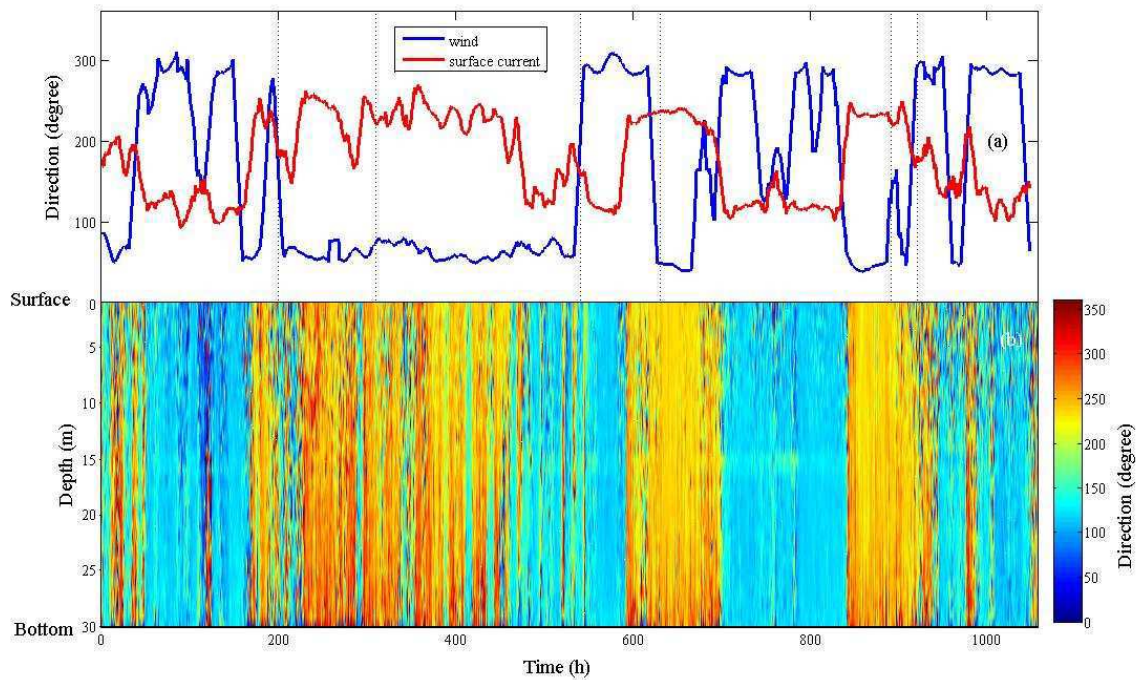


Figure II.23 : Directions des courants en degrés sur toute la profondeur pendant la période d'enregistrement de l'ADCP mouillé

Tout au long du temps de mesure, le système de directions des courants apparaît très binaire, avec seulement deux tranches de direction (l'une aux alentours de 250° et l'autre aux alentours de 150°) et souvent homogènes le long de la profondeur, où les directions sont presque constantes et présentent de légères variations (de quelques degrés, Figure II.23). Ces changements de direction sont tout de même minimes si on veut le comparer à une inversion de direction telle qu'elle peut être décrite dans le modèle idéal de spirale d'Eckman. Mais cette dernière s'effectue sur de très grandes profondeurs (ce qui n'est pas dans le cas présent, puisque l'ADCP est environ sur 40 mètres de profondeur) mais aussi dans un système théoriquement infini. Il semble néanmoins que de légères variations (nous ne prenons pas en compte ici les variations brusques de couleur entre le rouge (360°) et le bleu (0°) qui correspondent à une direction nord) se font lorsque le courant est de faible intensité. Pour vérifier cette hypothèse, nous traçons la courbe

des intensités de courant de surface au cours du temps avec une courbe représentant la variabilité des directions de courant sur toute la profondeur. Cette dernière représente l'écart type des directions intégrées sur toute la profondeur au cours du temps. Nous en présentons ici un extrait entre 550 et 900 heures d'enregistrement (Figure II.24).

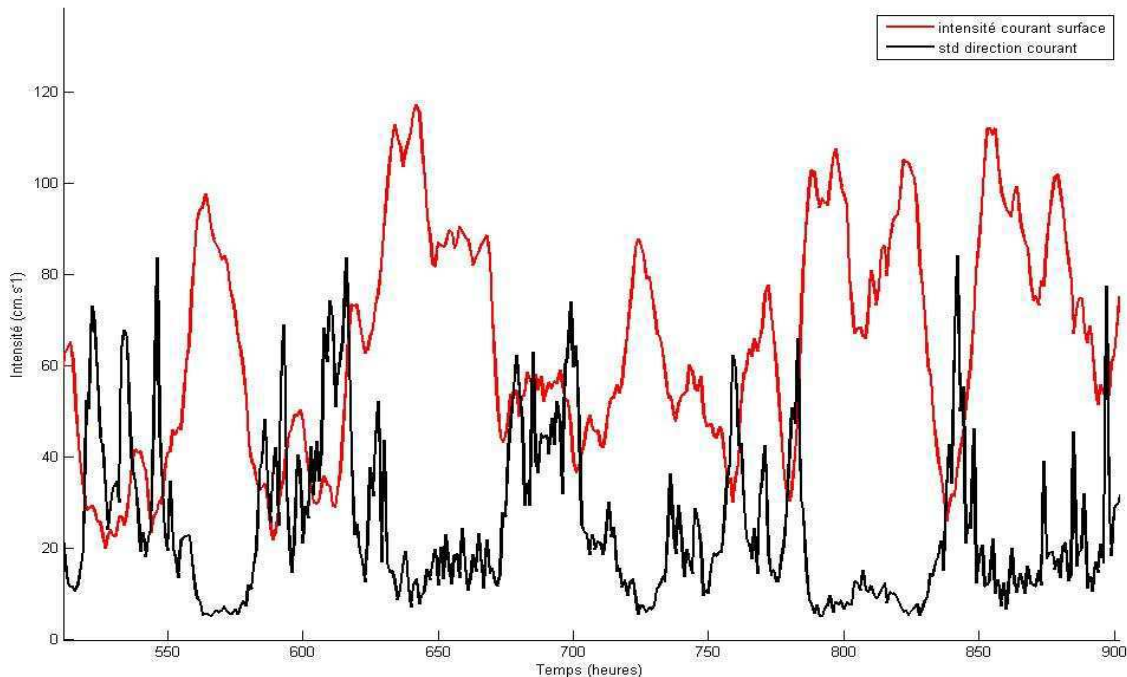


Figure II.24 : Direction du courant, Écart type (std) des directions de courant intégré sur la profondeur, entre 550 et 900 heures d'enregistrement de I4ADCP mouillé

Grâce à la courbe des écarts types, ce phénomène de variabilité des directions en profondeur pour une faible intensité de courant est bien explicite. En effet, la courbe d'intensité de courant de surface (en rouge) et souvent inversée avec celle des écarts types (en noir). Plus le courant est fort, plus la variabilité des directions est faible, et inversement plus l'intensité du courant est faible plus la variabilité des directions est forte.

Le second élément que permet de dégager la Figure II.23, indique deux directions principales de courant, l'une située au alentour de 120° (E-SE) et l'autre au alentour des 250° (W-SW). Ces deux directions correspondent aux deux directions principales de vent déjà connues (I.1.3). Pour vérifier cette hypothèse, nous allons examiner le système de vent établi lors de la période d'enregistrement de l'ADCP mouillé, nous regardons la fréquence des directions et de l'intensité du vent. Sur un ensemble de 1071 éléments (fréquence d'échantillonnage du vent horaire), après avoir créé des

classes (voir Tableau II.4 à Tableau II.7), nous calculons dans quelle classe se situe chaque enregistrement, puis nous ramenons cet effectif à un pourcentage.

Tableau II.4: Rangs de directions des vents enregistrés entre le 24/11/2004 et le 07/01/2005.

Libeccio	entre 259° et 321°	Catégorie 1
Gregal	entre 9° et 71°	Catégorie 2
Autres	Autres	Catégorie 3

Tableau II.5 : Effectif et pourcentage de directions des vents par rangs

Direction	Effectif du rang	Pourcentage
Catégorie 1 -Libeccio	366	34.2
Catégorie 2 -Gregal	508	47.4
Catégorie 3 -Autres	197	18.4

Tableau II.6 : Rangs de vitesse des vents enregistrés entre le 24/11/2004 et le 07/01/2005

Rang de 0 à 5 m.s ⁻¹	Catégorie A
Rang de 6 à 10 m.s ⁻¹	Catégorie B
Rang de 11 à 15 m.s ⁻¹	Catégorie C
Rang de 16 à 20 m.s ⁻¹	Catégorie D
Rang de 21 à 25 m.s ⁻¹	Catégorie E

Tableau II.7 : Effectif et pourcentage de vitesse des vents par rangs

Vitesse	Effectif du rang	Pourcentage
Catégorie A	441	41.2
Catégorie B	446	41.7
Catégorie C	136	12.7
Catégorie D	39	3.6
Catégorie E	9	0.8

Durant la période d'enregistrement de l'ADCP mouillé, le vent le plus souvent rencontré est le vent de nord-est (Gregal, 47.43 %), puis c'est ensuite le vent d'ouest qui est le plus fréquent (Libeccio, 34.17%), enfin les autres directions de vents représentent 18.38%. Les vitesses de vent sont comprises entre 0 et 25 en m.s⁻¹, cinq catégories sont formées pour les définir, les vents les plus souvent rencontrés sont compris dans les catégories A et B avec un pourcentage respectif de 41.18% et 41.64% et correspondent à des vents faibles ou peu forts compris entre 0 et 10 m.s⁻¹. La catégorie C (présente à 12.70%) correspond à des vents compris entre 11 et 15 m.s⁻¹. Quant aux catégories D et E représentant des vents forts à très forts, elles ne sont que faiblement présentes dans la période d'enregistrement puisque leur pourcentage cumulé représente 4.48%.

Le même travail est effectué sur les vitesses et directions de courant de surface enregistrées sur le niveau C30 sur un ensemble de 2113 enregistrements, après avoir créé des classes (voir Tableau II.8 à Tableau II.11), nous calculons dans quelle classe se situe chaque enregistrement, puis nous ramenons cet effectif à un pourcentage.

En ce qui concerne les directions, les classes de vent et de courant sont faites de façon à correspondre entre elles. Nous rappelons que les directions de vent (indiquant leur provenance) sont inverses à celles des courants (indiquant leur destination). Nous prenons exemple de la catégorie 1, comprenant pour le vent (libeccio) des directions comprises entre 259° et 321° don c vent d'ouest, qui influencerait classiquement en surface et sans d'autres contraintes un courant est dont la direction serrait comprise entre 48° et 172°.

Tableau II.8 : Rangs de directions des courants de surface (niveau C30) enregistrés entre le 24/11/2004 et le 07/01/2005.

Rang entre 48° et 172°	Catégorie 1
Rang entre 209° et 301°	Catégorie 2
Autres	Catégorie 3

Tableau II.9 : Effectif et pourcentage de directions des courants par rangs

Direction	Effectif du rang	Pourcentage
Catégorie 1	957	45.29
Catégorie 2	866	40.98
Catégorie 3	290	13.72

Tableau II.10: Rangs de vitesse des courants de surface (niveau C30) enregistrés entre le 24/11/2004 et le 07/01/2005.

Rang de 0 à 20 cm.s ⁻¹	Catégorie A
Rang de 21 à 40 cm.s ⁻¹	Catégorie B
Rang de 41 à 60 cm.s ⁻¹	Catégorie C
Rang de 61 à 80 cm.s ⁻¹	Catégorie D
Rang de 81 à 100 cm.s ⁻¹	Catégorie E
Rang de 101 à 150 cm.s ⁻¹	Catégorie F

Tableau II.11: Effectif et pourcentage de vitesse des courants de surface (niveau C30) par rangs

Vitesse	Effectif du rang	Pourcentage	Pourcentage cumulé
Catégorie A	306	14.48	14.48
Catégorie B	582	27.54	42.02
Catégorie C	559	26.46	68.48
Catégorie D	333	15.76	84.15

Catégorie E	216	10.22	94.37
Catégorie F	117	5.54	100

Le pourcentage des directions des vents ne correspond pas entièrement à celui des pourcentages de directions de courant. Puisque les catégories 1, 2 et 3, représentent respectivement environ 45% (contre 34% pour le vent), 40% (contre environ 47% pour le vent) et 13% (contre 18% pour le vent). Cependant, la dynamique vent/courant étant complexe, notamment sur des questions de temps d'inertie entre vent courant, temps nécessaire pour avoir un vent bien établi, et celui nécessaire pour que le courant s'adapte à ce vent, il est possible que la répartition entre les différentes catégories de directions de vent et de courant soit cohérente. Nous essaierons par la suite d'étudier plus précisément ce comportement.

Les plus faibles intensités comprises dans la catégorie A (de 0 à 20 cm.s^{-1}) représentent une faible part des courants rencontrés dans la durée d'enregistrement (environ 14%). Les intensités de courants les plus rencontrées sont comprises dans les catégories C (de 21 à 40 cm.s^{-1}) et D (61 à 80 cm.s^{-1}) correspondant à des courants faibles à moyens qui représentent respectivement 27 et 26%. Les courants considérés comme forts (61 à 80 cm.s^{-1}) comprennent dans la catégorie D, représentent environ 15%. En dernier, nous grouperons les catégories E et F (comprises entre 81 et 150 cm.s^{-1}) regroupant les vents très forts à violents, qui représentent environ 15% des courants.

II.2.2.2. Comportement des directions en profondeur pour l'ADCP mobile

Nous utilisons les mêmes exemples que pour la partie II.2.1 (diminution de l'intensité en profondeur), avec pour le premier, le profil du courant réalisé au sud des îles Lavezzi et pour le second, un profil réalisé au large des côtes est de Bonifacio. Pour se faire, la moyenne des directions des courants est calculée sur un ensemble de 20 minutes pour chaque bin, sur un trajet correspondant à environ 5 km, puis ces moyennes sont tracées en fonction de la profondeur (Figure II.25 et Figure II.26).

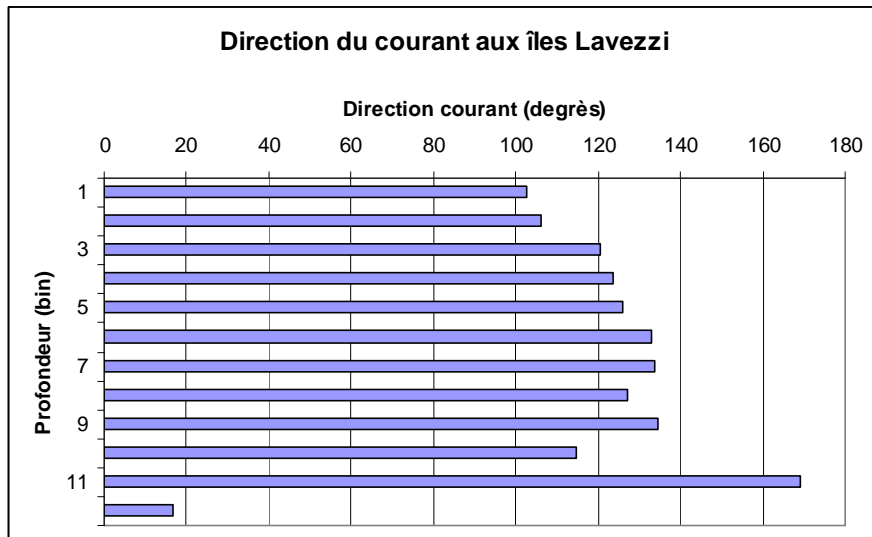


Figure II.25 : Direction des courants en profondeur aux îles Lavezzi (correspondant aux données intensité de la Figure II.22)

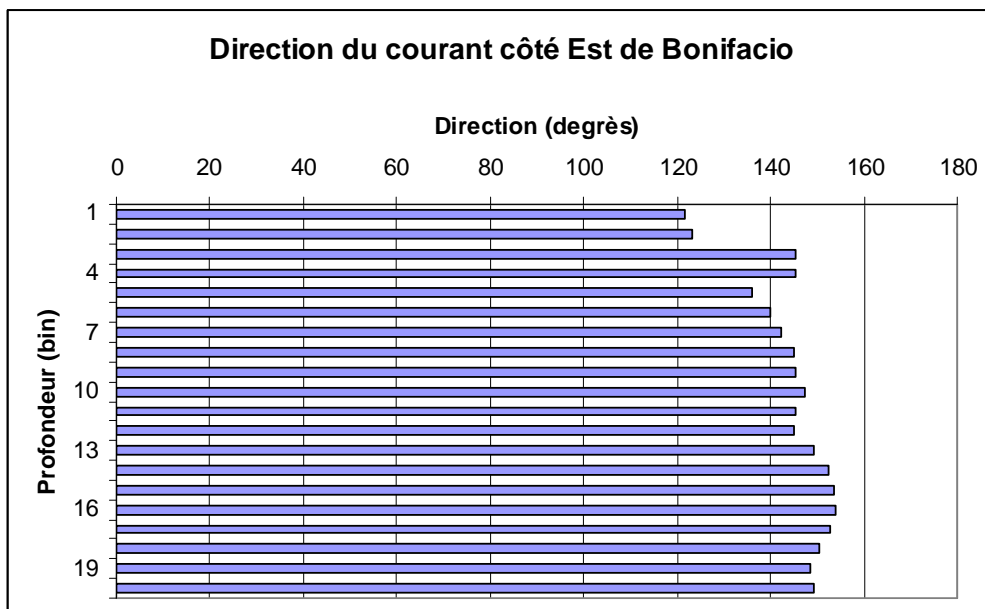


Figure II.26 : Direction des courants en profondeur du côté est de Bonifacio (correspondant aux données intensité de la Figure II.23)

Ces deux figures montrent des directions assez homogènes le long de la colonne d'eau (surtout pour l'exemple côté est de Bonifacio), ce qui correspond avec le résultat trouvé pour les données de l'ADCP mouillé. Cependant, nous constatons une variation de moyenne des directions, pour la Figure II.25 (îles Lavezzi) au bin 11 (≈ -40 m). Cette différence peut être un signal vrai enregistré pas l'appareil, qui semble cependant difficilement explicable, car il se situe sur une seule couche, mais elle peut également provenir d'une erreur d'enregistrement sur un seul bin, puisque cette valeur est isolée par des valeurs homogènes le long de la colonne d'eau.

Cette partie de l'étude (II.2) montre une structure courantologique présentant une diminution d'intensité avec la profondeur ainsi que des directions homogènes le long de la colonne d'eau et ceci pour les deux jeux de données des appareils utilisés. Cependant, elle montre également des structures légèrement différentes (pour l'exemple des directions de courant des îles Lavezzi, pour les données Téthys) laissant apparaître une certaine variabilité des courants dans le milieu. Cette première étape est un début de validation des appareils de mesure utilisés dans une zone côtière et sur une petite échelle spatio-temporelle, surtout pour l'ADCP mobile du Téthys II dont l'utilisation en zone côtière n'est pas courante. De plus, elle nous montre que les pourcentages des catégories de vent et de courant ne se suivent pas forcément, laissant des questions en suspend quant au dynamique vent/courant présent dans la zone.

II.3. Diminution de la variabilité des directions de courant avec augmentation de l'intensité du courant

II.3.1. Diminution de la variabilité des directions de courant avec augmentation de l'intensité du courant pour l'ADCP mouillé

Une première notion de variabilité d'intensité, mais également de direction du courant a été abordée dans la partie précédente. Cette notion doit impérativement être comprise et étudiée, avant de pouvoir dégager les premiers éléments composant la dynamique des courants dans la réserve. Il est important de connaître s'il existe également un lien entre la variabilité de l'intensité et celle des directions ainsi que de savoir comment réagit la première par rapport à l'autre. De plus, cette notion de variabilité des directions prend toute son importance, car sa connaissance reste un élément majeur de management dans tout ce qui est export et import d'espèce, nous pensons en particulier aux larves de crustacés et de poissons en tout genre.

Pour observer cette variabilité, la série de données de l'ADCP mouillé est séparée successivement en groupe de 20 enregistrements (nombre pris de façon aléatoire permettant de former des échantillons assez grands à l'intérieur d'un groupe ($n=20$))

mais également de constituer un nombre de groupe raisonnable (n=107). Pour chaque groupe, la vitesse moyenne du courant et l'écart type des directions (représentant la variabilité ou dispersion des directions) sont calculés. Puis la dispersion des directions en fonction de l'intensité moyenne est tracée sous forme de nuage de point. Cette étape est effectuée pour plusieurs profondeurs, nous ne présenterons ci-dessous que la couche de surface (Figure II.27) et de fond (Figure II.28).

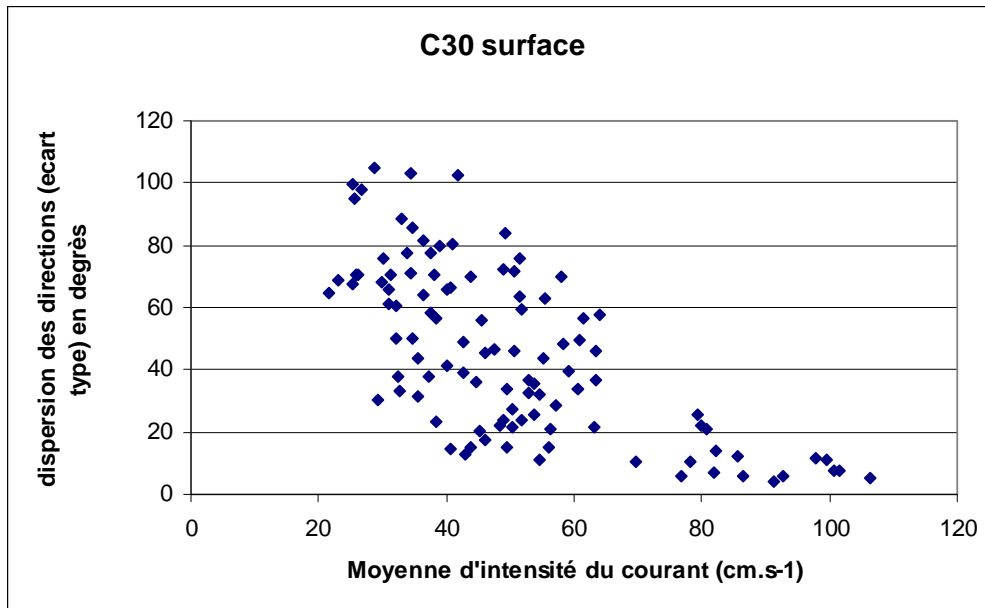


Figure II.27 : Diminution de la variabilité des directions de courant en fonction de l'intensité du courant pour l'ADCP fixe en surface

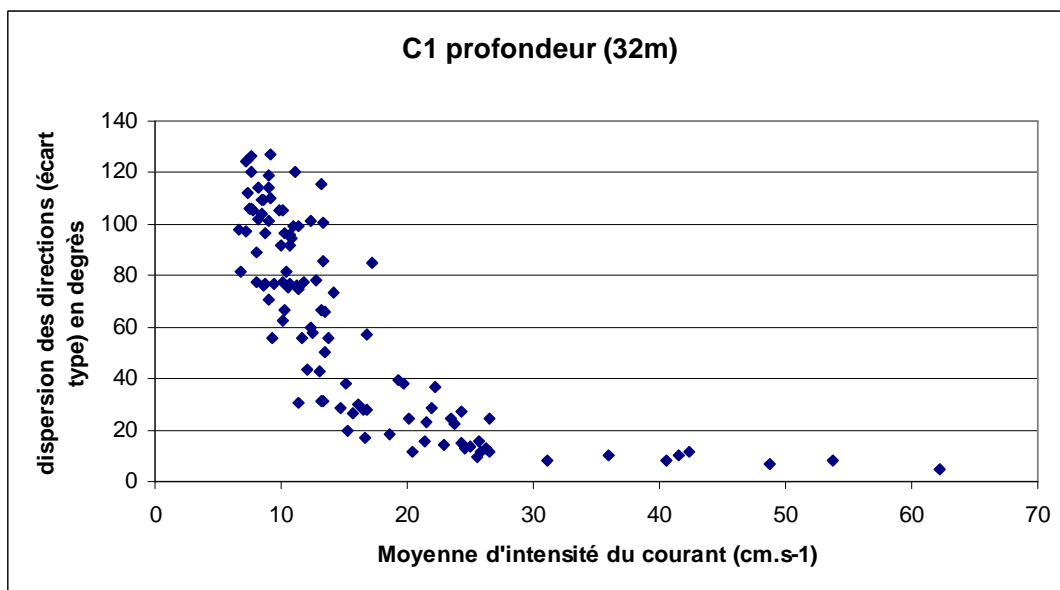


Figure II.28: Diminution de la variabilité des directions de courant en fonction de l'intensité du courant pour l'ADCP fixe en profondeur

Nous constatons en surface comme en profondeur, une diminution de la dispersion des directions avec l'augmentation de l'intensité du courant. Cette régression est significative en surface et hautement significative en profondeur, de type exponentielle (avec respectivement $R^2=0.59$ et $R^2= 0.83$); $n= 107$, avec $p<0.001$ (coefficient d'ajustement). Ce résultat se retrouve, pour l'ADCP mouillé, sur toute la colonne d'eau. Néanmoins, d'après les graphiques nous constatons que la courbe en surface est beaucoup moins lisse que celle effectuée en profondeur. Ce phénomène est explicable puisque les couches de surface sont directement en contact avec le vent, ce dernier augmentant la variabilité des directions, alors que l'action du vent est naturellement atténuée en profondeur. Il est possible de dire que la variabilité des directions diminue en fonction de l'augmentation de l'intensité du courant. En d'autres termes, plus les courants augmentent de vitesse plus leur direction tend à s'orienter dans une tranche de directions restreinte alors qu'avec des courants d'intensité plus faible leur direction seront plus variable.

II.3.2. Diminution de la variabilité des directions de courant avec augmentation de l'intensité du courant pour l'ADCP mobile

La même technique est adaptée sur les données CYRCE où les données sont séparées successivement en groupe de 20 enregistrements. Pour chaque groupe, la vitesse moyenne du courant et l'écart type des directions sont calculés. Puis la dispersion des directions en fonction de l'intensité moyenne est tracée sous forme de nuage de point. La diminution de la variabilité des directions en fonction de l'augmentation de l'intensité du courant apparait aussi sur les missions CYRCE, et ce, pour toutes les profondeurs (de 1 à 60) avec des courbes plus ou moins significatives en fonction du bin étudié. Nous en présentons ci-dessous un exemple (Figure II.29), pour un fichier de CYRCE 4 (juillet, fichier comprenant un transect classique de CYRCE couvrant l'entièreté du détroit), au bin 3, de $n= 170$ individus. Ce phénomène est hautement significatif, de type exponentiel ($R^2=0.64$), $n=170$, $p<0.001$. Cette courbe est plus lisse (fitness) que celle de surface pour l'ADCP fixe, mais elle a été effectuée sur le bin 3 (-16m) donc l'influence du vent en est diminuée.

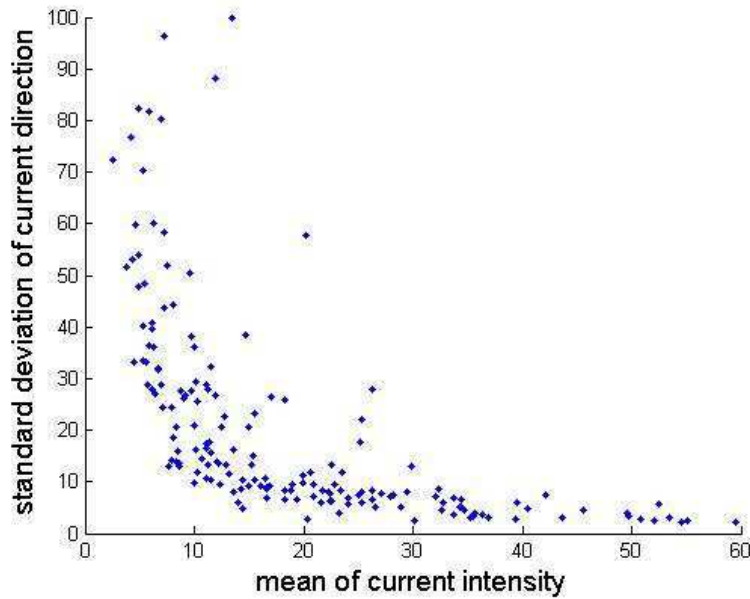


Figure II.29: Diminution de la variabilité des directions de courant en fonction de l'intensité du courant pour un fichier de CYRCE 4 (juillet) au bin 3

Ce phénomène de diminution de la variabilité des directions en fonction de l'intensité du courant qui augmente se retrouve également dans les données courantologiques de l'ADCP mobile pour tous les cas de CYRCE. Le fait que la variabilité des directions de courant diminue avec l'augmentation d'intensité de courant permet d'admettre qu'à courant fort les directions de courant vont s'orienter vers une seule direction. Donc, il est possible d'interpréter que le transport de matériau par les courants (tel que les sédiments par exemple les figures sédimentaires, les particules, les micros organismes par exemple les larves et le plancton) se fera dans une unique direction à partir d'un certain seuil de courant et non pas de façon aléatoire. Cette information sera essentielle lors du traitement de l'application des connaissances et des outils acquis pour la gestion des espèces (chapitre IV). Il est donc nécessaire de savoir à partir de quel seuil d'intensité de courant ce dernier va s'orienter dans une plage de direction unique.

II.3.3. Diminution de la variabilité des directions de courant avec augmentation de l'intensité du vent

Le même type de représentation est utilisé sur les données de vent de Pertusato enregistrées durant la période de mise à l'eau de l'ADCP fixe. Sur un ensemble de

20 individus, la moyenne est calculée pour l'intensité de ces individus et l'écart type des directions est calculé. Ces points sont tracés en nuage de point avec un ensemble de 52 individus (Figure II.30), donnant une liaison significative, de type exponentielle ($R^2=0.30$), $n=52$, avec $p<0.05$.

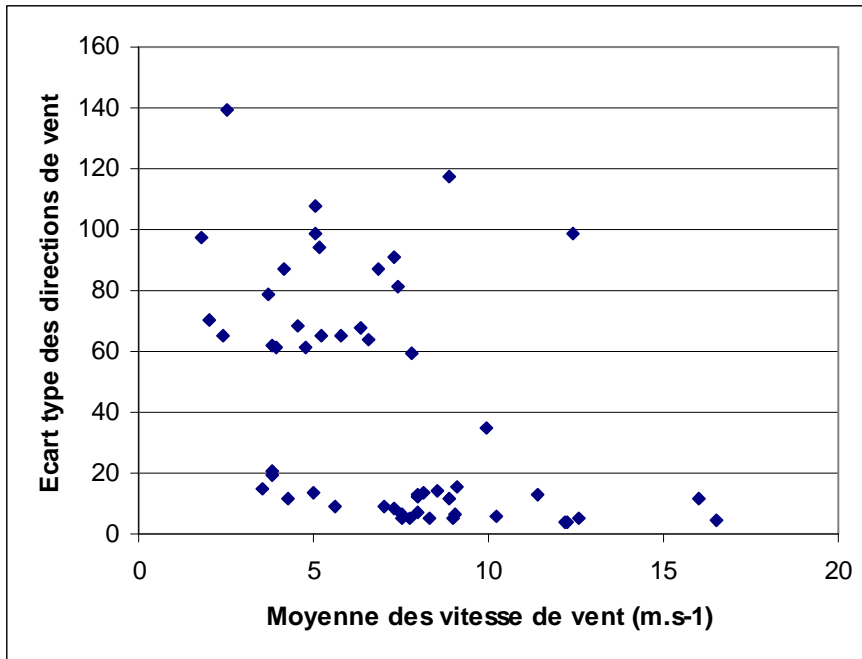


Figure II.30: Graphique dispersion des directions de vent en fonction de l'intensité du vent

Deux groupes de nuages de points apparaissent, montrant la présence de deux populations différentes. Le premier groupe présente un faible écart type, c'est-à-dire une faible variabilité des directions, qui correspond aux deux directions principales de vent (ouest et nord-est). Le second groupe de nuage de points présente un écart type plus élevé, donc une variabilité des directions plus grande, ce groupe correspond aux directions de vent qui ne sont pas comprises dans la tranche de direction des deux vents principaux. Ce second groupe ne se rencontre pas sur le même type de figure tracé pour les courants enregistrés par l'ADCP mouillé (partie II.3.1). Pour comparer les deux résultats, les dispersions des directions en fonction de l'intensité pour le vent et pour le courant de surface sont tracées sur la même figure (Figure II.31).

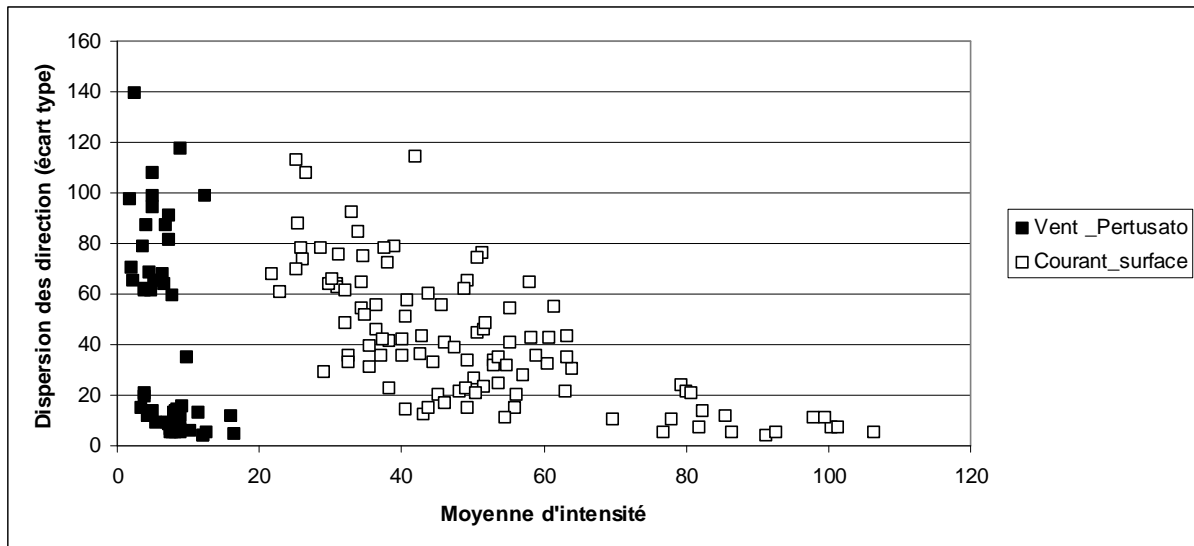


Figure II.31: Graphique dispersion des directions en fonction de l'intensité pour le vent Pertusato et pour le courant de surface enregistré par l'ADCP mouillé. Dispersion des directions correspond aux écarts-types de direction en degrés, les intensités de courant sont en cm.s^{-1} et les intensités de vent sont m.s^{-1} .

Nous rappelons que nous obtenons pour le vent un échantillon de 52 individus et pour le courant de 107 individus (de type exponentielle, $R^2=0.59$, avec $p<0.001$). Alors que deux nuages de point se démarquent pour le vent, le courant apparait en un groupe de type exponentiel. En effet, l'air étant plus léger que le milieu aquatique, il est sujet plus facilement à des modifications de directions (ces dernières étant traduites par le second groupe de nuage de point) que le milieu marin, qui lui de par sa masse aura une certaine inertie pour voir apparaitre ces modifications. Pour l'échantillon de vent, deux groupes sont identifiés, le groupe du haut avec les plus grandes dispersions correspond aux vents faibles (moyenne d'intensité= 5.56 m.s^{-1} , $\text{std}=2.43$, $n=22$) et le groupe du bas correspond aux vents forts (moyenne d'intensité= 8.56 m.s^{-1} , $\text{std}=3.18$, $n=30$).

II.4. Éléments de courantologie acquis par deux appareils différents. Comparaison

Il est rare de pouvoir disposer sur la même zone d'un ADCP mouillé et d'un jeu de données fournies par un ADCP embarqué dans différentes configurations météorologiques. Une des difficultés dans ce travail est que l'expérience de mouillage n'a duré qu'un mois, sans être la même période que les missions CYRCE.

En revanche, si l'on considère que la configuration courantologique, pour certains cas types météorologiques, est indépendante de la saison, nous disposons dans les données Téthys de suffisamment de cas types qui ont été mesurés par l'ADCP mouillé.

Comment déterminer ces cas types: Nous avons vu dans matériel et méthode que le régime de vent été très largement dominé par deux directions (ouest et nord-est), caractérisées entre autres par des situations de vent très violent. Nous avons par ailleurs montré précédemment, que c'était dans des configurations de vent violent et établi depuis longtemps, que la dispersion des données de courant était la plus faible, c'est-à-dire que nous avons une situation de direction de courant homogène. Enfin le positionnement par la DDE de l'ADCP mouillé au sud des îles Lavezzi, c'est-à-dire dans une position d'un double effet Ventury, celui du vent (relief terrestre) et du courant (topographie sous marine), font que nous prêterons dans cette partie une attention particulière sur les transects proches de la station 1 lors des passages de la partie est et ouest et vis versa.

Il faut pourtant remarquer que dans les nombreuses figures qui précèdent les missions CYRCE (de la Figure II.2 à Figure II.11), ce n'est pas cette partie étroite du détroit, où doivent se produire de fortes accélérations du courant, que l'on constate les plus fortes valeurs d'intensité. Par exemple, la Figure II.32 montre de très forts courants de direction sud sur la côte orientale, et à l'inverse, une situation de courant très fort par vent d'ouest sur la partie occidentale.

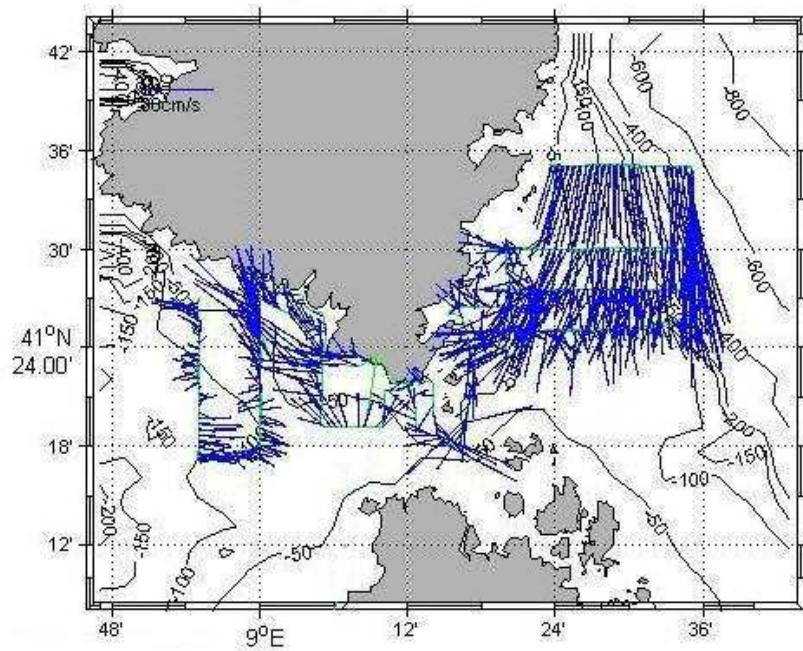


Figure II.32: Courants enregistrés durant CYRCE 4, du 21/07/2005 à 23h00 au 23/07/2005 à 14h17.

II.4.1. Détermination des 5 cas types

Les intensités relatives des vents et des courants et leurs directions, enregistrées pendant cette période (# 1000h) sont respectivement représentées, sous forme de moyennes mobiles, dans les Figure II.33 (x 10 pour les vents) et Figure II.34.

Intensités des vents et des courants (Figure II.33) montrent un bon niveau de couplage, particulièrement pour les pics. Avec toutefois des exceptions notables comme à la fin de la période d'enregistrement. Ce couplage se retrouve dans l'évolution des directions (Figure II.34 - en position inverse bien sûr puisque par convention source des vents et cap des courants sont exprimés ici).

Mais malgré la bonne liaison constatée en général entre les vents et les courants, il existe bien des situations où l'on remarque un découplage entre ceux-ci. Pour en identifier quelques-uns, nous allons nous servir des données recueillies par l'ADCP mouillé aux Lavezzi.

Nous allons maintenant passer en revue succinctement les différents cas qui semblent se dégager.

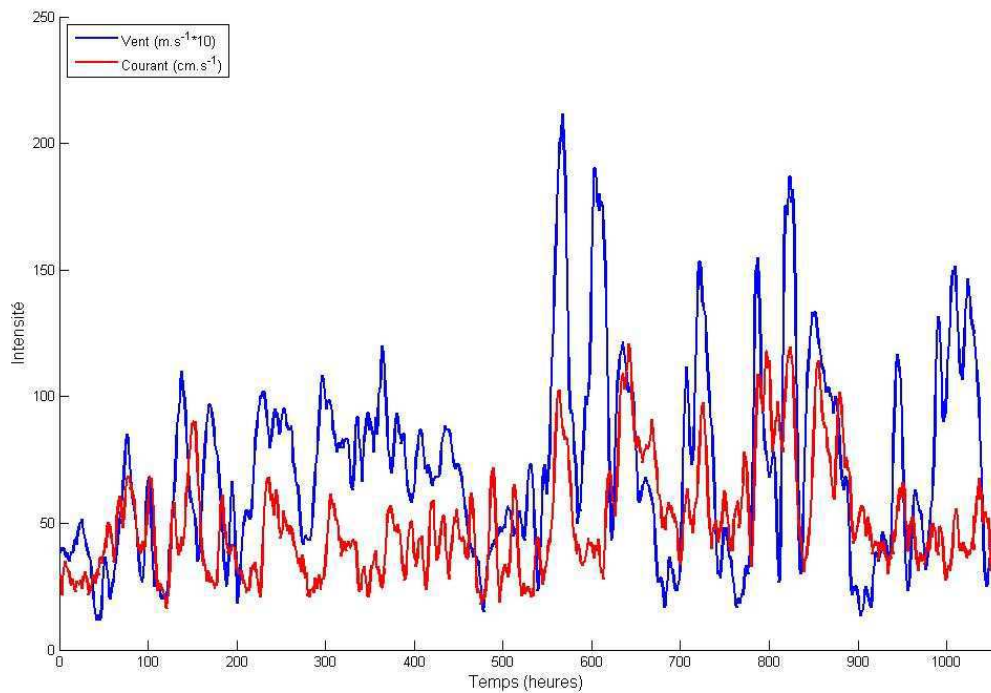


Figure II.33 : Intensité du vent et du courant durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé du 24/11/04 à 09h50 au 07/01/05 à 09h50.

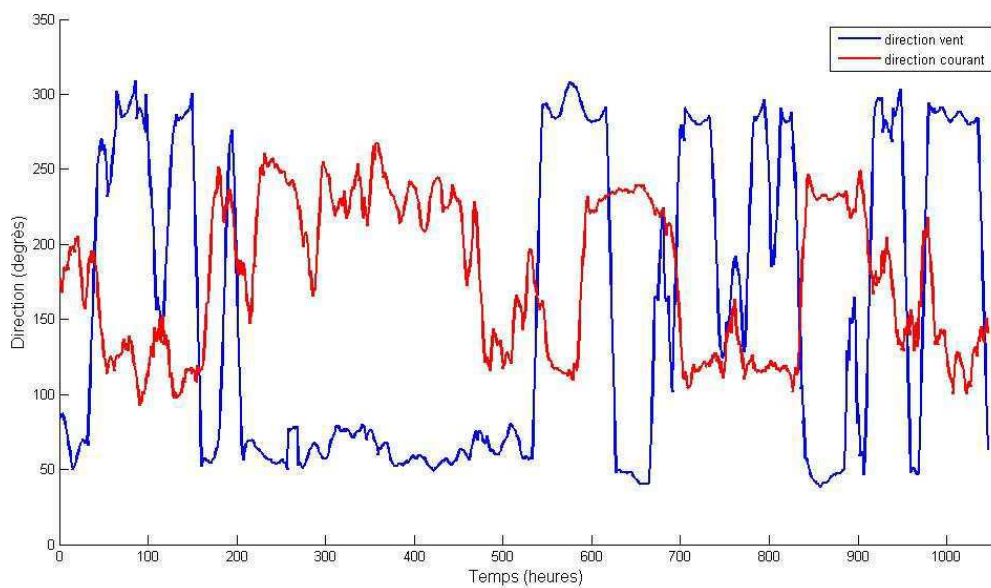


Figure II.34 : Direction du vent et du courant durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé 24/11/04 à 09h50 au 07/01/05 à 09h50.

II.4.1.1. Vent Faible

Nous avons sélectionné pour cette catégorie les périodes où le vent présentait une moyenne inférieure à 5m.s^{-1} . La première constatation, comme cela est présenté

dans la Figure II.35, est que même à ces faibles vitesses, une modification de l'intensité du vent, semble induire directement une modification de celle des courants de surface, comme en témoigne les deux évolutions parallèles présentées ici pendant 25h.

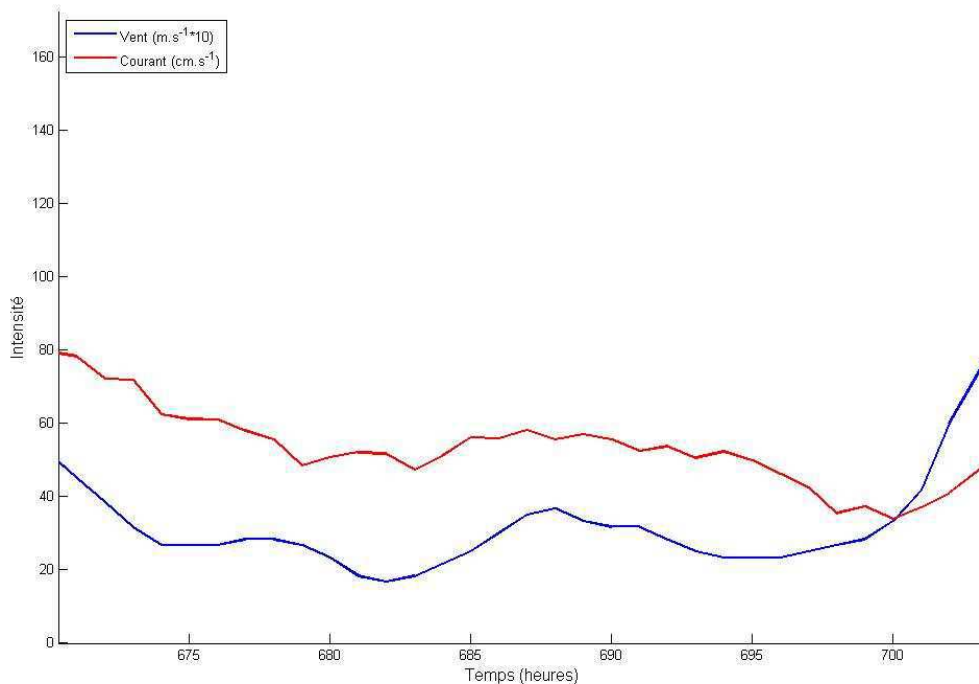


Figure II.35: Zoom sur un cas de vent faible enregistré par l'ADCP mouillé de 675 h à 700 h d'enregistrement

Mais, les courants de surface peuvent présenter de brusques modifications, pouvant aller jusqu'au doublement de l'intensité (minorée ici puisque les valeurs sont lissées), comme dans l'exemple présenté dans la Figure II.36. Et ce phénomène peut se produire deux fois sur les seules 35h d'enregistrement. Ces deux pics sont associés soit à une décroissance soit une croissance de la vitesse du vent, toutes deux régulières.

Enfin, les deux intensités peuvent être couplées (Figure II.37) pendant plus de 20h, puis, alors que l'intensité du vent croît rapidement, cela semble sans conséquence sur celle du courant, du moins jusqu'à la fin de la période sélectionnée ici, ce qui peut laisser supposer une latence dans la réponse de l'eau de surface au forçage par le vent.

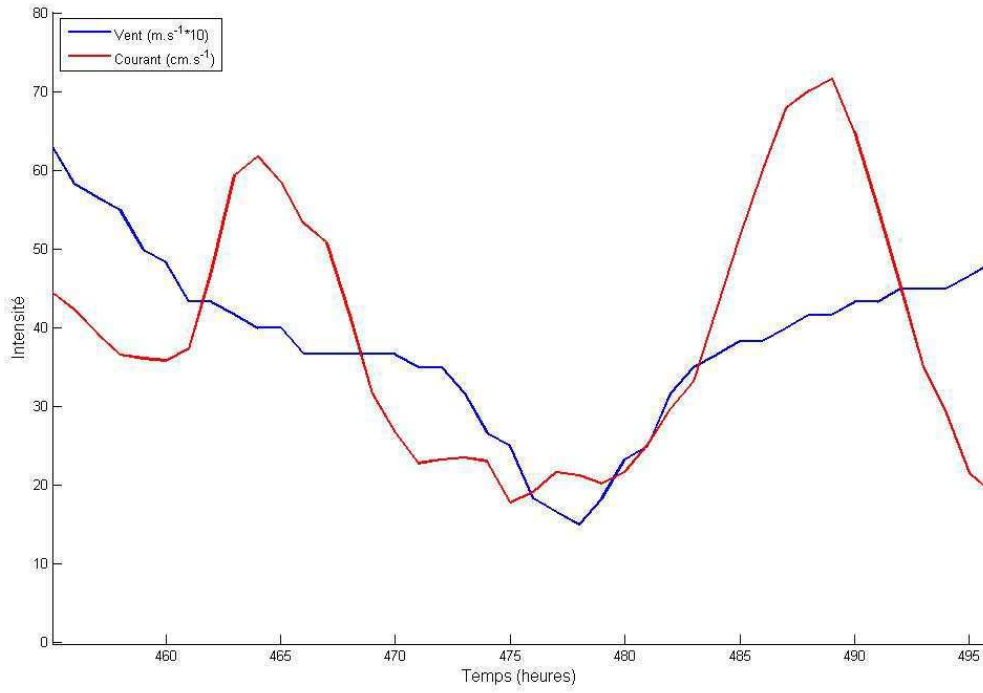


Figure II.36: Zoom sur un cas de vent faible enregistré par l'ADCP mouillé de 460 h à 495 h d'enregistrement

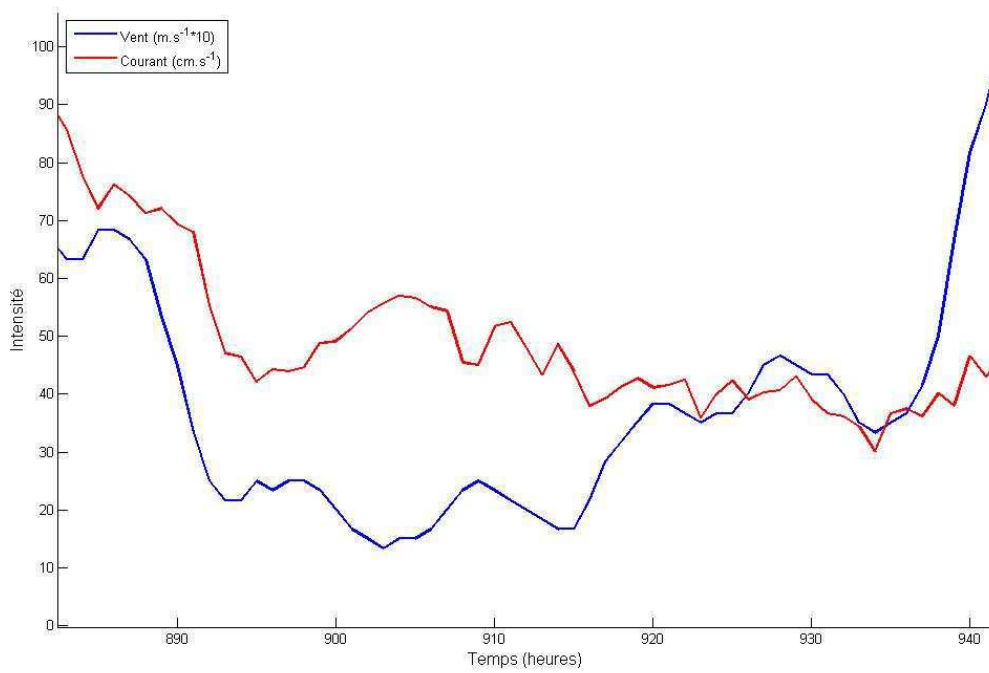


Figure II.37: Zoom sur un cas de vent faible enregistré par l'ADCP mouillé de 890 h à 940 h d'enregistrement

Pour continuer ces études de cas, nous allons à présent isoler d'autres périodes d'enregistrement correspondant aux deux vents dominants (W et NE).

II.4.1.2. Vent d'ouest (Libeccio).

Pour les situations de libeccio deux exemples ont été choisis. Ils correspondent aux zones en pointillés A et B de la Figure II.38.

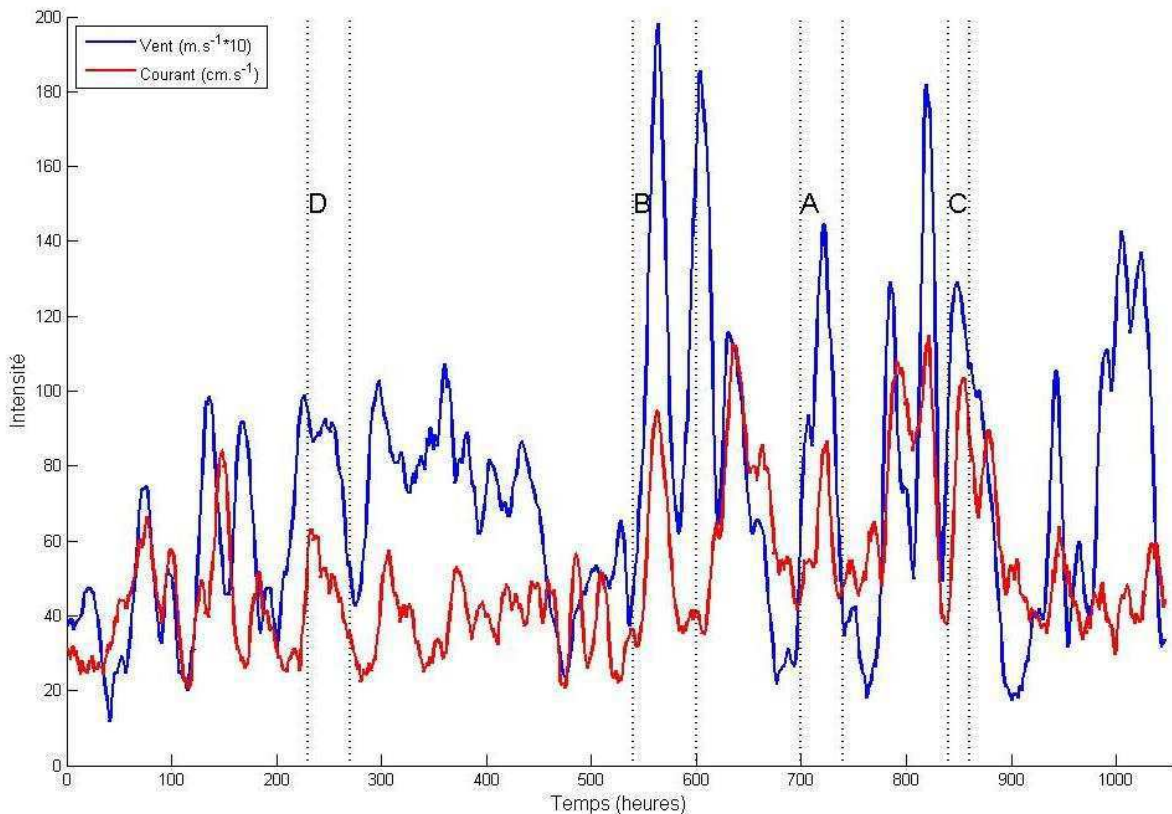


Figure II.38 : Intensité du vent et du courant enregistré par l'ADCP mouillé, zoom en partie isolé par les pointillés ; A : cas de courant bien établi et B : cas de courant en période d'accélération

Dans ce type de situation de vent d'ouest, d'une certaine intensité, il existe un couplage étroit entre le vent et le courant induit en surface, tant pour les séquences d'accélération que de décélération, avec une faible inertie dans la réponse hydrodynamique. La direction du courant (non indiquée ici) se traduit par une sortie des eaux vers l'est, par les Lavezzi. On notera que le très fort pic de vent qui suit l'exemple B, presque aussi fort que celui-ci, et sensiblement de mêmes durées (orienté exclusivement ouest) ne se traduit pas du tout par une croissance

correspondante de la vitesse du courant comme le montrent les évolutions présentées dans la figure suivante.

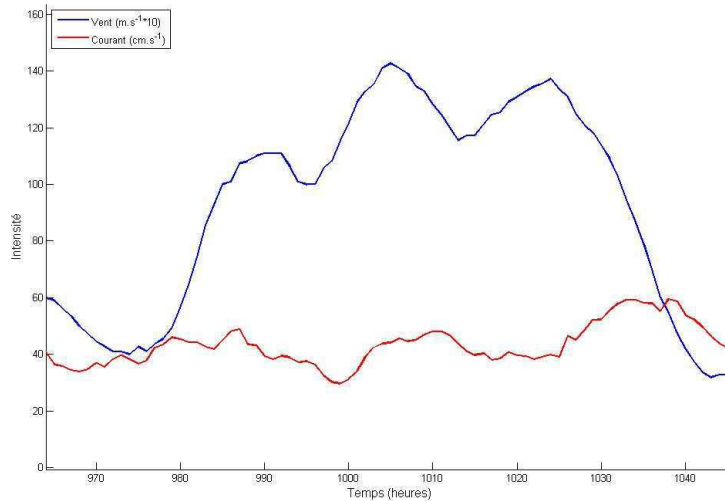


Figure II.39: Accélération du vent sans réponse de courant

Le vent est orienté ouest, alors que le courant est orienté ouest, nord-ouest. Ce cas représente une situation déjà vue précédemment. On peut penser que dans ce cas on assiste à un rééquilibrage entre les deux bassins à travers la passe des Lavezzi, la force de ce rééquilibrage, une circulation de courant de pression, occasionnant alors un courant, moins sensible au forçage du vent puisque la direction du courant, constante et sans fluctuation d'intensité se fait contre le vent.

II.4.1.3. Vent d'est (Gregal)

Nous avons procédé de façon identique pour le vent de direction NE (Gregal), en zoomant sur deux périodes particulièrement significatives (C et D - Figure II.38). Cette sélection a été plus difficile, malgré une fréquence relative plus importante du vent N-E ($\approx 47\%$), en raison de la rareté de pics d'intensité significatifs.

Les deux exemples choisis montrent, à la différence des deux premiers (vent d'ouest), un retard net de la réponse des courants (tracé rouge) aux variations de l'intensité du vent (tracé bleu). Cette inertie (de l'ordre d'une dizaine d'heures) des courants de surface se constate tant dans les phases de croissance que de décroissance de la vitesse du vent avec néanmoins un bon parallélisme des deux dynamiques. Sous l'influence de ce vent de N-NE, la direction des courants

résultants amène à un transfert des eaux de la partie est vers la partie ouest du détroit de Bonifacio dont la passe des Lavezzi est transverse (est-ouest) par rapport au lit du vent. Ceci pourrait peut-être expliquer l'inertie constatée pour la réponse des courants.

Si dans la Figure II.38, on constate bien en général un bon couplage vent-courant, il existe des situations, comme celle constatée en fin de graphe entre la 950° et la 1050° heure où ce découplage des intensités semble total, la croissance et le maintien à de fortes valeurs de la vitesse du vent n'induisant aucune modification de celle du courant. Aussi allons-nous rechercher maintenant la norme de ce couplage.

II.5. Étude de la corrélation vent courant pour les données de l'ADCP fixe

Pour analyser la corrélation entre l'intensité du vent et l'intensité du courant de l'ADCP mouillé, pour toutes les profondeurs, nous avons trié les intensités de vent par ordre croissant ($n=1056$) avec les intensités de courant qui leur correspondent. Puis l'ensemble a été scindé en deux catégories (vent fort et vent faible) à partir de la médiane (7 m.s^{-1}) d'intensité du vent, ce qui amène des effectifs respectifs de 541 et 515 mesures. Une analyse de corrélation entre l'intensité du vent et du courant et leurs directions ont été réalisées pour chacun de ces deux groupes et pour chacune des trente cellules de mesure de l'ADCP. Les résultats sont présentés dans la Figure II.40, où les coefficients de corrélation pour chaque catégorie sont tracés en fonction des niveaux de profondeur. Pour les intensités il n'existe aucune relation significative pour les vitesses inférieures à 7 m.s^{-1} , alors que pour les vitesses supérieures au seuil la relation vent-courant est forte ($p < 0.001$) et ce, pour toutes les cellules. Pour le couplage des directions, pour toutes les cellules de mesure, il est à une exception près, toujours significatif, que le vent soit faible ou fort, mais ces coefficients de corrélation sont significativement plus faibles dans le premier groupe et pour le second, le coefficient de corrélation tendant à diminuer la profondeur.

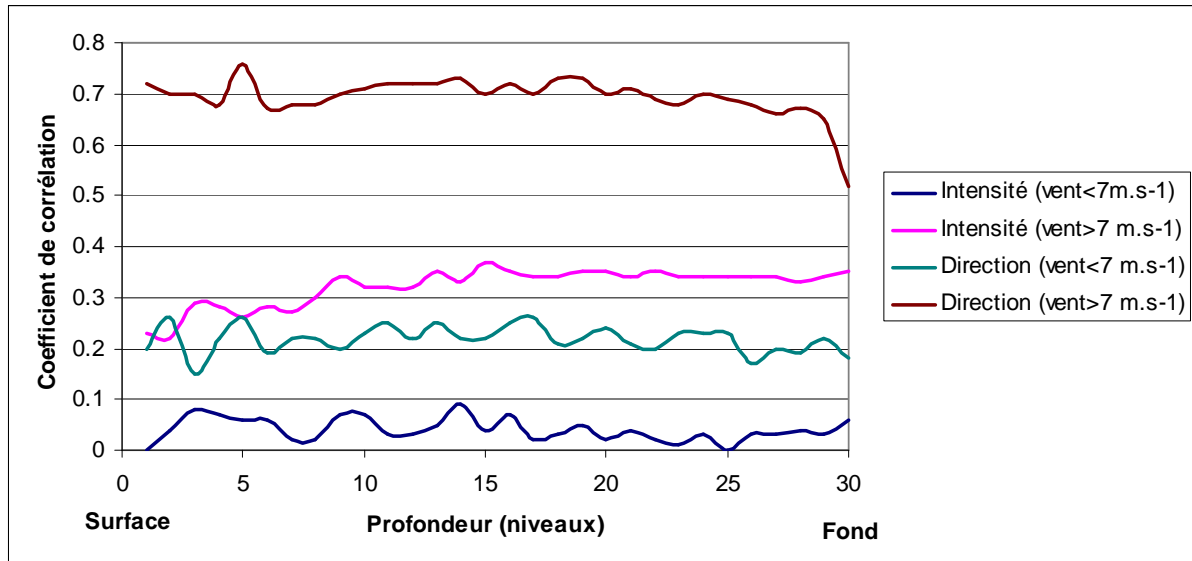


Figure II.40 : Coefficient de corrélation entre les vitesses et les directions de vent et de courant, pour des vents inférieurs et supérieurs à 7 m.s^{-1} .

Après avoir constaté une corrélation entre l'intensité du vent et du courant, il nous est apparu intéressant de rechercher des cas d'inertie (de décalage) possibles entre le vent et le courant qu'il induit.

La relation qui unit le courant et le vent est complexe surtout dans un cas comme Bonifacio où beaucoup de situations vent/courant sont particulières et où l'on rencontre un grand niveau de variabilité spatio-temporelle. À cette difficulté s'ajoute, le problème que le vent dont nous disposons pour cette analyse est enregistré au sémaphore de Pertusato (séparée d'environ 8 km de la zone d'enregistrement de l'ADCP mouillé), mais également une notion de dynamique de déplacement des masses d'eau et de l'air. Il faut en effet, en zone côtière tenir compte des interférences créées par plusieurs paramètres (bathymétrie, masse d'eau, équilibrage des bassins...). De plus, la courte période d'enregistrement (environ un mois) de l'ADCP mouillé ne permettant pas d'avoir une vue exhaustive de l'hydrodynamique de la zone, c'est pour cela que nous n'allons aborder cette partie qu'avec des études de cas.

Les figures suivantes des intensités et des directions sont présentées sous forme de déroulés temporels et pour en faciliter la lecture nous avons utilisé une représentation binaire des directions correspondant mieux au régime de vents dominants caractéristiques de la zone. Les directions supérieures à 180° sont dans la partie positive du graphique (correspondant au vent ouest: Libeccio) et les

directions inférieures à 180° sont dans la partie négative du graphique (correspondant au vent d'est-nord-est: Gregale). En outre, les courants sont tracés avec une direction à l'inverse de leur représentation classique ("là où ils vont") de façon à ce qu'elle corresponde à celle des vents ("là d'où ils viennent"). Cette vision très binaire (englobant uniquement deux orientations de vent) empêche de voir d'autres situations statistiquement mineures, mais facilite une première analyse.

Après un lissage par moyenne mobile sur toute la période d'enregistrement (Figure II.41) et afin de les étudier en enlevant le différentiel qui les sépare (temps d'inertie entre les trois entités), nous les présentons sous forme de données centrées et réduites : la moyenne est soustraite de chaque valeur (centrage), puis elles sont divisées par l'écart type (réduction), permettant d'obtenir des données indépendantes d'un point de vue échelle et unité, facilitant la comparaison de leurs variations. L'analyse a été faite sur les valeurs non filtrées.

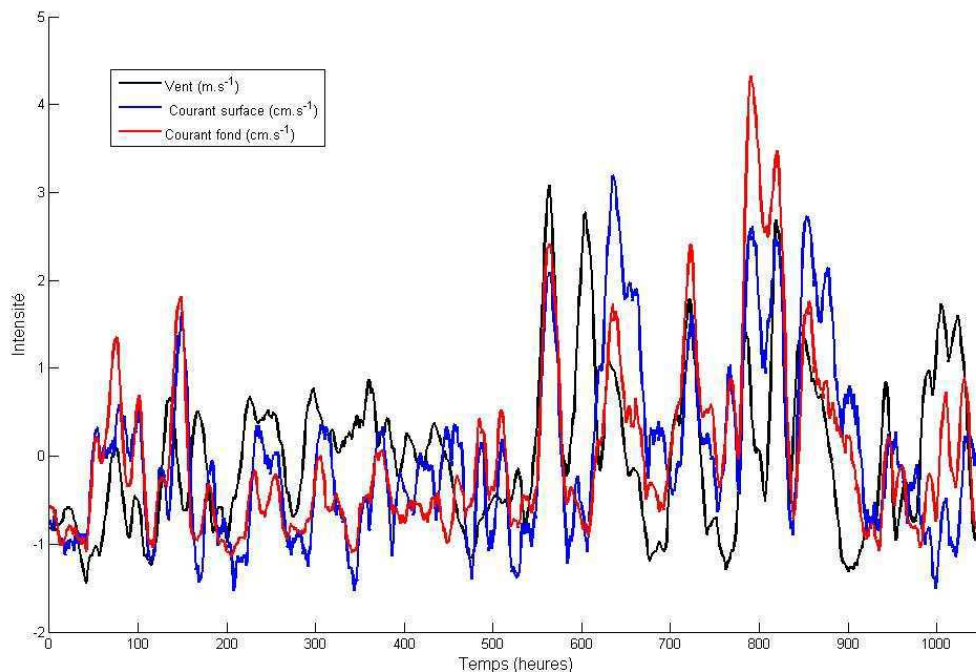


Figure II.41 : Valeurs centrées réduites de la vitesse du vent, du courant de surface et du courant de fond pour l'ensemble de la durée d'enregistrement de l'ADCP mouillé aux Lavezzi.

Dans cette étude de cas, nous commencerons en isolant une première période comprise aux alentours de la 600^{ème} heure d'enregistrement (Figure II.42). Pour

chaque cas isolé, nous allons présenter les deux techniques (représentation de l'intensité en direction binaire et valeur centrée réduite) avec un zoom graphique de ces périodes.

Deux pics consécutifs de vent se produisent entre t500 et t700. Les courants de surface et de fond, suivent la première augmentation de vent et sa décroissance, mais, en revanche ils sont découplés de son action lors du second pic, les courants restant faibles aux deux profondeurs.

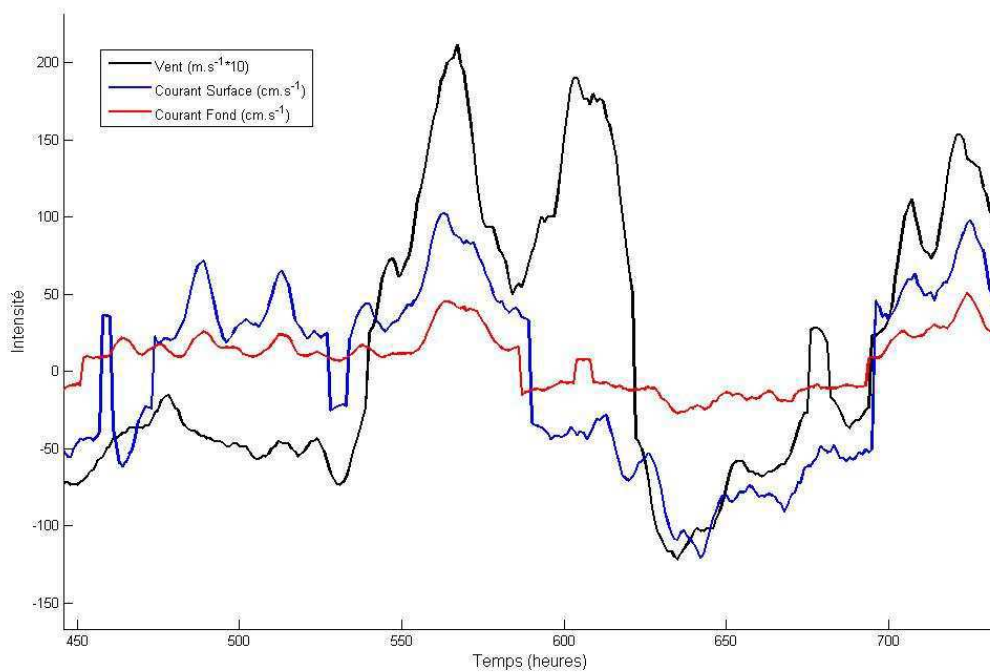


Figure II.42 : Intensité du vent, courant de surface et courant de fond en direction binaire durant la durée d'enregistrement de l'ADCP mouillé. Cas numéro 1 et 2.

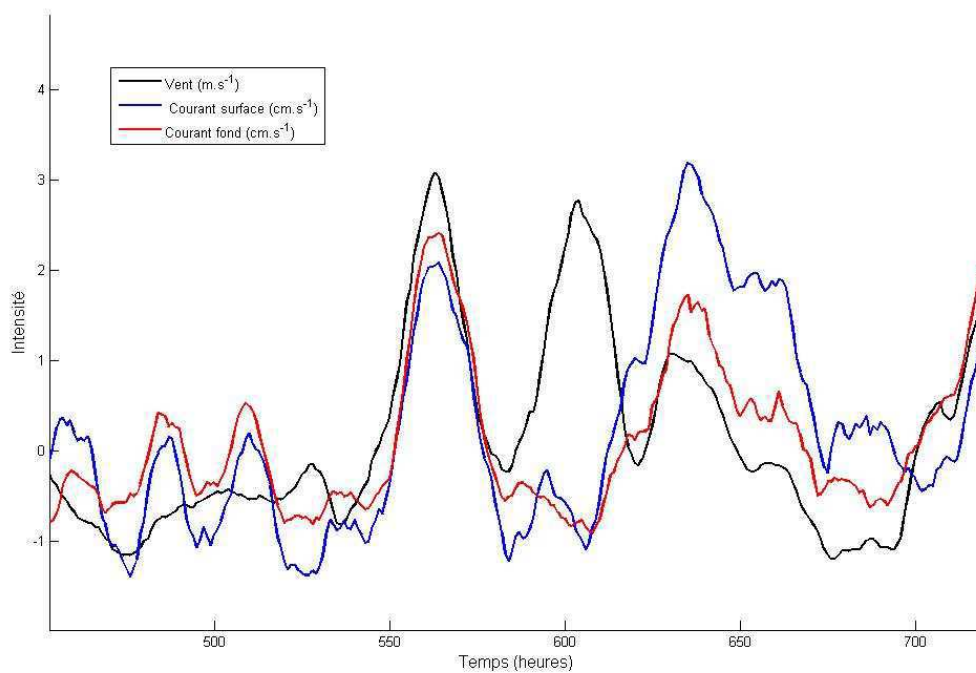


Figure II.43 : Valeurs centrées réduites de la vitesse du vent, du courant de surface et du courant de fond, cas 1 et 2

Le premier pic d'intensité des vents correspond à une orientation ouest et les deux tranches de courant s'orientent dans cette direction. Rappelons que le site d'enregistrement se situe dans le milieu du détroit de Bonifacio, le cas examiné ici traduit donc un transit des masses d'eau d'ouest en est sous l'action directe du vent. Il est possible d'identifier l'inertie de cet événement : les maxima respectifs du vent et des courants sont à t567 et t569 soit un retard de 2h des courants sur le vent sans décalage pour les courants aux deux profondeurs (expliqué par la faible profondeur de mouillage de l'ADCP, environ 35 m).

Lors du second pic de vent, celui-ci conserve la même direction ouest, mais non seulement les courants y sont insensibles aux deux profondeurs, mais leur direction est opposée à celle du vent (partie négative de l'axe Y). Cette situation traduit donc bien un passage des masses d'eau au milieu du détroit d'est en ouest, dans une situation de vent d'ouest assez fort. Cette situation peut être attribuée à un courant de pression qui tend à rééquilibrer les deux bassins (Tyrrhénien et liguro-provençal).

Une seconde période a été sélectionnée. Elle est comprise entre la 450^{ème} et 550^{ème} heure d'enregistrement et présentée sur la même figure (Figure II.42).

C'est une situation où le vent est faible et le courant relativement fort (Figure II.42): aux deux profondeurs on note la présence de deux pics de courant (très amortis pour la couche profonde et en retard d'environ 1h sur celui de surface) mais d'un seul pic de vent, précédant nettement les pics de courant. Le vent est porté (Figure II.43) dans la partie négative (nord-est) du graphique et les courants dans la partie positive (ouest), ils sont donc de sens opposés.

II.6. Comparaison ADCP mouillé et système SAVED

II.6.1. Fréquence des événements des catégories de vent

Il est difficile sur les données du Téthys de traiter les différentes études de cas de comportement vent/courant abordés pour l'ADCP mouillé, notamment les cas de vent d'est ou d'ouest avec de faibles valeurs d'intensité de courant.

Pour repérer la présence des différentes configurations de vent rencontrées durant les missions CYRCE et identifier leurs fréquences, nous les avons décomptées pour chaque mission selon trois catégories : les deux vents dominants (vent d'ouest et vent d'est), la troisième étant constituée des autres directions (très minoritaires dans cette zone rappelons-le), et pour chacune de ces trois catégories en distinguant deux groupes: vent fort et vent faible. Le Tableau II.12, récapitule cette information pour chacun des six groupes avec leur importance relative sur le total des heures d'enregistrement des missions CYRCE.

Tableau II.12 : Récapitulatif du nombre d'heures comptabilisées par cas de vent durant les missions CYRCE et fréquence de ces phénomènes.

Mission	Vent d'ouest		Vent d'est		Autres vents		Heures Totales
	Faible	Fort	Faible	Fort	Faible	Fort	
CYRCE 1	50	36	1		8	x	95
CYRCE 2	55	67	15		30	x	167
CYRCE 3	21	59	2		9	x	91
CYRCE 4	42	70	30	22	9	4	177
CYRCE 5	32	63	4		22	11	132
CYRCE 6	16	52	17	12	31	12	140
CYRCE 7	10	17	26		35	1	89
Heures Totales	226	364	95	34	144	28	891
%	25.36	40.85	10.66	3.82	16.16	3.14	

La configuration la plus fréquente est la situation de vent d'ouest fort avec environ 40% du total des vents. Les moins fréquentes sont les vents d'est faibles orientés est (3%) et le vent fort d'autres directions (3%). Le vent d'ouest est très largement dominant dans les enregistrements CYRCE, avec une fréquence relative totale de 66%. Rappelons que ce résultat, portant sur les différentes saisons où se sont déroulées les missions CYRCE, est différent de celui obtenu à partir des données de vent du sémaphore du cap Pertusato durant la durée de déploiement hivernal de l'ADCP mouillé : une répartition différente entre les deux vents dominants : (47% pour le vent d'est et de 34% pour le vent d'ouest).

II.6.2. Comparaison des deux systèmes -ADCP mouillé et ADCP SAVED-

Les deux appareils utilisés dans cette thèse s'ils sont de même type (courantomètres profileurs basés sur l'effet Doppler), n'ont pas la même fonction: le premier est mouillé à un endroit fixe pendant une période de temps limité (voir matériel et méthode), le second, est embarqué à bord du Téthys, se déplace avec le navire et ne se trouve jamais au même point. L'ADCP mouillé représente une série temporelle du même point, mais ne peut être considéré comme représentatif de l'ensemble de la zone CYRCE. Il intègre par contre toutes les variations météorologiques successives intervenant sur ce point. L'ADCP du Téthys permet une comparaison à différentes échelles d'espace, mais compte tenu des variations météorologiques à petite échelle de temps, rien ne dit que les conditions de courants établis une heure après le passage du Téthys sur un point s'est maintenue. À ces différences d'usage, il faut ajouter des différences instrumentales. L'ADCP mouillé présente peu de contraintes de position pouvant modifier le signal et d'autre part sa bande passante est plus adaptée aux zones côtières de faible profondeur. L'instrument embarqué à bord du Téthys est plus universel, car il a la capacité d'atteindre des profondeurs beaucoup plus importantes, mais son signal doit être corrigé à cause des problèmes de tangage, de roulis du navire et d'intégration du cap suivi pendant sa route, ce qui expliquerait peut être la discussion de la Figure II.44; étant plus universel il est aussi moins précis dans les faibles profondeurs. Cette variabilité a été testée lors de la première mission CYRCE. À partir de quelques points, des enregistrements ont été réalisés en étoile, par des allers-retours

de quelques milles d'une durée d'environ 30 min. Quelques une de ces figures d'enregistrement sont présentées dans Figure II.44. Sur cette figure, avec des conditions de vent faible ($<7\text{m.s}^{-1}$) nous constatons une variabilité certaine entre l'aller et le retour du bateau, cependant malgré cette variabilité, nous notons que "l'orientation" des directions ne change pas (globalement orientée nord-ouest sur l'aller et orientée nord-est sur le retour).

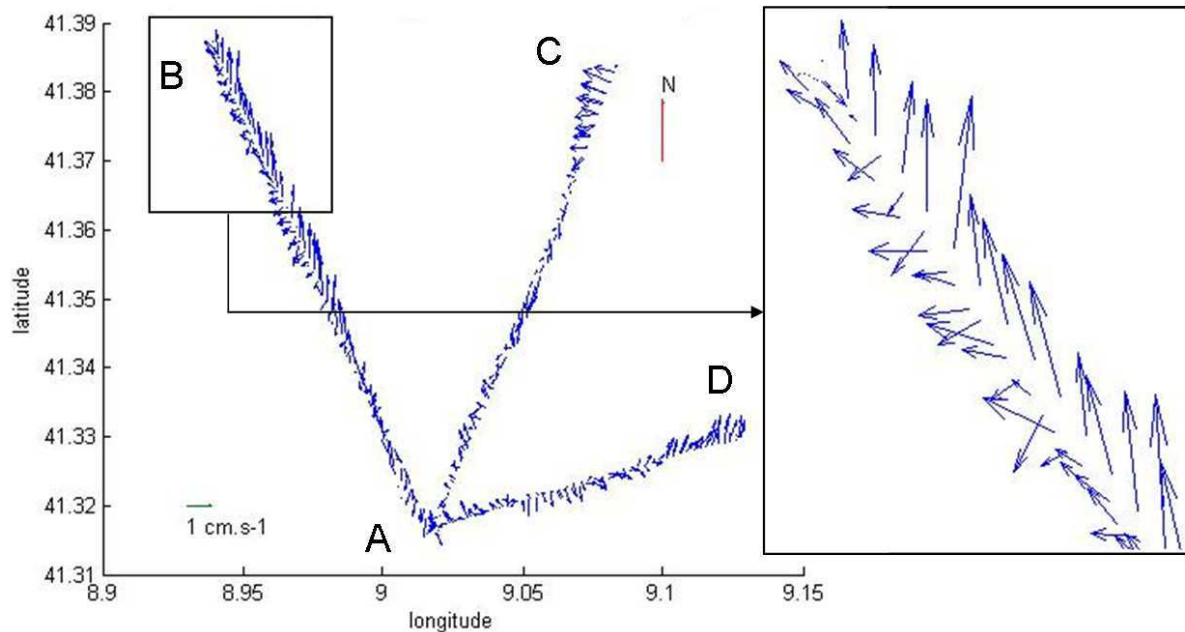


Figure II.44 : Variabilité du courant (-14 m) sur une petite échelle d'espace et de temps durant CYRCE 1 et zoom sur le point B. La distance entre aller et retour A et B est approximativement de 3.5 milles nautique et parcouru en une demi-heure.

Malgré ces réserves d'usage et de métrologie, nous avons tenté une comparaison des mesures fournies de ces deux appareils en situations comparables.

Pour le Téthys, nous avons sélectionné : dans un carré de 2000 m de coté, avec pour point central l'emplacement de l'ADCP mouillé, tous les transects du Téthys (toutes missions confondues, ou uniquement pour les missions d'été ou d'hiver) passant dans la zone de ce carré. Puis pour chaque transect ont été calculés la moyenne d'intensité des courants ainsi que l'écart type des directions soit 536 points sur 48 transects. Nous avons alors porté dans la Figure II.45 la dispersion des valeurs de direction du courant en fonction de sa vitesse et nous l'avons comparé à la même relation obtenue par les données de l'ADCP fixe, à une profondeur correspondante. Nous avons présenté plus haut une telle relation, mais elle

concernait l'entièreté de la mission CYRCE 4, toutes zones géographiques confondues. Nous voyons que dans les deux cas la dispersion des données de direction décroît de manière significative avec l'augmentation de la vitesse du courant, l'évolution est identique pour les deux cas. Dans le cas des données Téthys comme pour les données de l'ADCP mouillé au niveau C20 (correspondant environ au bin 3), le meilleur ajustement est de type puissance avec respectivement un $R^2=0.35$, $n=48$, $p>0.05$ et $R^2=0.73$, $n=105$, $p<0.001$. On constatera néanmoins que l'ajustement est bien meilleur pour l'ADCP mouillé, ceci étant sans doute dû à une meilleure représentativité des mesures.

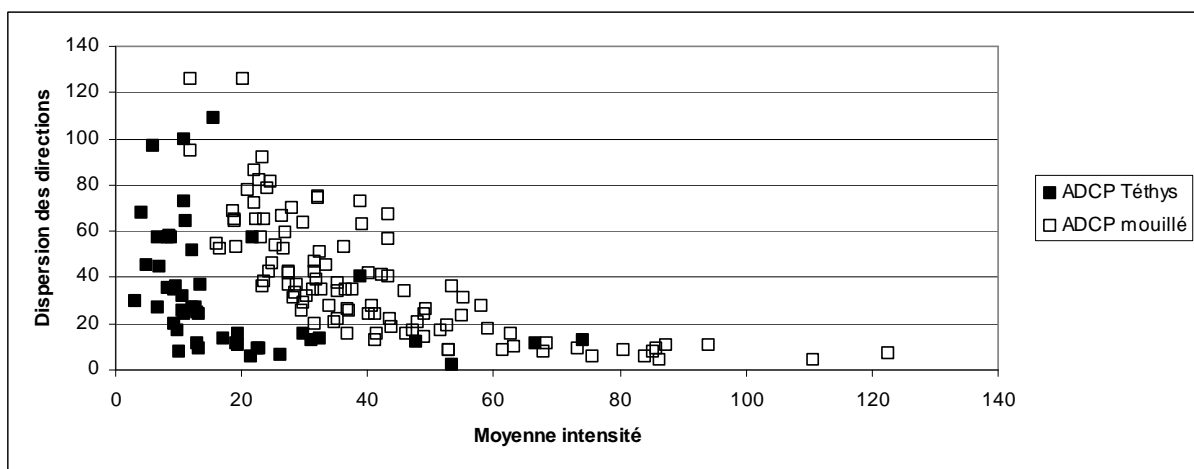


Figure II.45 : Distribution de la variabilité des directions de courant (degrés) en fonction de la moyenne de l'intensité du courant (cm.s^{-1}).

On voit bien à partir de cette comparaison que la variabilité, que l'on constate entre points adjacents de l'ADCP mobile (confère Figure II.44), peut en partie, et en partie seulement, s'expliquer par le déplacement de l'appareil ainsi que ses limites pour l'utilisation par petit fond. On retrouve en effet pour les faibles courants, dans le cas de l'ADCP fixe, ces dispersions de valeur de dispersion. Quand un des deux vents dominants souffle, il cause une forte contrainte en direction sur la surface de la mer et cela sur une large échelle. Mais aussi dans de nombreux cas de vent fort les changements de vitesse et de direction respectifs de vent et de courant sont synchrones. Au contraire, quand le vent est plus faible et souvent plus variable en direction, les effets locaux tendent à devenir prédominants et dans la réponse du courant induit à prendre en compte l'influence des caractéristiques locales telles que la profondeur ou la topographie de côte, etc.

Par ailleurs, nous avons pu montrer par les cartes présentées pour un certain nombre de missions, que les situations sur une période de 24 heures pouvaient être très différentes entre est et ouest des bouches. L'appareil posé sur le fond ne peut pas montrer ces différences à faible échelle de temps.

Ces deux instruments sont donc complémentaires, ils doivent être utilisés selon le but que l'on se fixe. Si l'on recherche une vision intégrée d'une zone côtière même en déplaçant un ADCP en divers positions, on ne pourra jamais intégrer dans la même tranche de temps les sous-ensembles de la zone étudiée, si au contraire on veut connaître de manière exhaustive les contraintes des courants qui s'exercent en un point donné (transport d'organisme vivant, contrainte anthropique cas d'un émissaire ou encore la tenue d'ouvrage sous marin) c'est naturellement l'ADCP mouillé qui sera préféré.

Comment concilier ces deux approches? C'est le but des outils statistiques que nous allons présenter maintenant.

Nous avons pris précédemment la maille de 2000 mètres passant sur la position de l'ADCP fixe, en doublant la maille nous obtenons toujours le même type de configuration. Il ne s'agit pas ici de dire que les données moyennes obtenues sur l'ADCP fixe sont comparables aux données moyennes de vitesse et de direction de l'ADCP mobile, mais simplement que c'est une des caractéristiques des courants que nous avons étudiées à différentes échelles d'espace et de temps (maille de 2000 m, de 4000 m, ensemble de la zone, ensemble d'une mission) : la variabilité de la direction des courants mesurés pour les faibles vitesses de vent et de courant, est une caractéristique du système. Nous allons voir dans une des parties suivantes que c'est une vision qui a déterminé la mise en place de filtre sur des données de vitesse de courant, partie intégrante du modèle que nous proposons.

II.6.3. Etude des courants issus de l'ADCP mobile pour les deux vents dominants

II.6.3.1. Profils horizontaux durant les deux vents dominants

Du fait de l'originalité de la zone, fortement influencée par la présence de deux vents dominants, la description des courants ne peut se faire que dans ces deux situations. Pour cela un profil horizontal de courant couvrant l'ensemble des Bouches de

Bonifacio est sélectionné et décrit pour les deux cas réalisés, l'un et l'autre, aux deux situations de vents sélectionnés.

Pour CYRCE 4, nous sélectionnons une période de plusieurs heures où les deux configurations de vent sont bien établies. Ces deux zones sont mises en évidence par des pointillés sur la Figure II.46, avec pour une configuration de vent d'ouest comprise entre les 30 ème et 80 ème heures de la mission, avec une intensité supérieure à 6 m.s^{-1} , et pour une configuration de vent d'est comprise entre les 120 ème et 150 ème heures d'enregistrement, pour une intensité supérieure à 4 m.s^{-1} . Ensuite les cartes des profils de courant (au bin 3 $\approx -16 \text{ m}$) pour les deux configurations de vent, de la mission CYRCE 4 sont sélectionnées (Figure II.47 & Figure II.48) et décrites afin d'étudier un cas particulier de circulation de courant à travers le détroit.

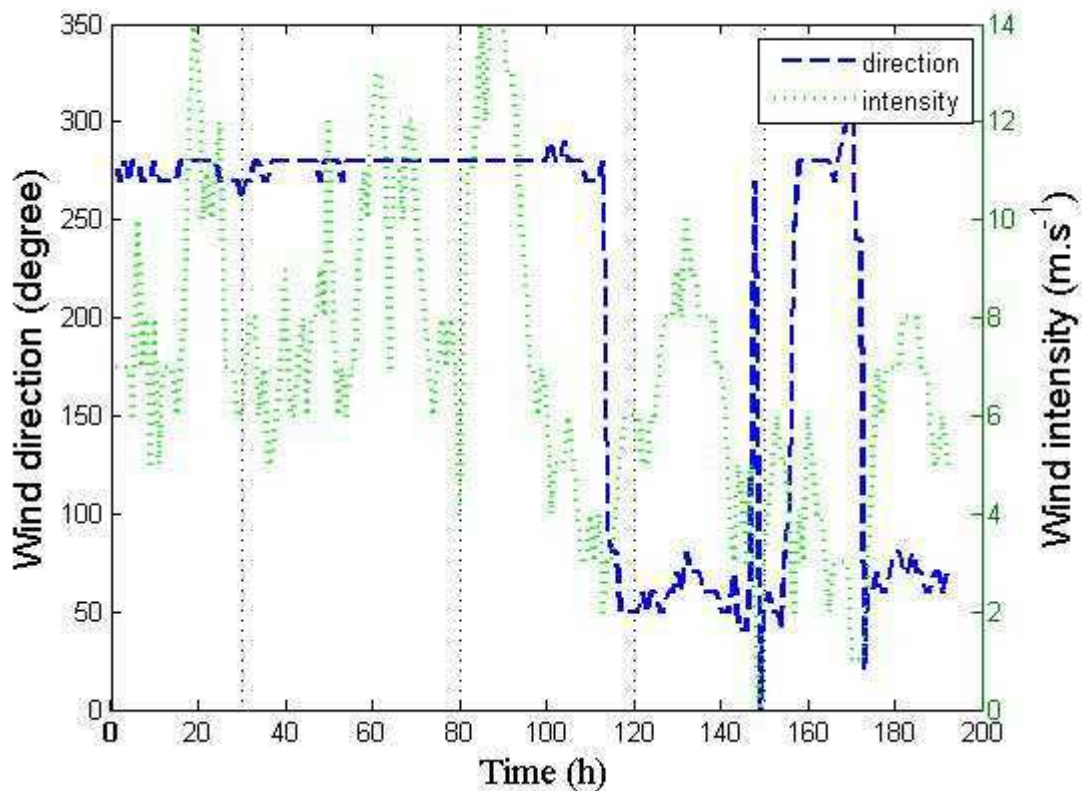


Figure II.46 : Intensité et direction du vent durant CYRCE4, données issues du sémaphore de Pertusato ; étude de cas 1 isolé par des pointillés entre la 30 ème et la 80 ème heure d'enregistrement durant laquelle le vent est orienté ouest et supérieur à 6 m.s^{-1} ; étude de cas 2 isolé par des pointillés entre la 120 ème et la 150 ème heure d'enregistrement durant laquelle le vent est orienté est et supérieur à 4 m.s^{-1}

La carte (Figure II.47) présente les courants enregistrés durant une configuration de vent d'ouest. Une très nette différence entre le côté est et ouest des Bouches de

Bonifacio apparait sur cette carte. Sur la partie est et un peu au large de la côte, un courant violent (supérieur à 30 cm.s^{-1}) est présent et très homogène en direction avec une orientation sud. Le courant devient moins homogène avec des zones de cisaillement et des orientations variables quand on se rapproche de la côte. La dynamique présente du côté ouest est plus complexe et variable en direction. Les flux y sont orientés dans plusieurs directions, indice de la présence de structures tourbillonnaires générées par le resserrement du détroit entre la Corse et la Sardaigne tant en latitude qu'en profondeur. Le long de la côte ouest, le courant est orienté nord-ouest à la côte, témoin de ces structures tourbillonnaires.

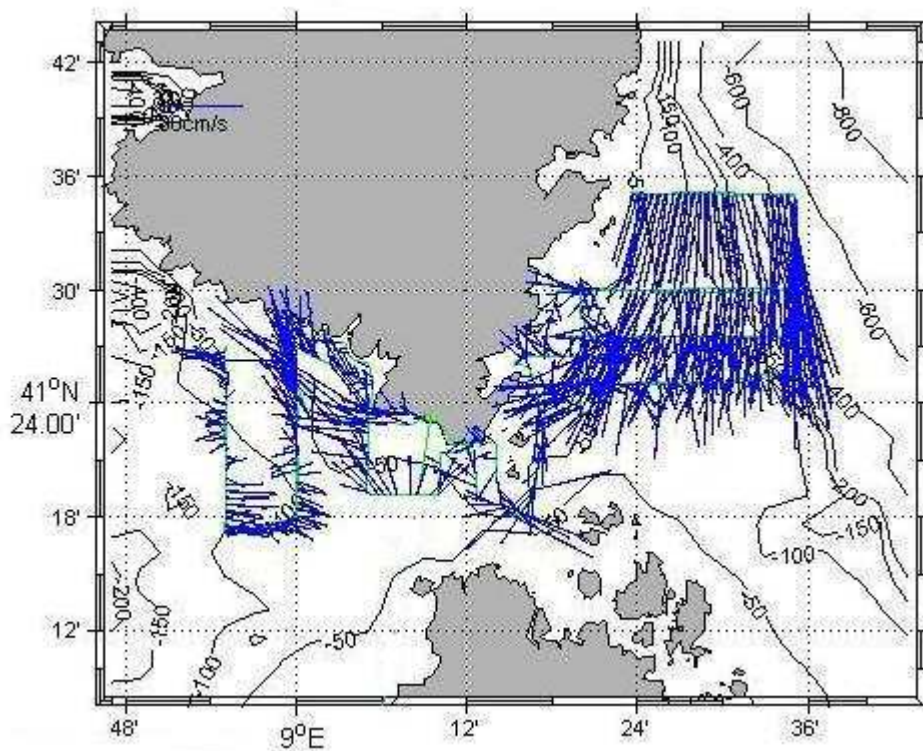


Figure II.47: Carte des courants enregistrés (sélectionnés toutes les trois minutes) le long du parcours du bateau durant CYRCE 4 du 21/07/2005 à 23h00 au 23/07/2005 à 14h17. Conditions de vent fort $> 6 \text{ m.s}^{-1}$, orienté ouest. Bin 3 = -16m

Nous présentons le même type de carte (Figure II.48), où les courants sont enregistrés durant la même mission que la carte précédente, mais avec une configuration de vent d'est. Cette carte a été tout d'abord zoomé pour ne sélectionner que la partie englobant les Bouches de Bonifacio, puis les vecteurs représentant les courants ne sont affichés que toutes les trois minutes pour permettre une meilleure visibilité. Une nette différence entre le côté est et ouest est marquée, ce qui semble être une caractéristique du système peu importe les

conditions de vent. Le courant violent orienté sud se retrouve sur dans la partie est du détroit (surtout visible sur une carte non zoomé, non présentée ici). Avec une même configuration de courant, c'est-à-dire très homogène, en direction (orienté sud) au large et plus variablement orienté avec la proximité de la côte. La situation est plus compliquée à l'ouest (comme sur la carte précédente) avec des directions variables plus l'enregistrement se rapproche du milieu du détroit. Mais, cette carte montre néanmoins, une nette orientation nord-ouest, moins variable en direction que la carte précédente. Nous voyons que sur une seule mission, et pour deux configurations de vent différentes, certains phénomènes hydrodynamiques se retrouvent. A savoir, une configuration des flux différente, surtout au niveau de la variabilité des directions de courant, entre le côté est et le côté ouest. L'ouest présentant une variabilité en intensité et direction de courant plus importante, alors que l'est, affiche toujours un fort courant orienté sud. Le fait que ce courant orienté sud se retrouve sur la côté est, pour les deux configurations de vent, prouve que ce courant n'est pas dû à l'action de ces derniers, mais plutôt à attribuer à la dynamique générale de la zone.

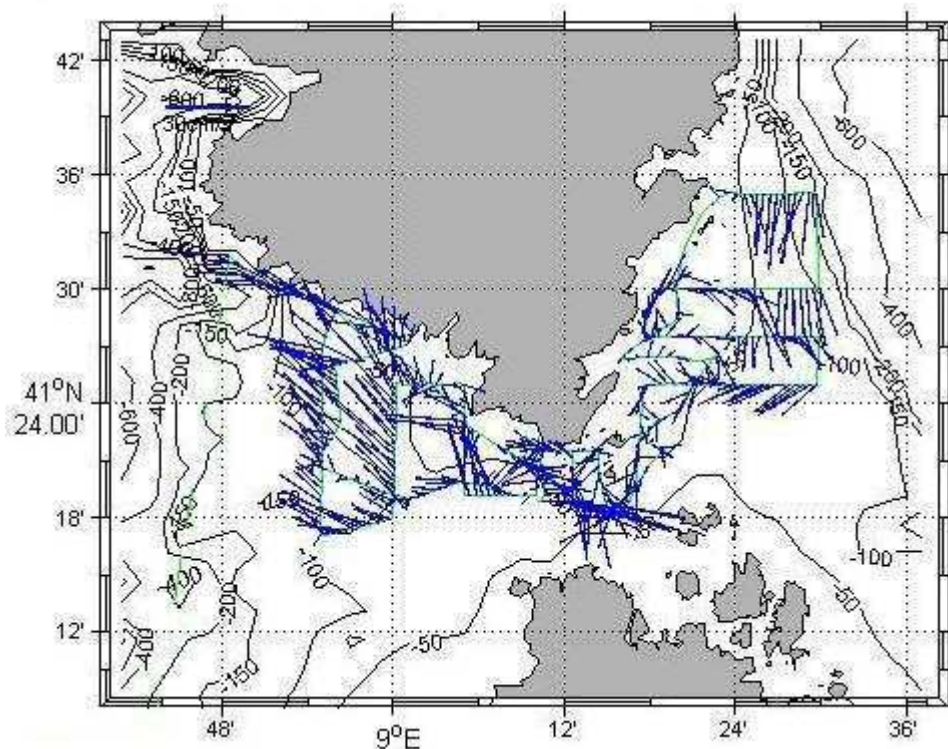


Figure II.48 : Carte (zoomé) des courants enregistrés (sélectionnés toutes les trois minutes) le long du parcours du bateau durant CYRCE 4 du 24/07/2005 au 25/07/2005. Conditions de vent supérieur à $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, orienté est. Bin 3= -16 m.

II.6.3.2. Profils verticaux durant les deux vents dominants

Nous avons vu que pour deux configurations des vents dominants présents dans le détroit, nous retrouvions des structures courantologiques communes sur des profils de courants horizontaux permettant d'englober le côté est et ouest du détroit. Il est nécessaire de faire le même travail sur des profils de courants verticaux pour connaître l'impact des vents dominants sur la totalité de la colonne d'eau. Deux profils de courant sur une tranche verticale sont présentés pour des conditions de vent d'est, nord-est et de vent d'ouest. Pour ce faire sur un ensemble de 12 points consécutifs enregistré le long de la trajectoire du bateau choisi durant des conditions de vent voulues, la moyenne d'intensité de courant est calculée. Cette dernière est tracée pour chaque bin afin d'obtenir un profil vertical (Figure II.49).

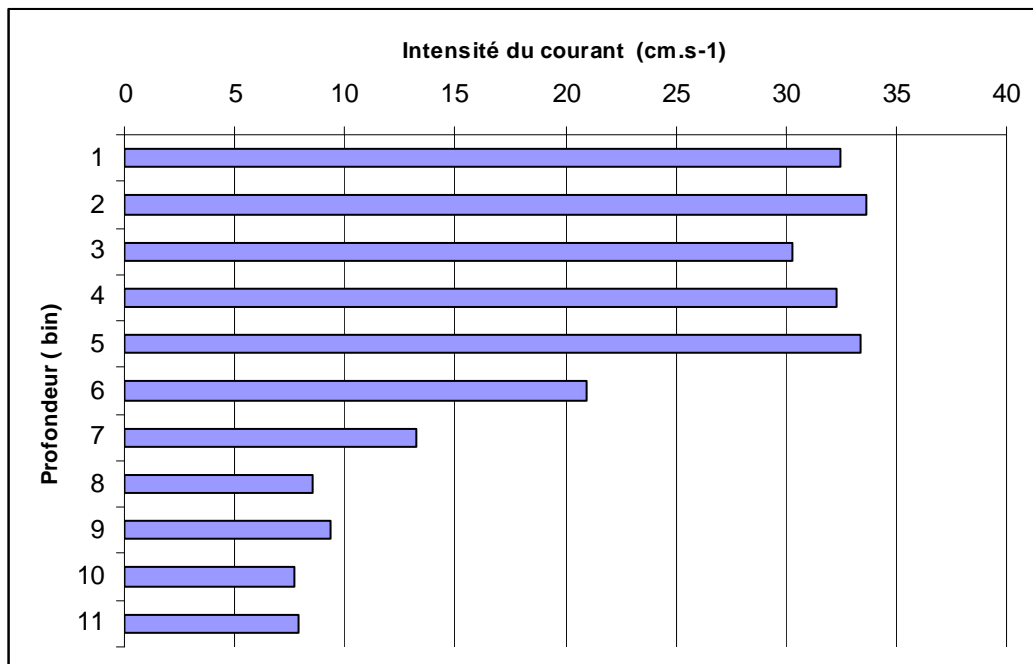


Figure II.49 : Intensité moyenne du courant en cm.s-1 effectuer sur 12 points (12 minutes), coté est de Bonifacio en situation de vent Libeccio.

Sur la Figure II.49, il y a en moyenne une décroissance de l'intensité du courant en profondeur. Les courants sont plus forts en surface qu'en profondeur. À partir du bin 7 (-28m), l'intensité reste plus ou moins constante et subit une diminution d'intensité moins forte que sur les bins supérieurs.

Cependant, cette décroissance d'intensité dans la colonne d'eau n'est pas toujours constante et il est possible de remarquer des bins où l'intensité du courant est

légèrement supérieure à celle du bin supérieur. En effet au bin 2 (- 8m), l'intensité du courant augmente (passant de 32 à 33 cm.s^{-1}) par rapport au bin d'en dessous, ce même phénomène se retrouve entre le bin 8 (-32 m) et le bin 9 (-36 m) où une très légère augmentation d'intensité se retrouve (de 8.51 à 9.34 cm.s^{-1}). En revanche ce phénomène est plus important entre les bins 3 (-12m), 4 (-16m) et 5 (-20m) où l'intensité du courant augmente sur ces trois bins passant de 30.33 à 33.35 cm.s^{-1} . Le même style de profil est présenté avec une situation de vent dominant Gregale.

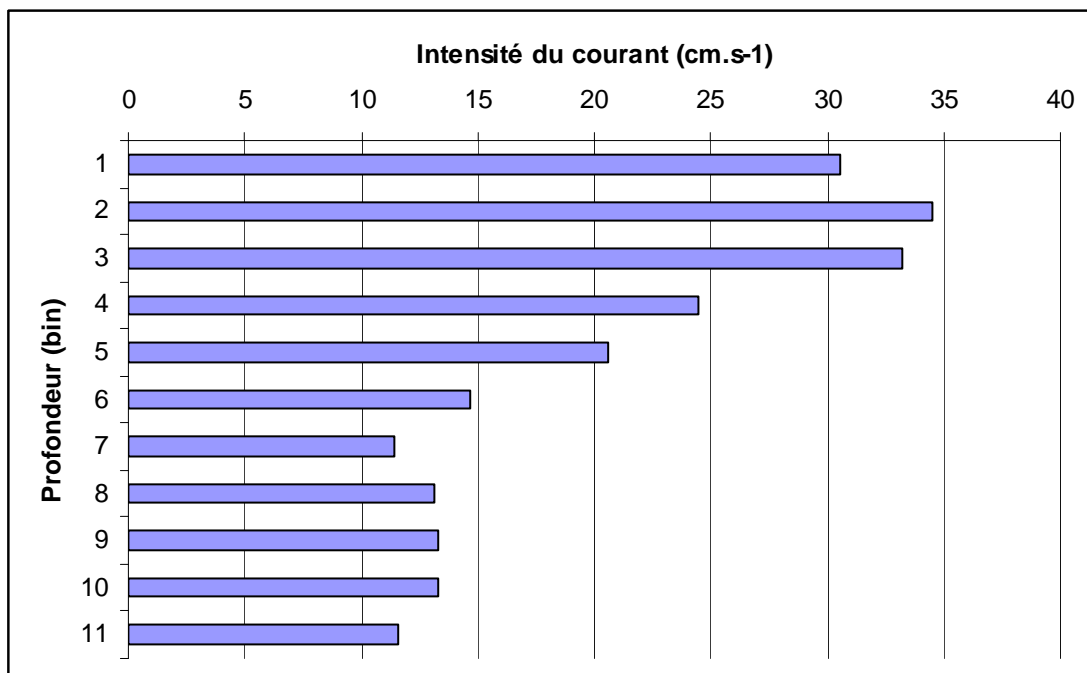


Figure II.50 : Intensité moyenne du courant en cm.s^{-1} effectuée sur 12 points (12 minutes), coté est de Bonifacio en situation de vent Gregale

Sur la Figure II.50, il y a en moyenne une décroissance de l'intensité du courant en profondeur comme précédemment (Figure II.49). La légère augmentation d'intensité de courant se retrouve sur les premiers bins où l'intensité du courant passe de 30.56 cm.s^{-1} (bin 1) à 33.20 cm.s^{-1} (bin3).

Malgré deux directions de vents dominants, les structures des profils courantologiques (intensité de courant) n'apparaissent pas différentes entre elles. Ces profils sont donc caractérisés par une diminution de l'intensité de courant. Avec en surface (en moyenne entre le bin 4 et 5) des courants plus forts qu'en profondeur. Cependant en surface l'intensité du courant a une légère tendance à augmenter.

Pour les deux configurations de vent, nous retrouvons la même structure de profils verticaux, avec en moyenne une diminution de l'intensité moyenne dans la colonne d'eau. D'après les deux cartes présentées ci-dessus, nous avons vu que certains courants ne sont pas des courants générés par les vents, mais plutôt des courants permanents caractéristiques de la zone. Cependant, nous avons vu dans la partie II.5, traitant la corrélation vent vs courant sur les données issues de l'ADCP, que les deux jeux de données étaient corrélés sur toute la profondeur pour des vents forts ($>7 \text{ m.s}^{-1}$). Nous allons voir si nous ce résultat de corrélation vent vs courant pour le vent issu du cap Pertusato et les données de courant du Téthys II. Bien évidemment, nous tiendrons compte du caractère mobile de l'ADCP embarqué.

II.6.4. Étude de la corrélation vent Pertusato vs courant ADCP

Téthys

Pour tester la corrélation entre les intensités de vent (Pertusato) et de courant (Téthys), le détroit est divisé en deux jeux de données avec en premier les intensités de vent et courant recueillies uniquement dans la partie ouest du détroit et en second échantillon les données enregistrées dans la partie est. En effet, nous ne pouvons traiter la corrélation de ces données sur le jeu de donnée entier. Tout d'abord d'un point de vue météorologique la configuration de la zone (présence des falaises), la présence de deux vents dominants, et la localisation du sémaphore de Pertusato (se trouvant globalement au milieu des bouches de Bonifacio et la zone étant fortement influencée) demandait à ce que soit pris en compte séparément les données de part et d'autre du détroit.

La corrélation est ainsi testée pour trois niveaux de profondeur différents (bin 3= -16m, bin 8= -32 m, et bin 15= -60 m) pour les deux échantillons de courant enregistrés du côté est et ouest. Pour l'échantillon ouest, il y a corrélation entre les intensités de courant et de vent pour les bins 3 et 8 avec respectivement ; $n=244$, $R^2=0.26$; $n=239$, $R^2=0.26$; $p=0.001$, pour des tests unilatéral et bilatéral. À l'inverse, aucune corrélation n'est présente entre l'intensité vent vs courant pour le coté est. Cependant, la configuration morphologique de la zone (présence de falaise) et l'emplacement du Sémaphore de Pertusato peuvent influencer sur cette corrélation. En effet, nous prendrons par exemple le cas de situation de vent d'ouest alors que le bateau enregistre des données du côté est, les falaises protégeront la partie est du

vent, on ne peut donc pas trouver de corrélation vent vs courant dans ce cas. Nous allons donc tester les corrélations en réduisant l'échantillon aux vents forts (supérieur à 8 m.s⁻¹, médiane, puisque nous avons constaté dans une partie précédente une meilleure corrélation sur les vents forts, partie II.5) et uniquement en direction nord-est. Pour ce nouvel échantillon, il y a une corrélation entre l'intensité vent/courant pour les trois profondeurs ; bin 3 : n=34, R²=-0.45 (p=0.05, unilatéral et bilatéral); bin =8 ; n=231, R²=-0.39, (p=0.001 unilatéral et bilatéral) ; et pour le bin 15, n=140, R²=-0.39 (p=0.001 unilatéral et bilatéral).

II.6.5. Différence des données de vent issues du cap Pertusato entre l'hiver et l'été

En constituant deux groupes de vent (été/hiver) en départageant les missions CYRCE de manière à ce que quand la colonne d'eau est marquée par la thermocline les missions sont classées dans la catégorie « été » et quand la colonne d'eau est homogène les missions sont classées dans la catégorie « hiver ». Puis pour comparer ces deux échantillons, nous procédons à une analyse de variance sur les vitesses et les directions des vents de Pertusato. Les intensités de vent entre l'été et l'hiver sont significativement différentes (p<0.05, n=480) pour un test unilatéral (p=0.01) et bilatéral (p=0.03) et les directions de vent sont significativement différentes (p<0.001, n=480) pour un test unilatéral (p=1.96 .10⁻⁶) et bilatéral (p=3.83 .10⁻⁶).

II.6.6. Différence de vent Pertusato et Téthys

Il est rare de posséder plusieurs types de données de vent sur une même zone : les données du Sémaphore de Pertusato (données utilisées tout au long de cette thèse) et les données météorologiques du Téthys II. Nous avons voulu comparer ces deux échantillons différents, qui acquièrent exactement la même donnée (même date et même heure, mais dans des positions géographiques différentes). Avant cela nous transformant les données d'intensité de vent Téthys (fournie en nœud) en m.s⁻¹, pour les comparer aux données Pertusato également en m.s⁻¹. Ainsi, nous allons voir l'influence du vent à une échelle très locale. Avec un test d'égalité des espérances (deux observations de variances différentes) nous testons les données disponibles

sur quatre des missions CYRCE (1, 5, 6 et 7), l'intensité des vents (Pertusato et Téthys) durant CYRCE 1 et CYRCE 6 sont statistiquement identiques alors que pour CYRCE 5 et 7, les deux vents sont statistiquement différents (voir Tableau II.13). Cependant, CYRCE 5, 6, 7 apparaissent statistiquement identiques s'ils sont comparés de part et d'autre du détroit.

Tableau II.13: Données de l'intensité du vent issues du Sémaphore de Pertusato et du Téthys II

		Intensité en (en m.s-1)		Différence vent Pertusato et Téthys II
		Pertusato	Téthys	
CYRCE 1	Moyenne	6.13	6.51	H0 ne peut être rejeté pour un test d'égalité des espérances p=0.25 pour un seuil de risque à 0.05
	Écart-type	2.14	1.87	
	Min	2	1.92	
	Max	11	11.82	
	Nb	73		
CYRCE 5	Moyenne	8.39	7.50	Rejet d'H0 pour un test d'égalité des espérances
	Écart-type	4.08	3.37	
	Min	0	0	
	Max	20.1	15.42	
	Nb	121		
CYRCE 6	Moyenne	7.00	6.63	H0 ne peut être rejeté pour un test d'égalité des espérances p=0.37 pour un seuil de risque à 0.05
	Écart-type	3.39	3.25	
	Min	1	0	
	Max	14.8	14.90	
	Nb	121		
CYRCE 7	Moyenne	7.25	5.94	Rejet d'H0 pour un test d'égalité des espérances
	Écart-type	4.96	3.92	
	Min	0	0.51	
	Max	19.1	14.90	
	Nb	145		

D'après les résultats du Tableau II.13, sur certaines missions les deux échantillons de vent sont différents et sur d'autres ils sont identiques, cela traduit d'une part un fort effet local dans la zone, mais d'autre part une influence sur les données probablement du à la configuration morphologique de la zone (cas abordé précédemment). Nous allons donc regarder si les deux échantillons de vent sont différents entre eux de part et d'autre du détroit. Comme précédemment, nous divisons les échantillons entre la partie enregistrée par le Téthys quand ce dernier se trouvait à l'ouest du détroit et nous regardons la différence de cet échantillon avec les données du Sémaphore de Pertusato enregistrées aux mêmes dates et heures, puis nous faisons de même avec les données de vent enregistrées dans la partie est du détroit. Dans la comparaison du vent de Pertusato et du vent de Téthys II, on ne peut pas rejeter H0, l'intensité du vent enregistrée à Pertusato et par la station météorologique du Téthys apparaît statistiquement identique de part et d'autre du

détroit ; avec pour la partie ouest ($n=76$, $p=0.15$ pour un test unilatéral et $p=0.30$ pour un test bilatéral, avec un risque $\alpha=0.01$) et pour la partie est ($n=108$, $p=0.18$ pour un test unilatéral et $p=0.36$ pour un test bilatéral, avec un risque $\alpha=0.01$).

La base de données SAVED comprend l'enregistrement des capteurs météorologiques dont les données sont stockées toutes les 30 min. Nous avons connu des difficultés pour récupérer cette base de données météorologique. Aussi ce travail a-t-il été commencé en utilisant les données MétéoFrance du cap Pertusato, cette base nous fournissait des données enregistrées au pas horaire. Malgré la différence (faible) de fréquence d'acquisition, nous avons poursuivi ce travail en utilisant essentiellement les données du cap Pertusato pour des raisons de cohérence. Même si l'intérêt d'avoir des données de vent associé aux courantomètres ADCP, la faible extension de la zone étudiée ainsi que la présence en son milieu d'une station de MétéoFrance nous ont fait préférer ce choix, rendant plus cohérent la série de traitement.

II.7. The current dynamics inside the Strait of Bonifacio: impact of the wind effect in a little coastal strait

Ce travail d'étude de cas vent-courant à partir deux appareils ADCP, a fait l'objet d'une publication. Confère article annexe 12:

Gerigny, O., et al., The current dynamics inside the Strait of Bonifacio: Impact of the wind effect in a little coast strait. *Continental Shelf Research* (2010).
Doi:10.1016/j.csr.2010.11.005.

II.8. Description cas majeurs.

Nous venons de voir que certaines structures courantologiques sont présentes durant les deux configurations de vent dominant, ces structures ne sont donc pas à attribuer aux conditions météorologiques. Nous avons vu également qu'il y avait une différence entre le vent d'été et d'hiver, alors que les mêmes structures courantologiques étaient présentes durant toute l'année (grâce aux descriptions des cartes de courant des missions autres que CYRCE) et donc qu'elles ne sont pas l'effet d'un phénomène saisonnier. Ces structures courantologiques « permanentes » seront qualifiées de phénomènes majeurs et feront l'objet d'une étude plus poussée.

II.8.1. Le courant orienté sud du côté est de Bonifacio et la zone de cisaillement (côté est) en se rapprochant des côtes

Nous avons vu dans la partie II.6.3, présentant des cartes de courant enregistrées durant les missions CYRCE pour les deux configurations de vents dominants, dans la partie est du détroit la présence d'un fort courant sud et une zone de cisaillement en se rapprochant de la côte. Ces deux phénomènes majeurs sont le sujet de ce paragraphe. Pour les présenter, nous reprenons les figures présentées dans la partie II.6.3, où les cartes de courants pour les deux configurations de vent seront zoomé.

Sur la Figure II.51, le côté est présente un autre cas particulier. En effet, au large des cotes est du détroit, il y a un fort courant orienté sud qui est présent et sur les toutes les radiales effectuées de ce côté là. Mais en se rapprochant des côtes, une zone de cisaillement apparait avec une diminution de l'intensité du courant. Puis près des côtes, le courant s'inverse en un contre courant à la côte pour avoir une tendance d'orientation nord-est, nord-ouest.

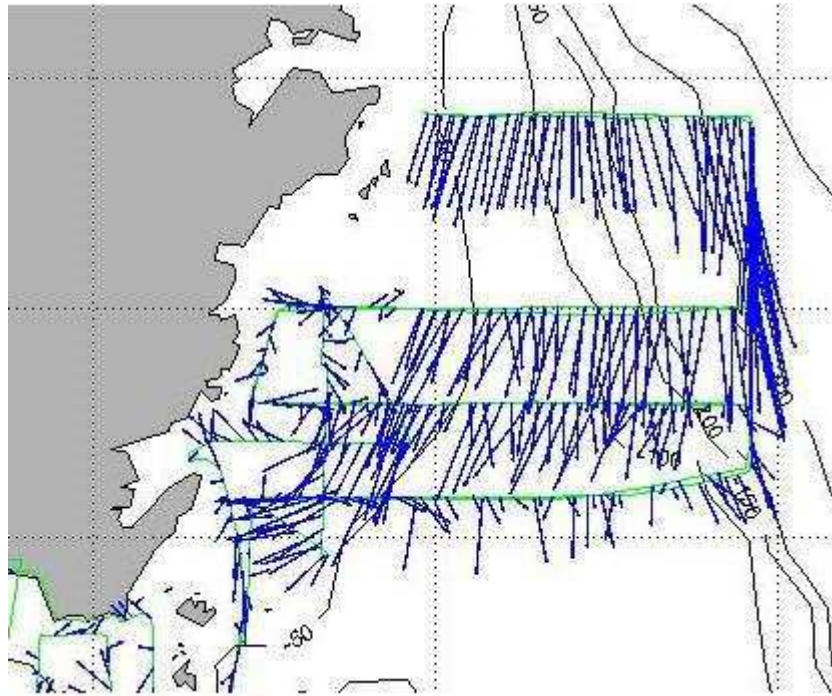


Figure II.51 : Carte des courants enregistrés (sélectionnés toutes les trois minutes) le long du parcours du bateau durant CYRCE 4 du 21/07/2005 à 23h00 au 23/07/2005 à 14h17. Conditions de vent fort $> 6 \text{ m.s}^{-1}$, orienté ouest. Bin 3 = -16m. Zoom effectué sur l'est des Bouches de Bonifacio, l'échelle des vecteurs est divisée par deux pour permettre une meilleure visibilité.

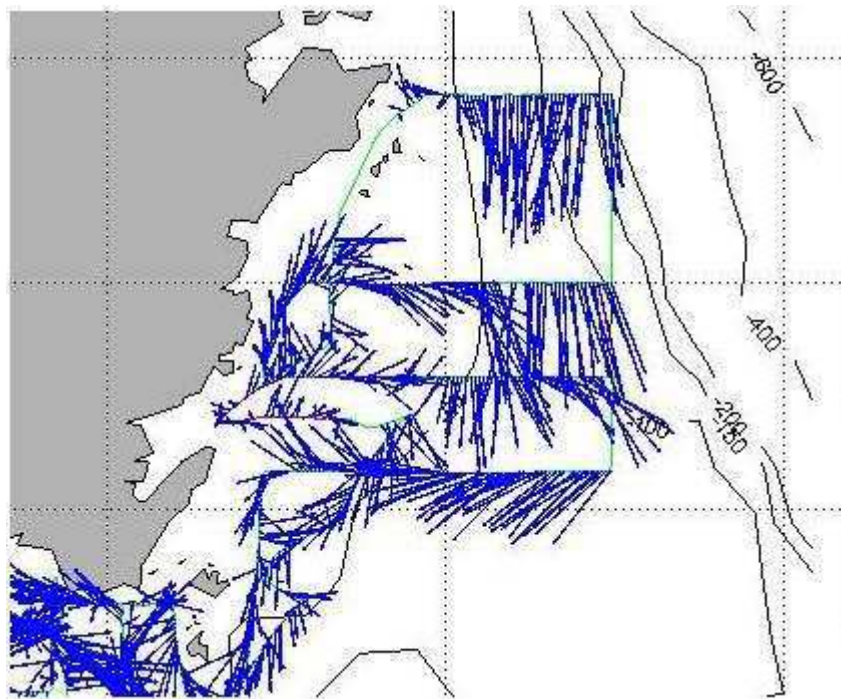


Figure II.52 : Carte (zoomé) des courants enregistrés (sélectionnés toutes les trois minutes) le long du parcours du bateau durant CYRCE 4 du 24/07/2005 au 25/07/2005. Conditions de vent supérieur à 4 m.s^{-1} , orienté est. Bin 3= -16 m. Zoom effectué sur l'est des Bouches de Bonifacio

Sur les Figure II.51 & Figure II.52, du côté est au large de la côte, pour les deux configurations de vent (orienté est et ouest), est présent un courant violent. Ce courant malgré une certaine variabilité de direction, présente une orientation sud très nette. En se rapprochant de la côte est, le courant subit des modifications tant en direction qu'en intensité, formant des zones de cisaillement. Le courant tend à s'inverser en orientation pour remonter avec une orientation nord à la côte. Ces deux phénomènes : courant violent orienté sud et zone de cisaillement en se rapprochant des côtes se retrouvant pour les deux configurations de vent, sont considérés comme étant des courants de « pression » et non pas des courants dus aux vents. Ce courant sud, au large apparaît cohérent avec la structure hydrodynamique présente autour de la Corse à plus large échelle. La zone de cisaillement est générée par le changement d'orientation du flux près de la côte, qui lui-même est généré par le passage du flux à l'intérieur du détroit.

II.8.2. Deux cas de circulation dans le détroit

D'après la méthodologie qui sera présentée dans l'article intitulé « Methodology to build a local current map using sets of inboard ADCP data – Méthodologie pour construire une carte de courant locale à partir de données d'ADCP embarqué » (partie II.9) donnant une carte résumant les courants enregistrés durant les missions CYRCE, ainsi que les cartes des missions CYRCE et autres missions, le flux passant en milieu de détroit semble majoritairement orienté d'ouest en est. Il est cependant possible de trouver les deux cas de circulation à l'intérieur du détroit, présentés sur les Figure II.53 et Figure II.54, (courants présentés pour deux profondeurs -16 m surface (à gauche) et -40m profondeur (à droite)). Deux cas de circulation dans le détroit y sont présentés : le premier présente le courant orienté d'ouest en est et le second où le courant est orienté d'est en ouest.

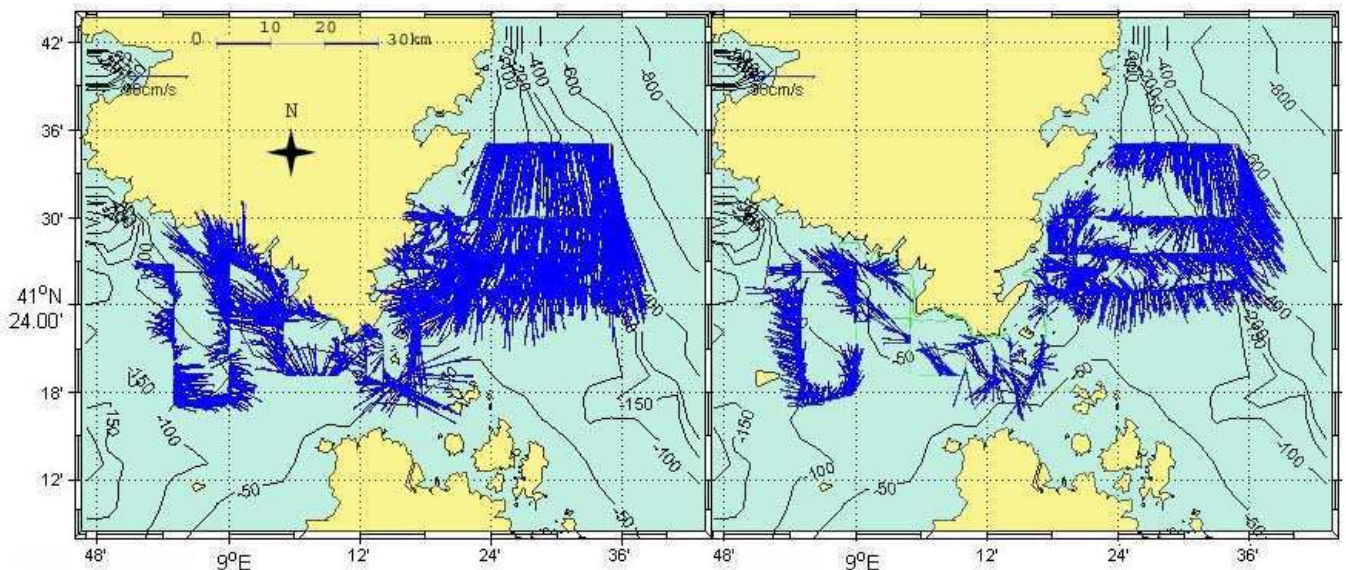


Figure II.53 : Cartes de courant du 21/07/2005, à gauche -10m, à droite -40m, condition : mer agitée

Pour le premier cas (Figure II.53), il y a une opposition nette entre les parties est et ouest des bouches, en situation de vents dominants d'ouest. Du côté ouest la situation est complexe : à -16m direction plutôt NW près des côtes, mais E-ESE dans la partie large du détroit, avec formation de tourbillons, à -40m l'atténuation est sensible, mais la structure est voisine. L'intensité des courants est moins forte côté ouest que côté est, mais au niveau le plus étroit du détroit les courants s'intensifient (orientés vers l'est). Au contraire, sur la côte orientale, il y a un courant du large, de direction sud, très violent et un contre-courant près de la côte de direction nord, plus faible avec une zone de transition (cisaillement) entre les deux. Ces courants violents ($\approx 60 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) s'expliquent par les conditions météorologiques correspondant à une mer de peu-agitée à agitée avec houle, avec une vitesse de vents d'environ 20 nœuds (environ 35 km/h) et de direction comprise entre 260° et 290°. En profondeur, côté ouest, l'intensité des courants diminue beaucoup plus nettement, voire le courant s'inverse et une zone de convergence est observée au niveau du détroit. Un des éléments importants est que le courant entre la carte de surface et de profondeur perd presque 50% de son intensité. Les courants violents de surface sont donc des courants que nous qualifierons de « courants de vent », puisqu'ils perdent de leurs intensités en profondeur.

Le second cas (Figure II.54) est dans une situation où la météo de ce jour pour une station en milieu de détroit correspond à des vents d'est d'une vitesse d'environ 10 nœuds (environ 18 km/h), de direction comprise entre 95° et 168° et mer belle. Du

côté ouest du détroit, les courants faibles ($<30 \text{ cm.s}^{-1}$) vont dans quatre directions avec des zones de cisaillement entre ces différentes zones. Les courants ainsi que les vents (vents d'est) sont inversés par rapport à la carte précédente, avec un flux en milieu de détroit orienté d'est en ouest. Cette fois-ci la vitesse des courants, pour les deux côtés du détroit, est conservée entre la surface et la profondeur, indiquant la présence de courant dit de « pression », généré par soit une circulation générale à plus grande échelle, soit par la configuration morphologique du détroit (bathymétrie, forme de la côte) et non pas généré par les vents.

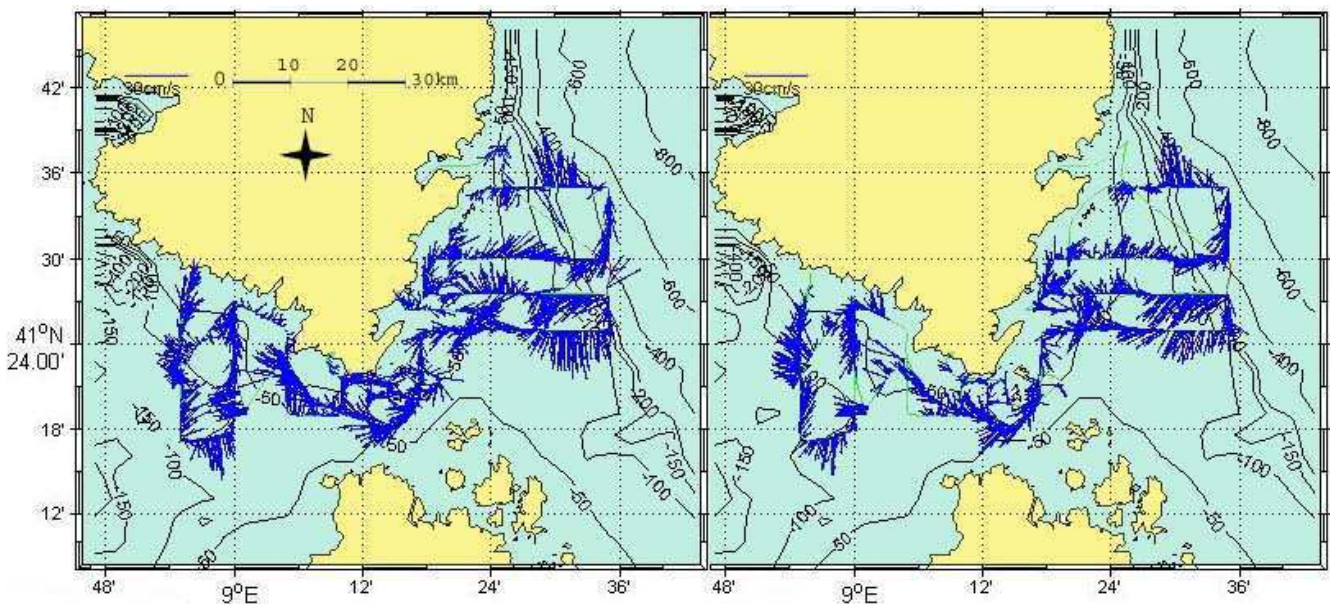


Figure II.54 : Carte de courant du 11/03/2005 de la mission CYRCE 2, condition de mer belle

Sur la côte orientale, les courants sont moins violents que précédemment. Il n'y a pas un seul courant dominant, mais plusieurs dont les directions sont variées (quatre directions), et on retrouve les courants orientés sud au large de la côte est. Sur la zone en face du golfe de Sant'Amanza, un enchevêtrement de courant crée une zone de cisaillement.

Il est donc possible de trouver deux sens de circulation en milieu de détroit, donnant un système de circulation très binaire. Mais est-ce que ces deux cas sont présents à la même fréquence ou non. Répondre à ces questions sera important notamment quand nous aborderons les questions d'export de biomasse à partir des cantonnements de pêche présents dans la réserve. Nous analysons la fréquence d'orientation du flux dans le détroit. Les cartes de CYRCE sont analysées une à une

pour déterminer dans quels sens le flux circulait dans le détroit. Le Tableau II.14 présente ces résultats et le Tableau II.15 les résume.

Tableau II.14 : Sens de passage du flux à l'intérieur du détroit

Mission	Fichier	Nb trajet	Orientation
CYRCE 1	TCY0404	2	Nord-est
			Sud-ouest
	TCY0405	2	Sud-est
			Nord-est
	TCY0407	2	Ouest
			Ouest
	TCY0408	1	Nord-est
	TCY0409	1	Nord-est
TCY0415	2	Est	
		Est	
TCY0416	1	Sud-est	
CYRCE 2	TCY0501	1	Nord-est
	TCY0502	2	Sud-est
	TCY0503	2	Sud-ouest
			Sud-ouest
TCY0504	1	Sud-est	
CYRCE 3	TCY0505	2	Est
			Est
TCY0506	1	Sud-est	
CYRCE 4	TCY0508	2	Nord-est
	TCY0510	1	Sud-ouest
			Sud-ouest
TCY0511	2	Est	
			-
CYRCE 5	TCY0512	2	Est
			Est
CYRCE 6	TCY0603	4	Est
			Est
			Nord-est
			Sud-est
CYRCE 7	TCY0605	2	Est
			Est
	TCY0606	2	Sud-est
			Sud-ouest
	TCY0607	2	Sud-est
Sud-ouest			

Tableau II.15 : Fréquence du sens du passage du flux à l'intérieur du détroit.

	Taille	%
Est	26	72.22
Ouest	10	27.78
n	36	

Durant les missions CYRCE, la direction de flux majoritaire passant en milieu de détroit est orientée d'ouest en est, et ce, pour 72% des cas, contre 27 % des cas orientés d'est en ouest.

II.9. Methodology to build a local current map using sets of inboard ADCP data

Nous avons vu d'après les cartes de courant CYRCE présentées précédemment, qu'il y avait une grande variabilité des courants sur une petite échelle d'espace et de temps. Malgré cette variabilité, nous avons tout de même identifié des phénomènes majeurs comme la présence d'un courant violent orienté sud du côté est du détroit, une nette différence de structure courantologique de part et d'autre des Bouches. Mais la description de ces phénomènes majeurs ne donne en aucun cas une vision globale du système. De plus, il était difficile d'extraire une tendance générale de l'hydrodynamisme du détroit, à partir de l'analyse seule des cartes de courant (issues du logiciel V4.2lite) ou des données brutes. Un des objectifs de ce mémoire était de se faire une idée et de caractériser la circulation générale présente dans le détroit et plus particulièrement dans la partie française où nous disposons des données CYRCE. Mais comment obtenir cette vision avec ce type de donnée (mobile dans l'espace et le temps, très important en terme de taille d'échantillonnage $\approx 54\,000$ données) qui présente une telle variabilité surtout dans les directions. C'est le sujet que nous avons traité dans l'article intitulé « Methodology to build a local current map using sets of inboard ADCP data – Méthodologie pour construire une carte de courant locale à partir de donnée d'ADCP embarqué » que nous présentons en Annexe 13.

II.10. Application du Modèle Symphonie aux Bouches de Bonifacio.

II.10.1. Le modèle Symphonie

Le système **SIROCCO**, d'une maille de résolution de 2.5 km, a été développé par le Pôle d'Océanographie Côtier –Laboratoire d'Aerologie- Toulouse (<http://sirocco.omp.obs-mip.fr/>). Ce système est composé de modules destinés à la modélisation côtière physique (labélisé en 2007 par l'INSU en tant que modèle communautaire) et repose sur quatre modules :

- Le modèle barotrope (2D horizontal) T-UGOTm 2D,
- Le modèle 3D Symphonie,
- Le module d'initialisation VIFOP et
- La plate forme d'assimilation SEQUOIA.

C'est sur le modèle hydrodynamique tridimensionnel **SYMPHONIE** que nous allons porter notre attention, puisque ce dernier a été adapté à l'échelle locale des Bouches de Bonifacio avec une résolution de 500 m. Symphonie est un modèle de surface libre, hydrostatique, à sigma généralisé, c'est un modèle de turbulence avec des conditions bluk en surface. Les vents que prend en compte Symphonie pour simuler les courants sont issus du modèle ALADIN de MétéoFrance (modèle intégrant des données réelles).

Plusieurs validations dans le golf du Lion (Estournel, *et al.*, 2003 [21]; Ulses, *et al.*, 2005 [74] ; Auclair, *et al.*, 2001 [3]), notamment portées sur l'étude de l'intrusion du courant Nord sur le plateau, de la formation d'eaux denses sur le plateau a montré que le modèle Symphonie représente correctement les principaux processus physiques saisonniers rencontrés dans le Golf du Lion (Ulses, 2005 [73]). Ses options numériques (surface libre, coordonnée verticale généralisée,...) en font un modèle adapté aux simulations régionales et côtières. Cependant, il présente certaines limites dans les résultats que nous pouvons en obtenir sur les Bouches de Bonifacio:

- La taille des mailles de 500 m, ne permet pas de distinguer certains îles et îlots.

- Le lissage de la bathymétrie, même s'il est possible de disposer d'une bathymétrie très précise dans la zone, le modèle prendra une valeur bathymétrique moyenne par maille de 500 m (lissage entre la maille « mère » de Médoc à 2.5 Km et celle de Symphonie).

- Les données de vent utilisées ne correspondent par réellement au vent local. En effet, le modèle Aladin procure une approximation des vents à Symphonie, mais ces données de vent n'ont pas été raffinées au niveau local par l'utilisation des données Pertusato ou même du Téthys.

Toutes ces limites donnent un lissage des solutions numériques produites par Symphonie par rapport à la réalité. Malgré tout, les phénomènes à grande échelle sont bien récupérés et le modèle permet d'obtenir une bonne vision d'ensemble, ce qui n'est pas le cas des mesures expérimentales qui sont toujours ponctuelles.

Nous présentons pour les deux configurations de vents (vent d'est et vent d'ouest) deux cartes de courants. Pour les deux cartes de vents et courants, ces dernières correspondent aux vents et courants moyens rencontrés durant la journée.

II.10.2. Application du modèle Symphonie pour les deux configurations de vent

Nous avons vu plusieurs fois que le régime de vent présent dans les Bouches de Bonifacio était régi par la présence de deux vents dominants (vent orienté est/nord-est et vent orienté ouest). Nous allons donc présenter les cartes de courants obtenues grâce au modèle Symphonie pour ces deux configurations de vent. Ces dernières sont sélectionnées en fonction du vent moyen enregistré ce jour-là.

II.10.2.1. Application du modèle Symphonie pour un vent d'ouest

Nous présentons les courants moyens de surface ainsi que le vent moyen enregistré le 10/12/2006 (Figure II.56), pour une direction de vent moyen orienté ouest (Figure II.55).

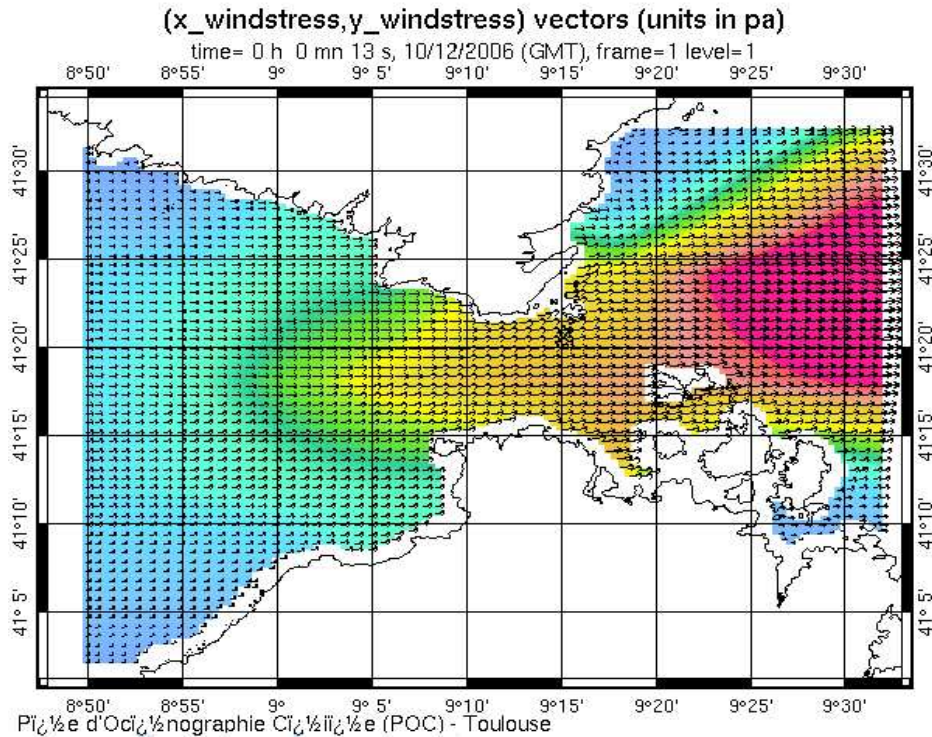


Figure II.55 : Carte des vents moyens de la journée du 10 12 2006. Le vent est matérialisé par des vecteurs, l'orientation des vecteurs indique la direction du vent. L'intensité du vent est matérialisée par un dégradé de couleur : bleu pour le vent de faible intensité et rouge pour le vent de forte intensité.

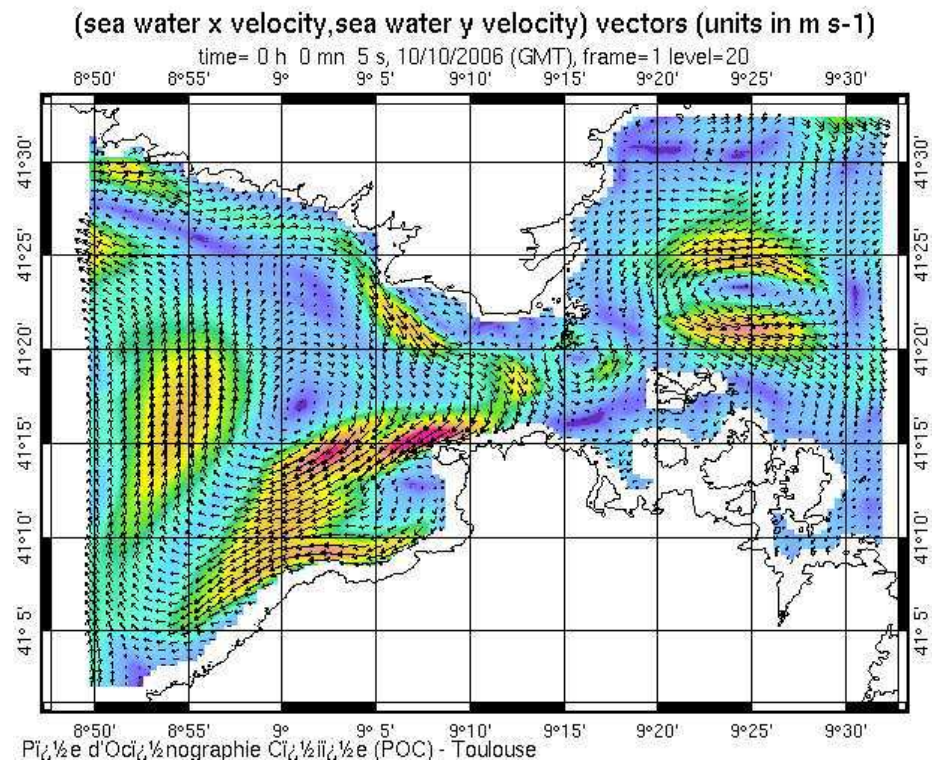


Figure II.56 : Carte des courants moyens en surface du 10/12/02006. Le courant est matérialisé par des vecteurs, l'orientation des vecteurs indique la direction des courants. L'intensité des courants est matérialisée par un dégradé de couleur : bleu pour les courants de faible intensité et rouge pour les courants de forte intensité.

Avec un vent moyen clairement orienté ouest durant la journée du 10/12/2006, les courants de surface du côté ouest du détroit de Bonifacio (Figure II.56), forment un tourbillon anticyclonique, une partie du flux de ce tourbillon se dirige vers le point le plus resserré du détroit et passe du côté est via un autre tourbillon cyclonique formé en dessous des îles Lavezzi. Du côté est, la circulation est nettement dominée par la présence d'un tourbillon cyclonique. Ce tourbillon est à l'origine du fort courant orienté sud au large du côté est (identifié dans les cartes issues des données CYRCE). La zone de simulation du modèle Symphonie étant plus grande que celle prospectée durant les missions CYRCE, les cartes issues du modèle permettent donc d'obtenir une vision du système hydrodynamique à plus grande échelle.

II.10.2.2. Application du modèle Symphonie pour un vent nord-est

Nous présentons les mêmes cartes (courant de surface, Figure II.58 et vent moyen, Figure II.57) mais pour une situation de vent orienté nord-est (issue du modèle Symphonie pour le 10/10/2006).

La situation en vent d'est/nord-est est totalement différente que celle présente sur la carte précédente en situation de vent d'ouest. Du côté ouest du détroit, nous constatons la présence d'un fort courant orienté ouest, longeant la côte française et qui passe en milieu du détroit avec une orientation nette en est. Ce flux en sortant du point le plus resserré du détroit remonte vers le nord, car il rencontre les îles de la Maddalena, formant une contrainte physique pour le passage du flux. Du côté est, la situation est complexe. Une partie du flux remonte de la Sardaigne avec une orientation nord. Au point nord le plus haut de la carte, du côté est, le courant est orienté sud. L'interaction entre les deux courants crée une zone de turbulence créant un petit tourbillon.

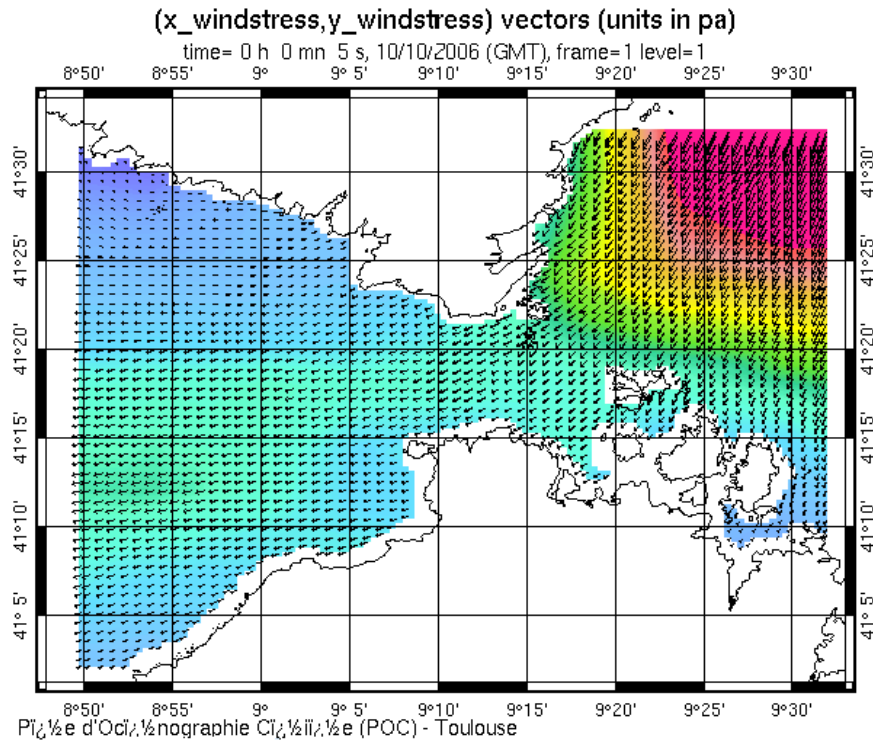


Figure II.57 : Vent moyen du 10/10/2006. Le vent est matérialisé par des vecteurs, l'orientation des vecteurs indique la direction du vent. L'intensité du vent est matérialisée par un dégradé de couleur : bleu pour le vent de faible intensité et rouge pour le vent de forte intensité.

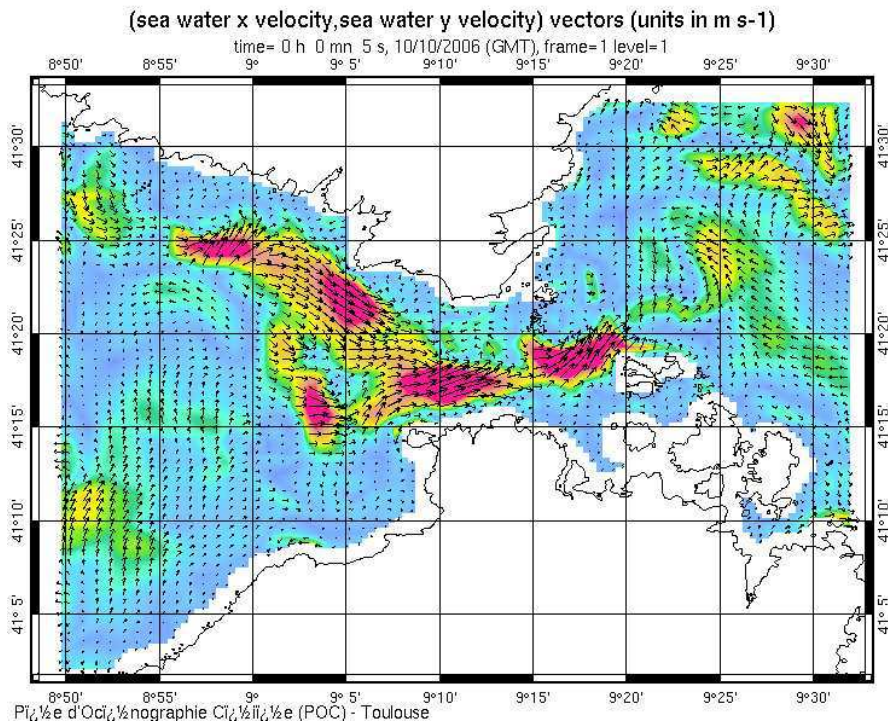


Figure II.58 : Carte des courants moyens pour la journée du 10/10/2006. Le courant est matérialisé par des vecteurs, l'orientation des vecteurs indique la direction des courants. L'intensité des courants est matérialisée par un dégradé de couleur : bleu pour les courants de faible intensité et rouge pour les courants de forte intensité.

Pour les deux vents dominants, nous constatons deux structures de courants tout à fait différentes. Nous ne retrouvons pas forcément les mêmes éléments qui sont régulièrement identifiés sur les cartes CYRCE. Cependant, l'échelle de la zone simulée par Symphonie permet de donner une vision à plus grande échelle du système, comme la présence du tourbillon cyclonique du côté est du détroit engendrant le fort courant orienté sud souvent rencontré dans CYRCE. À l'inverse les données CYRCE auront une meilleure résolution par rapport au modèle, surtout près des côtes où certains phénomènes n'apparaissent pas sur les cartes issues des simulations, comme la présence du courant orienté nord, remontant à la côte est des Bouches de Bonifacio.

II.10.3. Comparaison des courants issus de Symphonie entre CYRCE

Nous avons voulu comparer les données issues du modèle Symphonie aux données de mesures de courant *in situ* acquises durant les missions CYRCE. Pour les comparer, nous avons récupéré pour les mêmes dates et heures d'enregistrement de données réelles les courants simulés correspondants. Puis ces derniers sont tracés le long du trajet du bateau (Figure II.59).

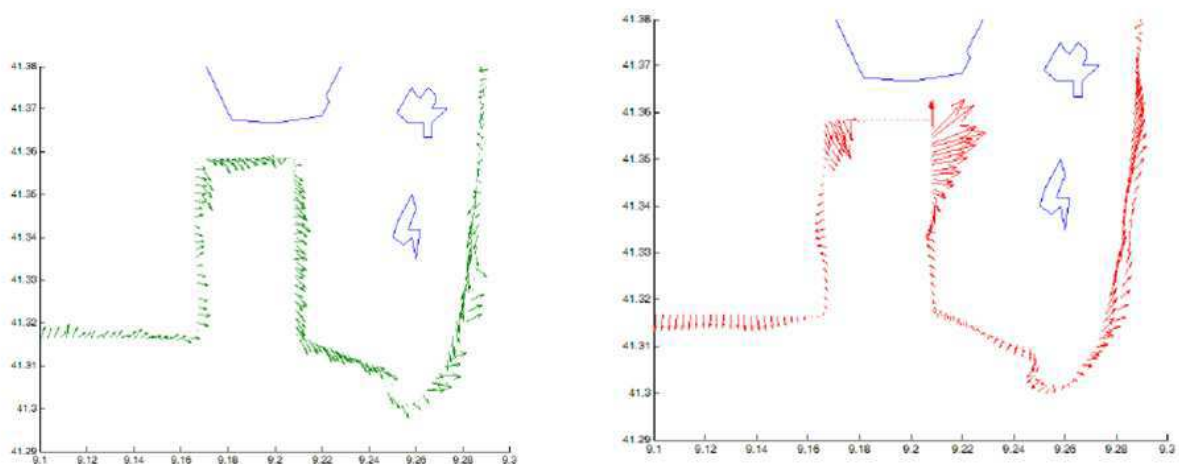


Figure II.59 : Comparaison des courants entre une carte CYRCE (gauche) et une carte Symphonie (droite).

Statistiquement, ces deux jeux de données ne sont pas comparables, car leur échantillonnage est totalement différent. Il est quand même possible de comparer les divergences et convergences de ces deux figures.

Un des éléments frappants est le fort courant (sur le modèle) qui apparaît à proximité de la côte. Ce courant n'est pas présent sur les données Téthys. Mais ils sont explicables par la résolution du modèle. Ce dernier ayant une maille de résolution de 500 m, le modèle considère (là où il y a des pointillés rouges sur la figure) qu'il est sur la côte, et donc que les courants proches de cet endroit seront contraints par le trait de côte. Il apparaît donc à cet endroit une zone de turbulence qui n'existe pas sur les données réelles de terrain. En quelque sorte, plus les courants simulés seront proches de la côte, plus il y aura une grande différence entre les données simulées et *in situ*.

Chap III. Hydrologie

La quantité de données acquises lors des missions Cyrce pour les profils hydrologiques, tous les quelques centimètres, de la surface vers le fond, au moyen de la bathysonde SeaBird, est considérable. Une première opération a consisté, (tout en conservant les fichiers originaux d'acquisition sous forme d'archives en format natif) à intégrer dans un premier temps toutes ces valeurs, tous les 0.25m. Malgré cette réduction, et avant d'entreprendre cette étude hydrologique de la zone des bouches de Bonifacio, nous avons préféré fixer les idées de la plage de variabilité possible de l'ensemble des paramètres, toutes missions (et donc saisons confondues).

III.1. Norme des données des missions CYRCE

III.1.1. Tableau récapitulatif des données

Malgré le nombre de données acquises et la variabilité saisonnière constatée pour la plupart d'entre elles, nous pouvons cerner une plage de mesure raisonnable pour cette variabilité. Une première approche pour décrire la plage de mesure des variables et leurs bornes est présentée dans le Tableau III.1.

Tableau III.1: Borne des valeurs minimales et maximales pour tous les paramètres enregistrés durant CYRCE

Paramètres	Minimum	Maximum	Unité
Température	11.79	25.75	°C
Oxygène dissous	3.14	6.07	ml.l-1
Fluorescence	0.05	15.21	u.a
Transmission	24.16	89.02	%
Salinité	37.8	38.54	psu

La température est comprise entre 11.79°C et 25.75°C, l'oxygène dissous entre 3.14 et 6.07 ml/l, la fluorescence entre 0.05 u.a et 15.21 u.a, la transmission entre 24.16% et 89.02%, la salinité entre 37.8 (32.92 étant la valeur la plus faible enregistrée, mais elle est considérée comme valeur exceptionnelle et donc elle n'est pas retenue comme minimum pour la plage de mesure et traduit un phénomène particulier) et 38.54.

La distribution de ces valeurs rentre effectivement dans ce qui est classiquement reconnu comme étant leur plage de variabilité dans les eaux côtières en Méditerranée nord-occidentale.

Comme nous pouvons nous y attendre, les températures les plus basses sont enregistrées durant l'hiver et les plus hautes pendant l'été. Les températures les plus chaudes étant enregistrées au-dessus de la thermocline, cet aspect sera traité avec une attention plus particulière dans une des sections suivantes (III.4). C'est au printemps, donc au moment de la production (poussée de la biomasse planctonique), que la transmission (turbidité) affiche sa valeur la plus basse, correspondant donc à une eau de mer chargée en particules, et c'est en été que l'on retrouve un maximum de transmission (correspondant à des eaux claires).

Cependant, quelques anomalies se remarquent dans ces tendances générales, que nous énonçons ci-dessous. Par exemple, lors de CYRCE 1, les profils de salinité indiquaient une salinité minimum de 36.00 à la station 17 (profil numéro 27 effectué le 02/08/2004 à 22h31) située dans le golfe de Sant'Amanza, valeur qui a été écartée dans les tableaux récapitulatifs des normales. Or le golfe de Sant'Amanza semble souvent présenter des caractéristiques originales et nous y consacrerons donc dans ce manuscrit une section spécifique.

III.1.2. Comparaison avec d'autres sites méditerranéens

Les valeurs obtenues durant les missions CYRCE en ce qui concernent les normales et les bornes correspondent-elles à ce qui est classiquement rencontré en Méditerranée nord-occidentale ? Nous avons recherché ces informations à travers plusieurs études bibliographiques disponibles. Une étude historique conduite sur les températures de l'eau de mer en surface (à 1 m de profondeur), de 1885 à 1967, à Marseille indique des températures comprises entre 22°C et 25°C pour la saison estivale et jamais inférieure à 12°C pour la saison hivernale (Romano and Lugrezi, 2007 [68]), données confirmées par celles plus actuelles recensées dans la littérature comme Bensoussan, 2004 [7]. Ce qui correspond à celles rencontrées durant les missions CYRCE (minimum hivernal à 11.79°C et période estivale encadrée entre 23°C et 25°C).

Pour la salinité, tant pour les données de la littérature que pour celles mesurées lors des missions Cyrce, ces valeurs sont élevées avec des valeurs

comprises entre 37.5 et 38.2 en moyenne pour les eaux de surface de Méditerranée Nord Occidentale avec de faibles variations d'un mois à l'autre

Les bornes des distributions des valeurs, pour chaque paramètre et pour chacune des missions Cyrce sont présentées dans le Tableau III.2 et en sélectionnant dans le Tableau III.3, quatre missions représentatives d'une saison.

Tableau III.2: Récapitulatif des minima et maxima pour chaque variable par missions CYRCE

		Température	O ₂	% sat.O ₂	Fluorescence	Transmission	Salinité	Sigma t 00
CYRCE 1	min	13.63	3.14	67.12	0.05	73.86	36.55 ¹	21.68
	max	25.75	6.06	114.51	0.55	89.02	38.18	28.71
CYRCE 2	min	11.79	4.34	73.65	0.14	56.2	38.24	28.92
	max	13.18	5.94	100.21	1.99	85.16	38.47	29.17
CYRCE 3	min	12.9	3.71	64.92	0.06	24.16	38.19	28.73
	max	14.05	5.71	100.08	1.81	81.16	38.54	29.01
CYRCE 5	min	13.43	4.21	73.29	0.05	72.53	37.9	27.95
	max	16.59	5.35	97.63	0.41	85.99	38.34	28.89
CYRCE 6	min	13.34	4.33	0	0.08	76.73	37.99	26.21
	max	23.74	6.07	121.03	2.51	85.05	38.52	28.93

Tableau III.3: Récapitulatif des minima et maxima pour chaque variable par saison

		Température	O ₂	% sat.O ₂	Fluorescence	Transmission	Salinité	Sigma t 00
Hiver CYRCE 2	min	11.79	4.34	73.65	0.14	56.2	38.24	28.92
	max	13.18	5.94	100.21	1.99	85.16	38.47	29.17
Printemps CYRCE 3	min	12.9	3.71	64.92	0.06	24.16	38.19	28.73
	max	14.05	5.71	100.08	1.81	81.16	38.54	29.01
Été CYRCE 1 et 6	min	13.34	3.14	0	0.05	73.86	36.55	21.68
	max	25.75	6.06	114.51	2.51	89.02	38.52	28.93
Automne CYRCE 5	min	13.43	4.21	73.29	0.05	72.53	37.9	27.95
	max	16.59	5.35	97.63	0.41	85.99	38.34	28.89

¹ Valeur exceptionnelle : 32.92 station 17 CYRCE 1, 6.06 mg.l⁻¹ pour CYRCE 1

III.2. Les facteurs les plus déterminants par mission et par saison

Après avoir donné la norme d'encadrement des valeurs pour chaque variable, nous allons regarder quelles sont celles qui jouent le rôle le plus déterminant dans chaque mission CYRCE, permettant ainsi de prendre en compte la variabilité saisonnière. Pour ce faire, des ACP (Analyses en composantes principales) ont été réalisées (Annexe 4) pour chaque mission sur tous les profils effectués lors de cette mission. Nous admettons que les variables contribuant le plus aux facteurs 1 et 2 (parfois trois), résumant l'essentiel de l'information (aux alentours de 80% de la variabilité totale), sont les plus déterminants pour la spécificité hydrologique de chaque mission.

Tableau III.4: ACP par CYRCE pour toutes les variables

	Variables déterminantes du facteur 1	Variables déterminantes du facteur 2	Variables déterminantes du facteur 3
CYRCE 1 Août	Température Conductivité Sigma t 00	% saturation en oxygène dissous	
CYRCE 2 Mars	Température Conductivité Sigma t 00	Salinité	
CYRCE 3 Avril	Oxygène dissous Fluorescence Transmission	Salinité Sigma t 00	
CYRCE 4 Juillet	Température Conductivité Sigma t 00	Salinité	
CYRCE 5 Novembre	Température Conductivité Sigma t 00	Transmission	
CYRCE 6 Septembre	Température Conductivité Sigma t 00	Oxygène dissous	Transmission

La température, la conductivité (et donc la densité) sont les variables qui déterminent le plus fortement le facteur 1 pour toutes les missions CYRCE, excepté pour CYRCE 3. Ce sont donc pour celles-ci les paramètres physiques du milieu (éléments conservatifs) qui expliquent le mieux l'intercorrélation des valeurs alors que pour Cyrce 3, au printemps (avril), ce sont au contraire ceux qui dépendent de l'activité biologique (paramètres non-conservatifs : oxygène dissous, fluorescence et turbidité) qui apparaissent les plus déterminants pour l'ACP et en particulier pour le facteur 1.

Pour le facteur 2 des ACP, les variables les plus déterminantes changent pour les différentes missions CYRCE, mais dans l'ordre seulement dans le même petit nombre de paramètres. Celle qui détermine le plus fortement le facteur 2 est la salinité pour trois missions (CYRCE 2, 3, et 4). Pour les autres missions, les variables déterminant le facteur 2 sont le pourcentage d'oxygène dissous, la turbidité et l'oxygène dissous.

Une ACP est ensuite effectuée avec les mêmes variables (excepté la densité, et σ_t) mais regroupant plusieurs missions CYRCE par saison (Annexe 7 à Annexe 10), en fonction de la période à laquelle elles ont été effectuées. Afin de ne pas biaiser le résultat de l'ACP de la période d'été, CYRCE 4 n'a pas été pris en compte, car la sonde permettant de mesurer l'oxygène dissous et la fluorescence n'a pu être embarquée sur le bateau. Les résultats des ces ACP "saisonniers" sont synthétisés dans le tableau I-2, toujours pour les trois premiers facteurs.

En hiver, période à faible activité biologique et où la colonne d'eau est homogène entre la surface et le fond, les variables les plus déterminantes du facteur 1 sont la température, la conductivité et l'oxygène dissous alors que la profondeur n'est pas explicative. Au printemps, au contraire, ce sont la turbidité, la fluorescence et l'oxygène dissous, paramètres liés, plus ou moins directement à l'activité biologique.

En été, les variables les plus déterminantes du facteur 1 sont la température, la conductivité, comme en hiver, mais aussi la profondeur. Ce sont d'ailleurs ces trois paramètres qui jouent un rôle déterminant dans la stratification de la colonne d'eau en été où le système est caractérisé par un système bicouche.

En automne, les variables les plus déterminantes du facteur 1 sont la température, la conductivité et le pourcentage de saturation en oxygène dissous.

Tableau III.5: ACP par saison pour toutes les variables

	Mission	Variables déterminantes du facteur 1	Variables déterminantes du facteur 2	Variables déterminantes du facteur 3
Hiver	CYRCE 2	Température Conductivité Oxygène dissous	Salinité Fluorescence	Profondeur
Printemps	CYRCE 3	Fluorescence Turbidité Oxygène dissous	Température Conductivité Profondeur	Salinité
Été	CYRCE1 CYRCE 6	Température Conductivité Profondeur	Turbidité Salinité Oxygène dissous	
Automne	CYRCE 5	Température Conductivité % saturation d'oxygène	Turbidité	Salinité

III.3. Description des trois structures hydrologiques rencontrées dans la colonne d'eau au cours de l'année

Structure hydrologique homogène de la surface au fond en hiver et système bicouche (couche chaude surmontant des eaux froides) en été avec apparition ou disparition progressive de la thermocline aux intersaisons, sont des éléments structurants que nous allons retrouver dans les eaux des bouches de Bonifacio à travers quelques exemples (tous les profils étant présentés en Annexe 11). Ces exemples ont été choisis dans les profils de la station 1, située au sud des îles Lavezzi, c'est à dire dans la partie la plus étroite du détroit. Compte tenu de la variabilité au sein d'une même journée de certains paramètres hydrologiques (température, oxygène dissous, etc), en particulier en été, nous ne présenterons dans ce qui suit que les mesures d'un seul profil choisi comme étant représentatif de la période considérée.

III.3.1. Température et salinité

III.3.1.1. Description des trois situations rencontrées dans la colonne d'eau pour la température et la salinité

Dans les Figure III.1, Figure III.2, Figure III.3 sont représentés les profils de la température et de la salinité en respectivement en août, juillet et septembre. Ces trois exemples sont caractéristiques de situation "bi-couche" : couche d'eau chaude (>25°C) surmontant une couche plus froide (15 à 18°C), séparées par une thermocline, avec en correspondance une halocline pour la salinité.

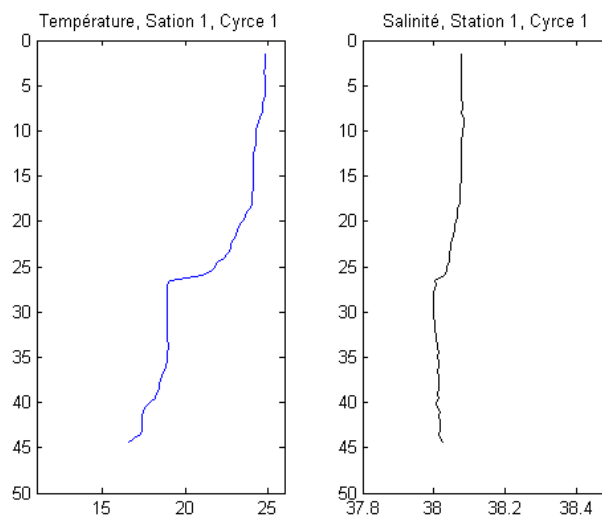


Figure III.1: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 1 (août), numéro de profil 1

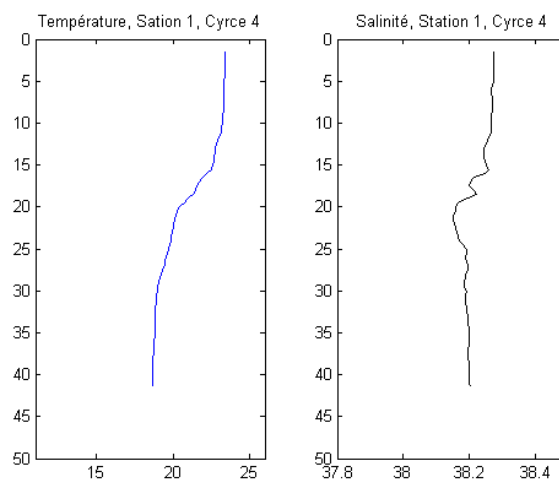


Figure III.2: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 4 (juillet), numéro de profil 123

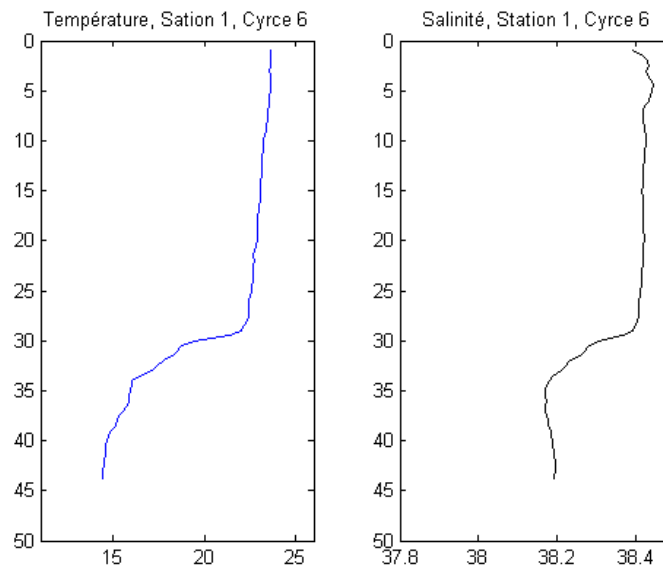


Figure III.3: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 6 (septembre), numéro de profil 178

Ces ruptures sont plus ou moins marquées et plus ou moins profondes selon les cas, et c'est pour septembre que ces ruptures sont les plus nettes et où pourtant la température des eaux chaudes est plus faible qu'en août.

Dans les figures III-4, III-5 et III-6 sont représentés les profils de température et de salinité en respectivement mars, avril et novembre, c'est à dire en situation de structure hydrologique "*homogène*" de toute la colonne d'eau. La température en mars (Figure III.4), de l'ordre de 13°C et la salinité (>38.2) sont caractéristiques des eaux hivernales méditerranéennes, et le léger réchauffement des eaux de surface en avril (Figure III.5) ne se traduit pas encore par l'apparition d'une thermocline, et celle-ci a presque disparu en novembre (Figure III.6), ces situations de transition sont associées à une salinité quasiment constante de la surface vers le fond, sans aucune halocline discernable.

Pour CYRCE 2, 3 et 5, la température est homogène à 13°C (pour CYRCE 2 et 3), et à 15.5°C pour CYRCE 5. Il en est de même pour la salinité avec des valeurs respectives de 38.3, 38.4 et 38.2. La température reste quasi identique à cette période, et elle correspond aux minima hivernaux, une légère différence de salinité est constatée avec comme valeurs respectives pour CYRCE 2, 3 et 5 de 38.32, 38.36 et 38.18.

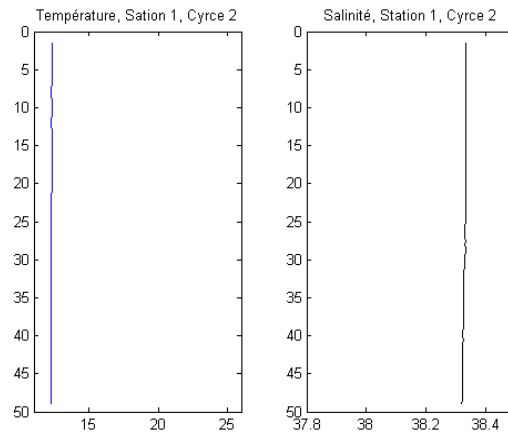


Figure III.4: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 2 (mars), numéro de profil 70

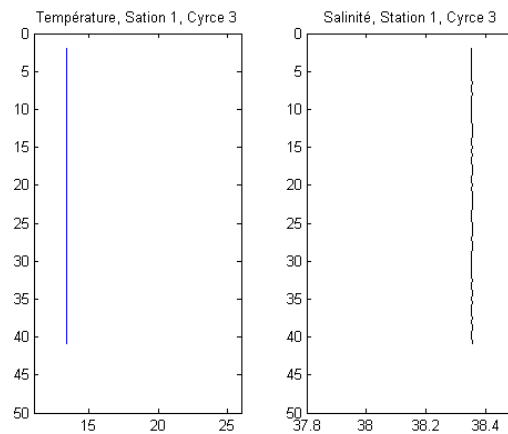


Figure III.5: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 3 (avril), numéro de profil 100

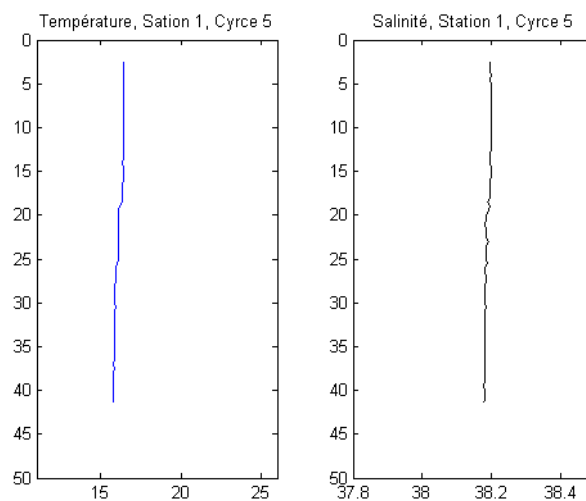


Figure III.6: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 5 (novembre), numéro de profil 161

En se référant à l'ensemble des profils hydrologiques des missions Cyrce, on pourra constater que les conclusions issues des exemples de la seule station 1 présentés ici sont applicables (avec des différences de détail) pour les autres stations. A savoir que d'une part que les valeurs saisonnières des paramètres conservatifs (température et salinité) et la structure hydrologique présentent, dans la zone étudiée ici, les caractéristiques générales des eaux méditerranéennes mais que de plus, il ya plus de différence d'une mission (donc d'une saison) à l'autre qu'il n'y en a, au sein d'une même mission, d'une station à l'autre.

Par la suite, nous verrons que nous avons pu recalculer les données CYRCE au jour et l'heure près, avec des données de l'équipe scientifique de la RNBB et qui enregistre à trois profondeurs la température de l'eau de mer à une fréquence semi-horaire.

III.3.1.2. Comparaison des températures de CYRCE avec les sites Med Change

Pour le confirmer, nous avons pu également accéder à des données d'enregistrement de la température en continu réalisées, à différentes profondeurs dans la réserve de Scandola (Corse) et à d'autres endroits en Méditerranée nord-occidentale, et recueillies par le programme ANR-Medchange (www.medchange.org et voir aussi : Bensoussan, *et al.*, 2010 [8]) .

Dans le Tableau III.6, nous présentons pour ces sites les valeurs de température moyenne mensuelles aux profondeurs correspondantes et pour les mois où ont été réalisées les températures des missions CYRCE.

D'un point de vue statistique, ces deux jeux de données sont assez différents. Les données CYRCE présentées ici sont les moyennes aux trois profondeurs, des températures enregistrées aux différentes stations des bouches de Bonifacio, sur une période de temps courte (1 à 5 jours), celle de la mission. A l'inverse les températures des sites Medchange sont recueillies en un seul point fixe, mais toutes les heures et donc les moyennes mensuelles sont très robustes statistiquement. En toute rigueur, ces deux jeux ne sont pas comparables. Nous ne le faisons pas d'ailleurs statistiquement. Néanmoins, ils permettent de constater que les données recueillies dans les missions CYRCE relèvent bien d'une typologie d'un type d'eau Méditerranéen nord-occidental, tant par le niveau des moyennes mensuelles que de leur répartition avec la profondeur.

Tableau III.6: Tableau des températures de l'eau de mer à 10, 20 et 40 m entre deux jeux de données. Le premier est constitué des données CYRCE toutes sessions confondues pour le mois correspondant au mois de la mission. Le second jeu de donnée est constitué de moyennes mensuelles d'enregistrement de température à fréquence horaire réalisées et recueillies en 2005 dans quatre sites de Méditerranée Nord Occidentale. Données programme ANR Medchange, (communication personnelle Jean Claude Romano).

Missions\Mois	Profondeur	Mars	Avril	Juillet	Août	Septembre	Novembre
CYRCE	10	12.31	13.57	23.18	24.57	22.16	16.19
	20	12.30	12.55	21.29	22.32	19.88	16.06
	40	12.59	13.49	15.76	15.89	14.71	15.66
Marseille 2005	10	12.86	13.45	18.03	18.38	21.57	18.52
	20	12.87	13.44	16.47	17.10	20.84	18.60
	40	12.62	13.19	14.27	14.73	16.75	17.94
Scandola *	10	12.92	14.51	23.04	23.49	22.59	19.07
	20	12.95	14.05	19.76	20.90	21.26	19.02
	40	12.70	13.18	14.80	15.09	15.54	18.00
Port Cros 2005	10	12.75	13.47	21.56	23.00	22.79	18.75
	20	12.81	13.45	17.92	20.57	21.95	18.48
	40	12.81	13.38	14.53	15.39	16.80	18.22
Ile Medes 2005	10	12.62	13.14	22.23	21.31	20.20	16.85
	20	12.50	12.96	20.96	20.65	19.65	16.81
	40	12.41	12.91	16.20	16.89	18.00	17.15
* juin 2005 à mai 2006							

A la période estivale, les valeurs de température enregistrées durant les missions CYRCE apparaissent légèrement supérieures à celles enregistrées aux autres sites Medchange et ce sur toute la colonne d'eau, excepté pour la profondeur de -40 m sur le site des îles Medes (avec des valeurs respectives pour CYRCE et les îles Medes de 15.67°C et 16.20°C en juillet, de 15.89 °C et 16.89°C en août et 14.71°C et 18°C pour septembre là où l'écart de température est le plus grand).

A l'inverse de la saison estivale, les températures d'automne (novembre) sont plus froides en général que celles indiquées pour les stations Medchange avec des écarts allant de 0.66°C à 2.88°C (écart le plus important avec le site de Scandola).

Au printemps et en hiver, les températures de CYRCE apparaissent dans la norme des températures de la saison c'est-à-dire aux alentours de 12°C pour mars et compris entre 12.90 et 14.50 pour avril et ne montrent pas de différence notable avec les stations Medchange (avec comme comparaison entre les maxima et minima à -10 m, une différence comprise entre 0.31°C et 0.61°C pour mars, entre 0.43°C et 0.94°C pour avril).

Ce qui peut paraître surprenant c'est qu'il semble y avoir souvent plus de différence entre les sites Bonifacio et Scandola, proches géographiquement qu'avec les autres sites plus éloignés : températures plus faibles en hiver et plus élevées en été, à Bonifacio qu'à Scandola.

Néanmoins, dans l'ensemble, ces résultats apparaissent cohérents puisque c'est ce qui est classiquement rencontré en Méditerranée nord-occidentale (comme à Marseille par exemple, Abboud-Abi Saab, et al., 2004 [1]). Avec une originalité au niveau des températures de l'eau de mer, à différentes profondeurs, qui sont en général plus élevées à Bonifacio et Scandola, c'est à dire en Corse, qu'aux autres sites de la façade continentale, ce qui est explicable par la position en latitude de la Corse.

Si en ce qui concerne les paramètres physiques, la zone des bouches de Bonifacio ne s'originalise pas (ou peu) de ce que l'on peut rencontrer ailleurs dans le bassin nord-occidental de la méditerranée, qu'en est-il des paramètres non-conservatifs des eaux marines, c'est à dire de ceux qui, pour tout ou partie, dépendent eux de la production biologique, c'est à dire l'oxygène dissous, la fluorescence et la salinité ? C'est ce que nous allons examiner maintenant.

III.3.2. Oxygène dissous et pourcentage de saturation

Comme précédemment, nous avons choisi d'illustrer la dynamique saisonnière des ces paramètres non-conservatifs, à partir de quelques exemples issus des mesures à la station 1, choisis comme cohérent sur le plan de l'heure de mesure, puisque certains, donc l'oxygène dissous peuvent varier au cours de la journée.

Comme illustration de l'évolution saisonnière de l'oxygène dissous, nous présentons comme exemple les données de profil réalisées à la station 1 pour les différentes missions CYRCE. Pour des commodités de lecture, nous présenterons ainsi successivement les profils des situations estivales (CYRCE 1 et 6 Figure III.7 et Figure III.8), et hivernales (CYRCE 2, 3 et 5 - Figure III.9 à Figure III.11).

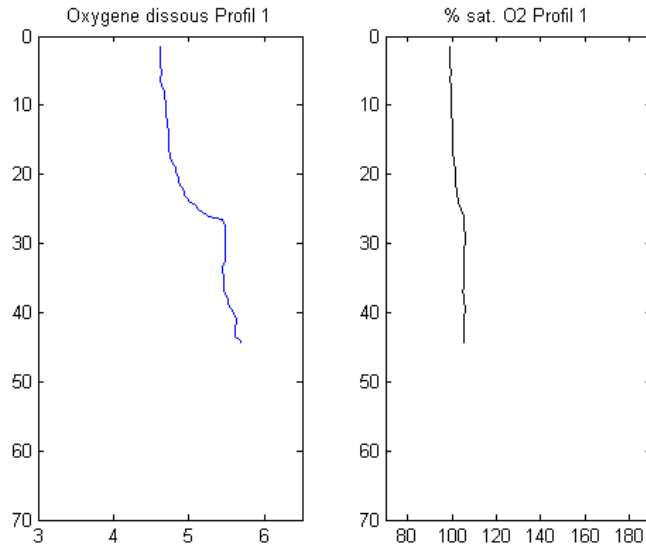


Figure III.7 : Profils d’oxygène dissous et de Pourcentage de saturation effectués à la Station 1 durant CYRCE 1 (août), numéro de profil 1

En août (CYRCE 1-Figure III.7) la concentration en oxygène dissous est homogène à 5.7 ml.l^{-1} et le pourcentage de saturation voisin de 100% jusqu'à 30m, avec ensuite une légère augmentation de ces deux valeurs sous la thermocline, ce second élément pouvant laisser supposer une certaine contribution biologique à ces concentrations en oxygène.

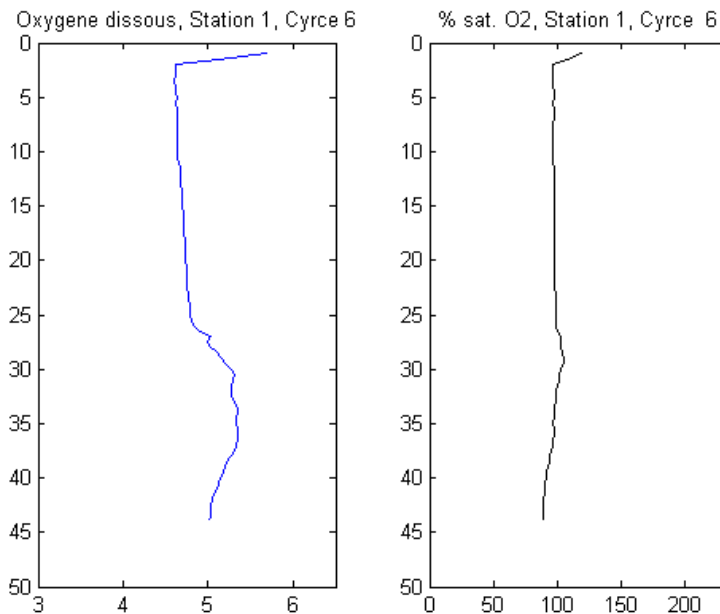


Figure III.8 : Profils d’oxygène dissous et de pourcentage de saturation effectués à la Station 1 durant CYRCE 6 (septembre), numéro de profil 178

A l'automne (CYRCE 6 - Figure III.8), on remarque d'abord les très fortes concentrations en oxygène dissous dans les trois premiers mètres, atteignant près 6 ml.l⁻¹, mais chutant en moins de deux mètres à 5.1 ml.l⁻¹, ainsi qu'une baisse parallèle du pourcentage de saturation alors que la température et la salinité varient peu (fig. III-3 plus haut). Cette augmentation des concentrations en oxygène dissous est vraisemblablement la conséquence du fort brassage des eaux de surface par le vent soufflant de 11 à 16 nœuds (40 à 55 km.h⁻¹) et de la forte agitation de la mer, enrichissant les eaux de surface par l'oxygène de l'air. Pour le reste du profil, il rappelle celui de CYRCE 1 avec des concentrations de 5 ml.l⁻¹ jusqu'à la thermocline (-25m à -30 m) puis un pic se répartissant sur une dizaine de mètres de profondeur avec, en correspondance, une légère indentation du pourcentage de saturation qui diminue régulièrement jusqu'à -45 m où il est même inférieur au pourcentage de saturation théorique, traduisant une consommation biologique.

En résumé, en situation bi-couche avec thermocline estivale très marquée, cette structuration hydrologique se retrouve également dans les concentrations en oxygène dissous, avec des variations liées à l'activité biologique.

En cas de situation hivernale (CYRCE 2 et CYRCE 3 - fig.III-9 & III-10), comme d'ailleurs pour la situation automnale tardive de CYRCE 5 (fig. III-11), c'est à dire avec une structure homogène pour toute la colonne d'eau, nous constatons la même monotonie verticale pour les teneurs en oxygène dissous et le pourcentage de saturation avec la profondeur. Les concentrations en oxygène dissous sont comprises entre 5 et 6 ml.l⁻¹, (supérieure donc à celles de l'été) comme le pourcentage de saturation qui est voisin de 100%.

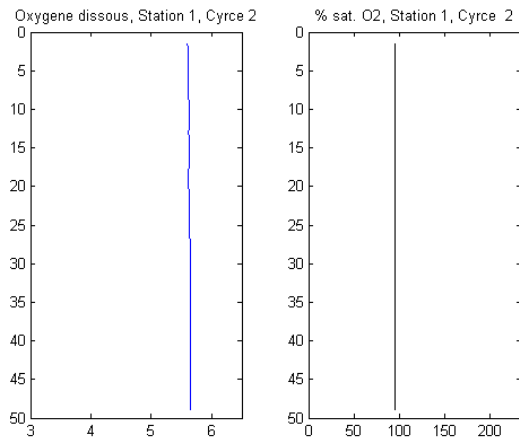


Figure III.9: Profils d'oxygène dissous et de Pourcentage de saturation effectués à la Station 1 durant CYRCE 2 (mars), numéro de profil 70

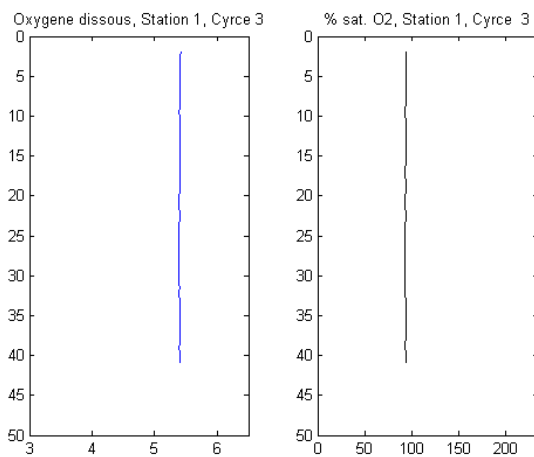


Figure III.10 : Profils d'oxygène dissous et de Pourcentage de saturation effectués à la Station 1 durant CYRCE 3 (avril), numéro de profil 100

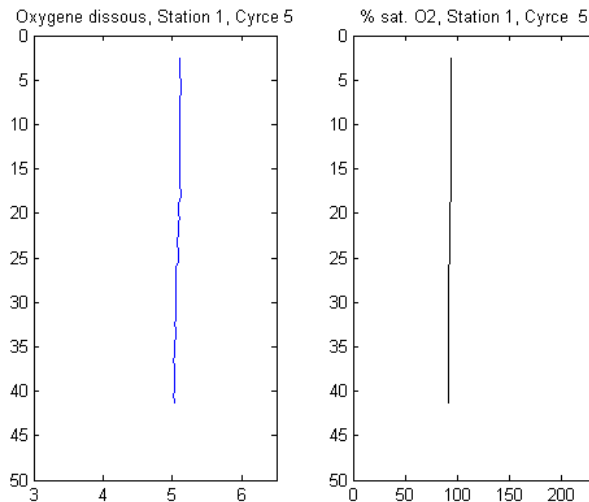


Figure III.11 : Profils d'oxygène dissous et de Pourcentage de saturation effectués à la Station 1 durant CYRCE 5 (novembre), numéro de profil : 161

En situation hivernale, ou aux inter-saisons, en l'absence d'activité biologique significative dans les eaux, l'homogénéité constatée pour les paramètres conservatifs, se retrouvent donc également pour les teneurs en oxygène dissous. On pourra constater, en se reportant aux annexes, que les conclusions tirées de ces exemples de la station 1, sont valides dans l'ensemble pour les autres stations Cyrce, à époque comparable.

Une grande partie de l'évolution saisonnière de l'oxygène qui est donc déterminée par les caractéristiques physiques de l'eau de mer. Mais ce ne sont pas les seules et c'est pour cela que nous allons examiner maintenant sur ces mêmes profils l'évolution de marqueur de la biomasse.

Les marqueurs de la biomasse planctonique, Rappel :

Deux types de capteurs embarqués sur la bathysonde peuvent fournir des indications de la présence d'organismes dans l'eau: le fluorimètre et le transmissiomètre. Rappelons brièvement les fonctions (exposées en détail dans la partie matériels et méthodes). Le fluorimètre fournit, par la mesure de la chlorophylle, une indication de la biomasse des organismes phytoplanctoniques dans l'eau, il est donc spécifique des producteurs primaires phytoplanctoniques. Le second, le transmissiomètre, est à spectre de réponse plus large : mesurant la « clarté » de l'eau, une baisse de sa réponse indique une augmentation de la turbidité causée soit par des particules inertes, minérales ou organiques, soit des particules « vivantes »

(phytoplancton ou zooplancton), on considère ici que les bactéries ne peuvent contribuer significativement à une baisse de la transmission qu'en cas d'accident écologique). Rien ne permet de séparer *a priori* les contributions des particules inertes de celles du zooplancton, organismes qui ne contenant pas de chlorophylle ne peuvent être détectés, en parallèle, par le fluorimètre. Le phytoplancton contribue aussi, quand sa densité est suffisante, à faire baisser le pourcentage de transmission, mais il contribue spécifiquement aux mesures du fluorimètre. C'est en ayant présent à l'esprit les réponses différentes de ces deux appareils que nous allons maintenant examiner les profils que nous avons sélectionnés.

III.3.3. Fluorescence et Transmission

Pour illustrer l'évolution saisonnière de la fluorescence et du pourcentage de transmission, nous présentons comme exemple les profils réalisés à la même station 1 et pour les mêmes missions CYRCE que précédemment. Pour des commodités de lecture, nous présenterons ainsi successivement les profils des situations estivales (CYRCE 1, 4 et 6 - fig III-12, III-13 et III-14), et aux autres saisons (CYRCE 2, 3 et 5 - fig III-15 à III-17).

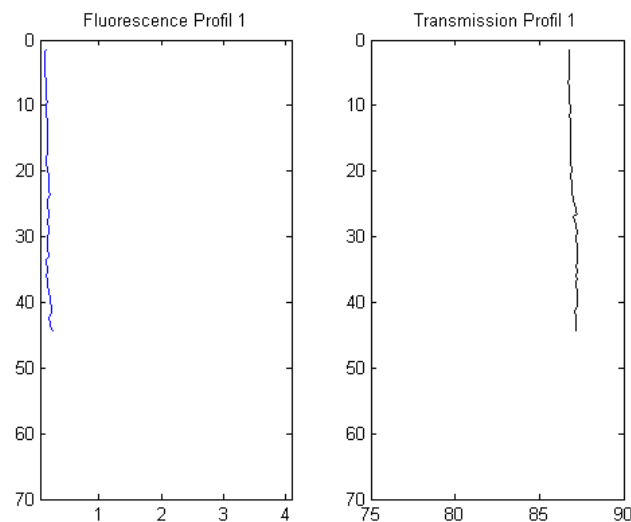


Figure III.12: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 1 (août), numéro de profil : 1

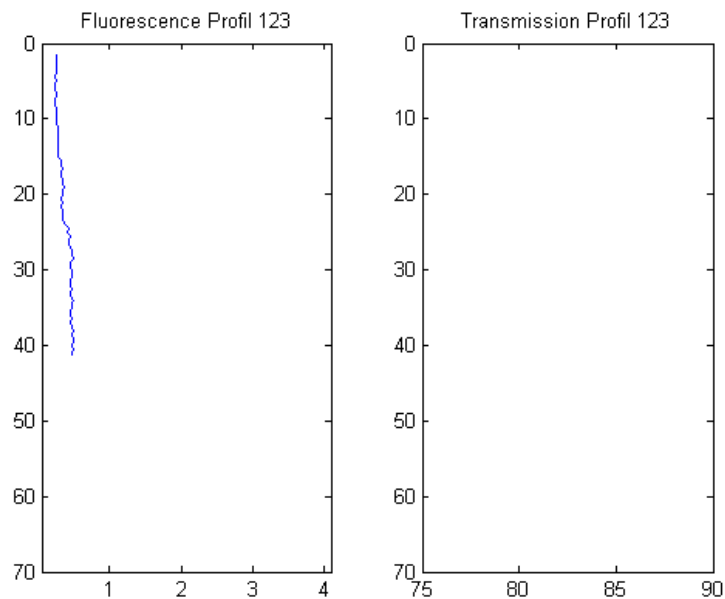


Figure III.13: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 4 (juillet), numéro de profil : 123

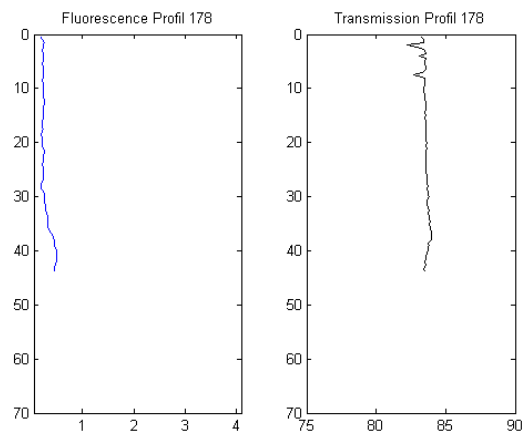


Figure III.14: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 6 (septembre), numéro de profil : 178

Pour la situation estivale, la fluorescence et la transmission sont homogènes dans la colonne d'eau à 0.15 u.a et 86 % pour CYRCE 1. En revanche, la fluorescence tend à augmenter en profondeur pour CYRCE 4 (nous verrons plus tard que la fluorescence de CYRCE 4 fait l'objet d'une étude de cas particulier, puisqu'associé à un très fort bloom phytoplanktonique dans une partie des bouches de Bonifacio) et CYRCE 6. Et dans ces deux cas cette augmentation de fluorescence est accompagnée par une légère diminution de la transmission. Nous avons vu, pour Cyrce 6 (septembre), l'oxygène dissous augmente aussi en profondeur, au niveau de la thermocline (≈ -30 m). Avec aussi à ce niveau une légère augmentation du

pourcentage de saturation, l'ensemble de ces éléments traduisant sans doute la présence d'une biomasse phytoplanctonique active, poussée post-estivale souvent constatée dans les eaux méditerranéennes.

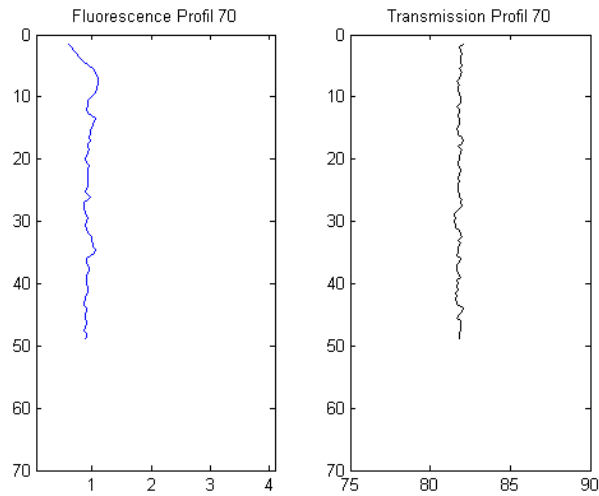


Figure III.15: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 2, numéro de profil : 70

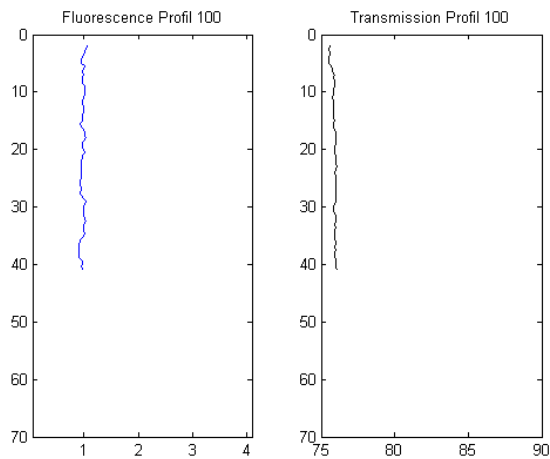


Figure III.16: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 3, numéro de profil : 100

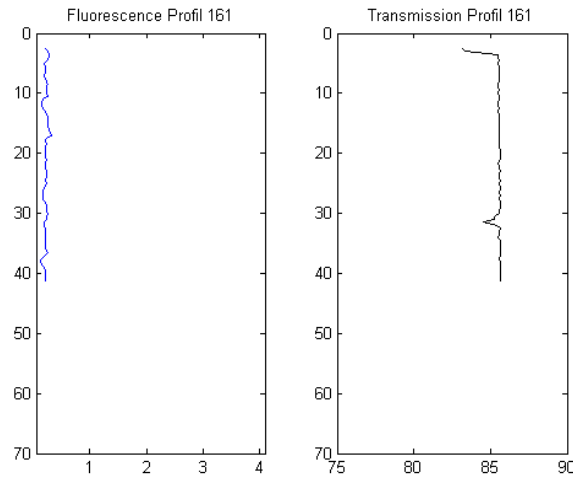


Figure III.17: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 5, numéro de profil : 161

En hiver et aux intersaisons, les profils de fluorescence dans la colonne d'eau, fluctuent autour d'une valeur moyenne, traduisant l'hétérogénéité de la distribution des particules d'une mesure à l'autre (notons que certains "creux" dans les valeurs de transmission sont sans doute liés à la présence ponctuelle et aléatoire de particules de plus grosses taille dans l'instrument). Pour les profils de la station 1, les valeurs de printemps sont les plus fortes de l'année (environ 1 ml/l) correspondant à la période de bloom phytoplanctonique printanier. En été la fluorescence affiche des valeurs plus basses comprises entre 0.2 et 0.6 ml/l, et décroît en profondeur. La fluorescence étant la mesure de la quantité de chlorophylle "particulaire" en suspension dans l'eau, donc de phytoplanctontes, une tendance à la diminution en profondeur de cette variable s'explique essentiellement par la diminution de lumière ne permettant pas à ces organismes de subvenir à leurs besoins en énergie, ceux-ci étant donc plus nombreux en surface.

A la différence des trois autres paramètres examinés précédemment, ces indicateurs de biomasse que sont la fluorescence et la transmission, ne dessinent pas de schéma saisonnier nets, et, de plus, au sein d'une même mission, leurs évolutions d'une station à l'autre, d'un jour à l'autre, d'une partie des bouches de Bonifacio à l'autre, peuvent être un peu (voire très) différentes, comme on peut le constater en se référant à la totalité des profils donnés en Annexe 11. Ceci n'a rien d'étonnant. La biomasse et l'activité planctonique sont certes dépendantes des caractéristiques du milieu à l'échelle saisonnière : poussée phytoplanctonique printanière et parfois (pas toujours) post estivale plus faible, suivie d'un

développement de consommateurs secondaire. Le reste du temps, comme en été, on constate surtout la présence d'un bruit de fond biologique, Mais ce schéma, s'il est globalement attesté par les missions Cyrce, est aussi déterminé par des conditions locales, à petite échelle d'espace et de temps, sans que l'on en comprenne toujours le déterminisme. En témoigne le cas de la poussée phytoplanctonique s'étant produite dans les bouches de Bonifacio, et que nous examinons plus loin.

Dans la partie qui précède, nous avons pris comme exemple illustratif une seule station. Nous avons montré précédemment que les caractéristiques de station à station peuvent présenter des variations faibles, mais significatives selon leur position. Néanmoins, elles présentent la même dynamique saisonnière que celle des eaux méditerranéennes que nous allons résumer ci-dessous.

Au printemps, quand la température commence à augmenter, une légère stratification de l'eau apparaît, amorce de la formation de la thermocline. L'inverse se produit également à l'automne, où l'on peut trouver sur certains profils un reste de thermocline qui tend à disparaître. En effet, à cette saison la température ambiante et l'irradiance diminuent, accompagnées souvent par des conditions météorologiques plus violentes qu'en hiver entraînant un brassage de l'eau, homogénéisant la colonne d'eau. La fluorescence, l'oxygène dissous et la transmission sont homogènes. Leurs valeurs correspondent à des normes d'intersaison, plus faibles qu'en hiver, mais plus élevées qu'en été.

En hiver la température (entre 11.79 et 13.18, les plus basses de l'année) et la salinité (entre 38.24 et 38.47) sont homogènes dans la colonne d'eau. La turbidité est comprise entre 80 et 84 %, donc des eaux faiblement turbides. Autrement dit, les organismes benthiques et les espèces démersales vivants dans la zone étudiée des bouches de Bonifacio, qui sont les mêmes que celles que l'on trouve ailleurs dans le bassin nord-occidental, se retrouvent dans des conditions écologiques pendant cette période tout à fait comparable à celles des autres populations.

En été, où les températures enregistrées sont les plus chaudes de l'année, la colonne d'eau est séparée en deux couches par une thermocline marquée:

-des eaux de surface chaudes (au dessus de -22.50 m, le maximum et minimum de température sont compris entre 25.75°C et 15.38°C, pour CYRCE 1) et souvent instables au dessus de la thermocline,

- des eaux froides et stables en dessous de la thermocline (au dessous de -22.50 m, le maximum et minimum de température sont compris entre 22.51°C et 13.63°C, pour CYRCE 1).

La salinité en été est également séparée en deux couches délimitées par la halocline qui correspond le plus souvent à la position de la thermocline, présentant : des eaux en surface variant entre 38.16 et 37.75 (pour CYRCE 1) au dessus de la halocline et des eaux en profondeur variant entre 38.18 et 37.89 (pour CYRCE 1) au-dessous de la halocline. Le plus souvent la salinité est homogène sur les premiers mètres, puis tend à diminuer dans la zone du palier de la thermocline, une fois ce palier dépassé, la salinité croît à nouveau.

Les organismes benthiques et les espèces démersales, qui vivent près du fond et ne se déplacent que rarement à la surface, se retrouvent dans une situation thermique proche de l'hiver. Elles ne sont donc que peu soumises à des changements de leurs conditions environnementales. Il n'en est pas de même les organismes marins (sessiles, végétaux ou animaux) adaptés à ces horizons. Ceux-ci vont subir des chocs thermiques importants et fréquents, mais auxquels ils sont adaptés. Le problème se pose en cas de vague de chaleur comme en fin d'été 1999. Lors de cette anomalie thermique (Romano, *et al.*, 2000 [67]), une température estivale s'était maintenue pendant plus de deux semaines en fin d'été jusqu'à des profondeurs de -40, -45 m. Ceci avait occasionné des mortalités massives d'organismes benthiques en de très nombreux points en Méditerranée nord-occidentale (Cerrano, *et al.*, 2000 [15] ; Perez, *et al.*, 2000 [59]) y compris à Scandola (Haute-Corse). Dans ce genre de situation, les organismes benthiques et espèces démersales, adaptés à un milieu plus stable que les eaux de surface et à des moyennes de températures estivales significativement plus froides, peuvent difficilement s'adapter à ces changements brutaux. Les missions ponctuelles CYRCE, qui comme nous l'avons vu, reflètent assez fidèlement les conditions estivales standards, ne peuvent rendre compte de ces événements exceptionnels, mais malheureusement de grande importance écologique. La situation bi couche que nous venons de décrire reste valable, mais l'anomalie de 1999, puis celles d'août 2003 et de juillet 2006, montrent que ce schéma général doit être nuancé.

L'oxygène dissous (compris entre 3.14 et 6.07 ml.l⁻¹) est élevé pour des valeurs estivales. Dans le cas classiquement rencontré en Méditerranée nord-occidentale, les valeurs d'oxygène dissous estivales sont généralement faibles par rapport à l'hiver et au printemps, « *conséquence normale de la capacité de solubilisation des gaz dans l'eau en fonction de la température* » (Bensoussan, 2004 [7]). Cependant, les missions d'été (CYRCE 1 et CYRCE 6) présentent des valeurs à 6 ml.l⁻¹ au alentour de 30 m de profondeur, accompagnées d'un pourcentage de saturation en oxygène dissous au alentour de 110-113% et d'une fluorescence inférieure à 1 u.a. Ces fortes valeurs en oxygène dissous ne peuvent donc pas être attribuées à l'activité biologique. En revanche, nous constatons une légère diminution de la salinité au alentour de 30 m de profondeur signature d'une veine d'eau locale, qui expliquerait l'augmentation de l'oxygène dissous qui dépend de la température et de la salinité (ces derniers jouant un rôle quant à la capacité d'un milieu liquide à être saturé en gaz). Le dernier fait qui sera remarqué pour confirmer cette hypothèse est que toutes les valeurs fortes en oxygène dissous se rencontrent sur la station 4 (partie ouest du détroit, loin des côtes, dans une zone de fort hydrodynamisme) sujette plus facilement à des veines d'eau que des stations plus « côtières ». Les eaux sont claires, car la turbidité est la plus élevée avec un pourcentage de 89.02%. En ce qui concerne les paramètres conservatifs (température et salinité) un test «t» a été utilisé pour comparer les moyennes de température et de salinité, de part et d'autre de la thermocline, pour CYRCE 4. Avec une probabilité $p < 0.001$, H_0 (hypothèse nulle, ne postulant aucune différence significative entre les échantillons) peut toujours être rejetée. Dans les bouches de Bonifacio, en juillet, et en été plus généralement, la structure hydrologique peut être différenciée en deux parties en ce qui concerne la température et la salinité, au dessus et au dessous de la profondeur de -20 m où se trouve en général la thermocline.

III.4. La thermocline d'été

Les trois systèmes classiquement rencontrés dans la colonne d'eau en Méditerranée nord-occidentale sont donc identifiés sur les missions CYRCE : structure homogène hivernale, structure bi-couche estivale, transition entre les deux au printemps et à l'automne. Nous allons maintenant nous intéresser plus particulièrement au système bi couche de la saison estivale tel qu'il a pu être

enregistré dans les bouches de Bonifacio. La partie des bouches de Bonifacio, dans laquelle les stations hydrologiques Cyrce ont été effectuées, se trouve majoritairement dans ce que l'on peut considérer, sur le plan océanographique, comme une couche superficielle car d'une épaisseur ne dépassant généralement pas 100 m. Cette couche, se trouvant sur l'effet direct de l'éclairement solaire, des échanges thermiques avec l'atmosphère, et du brassage provoqué par les vents, est plus ou moins homogène en hiver et se trouve être le siège en été, de la formation d'une thermocline. En effet, au printemps, la température des eaux de surface augmente, par absorption d'énergie solaire. La pénétration de cette énergie est limitée en profondeur et donc une thermocline saisonnière se forme. Sa pente est d'autant plus forte que le réchauffement en surface est plus rapide et que la mer est calme (Ivanoff, 1972 [34]). Cette structure va avoir un rôle déterminant dans la distribution verticale des espèces benthiques mais aussi des organismes phytoplanctoniques, la thermocline constitue une barrière empêchant des échanges thermiques ou chimiques verticaux, ce qui lui confère un rôle important sur le plan chimique et biologique.

Nous avons cherché à caractériser ces masses d'eaux, part et d'autre de la thermocline, mais pour cela, il fallait identifier la profondeur à laquelle se situe cette dernière. Seulement plusieurs définitions de la thermocline existent. La première divise la colonne d'eau en deux régions, l'une chaude, l'autre froide, séparée par une surface plus ou moins courbe dans l'espace sous marin. L'autre définition divise la colonne d'eau en trois régions thermiques, la tranche d'eau chaude en surface, en général peu stratifiée, qui est appelé épilimnion (par les limnologues) ou «couche superficielle de mélange», tandis que la région thermique froide est appelée hypolimnion (Leblond and Orvig, 1982 [42]). Historiquement la couche de transition thermique fut appelée successivement :

- Couche de discontinuité par Wedderburn, 1907 [79],
- Thermocline par Brige, 1897 [14] indiquant une région thermique dans laquelle le gradient de température dépasse le niveau de 1°C, définie comme étant le plan où le gradient de température est maximal.
- Et redéfini par le terme métalimnion comme étant la région délimitée mathématiquement par deux plans Hutchinson, 1957 [33].

Tableau III.7: Minimum et maximum observé pour chaque variable au-dessus et en dessous de la thermocline pour chaque mission d'été

			Temp	Cond	O2	% sat	Fluo	Trans	Sal	Sig T	Prof thermo
Cyrce 1	Au dessus	min	15.38	46.56	3.14	67.12	0.08	86.32	37.75	25.33	20
		max	25.75	58.11	6.01	114.51	0.44	87.94	38.16	28.17	40
		max-min	10.37	11.55	2.87	47.39	0.36	1.61	0.41	2.84	
	En dessous	min	13.63	44.96	4.95	86.21	0.11	73.86	37.89	26.38	20
		max	22.51	54.38	6.06	113.86	0.56	89.02	38.18	28.71	40
		max-min	8.88	9.42	1.11	27.65	0.44	15.16	0.29	2.33	
Cyrce 4	Au dessus	min	14.64	46.02	x	x	0.06	x	37.88	25.68	20
		max	25.58	58.19	x	x	3.26	x	38.45	28.51	50
		max-min	10.93	12.16	x	x	3.20	x	0.57	2.83	
	En dessous	min	13.13	44.54	x	x	0.24	x	38.07	26.69	20
		max	21.97	54.03	x	x	15.21	x	38.33	28.90	50
		max-min	8.84	9.49	x	x	14.97	x	0.26	2.20	
Cyrce 6	Au dessus	min	14.39	45.80	4.50	92.07	0.08	79.55	38.10	26.27	10
		max	23.72	56.26	6.07	114.50	0.47	84.58	38.47	28.61	35
		max-min	9.33	10.46	1.57	22.43	0.39	5.03	0.37	2.34	
	En dessous	min	13.34	44.78	4.33	75.12	0.11	76.73	37.99	26.94	10
		max	21.67	53.95	6.03	113.45	0.64	85.05	38.45	28.93	35
		max-min	8.33	9.17	1.70	38.33	0.53	8.32	0.46	1.99	

Tableau III.8: Variation minimale et maximale au dessus et en dessous de la thermocline pour chaque variable au cours des trois missions d'été

			Temp	Cond	O2	% sat	Fluo	Trans	Sal	Sig T
cyrce 1	au dessus	min	1.79	2.06	0.30	2.34	0.00	0.15	0.04	0.49
		max	9.82	10.92	1.45	16.14	0.20	1.29	0.25	2.53
	en dessous	min	1.23	1.25	0.07	0.61	0.00	0.13	0.01	0.35
		max	7.01	7.54	0.93	21.88	0.41	13.61	0.21	1.83
cyrce 4	au dessus	min	0.75	0.84	-	-	0.06	-	0.02	0.21
		max	9.64	10.88	-	-	3.02	-	0.44	2.46
	en dessous	min	0.80	0.82	-	-	0.08	-	0.02	0.20
		max	5.49	5.87	-	-	14.33	-	0.23	1.35
Cyrce 6	au dessus	min	0.24	0.25	0.10	0.73	0.02	0.15	0.03	0.09
		max	8.05	8.98	1.37	15.81	0.31	4.62	0.34	1.97
	en dessous	min	0.33	0.32	0.04	0.73	0.02	0.08	0.01	0.09
		max	4.51	4.69	1.54	33.99	0.41	7.26	0.31	1.11

Nous allons donc analyser les données de part et d'autre de la thermocline pour les trois missions d'été qui sont CYRCE 1, 4 et 6. Pour ce faire, la colonne d'eau est divisée en deux (en adoptant une terminologie en usage dans les eaux continentales où les différences sont encore plus tranchées qu'en mer) : entre la fin de la partie métalimnion et le début de l'hypolimnion. Puis pour chaque partie au dessus et au dessous de cette thermocline, nous avons regardé pour chaque variable quels sont les minima et les maxima obtenus ainsi que la différence entre le minimum et le maximum. Il est important de garder à l'esprit que cette différence est juste une indication, car elle est calculée entre le minimum et le maximum observé entre tous les profils. Nous présentons ensuite un second tableau récapitulatif des plus faibles et les plus grandes variations observées par profils.

C'est dans les eaux situées au-dessus de la thermocline que les écarts thermiques sont les plus importants, avec des températures plus chaudes (de 25.75°C à 15.38°C pour CYRCE 1, de 25.38°C à 14.64°C pour CYRCE 4 et de 23.72°C à 14.39°C pour CYRCE 6), alors qu'en dessous de la thermocline, les températures sont plus froides (de 22.51°C à 13.63°C pour CYRCE 1, de 21.97°C à 13.13°C pour CYRCE 4 et de 21.67°C à 13.34°C pour CYRCE 6) et présentent moins de variations. Il en est de même pour la conductivité (de 58.11 à 46.56 au dessus de la thermocline et comprise entre 54.38 et 44.96 en dessous, pour CYRCE 1) et sigma T00 (densité, comprise entre 28.17 et 25.33 au dessus de la thermocline et 28.71 et 26.38 en dessous) qui présentent plus de variations au dessus de la thermocline qu'en dessous.

Pour CYRCE 1 et au-dessus de la thermocline, la plus faible différence de température est de 1.78°C et la plus forte est de 9.82°C alors qu'en dessous de la thermocline la plus faible différence est de 1.23°C et la plus forte est de 7°C. Ce résultat se retrouve pour CYRCE 4 et 6 avec respectivement 0.74°C et 0.23°C pour les différences les plus faibles et 9.64°C et 8.05°C pour les différences les plus élevées au-dessus de la thermocline et respectivement 0.79°C et 0.33°C pour les différences les plus faibles et 5.49°C et 4.50°C pour les différences les plus élevées en dessous de la thermocline. La couche de surface étant directement en contact avec les températures atmosphériques et recevant directement la lumière incidente, se trouve en effet plus chaude que celle située en dessous de la couche nommée hypolimnion.

La salinité varie plus au-dessus de la thermocline avec des écarts entre les minima et maxima des missions de 0.41, 0.57 et 0.37 pour respectivement CYRCE 1, 4 et 6, qu'en dessous de la thermocline avec des écarts de 0.29, 0.26 et 0.46 pour les mêmes missions. Ce résultat se retrouve également dans le Tableau III.8, où l'on rencontre les plus grands écarts par profil au dessus de la thermocline.

L'oxygène dissous présente deux cas différents en fonction de la saison de prélèvement. Pour CYRCE 1 (août), l'oxygène dissous est plus concentré et varie plus en dessous de la thermocline (de 4.95 à 6.06 ml.l⁻¹, avec une différence de 1.11) qu'au dessus (allant de 3.14 à 6.01 ml.l⁻¹, avec une différence de 2.87). Les plus fortes concentrations sont donc en dessous de la thermocline, là où se trouve majoritairement plus de phytoplanctons, traduits par une fluorescence plus élevée en dessous de la thermocline variant de 0.11 u.a à 0.56 u.a qu'au-dessus (0.08 u.a à 0.44 u.a). Cette présence est également attestée par le pourcentage de transmission, plus élevé sous la thermocline (entre 67.12 et 114.51%) qu'au-dessus entre 86.21 et 113.86%. En été, les températures étant trop chaudes et la lumière trop forte en surface, les communautés phytoplanctoniques ne peuvent se développer qu'en dessous de la thermocline où elles trouvent des conditions physiques plus adaptées à leurs besoins. Il serait possible de constater la part du biologique dans la production d'oxygène dissous mesuré par le pourcentage de saturation en oxygène dissous (si ce dernier est supérieur à 100%, l'activité biologique est considérée comme ayant une part certaine dans la production d'oxygène), cependant dans le cas de CYRCE 1, ce pourcentage varie plus au dessus de la thermocline et les deux maxima sont au-dessus à 114% et en dessous à 113 %, ce qui ne permet pas de confirmer ces hypothèses.

En revanche pour CYRCE 6 (septembre, donc fin de la période estivale), l'oxygène dissous affiche des valeurs plus élevées dans les eaux de surface, au-dessus de la thermocline (comprises entre 4.50 ml.l⁻¹ et 6.07 ml.l⁻¹, différence de 1.57) à cause, nous l'avons vu d'un fort brassage des eaux de surface, et non par la présence du phytoplancton, puisque ce dernier d'après les valeurs de fluorescence (de 0.08 à 0.47 u.a au dessus de la thermocline, de 0.11 à 0.64 en dessous) se concentre plus en dessous de la thermocline. Cette présence des organismes phytoplanctoniques en dessous de la thermocline se traduit également au travers des valeurs de transmission, qui présente la valeur la plus basse (76.73%) avec la

plus forte variation (8.32 pour la différence entre minimum et maximum, et 7.26 pour la plus grande différence observée sur un profil).

En général, l'oxygène dissous est présent en plus grande concentration au dessus de la thermocline, car en effet c'est à travers la surface que ce produit la majeure partie des échanges avec l'atmosphère beaucoup plus riche en oxygène.

III.5. Les floraisons phytoplanctoniques dans les bouches de Bonifacio : un exemple de poussée printanière classique (mars 2005-CYRCE 3)

Nous venons de voir qu'en situation hivernale les paramètres comme l'oxygène dissous, reflètent de la qualité des eaux, dépendent peu des variables biologiques, mais essentiellement des paramètres conservatifs (température et salinité). Ceci est normal puisque cela correspond à une période de faible biomasse et de dormance des organismes. À l'inverse dans la situation estivale ou automnale, si l'empreinte de la biomasse et donc de l'activité biologique semble se refléter en partie dans des variables comme la limpidité des eaux ou des taux d'oxygène dissous, ces deux grandeurs reflètent l'évolution complexe de tous les éléments, particules inertes ou vivantes, participants à cette évolution. Nous allons maintenant examiner en détail la mission CYRCE 3 qui s'est déroulée (du 19/04/2005 au 23/04/2005) dans des conditions de développement phytoplanctonique.

III.5.1. ACP sur CYRCE 3

Comme l'avait montré l'ACP présentée en partie III.2, comparée aux autres missions, CYRCE 3 est originale: les variables les plus explicatives des axes majeurs sont l'oxygène dissous, le pourcentage de saturation en oxygène dissous, la fluorescence et la transmission, toutes ces variables sont en partie en relation avec la biologie des eaux. Nous avons donc étudié plus en détail 21 profils de cette mission (n° 87 à 108) sur lesquels ont été mesurés les huit variables (Annexe 8). Nous avons alors effectué des ACP spécifiques à cette mission.

Une ACP a d'abord été appliquée sur les moyennes de chaque variable pour tous les profils. Cette moyenne est réalisée sur les 35 premiers mètres des valeurs

de chaque profil. Nous avons donc travaillé sur une matrice réduite de huit variables et de 21 individus.

Les facteurs 1 et 2 représentent respectivement plus de 45 % et 29 % de la variance totale, soit près de 75%. Les variables non conservatives, influencées par le biologique, contribuent très fortement au facteur 1, avec pour ordre de position l'oxygène dissous, le pourcentage d'oxygène dissous et la fluorescence d'une part et transmission de l'autre, et les variables physiques contribuent le plus fortement au facteur 2 (Figure III.18). La Figure III.19 représente la projection des individus sur les plans factoriels F1/F2.

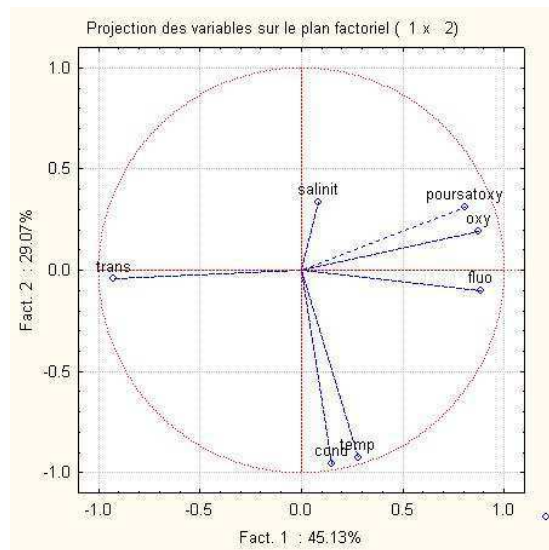


Figure III.18: Cercle des corrélations de l'ACP effectuée sur les profils de CYRCE 3. Chaque profil est résumé par sa moyenne.

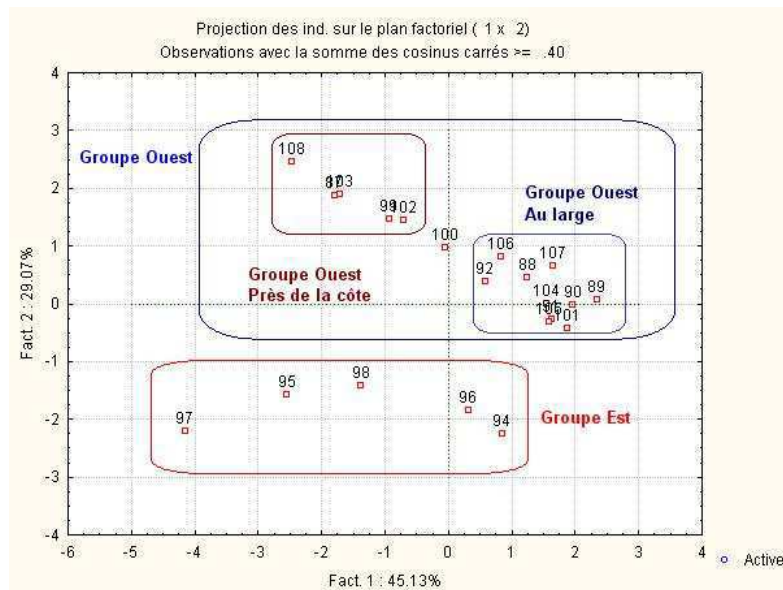


Figure III.19: Projection des individus du facteur 1 et 2, ACP sur les profils de CYRCE 3

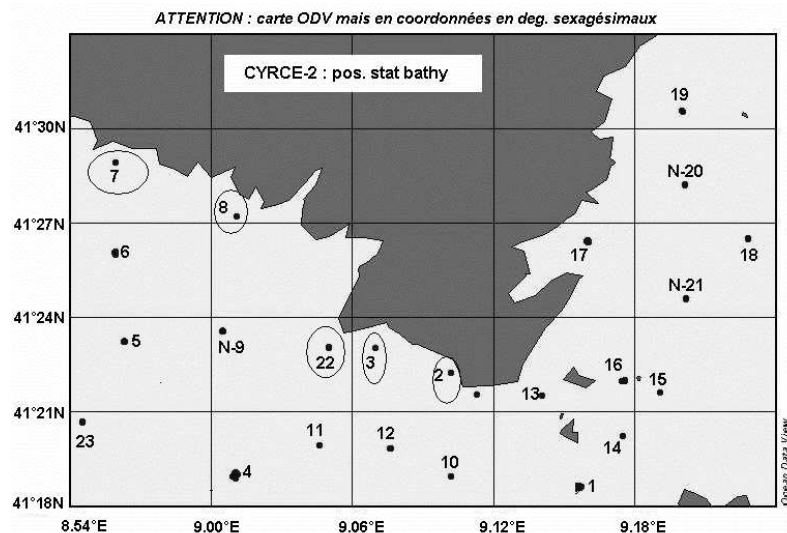


Figure III.20: Carte de localisation des stations, les stations entourées par un cercle correspondent aux stations ouest considérées comme proche de la côte.

Deux groupes de profils se dégagent. Le premier («groupe ouest», Figure III.19) est composé de profils effectués le matin entre 6h00 et 10h00 pour la majorité, localisés dans la partie ouest du détroit (Figure III.20), avec une température plus faible, des valeurs de fluorescence ainsi que d'oxygène dissous plus fortes que dans le second groupe («groupe est») qui regroupe les profils réalisés au cours de l'après-midi (entre 14h00 et 16h00) à l'est des bouches. Le Tableau III.9 regroupe ces différences. Le groupe ouest peut-être divisé en deux sous-groupes (Figure III.20). Un premier regroupant les stations près de la côte (distance à la côte comprise entre 1 et 7 km) avec une température plus froide et des valeurs plus faibles en oxygène dissous et en fluorescence. Le second regroupant les stations plus au large des côtes, avec des eaux plus chaudes et des valeurs plus élevées en fluorescence et en oxygène dissous.

On a donc bien quitté la situation hivernale caractérisée par de très faibles écarts circadiens et une structure thermique verticalement homogène et l'on assiste au début de formation de la thermocline. Cette importance de la température comme variable (temporelle) contributive principale du facteur 1 de l'ACP (expliquant 54.32% de la variance totale) permet d'isoler des groupes de profils (ou de stations) selon des critères géographiques (proximité ou éloignement de la côte, partie est ou ouest des bouches...).

Dans le Tableau III.9 sont récapitulées pour chaque variable et groupe (est, ouest large/côte, ouest côte, ouest large) les valeurs moyennes correspondantes et dans la seconde partie du tableau les différences par secteur.

III.5.2. Différences entre les variables est et ouest

Tableau III.9: Différence entre variables pour les différents groupes de CYRCE 3

Moyenne des variables par secteurs						
Secteurs	Température	Conductivité	Oxygène dissous	Fluorescence	Transmission	Salinité
Est	13.83	45.38	5.03	0.71	77.67	38.41
Ouest-côte	13.22	44.69	5.25	0.65	77.26	38.35
Ouest-large	13.58	45.04	5.56	1.18	74.05	38.32
ouest	13.47	44.94	5.47	1.03	74.99	38.33
Différence entre variables par secteurs						
Différence	Température	Conductivité	Oxygène dissous	Fluorescence	Transmission	Salinité
est/ouest	0.35	0.45	0.43	0.32	2.68	0.07
ouest large/côte	0.35	0.35	0.31	0.53	3.21	0.02

Pour cette mission CYRCE 3, au «groupe est» sont associées des températures, des salinités et des conductivités supérieures à celles du «groupe ouest large/côte» avec des différences respectives de 0.35 °C, de 0.07 et de 0.45. En revanche les valeurs d'oxygène dissous et de fluorescence sont, elles, plus faibles dans ce groupe avec une différence respective de 0.43 ml.l⁻¹ et 0.32 u.a. Le «groupe ouest-large» montre des valeurs de température, d'oxygène dissous et de fluorescence plus élevées que pour le «groupe ouest-côte» avec des différences respectives de 0.35°C, 0.31 ml.l⁻¹ et 0.53 u.a. A l'inverse la conductivité, la transmission et la salinité sont plus élevées dans le «groupe ouest-côte» (différences respectives de 0.35, 3.21% et 0.02 psu).

Après un tirage au sort aléatoire, dans le but de ramener au même nombre d'individus chaque groupe sélectionné dans les parties est et ouest, nous avons supprimé un nombre d'individus suffisant pour ramener l'effectif du groupe le plus nombreux à l'effectif du groupe le plus faible auquel il a été comparé. Un test de Man et Whitney est effectué sur les températures et les salinités du «groupe est» et du «groupe ouest» sur les moyennes calculées au-dessus de -35 m de profondeur.

Pour un risque de rejet H_0 à $p=0.1$, la température et la salinité apparaissent différentes entre l'est et l'ouest.

Ces variations de paramètres conservatifs sur une petite échelle d'espace sont minimales, en effet nous observons une différence de température entre l'ouest et l'est inférieure à 1°C . Cette différence à laquelle les populations sont soumises est minimale si nous la comparons aux variations journalières rencontrées en été, cependant elle a bien été mise en évidence de manière statistique. Nous pouvons penser que les espèces ne seront aucunement influencées par ce phénomène puisqu'elles subissent en été des variations de température bien supérieures, sur le seul espace d'une journée.

Nous nous sommes donc posé la question de savoir si cette différence de température était suffisante pour expliquer les différences de fluorescence et de biomasse constatée entre les parties est et ouest des bouches de Bonifacio, au point d'avoir un impact ou une influence sur la répartition des espèces.

Ne disposant d'aucune donnée concernant les populations phytoplanctoniques dans la zone des bouches de Bonifacio, nous avons utilisé une étude portant sur une vingtaine d'espèces de poisson, et menée sur toute la zone du Parc Marin International de Bonifacio (Culioli, *et al.*, 2003 [18]). Cette étude montre une tendance des espèces thermophiles telles que les Sparidae (*Diplodus annularis*, *Diplodus puntazzo*) et la Girelle paon (*Thalassoma pavo*, considérée comme bon indicateur des variations biogéographiques) à être présentes en plus grand nombre du côté est. À l'inverse, les espèces à affinité d'eau plus froide seraient plus présentes du côté ouest c'est le cas des Labridae (*Labrus merlus*, *Labrus viridis*). La différence thermique entre les eaux des parties ouest et est des bouches, constatée par nous-même et par l'équipe de la réserve (Culioli J.-M., *com. pers*) semble bien être une des causes d'une certaine spécificité de la répartition spécifique. Cela n'est pas surprenant puisque les organismes sont de bons indicateurs de l'état du milieu et c'est notamment de cette capacité que les notions de bio-indicateurs sont nées (Blandin, 1986 [11], Salas, *et al.*, 2006 [69]). Peut-être cela a-t-il aussi des conséquences sur la productivité planctonique ?

III.5.3. Description des variables rencontrées sur différents profils

Pour compléter cette analyse, nous présentons un choix de profils explicites concernant plus particulièrement la fluorescence, la transmission et l’oxygène dissous, puisque la température et la salinité ont été décrites précédemment pour la période donnée (III.3.1).

Pour la fluorescence, les profils réalisés durant CYRCE 3 montre deux types de comportement avec la profondeur. Les profils réalisés au cours de l’après-midi (entre 13h00 et 16h00) montrent des valeurs homogènes dans la colonne d’eau et qui restent inférieures à 1 u.a. Au contraire, les profils réalisés le matin (entre 04h00 et 11h00) montrent en général des valeurs de fluorescence plus élevées et souvent centrées aux alentours de -10 m de profondeur.

Le profil 89 (Figure III.21) est décrit ici comme exemple (effectué le matin à 10h08).

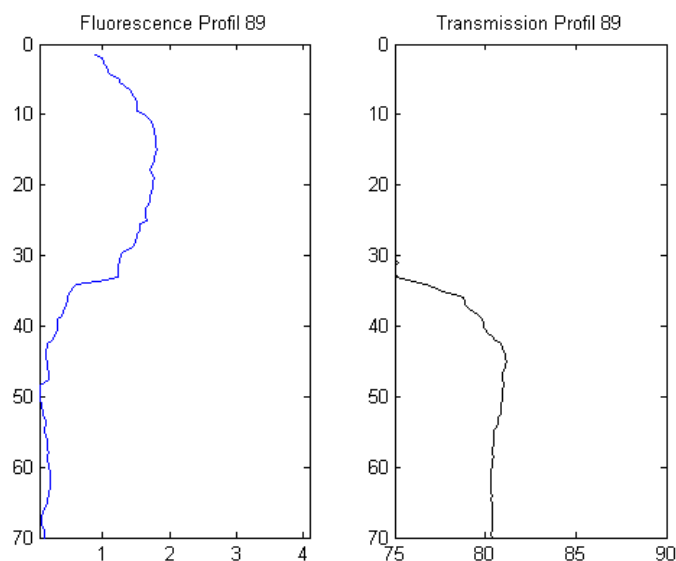


Figure III.21: Fluorescence et transmission du profil 89, station 5, Cyrce 3 (avril 2005)

De la surface à -15 m de profondeur, la fluorescence est croissante (de 1 u.a à 1.8 u.a) cependant cet événement ne se traduit pas par une baisse de la transmission, mais à l’inverse par une augmentation traduisant des eaux plus claires (passant de 60% à -3 m, à 72% à -15 m). Puis la fluorescence diminue avec la profondeur (passant de 1.8 u.a à 0.5 u.a), cette décroissance est marquée par un «palier» à -35 m où la fluorescence passe de 1.8 u.a à 1.5 u.a (en quelques mètres).

Le coefficient de corrélation entre la fluorescence et la transmission, variables liées par une relation inverse significative, pour ce profil du matin, est $r = -0.60$ (risque de rejet de H_0 à $p=0.05$ pour toute la colonne d'eau). L'examen graphique de la relation met en évidence trois points sortant nettement du groupe et pour lesquels à valeur de fluorescence comparable, la transmission chute de façon considérable respectivement à 60, 50 et 25 % et qui correspondent aux trois premières mesures du profil. Une fois ces trois premières valeurs anormales (sans doute dues à un problème instrumental) écartées, nous obtenons une meilleure corrélation inverse (transmission / fluorescence) avec un $r = -0.96$ ($p=0.001$).

La croissance de la fluorescence de 0 à -15 m, puis sa diminution de 1.8 u.a à 0.5 u.a, marquée par un palier brusque, traduit principalement la répartition verticale des organismes phytoplanctoniques. Le phytoplancton se concentre ici dans la première dizaine de mètres, parce que les conditions d'éclairement plus faibles en cette saison (mars), et surtout à cette heure (le matin) sont optimales pour la photosynthèse à ces profondeurs alors qu'en été l'irradiance serait trop forte, avec un risque de photolyse de la chlorophylle causant une photodégradation de la chlorophylle, et des pics de fluorescence plus profonds (voir Annexe 11-Cyrce 1 par exemple). Ensuite en profondeur, les conditions d'éclairement deviennent de plus en plus défavorables par leurs faibles niveaux. On constate alors une décroissance de la fluorescence en profondeur à partir de -15 m. Cette décroissance s'accompagne d'une augmentation de la transmission (eaux plus limpides) du fait en partie de la diminution de la biomasse phytoplanctonique.

Au contraire, dans le profil 94 réalisé l'après-midi (14h25), les valeurs de fluorescence sont nettement plus faibles (inférieures à 1 u.a). Cette diminution traduirait ce qui est connu, une photolyse de la chlorophylle, pigment photosensible, liée aux forts éclaircements en milieu de journée. Cette chlorophylle se reconstitue pendant la nuit (Bensoussan, 2004 [7]). Cette nouvelle synthèse nocturne se traduisant par des valeurs plus élevées de fluorescence constatées dans les profils du matin. On peut penser que ce n'est pas la densité de cette population phytoplanctonique qui varie au cours de ces 24 heures, mais que c'est le contenu des cellules phytoplanctoniques en chlorophylle qui varie.

La transmission dépasse rarement les 80%, mais descend fréquemment en dessous de 75 % (eaux chargées en particules, relatives par exemple à la présence

de phytoplancton, mais plus généralement de particules en suspension, voire de sédiments dans les eaux proches du fond).

Sur l'ensemble de stations de la mission CYRCE-3, les profils sont le plus souvent homogènes dans la colonne d'eau, mais selon les stations affichent des valeurs variables sans qu'il soit possible d'affecter ces différentes valeurs à une zone particulière du détroit. Pour les profils présentant une variation en fonction de la profondeur, la transmission augmente avec la profondeur (indiquant des eaux moins chargées) et ils correspondent, en majorité à des stations localisées au large des côtes, aux alentours du cantonnement franco-italien.

Pour les profils effectués au large, il y a en majorité une forte corrélation négative (avec un risque de rejet de H0 de 5%) entre la fluorescence et la transmission, à l'exception des profils 104 et 106 (stations respectives 12 et 4) où il n'y a pas de corrélation entre les deux variables. Ces deux stations se situent au large du côté ouest dans le prolongement du milieu du détroit. Pour les autres profils, la fluorescence corrélée négativement avec la transmission indique que plus la fluorescence augmente plus la transmission diminue (traduisant des eaux troubles) et inversement, donc que la diminution de transmission dans cette zone est due à la présence d'organismes photosynthétiques.

Les stations à la côte montrent plusieurs cas de figure de corrélation entre la fluorescence et la transmission. Elles sont soit inversement liées, soit positivement, soit pas du tout.

Ceci nous amène à rappeler les informations différentes que nous procurent ces deux capteurs : le fluorimètre est spécifique de la chlorophylle, donc du phytoplancton alors que le transmissiomètre mesure la "turbidité" de l'eau qui peut être modifiée par toute matière particulaire en suspension, inerte ou vivante, animale (zooplancton) ou végétale. Le signal de transmission inclut la cause du signal de la fluorescence mais l'inverse n'est pas vrai. D'où sans doute les divergences de relation constatées entre ces deux mesures.

Les profils d'oxygène dissous, homogènes généralement le long de la colonne d'eau, indiquent des valeurs en majorité supérieures à 5 ml/l, ce qui est normal compte tenu de la température et de la salinité en mars pour des eaux

méditerranéennes. Il est pourtant difficile d'y déceler, à partir celles-ci et des valeurs de pourcentage de saturation, l'influence de la poussée phytoplanctonique.

III.6. Les floraisons phytoplanctoniques dans les bouches de Bonifacio : un exemple de floraison exceptionnelle (juillet 2005-CYRCE 4)

D'après les valeurs d'encadrement des variables lors de CYRCE 4 (confère Tableau III.10), la fluorescence montre des valeurs élevées (maximum à 15.21 u.a), manifestant un cas particulier d'une poussée phytoplanctonique exceptionnelle en période estivale. Nous allons donc faire une étude particulière sur ce phénomène. CYRCE 4 s'est déroulé dans des conditions de vent fort entre 23 et 27 nœuds avec une orientation majoritaire de 260°. C'est donc une mission où a été constatée une chute du baromètre signifiant une nette dépression accompagnée d'une mer agitée. CYRCE 4 présente une situation rarement rencontrée en hydrologie méditerranéenne : celle d'une poussée phytoplanctonique se produisant en juillet c'est-à-dire à la saison estivale. Classiquement les poussées printanières se produisent en fin d'hiver quand la lumière sur l'eau est suffisante et qu'un stock d'éléments nutritifs a été reconstitué, soit par la dégradation des poussées planctoniques précédentes, soit par l'enrichissement en sels nutritifs des eaux de surface accompagnant la remontée des eaux profondes hivernales. En été au contraire, la poussée printanière est terminée et les eaux sont généralement pauvres en phytoplancton tout au moins du type diatomée. Il peut arriver qu'en été se produisent des poussées explosives de certains péridiniens (marée rouge) très limitées dans le temps (quelques jours) dans les eaux de surface (Peres, *et al.*, 1986 [57]).

III.6.1. ACP sur CYRCE 4

Tableau III.10: récapitulatif des minima et maxima pour chaque variable pour la mission CYRCE 4

		Température	Conductivité	Fluorescence	Salinité	Sigma t 00
CYRCE 4	min	13.13	44.54	0.06	37.88	25.68
	max	25.58	58.19	15.21	38.45	28.9

Dans CYRCE 4, cette situation inhabituelle est caractérisée sur le plan hydrologique par les très fortes différences entre maxima et minima présentées dans le tableau suivant et qui sont typiques d'une situation estivale et d'une structuration bi-couche de la colonne d'eau.

On constate une très forte poussée phytoplanctonique, atteignant 15 u.a c'est à dire 10 fois *supérieures* aux concentrations rencontrées dans CYRCE 3, exemple qui vient d'être traité précédemment comme "classique". Mais ici, cette floraison est centrée en profondeur (-25, -30 m) et associée à des eaux froides (15°C -16°C localisées sous la thermocline). Malheureusement pour CYRCE 4, la bathysonde n'était équipée ni d'un transmissiomètre, ni d'un oxymètre, mais par contre d'un PAR (Photosynthetic Array Radiation) ce qui nous permet de dire que cette poussée s'est produite en faible lumière incidente.

Comme le montrent les profils de fluorescence (Annexe 11), cette poussée n'a pas du tout la même intensité à toutes les stations. Deux ACP conduites respectivement sur les parties est et ouest des bouches donnent sensiblement les mêmes résultats. Le facteur 1 est déterminé très majoritairement, en positif par la température et la lumière incidente et inversement par la fluorescence et la profondeur.

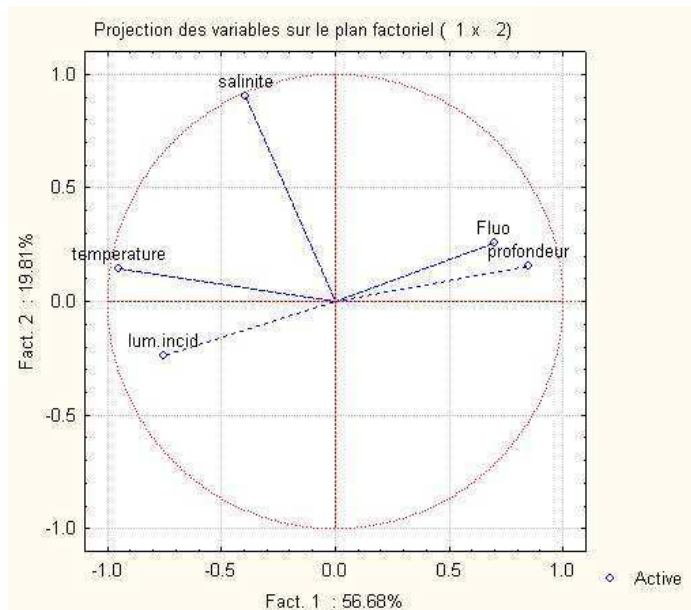


Figure III.22: ACP CYRCE 4 côté ouest, facteur 1 = 56.66% avec comme variables les plus constitutives : profondeur, fluorescence et température, salinité, lumière incidente (en négatif

sur le facteur 1), et facteur 2= 19.81% avec comme variables les plus constitutives : profondeur, température, fluorescence, salinité et lumière incidente (en négatif sur le facteur 1).

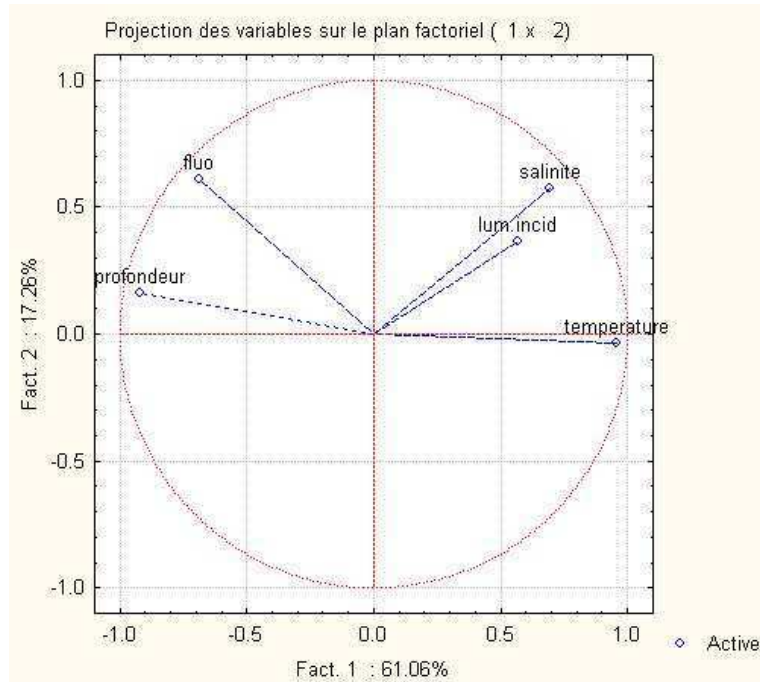


Figure III.23 : ACP CYRCE 4 côté est, facteur 1 = 61.06% avec comme variables les plus constitutives : température, salinité, lumière incidente et profondeur, fluorescence (en négatif sur le facteur 1), et facteur 2= 17.26% avec comme variables les plus constitutives : fluorescence, salinité et lumière incidente.

Cependant, nous allons regarder la concentration en fluorescence par rapport à la répartition géographique des stations. Une valeur moyenne de fluorescence est calculée, par tranche d'eau de dix mètres et pour chaque station. Les valeurs du niveau de surface sont intégrées entre -2 m et -10 m de profondeur, le niveau suivant entre -10 m et -20 m, et ceci jusqu'à -50 m de profondeur par palier de dix mètres. Nous obtenons ainsi une valeur moyenne pour chaque profil effectué durant CYRCE 4 (en tout 45 profils). Puis nous avons sélectionné uniquement les profils des stations hydrologiques se trouvant sur le trajet aller du bateau (c'est-à-dire du profil 109 au profil 131, soit 22 valeurs). Puis avec une routine Matlab, ces 22 valeurs nous ont permis de tracer des iso-lignes (grâce à une interpolation des valeurs de chaque station, étoile bleue sur les Figure III.24 à Figure III.27) représentant la concentration de fluorescence transformée en log pour permettre d'avoir une échelle commune sur tous les figures (Figure III.24 à Figure III.27) en fonction de la position géographique. Les résultats sont présentés dans la section suivante.

III.6.2. Répartition géographique de la fluorescence pendant la poussée phytoplanktonique de CYRCE 4 (juillet 2005)

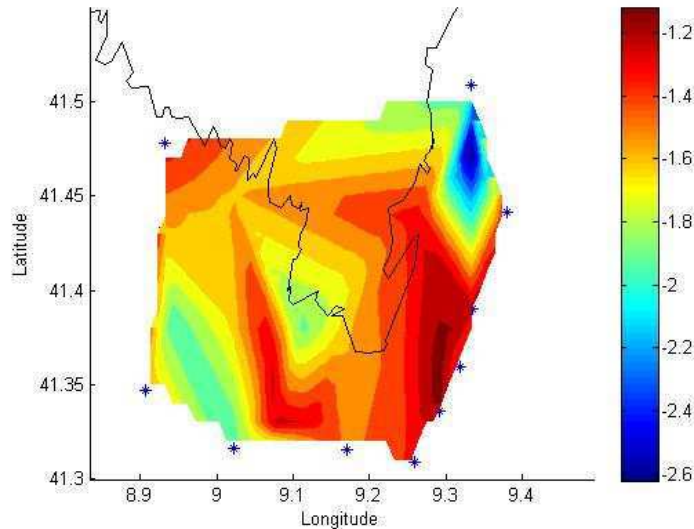


Figure III.24: Répartition de la fluorescence sur les bouches de Bonifacio durant CYRCE 4, les valeurs de fluorescence sont intégrées sur tranche de -2 m à -10 m.

Deux pôles de fluorescence sont identifiés entre -10 et -20 m : l'un est localisée du côté ouest des bouches de Bonifacio, à proximité des îles aux Moines, le second en milieu de détroit peut être séparé en deux pôles de concentration plus importante : l'une à l'ouest proche du carré international de pêche commune franco-italien et l'autre à l'est proche des îles de l'archipel de la Maddalena (Figure II.27 à Figure III.26).

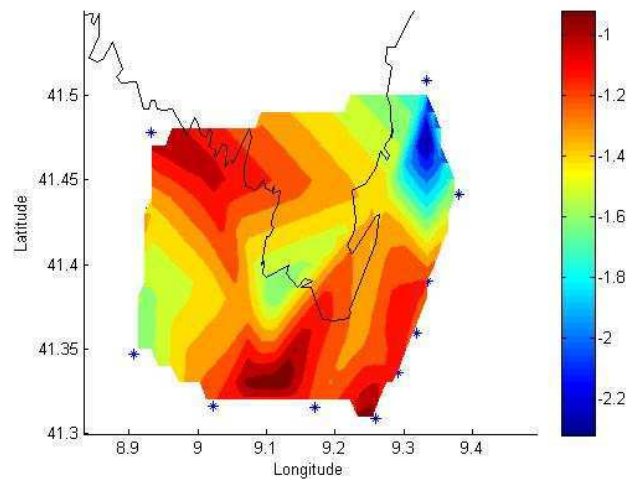


Figure III.25 : Répartition de la fluorescence sur les bouches de Bonifacio durant CYRCE 4, les valeurs de fluorescence sont intégrées sur la tranche de -10 m à -20 m.

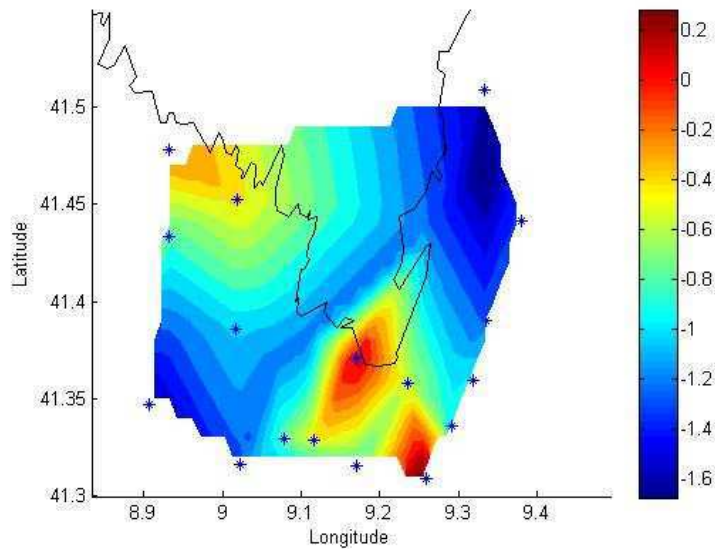


Figure III.26: Répartition de la fluorescence sur les bouches de Bonifacio durant CYRCE 4, les valeurs de fluorescence sont intégrées sur la tranche de -20 m à -30 m.

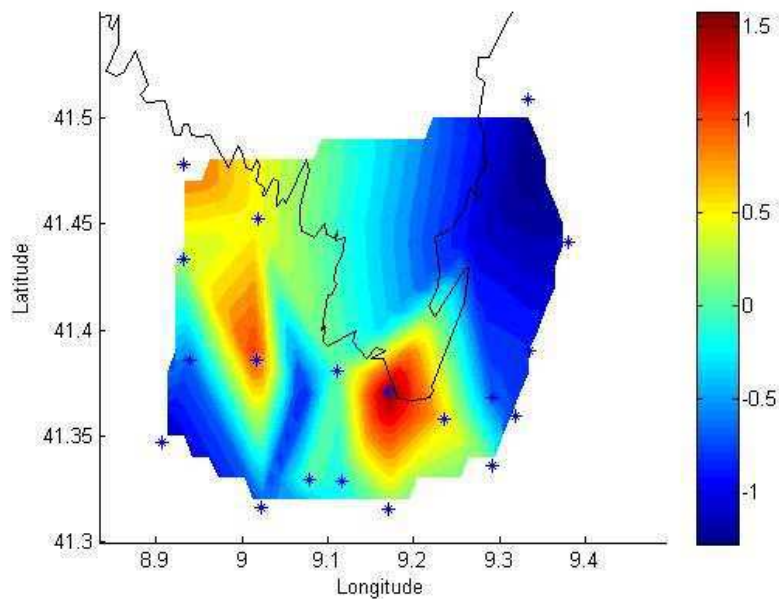


Figure III.27 : Répartition de la fluorescence sur les bouches de Bonifacio durant CYRCE 4, les valeurs de fluorescence sont intégrées sur la tranche de -30 m à -40 m.

Sur les couches d'eau de -10 m à -40 m, deux voire trois points de concentration « élevée » se démarquent. Les deux premiers sont les mêmes que ceux vus précédemment, c'est-à-dire milieu de détroit de part et d'autre du centre (est îles Lavezzi), et le troisième au niveau des îles des Moines, dans la partie ouest de Bouches de Bonifacio. Il est à noter que les concentrations les plus « élevées » en fluorescence sur ces cartes, se situent au niveau de trois zones de réserves ou

zones de cantonnement proche de l'entrée du port de Bonifacio, îles Lavezzi et îles des Moines.

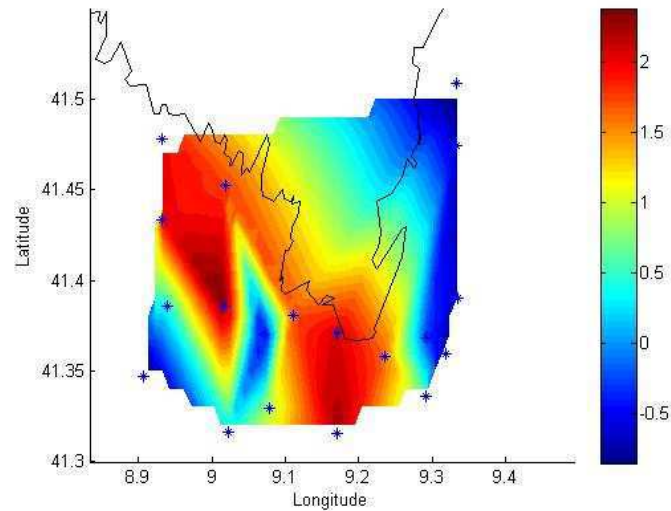


Figure III.28: Répartition de la fluorescence sur les bouches de Bonifacio durant CYRCE 4, les valeurs de fluorescence sont moyennées dans la tranche de -40 m à -50 m.

Ces valeurs de fluorescence (allant dans une plage de moyennes compris entre 0.1 et 11 u.a), valeurs inhabituellement rencontrées dans le bassin Méditerranéen Nord Occidental, de surcroît à cette période. Comme sur les autres cartes, les localisations des plus fortes concentrations en fluorescence se retrouvent en deux points. Le premier à l'ouest du détroit toujours localisé près des îles aux Moines, le second localisé en milieu de détroit.

En fait, un pointage station par station montre que si la poussée se produit dans les parties est et ouest des bouches de part et d'autre du détroit, elle est manifestement beaucoup plus intense dans la partie ouest des bouches. Situation que nous avons rencontré, dans la section précédente, où nous avons traité d'une poussée phytoplanctonique printanière "classique". Sans que nous puissions en établir les causes ou les raisons, cela mérite d'être retenu. Sur les profils de fluorescence en fonction de la profondeur, on distingue deux autres groupes. Dans le premier, la croissance de fluorescence se poursuit régulièrement d'une dizaine de mètres jusqu'au fond. Dans le second groupe au contraire, la poussée phytoplanctonique se présente comme un pic plus ou moins large dont le maximum

est centré au alentour des 30- 40 m, la fluorescence décroît ensuite dans les eaux plus profondes jusqu'au fond.

Une troisième constatation fait apparaître des valeurs de biomasse phytoplanctonique plus importantes vers le large que vers la côte. Mais ceci est à corriger par le fait que naturellement près des côtes, la profondeur des fonds est plus faible et donc que le bloom phytoplanctonique n'a pas la possibilité de s'y développer dans toute son extension.

Il faut noter que cette poussée se développe dans une situation de thermocline très marquée, mais avec des températures comparables en valeur à ce qui a pu être constaté dans d'autre mission CYRCE en été.

Le confinement de cette poussée phytoplanctonique en eau froide, en plein été, avec une lumière incidente forte en surface est compréhensible. L'intensité de la lumière dans les eaux de surface aurait empêché un tel développement par l'effet létal des fortes radiations. Au contraire, l'intensité de cette lumière fait qu'il en reste une proportion suffisante à 30-40 m pour que la photosynthèse puisse s'y dérouler.

Les causes de cette poussée phytoplanctonique nous sont inconnues. Nous ne savons pas d'ailleurs, puisqu'il n'y a pas eu d'étude hydrologique préalable avant CYRCE dans cette zone, si chaque été il ne se produit pas ce type de développement ponctuel. Il faut noter dans ce cas, que des images satellites de SeaWIFS ne nous sont d'aucune utilité pour en chercher la périodicité. En effet, seules les premières couches de surface sont accessibles par les capteurs embarqués, or ce développement phytoplanctonique explosif s'est produit entre 30 et 40 m de fond.

La stratégie des missions CYRCE n'a permis de connaître ni le début ni la fin de cette poussée, et donc évidemment ni sa durée. Les très fortes valeurs de fluorescence mesurées sont parmi les plus fortes de celles observées depuis plus de 10 ans, même dans les données régulières récoltées par les services d'observation de l'INSU de la façade continentale. Compte tenu en outre de la surface couverte par ce bloom et du fait que le phytoplancton est la source de la pyramide alimentaire, on peut postuler que si celle-ci ne sont pas rares, elles peuvent avoir des conséquences sur l'ensemble des réseaux trophiques marins.

III.7. Différence est et ouest

III.7.1. Température au cours du temps en hiver pour deux jeux de données

Le développement phytoplanctonique inégal, entre les parties est et ouest des Bouches de Bonifacio, tant dans l'exemple de la poussée printanière "classique" que dans celui, estival, que nous venons de montrer, recoupe d'autres données. Des informations recueillies sur le terrain auprès du personnel scientifique de la Réserve Internationale des Bouches de Bonifacio indiquaient une certaine dissymétrie est/ouest pour la répartition des populations de certaines espèces, en particulier de poisson. Des espèces plus thermophiles semblaient être mieux représentées, voire n'être présentes pour certaines espèces que dans la partie est de la réserve à savoir la côte allant du golfe de Porto Vecchio jusqu'aux îles Lavezzi. Ces informations recourent des données de température enregistrées ponctuellement, par la même équipe, et qui montrent effectivement des températures d'eau de mer légèrement supérieures sur la côte orientale (J.M. Culioli, *com. pers.*). Comme nous l'avons vu plus haut, les eaux corses de Bonifacio se trouvent, en hiver, dans une situation très voisine de celle d'autres sites de Méditerranée nord-occidentale : température stable de l'ordre de 12°C à 13°C de la surface jusqu'au fond .

Pour tenter de vérifier cette dissymétrie thermique, nous avons procédé à une comparaison statistique entre une sélection des stations est et de station ouest. Nous pouvons postuler, si différence de température il y avait entre la partie est et ouest des bouches, qu'elle devrait plus facilement être mise en évidence pendant l'été si cette différence était liée au niveau de la réponse des eaux côtières à l'énergie solaire.

La stratégie pour ce type d'étude est difficile. En effet même en hiver, où la température de l'eau de mer est considérée comme stable et constante, elle peut varier en surface tout au moins, de quelques dixièmes de degrés selon l'heure de la journée. Nous présentons par exemple dans la Figure III.29, l'évolution sur une semaine de la température moyenne enregistrée à un pas horaire au mois de mars dans la partie ouest des Bouches.

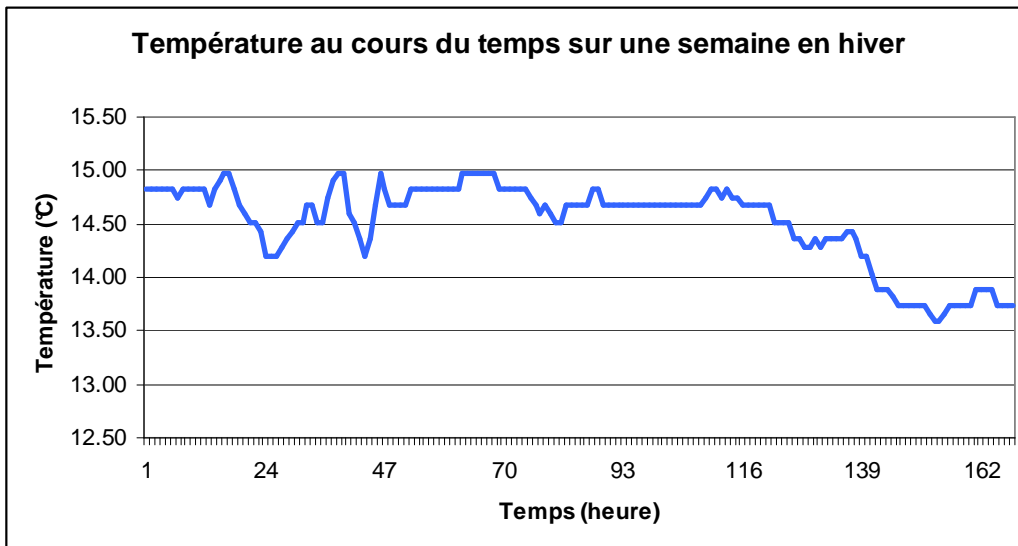


Figure III.29: Température (en °C) au cours du temps (heures) enregistrée sur la semaine du 01/05/2004 au 07/05/2004 à -11m de profondeur, donnée issue de l'équipe scientifique de la réserve des bouches de Bonifacio -Office de l'environnement de la Corse-

L'écart maximal constaté est de 1.5°C, mais il est le plus souvent inférieur à 1°C, mais ces variations sont détectables.

Au contraire en été, cette température peut varier de plusieurs degrés en 24 h comme le montre la figure ci-dessous des données de température, mesurées au même site, par l'équipe de la RNBB (avec une échelle de température différente, en ordonnée, que celle du graphique précédent).

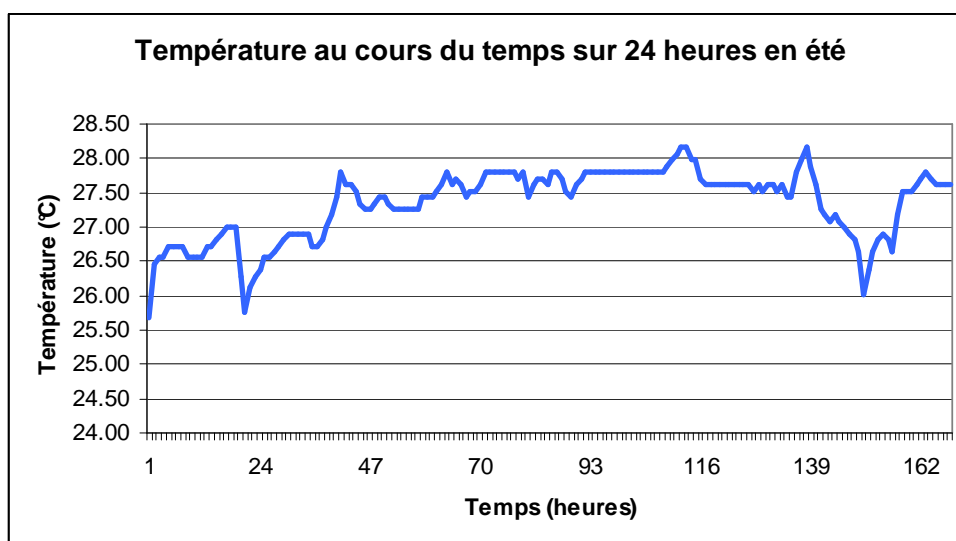


Figure III.30: Température (en °C) au cours du temps (heures) enregistrée sur la semaine du 15/08/2003 au 22/08/2003 à -11m de profondeur, donnée issue de l'équipe scientifique de la réserve des bouches de Bonifacio -Office de l'environnement de la Corse-

Il est donc difficile de pouvoir déceler une différence de température entre l'est et l'ouest des bouches que l'on peut supposer faible alors que même en hiver entre le jour et la nuit la différence était de quelques dixièmes de degrés, mais quelques dixièmes quand même.

La seconde difficulté était qu'il fallait un nombre suffisant d'échantillons pour qu'une différence soit statistiquement vérifiée. Sur l'ensemble de tous les profils CYRCE, nous avons donc sélectionné les tranches de profondeur de -2 à -10 m et pour chaque profil en avons calculé la moyenne de température et de salinité.

Lors des missions CYRCE, quand c'était possible les mêmes stations étaient ré échantillonnées deux, voir même trois fois, mais pas forcément aux mêmes heures. Pour nous représenter cette évolution de la température au cours de la journée, en hiver, nous avons porté, dans la Figure III.31 pour toutes les moyennes de -10 m des profils de CYRCE 2, l'heure où les mesures ont été faites.

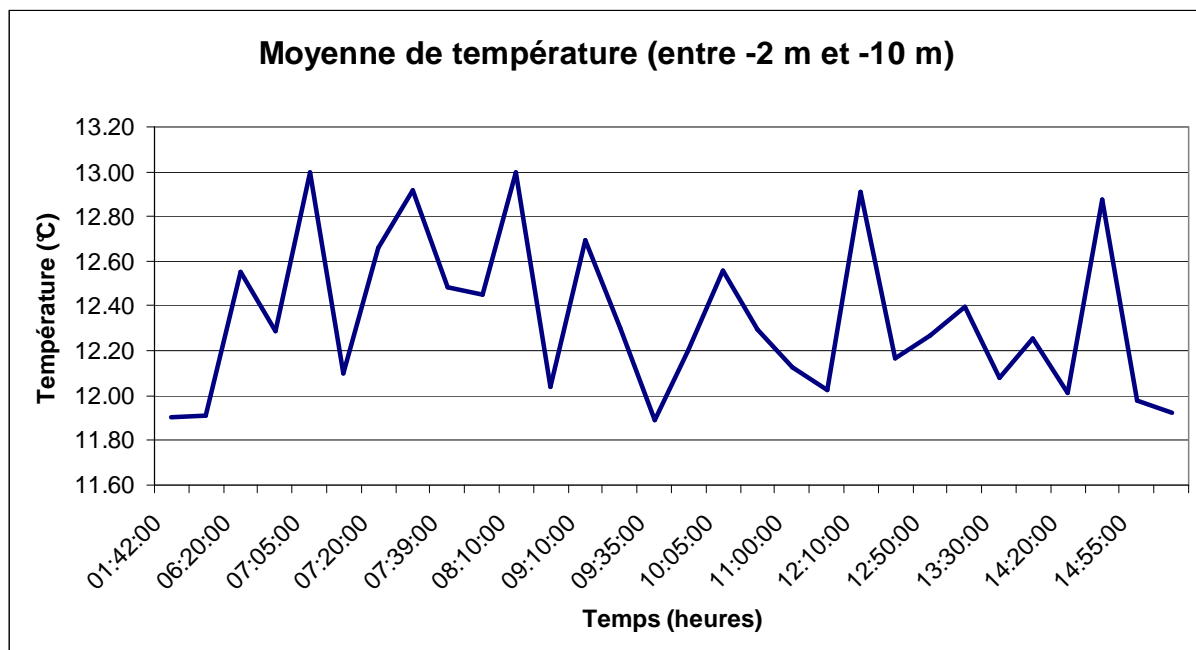


Figure III.31: Température moyenne (de -2 m à -10 m) des profils effectués durant CYRCE 2 au cours du temps. ($Y=-0.0075x + 12.459$; $R^2=0.0357$).

La situation hivernale se retrouve. Les températures entre -2 et -10 m se situent entre 12°C et 13 °C. La plus grande amplitude de variation est de l'ordre du degré, mais surtout sans que l'on retrouve le signal clair apparu dans la figure précédente. On peut donc dire que ce graphique, mêlant l'information recueillie lors des quatre

jours de la mission CYRCE 2 et classée selon l'heure de la réalisation du profil, ne nous renseigne uniquement sur la grandeur de cet écart (journalier), en notant qu'à la différence du graphique précédent aucun des profils réalisés durant CYRCE 2 n'a été réalisé après 15 heures, heure à laquelle on rencontre les maxima des températures hivernales.

III.7.2. Différence de température et salinité entre l'est et l'ouest du détroit pour la période estivale et hivernale

III.7.2.1. Différence en période hivernale

Nous avons donc effectué un premier tri sur toutes ces moyennes des profils de -2 à -10 m, puis un second tri par tranche horaire de quatre heures. Pour CYRCE 2 (situation hivernale), les tranches horaires représentant le plus grand nombre d'individus étaient respectivement de 6h00 à 10h00. Pour la situation d'été, seules les missions CYRCE 4 et 6 nous donnaient un nombre d'individus suffisants pour les tranches horaires de 6h00 à 10h00, nous avons regroupé dans chaque tranche horaire choisie les données sélectionnées de CYRCE 4 et 6. Devant appliquer un test de comparaison de moyenne non paramétrique et pour que ce test soit robuste, nous avons choisi d'opérer pour chaque saison et pour chaque tranche horaire un tri supplémentaire devant amener le même nombre d'individus sélectionnés pour les parties est et ouest, à chacune des deux saisons. Par un choix aléatoire, nous avons supprimé un nombre d'individus suffisant pour le ramener à l'effectif le plus faible du groupe auquel il allait être comparé.

Ce tri nous a donné la sélection suivante. Pour les températures hivernales, une seule mission (CYRCE 2) répondait aux conditions requises. Pour les températures estivales, nous avons pu effectuer un regroupement des individus des missions 4 et 6.

Pour chaque saison et pour chaque tranche horaire, les deux échantillons "est" et "ouest" ont été comparés pour trois variables (température, salinité et heure moyenne) par un test de Mann et Whitney (test U).

Pour l'hiver, en fixant un seuil de risque de rejet de l'hypothèse nulle H_0 p à 0.05, les heures moyennes des deux échantillons n'apparaissent pas significativement différentes ($p=0.066$). Au contraire entre le groupe est et ouest et pour le même seuil de rejet, la température ($p=0.002$) et salinité ($p=0.001$) sont significativement différentes entre le groupe est et ouest. Avec des différences entre l'est et l'ouest pour la température avec respectivement 12.77°C à l'est et 12.19°C à l'ouest (soit une différence de 0.58°C) et la salinité respectivement est 38.39 et 38.28 (soit une différence de 0.11), il apparaît bien que ces deux parties de bouches sont significativement différentes sur le plan hydrologique : à l'est les eaux sont plus chaudes et plus salées qu'à l'ouest. Le fait que nous ne puissions pas mettre en évidence de différence significative pour les heures moyennes de notre sélection (08h29 pour l'est et 10h38 pour l'ouest) montre d'abord que nos deux regroupements étaient compatibles et entrant dans l'enveloppe des variations de température des eaux de surface en hiver voir (Figure III.29, ci-dessus). Mais surtout que, tout au moins en hiver, l'éclairement solaire ne serait pas la cause principale de ce réchauffement sélectif des eaux de la partie est. Même si nous n'avons pas pu le mesurer, l'éclairement incident n'avait de raison d'être différent sur les deux parties des bouches lors de cette mission, et en tous cas serait sans incidente sur la salinité dans la tranche d'eau de 2 à 10m.

Ces différences de température peuvent, peut-être s'expliquer, par plusieurs causes non exclusives. Tout d'abord par une différence dans la circulation des courants entre l'ouest et l'est de la Corse. A l'ouest avec l'ouverture sur le golfe du Lion, les schémas de circulation générale décrivent classiquement un courant avec des caractéristiques plus atlantiques (plus froid et moins salé) que le long de la côte est ouverte sur la mer tyrrhénienne. Ensuite la largeur du plateau continental peut jouer un rôle, surtout sur le changement de température: le plateau continental du côté ouest des Bouches de Bonifacio est étroit et abrupt (profondeur beaucoup plus forte accompagnée par des eaux potentiellement plus froides) alors que celui du côté est est plus large (eaux moins profondes donc moins froides, tout au moins pour les parties couvertes par les missions CYRCE).

III.7.2.2. Différence en période estivale

Cette même démarche a été conduite sur les résultats des missions d'été CYRCE 4 et CYRCE 6. Le fait qu'il n'apparaît pas de différence significative dans l'heure moyenne des échantillons est et ouest montre ici aussi que nous avons comparé des échantillons compatibles avec la variabilité de la température au cours de la journée (heure moyenne et probabilité). Mais à la différence de la situation en hiver aucune différence significative entre l'est et l'ouest n'apparat, ni pour la température, ni pour la salinité. Pour la température, les valeurs moyennes des groupes est et ouest sont respectivement de 23.00°C et de 23.42°C, pour la salinité elles sont respectivement de 38.36 et de 38.34. La même procédure de sélection de données a été appliquée non pas sur des moyennes de 2 à 10 m de profondeur, mais sur des moyennes de 30 à 40 m, c'est à dire sous la thermocline donc dans des conditions thermiques plus stables. Le même tri aléatoire a été exercé au final pour obtenir des groupes est et ouest de même tranche horaire à effectif identique. Pour les eaux situées en dessous de la thermocline et alors que les heures moyennes de mesure ne sont, ici non plus, significativement différentes, nous ne notons en situation d'été aucune différence significative ni pour la température, ni pour la salinité. Mais si pour la salinité, cette différence est très faible (38.21 à l'ouest) et 38.20 à l'est), elle est forte pour la température de l'eau de mer entre 2 et 10m (18.66°C à l'ouest et 16.78°C à l'est) soit près de deux x degrés d'écart et, dans ce cas, à l'inverse de ce qui a pu être conclu pour l'hiver, mais cette différence n'est pas significative.

III.7.2.3. Différence est ouest durant CYRCE 2

La mission CYRCE 2 réalisée en hiver minimisait l'influence des variations jour/nuit des caractéristiques de l'eau en particulier de la température. Nous avons donc réalisé sur l'ensemble des profils de cette mission (profil 57 à 86) une ACP. La matrice de donnée a été réduite de manière à ce que chaque profil soit résumé pour chacune des variables par la moyenne calculée de 0 à -35 m de profondeur. On

élimine ainsi le facteur profondeur. Les résultats sont présentés dans les deux figures suivantes.

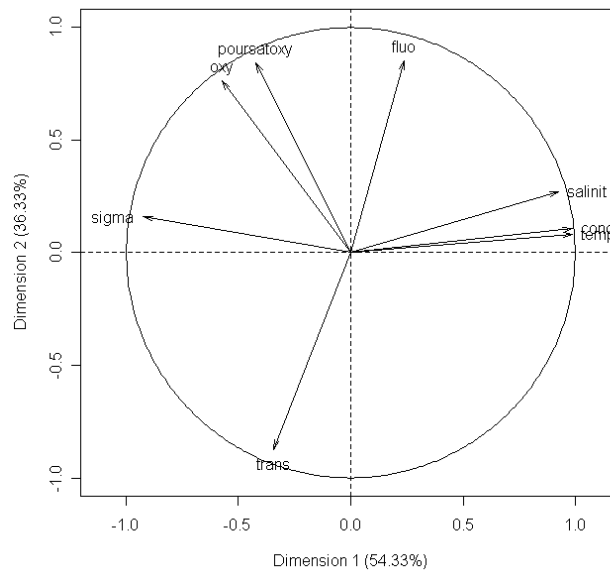


Figure III.32: Cercle des corrélations de l'ACP effectuée sur CYRCE 2 (mars 2005)

Les facteurs 1 représentent respectivement plus de 54 % et facteur 2 plus de 36 % de la variance total, soit près de 90% pour les deux (Figure III.32). Les variables physiques contribuent très fortement au facteur 1 et les variables non conservatives, influencées par le biologique, contribuent le plus fortement au facteur 2 avec pour ordre de position fluorescence et oxygène dissous d'une part et transmission de l'autre. La Figure III.33 représente la projection des individus sur les plans factoriels F1/F2.

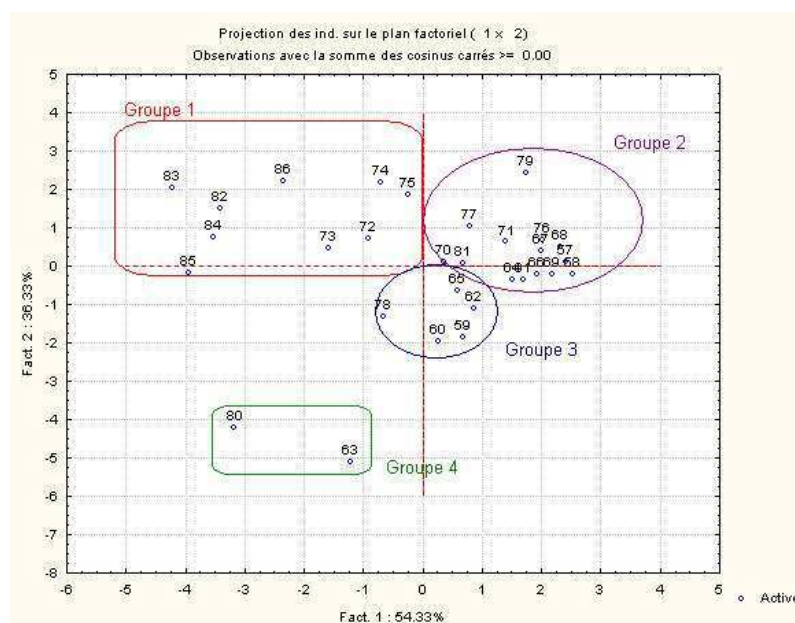


Figure III.33: Projection des individus de l'ACP CYRCE 2 (mars 2005)

A partir du nuage de points des individus (stations) projetés par l'analyse sur le plan des facteurs 1 & 2, nous avons pu constituer quatre groupes.

Le groupe 1 est caractérisé par une température et une salinité élevées. Dans ce groupe, nous retrouvons les profils réalisés aux stations localisées à l'est des Bouches de Bonifacio (comprenant par exemple les stations de 14 à 21). Près de l'axe 2, nous retrouvons un des profils de la station 1 (numéro de profil 70). Les deux autres profils de cette station 1, positionnée dans la transition entre les parties est et ouest, se retrouvent eux avec le groupe 2, donc en position intermédiaire (située au milieu du détroit).

Le groupe 2 est constitué des stations se situant toutes du côté ouest du détroit, avec des températures légèrement plus froides et des eaux légèrement moins salées et moins denses que les stations composant le groupe 1 (station 6, 7, 8 par exemple). On notera dans ce groupe la position du profil 71, correspondant à la station 13, qui se trouve comme la station 1 mais plus à l'ouest au milieu du détroit. On remarquera que les groupes 1 et 2, sont tous situés en haut du facteur 1 et semble donc peu structurer par les variables associées au biologique. Ce facteur 2 isole très nettement deux des profils 80 et 63, correspondant respectivement aux stations 23 et 4 c'est à dire, les stations situées les plus au large avec les fonds les plus élevés. On retrouve pour ces deux profils, une légère, mais nette sous saturation en oxygène associée à de fortes valeurs de transmission donc à des eaux beaucoup plus claires. Deux autres profils réalisés à ces stations se retrouvent avec un petit groupe situé sensiblement en position médiane du graphique, c'est à dire faiblement déterminés par les deux principaux facteurs. On remarquera que ce facteur 2 peut être aussi une bonne image de la distance à la côte. Tout le haut du graphique concerne des stations proches de la côte, avec des valeurs légèrement plus faibles de transmission et plus fortes en oxygène dissous.

En conditions hivernales, c'est-à-dire à faible variabilité de température sur 24 heures, il existe bien une différenciation entre les parties ouest et est du détroit. Les stations 1 et 13, au niveau des Lavezzi en constituent la transition. Cette analyse globale, sur une mission, confirme donc bien les résultats partiels présentés plus haut.

Mais cette analyse présente également un autre niveau de structuration, s'il on considère le groupe 1. Sur ce dernier se dessine pour toutes les stations de la partie "est", une direction supplémentaire, nord-sud, structurée par le facteur 1. A l'extrémité de l'axe se trouvent les profils réalisés le plus au nord et près du centre de l'axe se trouve ceux réalisés dans la partie sud de la côte orientale. On a donc également un effet latitudinal de la température et de la salinité sur ce groupe de stations. Au contraire dans le groupe 2, on ne retrouve pas de positionnement géographique clair à l'intérieur de ce groupe déterminé par le facteur 1.

Les résultats que nous venons d'exposer semblent pour partie paradoxaux. En été alors que le rayonnement solaire est le plus intense, nous ne pouvons pas mettre en évidence de différences significatives entre les parties est et ouest des Bouches; Or cette différence est, elle, statistiquement significative pour l'hiver avec les températures les plus froides et les plus stables de l'année. Il est vrai qu'en été les différences de températures peuvent varier d'heure en heure, avec une amplitude sur cet intervalle, proche de celle constatée en hiver sur 24h. Il paraît difficile d'expliquer ces différences hivernales par la seule topographie des deux côtes (plus grande largeur du plateau continental sur la cote est, fonds plongeant très rapidement sur la côte ouest). La lumière incidente hivernale de l'ordre de 200 watt/m² au midi, loin des 900 watt/m² au midi estival, est en effet insuffisante à notre avis pour induire une différence de température significative dans ces deux colonnes d'eau d'épaisseurs différentes. D'ailleurs dans les zones côtières, à part les fonds de baie ou les zones très peu profondes, la température des différents points reste comparable.

Malgré ces difficultés d'explication, un rapprochement de faits s'impose à nous : il existe bien, sur le plan hydrologique, une différence entre les parties est et ouest des bouches de Bonifacio, et cette différence est corroborée, et dans le même sens, par les observations écologiques conduites par l'équipe scientifique de la RNBB, sur des populations d'espèces vagiles, c'est à dire susceptible (à la différence du plancton) de "choisir" leurs "preferendum" de milieu de vie, et donc d'être d'efficaces "indicateurs écologiques".

III.7.3. Comparaison des températures à une série à long terme disponibles (CYRCE et RNBB)

Une question peut alors se poser : les données hydrologiques recueillies durant les campagnes CYRCE, avec sa stratégie spatiale et temporelle particulière, sont elles ou non des données représentatives de l'hydrologie et de sa dynamique dans la zone étudiée ?

Pour répondre à cette question, nous avons comparé les données de température de ces missions avec celles obtenues par des séries continues de mesures de température (le seul paramètre pratiquement opérationnel aujourd'hui à long terme) recueillies, à différentes profondeurs, par l'équipe scientifique de la RNBB (Office de l'environnement de la Corse). Les résultats sont synthétisés dans le Tableau III.11.

Les mois de mars, avril, juillet, septembre semblent indiquer que les données CYRCE sont cohérentes avec celle de RNBB même si en moyenne les données de températures CYRCE sont légèrement plus basses. Cette légère différence peut être expliquée par l'acquisition des séries de données avec deux instruments très différents, avec pour l'une (RNBB) acquisition de données intégrées dans le temps, pour l'autre (CYRCE) acquisition de données ponctuelles.

En revanche, le mois d'août montre une différence entre les deux séries de température puisque celles des RNBB sont au alentour de 26°C alors que celles de CYRCE sont comprises dans une tranche au alentour des 25°C. Ceci peut-être la conséquence de la différence géographique de positionnement des prélèvements : les données CYRCE sont prises plus au large de la bouée de thermistances, donc des températures plus froides car moins influencées par "l'effet bathymétrique" des eaux littorales.

Tableau III.11: Comparaison de température (°C) de la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio et des missions CYRCE

Mois	Mars		Avril		Juillet		Août		Septembre		Novembre	
Donnée	RNBB	CYRCE 2	RNBB	CYRCE 3	RNBB	CYRCE 4	RNBB	CYRCE 1	RNBB	CYRCE 6	RNBB	CYRCE 5
Année	2004	2005	2004	2005	2003	2005	2003	2004	2003	2006	2004	2005
Heure	prof -11 m	moyenne (10.50m-11.50m)	prof -11 m	moyenne (10.50m-11.50m)	prof -11 m	moyenne (10.50m-11.50m)	prof -11 m	moyenne (10.50m-11.50m)	prof -11 m	moyenne (10.50m-11.50m)	prof -11 m	moyenne (10.50m-11.50m)
0	12.96		13.90		23.63		26.47	24.43	23.81		18.21	
1	12.96	11.90	13.90		23.55		26.41	24.62	23.80		18.20	
2	12.95		13.90		23.57		26.43	24.92	23.80	21.17	18.18	
3	12.95		13.90		23.53		26.50	24.21	23.79	18.47	18.17	
4	12.94		13.89	13.34	23.60		26.47		23.76	18.12	18.16	
5	12.93		13.89	13.85	23.62		26.50	24.89	23.71	16.96	18.14	
6	12.92	12.22	13.88	13.27	23.65		26.52		23.78	21.35	18.16	
7	12.92	12.59	13.89	13.73	23.73	23.73	26.57	24.64	23.79	21.29	18.18	
8	12.90	12.49	13.90	13.48	23.67	23.86	26.55	24.57	23.79	22.12	18.17	16.34
9	12.90	12.25	13.91	13.28	23.54	23.57	26.63	24.90	23.85	23.33	18.17	16.18
10	12.92	12.40	13.93	13.59	23.80	23.87	26.65	24.24	23.85	23.51	18.16	16.58
11	12.96	12.04	13.93		23.81	22.25	26.71	24.10	23.92	23.43	18.18	16.42
12	12.98	12.41	13.96		24.06	22.15	26.74	24.98	23.97	23.26	18.20	15.75
13	13.02	12.17	14.04	13.61	24.06	23.58	26.82	24.34	24.06	23.05	18.23	16.31
14	13.05	12.29	14.05	13.86	24.19	23.54	26.95	24.19	24.14	22.99	18.23	16.21
15	13.05	11.93	14.07	13.74	24.38	22.60	26.90	24.49	24.15	23.06	18.24	15.84
16	13.06		14.07	13.79	24.25	22.01	26.99	24.25	24.12	23.47	18.22	16.22
17	13.07		14.07		24.11	23.95	26.92	24.55	24.05	23.40	18.19	16.43
18	13.04		14.05		23.88	20.80	26.92	24.34	23.98		18.17	
19	13.04		14.00		23.83	22.92	26.81	24.31	23.90		18.12	
20	13.02		13.97		23.74	22.03	26.65	24.75	23.85		18.09	
21	13.01		13.96		23.67	23.38	26.60	24.71	23.86		18.08	
22	13.01		13.95		23.57	23.60	26.59	24.81	23.87		18.08	
23	13.01		13.95		23.56		26.60	24.64	23.82		18.07	

Une autre différence est constatée au mois de novembre (RNBB au alentour de 18°C et CYRCE 16°C). Cependant, les données TSG en registrées par le Téthys II en continu dans les eaux de surface, le long de son trajet, en novembre (Tableau III.12 : Donnée de température TSG issue de CYRCE 5 (novembre) donnent des moyennes autour des 15°C- 16°C, c'est à dire cohérentes et dans la plage tranche de température pour la saison et pour des eaux du bassin nord-occidental de la méditerranée (voir www.medchange.org). La différence entre les deux jeux de donnée (RNBB et CYRCE) pourrait venir, comme dit précédemment, soit de différences soit des instruments, soit de leur positionnement puisque la météo de CYRCE 5 ne justifie pas un refroidissement des eaux. Rien ne nous paraît, en l'état actuel, pouvoir trancher, dans un sens ou dans l'autre.

De plus, les températures de mars (18°C en moyenne) indiquées par la bouée de la RNBB (Tableau III.12) semblent être élevées pour la saison, si l'on tient compte des autres données disponibles sur les sites Medchange, voire même historiquement exceptionnelles depuis un siècle (Romano and Lugrezi, 2007 [68]).

Tableau III.12 : Donnée de température TSG issue de CYRCE 5 (novembre)

	Températures Moyennes	Températures Minimales	Températures maximales
Du 25 au 29 novembre 2005 (12h28 - 05h37)	15.87	14.01	17.73
Du 29 au 29 novembre 2005 (05h37- 06h19)	15.72	15.52	15.92
Du 29 au 30 novembre 2005 (6h20- 19h16)	15.09	13.02	17.14
Du 30 novembre au 5 décembre 2005 (19h16- ?)	16.38	12.98	16.85

III.8. Cas particulier des stations de cantonnement

III.8.1. Étude des stations dans les zones de cantonnement (CYRCE 2) en surface

Dans la surface couverte par la réserve des bouches de Bonifacio, il existe trois cantonnements de réserve. Nous n'avons pas pu savoir par l'équipe scientifique, quelles étaient les raisons qui, au moment de la constitution du parc marin, avaient présidé au choix de leur localisation. Certes il n'existait aucune raison *a priori* de penser que les caractéristiques hydrologiques puissent y être différentes qu'aux alentours mais nous avons pourtant voulu le vérifier.

Nous allons donc maintenant examiner s'il y a ou non une différence dans les mesures hydrologiques entre les stations CYRCE réalisées à l'intérieur des cantonnements de pêche et celles réalisées à l'extérieur

Les trois zones de protection spéciales se trouvent: dans le secteur ouest du détroit pour le cantonnement des Moines, à l'entrée du port de Bonifacio pour le cantonnement de Bonifacio et en milieu de détroit pour le cantonnement des Lavezzi (entourant les îles Lavezzi)

Dans la Figure III.34 on voit que pour le cantonnement des Moines pour toutes les missions CYRCE nous disposons, à l'intérieur de ce cantonnement, de deux stations (stations 6 et 7), pour le cantonnement de Bonifacio nous disposons, à l'intérieur de ce cantonnement de la station 2 et 3, pour le cantonnement des Lavezzi nous disposons, à l'intérieur de ce cantonnement, de trois stations (stations 1, 13 et 14), pour le cantonnement des Cerbicales nous disposons, à l'intérieur de ce cantonnement de la station 2. Ces données sont récapitulées dans Tableau III.13.

Tableau III.13: Récapitulatif des numéros de profil de stations présents dans les cantonnements

Cantonement Station	Moines		Bonifacio		Lavezzi		
	6	7	2	3	1	13	14
CYRCE 1	41; 43;45; 47 et 49	42 et 48	2	38 et 53	1; 3; 5; 7; 9; 11; 13 et 20	6	12
CYRCE 2	58	57; 81	66; 68	67	70; 75	71	74
CYRCE 3	88	87	102	103	100	99	91
CYRCE 4	110 et 144	109 et 146	120 et 138	119 et 134	123 et 136	122 et 135	124 et 154
CYRCE 5	169	167	174	173	161	175	176
CYRCE 6	191 et 194	192 et 193	181 et 204	183 et 202	178 et 207	179 et 206	215 et 216

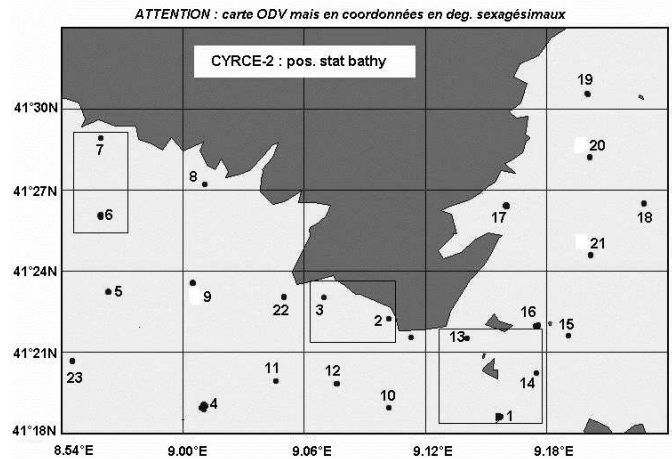


Figure III.34: Localisation des stations présentes dans les zones de cantonnement

Comme nous l'avons vu plus haut, la situation hivernale rencontrée lors de CYRCE 2, permet de minimiser les variabilités horaires selon les profils répétitifs nous allons reprendre la figure représentée (Figure III.32) pour en discuter dans le cadre de l'intégration des stations situées dans les cantonnements de réserve dans l'ensemble des missions CYRCE. Rappelons la procédure utilisée. Chaque profil (du profil 57 à 86) a été résumé de la surface à -35m de profondeur, on a donc 30 individus pour lesquels l'ensemble de la moyenne des variables a été testé. De manière claire et évidente, les profils hydrologiques réalisés à l'intérieur des cantonnements, représentés sur le graphique ici par des carrés, se positionnent bien dans le groupe des stations ouest. Comme précédemment le profil réalisé dans la zone de cantonnement des îles Lavezzi est en position intermédiaire ici aussi

position géographique cohérente. Sur l'ensemble des stations de la mission CYRCE 2, les profils réalisés dans les cantonnements de réserve présentent, tant du point de vue des variations physiques que celles liées au biologique, les caractéristiques des profils qui leur sont voisines. La variabilité notable des profils réalisés à la station 1 provient incontestablement de sa position intermédiaire entre les deux zones. Dans cette zone la plus resserrée du détroit des Bouches de Bonifacio, donc dans la zone susceptible de présenter la plus forte variabilité à petite échelle de temps, selon la situation météorologique ponctuelle et les mouvements de masse d'eau.

Pour limiter l'influence de l'heure du prélèvement sur les variables, nous avons choisi de conduire une ACP dans une situation où ces relations sont limitées c'est-à-dire en hiver. Nous avons donc choisi de travailler sur les profils de la mission CYRCE2.

Comme présenté plus haut, pour chaque profil (représentants les individus, 30 au total, pour CYRCE 2) où chaque variable a été moyennée de la première donnée du profil jusqu'à 35 m de profondeur. Les variables actives de l'axe 1 qui représente 53.97 % de l'information sont : pour les positives la température, la fluorescence et la salinité ; et pour les négatives la transmission. L'axe 2 qui représente 37.27% de l'information, est représenté, par la variable active qui est : l'oxygène dissous du côté négatif de l'axe 2 (Figure III.35).

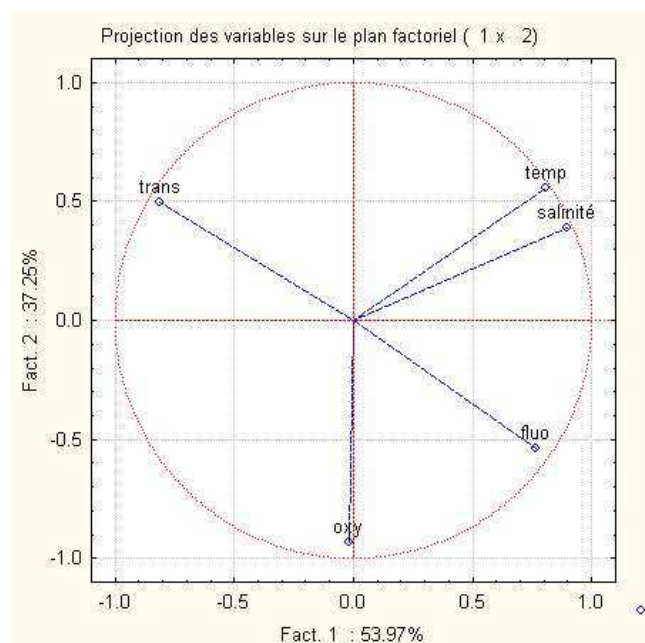


Figure III.35: Cercle des corrélations de l'ACP effectuée sur les moyennes des profils de CYRCE 2

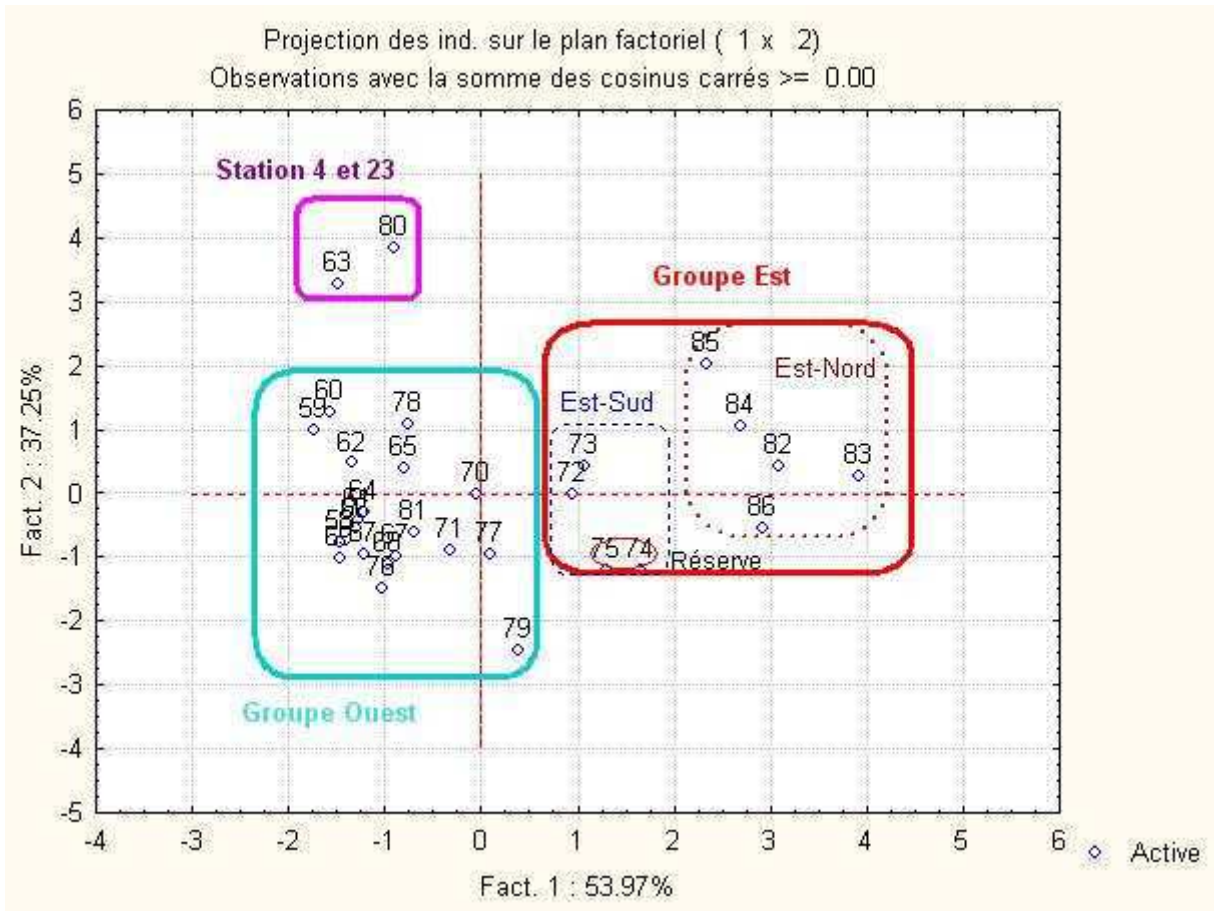


Figure III.36: Projection des individus de l'ACP effectuée sur les moyennes des profils de CYRCE 2

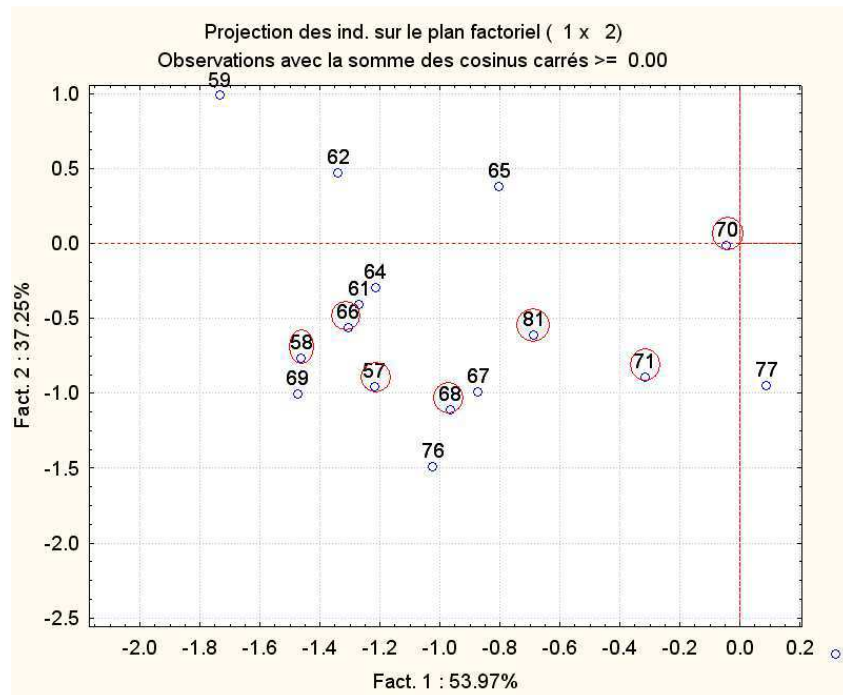


Figure III.37: Zoom du groupe ouest de l'ACP CYRCE 2

Les cantonnements (qui sont indiqués sur les figures ci-dessus (Figure III.36 & Figure III.37) entourés par des cercles rouges) se situent dans le groupe ouest (cantonement des Moines, de Bonifacio), le cantonnement des Lavezzi se trouve à la jonction des groupes est et ouest, nous pouvons dire que les stations de ce cantonnement se situent quant à leurs analyses des paramètres moyens, à l'intérieur d'un groupe qui leur est statistiquement et géographiquement voisin.

III.8.2. Test Kruskal Wallis sur les zones de cantonnement

Pour compléter cette analyse, un test non paramétrique de Kruskal Wallis (avec les tests post hoc) est effectué sur les mêmes types de données (moyenne des variables de température, salinité, fluorescence, turbidité, oxygène dissous, absence de variable calculé à partir de variable déjà représentée, ex: le pourcentage de saturation en oxygène dissous est calculé à partir de l'oxygène dissous), pour chaque profil, de -2 m à -10 m, cet échantillon étant considéré comme représentatif des eaux de surfaces. Puis les individus (moyenne de variable) ont été répartis en différents groupes de cantonnement : Moines, Bonifacio, Lavezzi. Les résultats des tests montrent avec un risque d'erreur de rejet de l'hypothèse H_0 à 0.05 qu'aucune différence significative n'existe entre ces différents groupes de cantonnement pour chaque variable.

III.8.3. Étude des stations dans les zones de cantonnement en profondeur (mars 2005 -CYRCE 2)

Pour des gestionnaires d'un parc, l'importance est peut être se qui se passe près du fond pour les cantonnements de réserve : biodiversité, recrutement de larves et de juvéniles. C'est pour cela que le même type d'ACP a été conduit sur les profils de CYRCE 2 en calculant la moyenne résumant l'individu (profil) de -30 m au fond), pour la situation d'hiver.

Pour la situation d'été, le même type d'ACP a été réalisé, sur les données de CYRCE 1, selon la même méthode de réduction des échantillons, mais cette fois la moyenne a été faite avec deux répliquas par station

Les axes facteurs 1 et 2 représentent près de 75% de la variance totale et la Figure III.38 représente la projection des stations sur le plan de ces deux facteurs.

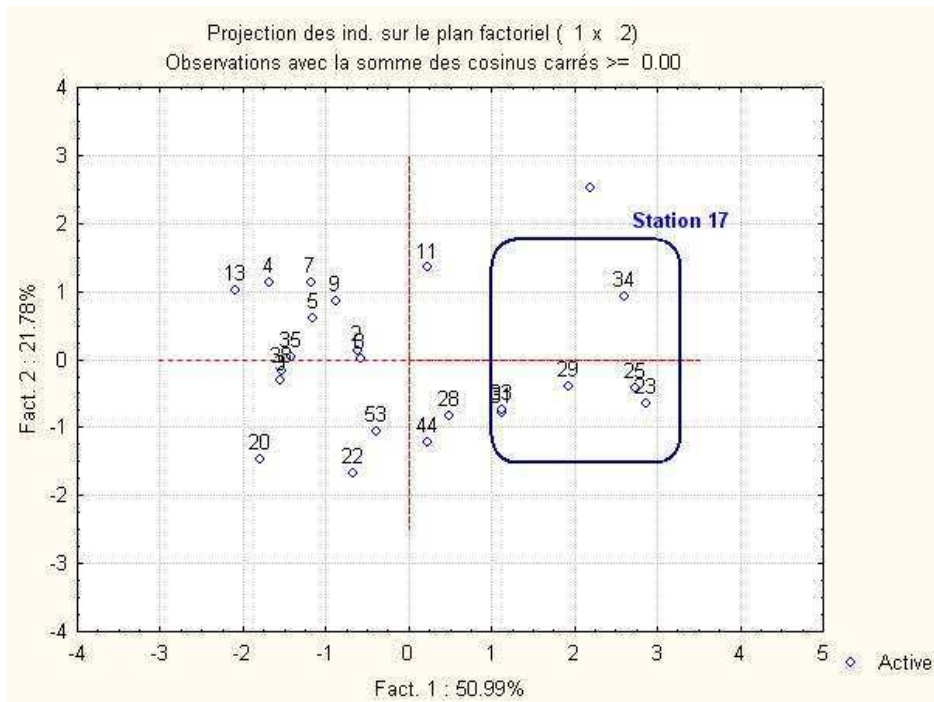


Figure III.38: Projection des individus sur les facteurs 1 et 2 de l'ACP sur CYRCE 1 (mission d'été, août), individus résumés par une moyenne de variable de -30 m au fond. n=23.

Cette analyse permet de conclure qu'il n'y a pas de différence statistique entre les différents cantonnements, et ce, pour aucune des variables. En revanche, elle montre une très nette opposition entre les stations de cantonnement et la station 17 (localisée au niveau du golfe de Sant'Amanza) qui présente une particularité (plus chaude, moins de fluorescence, moins salée). Il ne semble pas que ces particularités puissent être attribuées à la différence horaire des profils (puisque le groupe de la station 17 contient des profils de tranche horaire variée), ni à la différence est-ouest (mise en évidence dans la partie III.7) puisqu'elle n'apparaît pas pour les autres profils. En effet, cette différence est atténuée par la réduction des échantillons en moyennant les variables de 35 m jusqu'au fond.

Le golfe de Sant'Amanza où se situe la station 17 est localisé dans la partie est de bouches de Bonifacio. Diverses activités humaines s'exercent dans ce golfe : activité nautique, plaisance, plongée, pêche (Le Direach and Francour, 1991 [40]), structure portuaire, mouillage de plaisance... Mais surtout, et c'est un paradoxe administratif pour une réserve naturelle, depuis 1988, une ferme marine est implantée en fond de golfe avec un dispositif de cages flottantes (20 en 1994, Pergent-Martini, *et al.*, 1997 [60]), fixées à environ 300 m du rivage (Ferrat, *et al.*,

2002 [23]), où sont élevées les espèces *Dicentrarchus labrax* et *Sparus aurata* et semble avoir connu une extension récente. Cette situation mérite une attention particulière et une stratégie d'étude plus adaptée que celle utilisée pendant les missions Cyrce. Cette étude spécifique ne sera donc pas développée dans le cadre de ce mémoire.

Chap IV. Impact de l'hydrodynamisme sur les espèces biologiques, Utilisation des connaissances acquises et des outils disponibles pour la gestion de l'écosystème

IV.1. Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons fait un inventaire et un état des lieux de l'hydrologie et de l'hydrodynamisme des bouches de Bonifacio. Ces chapitres, nous ont permis de réaliser plusieurs de nos objectifs à savoir obtenir une vision globale du système à petite échelle d'espace et de temps, tant d'un point de vue courantologique qu'hydrologique. Cependant, cette analyse en elle-même ne remplit qu'une partie de la compréhension nécessaire de l'écosystème des bouches de Bonifacio. En effet, les écosystèmes sont contrôlés en partie par les contraintes hydrodynamiques, ces dernières conditionnent la répartition des espèces. Par exemple l'écosystème planctonique composé d'organismes qui, comme leur nom l'indique, sont "passifs" ou limités dans leurs déplacements volontaires, est incapable de maintenir une distribution spatiale indépendante de celles des masses d'eau (Hecq, 2003 [32]). Mais ceci est également vérifié pour de nombreux organismes nectoniques qui ont une ou des phases larvaires planctoniques.

Dans une zone comme la réserve des bouches de Bonifacio, les questions de gestion de l'écosystème sont multiples, car plusieurs acteurs s'y côtoient (gestionnaires, touristes, plongeurs, pêcheurs), et où la gestion des ressources est primordiale. Ces ressources, et plus particulièrement les ressources halieutiques, doivent être préservées, mais également être économiquement viables pour les pêcheurs professionnels donnant lieu à un compromis entre protection et prélèvement. Pour ce faire, des cantonnements de réserve ont été mis en place, mais le choix de leur emplacement est un choix stratégique. En effet, un des problèmes majeurs des gestionnaires est que les cantonnements de réserve établis doivent augmenter la ressource sans épuiser le capital, mais encore faut-il que ceux-ci soient acceptés par les patrons de la petite pêche locale. Et pour cela il faut que ces cantonnement exportent et enrichissent l'ensemble de la réserve, y compris les parties où la pêche est autorisée. C'est ce que l'on appelle "l'effet réserve".

A ce jour, il existe dans la partie française plusieurs zones de protection renforcée et zones de non-prélèvement, nous n'en considéreront ici que trois d'entre elles (les autres étant hors de la zone d'étude) localisées globalement autour de l'archipel des Lavezzi, des îles Bruzzi et des Moines, et de part et d'autre du goulet de Bonifacio entre le capo di Feno et le capo di Pertusato (Figure I.4). En effet, c'est dans les années 1960, lors d'une première mission océanographique in Bellan, *et al.*, 1961 [6] ; Office de l'Environnement de la Corse, 2007 [52] que l'intérêt naturaliste des bouches de Bonifacio a été mis en évidence, ce qui a amené à préconiser la création d'une réserve en raison «*de la position clé qu'elles (les îles Lavezzi et Cerbicale) occupent au niveau du carrefour biogéographique que représente le détroit corso sarde* ». A la suite de cela, des premières mesures de protection ont été prises pour la flore et l'avifaune des archipels Lavezzi et Cerbicale, zones riches en biodiversité, tant terrestre que marine.

La question du rôle de ces cantonnements pour l'enrichissement de l'ensemble de la réserve pose naturellement en premier lieu pour les poissons d'intérêt commercial.

De nombreuses espèces qui vivent dans ces zones sont des espèces démersales (rascasse : *Scorpaena.sp.*, congre : *Conger conger*, mostelle : *Physic phycis*, rouget : *Mullus surmuletus*) à ce titre ces espèces nous intéresseront particulièrement, tant au niveau de notre propre étude que de leur gestion, car elles représentent un intérêt économique et écologique. Par définition, nous engloberons dans les espèces démersales aussi bien les espèces strictement démersales c'est-à-dire dire celles qui vivent en contact sur le fond, mais également les espèces qui peuvent être amenés dans leurs déplacements à se trouver souvent près du fond. Sur le plan de la résistance à l'hydrodynamisme, la situation est très différente pour un poisson pélagique que pour une espèce démersale quant à cette capacité. En effet, près du fond, la rugosité du substrat rocheux (cas très généralement représenté dans la réserve) présente de nombreux obstacles permettant de résister aux courants. Ce dernier élément (rugosité du fond) ne nous est pas accessible dans cette étude, nous avons donc postulé que les deux situations étaient (en première approche) réductibles l'une à l'autre, à savoir, ne prendre en compte, à partir de quelques exemples, la seule capacité d'un poisson à résister aux courants.

Ce chapitre présente donc les impacts possibles des conditions hydrodynamiques présentées dans les chapitres précédents sur les espèces, en particulier démersales. Dans un premier temps nous exposerons les données de la littérature concernant les capacités de nages de quelques espèces, établies par l'observation ou en laboratoire et que nous avons compilé pour les rassembler ici. Puis nous les comparerons à l'inventaire des situations courantologiques que nous avons rencontré dans les bouches de Bonifacio. Et enfin nous utiliserons quelques outils de simulation numérique, qui pourraient, dans le futur, aider à la gestion de l'écosystème et des populations.

IV.2. Comportement de nage des poissons.

Pour les espèces démersales, il est important de différencier les adultes dont les capacités de déplacements sont plus importantes, des larves et des juvéniles. Si nous parlons d'individus adultes cela sous-entend, individus capables de mouvement et d'adaptation. En revanche, si nous parlons de stades larvaires et juvéniles (stades dont la capacité de nage est réduite par rapport à un adulte et où l'énergie dépensée par un individu ne peut compenser la dérive générale des eaux) connaître l'influence des contraintes hydrodynamiques sur leurs mouvements, leurs dispersions deviennent plus cohérentes. Puisque alors leur répartition va dépendre essentiellement des vitesses et directions de courants. En effet, la compréhension des interactions entre la vitesse du courant et la capacité de nage des poissons est essentielle pour la conservation des espèces (Leavy and Bonner, 2009 [41]).

Une des premières questions posées se rapporte au comportement de nage des poissons et plus largement des espèces démersales face au courant, à savoir en fonction des courants qu'ils rencontrent à Bonifacio. Nous allons prendre pour base les données moyennes de vitesses de courant établies dans les parties précédentes en nous posant la question : les juvéniles de ces espèces démersales sont-ils ou non capables de lutter ou de résister à ces courants ?

Pour y répondre, nous avons d'abord recherché dans la littérature des informations sur les vitesses de nages de certaines espèces caractéristiques. La

littérature est bien fournie sur ce sujet mais on se rend très vite compte que les chiffres concernent souvent les mêmes espèces. Il est d'autre part plus fréquent de trouver des vitesses de nage pour les espèces d'eaux continentales. C'est pour cela que nous commencerons par des vitesses de poissons d'eau douce (souvent migratrices, et remontant les cours d'eau) dont les données sont facilement disponibles à travers diverses études de pêche et d'études d'impacts (barrages) sur les rivières. Pour notre propos (relation entre les capacités de nage d'un organisme aquatique et la force du flux auquel il peut s'opposer) il est peu important que ce ne soit pas des poissons marins, et cela représente l'avantage que la documentation soit plus fournie. Puis nous donnerons des notions de vitesse de nage de poissons marins, le plus souvent pélagiques, et là les documents sont plus rares, et sont surtout des observations naturalistes. On peut comprendre que l'appareil natatoire d'un thon ou d'un loup sera plus performant que celui d'une rascasse et donc leurs vitesses de nage de poissons pélagiques seront sûrement supérieures à celles des poissons démersaux.

Dans la littérature, les notions de vitesse de nage des poissons d'eau douce sont souvent exprimées à travers des vitesses représentant les performances maximales (Vagner, *et al.*, 2008 [76]). Ces dernières varient en fonction des facteurs intrinsèques (taille, forme, physiologie) et des facteurs environnementaux (température, l'oxygène). Déterminées en fonction de situations expérimentales, ces vitesses de pointe sont sans doute éloignées des vitesses moyennes. Il est certain qu'elles ne peuvent être maintenues que pendant un temps limité pour des questions de consommation énergétique par l'individu. Effectivement, il est plus courant de trouver ces performances en termes de longueur de corps et de temps. Nous essaierons cependant de fournir des vitesses en termes de distance et de temps (type $m.s^{-1}$ ou $cm.s^{-1}$), car elles seront plus facilement explicites en comparaison des unités utilisées pour les courants. Le tableau suivant indique les vitesses de nage pour certaines espèces de poissons d'eau douce.

Tableau IV.1 : Vitesse de pointe de nage de poissons d'eau douce

Poisson	Vitesse	Sources
Perche	0.60 m.s-1	Tables de Kreitmann
Brochet	0.45 m.s-1	Tables de Kreitmann
Truite	4 m.s-1	Tables de Kreitmann
Barbeau	2.40 m.s-1	Tables de Kreitmann
Chevesne	2.70 m.s-1	Tables de Kreitmann
Hotu	3.40 m.s-1	Tables de Kreitmann
Carpe	0.4 m.s-1	Tables de Kreitmann
Grands salmonidés migrateurs	6 à 8 m.s-1	Tables de Kreitmann
Truite et cyprinides rheophiles	3 à 4 m.s-1	Tables de Kreitmann

Les vitesses de nage exprimées ici sont des vitesses de pointe qui correspondent à la vitesse maximale à laquelle le poisson peut nager. Ces vitesses sont comprises entre 0.4 m.s⁻¹ pour la carpe et le brochet, et 8 m.s⁻¹ pour les grands salmonidés migrateurs.

Nous présentons un autre tableau de vitesse de nage de poisson pour les poissons marins présents en méditerranée, ces données sont issues de la Fish Data Base (www.fishbase.org/) qui est une base de données sur les poissons, regroupant diverses observations sur les espèces avec pour indication leur morphologie, leur habitat, leur biologie, etc.

Tableau IV.2 : Valeur issue de la FishBase gérée par le muséum National d'Histoire naturelle

Nom scientifique	Nom commun	Indications	Vitesse de nage en m.s-1	nb ind	Répartition géographique
<i>Acanthocybium solandri</i>		espèce apparentée aux maquereaux	04. à 21.4	5	
<i>Argyrosomus regius</i>	Maigre		1.13	1	Atlantic méditerranée
<i>Aspitrigla cuculus</i>	Gourdin rouge	15 à 20 m de prof	0.47	1	atlantique et med
<i>Auxis rochei rochei</i>	Bonitou		0.68	1	présent en Méditerranée
<i>Brevoortia tyrannus</i>			0.13	1	atlantic
<i>Clupea harengus</i>	Hareng		1.74	1	eau froide
<i>Coryphaena hippurus</i>		0.56 m.s-1, peut dépasser des vitesses de 50 nœuds		1	occasionnel en med
<i>Echiichthys vipera</i>	Vive		0.4	1	atlantic et méditerranée
<i>Euthynnus affinis</i>	Petit thon oriental		0.76 à 5	2	
<i>Gasterosteus aculeatus aculeatus</i>	Epinoche	benthopélagique	0.2	1	présent en Méditerranée
<i>Liza ramada</i>	Muge ou mulet	marin et lagune	0.61	1	présent en Méditerranée
<i>Merluccius merluccius</i>	Merlu		0.79	1	présent en Méditerranée
<i>Mugil cephalus</i>	Mulet gris, muge	de 0 à 300 m de prof	4.31	1	présent en Méditerranée
<i>Pomatomus saltatrix</i>			0.4	1	présent en Méditerranée
<i>Pomaschistus minutus</i>	Petit gobie		0.27	1	présent en Méditerranée
<i>Sarda sarda</i>	Bonite à dos rayé		0.35 à 1.2	2	présent en Méditerranée
<i>Scomber scombrus</i>	Maquereau commun		0.28 à 5.4	7	présent en Méditerranée
<i>Sphyraena barracuda</i>	Barracuda		3.79 à 12.13	10	présent en Méditerranée
<i>Spinachia spinachia</i>	Epinoche de la mer		0.72	1	
<i>Trachurus mediterraneus</i>	Severeau ou chinard		2.8	1	présent en Méditerranée
<i>Trisopterus luscus</i>	Tacaud	5 à 300 m de prof	0.55	1	présent en Méditerranée
<i>Xiphias gladius</i>	Espadon		2.25 à 24.86	10	présent en Méditerranée
<i>Zeus faber</i>	Saint Pierre	5 à 200 m de prof	0.3	1	présent en Méditerranée

Dans le Tableau IV.2, les vitesses de nage entre les différents poissons présentent de grandes différences entre elles. Les maxima se retrouvent pour l'espadon de 2.25 à 24.86 m.s⁻¹, pour les espèces apparentées aux maquereaux de 0.4 à 21.4 m.s⁻¹ et pour le barracuda 12.2 m.s⁻¹. Les vitesses les plus faibles sont de l'ordre de moins d'1m.s⁻¹, avec 0.47 pour le gourdin rouge, 0.4 pour la vive, 0.2 pour l'épinoche et 0.27 pour le gobie. D'après ce tableau, les plus petites vitesses de nage sont enregistrées pour les plus petits poissons, cependant nous ne pouvons affirmer cette hypothèse uniquement à partir de ces données. En effet, ces vitesses de nage issues de la FishBase ne nous renseignent pas sur les conditions d'enregistrement de ces vitesses, sur la taille de l'échantillon, et sur la taille des poissons.

Or bien d'autres paramètres vont exercer leur influence, dont les conditions du milieu. D'après une étude sur le loup (*Dicentrachus labrax*) que nous citerons comme exemple, la température, l'oxygène et la luminosité influencent l'activité natatoire ; avec une baisse de l'activité à 12°C et 22°C et un renforcement de l'activité nocturne pour des valeurs d'oxygène supérieures à 10 m.l⁻¹; et une baisse de l'activité natatoire pour les forts et faibles éclaircissements (Bégout Anras and Lagardère, 1998 [5]). L'activité natatoire du loup indique deux températures optimales de nage, puisque la nuit, où la température diminue, l'activité natatoire en fait autant. Une augmentation d'oxygène dans le milieu correspond à une augmentation de l'activité du loup. Cependant, ces conditions peuvent se compenser, nous citerons comme exemple que l'activité natatoire du loup peut être vive lors d'une augmentation de température malgré un manque d'oxygène. L'animal poïkilotherme, malgré un manque d'oxygène, trouve une compensation énergétique grâce à la température. L'activité natatoire est également sensible aux conditions atmosphériques tel que le vent avec, toujours pour le loup, une amplification de la vitesse moyenne et de la dispersion de nage quand la vitesse du vent dépasse 8 m.s⁻¹(Bégout Anras and Lagardère, 1998 [5] ; Lagardère, *et al.*, 1994 [38]).

Les espèces s'adaptent donc à toutes ces conditions de température, d'oxygène et d'éclairement, en migrant dans la colonne d'eau pour les espèces pélagiques ou en se déplaçant pour les espèces démersales, pour trouver les températures et éclaircissements optimaux à leurs besoins. Rappelons tout de même que certaines espèces ne sont pas exclusivement pélagiques ou démersales tout au long de leur vie. En fonction de leurs différentes phases de développement (œufs, larves ou juvéniles), elles peuvent vivre soit dans la colonne d'eau, soit près du fond.

Dans la FishBase il est généralement pris en considération des adultes. Pour le problème qui nous préoccupe, il est évident que les juvéniles auront des vitesses de nage différentes (de telles données seraient disponibles dans la FishBase, mais nous n'avons cependant pas pu accéder aux pages signalées).

Nous avons vu que les variables (environnementales et physiologiques) susceptibles de modifier les vitesses de nage des poissons sont donc nombreuses et souvent exprimées (taille, variables abiotiques) dans l'expression de ces vitesses. C'est pourquoi nous avons voulu compléter les données issues de la FishBase par un autre jeu de données issues de la bibliographie (Tableau IV.3). Le plus souvent, ces vitesses sont mesurées en laboratoire et sont données en unité de longueur de poisson en fonction du temps ($L.s^{-1}$ = Longueur, $BL.s^{-1}$ = Boddy Lenght ou $LC.s^{-1}$ = Longueur de Corps;) autrement dit on peut parler de vitesse relative à la taille du poisson. Ces données de laboratoire, donc en conditions contrôlées, expriment des vitesses de nage pour des températures et des niveaux de saturation en oxygène précis (ces derniers seront notés en commentaire quand ils seront disponibles). Différents paramètres liés à la nage sont mesurés soit en bassin, soit en milieu naturel :

La vitesse de nage critique U_{crit} : la consommation en oxygène augmente exponentiellement avec la vitesse de nage d'un poisson (Gallaugher, *et al.*, 2001 [26]). Cette courbe exponentielle atteint sa limite pour une vitesse maximale appelée U_{crit} (Nelson, *et al.*, 2002 [50]),

La vitesse de nage optimale est définie par la relation entre la consommation d'oxygène et la vitesse de nage, c'est à dire celle où le coût énergétique sera minimal pour le poisson U_{ms} (Vagner, *et al.*, 2008 [76]). Cette vitesse est susceptible d'être conservée durant un certain temps par le poisson sans engendrer des modifications physiologiques. La vitesse de nage maximale U_{max} correspond à la vitesse que le poisson est capable de maintenir, avec des battements de queue constants et réguliers. Les critères pour définir U_{max} ou U_{ms} à un changement de nage du poisson traduit par une diminution des battements de la queue et un changement de position dans le tunnel de test (en arrière de la chambre près de la grille), Sepulveda and Dickson, 2000 [70].

Tableau IV.3 : Vitesse de nage de poisson issue de la bibliographie

Nom poisson	Catégorie/commentaire	Min	Max	Moyenne	Source	Commentaire
	petits poissons (0.1 m)	25 BL.s-1			Wardle, 1975	en labo et observation à proximité des appareils de pêche
	grands poissons (1 m)	4 BL.s-1			Wardle, 1975	
<i>Dicentrarchus labrax</i> (Loup)	Ucrit	0.63 m.sec-1	1 m.sec-1	0.87 m.sec-1	Lembo, et al 2007	avec SE 0.031
		2.58 BLsec-1	3.98 BLsec-1	3.43 BLsec-1	Lembo, et al 2007	avec SE 0.12
				2.25 BLsec-1	Chatelier et al, 2005	avec SE 0.08
	vitesse repos	0.1 m.sec-1	0.3 m.sec-1		Lembo, et al 2007	Après un ajustement de calibration
	vitesse moyenne	0.4 m.sec-1	0.6 m.sec-1		Lembo, et al 2007	
	vitesse intense	>0.7 m.sec-1			Lembo, et al 2007	
<i>Solea senegalensis</i> (Sole)	vitesse moyenne	1.21 BLsec-1 ou 12.13 cm.s-1			Durate et al, 2006	
<i>Thunnus thynnus</i> (thon rouge)		1.2 m.s-1	3.2 m.s-1	1.88 m.s-1 (sd=0.4)	Wardle, et al 1989	Observation en captivité par enregistrement vidéo (fréquence de battement)
		0.6 L.s-1	1.2 L.s-1	0.77 L.s-1 (sd= 0.16)		
<i>Pagrus auratus & australis Acanthopagrus</i>		20 SL S-1			(Clark et al., 2005).	
<i>Melanogrammus aeglefinus</i> (aiglefin)		10 cm.sec-1			Tyler	
<i>Gasterosteus aculeatus</i> (épineche)				24.8 ±0.3 cm.s-1	Schaarschmidt and Jürss, 2003	
				≈ 4.5 BL.s-1		
<i>Diplodus vulgaris</i> (dorade blanche)			12.3 cm.s-1		Planes et al, 1997	
<i>Pollachius virens</i> (Lieu Noir)	Uopt, à 10°C			1.4 BL.s-1	Steinhausen et al, 2004	à 10°C
	Ucrit, à 10°C			2.5 ±0.1 BL.s-1	Steinhausen et al, 2005	à 10°C
	Ums, à 14°C			2.9 BL.s-1	He and Wardle, 1988	à 14°C
<i>Merlangius merlangus</i> (Merlan)	Uopt, à 10°C			1.0 BL.s-1	Steinhausen et al, 2006	à 10°C
	Ucrit, à 10°C			1.4 ±0.1 BL.s-1	Steinhausen et al, 2007	à 10°C
<i>Sparus aurata</i> (Dorade royale)	Ucrit -sauvage-	0.86 ±0.01 m.s-1 ou 4.52 ±0.05 BL.s-1			Basaran et al, 2007	sauvage
	Ucrit -élevage-	0.79 ±0.01 m.s-1 ou 4.21 ±0.05 BL.s-1			Basaran et al, 2007	élevage
<i>Mugil cephalus</i> (mullet)	Uop	45 cm.s-1 (~ 1.12 m Lcorps)			Vagner, 2008	
	Uopt, poisson de 491.3 gr	1.2 BL.s-1			Vagner, 2008	
Espèce de téléostéens		42 cm.s-1			Videler, 1993	Uopt pour un poisson de 491.3 gr
<i>Trachinus vipera</i> (vive)		1.8 L.s-1			Magnan, 1930	
		40 cm.s-1 (pour un poisson de 22.4 gr)			Magnan, 1930	
<i>Trigla pini</i> (rouget)		2.4 L.s-1			Magnan, 1930	

		47 cm.s-1 (pour un poisson de 19.2 cm)		Magnan, 1930	
<i>Zeus faber</i> (Saint Pierre)		1.6 L.s-1		Magnan, 1930	
		30 cm.s-1 (pour un poisson de 19.7 cm)		Magnan, 1930	
<i>Sebastes dactylopterus</i> (Sébaste)		3.6 L.s-1		Magnan, 1930	
		98 cm.s-1 (pour un poisson de 26.8 cm)		Magnan, 1930	
<i>Zoarces viviparus</i> (blennie vivipare)		18 cm.s-1	21 cm.s-1	Hoar and Randall, 1969	
		2.8 L.s-1	3.3 L.s-1	Hoar and Randall, 1969	
<i>Pomatoschistus itajara</i> (gobie sp.)	poisson d'1 m	174 cm.s-1		Hoar and Randall, 1969	poisson d'un mètre
<i>Serranus scriba</i> (serran)	poisson d'1 m	227 cm.-s		Hoar and Randall, 1969	poisson d'un mètre
<i>Mullus barbatus ponticus</i> (rouget)		109 cm.s-1		Hoar and Randall, 1969	
		9.2 L.s-1		Hoar and Randall, 1969	
<i>Pholis gunnellus</i> (gonnelle)		30 cm.s-1		Hoar and Randall, 1969	présent en atlantique "serpent des mers"
		3 L.s-1		Hoar and Randall, 1969	
<i>Gobius minutus</i> (gobie)		27 cm.s-1		Hoar and Randall, 1969	
		4.2 L.s-1		Hoar and Randall, 1969	
<i>Trigla ssp</i> (gourdin)		129 cm.s-1	135 cm.s-1	Hoar and Randall, 1969	
		7.2 L.s-1	7.5 L.s-1	Hoar and Randall, 1969	
<i>Pleuronectes platessa</i> (plie)		3.7 cm.s-1	15 cm.s-1	Hoar and Randall, 1969	
	ind de 0.7 à 15 cm	4.9 L.s-1	16 L.s-1	Hoar and Randall, 1969	individus de 0.7 à 15 cm
<i>Mugil cephalus</i> (mullet)	Uop	45 cm.s-1 (~ 1.12 m Lcorps)		Vagner, 2008	
Sparts et merlans	durant le jour	16 cm.s-1	24 cm.s-1	Onsrud, 2005	durant le jour

Tableau IV.4 : Tableau récapitulatif des abréviations du Tableau IV.4

Ucrit= Vitesse critique de nage
Uopt = Vitesse de nage optimale
Ums= Vitesse de nage maximale
BL= BodyLength
• Espèces pélagiques
• Nage près du fond
• Espèces démersales

Nous donnons également, un tableau résumant les abréviations pour qualifier les différentes vitesses indiquées dans le Tableau IV.4

D'après le Tableau IV.3, les vitesses de ces poissons sont variables. Le thon a la plus grande vitesse de nage avec 1.88 m.s^{-1} . La dorade (qui nage près du fond) peut atteindre une vitesse critique de 0.86 m.s^{-1} ou de 4.52 B.L.s^{-1} (pour la sauvage) et 0.79 m.s^{-1} ou 4.21 B.L.s^{-1} (pour celle d'élevage). Si l'on compare cette vitesse à celle du loup (en moyenne 0.87 m.s^{-1} ou aux alentours de 3 B.L.s^{-1}), nous constatons qu'entre une espèce pélagique et une espèce qui nage près du fond, il y a peu de différence. Le rouget (*Mullus barbatus ponticus*) petite espèce démersale, atteint l'une des plus fortes vitesses exprimées en cm.s^{-1} (109 cm.s^{-1}) et la plie la plus forte vitesse exprimée en BL.s^{-1} (16 BL.s^{-1}). Nous retiendrons tout particulièrement les vitesses des espèces démersales (sole, vive, rouget, blennie, gonnelle, gobie) qui nous intéressent tout particulièrement et qui sont comprises entre 12.18 et 47 cm.s^{-1} et 1.21 et 4.2 L.s^{-1} . Nous constatons que les vitesses de poisson sont très variables et difficilement classables en fonction du mode de vie. Les poissons pélagiques ou ceux se déplaçant près du fond ne nagent pas forcément plus rapidement que les espèces démersales et *vice versa*. Les vitesses de nage exprimées en distance et en temps vont nous donner une bonne indication, car elles seront plus facilement comparables à celles des courants grâce à leurs unités. En revanche, il sera plus facile de comparer entre deux poissons des vitesses de nage exprimées en longueur de corps et unité de temps. En effet, si nous regardons les vitesses de nage en m.s^{-1} entre le loup et la dorade, celle du loup est plus élevée ; en revanche si nous regardons la vitesse exprimée en BL.s^{-1} , la dorade possède une vitesse plus grande donc une capacité de nage supérieure à celle du loup, car à taille comparable la dorade sera plus rapide.

Pour rester toujours dans la problématique de gestion de la ressource, et notamment de la production de biomasse sur les cantonnements, nous avons vu qu'il était primordial de suivre également les larves et juvéniles des différentes espèces, car ils sont plus dépendants de l'hydrodynamisme. Tout comme les adultes, mais bien évidemment avec un moindre effet, les possibilités de déplacements de ces individus, en fonction de la force de l'hydrodynamisme entreront en compte dans leurs distributions spatiales. Nous donnons dans les tableaux suivants (Tableau IV.5

& Tableau IV.6) l'estimation de vitesse de nage de différentes larves, le plus souvent verticale. Une notion de ces vitesses peut être indicative quant à la dispersion de larves et/ou juvéniles même si ce sont des individus qui ont une faible capacité pour lutter contre le courant. Parmi ces études, une des plus quantitativement documentées est celle de Bishai, 1960 [10] qui a évalué expérimentalement l'influence des courants sur les larves de hareng, mettant en évidence un seuil en deçà duquel les larves sont encore aptes à se mouvoir contre un courant et même à le remonter : ce seuil est de 0,58 à 1,03 cm.s^{-1} . Pour des courants supérieurs et jusqu'à 2,10 cm.s^{-1} , les larves résistent encore, mais partiellement et sont entraînées avec une vitesse inférieure à celle du courant. Cette mobilité propre peut donc aussi augmenter la dissémination larvaire (Bishai, 1960 [10], Arbault and Boutin, 1986 [2]), dont le facteur majeur est les courants. Les larves de Loup (*Dicentrarchus labrax* (Linné, 1758) d'une longueur moyenne de 4.4 mm sont capables de nager contre un courant de 0.2 cm.s^{-1} , mais déjà avec une longueur moyenne de 5.3 mm elles peuvent nager contre un courant de 0.5 cm.s^{-1} (Barnabe, 1980 [4]).

La plupart des poissons démersaux marins connaissent une phase larvaire planctonique avant un passage à des habitats de fond pour les juvéniles (Leis and Carson-Ewart, 1997 [43] ; Koumoundouros, *et al.*, 2009 [37]). La variabilité spatio-temporelle des effectifs de larves de poissons peut être expliquée par le couplage entre processus physiques et production spécifique de chaque espèce. Même si l'hydrodynamisme joue un grand rôle dans le déplacement et la dispersion des espèces, la biologie et les différentes phases ontogéniques ou de croissance des larves ou des juvéniles conditionnent également la capacité de nage des poissons et des larves. Nous donnerons un exemple montrant l'impact de la croissance sur la vitesse de nage des larves de *Sparus aurata* (daurade blanche) d'après l'étude de Koumoundouros, *et al.*, 2009 [37]. Ces vitesses de nage sont enregistrées en conditions de températures optimales pour l'espèce qui est de 25°C.

Tableau IV.5 : Vitesse de nage des larves de *Sparus aurata* d'après le niveau de stage ontogénique, issue de Koumoundouros, et al., 2009 [37].

Température	Groupe	Rucrit (TLs-1)
15	début stade ontogénique (13.7 à 18.7 mm)	4.7 ±0.4
20		5.2 ±0.7
25		6.5 ±0.7
28		5.5 ±0.6
15	fin stade ontogénique (20.4 à 34.3 mm)	5.4 ±0.5
20		6.2 ±0.9
25		7.5 ±0.8
28		7.1 ±0.3

Le Tableau IV.5 indique des vitesses de nage (Ucrit) de larves de *Sparus aurata* enregistrées en laboratoire dans des conditions de température contrôlées, pour deux stades ontogéniques différents (début et fin de stade qui est déterminé par la taille des larves). La vitesse de nage augmente en fonction de la taille de la larve puisque pour le premier stade ontogénique (dont la taille des larves est comprise entre 13.7 et 18.7 mm) indique un minimum de 4.7 TL.s⁻¹ et un maximum de 6.5 TL.s⁻¹ alors que le second stade (taille des individus comprise entre 20.4 et 34.3 mm) indique comme vitesse minimale et maximale respectivement 5.4 TL.s⁻¹ et 7.5 TL.s⁻¹. À travers ce tableau, nous voyons une fois de plus l'impact de la température sur la vitesse de nage, puisque pour la température maximale (28°C) une baisse de l'activité natatoire est constatée avec pour les deux stades ontogéniques respectivement 5.5 et 7.1 TL.s⁻¹. Ces valeurs de vitesse de nage sont inférieures (de l'ordre de 5 à 10%) à celles enregistrées pour une température de 25°C, laquelle apparaît comme la température optimale de nage.

Après avoir vu l'impact de la croissance, mais également de la température sur les vitesses de nage des larves, nous présentons dans le Tableau IV.6 exposant différentes vitesses de nage de larve ou juvénile en fonction de leur taille. Dans l'ensemble il s'agit d'espèces démersales, pour la plupart des poissons de récifs coralliens, car malheureusement les informations sur les vitesses des larves pour des espèces méditerranéennes sont inaccessibles.

La taille entrant en ligne de compte dans la vitesse de nage des individus, il sera plus pratique, pour les comparer d'utiliser les vitesses exprimées en BL.s⁻¹. Pour les vitesses exprimées en cm.s⁻¹, les valeurs les plus élevées sont attribuées aux Holocentridae (moyenne entre 48.1 et 65.5 cm.s⁻¹), qui sont des poissons coralliens vivants près du fond. Si nous écartons les Holocentridae des mesures, la valeur

Tableau IV.6 : Vitesse de nage des larves ou juvénile.

Nom	Taille	n	Speed (cm.s-1)				Speed (BL.s-1)			Ucrit	Référence
			mean	SE	Max	Min	mean	Max	Min		
<i>Blenniidae</i>	1 cm	1	26.4				26.4				Leis & Carson-Ewart, 2006
<i>Holocentridae</i> - poisson-soldat -	5.5 cm	1	65.5				11.9				
	2.8 cm	1	48.1				17.2				
<i>Lethrinidae</i>	1.8 cm	11	19.4	1.2	27.2	13.8	10.8	15.1	7.6		
<i>Lutjanus fluviflamma</i>	1.6 cm	1	14.5				9				
<i>Caesio sp</i>	2 cm	1	23.3				11.7				
<i>Diploprion bifasciatum</i>	2.5 cm	11	21.8	1	26.4	16.5	8.7	10.6	6.6		
<i>Plectropomus leopardus</i>	1.7 cm	3	19.2	1.6	23	16.3	11.3	13.5	9.6		
<i>Sparidae</i>	-		15 à 20				12 à 20				Clark et al, 2005
<i>Diplodus capensis</i>	8.9-16 mm									2.8-35.2 cm.s-1	Patrick & Strydom, 2009
<i>Sarpa salpa</i>	12.1-21.3 mm									4.8-33.4 cm.s-1	
<i>Acanthopagrus australis</i>	4.9-10.7 mm									2-26 cm.s-1	Clark et al, 2005
<i>Diplodus vulgaris</i>										12.3 cm.s-1 (Umax)	Planes et al, 1997
<i>Sarba rhabdosargus</i>			6.4								Trnski T., 2002
<i>Pagrus auratus</i>			10.9								
<i>Tricuspidata girella</i>			12.5								

maximale est attribuée à *Caesio sp* avec une moyenne de 23.3 cm.s^{-1} pour un individu de 2 cm et le minimum est attribué à *Sarba rhabdosargus* (appartenant à la famille des Sparidae) avec 6.4 cm.s^{-1} .

Pour les vitesses exprimées en BL.s^{-1} , la valeur maximale est constatée chez les Blenniidae (famille commune présente dans la réserve des bouches de Bonifacio) avec 26.4 BL.s^{-1} pour un individu de 1 cm et la minimale chez *Diploprion capensis* avec 8.7 BL.s^{-1} . Nous remarquerons également que *Diplodus vulgaris* (sar à tête noire) et *Sarpa salpa* (saupe), deux espèces nageant fréquemment près du fond et communes en Méditerranée, affichent des vitesses de nage critiques de respectivement de 12.3 cm.s^{-1} et de 4.8 à 33.4 cm.s^{-1} .

IV.3. Étude des déplacements des espèces en fonction des mouvements des masses d'eau phénomènes majeurs et vitesses et directions de courants

Pour se mouvoir selon ses propres tropismes dans le milieu, un poisson ne doit pas rencontrer un courant supérieur à sa capacité de nage (Guéguen and Prouzet, 1994 [30]). C'est d'ailleurs ce principe qui est considéré pour tout ce qui concerne l'impact écologique des constructions de barrages et la conception des échelles à poissons pour leur franchissement. Nous avons considéré qu'il en était de même pour les espèces marines dans les bouches de Bonifacio. Nous avons à présent les limites des vitesses de nage pour les poissons démersaux, qui sont comprises entre 12.18 et 47 cm.s^{-1} et 1.21 et 4.2 L.s^{-1} , en ayant écarté la vitesse de nage maximale du rouget (*Mullus barbatus ponticus*) et celle minimale de la plie (*Pleuronectes platessa*).

Nous allons maintenant comparer ces vitesses de nages aux vitesses de courant observées dans la zone d'après les données enregistrées par l'ADCP mouillé. Dans cet objectif, nous présentons dans le Tableau IV.7 récapitulatif du Tableau II.3 du chapitre II, donnant les moyennes de vitesse pour trois niveaux de la colonne d'eau (surface, milieu, fond).

Tableau IV.7 : Tableau des intensités de courants (cm/s) enregistrées par l'ADCP mouillé aux îles Lavezzi pour trois niveaux dans la colonne d'eau

Niveau	Fond	Milieu	Surface
Moyenne	16.07	35.06	50.41
Écart type	12.39	23.67	27.98
MAX	81.40	143.20	145.90
MIN	0.20	0.60	1.60

En moyenne, les intensités de courants décroissent de la surface vers le fond ce qui est normal du fait qu'en zone littorale le vent est la principale variable forçante. Un poisson aura donc plus de mal à lutter contre un courant en surface qu'en profondeur. Comme nous nous intéressons particulièrement aux poissons démersaux, nous avons comparé leurs vitesses de nage uniquement avec les vitesses de courants enregistrées au niveau du fond. En milieu de détroit (emplacement de l'ADCP mouillé), les poissons rencontrent une vitesse moyenne de 16.07 cm.s^{-1} . Les vitesses de poissons démersaux issues de la littérature donnent des vitesses comprises entre 12.18 et 47 cm.s^{-1} . Deux cas de figure peuvent alors se présenter. Soit, un poisson nage dans le sens du courant et dans ce cas la vitesse du poisson s'ajoute à celle du courant et il n'y aura pas de problème pour l'individu à se déplacer volontairement. Soit le poisson nage à contre-courant, et dans ce cas là, d'après les vitesses de nage, certains poissons pourront lutter contre, c'est le cas par exemple de la vive, des rougets, du blennie et d'autre non par exemple la plie, mais avec une dépense énergétique plus forte. Pour les mesures de nage des poissons démersaux issues du Tableau IV.3, nous pouvons considérer que beaucoup de poissons, présents dans la réserve, ont une capacité à se déplacer dans le détroit, même à contre-courant, bien que ce dernier soit considéré comme ayant un fort hydrodynamisme. Compte tenu des données rassemblées de vitesses de courant nous aurions pu penser que ces conditions étaient un obstacle aux déplacements des individus dans le détroit, les forçant à se cantonner à des espaces restreints. Mais d'après les vitesses de nage des poissons présentées ci-dessus, cela ne semble pas être le cas.

En revanche cette capacité sera moindre pour des larves de poissons ou des juvéniles, dont la capacité de nage est comprise (d'après le Tableau IV.6) entre 4.7 et 7.1 TLs^{-1} . Cette capacité étant réduite par rapport à un adulte, les larves et juvéniles seront beaucoup plus sensibles à l'influence des courants.

Cependant, un autre élément que l'intensité est à prendre en compte. Nous avons montré, à partir de nos données, (partie II.2.1) que plus le courant est faible plus la variabilité des directions de courant est grande. Alors, pour des vitesses de courant suffisamment élevées par rapport aux capacités de nage des larves, mais suffisamment faibles pour que leur variabilité de directions soit importante, il est difficile compte tenu du déplacement erratique probable d'une larve ou d'un juvénile, d'en conclure à un import ou à un export de ces larves à partir des cantonnements de réserve.

Pour les faibles courants, les larves seront donc moins rapidement emportées d'un point de vue vitesse, mais auront une plus forte variabilité de direction dans leur trajectoire de dispersion. Tout ceci montre à quel point ces questions de distribution géographique de la biomasse issue des cantonnements de réserve sont complexes et que cette analyse ne peut se baser uniquement sur la comparaison de données de vitesse de courant et de nage. C'est pour cela que nous allons à présent nous appuyer sur le modèle Symphonie.

En effet, le modèle Symphonie, développé par le laboratoire CNRS-POC (Pôle d'Océanographie Côtière) de Toulouse, permet de prendre en compte certaines notions biologiques, comme celle du déplacement passif, en utilisant des traceurs. Ces "traceurs numériques", sont des points virtuels qui seront lâchés, c'est à dire intégrés à une simulation des courants, dans les conditions souhaitées par l'opérateur, que ce soit au niveau temporel (date et heure), géographique (lieux du larger-à la précision près de la maille du modèle) ou encore du contexte météorologique appuyé sur les données numériques "Aladin" de Météo-France. Par quelque unes de ces simulations que nous présentons ci-dessous, nous avons essayé de répondre aux questions d'export de biomasse, au niveau de leur trajectoire possible à partir des zones de cantonnement.

IV.4. Étude des déplacements des espèces en fonction des masses d'eau grâce à l'utilisation du modèle Symphonie

Les exemples de vitesse de nage exposés précédemment sont le plus souvent le cas d'expériences effectuées en laboratoire, sous conditions contrôlées. Quand nous allons raisonner sur différents cas de comportement de poisson, nous

devons garder à l'esprit que ce sont des cas dont la cause, ou plutôt les causes sont complexes (lutte du poisson contre le courant, retour du poisson à la zone de ponte ou de naissance, répartition du poisson en fonction des conditions hydrodynamiques) qui ne reflètent pas forcément les conditions comportementales réelles qu'adapteront les poissons face à ces différentes situations. Pour être plus explicite, même si nous allons par exemple, prendre en compte la capacité potentielle d'un poisson à traverser le détroit, nous restons conscients que ce même poisson n'aura peut être pas ce comportement.

Nous n'avons pu trouver, dans la littérature, de réelles mesures de vitesse en fonction de conditions hydrologiques et météorologiques différentes. La seule étude est celle de (Lagardère, *et al.*, 1994 [38]) sur le comportement des soles (*Solea solea*) face au "bruit environnemental" généré par les vents. Comme cette étude, très précise sur les poissons démersaux, a été réalisée dans des bassins de très faible profondeur ($\approx 1\text{m}50$) et de faible superficie, l'agitation de l'eau de ces bassins est extrêmement sensible aux conditions météorologiques de l'air. Cette étude montre une modification de leur trajectoire de nage et d'orientation de déplacement en fonction de la force et de la direction du vent. Ceci suggérant, dans ces conditions très particulières, un effet déterministe du vent sur les déplacements de ces populations de poisson en mer durant des évènements météorologiques notables. Est-ce extrapolable à la zone qui nous intéresse ?

Compte tenu du nombre de données courantologiques, hydrologiques et météorologiques disponibles (voir chapitre II et III) ou que nous avons réunies sur cette zone, nous avons identifié trois phénomènes majeurs dans la structure hydrodynamique. Tout d'abord la présence d'un gyre anticyclonique dans la partie ouest du détroit, un fort courant orienté sud dans la partie est avec un contre-courant nord plus faible à la côte et une circulation du flux au milieu du détroit majoritairement orienté de l'ouest vers l'est. Ces configurations se retrouvent dans les différentes situations de vent (vent de nord-est et d'ouest) rencontrées durant les missions CYRCE. Cette vision du système, qui n'est peut-être pas suffisamment exhaustive, ne nous permet pas, en toute rigueur et en fonction des configurations réelles de vent observées, de conclure au transport d'individus passifs (juvéniles mais surtout larves) du fait de la grande variabilité constatée du système hydrodynamique.

C'est, en particulier dans ces cas, que la simulation numérique peut nous être très utile. Nous avons tenté dans la partie qui suit de « simuler » quelques situations

typiques pour quelques espèces ciblées pour lesquelles nous disposons de données expérimentales de vitesse de nage dans la littérature. Ces simulations seront faites à partir de lancement de "bouées virtuelles passives" censées représenter les individus. Ceci permettra de discuter de la possibilité d'export de biomasse à partir des cantonnements en fonction des configurations de vent données.

L'étude de la dispersion larvaire à travers l'utilisation de tous modèles numériques à composante biologique demande la prise en compte de nombreux éléments spécifiques à l'espèce ; comme la période de reproduction ou de ponte, les différents stades ontogéniques des larves ainsi que leur durée, leur vitesse de chute, leur vitesse de nage et beaucoup d'autres paramètres (Guizien, *et al.*, 2006 [31]). Nous avons utilisé un « module » du programme Symphonie applicable à des traceurs virtuels (dits ici "bouée"). Il existe aussi un « module bio » qui permet d'affecter ces traceurs à un modèle biologique spécifique. Mais pour que cette dernière application soit fonctionnelle, il est nécessaire de prendre en compte de très nombreux éléments spécifiques à l'espèce simulée. Ne disposant pas de ces paramètres nécessaires et leur connaissance dépassant la portée de ce mémoire, nous n'avons pas utilisé cet "outil" en ce sens. Cependant en utilisant le « module bouée », avec les limites de nos connaissances, nous avons tenté de simuler ce comportement. Du fait de des nombreux paramètres nécessaires à cette simulation, nous ne pouvons appliquer cet outil pour déterminer la dispersion d'œufs ou de larves de diverses espèces.

Nous avons tenté une simulation du comportement de traceurs "virtuels" (censé représenter des larves). Ces traceurs passifs lagrangiens (bouées), ont été introduits dans le modèle Symphonie qui en fonction de la vitesse et de la direction du vent, nous fournissent une estimation par le calcul de la vitesse et de la direction des courants ainsi que (selon la saison) de la température et de la salinité. Ces traceurs lagrangiens représentent des organismes virtuels, sans tenir compte de leur taille et que l'on considère par définition comme passifs. Ce modèle de simulation utilisant des données météorologiques, courantologiques et hydrologiques, permet d'estimer avec toutes les réserves que nous venons de faire, le comportement d'un individu en fonction de l'hydrodynamisme, indépendamment de leur taille permettant de visualiser la trajectoire potentielle d'individus passifs (sans comportement particulier). Pour tenter de simuler, donc de comprendre, la dynamique l'export de biomasse à partir des cantonnements de réserve.

IV.5. Validité du modèle

Dans la partie II, nous avons vu que l'hydrodynamisme des bouches de Bonifacio était caractérisé par une forte variabilité spatio-temporelle. Si nous voulons appliquer le modèle, comme outil d'export de biomasse, il est essentiel que ce dernier prenne en compte cette variabilité spatio-temporelle. C'est ce que nous allons voir dans les deux sections qui suivent. Nous rappelons tout de même que les contraintes du modèle demandent un lissage de la côte et de la bathymétrie qui force le modèle à sous-estimer la variabilité spatiale et temporelle à ces limites. Nous allons regarder la variabilité spatiale que montrent des bouées simulées par le modèle, en lançant plusieurs bouées à quelques mètres de distance les unes des autres et à la même heure. Puis nous regarderons la variabilité temporelle, pour des bouées lancées à une même position géographique, à des heures successives.

IV.5.1. Variabilité dans l'espace du modèle

Pour illustrer la variabilité spatiale du modèle, nous lançons plusieurs bouées aux mêmes heures, sur quatre points (écartés d'environ 100 m) dessinés en carré avec pour point central (cinquième point) un point situé près du cantonnement des Moines. Ce point est choisi de manière à être assez éloigné des côtes afin que, de par la taille de la maille du modèle, la proximité de la côte ne soit pas un élément perturbateur. En lançant à la même date et à des points proches les uns des autres, nous allons pouvoir identifier ou non une variabilité spatiale quant à la dispersion de biomasse sur une même zone. C'est-à-dire que pour une certaine quantité de biomasse produite dans un cantonnement (pour cet exemple dans le cantonnement des Moines), nous allons voir si toute cette biomasse se dirige dans une même direction ou si au contraire les différents lâchés (séparés d'environ 100 m) se dirigent vers des orientations totalement différentes. Les résultats de cette analyse sont présentés dans les quatre figures suivantes, pour une période de simulation d'un mois après le lancement du modèle. Une couleur est attribuée à une bouée en fonction de sa position géographique, cette couleur sera conservée pour la même bouée qu'elle soit lancée en surface (-10 m) ou en profondeur (-35 m). Plusieurs dates de lâché sont simulées, nous ne présentons ici qu'un jeu de deux figures (bouées en surface et en profondeur) qui représente le cas de figure le plus généralement rencontré (Figure IV.1 et Figure IV.2). Pour permettre de comprendre

le trajet des bouées, nous complétons par les cartes des courants (courants moyens sur la journée) simulés par Symphonie, en surface et en profondeur.

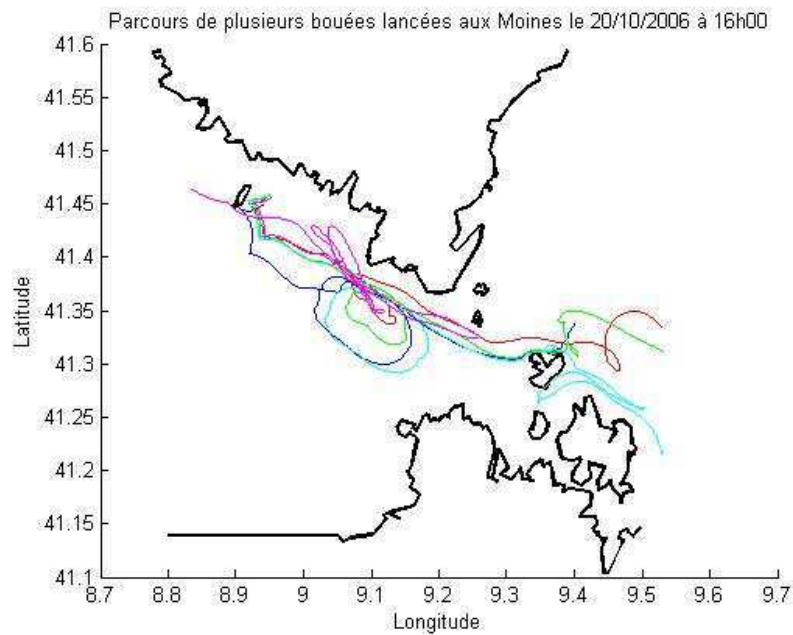


Figure IV.1: Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée le 20/10/2006 à 16h00. La bouée de fond est lâchée à -3m de profondeur. Condition de vent issue du cap Pertusato le 20/10/2006 à 16h00 : vitesse= 7 m.s⁻¹, direction= 90°. Orientation ouest majoritairement maintenue durant 3 jours, pour un vent plus faible. Puis changement successif entre vents d'est et d'ouest.

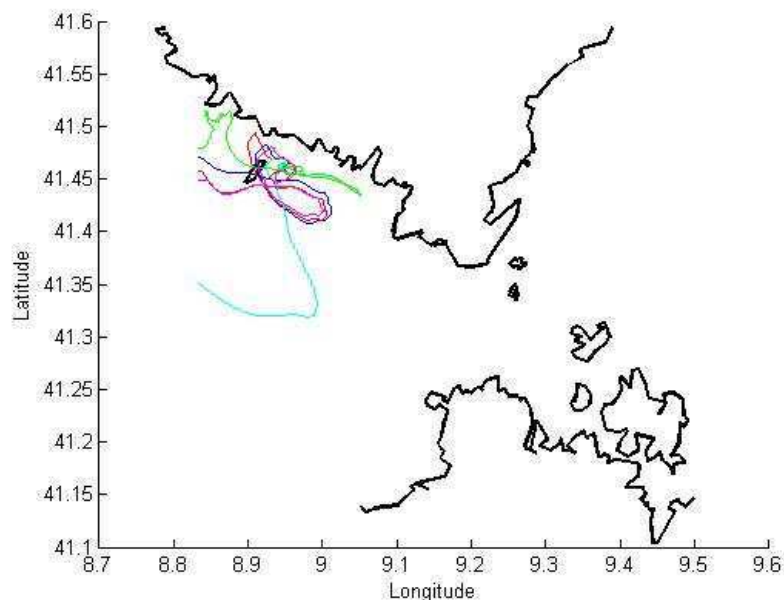


Figure IV.2 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée le 20/10/2006 à 16h00. La bouée de fond est lâchée à -35m de profondeur. Condition de vent issue du cap Pertusato le 20/10/2006 à 16h00 : vitesse= 7 m.s⁻¹, direction= 90°. Orientation ouest majoritairement maintenue durant 3 jours, pour un vent plus faible. Puis changement successif entre vents d'est et d'ouest.

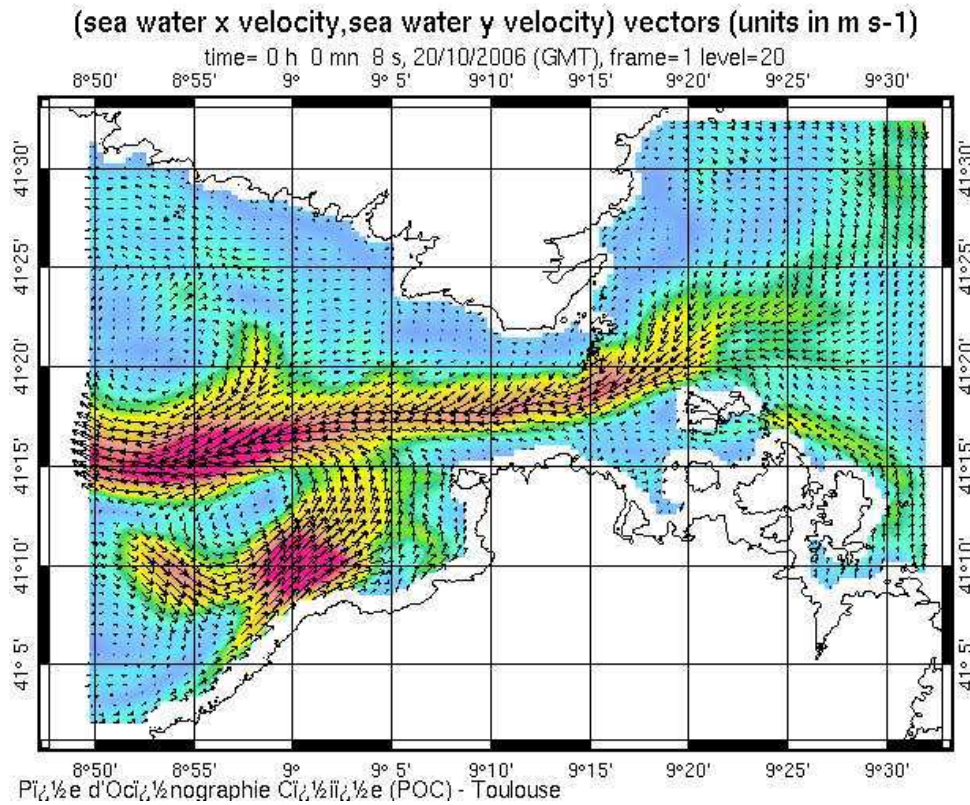


Figure IV.3 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 20/10/2006, en surface

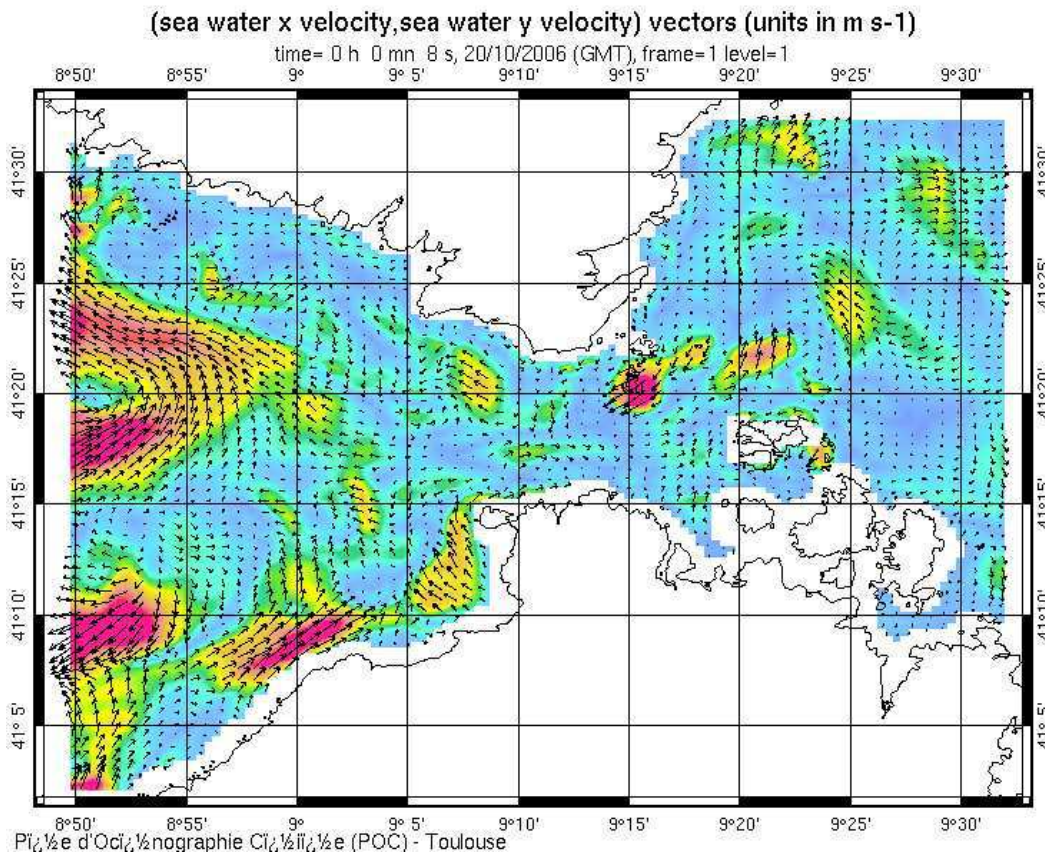


Figure IV.4: Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 20/10/2006, en profondeur

Les Figure IV.1 et Figure IV.2, représentent le parcours des bouées lancées le 20/10/2006 respectivement en surface (-3 m) et en profondeur (-35 m). Les bouées de surface, malgré des directions différentes au moment du lâcher, montrent une même orientation de trajectoire. Elles passent toutes dans la partie est du détroit, et ont une orientation globale d'est à sud-est. Ce trajet ne correspond pas au sens du courant en surface (Figure IV.3) qui se maintient sur plusieurs dizaines de mètres. Le parcours des bouées de fond est très différent de celui des bouées de surface. En effet, elles restent toutes confinées dans la partie ouest des bouches, et restent globalement très proches les unes des autres (excepté pour l'une d'entre elles), et sortent de la zone en direction nord-ouest au niveau des îles Moines. Ce trajet correspond plus à la dynamique moyenne des courants rencontrés en profondeur ce jour-là (Figure IV.4). Ces premiers résultats indiquent une certaine variabilité des directions de parcours des bouées, et en revanche peu de variabilité dans l'orientation de parcours des bouées. Nous ne retrouvons donc pas, dans le modèle, la forte variabilité d'espace identifiée pour le système hydrodynamique dans le chapitre II. Cette différence est peut-être due aux lissages des contraintes agissant sur le modèle (voir chapitre II.10).

Cependant, nous ne présentons ici qu'un cas de figure, celui qui nous a paru le plus représentatif. Nous le présentons dans les Figure IV.5 et Figure IV.6. Les mêmes bouées sont lâchées (en position géographique et à deux profondeurs) le 10/10/2006. Le parcours pour les bouées de surface est différent de celui des bouées de fond, avec des trajectoires différentes. Deux d'entre elles, comme les figures précédentes, se retrouvent du côté est du détroit, alors que les trois autres restent dans la partie ouest et sortent de la zone simulée par le modèle avec une orientation nord-ouest. D'après les courants moyens de ce jour, une partie des bouées sont prises dans un petit tourbillon présent en milieu du détroit qui les mène dans la partie est, alors que l'autre partie des bouées est maintenue dans la partie ouest du détroit, par un tourbillon cyclonique qui les maintient à l'ouest des Bouches. Les parcours des bouées lancées au fond restent cantonnés, elles, dans la partie ouest du détroit, mais avec une plus grande dispersion que le cas précédent. Dans ce cas, que ce soit pour les bouées en surface ou en profondeur, on constate cette fois une forte variabilité de leurs trajets dans l'espace.

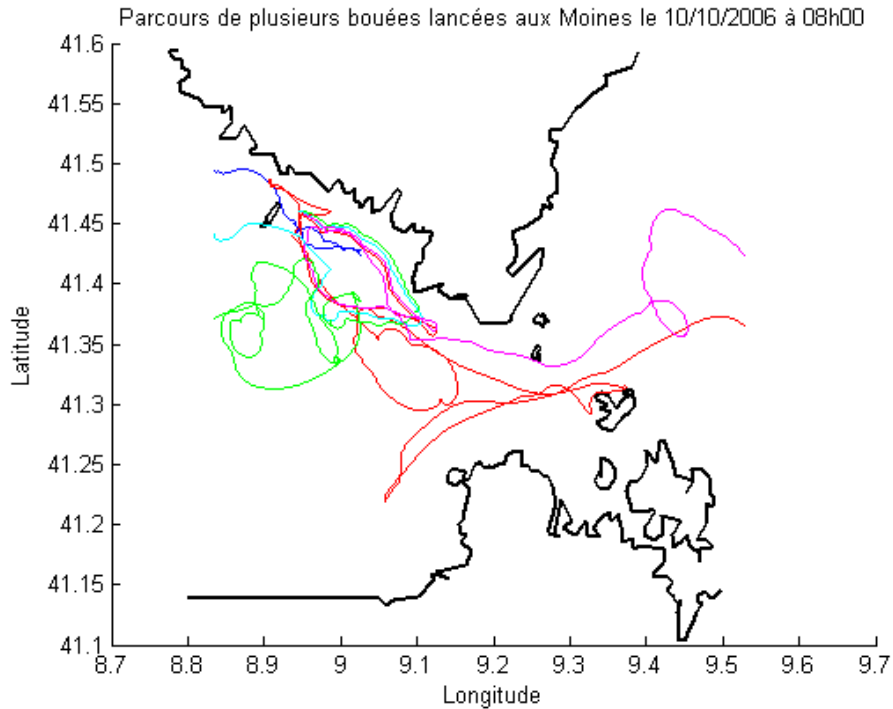


Figure IV.5 : Simulation de lancement de bouée (lâchée à -3m de profondeur) représentant des individus passifs. Bouée lancée le 10/10/2006 à 08h00. La bouée de surface est. Condition de vent issue du cap Pertusato le 10/10/2006 à 08h00 : vitesse= 1.4 m.s^{-1} , direction= 90° . Changement de direction sur 8 heures : vent d'ouest faible (vitesse moyenne= 3.18). Puis vent fort avec orientation majoritairement est/nord-est durant 9 jours.

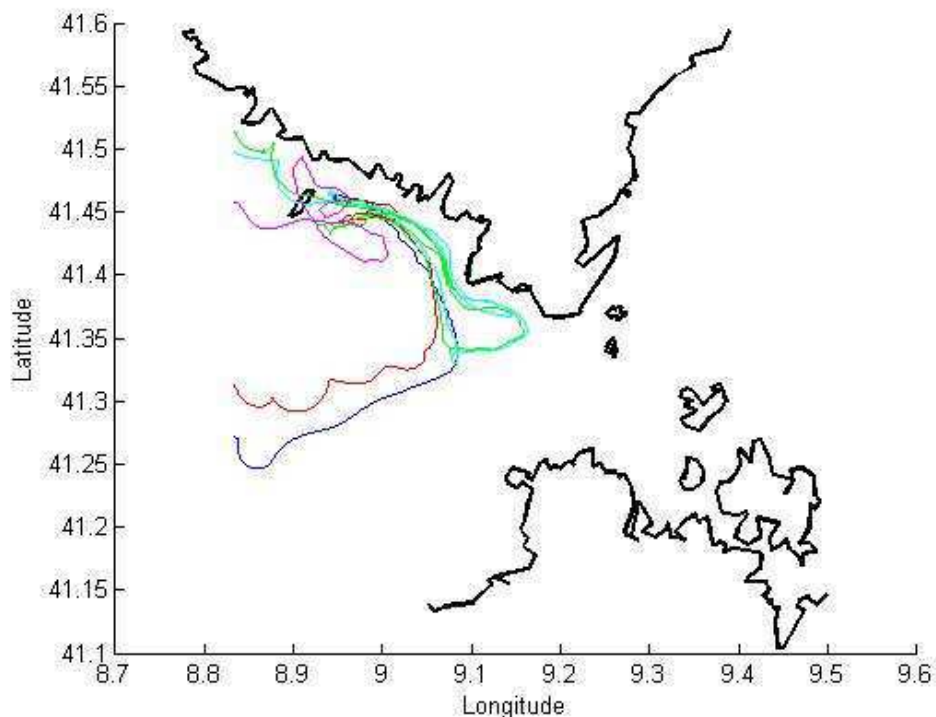


Figure IV.6 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée le 10/10/2006 à 08h00. La bouée de fond est lâchée à -35m de profondeur. Condition de vent issue du Cap Pertusato le 10/10/2006 à 08h00 : vitesse= 1.4 m.s^{-1} , direction= 90° . Changement de direction sur 8 heures : vent d'ouest faible (vitesse moyenne= 3.18). Puis vent fort avec orientation majoritairement est/nord-est durant 9 jours.

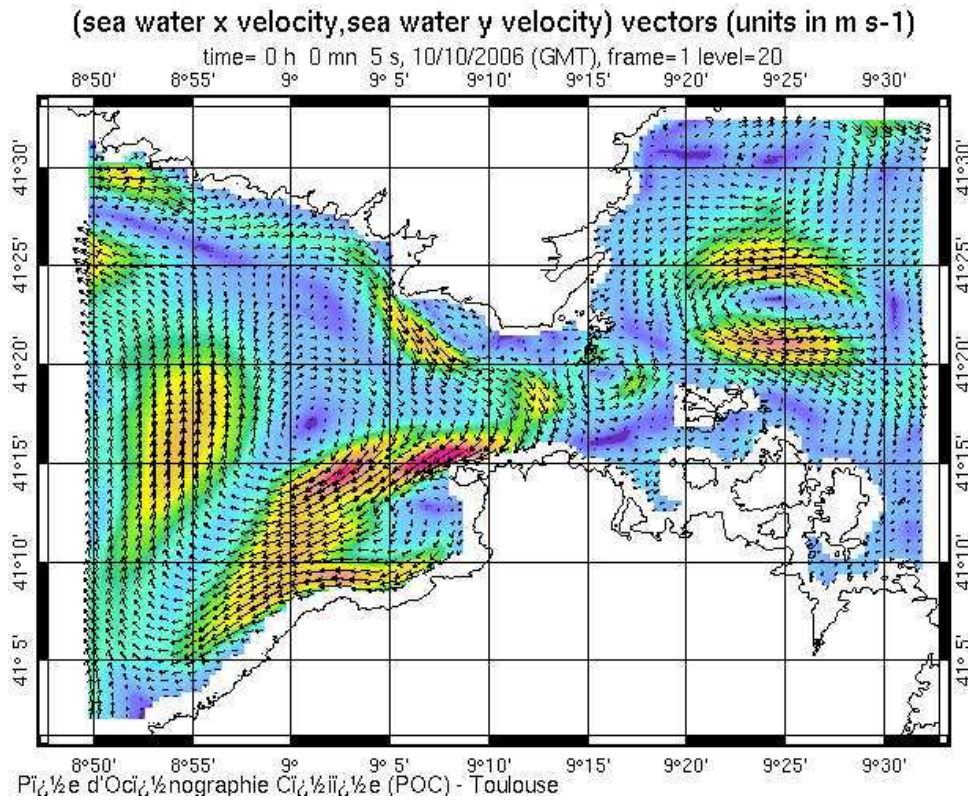


Figure IV.7: Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 10/10/2006, en surface

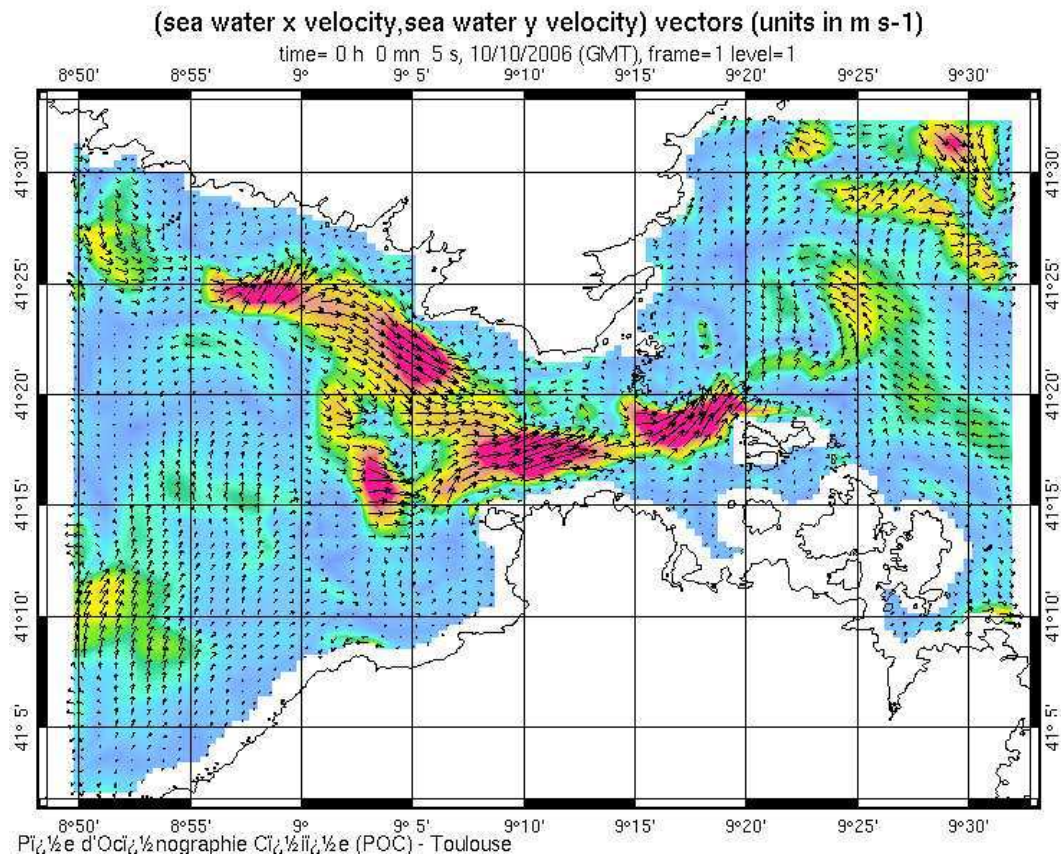


Figure IV.8: Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 10/10/2006, en profondeur

Les premières simulations indiquent que les trajets des bouées de surface sont toujours différents et plus dispersés de celui des bouées de fond. Cet élément apparaît cohérent avec un des éléments identifiés en chapitre II.3, où nous avons vu, que la variabilité des directions était plus grande pour des faibles intensités de courant et que les courants en surfaces étaient plus forts que les courants au fond. Les bouées de surface sont généralement entraînées vers la partie est du détroit, excepté dans un cas où une partie reste du côté ouest. Ces trajectoires correspondent en partie à celles des courants, mais en partie seulement, donc leur trajectoire a pu également être influencée par le vent. Pour les deux cas abordés ici, mais aussi des cas similaires non présentés ici, aucune de ces bouée "virtuelles" larguées dans les eaux du fond n'est passée du côté est du détroit. Une dynamique semble maintenir les bouées de fond dans la partie ouest du détroit et elles sont souvent amenées à quitter la zone par la partie la partie nord-ouest de la zone des bouches de Bonifacio. Pour les cas où plusieurs bouées sont lâchées dans un espace restreint, nous constatons souvent variabilité certaine des orientations de trajectoire de bouée en fonction des cas examinés.

IV.5.2. Variabilité dans le temps du modèle

Nous allons à présent tester la variabilité des trajectoires de bouées sur un petit espace de temps. Pour ce faire, nous avons lancé en simulation à un même point situé aux alentours du cantonnement des Moines (même point choisi que précédemment), chaque heure (de 03h00 à 10h00), une bouée durant une période de simulation de cinq jours, pour deux profondeurs différentes en surface (-10 m) et au fond (-35 m). Les résultats sont présentés dans les Figure IV.9 (pour les bouées de surface) et Figure IV.10 (pour les bouées de fond). Sur la première, la bouée lancée à 03h00 passe du côté est du détroit, alors que toutes les bouées suivantes restent dans la partie ouest avec une orientation sud/sud-ouest. Cette différence de trajet est peut-être due à un changement de vent, ce dernier étant initialement de direction nord-est à vitesse moyenne de $4.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, se maintient durant 2.5 jours puis change d'orientation (ouest). Ce phénomène se voit sur le trajet de la bouée lancée à 04h00, qui elle se dirige en premier lieu vers l'est du détroit (comme la bouée de 03h00) puis change de trajectoire. Comme la simulation a été arrêtée au bout de

cinq jours, nous ne pouvons pas dire, au final, quelle direction cette bouée a prise, mais elle change nettement de cap et prendre la direction des bouées lancées quelques heures plus tard. Ces trajets de bouées correspondent aux deux structures présentes dans la zone sur le courant moyen de ce jour la (Figure IV.11), un flux se dirigeant vers l'est du détroit, et un gyre cyclonique. Les bouées de fond ont une trajectoire différente de celle de surface et sont toutes confinées dans la partie ouest du détroit. Aucune ne passe dans la partie est et leurs trajectoires sont proches les unes des autres.

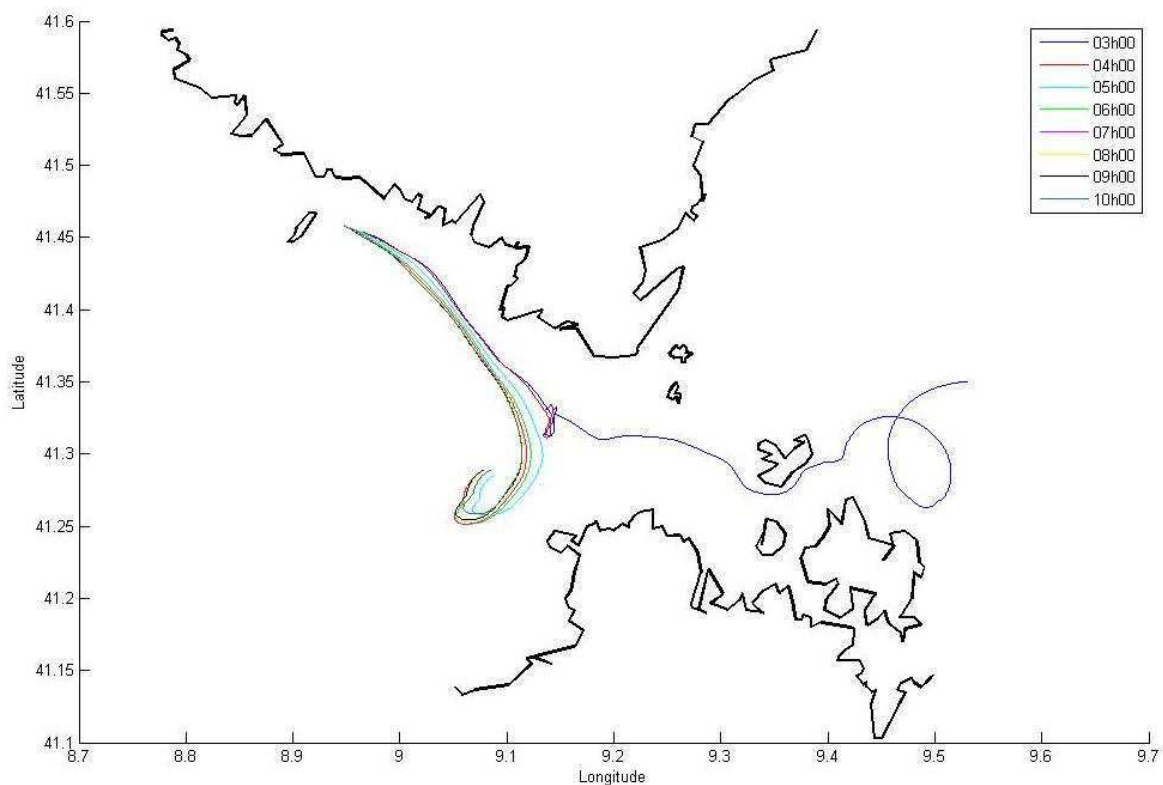


Figure IV.9 : Simulation d'individus passifs lancés le 12/09/2006 de 03h00 à 10h00, à -10 m. Simulation effectuée durant cinq jours. Condition de vent enregistrée au cap Pertusato le 12/09/2006 de 03h00 à 10h00 : vent nord-est, vitesse moyenne = 4.8 m.s-1. Condition d'orientation maintenue durant ≈ 2.5 jours, puis changement d'orientation avec un vent d'ouest.

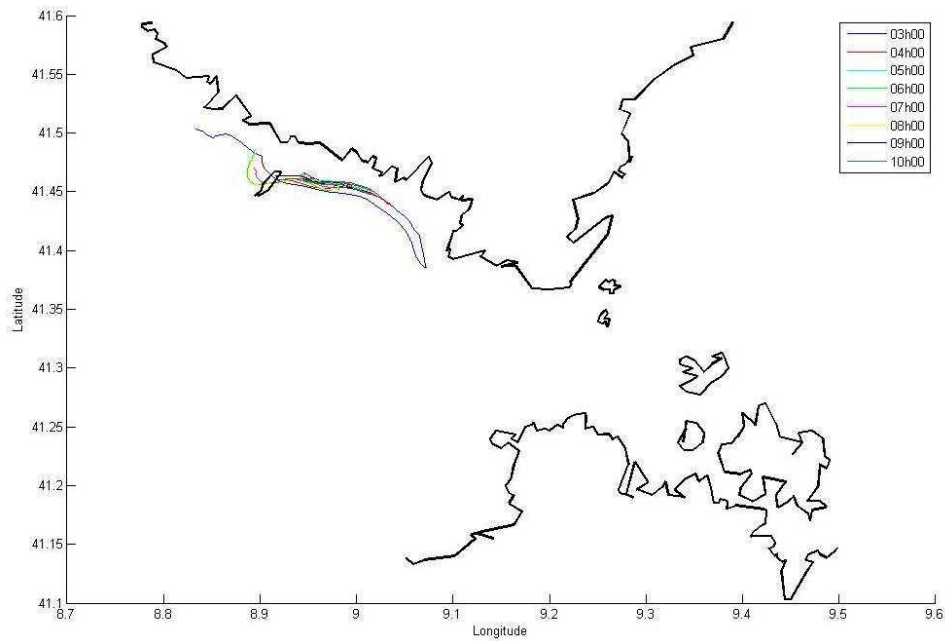


Figure IV.10 : Simulation d'individus passifs lancés le 12/09/2006 de 03h00 à 10h00, à -35 m, Simulation effectuée durant cinq jours. Condition de vent enregistrée au cap Pertusato le 12/09/2006 de 03h00 à 10h00 : vent nord-est, vitesse moyenne = 4.8 m.s-1. Condition d'orientation maintenue durant \approx 2.5 jours, puis changement d'orientation avec un vent d'ouest.

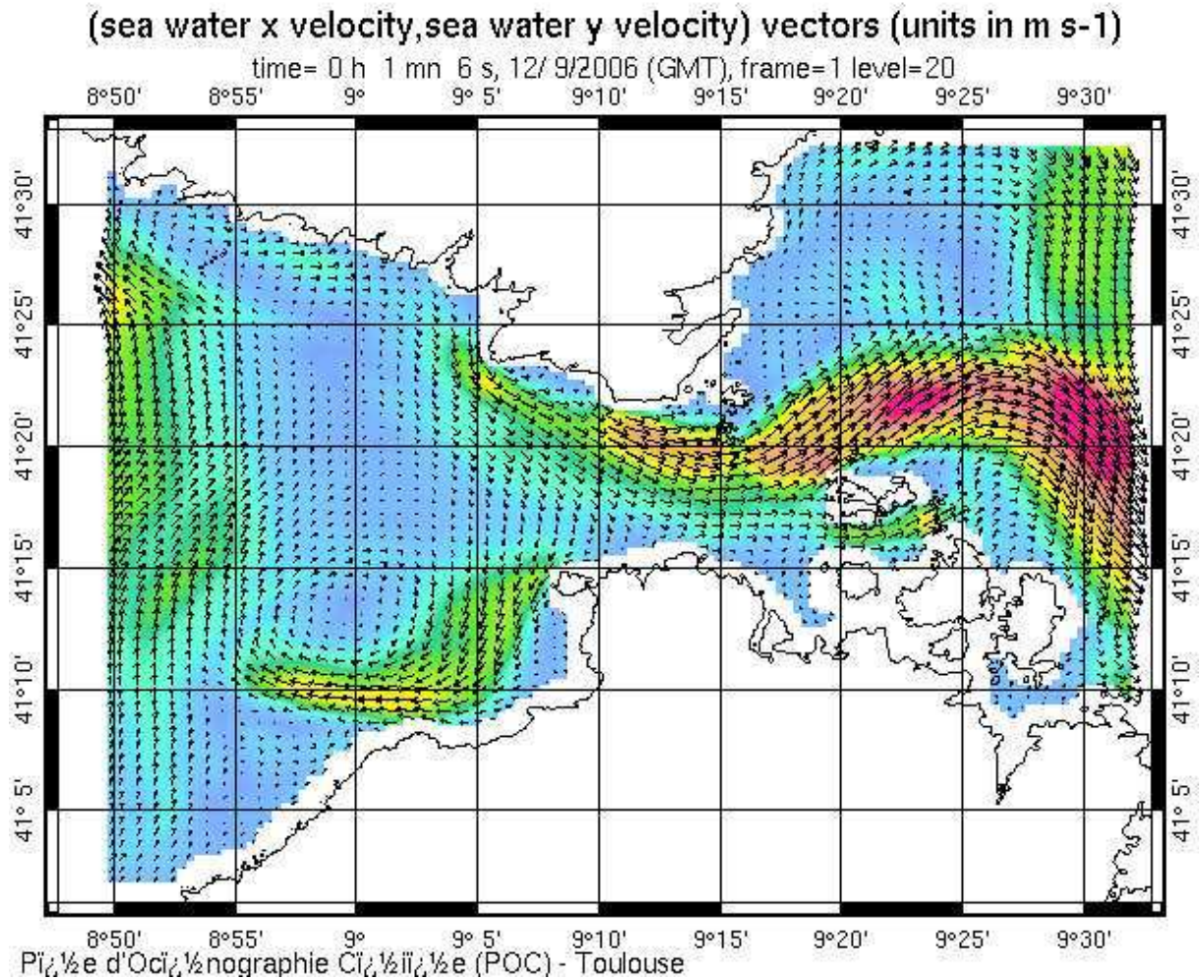


Figure IV.11: Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 12/09/2006, en surface

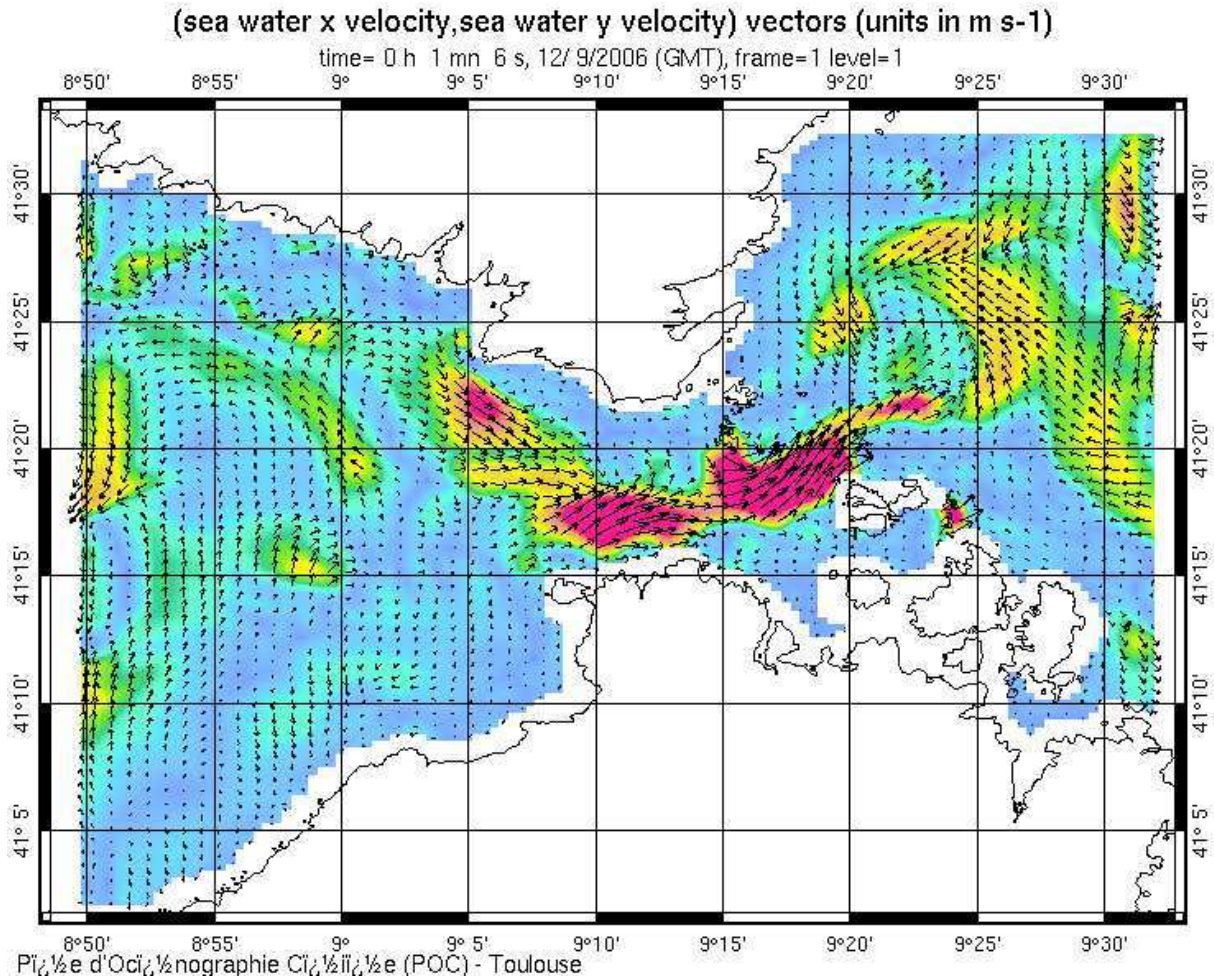


Figure IV.12: Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 12/09/2006, en profondeur

D'après les trajets des bouées lancées à la même position géographique à un intervalle de temps d'une heure, sur huit heures, on constate qu'il y a une faible variabilité trajectoires dans le temps. En effet, les trajets de la plupart des bouées, pour un même niveau de profondeur, se ressemblent et les différences de trajet semblent plus influencées par les configurations variables de vent en fonction du temps que par l'heure à laquelle les bouées sont lancées. C'est pour cela que nous allons maintenant lancer des "bouées virtuelles" en fonction des différentes configurations de vent identifiées dans les Bouches de Bonifacio.

IV.6. Applications du modèle dans les deux configurations de vent (d'ouest et de nord-est) pour vent fort et vent faible

Nous avons donc simulé la trajectoire d'individus en lançant des bouées virtuelles passives (traceurs lagrangiens) censées les représenter. Ceci permettra de discuter de la possibilité d'export de biomasse à partir des cantonnements en fonction des configurations de vent données.

Nous avons donc programmé le largage de bouées virtuelles, lors d'un jour et d'une heure d'une mission CYRCE donc dans des conditions météorologiques réelles. Le choix a été sélectionné sur le fait que ces configurations de vent devaient se maintenir sur une période d'minimum 24h00 après le lancement de ces bouées. Puis nous avons suivi le trajet de la bouée durant une période d'un mois, après son lancement. Il est évident que durant ce mois, les conditions météorologiques ont changé. L'évolution des courants simulés par Symphonie dépend des conditions météo durant cette période de simulation, qui elles sont simulées par le modèle Aladin. Ce dernier se base sur des données réelles Météo France, sur la période de simulation considérée.

Les cartes qui suivent ne seront pas présentées par organisation de catégories de vent, mais par la configuration des trajets de bouées qu'elles présentent. C'est ainsi que nous regroupons les Figure IV.13 (condition de vent fort de E-NE), Figure IV.14 (condition de vent faible d'W) et Figure IV.17 (condition de vent faible de E-NE) qui présentent globalement les mêmes orientations pour les bouées de surface et de fond. Sur ces trois figures, les trajets des bouées de surface et de fond sont différents, comme lors des cas précédents exposés ci-dessus. Les bouées de surface ont sur une trajectoire orientée sud-est dans la partie ouest du détroit, puis passent du côté est. Dans la partie est, deux d'entre elles se retrouvent dans la partie italienne du détroit, à proximité des îles de la Maddalena et l'une est entraînée vers le nord, c'est à dire vers l'est des côtes françaises. Les bouées de fond, pour les trois cas exposés ici, restent toujours dans la partie ouest du détroit, sans jamais passer dans les eaux italiennes de la mer tyrrhénienne.

Nous commenterons plus particulièrement, celle du 10/12/2006, en complétant avec les courants moyens du modèle en surface (Figure IV.15) et en profondeur (Figure IV.16). En surface, malgré des courants de faible intensité au

milieu de la partie ouest, les courants se dirigent vers la partie est, alors qu'en profondeur le flux au milieu de détroit change d'orientation (orienté d'est en ouest) et cantonnant les bouées de fond à la partie ouest du détroit.

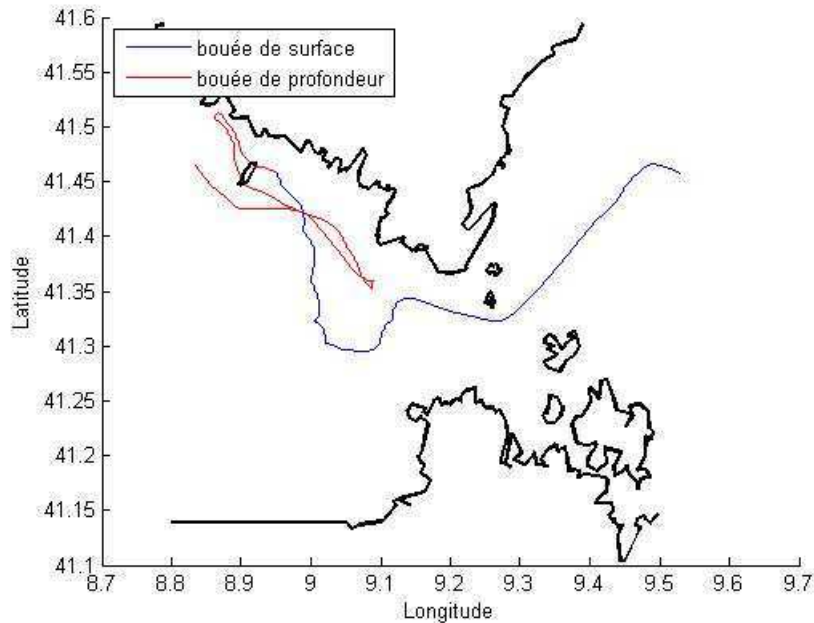


Figure IV.13: Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée durant CYRCE 6, le 16/09/2006 à 14h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -10m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -30 m. Condition de vent issue du cap Pertusato : vent fort ($>3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), orienté nord-est, condition maintenue durant 48 heures.

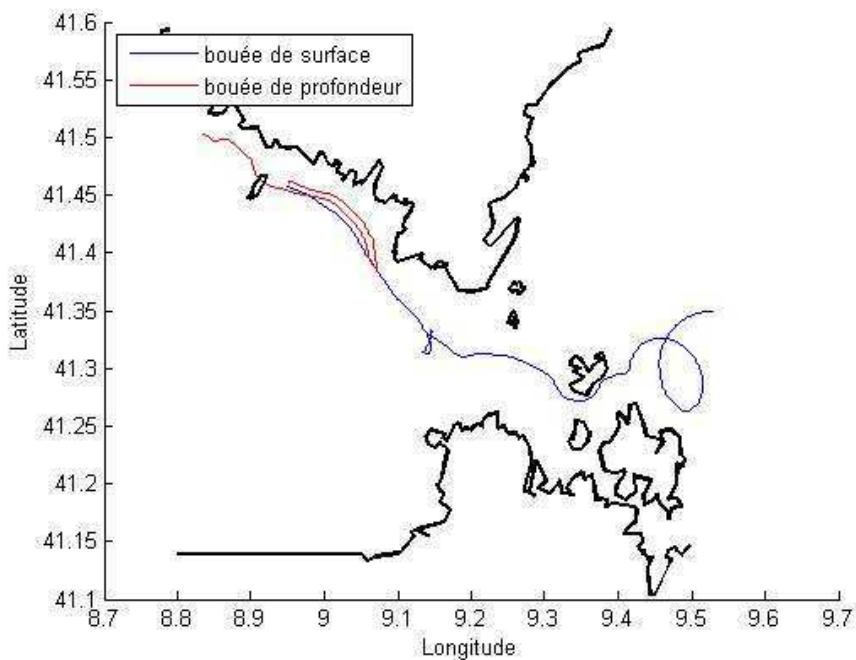


Figure IV.14: Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée durant CYRCE 7, le 10/12/2006 à 18h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -10m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -30 m. Condition de vent issue du Cap Pertusato : vent faible ($<3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), orienté ouest, maintenu durant 24h00.

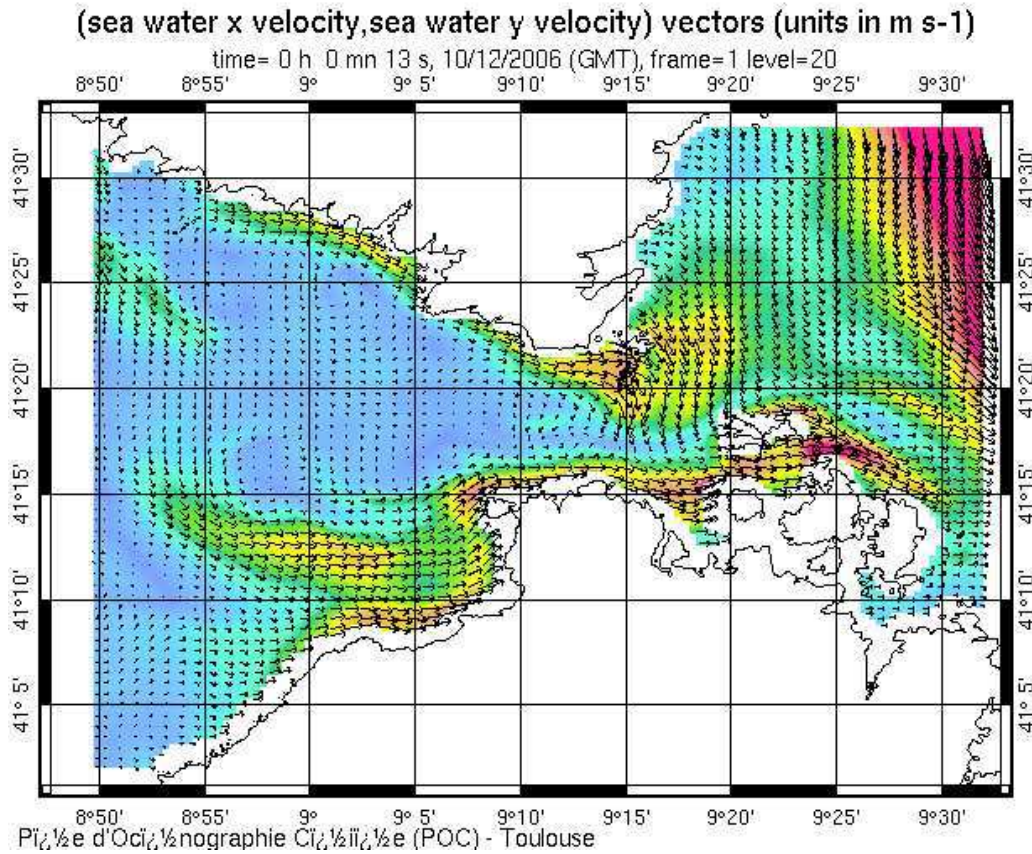


Figure IV.15 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 10/12/2006, en surface

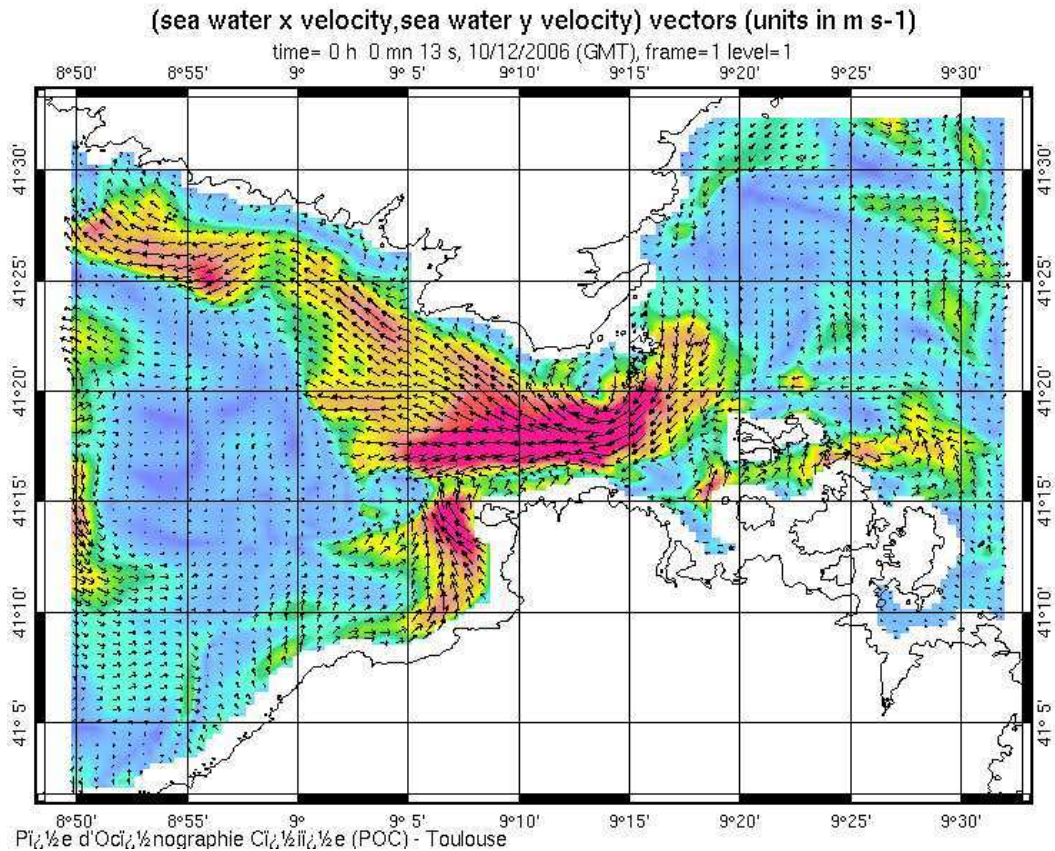


Figure IV.16 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 10/12/2006, en profondeur

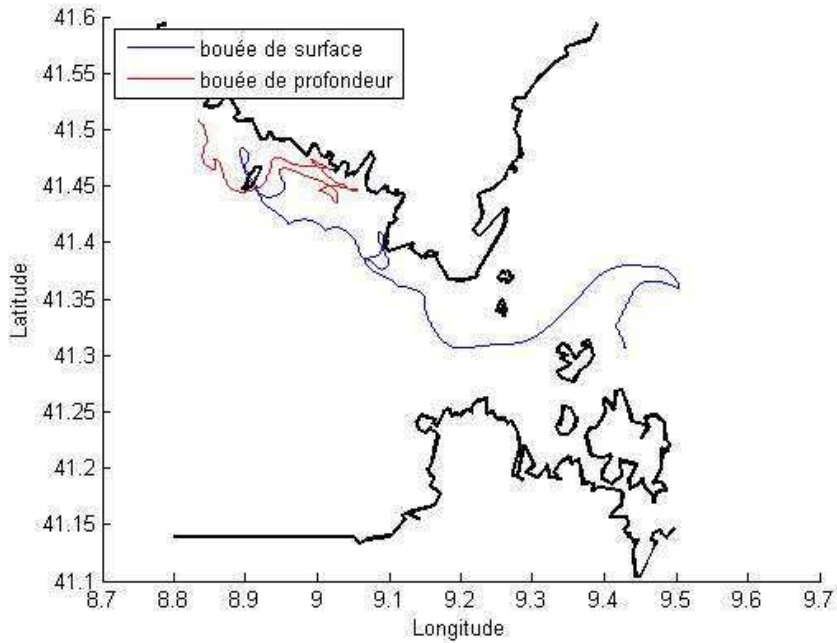


Figure IV.17 : SIMULATION de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée durant CYRCE 7, le 07/12/2006 à 16h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -10m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -30 m. Condition de vent issue du Cap Pertusato : vent faible ($<3\text{m.s}^{-1}$), orienté nord-est, condition maintenue pendant 24 heures, puis changement rapide de direction avec orientation ouest et vent violent ($>8\text{m.s}^{-1}$).

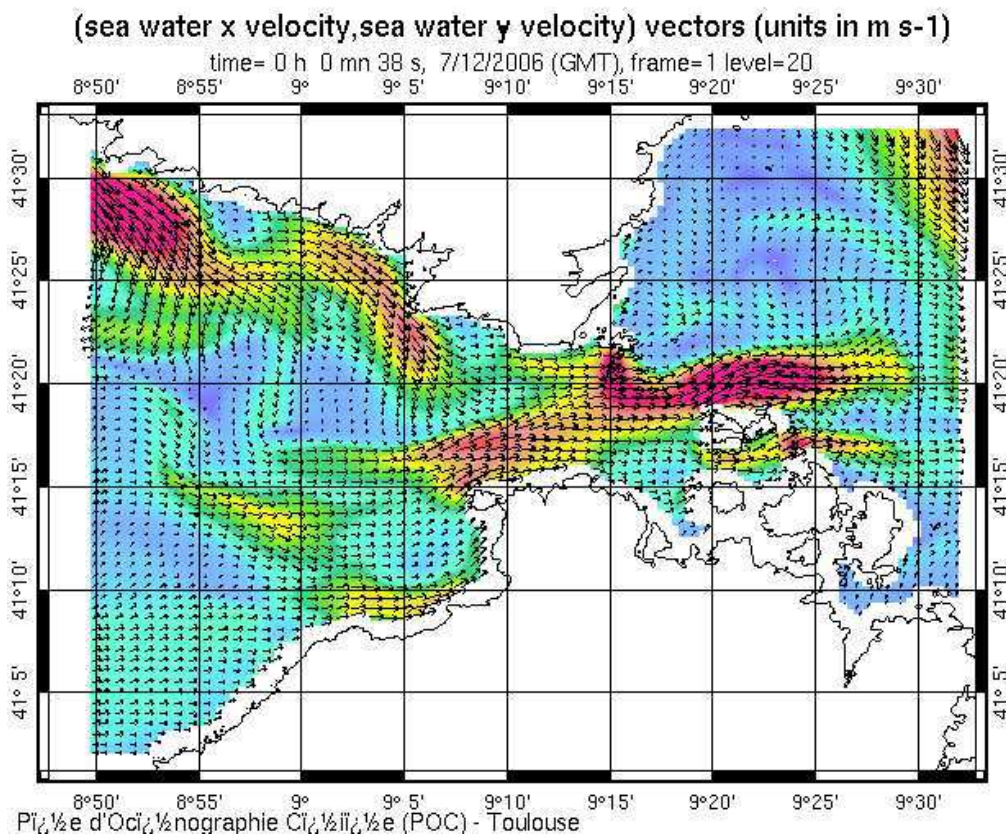


Figure IV.18 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 07/12/2006, en surface

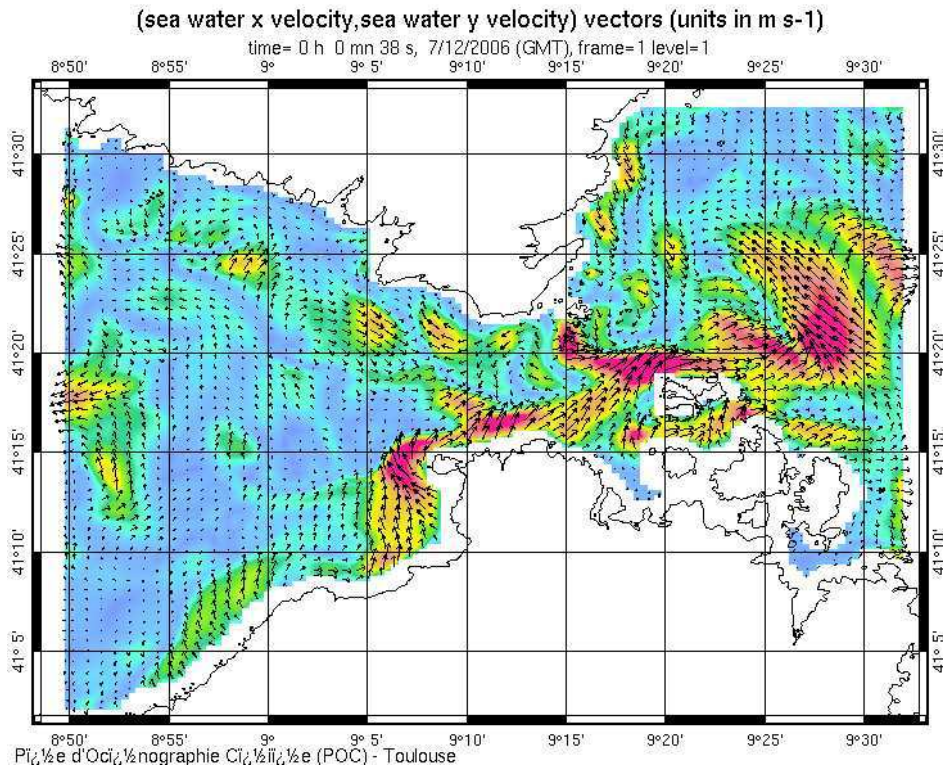


Figure IV.19 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 07/12/2006, en profondeur

Nous présentons deux cas particuliers de trajectoire de "bouée virtuelle", extraits de tous les cas simulés pour cette partie du mémoire. Ces deux cas particuliers correspondent à des conditions de vent fort d'ouest présentés sur la Figure IV.20 (conditions de vent déjà simulée durant CYRCE 6 et présentées sur une figure précédente) et sur la Figure IV.23. Pour ces deux configurations de vent, nous constatons que le parcours de la bouée de fond est identique à celui de la bouée de surface. Pour la première, les deux bouées restent dans la partie ouest du détroit et ont une trajectoire anticyclonique les ramenant vers l'ouest des îles Moines. Ces conditions de vent sont maintenues durant 24 heures, puis changement successif d'orientation de vent entre des directions ouest et nord-est, avec en fin de simulation (les cinq derniers jours) une orientation de vent nord-est. Les trajets des bouées sont clairement influencés par les directions de vent, car leurs directions sont cohérentes avec ces dernières. Cependant, la vitesse des vents étant variable (entre vents forts et faibles), ils n'expliqueraient pas que les bouées de surface et de fond aient le même trajet. Nous allons donc regarder la carte des courants moyens ce jour-là (Figure IV.21 et Figure IV.22). Le vent d'ouest ou les flux à plus grande échelle influent les courants de surface et de fond du côté est du détroit et donc ne correspondent pas à ce qui se retrouve pour le parcours des bouées. Cependant,

ces cartes montrent bien une moyenne de courant simulée pour la journée, et non pas une moyenne de courant pour la période de lâchers des bouées, elles sont donc à manier avec précaution dans l'explication du trajet des bouées.

Un autre cas particulier est examiné, toujours lors de condition de vent fort orienté ouest. Sur la Figure IV.23, les deux bouées ont le même parcours, mais cette fois-ci, elles se dirigent en premier lieu avec une orientation sud-ouest puis changent de cap avec une orientation nord-ouest puis sortent de la limite simulée par le modèle. Durant cette simulation, le vent d'ouest se maintient durant un jour, puis il change de direction avec une intensité d'orientation nord-est. Les bouées ne semblent pas être influencées alors par ce vent d'ouest, puisqu'elles ne se dirigent pas en début de trajet vers l'est. En revanche leurs trajectoires correspondent au vent d'est. Cependant une forte influence peut être due au courant ce jour-là à en juger par les cartes de courant moyen (Figure IV.18 et Figure IV.19) où le courant de surface est de faible intensité du côté ouest et où le flux en profondeur est au contraire clairement orienté d'est en ouest en milieu de détroit, poussant tout élément présent du côté ouest à sortir de la zone en direction nord-ouest.

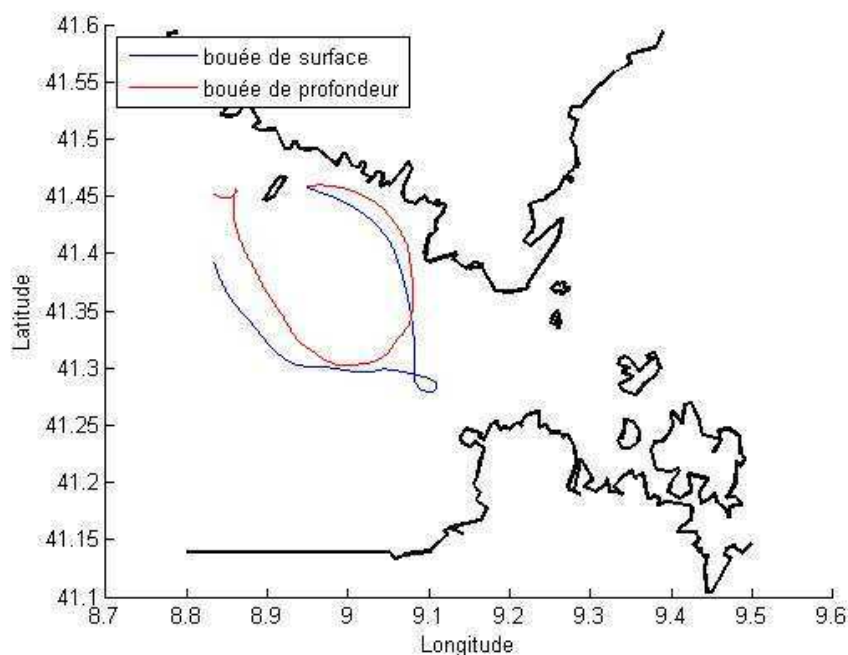


Figure IV.20 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée durant CYRCE 7, le 05/12/2006 à 00h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -10m de profondeur et reste dans la zone de simulation 7.27 jours, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -30 m reste dans la zone de simulation 10 jours. Condition de vent issue du cap Pertusato : fort (12 m.s^{-1}), orienté ouest (290°), condition maintenue durant 1 jour. Puis changement successif entre les deux vents dominants durant 3-4 jours avec une dominance de vent d'ouest. Les cinq derniers jours de présence de la bouée dans la zone de simulation, vent majoritairement orienté nord-est avec vitesses variables.

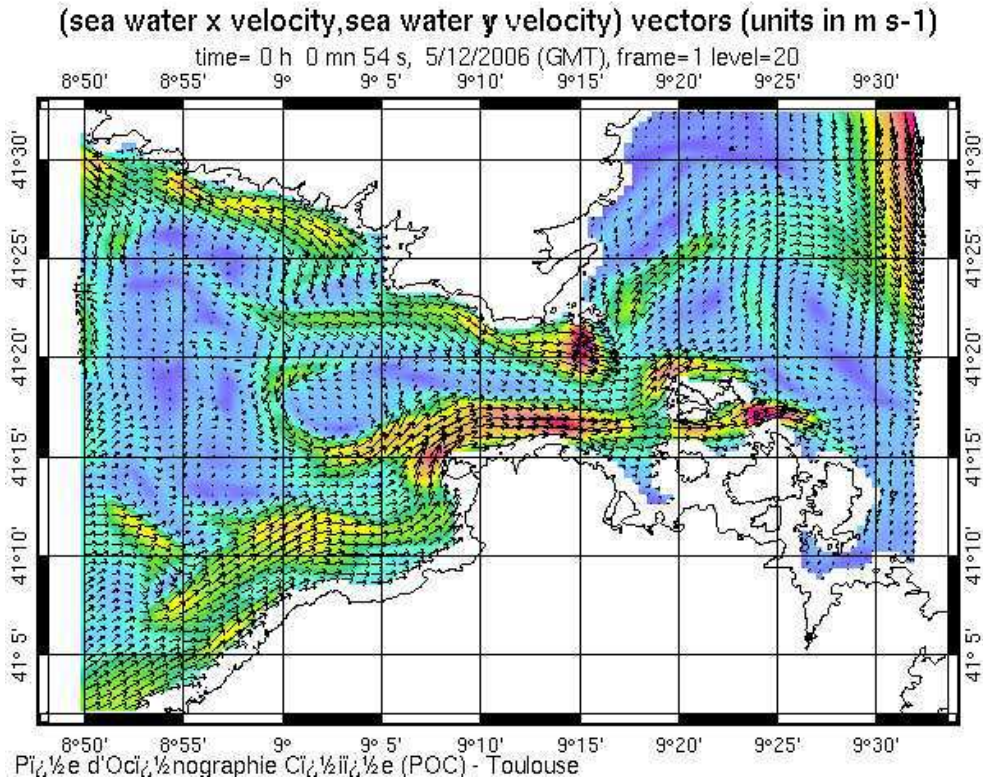


Figure IV.21 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 05/12/2006, en surface

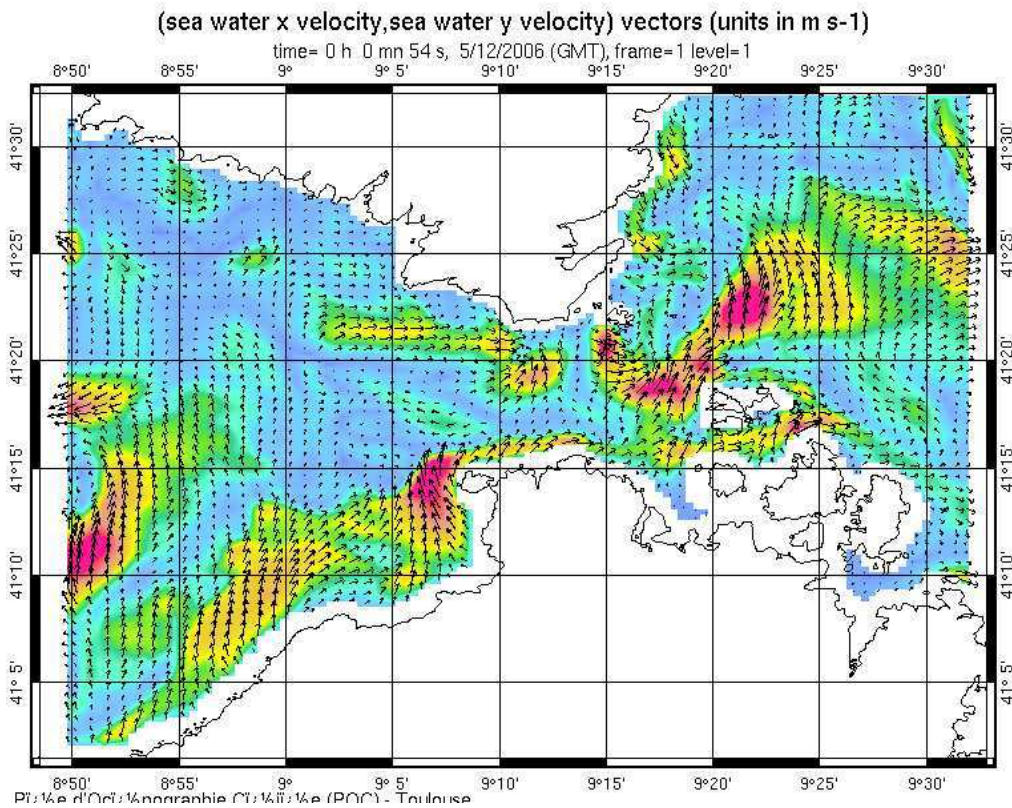


Figure IV.22 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 05/12/2006, en profondeur.

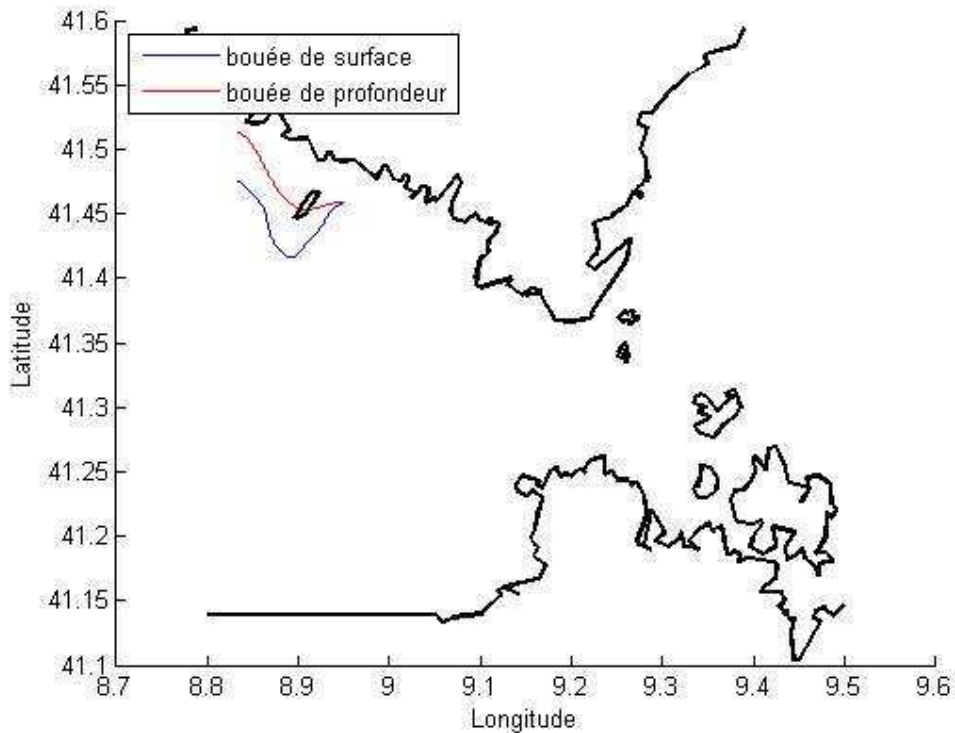


Figure IV.23 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée durant CYRCE 7, le 10/12/2006 à 18h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -10m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -30 m. Les deux bouées ne restent pas plus de trois jours dans la zone de simulation. Condition de vent issue du cap Pertusato le 10/12/2006: fort (>3m.s⁻¹), orienté ouest. Condition maintenue durant 1 jour, puis changement de direction en nord-est, vent faible.

Pour les configurations de vent fort ou au contraire de vent faible mais orienté nord-est ou faible d'ouest, les bouées de surface sont entraînées vers la partie est du détroit alors que les bouées de fond restent cantonnées dans la partie ouest du détroit, sans jamais passer du côté est, et sortant de la zone de simulation avec régulièrement une orientation nord-ouest. Lors de conditions de vent faible, c'est donc la circulation (de pression, ou de courant sur une plus grande échelle) sans l'influence directe du vent qui va régir la dispersion de la biomasse.

Deux cas particuliers sont identifiés, tous les deux pour des conditions de vent fort de secteur ouest. Pour ces deux configurations de vent, la bouée de surface et la bouée de fond ont le même trajet et restent pourtant dans la partie ouest du détroit. Nous ne pouvons pas attribuer ces cas uniquement au vent puisque cette direction de vent ne se maintient pas durant toute la période de présence des bouées dans la zone de simulation. Cependant, pour ces deux cas, la force du vent (vent fort) joue un rôle puisque cette dernière est transmise à l'entièreté de la colonne d'eau. En

revanche, il est possible d'attribuer une grande part aux courants uniquement pour le second cas particulier présenté (celui du 10/12/2006).

En fonction de la localisation de la production, les lieux de « stockage » seront différents. Par exemple, une espèce dont les larves se retrouvent au milieu de la colonne d'eau aura, pour les cas présentés ici, plus de probabilité de sortir de la zone du côté est et de se retrouver au-dessus de la Sardaigne. Et une espèce dont les œufs ou larves se retrouvent vers le fond aura au contraire tendance à rester dans la partie ouest du détroit. Donc la biomasse produite dans le cantonnement des Moines, par exemple, reste de la biomasse disponible pour les pêcheurs locaux. En revanche ce ne sera peut-être pas le cas de la biomasse de larves ou juvéniles produite ou étant amenée plus en surface ou au milieu de la colonne d'eau (-10 m). Cette conclusion conforterait des hypothèses émises dans la bibliographie indiquant une zone riche en juvéniles vers les îles Maddalena. Les zones intégrales au nord-est de la Sardaigne étant abritées, elles deviendraient alors un lieu préférentiellement colonisé par les larves de poisson. En effet, les zones intégrales au nord de la Sardaigne sont des zones plus riches en juvéniles de la famille des *Symphodus* (petits labres ou crénilabres, nageant près du fond) et *Serranus* (serrans, nageant près du fond) (Culioli, *et al.*, 2003 [18]), conséquence probable d'un effet de chasse due au courant et de la capacité de rétention due à la configuration morphologique de la zone. De plus, le fait que le parcours de la bouée de surface soit différent de celle du fond montre une fois de plus la forte variabilité du système hydrodynamique. Pour des recherches futures et plus complètes sur la dispersion des œufs et juvéniles, il sera impératif de bien prendre en compte le niveau de profondeur dans la colonne d'eau où se situe l'espèce étudiée en question.

A partir des trajectoires de ces simulations, il est vraisemblable le changement, parfois radical d'orientation des bouées corresponde à un changement de direction du vent. Pour l'affirmer il serait nécessaire d'intégrer chaque changement d'orientation de bouées à une date pour identifier les nouvelles forces et orientation du vent. Cette démarche est réalisable, mais n'apporterait rien à ce propos ci.

IV.7. Cas d'export de larve avec traceur du modèle

Nous ne pouvons nous appesantir sur tous les cas de simulations de bouées disponibles en fonction de configurations de vent. Ces cas sont trop nombreux et trop variés pour être décrits un à un. Beaucoup d'autres simulations ont été lancées, testant en particulier les trajectoires de ces bouées virtuelles lancées à très petit intervalle de temps et d'espace, mais ce n'est pas le lieu de les présenter ici. Grâce aux quelques cas abordés ci-dessus, nous avons quand même perçu le schéma global de ce qui peut se passer dans les bouches de Bonifacio pour une production de biomasse émise dans la zone des cantonnements des Moines. Nous avons examiné les déplacements simulés de larves passives, assimilées à ces traceurs lagrangiens du point de vue de la variabilité spatio-temporelle, mais aussi sous différentes configurations de vent. Cependant, ces simulations n'ont aucune signification écologique s'il n'y a pas de production biologique à ce moment-là.

Il nous fallait connaître les périodes (saison) de production de biomasse et plus précisément il nous fallait trouver une espèce démersale qui pondait à une période correspondante à celles simulées par le modèle. En quelque sorte, nous voulions tester la crédibilité du modèle à une période où il y avait une réelle production d'œufs ou de larves. Nous avons donc fait tourner le modèle sur la période d'octobre à décembre où il y a une production biologique par l'espèce *Sparus aurata* (espèce nageant près du fond) dont la période de ponte est automnale comprise entre octobre et décembre. D'après l'analyse courantologique de la zone effectuée dans le premier chapitre, nous savons que l'hydrodynamisme automnal et hivernal est souvent violent et variable à une petite échelle de temps et d'espace, tant au niveau des vitesses que des directions de courant. Cet élément nous amène à postuler que la biomasse, des espèces démersales ou vivant près du fond comme *Sparus aurata*, produite dans les zones de cantonnement pourrait être rapidement exportée de celles-ci. L'utilisation de traceurs virtuels ne peut évidemment tenir compte de la complexité des objets biologiques qu'elle veut simuler, non seulement morphologiquement mais du fait de leurs tropismes. Cependant il est possible en suivant ces traceurs passifs d'observer simplement leurs trajectoires simulées et de voir si celles-ci entraînent ou peuvent entraîner les individus en dehors d'un cantonnement, voire hors de la réserve, et dans ce cas en

combien de temps. Ou si au contraire le système hydrodynamique contraint ou peut contraindre la biomasse produite à l'intérieur du périmètre de la réserve. Il est important de bien comprendre que cette méthode ne fournit aucun bilan sur la dispersion larvaire de *Sparus aurata* (qui nous sert de référence pour les dates de lâché des traceurs), mais qu'elle permet uniquement d'estimer pour cette période de production biologique combien de temps mettraient les larves à quitter la zone ou à y demeurer. Sachant que le cycle larvaire de *Sparus aurata* dure environ 50 jours et que ces larves ont une faible capacité à nager contre les courants, nous avons considéré que leur identification à des traceurs passifs était une approximation acceptable.

Durant la période comprise en octobre et décembre, plusieurs bouées sont lâchées à intervalle régulier sur plusieurs heures de la journée (toutes les figures ne seront pas présentées ici). Nous ne présenterons que celles qui présentent une particularité avec deux bouées (une en surface et une au fond) lancées le même jour, à la même heure et à la même position géographique. Nous rajoutons une information sur la durée mise par la bouée pour sortir de la zone délimitée par le modèle.

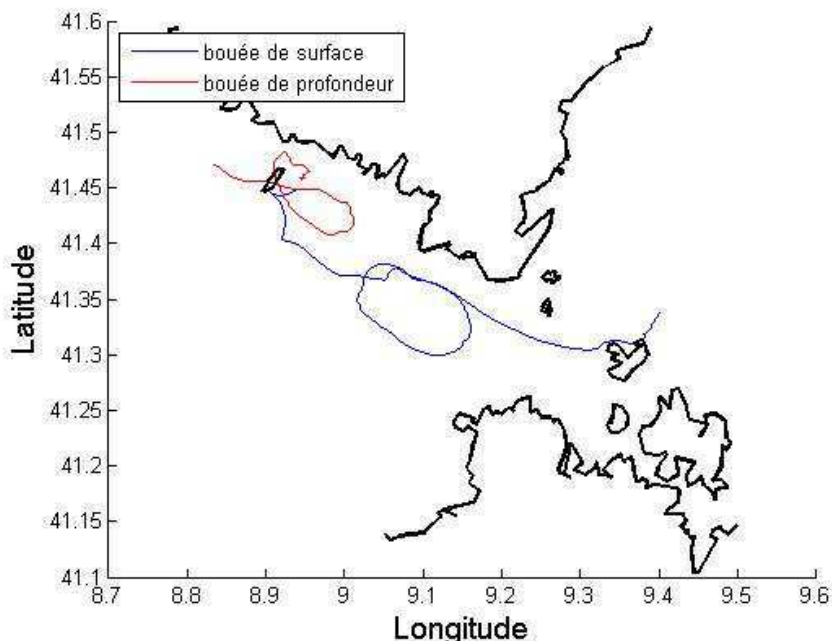


Figure IV.24: Cas n°4. Simulation de lancement de bouée re représentant des individus passifs. Bouée lancée le 20/10/2006 à 16h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -3m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -35 m. Condition de vent issue du cap Pertusato le 20/10/2006 à 16h00 : vitesse= 7 m.s⁻¹, direction= 90°. Orientation ouest majoritairement maintenue durant 3 jours, pour un vent plus faible. Puis changement successif entre vents d'est et d'ouest. Temps compris dans la zone pour la bouée de surface= 10.33 jours, pour la bouée de fond=11.78 jours.

Plusieurs cas de figure sont apparus au cours de ces simulations et nous présenterons une figure comprenant la bouée de surface et celle de fond pour chaque cas retenu.

Le premier cas (exemple donné sur les Figure IV.13, Figure IV.14 et Figure IV.17) montre le même schéma de parcours de bouées de fond et de surface que celui vu dans les parties précédentes. Nous revenons rapidement sur sa description. Les parcours des bouées de surface et de fond montrent une grande différence alors que bien évidemment le forçage météorologique est identique pour les deux. La bouée de surface passe du côté est des bouches et la bouée de fond reste confinée à la partie ouest pour la plus grande part de son trajet. Le but de décrire à nouveau ce cas ici, est tout simplement de constater que les « schémas » de parcours des bouées régulièrement observés dans les parties précédentes traitant de la variabilité du modèle et des parcours en fonction des configurations de vent, se retrouvent bien sur une période d'octobre à novembre (période de production biologique de certaines espèces comme c'est le cas de *Sparus aurata*). Cette configuration peut-être considérée comme une configuration-type d'export de biomasse à partir du cantonnement des Moines. Une autre notion est à considérer : celle du temps de résidence des traceurs dans la zone délimitée du modèle. Ce temps de résidence est plus long pour la bouée de fond (11.78 jours) que celui de la bouée de surface (10.33).

Nous allons maintenant présenter un seul exemple mais qui représente globalement très bien tous les cas rencontrés pour les simulations lancées durant cette période.

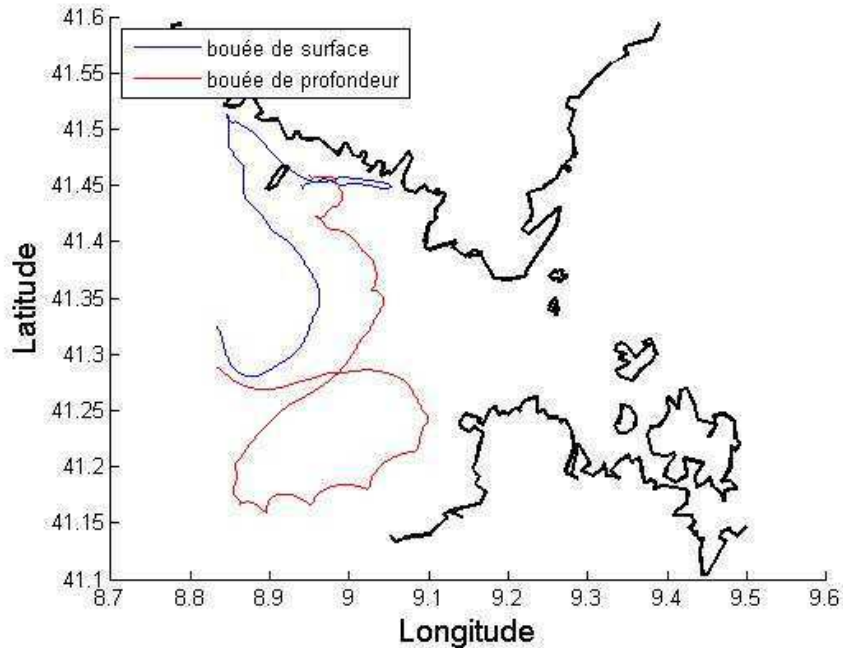


Figure IV.25 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée le 10/10/2006 à 16h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -3m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -35 m. Condition de vent issue du cap Pertusato le 10/10/2006 à 16h00 : vent faible, vitesse= 2.6 m.s^{-1} , orienté ouest, direction= 300° . Cette direction ne s'est maintenue qu'une heure. Changement direction de vent en Nord-est maintenu durant 9 jours avec vitesse variable. Temps compris dans la zone pour la bouée de surface= 14.69 jours, pour la bouée de fond=16.21 jours.

Sur la Figure IV.25 les deux bouées (surface et profondeur) restent toutes deux cantonnées dans la partie ouest du détroit mais leurs trajets y sont différents alors que les deux bouées ont été lancées du même endroit de la zone. C'est le premier cas présenté ici qui présente cette configuration de parcours car dans les autres cas où les deux bouées restaient dans la partie ouest, les trajets de bouées de surface et de fond étaient très voisins. La bouée de fond a un temps de résidence dans la zone de simulation plus long (16.21 jours) que celle de surface (14.69 jours).

Pour les deux cas présentés ci-dessus, le temps de résidence de la bouée de fond est un peu plus élevé que le temps de résidence de la bouée de surface. Rappelons que ce que nous nommons "*temps de résidence*" est celui où le traceur virtuel reste dans la zone de simulation; le programme ne peut plus ensuite suivre son trajet. Cette information est un point important, car d'un point de vue de la production biologique, la biomasse produite au fond aura donc un temps de résidence dans la zone plus importante que la biomasse produite plus en surface. Cependant, nous ne pouvons considérer ce cas comme étant habituel dans les bouches de Bonifacio, à partir de ces deux cas. Nous présentons donc le tableau

suivant résumant les temps de résidence de plusieurs simulations lancées (qui ne sont pas toutes présentées dans ce mémoire) afin de voir si ce phénomène peut être considéré comme général ou occasionnel.

Tableau IV.8 : Tableau de la durée en jours du temps de résidence des bouées de surface et de fond dans la zone délimitée par le modèle.

Dates et heures	Temps de résidence dans la zone pour la bouée de surface (en jours)	Temps de résidence dans la zone pour la bouée de fond (en jours)
12/09/2006 à 03h00	12.91	7.78
16/09/2006 à 14h00	9.01	11.9
05/10/2006 à 08h00	2.63	29.84
10/10/2006 à 08h00	9.82	29.47
10/10/2006 à 16h00	14.69	16.21
10/10/2006 à 23h00	20.03	24.73
20/10/2006 à 16h00	10.33	11.78
20/10/2006 à 23h00	10.03	14.73
05/12/2006 à 00h00	7.27	10.36
07/12/2006 à 16h00	20.24	14.86
10/12/2006 à 18h00	2.98	2.75
Nb	11	11
Minimum	2.63	2.75
Maximum	20.24	29.84
Moyenne	10.90	15.86
Écart type	5.82	8.73
	jours fond > jours surface	fréquence = 72.72 %
	jours surface > jours fond	fréquence = 27.28 %

Les durées les plus faibles de résidence pour les bouées de surface et de fond sont approximativement de deux jours, ce que l'on constate pour la bouée de surface le 05/10/2006 et pour la bouée de fond le 10/12/2006. Ce temps très court peut s'expliquer par le fait que les deux bouées sont sorties rapidement de la zone de simulation en direction de l'ouest, ayant été lâchées au cantonnement des Moines, situé très près de la limite ouest du cadre de simulation. Le temps de résidence le plus long est constaté pour une bouée de fond (29.84 jours). En moyenne, le temps de résidence dans la zone pour les bouées de surface est plus court (10.90 ± 5.82) que le temps de résidence pour les bouées de fond (15.86 ± 8.73). Nous n'avons présenté ici que les temps de résidence de bouées de surface et de fond, lancées simultanément, dans la zone de simulation. Cependant pour une des simulations, la durée de temps de résidence d'une bouée de surface (-10 m), seule, lancée aux Moines, a pu aller jusqu'à 35 jours. Il est vraisemblable que le temps de résidence pour une même bouée de fond, lancée du même lieu et à la

même date, aurait été supérieur à 35 jours. Cette notion de temps de résidence d'un individu passif est importante. La durée de temps dans laquelle les bouées sont comprises dans la zone varie environ de 2 à 25 jours (pour le tableau présenté ci-dessus, mais peut aller jusqu'à 35 jours). Rappelons tout de même que ce temps est seulement une indication, car les individus peuvent sortir de la zone et dans ce cas là, ils sont « *perdus* » pour le modèle, mais que dans la réalité il est possible que ces individus reviennent grâce aux courants à l'intérieur de la zone. Durant ce temps, certaines espèces peuvent se modifier morphologiquement. C'est le cas de *Sparus aurata* dont le cycle larvaire dure 50 jours, nous pouvons considérer qu'au bout de 20 jours il y aura donc une modification morphologique. En effet, si au bout de plusieurs jours certaines espèces passent par un nouveau stade ontogénique ou connaissent une simple augmentation de leur taille, elles pourraient adopter un comportement différent de nage avec pour certaines plus de capacité à rester éventuellement dans la zone. Mais dans ces cas-là, leurs trajectoires ne pourront plus être identifiées par de simples bouées virtuelles (traceurs lagrangiens passifs) car pour simuler la trajectoire de ces individus il serait alors nécessaire de prendre en compte leurs comportements de nage, leur vitesse de chute dans la colonne d'eau et dans le cas d'une quantification : le taux de mortalité, de prédation, etc.

De toutes les simulations lancées dans cette section, nous pouvons faire un bref récapitulatif.

Le parcours entre la bouée de surface et de fond apparaît en général différent. Les bouées de fond ont un temps de résidence dans la zone de simulation toujours supérieur à celui de celle de surface. L'export de biomasse sera donc plus actif en surface qu'au fond.

Le parcours des bouées de fond n'est jamais dirigé vers l'est, reste à savoir si cet élément est une caractéristique du système de Bonifacio ou de l'espace local des Moines, cette biomasse sera donc disponible pour les pêcheurs.

Deux cas montrent un parcours identique entre bouées de fond et de surface et ils se sont tous les deux produits par vent fort ouest. Sur ces cas, les changements brutaux de direction des bouées correspondent à des changements de directions de vent, mais ceci reste à approfondir comme nous l'avons déjà exposé plus haut.

Les œufs et larves émis dans la zone des Moines, en surface (ou disons à faible profondeur), ont une probabilité plus forte de ne pas se retrouver comme

ressource commerciale pour les pêcheurs corses de Bonifacio, ceux qui pourtant acceptent des restrictions de pêche, puisque cette « biomasse » peut arriver régulièrement dans les eaux de la Sardaigne par vent fort d'ouest dont on a montré la fréquence élevée dans les bouches. En revanche la biomasse produite dans les eaux proches du fond au cantonnement des Moines, demeurera dans la zone ouest des bouches de Bonifacio, donc augmentera, à terme, la ressource pour ces mêmes pêcheurs locaux.

IV.8. Application du modèle Symphonie pour la gestion de la réserve et la prévention des risques

Jusqu'à présent, nous avons utilisé le modèle Symphonie soit pour obtenir des modèles de courant ou d'hydrologie, en fonction de configuration météorologiques variées, soit pour matérialiser des individus passifs tels que les larves et juvéniles grâce à des modules de particules lagrangiennes. Nous avons vu tout au long de ce travail les avantages d'utilisation d'un tel d'outils : vision dans l'espace là où il n'y a pas de données in-situ, comparaison entre les valeurs in-situ et les valeurs du modèle, représentation de dispersion d'individus, etc. Dans ce mémoire, certains outils d'application du modèle, développés par le laboratoire POC du CNRS, ont été moins utilisés que d'autres et cependant leur application est toute aussi intéressante, nécessaire et utile. Nous allons donc présenter maintenant une application de Symphonie, qui n'a pas été encore explorée dans ce mémoire, mais dont l'utilisation apparaît néanmoins comme potentiellement très utile pour la gestion d'un écosystème tel que les bouches de Bonifacio.

Ce module intitulé «*tracer*», permet d'introduire aussi des traceurs passifs dans la simulation, mais qui sont calculés par une équation d'advection diffuse. Ce module permet de mettre en évidence le panache de rivière, la vitesse de sédimentation, de simuler d'autre introduction de sources comme des rejets de polluants en mer, la dispersion des pontes ou de juvénile. En fonction des paramètres rentrés dans le module, il est possible de donner à une source sa position géographique et sa profondeur bien évidemment, mais également d'indiquer la nature de ce qui est «*déversé*» dans le milieu en indiquant, par exemple, la vitesse de chute des particules, la concentration de tel ou tel élément dans chaque

fleuve, la densité de la source et les dates d'apparition et d'extinction de la source. Tous ces paramètres sont évidemment à maîtriser, car ce sont eux qui vont déterminer l'application biologique ou écologique que nous pourrions faire quant à l'utilisation de ce module. Par exemple, le paramètre densité sera un facteur clef, si ce dernier est inférieur à 1, le module sera plutôt utilisé pour simuler la diffusion d'une population de larves, si au contraire la densité est supérieure à 1 elle représentera plutôt la diffusion d'une substance qui aura tendance à "flotter", comme une nappe de pétrole par exemple.

Dans le cas de Bonifacio, les principales applications de ce module seraient de l'utiliser pour envisager des scénarios de pollution, notamment pétrolière, afin d'améliorer les interventions dans la zone. Mais également d'obtenir des informations plus précises sur la dispersion des larves et juvéniles. Jusqu'à présent, pour répondre à cette problématique, nous avons matérialisé ces individus grâce à des modules de particules lagrangiennes, passives donc, tout en mettant l'accent sur les précautions nécessaires à l'interprétation.

Nous présentons ici une application particulière de cet outil : la simulation de l'introduction de deux sources, non plus comme ci-dessus, de particules matérielles, c'est à dire la *dispersion* de "larves virtuelles", mais de la *diffusion* dans l'eau de mer d'une matière polluante. Si ces processus tendent, tous deux, à éloigner un ensemble d'éléments à partir d'une source ponctuelle, les équations de mécanique qui les décrivent diffèrent essentiellement du fait que, pour la seconde, va tendre à diminuer, de façon *homogène*, à diluer donc, cette substance au cours de l'éloignement de la source, mais également de la durée d'émission de cette source.

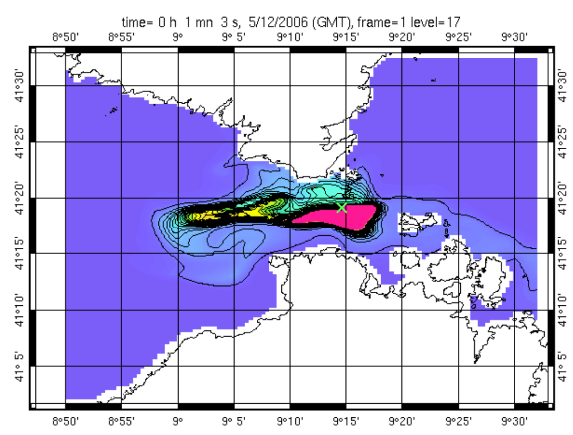
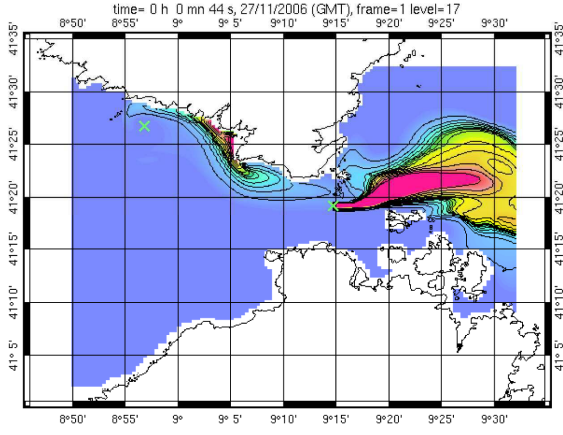
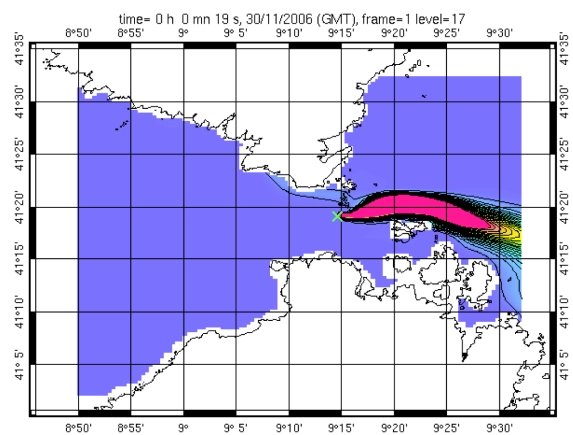
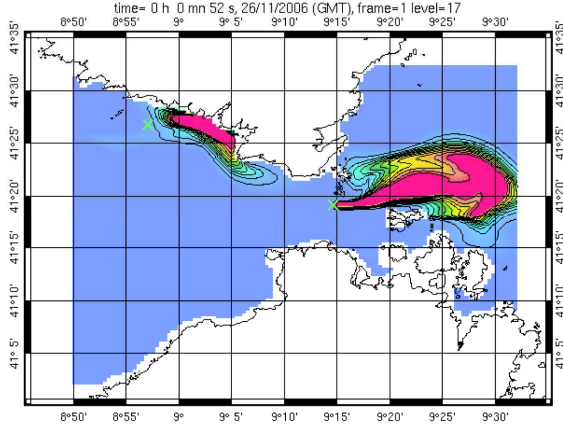
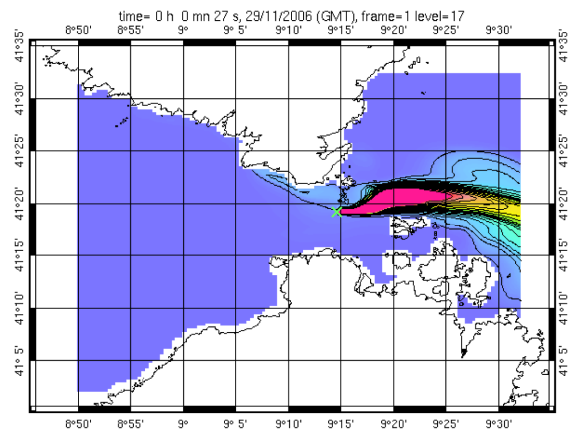
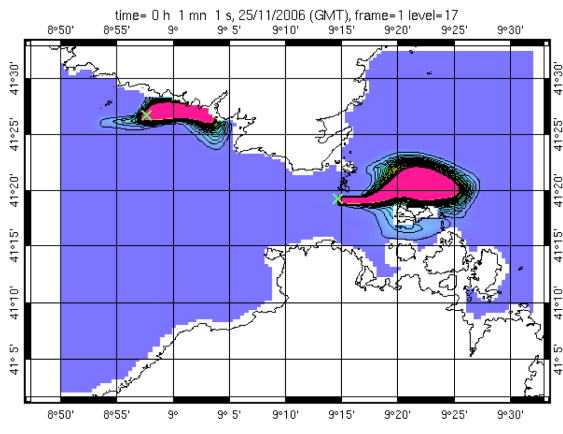
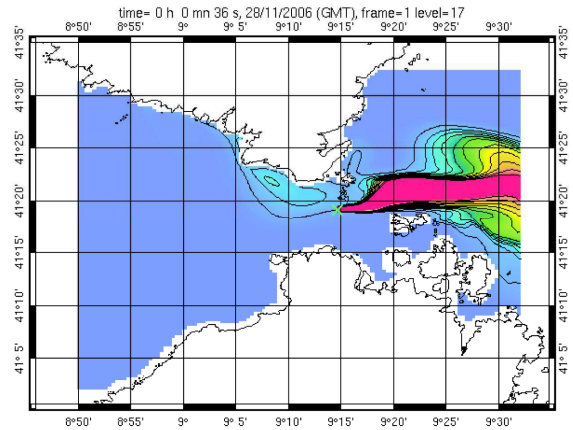
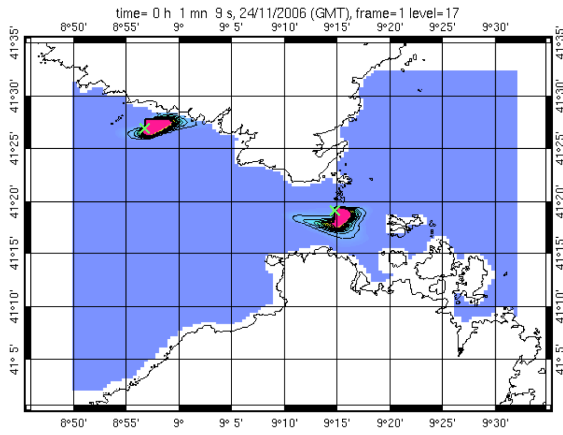
La période de simulation choisie ici, pour ces simulations de diffusion, couvre la période allant de mi-novembre à mi-décembre (Figure IV.26). L'une de ces sources a été située au niveau des îles Moines et émise pendant deux jours (du 23/11/2006 au 24/11/2006). L'autre au niveau des îles Lavezzi, et ce pendant 45 jours (durant toute la période de simulation du 23/11/2006 au 15/12/2006). Toutes les deux ont été lancées à -20 m de profondeur. La densité pour cet exemple a été paramétrée comme étant inférieure à 1, donc elle pourrait correspondre à des nappes de pétrole, des panaches de rivière ou des débits sédimentaires. L'exemple proposé ici, car il permet de mettre en évidence la gestion de deux sources

simultanées avec l'une permanente et l'autre continue. Comme les cas qui peuvent être simulés sont multiples (modification de la nature de la source, de la date d'émission, de la position géographique), nous n'en présenterons qu'un exemple.

Les données de vent (issues du sémaphore Pertusato-Météo-France) sont tracées (Figure IV.27) durant la période de simulation allant du 24 novembre au 3 décembre. Au début, le vent est orienté E-NE avec une vitesse en moyenne comprise entre 4.5 et 5 m.s⁻¹. Puis du 3 au 15 décembre, les directions de vent oscillent entre les dominantes que nous avons identifiées pour cette zone, mais avec une fréquence supérieure de vents d'ouest.

La matière émise par la source des Moines à -20 m, durant deux jours se dirige vers la côte près du port de Bonifacio et se disperse le long de cette dernière jusqu'à être complètement diffusée dans le milieu quatre jours plus tard. En effet, sur la carte de simulation du 28/11/2006, il n'existe plus aucune trace de cette émission. Du début de la simulation jusqu'à la date de disparition de l'élément relâché dans le milieu, le vent est strictement orienté nord-est, mais à -20 m de profondeur nous ne constatons pas son impact quant à la dispersion de la source. Cette nappe au contraire s'étend et se diffuse le long de la côte avec une direction est/sud-est, probablement entraînée par un tourbillon cyclonique fréquemment observé à ce niveau du détroit.

Le panache de la source émis à -20 m, au niveau des îles Lavezzi durant toute la période de simulation (environ un mois) garde une orientation strictement est jusqu'au 30/11/2006. Durant cette période, soumise à un vent nord-est, le panache, toujours en milieu de détroit conserve un axe de dilution vers l'est et commence à s'étaler. La direction du vent (Figure IV.27) semble peu influencer cette diffusion pendant cette période, alors que le courant, majoritairement orienté d'ouest en est en milieu de détroit, est déterminant dans la diffusion à partir de la source. À partir du 5/12/2006 le panache de dilution s'oriente différemment avec une direction de déplacement vers l'ouest, diminue de taille, cantonné en plein milieu du détroit. Durant ce jour, le vent est orienté ouest, mais n'influence pas la dispersion de la source. En effet, le même scénario se reproduit le 12/12/2006, mais cette fois-ci avec un vent orienté à l'est.



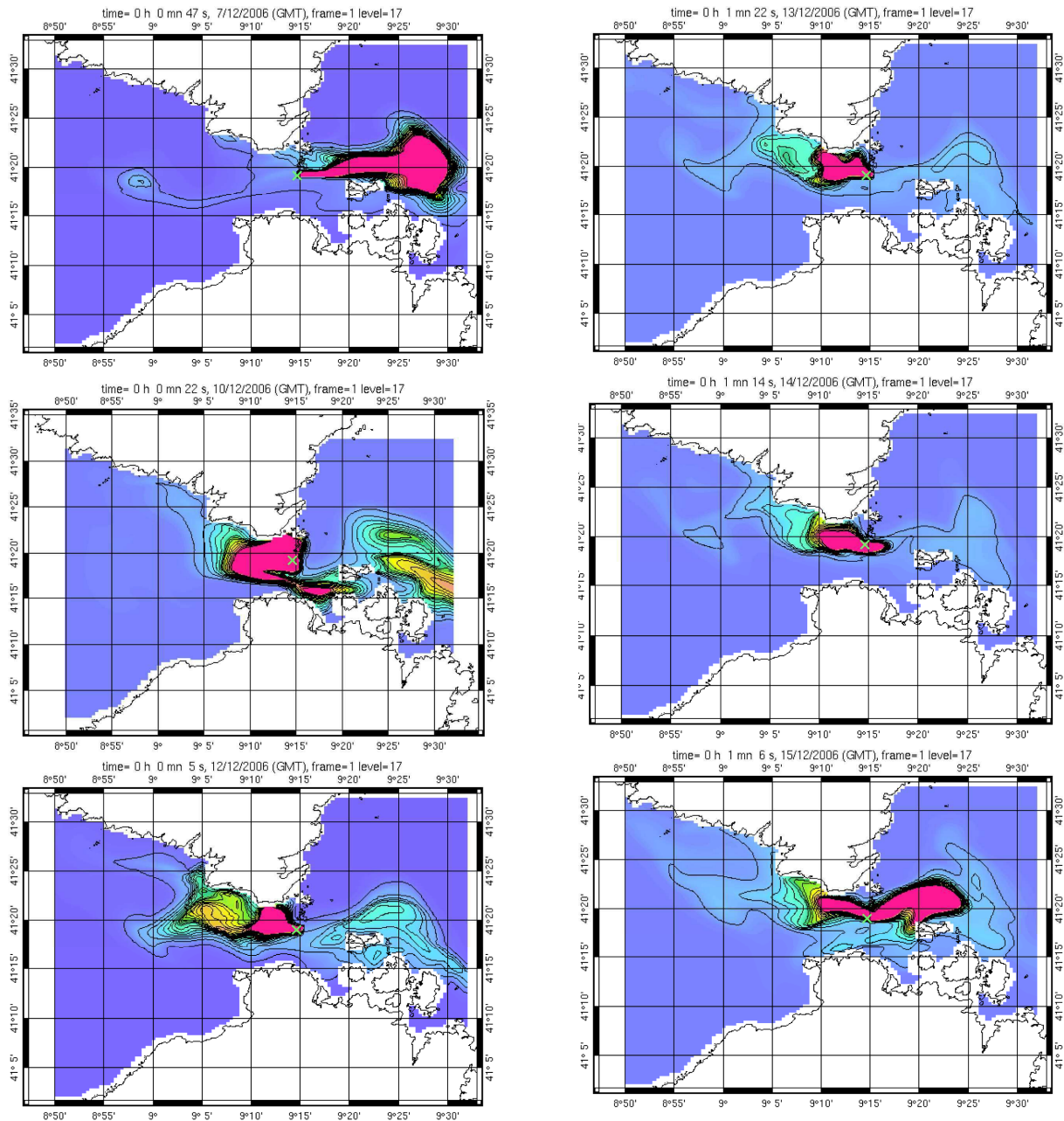


Figure IV.26: Utilisation du module traceur de Symphonie. Simulation lancée du 23/11/2006 au 15/12/2006 avec deux sources à - 20 m de profondeur. La première aux îlots Moines, source lancée le 23/11/2006 au 24/11/2006, la second aux îles Lavezzi du 12/12/2006. Conditions de vent durant le mois enregistrées au sémaphore de Pertusato

L'évolution du panache de diffusion de ces deux sources est présentée sous forme de séquences temporelles de figures. On remarquera qu'à la différence des simulations de dispersion par le lâcher de bouées virtuelles, les nuages sont représentés sous forme d'isolignes de concentration de la substance émise, les surfaces rouge représentant les zones de plus forte concentration.

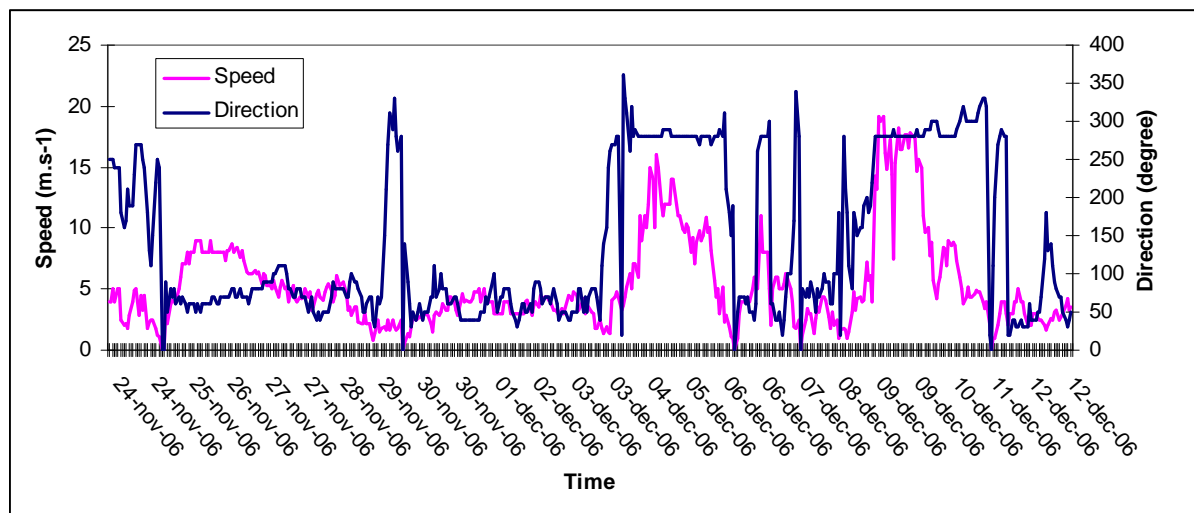


Figure IV.27: Vitesse et direction du vent enregistrée par le sémaphore de Pertusato du 24 novembre 2006 au 12 décembre 2006.

La source permanente que nous avons localisée aux Lavezzi voit son panache de diffusion essentiellement influencé par la direction des courants en milieu de détroit, orientés d'ouest en est. Ces courants violents contraignent le panache en une bande compacte dont la dilution en concentration se fait plus au large des îles Maddalena.

Sur cet exemple et pour les deux scénarios étudiés, l'impact du vent à -20 m de profondeur n'influence pas la dispersion d'une source, leurs panaches étant majoritairement forcés par les courants à cette profondeur. Il va de soit qu'un autre scénario se serait produit si la densité de la matière émise par la source n'avait pas été fixée à 1, mais à une valeur inférieure, comme par exemple dans le cas d'un pétrole. Celui-ci aurait eu tendance à remonter pour gagner les eaux de surface, et le panache aurait alors été beaucoup plus sensible au vent.

Par rapport aux cas d'utilisation du modèle pour sa simulation de traceurs lagrangiens, vus ci-dessus, aucun traceur n'avait été lancé au niveau des îles Lavezzi ou des îles de l'archipel de la Maddalena, cependant cette simulation nous

permet aussi d'émettre l'hypothèse qu'une source, en émission à ce niveau peut se retrouver soit du côté est, soit passer du côté ouest du détroit.

Conclusion et Perspectives

Un des points essentiels du travail présenté ici était qu'il n'y avait pour les bouches de Bonifacio, avant lui, quasiment pas de données courantologiques ou hydrologiques. Quelques mesures avaient bien été réalisées ponctuellement dans le passé, essentiellement en terme de qualité de l'eau (Directive Cadre sur l'Eau), mais rien, ou si peu, pour le reste. Un exemple illustrera ce manque. En 2004, un sous-marin nucléaire de l'US Navy, basé à La Maddalena, avait heurté le fond de ce détroit, avec l'éventualité de fuites de matières radioactives. Les informations officielles, rassurantes, diffusées à cette occasion faisaient alors référence à un modèle des courants qui minimisait l'éventualité de risques de dispersion éventuels. Largement répandus par les médias cet optimisme apparaissait à la réflexion, tout relatif quand on sait que la maille utilisée par ce modèle à grande échelle était de vingt kilomètres, ce qui veut dire en clair qu'UN seul point de simulation était disponible pour ... l'ensemble des Bouches de Bonifacio. Il existe bien un modèle de dérive de nappes de pétrole en fonction du vent, développé par Météo-France (MOTHY) mais celui-ci ne concerne que les eaux de surface, pas les eaux profondes. On était loin, très loin, d'approcher la complexité des courants marins dans cette zone comme nous l'avons mis en évidence dans les résultats présentés ici. Situation d'autant plus paradoxale que depuis de nombreuses années la France et l'Italie essaient de faire interdire le transit de matières dangereuses dans ce détroit international.

Mais ce n'était pas par rapport à ces seuls risques que ce manque d'information était préjudiciable. Car, paradoxalement aussi, alors que l'on ne disposait que de très peu d'éléments sur l'eau en tant que milieu de vie des populations marines de la zone, les poissons et les organismes benthiques qui y vivaient avaient été étudiés, et depuis de très nombreuses années, par les personnels de la réserve et par des équipes universitaires. Et certaines questions qui pouvaient se poser en tant que gestion de ces populations ne pouvaient trouver de réponses claires faute de données scientifiques sur l'hydrologie et l'hydrodynamisme à l'échelle locale. Plusieurs rapports passés (antérieurs au lancement en 2004 du programme CYRCE par J.-C. Romano) affichaient le manque de données

hydrodynamiques, mais également la nécessité de combler ce déficit. Nous citerons notamment un rapport de Culioli, *et al.*, 2003 [18]: « *l'étude des différentes masses d'eau des bouches de Bonifacio sera sans doute déterminant dans la connaissance de ces fonctionnements écologiques et de la productivité des réserves établies dans cette zone [...] l'étude des caractéristiques de ces masses d'eau (température, salinité...) pourrait également nous permettre de comprendre la répartition biologique* ». Il était donc crucial de répondre à ces questions pour mieux gérer les systèmes biologiques qui vivent au sein de la réserve des bouches de Bonifacio. Ces arguments majeurs ont d'ailleurs permis de convaincre la Collectivité Territoriale de Corse, qui a attribué une bourse d'études pour financer ce présent travail.

Ce sujet a été traité à travers plusieurs axes.

- **L'amélioration de la connaissance du système des bouches de Bonifacio** d'un point de vue courantologique et hydrologique grâce au déploiement d'appareils et au traitement statistique des données recueillies lors des missions CYRCE et par l'intermédiaire d'étude de cas.

- **La compréhension de l'interaction entre les facteurs hydrodynamiques et les populations.** En effet, la courantologie et l'hydrologie peuvent expliquer de nombreux comportements ou stratégies d'espèces, puisqu'ils influent par exemple sur la répartition géographique des individus, et sont à la base de certains phénomènes occasionnels. Une attention particulière a été faite pour répondre à la problématique des **recrutements de larves et de juvéniles**, facteur majoritairement dépendant des courants, à partir de zone de cantonnement.

- **L'utilisation d'un modèle numérique** tel que le modèle Symphonie était un outil complémentaire pour réaliser ce projet. Tout d'abord d'un point de vue courantologique il a permis d'améliorer nos connaissances sur la circulation. Ensuite d'un point de vue biologique, il a aidé à répondre à certaines questions sur le fonctionnement de l'écosystème et plus particulièrement aux questions de recrutement de larves.

Intérêt de la courantologie et de l'hydrologie

○ **Acquérir des connaissances :**

Grâce aux données recueillies à travers plusieurs projets (CYRCE, DDE), nous avons pu obtenir une vision globale du système à l'échelle saisonnière. Les données hydrologiques de CYRCE constituent maintenant une base de données (CYRCEProfils sur le logiciel Access®) comprenant tous les enregistrements numériques des profils réalisés. Cette base de données pourra aider les gestionnaires ou acteurs souhaitant soit porter un regard synthétique, soit entreprendre des actions dans la zone dans une optique d'amélioration des connaissances ou d'aide à la gestion de la zone côtière.

○ **Créer un état de référence pour les eaux des Bouches de Bonifacio**

Ce travail est également une opportunité de déterminer ce qui est communément appelé « *état de référence* ». Étant le premier travail réalisé, aux échelles saisonnières et pluriannuelles, sur l'hydrologie et l'hydrodynamisme, il s'inscrit, sur ces plans, comme un état "initial" du milieu. Il permettra de suivre leurs évolutions dans le temps pour ce qui concerne son évolution naturelle, mais notamment aussi en cas de perturbation anthropique éventuelle et de son retour à un état "normal" à cet « *état de référence* ».

○ **Suivi du réchauffement climatique**

Une partie des données récoltées (mais aussi celles obtenues par simulation) peuvent accompagner des séries poursuivies dans des programmes de suivi du réchauffement des eaux Méditerranéennes (comme Medchange par exemple), à une époque où ce dernier, accepté par la communauté scientifique doit être étudié, y compris sur le long terme, (Romano and Lugrezi, 2007 [68]). Afin d'en mesurer toutes les conséquences écologiques. En effet, cette évolution globale, prend des aspects locaux de rythme et d'amplitude différents (Bensoussan, *et al.*, 2010 [8]). Dans les bouches de Bonifacio cela permettrait peut-être aussi de comprendre des événements au niveau biologique, exceptionnels (mortalité de gorgone, bloom

phytoplanctonique exceptionnel), ou progressifs comme l'arrivée d'espèces invasives ou la sélection d'espèces thermophylles.

○ **Impact de l'hydrodynamisme sur la répartition des espèces**

Les données de courantologie et d'hydrologie sont cruciales dans la détermination du comportement des certaines espèces, et notamment pour la compréhension de leur répartition géographique. Nous en avons donné plusieurs exemples durant ce mémoire (répartitions différentes entre l'est et l'ouest du détroit pour certaines espèces de poissons déterminées en partie par les paramètres température et salinité, caractéristiques particulières du golfe de Sant'Amanza, etc.) Mais il en existe bien d'autres qui n'ont pas forcément étaient développé ici, nous pensons notamment à l'impact d'un fort ou faible hydrodynamisme sur les populations, déterminant la répartition de ces dernières. Par exemple, la courantologie influence fortement le conditionnement de la limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica*, tant par sa force que par sa fréquence qui, en se modifiant dans le temps, peuvent être par exemple à l'origine de la remise en suspension du sédiment qui nuit à son fonctionnement.

Comment les caractéristiques des bouches de Bonifacio s'inscrivent dans le cadre méditerranéen.

Les valeurs des paramètres mesurés durant les missions CYRCE (moyennes et extrema) s'inscrivent globalement dans le cadre de ce qui est caractéristique des zones côtières en méditerranée nord-occidentale ainsi que dans la dynamique saisonnière habituelle. Ceci n'a rien d'étonnant puisque les bouches de Bonifacio, point le plus sud des eaux territoriales françaises, fait partie du système de circulation général des eaux de cette partie de la méditerranée.

C'est le cas des paramètres conservatifs (température et salinité), qui présentent l'alternance des deux systèmes classiques. En hiver, la colonne d'eau, homogène de la surface au fond, est caractérisée par des températures froides et par une salinité plus élevée que ce qui est rencontré en été. Cette situation homogène se met en place progressivement à partir de novembre, se maintient durant environ quatre mois, avant que ne commence à s'installer, fin février-début mars, un système "bi-couche" de plus en plus tranché quand le rayonnement solaire,

et donc la chaleur des eaux superficielles augmentent : une couche d'eau chaude, à faible gradient thermique avec la profondeur, est limitée par la thermocline, d'eaux plus profondes, plus froides, et en général plus salées, quoique la halocline soit souvent discrète. Jusque là, rien de très original. Ce qui l'est peut-être plus, ce sont en particulier les minima hivernaux. Ils sont souvent compris entre 12 et 13°C, et parfois inférieurs. Cet aspect semble confirmé par les enregistrements en continu réalisés par l'équipe scientifique de la réserve (Office de l'Environnement de la Corse) grâce à des thermomètres enregistreurs immergés, et dont nous avons pu montrer, en les comparant qu'ils avaient la même dynamique annuelle. Or ces valeurs sont souvent inférieures à ce qui a pu, au contraire être mesuré par le programme Medchange (Bensoussan, *et al.*, 2010 [8]) dans de nombreux autres endroits en méditerranée nord-occidentale, sauf sur la côte catalane, à la station de l'Estartit. Or, la température des eaux méditerranéennes, même les plus profondes sont rarement inférieures à 13°C (Bethoux, *et al.*, 1990 [9]). Et d'autre part, la position latitudinale des bouches de Bonifacio (nettement plus sud que celles auxquelles nous l'avons comparée) ne nous préparait pas à une telle constatation. La position de la zone, comme un couloir resserré et de faible profondeur, entre le golfe du Lion et la mer tyrrhénienne peut-elle en être l'explication ? Nous ne pouvons répondre statistiquement à cette question qui mériterait de plus amples acquisitions de données.

Pour le cycle de l'oxygène dissous, comme pour ses valeurs statistiques, rien de bien original non plus. Il est en concordance avec celui habituellement rencontré en Méditerranée nord-occidentale. Il est dépendant, pour l'essentiel de la température et de la salinité, avec une faible empreinte, en général, de la biomasse sur ses concentrations, mais, plus significativement sur son pourcentage de saturation. Ni sursaturation, ni sous-saturation anormales, si ce n'est dans le golfe de Sant'Amanza, avec la présence de sa ferme aquacole, mais qui mériterait à lui seul, une étude particulière. Ce que nous n'avons pas voulu, et surtout pu, développer ici, faute d'une stratégie de mesure adaptée, mais, dans le futur, ce serait un axe de recherches pertinent sur le plan hydrologique, compte tenu de "l'anomalie administrative" que représente la présence d'une ferme aquacole dans une réserve.

La fluorescence, indice indirect de la densité du phytoplancton manifeste également les cycles saisonniers, classiques pour cette région de la méditerranée,

quant aux dates. En hiver la fluorescence est très faible et homogène sur toute la colonne d'eau. C'est aussi le cas en été, avec cependant, parfois, une poussée en profondeur, là où les conditions thermiques sont plus favorables et le stock d'éléments nutritifs encore disponible. C'est au printemps, naturellement, que les niveaux de biomasse phytoplanctonique estimés par la fluorescence sont les plus forts. Avec le niveau statistique des mesures, nous nous retrouvons dans une configuration classique pour la position géographique, et donc écologique, des bouches de Bonifacio. Cela n'empêche pas l'occurrence de phénomènes sortant de la norme. C'est le cas de la poussée phytoplanctonique, constatée lors de la mission CYRCE 4 et exposée en détail dans ce travail. Ses valeurs, en ce qui concerne la biomasse phytoplanctonique, dépassent ce que nous avons pu consulter dans la littérature, pour cette partie de la méditerranée, mais avec des questionnements : cet événement est-il rare dans cette zone ? Pourquoi ? Est-il en relation avec le changement climatique global ? Les données à notre disposition dans ce travail ne nous ont pas permis de répondre à ces questions.

Que les paramètres hydrologiques enregistrés sur les bouches de Bonifacio correspondent à ce qui est classiquement rencontré en Méditerranée nord-occidentale, permet d'une part de qualifier les bouches de Bonifacio comme relevant, dans ses caractéristiques générales des eaux méditerranéennes et donc que toute action ou gestion effectuées dans cette zone peut être appliquée en méditerranée et vice versa. Il nous semble alors que tout biais expérimental et de mesures peut être écartés. Cela n'empêche pas que cette zone d'études présente des originalités dont il faut tenir compte.

Originalité de la dynamique des eaux dans des bouches de Bonifacio

Nous avons vu que les données hydrologiques recueillies dans les Bouches de Bonifacio étaient caractéristiques des eaux côtières de Méditerranée nord-occidentale. Cependant durant le déroulement de cette thèse nous en avons également étudiée les particularités rencontrées durant les missions CYRCE.

En effet, de par la configuration de la zone, la réserve des bouches de Bonifacio reste un endroit original, dans le sens écologique du terme. Ce petit détroit, parsemé d'île et îlots, est rare en Méditerranée, sa côte fortement découpée a

comme conséquence, sur la plan de la géomorphologie, la formation de nombreux golfes baies, caps, pointes (Vela, *et al.*, 2002 [77]). Ce trait de côtes très découpé contribue certainement pour sa part à l'hydrodynamisme complexe qui a été présenté dans ce travail. Cet élément, s'ajoutant à quelques autres (substrat calcaire -une des très rares région calcaire de la Corse-, ouverture vers le large, transit de masses d'eaux entre deux bassins) expliquent sans doute la forte biodiversité (Dubost and Cornet, 1994 [20]).

Comme s'explique, par le régime binaire des vents dominants (libecciu et gregale), très original ici, la fréquence presque binaire, en direction, des distributions de courants. Aux coups de vents, souvent violents, correspondent des transits de masses d'eaux, soit du golfe du Lion vers la mer Tyrrhénienne en cas de vent du sud-ouest (libecciu), soit en sens contraire en cas de vent de nord-est (gregale). Cette structure bi-modale des régime de vents (très rare en Corse, comme d'ailleurs en France continentale), la présence d'un effet accélérateur des flux induits de transit à travers le détroit par la remontée de la bathymétrie et le rétrécissement nord-sud de ce seuil, tous ces facteurs originaux font de cette zone un atelier très intéressant pour étudier, en outre, des problématiques océanographiques de circulation et ont été déterminants quant à la stratégie d'analyse des traitements de données courantologiques, notamment pour l'étude des cas particuliers vent vs courant.

La présence de deux masses d'eau différentes de part et d'autre du détroit, et/ou leur transit fréquent, de part et d'autre, ont certainement des conséquences. D'abord sur la distribution préférentielle, est ou ouest, de certaines espèces, comme nous l'avons rappelé plus haut (chapitre IV), et comme cela avait été constaté dès le début des années 90 (Miniconi, 1994 [49]), puis confirmé par les observations de l'équipe scientifique de la réserve. Un important travail reste à faire quant à savoir, vraiment, jusqu'où cette différence entre les origines atlantique ou tyrrhénienne des masses d'eaux est déterminante dans la composition des populations.

Mais cette originalité hydrologique et hydrodynamique des bouches de Bonifacio, si elle peut, peut-être, expliquer certaines valeurs (température par exemple -voir plus haut- ou dissymétrie est/ouest pour la poussée phytoplanctonique très forte de juillet 2005 -CYRCE 4-), n'empêche pas, nous l'avons dit, qu'elle présente des caractéristiques classiques de méditerranée nord-occidentale.

Choix de l'appareillage (système de mesures) et des stratégies de mission Perspectives pour continuer à acquérir des données.

Nous considérons qu'un des côtés nouveaux de cette thèse a été l'utilisation de l'ADCP mobile du Téthys II dans une petite zone côtière. En effet cet appareillage, plus adapté à l'hauturier de par ses caractéristiques techniques, et bien que déjà testé sur quelques zones locales comme le golfe du Lion et le golfe d'aigue-Morte (Estournel, *et al.*, 2005 [22] ; Leredde, *et al.*, 2007 [44] ; Petrenko, 2003 [64]), n'avait pas encore été utilisé systématiquement et testé dans une petite zone côtière faisant globalement 10 km de large et 20 km de long et surtout avec une côte si découpée, la présence d'un détroit entre deux bassins (toutes causes de complexification de la circulation) et, nous l'avons, vu son régime spécial de vents.

Une stratégie d'échantillonnage, "*en créneaux*", a été adoptée, dès CYRCE 2 pour le trajet du bateau. L'enjeu était double. Premièrement obtenir une vue d'ensemble de la partie française du détroit et pour cela le bateau devait en couvrir la majeure partie. En second lieu, les trajets de bateau devaient être répétitifs, au sein d'une même mission, pour tenter de détecter le niveau de variabilité, à faible échelle de temps, forte variabilité présumée car fréquente en zone côtière, et prévisible dans la région des bouches, compte tenu de son profil météorologique.

Cette stratégie d'échantillonnage n'a été choisie par J.-C. Romano, initiateur de ce programme, qu'après le dépouillement des données obtenues durant la mission CYRCE 1, mission de test durant laquelle, au contraire, une stratégie dite "*en étoile*" a été adoptée. Celle-ci consistait à réaliser des allers-retours de l'ordre de 30min, rayonnants à partir d'un point central, et ce à des emplacements considérés comme "clés" de la zone. Cette stratégie *de test* nous a permis notamment de prendre en compte la forte variabilité des directions de courant en cas de vent et de courant faibles, tels qu'enregistrées par un ADCP en mouvement, et d'en tirer une relation significative liant cette variabilité des directions des courants à leur intensité. Relation évidente peut-être, *a priori*, si l'on considère que plus l'intensité d'une variable forçante diminue et plus la variabilité "*chaotique*" d'un système naturel, donc complexe, qui y est soumis augmente. Relation confirmée par les mesures de l'ADCP mouillé en un point fixe. Mais encore fallait-il la mettre en évidence.

Cette utilisation, *aux limites* en ce qui concerne la profondeur, de l'équipement ADCP du Tethys II, a fourni des données correctes, si l'on en croit le traitement des données brutes par la division technique de l'INSU (système Saved) ce qui, à travers ce travail, pourrait ouvrir des possibilités d'application locales plus nombreuses et souvent plus appliquées à des questions de gestion de l'environnement.

Ces constatations méthodologiques et technologiques nous permettent de penser à la stratégie possible de futures missions océanographiques éventuelles dans les bouches de Bonifacio pour continuer à enrichir la connaissance de cette zone. Les grandes tendances hydrodynamiques ayant été identifiées dans ce travail, avec la présence quasi permanente d'un transfert important est/ouest de masses d'eaux à travers le détroit, celle d'un tourbillon du côté ouest, d'un courant fréquemment orienté sud dans la partie est, avec alors souvent une inversion de direction du large vers la côte, l'élément qui nous semble le plus important à étudier est cette notion de variabilité du courant à petite échelle de temps et d'espace. Quelle est sa base de temps et d'espace ? Quelle incidence cela a-t-il sur la réponse des organismes et des peuplements. Pour l'étudier, plus en détail, ceci, nous recommandons pour les stratégies de futures missions de se centrer sur une stratégie de transects en étoile dans toutes les localités du détroit.

Un des avantages de cette étude a été l'accès aux données recueillies par deux ADCP, avec chacun sa stratégie de mesure de courants. Nous ne reviendrons pas sur les caractéristiques de ces deux appareils ainsi que les différences entre eux, exposées plus haut. Cependant, il est intéressant de les comparer du point de vue de leur utilisation dans l'optique d'améliorer la connaissance et la gestion de la zone marine couverte par la réserve.

Un des grands avantages de l'ADCP mobile réside dans sa capacité à obtenir des données sur la totalité du détroit et donc de fournir une vue globale du système dans un petit intervalle de temps (petit étant pris ici relativement au mois ou à la saison, sans oublier, comme nous l'avons montré, que la variabilité hydrodynamique peut être de l'ordre de quelques heures). Mais l'analyse des données fournies par ce type d'appareil demande de nombreuses compétences, en particulier de correction du signal et de validation de données (effectuées ici par la division technique de l'INSU-CNRS), mais aussi une logistique lourde mobilisant le navire porteur. Ces

compétences et cette logistique ne sont pas à la disposition des gestionnaires, dont ce n'est d'ailleurs pas la tâche. Même si ce type d'appareil présente un avantage considérable, notamment pour calibrer ou valider un modèle, il n'est pas adapté à l'action des gestionnaires, sauf opérations ponctuelles menées par des acteurs extérieurs.

L'utilisation d'un ADCP mouillé en un point fixe, judicieusement choisi (et nous pensons que notre étude peut aider à ce choix) est beaucoup plus adapté. Il faut rappeler que la Corse ne dispose d'aucun navire, même de petite taille, adapté au travail océanographique, si l'on excepte le petit chalutier de la Direction Départemental de l'Équipement utilisé pour des missions de surveillance, et qui est dépourvu des équipements et appareils considérés aujourd'hui comme nécessaires à une approche actuelle de l'hydrologie. D'un prix d'achat devenu abordable, pouvant être mis en place et entretenu par des moyens raisonnables, il peut être déployé sur le long terme (approche qui nous a fait parfois défaut au cours de ce travail) permettant d'obtenir une fréquence et une durée d'acquisition cohérente avec la variabilité du système. Il demande un entretien régulier (calibrage, nettoyage des "salissures" biologiques, récupération des données), mais il permet d'obtenir de longues séries de données d'un point de vue temporel, ce qui est un avantage non négligeable par rapport à l'ADCP mobile.

L'équipe M²PE, du laboratoire CNRS-UMR 6134, au sein de laquelle j'ai réalisé ce travail, vient d'ailleurs d'acquérir un ADCP (SONTEK) de ce type (mouillable dans la couche des 100m de profondeur) et a signé une convention avec la Réserve Internationale des Bouches de Bonifacio, pour une durée de deux ans. Cet enregistrement en continu, à une première position prévue dans le cantonnement de pêche de Bonifacio (emplacement choisi en fonction de la nature du fond, mais également de l'absence d'activité de chalutage), permettrait d'avoir une vision à long terme du système en un point, et d'obtenir une vision comparative à l'échelle saisonnière sur deux ans. Nous disposerions alors d'une série de l'hydrodynamisme permettant de mieux asseoir statistiquement le travail, que nous présentons ici, que l'on doit considérer ici comme ponctuel dans le temps et dans l'espace.

Avantage de la validation du modèle

Les études de cas ont pris une certaine importance dans ce travail. Cela tient à deux éléments. Le premier vient des deux types d'appareils que nous avons pu utiliser : le premier saisissant la variabilité spatiale à courte échelle de temps mais sur l'ensemble de la zone d'étude, le second la variabilité à long terme, mais à faible échelle d'espace. Le second élément tient à l'originalité de cette zone, que nous avons soulignée, tant du point géographique que météorologique. Entre ces deux approches, il fallait une étape supplémentaire, pouvant en faire la synthèse. Cela a été le sens de l'utilisation de modèles numériques. Et le fait de travailler dans une équipe de physiciens et de mathématiciens a été un atout considérable pour cette approche.

La première démarche, basée sur les données réelles acquise par l'ADCP du Tethys II, a consisté en une intégration de cette masse considérable de données. Cela a été effectué par un maillage, à partir d'un traitement numérique local, de la zone (ajustable en taille de maille unitaire), permettant des zooms spatiaux et temporels, et par deux filtrages successifs, avant les calculs d'intégration. Cette étape nous a fourni une vision large des événements les plus fréquents, donc les plus probables, de l'hydrodynamisme de cette zone, étant postulé au départ que cet échantillonnage, basé sur des missions ponctuelles mais réparties de façon saisonnière, était représentatif. A notre connaissance, cela représente la première tentative, réussie selon nous, d'intégration dans une zone côtière de la base de données Saved de l'INSU-CNRS réalisée à partir des données de l'ADCP embarqué sur le Tethys II. La démarche d'intégration (donc si l'on peut dire de "moyennage" des données) dans un système présentant une aussi forte variabilité spatiale et temporelle, était une approche nécessaire mais non exempte de risques car n'intégrant pas directement la variabilité du régime des vents, en temps réel, variable forçante déterminante du régime des courants.

La possibilité d'utiliser le modèle Symphonie du Pôle d'Océanographie Côtière, (POC-CNRS) de Toulouse, appuyé sur la base de données météorologiques Aladin de Météo-France, et de l'adapter à notre zone d'étude, celle des bouches de Bonifacio, a été l'étape suivante, et pour nous décisive, de ce travail. L'application de

ce modèle, conçu au départ pour des applications moins côtières, a d'abord nécessité une réduction de sa maille pour gagner en résolution. Il est important d'insister sur le fait que le résultat de la simulation est basé sur les données météorologiques réelles, de la date et du moment fixé. Plus adapté, alors, aux conditions spécifiques des bouches de Bonifacio, le modèle Symphonie nous a permis d'obtenir, sur une durée de près d'un an, une véritable vision d'ensemble des courants de la zone, et en particulier, des parties non couvertes par les trajets répétitifs "en crénaux" du Tethys II lors des missions CYRCE, forcément à pas plus large.

La comparaison avec les études de cas que nous avons traitées sur la base des données réelles de courant obtenues lors de missions CYRCE par le Tethys II, met clairement en évidence les flux importants de masses d'eaux, à travers le détroit des bouches de Bonifacio, en direction est ou ouest, selon le vent. On voit apparaître aussi, par exemple, les structures tourbillonnaires de la partie ouest du détroit, fréquentes puisqu'elles ont laissé leurs marques au niveau du sédiment. Les réserves à faire concernent la validité du modèle à proximité de la côte, qui nécessite une augmentation de la résolution par réduction de la maille de simulation numérique. Une démonstration en a été faite quand nous avons comparé, à trois profondeurs, et sur un an, d'une part les températures de l'eau de mer, simulées par le modèle Symphonie (c'est une de ses possibilités) et, d'autre part, celles enregistrées par des thermomètres enregistreurs sous-marins mis en place par l'équipe de la Réserve Internationale (article intitulé : One year (2005) comparison of seawater temperature series between in-situ and modelling data : application to the Strait of Bonifacio (South Corsica), soumis en 2010 aux Comptes Rendus de l'Académie des Sciences). Les divergences sont notables et centrées sur les extrêmes (températures hivernales et estivales). Les données mesurées étant en cohérence avec d'autres séries disponibles pour la méditerranée nord-occidentale, c'est donc à l'amélioration des données simulées par le modèle qu'il faut s'attacher.

En l'état, l'adaptation de ce modèle à la circulation des eaux dans les bouches de Bonifacio, s'avère déjà largement adéquate mais il est certain que ce mémoire ne prétend pas aborder toutes les autres possibilités qui ne pourront être rendues

opérationnelles que par des travaux ultérieurs, ainsi d'ailleurs que la poursuite de la validation de ce modèle par des données réelles.

Nous avons pourtant exploré deux autres applications possibles fournies avec Symphonie, à cause de ses implications fortes en ce qui concerne la gestion de la réserve.

Pour la première, en utilisant des traceurs ponctuels, simulant des larves passives d'organismes marins, et en suivant leurs trajets sur plusieurs jours à partir de cantonnement de réserve, nous avons pu montrer que, selon les configurations, ces larves pouvaient rester dans le périmètre de la réserve (et donc enrichir la ressource disponible pour la pêche locale) ou être exportée hors de ses limites. Il est vrai, à l'inverse, que les cartes de simulation générale des courants que nous avons pu établir, montrent parfois aussi, une arrivée d'eau provenant des côtes nord-ouest de la Sardaigne dans le périmètre de la réserve. Le bilan entre l'export et l'import reste à faire. Tout en gardant à l'esprit les précautions à prendre pour l'interprétation des résultats, nous avons montré qu'une partie de la biomasse produite dans un des cantonnements de pêche, celui des îles aux Moines, reste souvent à l'intérieur du périmètre de la réserve des bouches de Bonifacio. Ce cantonnement joue donc bien son rôle, à savoir produire de la biomasse tout en en conservant une partie, soit dans un même périmètre, soit en l'important dans une autre partie de la réserve. Cette étude préliminaire pour ce sujet ne demande qu'à être approfondie, soit en gardant la même technique pour étudier les émissions de larves, soit à partir d'autres cantonnements

Avec la seconde application du modèle Symphonie, ce n'est pas la dispersion de traceurs ponctuels dont nous suivions le trajet, mais la diffusion/dilution d'une matière à partir d'une source que nous avons simulée. On voit alors se dessiner, dans les bouches de Bonifacio, des isolignes de concentrations, cela naturellement en fonction de conditions météorologiques réelles (et donc des courants), et leur évolution temporelle selon que le déversement est limité dans le temps ou au contraire continu.

Une autre option serait possible. Elle consisterait à établir, par le modèle et en explorant des situations-type, une banque de "*situations possibles*" ou très probables. Compte tenu du haut niveau de variabilité constatée dans ce travail, tant

des conditions météorologiques que de la réponse de l'hydrodynamisme, ainsi que du lieu imprévisible de cet accident, il n'est pas certain que cette option soit efficace sur le plan opérationnel. Surtout si l'on tient compte du fait que cette zone critique, est de surface relativement restreinte et donc qu'un déversement accidentel de matière dangereuse peut arriver très vite à la côte.

Ce modèle numérique, Symphonie, pourrait-il constituer un outil efficace de gestion des risques en cas d'accident de navigation et de déversement de matières dangereuses dans le détroit de Bonifacio ? D'abord, en ce qui concerne, une "marée noire" d'hydrocarbures, il existe des modèles (développés en particulier par Météo-France) qui sont d'ores et déjà opérationnels, même si leur maille, donc leur résolution, semble mieux adaptée à la mésoéchelle, qu'au niveau très local des bouches de Bonifacio. Un des intérêts de cette application du modèle Symphonie est qu'elle permet de gérer la *densité* de la matière déversée, et pas seulement celles inférieures à celle de l'eau de mer qui se retrouveront toujours en surface. Et donc de prévoir, à toute profondeur, sa dynamique de diffusion. On peut en percevoir l'importance dans le cas de l'incident du sous-marin US évoqué en début de cette section. Un obstacle demeure, mais il est techniquement soluble : celui du temps réel. D'une part des situations que nous avons simulées ont pris plusieurs jours de calcul, non pas sur nos machines personnelles bien entendu, mais sur un des serveurs de l'université Pascale Paoli, beaucoup plus puissant. Ce niveau de moyens ne permet pas de gérer en temps réel une situation de crise et d'anticiper les solutions possibles. D'autre part, il n'y a pas pour l'instant de chaîne opérationnelle permettant de récupérer en temps réel les données météorologiques et de forçage aux limites contrairement au service proposé par MERCATOR.

Une fois que cet outil de modélisation sera amélioré (et il peut l'être) pour son adaptation à la zone des bouches de Bonifacio (résolution et validation), et que les connaissances sur les espèces à modéliser seront plus précises (cycle de vie de certaines espèces représentatives, connaissance sur les vitesses de nage, vitesse de chute de larve, taux de prédation, etc.), Symphonie peut être un outil très utile pour la gestion des cantonnements, mais aussi des populations (dispersion de larves, réserve de stock pour les pêcheurs).

Faut-il continuer à acquérir des données dans la zone des bouches de Bonifacio ?

Une première vision de l'hydrodynamisme a été obtenue, pour la totalité du détroit des bouches de Bonifacio, et pour différentes configurations de vent, qui reste la variable explicative la plus pertinente pour la dynamique des courants. On a pu aussi mettre en évidence la nécessité d'obtenir de nouvelles données *in-situ* tant hydrologiques que courantologiques. Il est clair que les missions CYRCE ont constitué un balayage correct de l'ensemble de la zone d'étude, avec une représentation saisonnière acceptable. En revanche les données de courant (communiquées par la DDE et correspondant à un simple test), en un seul point fixe, au sud des Lavezzi, et sur à peine un mois, sont insuffisantes. Surtout si l'on considère la qualité de l'information recueillie sur une période de temps aussi courte. Il faut d'ailleurs signaler ici que la DDE a installé, à une date récente et à ce même point des Lavezzi, une bouée permanente instrumentée et que cette administration recherchait auprès d'institutions comme le CNRS ou l'Ifremer des partenaires pour la gestion des données de courants et de météorologie. En outre, nous avons déjà indiqué que notre équipe disposait maintenant d'un ADCP qui pourra être installé sur d'autres points fixes. Ajoutons que le modèle Symphonie utilisé ici, perfectible en résolution mais nécessitant sans doute d'autres opérations de validation-terrain, a montré ses qualités et est surtout en permanence réactualisable par son appui sur la base météorologique Aladin. On peut donc considérer qu'en ce qui concerne les courants des bouches de Bonifacio, les moyens existent pour qu'une suite soit donnée à cette thèse.

Pour l'hydrologie, c'est moins certain. On pourrait certes envisager de réaliser des missions océanographiques sur le modèle des missions CYRCE. Mais l'absence de navire océanographique en Corse oblige à passer par des moyens nationaux et comme la concurrence scientifique pour le "temps bateau" est rude, le nombre en sera forcément limité. Une solution existe peut-être. Elle est à mettre en relation avec le projet de "pôle marin" *Stella-Mare* voulu par l'université de Corse et qui serait basé près de Bastia. Dans cette optique il est prévu d'acquérir une instrumentation océanographique moderne, dont une bathysonde SeaBird autonome (à système interne de stockage des mesures, donc sans nécessité de câble électroporteur) et pouvant être mise en œuvre par une embarcation de petite taille munie d'un simple

treuil manuel. Quoique la zone des bouches de Bonifacio ne semble pas être une cible prioritaire pour le projet *Stella Mare*, le fait que l'université disposerait de ce matériel, est un avantage réel.

Cela le serait d'autant plus qu'il y a trois ans, une demande avait été faite officiellement par J.-C. Romano, auprès du service national d'observation national SOMLIT de l'INSU-CNRS, pour que les bouches de Bonifacio deviennent un point d'appui de ce service, malgré l'absence de bateau porteur et, à l'époque, d'instrumentation moderne. Bien des arguments venaient en appui de cette demande. Le premier était naturellement le fait que les bouches de Bonifacio auraient alors constituées le point le plus sud de ce réseau national, ce qui n'est pas sans importance dans le cadre des problèmes posés par le changement climatique. Et à cela il fallait ajouter la très faible pression anthropique sur le milieu marin, la somme considérable d'observations biologiques archivées depuis de nombreuses années, la présence permanente de chaînes de thermomètres enregistreurs installées et maintenues par l'équipe scientifique de la réserve internationale, et enfin, et ce n'est pas le moindre, l'importance accordée à ce détroit par la France et l'Italie, en ce qui concerne la gestion des risques. L'acceptation des bouches de Bonifacio comme point d'appui SOMLIT aurait également l'intérêt, outre de pérenniser un financement, de compléter nos connaissances sur cette zone. Il n'aura pas échappé au lecteur de ce travail l'absence de mesures directes de la biomasse, de la production des eaux, et des ressources trophiques dissoutes (sels nutritifs par exemple), toutes mesures obligatoires dans ce service d'observation. Ce n'était pas la cible prioritaire de cette thèse, mais il fallait souligner ce manque alors que la productivité des eaux est un élément fondamental, y compris pour les organismes benthiques.

La zone des bouches de Bonifacio est un site privilégié de par sa position et par la diversité et la richesse des biotopes marins qui font partie de son patrimoine naturel. Mais elle est soumise à de grands risques écologiques et sa gestion "durable" implique un effort constant pour en améliorer la connaissance. L'Office de l'Environnement de la Corse, et tous les personnels de la réserve y contribuent. Mais la contribution de scientifiques en est aussi une des conditions indispensables. Ce travail en constitue une contribution, qui nous l'espérons sera poursuivie.

Bibliographie

- [1] Abboud-Abi Saab, M., Romano, J.-C., Bensoussan, N., Fakhri, M., 2004. Suivi temporels comparés de la structure thermique d'eaux côtière libanaises (Batroun) et françaises (Marseille) entre juin 1999 et octobre 2002. *Comptes Rendus Geoscience* 336, 1379-1390.
- [2] Arbault, S., Boutin, N., 1986. Ichthyoplancton oeufs et larves de poissons téléostéens dans le golf de gascogne en 1964. *Ifremer*
- [3] Auclair, F., Marsaleix, P., Estournel, C., 2001. The penetration of the Northern Current over the Gulf of Lions (Mediterranean) as a downscaling problem. *Oceanologica Acta* 24, 529-544.
- [4] Barnabe, G., 1980. Exposé synoptique des données biologiques sur le loup ou le bar, *Dicentrarchus labrax* (Linné, 1758). Synopsis FAO sur les pêches 126, 1-70.
- [5] Bégout Anras, M.-L., Lagardère, J.-P., 1998. Variabilité météorologique et hydrologique. Conséquences sur l'activité natatoire d'un poisson marin. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie* 321, 641-648.
- [6] Bellan, G., Molinier, R., Picard, J., 1961. Distribution et particularités des peuplements benthiques de l'étage circalittoral des parages de Bonifacio (Corse). Rapport. p.v. réun. CIESMM 16 (2), 523-527.
- [7] Bensoussan, N., 2004. Choix des échelles de temps pertinentes et développements instrumentaux complémentaires pour une approche intégrée du fonctionnement de communautés littorales. *Sciences de l'Environnement Marin Université de la Méditerranée, Centre d'Océanologie de Marseille, Station Marine d'Endoume* 296.
- [8] Bensoussan, N., Romano, J. C., Harmelin, J. G., Garrabou, J., 2010. High resolution characterization of northwest Mediterranean coastal waters thermal regimes: To better understand reponse of benthic communities to climat change. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 87, 431-441.
- [9] Bethoux, J. P., Gentili, B., Raunet, J., Tailliez, D., 1990. Warming trend in the western Mediterranean deep-water. *Nature* 347, 660-662.

- [10] Bishai, H. M., 1960. The effect of water currents on the survival and distribution of fish larvae. *Journal of Conseil International pour l'Exploration de la Mer.* 25 (2), 134-146.
- [11] Blandin, P., 1986. Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. *Bulletin d'Ecologie* 17, 211-307.
- [12] Boudouresque, C. F., Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., Diviacco, G., Meinesz, A., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Ruitton, S., Tunesi, L., 2006. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. RAMOGE pub. 1-202.
- [13] Bowers, J. A., Morton, I. D., Mould, G. I., 2000. Directional statistics of the wind and waves. *Applied Ocean Research* 22, 13-30.
- [14] Brige, E.-A., 1897. Plankton studies on lake Mendota II. The crustacea from the plancton from July, 1894 to december 1896. *Trans. wisc. Academy Sciences Arts Letters* 11, 274-448.
- [15] Cerrano, C., Bavestrello, G., Bianchi, C.-N., Cattaneo-vietti, R., Bava, S., Morganti, C., Morri, C., Picco, P., Sara, G., Schiaparelli, S., Siccardi, A., 2000. A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (Northwestern Mediterranean) summer 1999. *Ecology Letters* 3, 284-293.
- [16] Cicin-Sain, B., Knecht, R., 1998. *Integrated Coastal and Ocean Management: Concepts and Practices*. Washington, D.C., Island Press.
- [17] Cohen, J. E., Small, C., Mellinger, A., Gallup, J., Sachs, J., 1997. Estimates of coastal populations. *Science* 278, 1211-1212.
- [18] Culioli, J. M., G., P., Peschet, P., Ugo, M., Desanti, O., 2003. Evaluation qualitative et quantitative des espèces cibles de poissons entre 10 et 20 m dans le périmètre du Parc Marin International (missions 2001, 2002 & 2003). Office de l'Environnement de la Corse-Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio, Parco Nazionale Arcipelago la Maddalena 35 p.
- [19] Drévilon, M., Bourdallé-Badie, R., Derval, C., Drillet, Y., Lellouche, J.-M., Rémy, E., Tranchant, B., Benkiran, M., Greiner, E., Guinehut, S., Verbrugge, N., Garric, G., Testut, C.-E., Laborie, M., Nouel, L., Bahurel, P., Bricaud, c., Crosnier, L., Dombrowsky, E., Durand, E., Ferry, N., Hernandez, F., Galloudec, O., Messal, F., Parent, L., 2008. The Godae/Mercator-ocean global ocean forecasting system:

results, applications and prospects. *Journal of Operational Oceanography* 1, 51-57(7).

[20] Dubost, M., Cornet, F., 1994. Etude portant sur le diagnostic et la synthèse des connaissances actuelles sur les Bouches de Bonifacio. ICALPE, Rapport intermédiaire: 1-29 + Ann.

[21] Estournel, C., de Madron, X. D., Marsaleix, P., Auclair, F., Julliand, C., Vehil, R., 2003. Observation and modeling of the winter coastal oceanic circulation in the Gulf of Lion under wind conditions influenced by the continental orography (FETCH experiment). *Journal of Geophysical Research-Oceans* 108,

[22] Estournel, C., Zervakis, V., Marsaleix, P., Papadopoulos, A., Auclair, F., Perivoliotis, L., Tragou, E., 2005. Dense water formation and cascading in the Gulf of Thermaikos (North Aegean), from observations and modelling. *Continental Shelf Research* 25, 2366-2386.

[23] Ferrat, L., Pergent-Martini, C., Cancemi, G., Mimault, B., 2002. Etude de l'anthropisation des herbiers à *Posidonia oceanica* dans le périmètre de la réserve naturelle des Bouches de Bonifacio. GIS (Centre Corse)

[24] Fisher, N. I., 1993. Statistical analysis of circular data. *Cambridge University Press*, Cambridge:

[25] Fonseca, M. S., Kenworthy, W. J., 1987. EFFECTS OF CURRENT ON PHOTOSYNTHESIS AND DISTRIBUTION OF SEAGRASSES. *Aquatic Botany* 27, 59-78.

[26] Gallagher, P. E., Thorarensen, H., Kiessling, A., Farrell, A. P., 2001. Effects of high intensity exercise training on cardiovascular function, oxygen uptake, internal oxygen transport and osmotic balance in chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) during critical speed swimming. *Journal of Experimental Biology* 204, 2861-2872.

[27] Gatti, J., Petrenko, A., Devenon, J. L., Leredde, Y., Ulses, C., 2006. The Rhone river dilution zone present in the northeastern shelf of the Gulf of Lion in December 2003. *Continental Shelf Research* 26, 1794-1805.

[28] Giorgetti, J. P., 2009. Les grands vents de Corse. *Stantari. Kyrnos Publications*, 17, 56-59.

[29] Gosselin, M., Bouquegneau, J.-M., Lefebvre, F., Lepoint, G., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Gobert, S., 2006. Trace metal concentrations in *Posidonia*

oceanica of North Corsica (northwestern Mediterranean Sea): use as a biological monitor? *BMC Ecol* 6, 12.

[30] Guéguen, J., Prouzet, P., 1994. Le saumon d'Atlantique. 332.

[31] Guizien, K., Brochier, T., Duchene, J. C., Koh, B. S., Marsaleix, P., 2006. Dispersal of *Owenia fusiformis* larvae by wind-driven currents: turbulence, swimming behaviour and mortality in a three-dimensional stochastic model. *Marine Ecology-Progress Series* 311, 47-66.

[32] Hecq, J.-H., 2003. Modélisation conceptuelle et numérique de l'écosystème planctonique océanique. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège* 2-3-4, 93-302.

[33] Hutchinson, G., 1957. A treatise on Limnology. *John Wiley and Sons*, 1,

[34] Ivanoff, A., 1972. Introduction à l'oceanographie, propriétés physiques et chimiques des eaux de la mer. De l'enseignement à la recherche océanographie. *Librairie Vuibert*, Paris: 1, 208.

[35] Ivanoff, A., 1975. Introduction à l'oceanographie propriétés physiques et chimiques des eaux de mer. De l'enseignement à la recherche océanographie. *Librairie Vuibert*, Paris: 2, 331.

[36] Jacobs, G. A., 1998. Sea surface height variations in the Yellow and east China Seas - 1. Linear response to local wind stress. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 103, 18459-18477.

[37] Koumoundouros, G., Ashton, C., Xenikoudakis, G., Giopanou, I., Georgakopoulou, E., Stickland, N., 2009. Ontogenetic differentiation of swimming performance in Gilthead seabream (*Sparus aurata*, Linnaeus 1758) during metamorphosis. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 370, 75-81.

[38] Lagardère, J. P., Bégout, M. L., Lafaye, J. Y., Villotte, J. P., 1994. Influence of wind-produced noise on orientation in the sole (*Solea solea*). *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences* 51, 1258-1264.

[39] Lamouroux, J., 2006. Erreur de prévision d'un modèle océanique barotrope du Golf de Gascogne en réponse aux incertitudes sur les forçages atmosphériques : caractérisation et utilisation dans un schéma d'assimilation de données à ordre réduit. *Laboratoire d'Etude en Géophysique et Océanographie Spatiales Phd, Université Toulouse III- Paul Sébastier*. 243.

[40] Le Direach, J. P., Francour, P., 1991. Inventaire des zones d'intérêt écologique, faunistique et floristique de Corse. *Gis Posidonie et DRAE CORSE* édit 1-401.

- [41] Leavy, T. R., Bonner, T. H., 2009. Relationships among Swimming Ability, Current Velocity Association, and Morphology for Freshwater Lotic Fishes. *North American Journal of Fisheries Management* 29, 72-83.
- [42] Leblond, A., Orvig, S., 1982. Une définition plus appropriée de la thermocline lacustre saisonnière. *Atmosphère océan* 20 (4), 317-326.
- [43] Leis, J. M., Carson-Ewart, B. M., 1997. In situ swimming speeds of the late pelagic larvae of some Indo-Pacific coral-reef fishes. *Marine Ecology-Progress Series* 159, 165-174.
- [44] Leredde, Y., Denamiel, C., Brambilla, E., Lauer-Leredde, C., Bouchette, F., Marsaleix, P., 2007. Hydrodynamics in the Gulf of Aigues-Mortes, NW Mediterranean Sea: In situ and modelling data. *Continental Shelf Research* 27, 2389-2406.
- [45] Millot, C., 1987. Circulation in the Western Mediterranean-Sea. *Oceanologica Acta* 10, 143-149.
- [46] Millot, C., 1989. La circulation générale en Méditerranée occidentale: Aperçu de nos connaissances et projets d'études. *Annales de Géographie* 98, 497-515.
- [47] Millot, C., 1990. The Gulf of Lions'hydrodynamics. *Continental Shelf Research* 10, 885-894.
- [48] Millot, C., 1999. Circulation in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems* 20, 423-442.
- [49] Miniconi, R., 1994. Etude concernant le cadre réglementaire de la pêche professionnelle et de la pêche de loisir sur le territoire du futur Parc National marin de la Corse.
- [50] Nelson, J. A., Gotwalt, P. S., Reidy, S. P., Webber, D. M., 2002. Beyond U-crit: matching swimming performance tests to the physiological ecology of the animal, including a new fish 'drag strip'. *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular and Integrative Physiology* 133, 289-302.
- [51] Néraudeau, D., Borghi, E., Roman, J., 1998. Le genre d'échinide *Spatangus* dans les localités du Pliocène et du Pléistocène d'Emilie (Italie du Nord). *Annales de Paléontologie* 84, 243-264.
- [52] Office de l'Environnement de la Corse, 2007. Plan de gestion de la Reserve naturelle des Bouches de Bonifacio, 2007-2011. *Office de l'Environnement de la Corse, Département Espaces Naturels et Protégés*, 157 p + Annexes.
- [53] Ovchinnikov, I. M., 1966. Circulation in the Surface and Intermediate Water in the Algerian Basin,. *Journal of Geophysical Research* 6, 48-59.

- [54] Ovchinnikov, I. M., 1974. On the water balance of the Mediterranean sea. *Oceanology* 14(2), 198-202.
- [55] PAM/Plan Bleu., 2005. Les perspectives du Plan Bleu sur l'environnement et le développement. 1-432.
- [56] Pelaprat, C., Lejeune, P., 2004. Bonifacio -Complémentaire d'étude à l'étude d'impact réalisée sur le milieu marin en vue de l'installation d'un nouvel émissaire avec rejet en mer - Rapport d'étude d'impact Mairie de Bonifacio/STARESO. 52 pages + Fiches et Annexes.
- [57] Peres, J. M., Laborde, P., Romano, J. C., Desouzalima, Y., 1986. A Noctiluca-Scintillans red tide on the coast of provence in june 1984 - A dynamic interpretation *Annales De L Institut Oceanographique* 62, 85-116.
- [58] Pérès, J. M., Picard, J., 1964. Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée. 31 (47),1-137.
- [59] Perez, T., Garrabou, J., Sartoretto, S., Harmelin, J. G., Francour, P., Vacelet, J., 2000. Mass mortality of marine invertebrates: an unprecedented event in the Northwestern Mediterranean. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Iii-Sciences De La Vie-Life Sciences* 323, 853-865.
- [60] Pergent-Martini, C., Capiomont, A., Pasqualini, V., Pergent, G., 1997. Etude des peuplements littoraux de Corse du Sud. Office de l'Environnement de la Corse, Université de Corse: Eq.E.L. 59.
- [61] Pergent-Martini, C., Pasqualini, V., Ferrat, L., Pergent, G., 2006. Ecological data in integrated coastal zone management: Case study of *Posidonia oceanica* meadows along the Corsican coastline (Mediterranean sea). *Environmental Management* 38, 889-895.
- [62] Pergent, G., Pasqualini, V., Pergent-Martini, C., Chessa, L., Cossu, A., Gazale, V., 1995. Aménagement du littoral: apport de la cartographie benthique. *Research Mediterranea* 2, 48-58.
- [63] Petragallo, S., Mimault, B., Pasqualini, V., Pergent-Martini, C., Pergent, G., 2004. Etat de référence des principaux peuplements et types de fond du parc Marin International des Bouches de Bonifacio. Convention de recherche Seagrass 2000 & O.E.C. 1-54 + Annexes.
- [64] Petrenko, A., 2003. Variability of circulation features in the Gulf of Lion NW Mediterranean Sea. Importance of inertial currents. *Oceanologica Acta* 26, 323-338.

- [65] Petrenko, A., Leredde, Y., Marsaleix, P., 2005. Circulation in a stratified and wind-forced Gulf of Lions, NW Mediterranean Sea: in situ and modeling data. *Continental Shelf Research* 25, 7-27.
- [66] Pluquet, F., 2006. Evolution récente et sédimentation des plates-formes continentales de la Corse. *Sciences de la Terre et de l'Univers Université de Corse - Pascal Paoli*: 300.
- [67] Romano, J. C., Bensoussan, N., Younes, W. A. N., Arlhac, D., 2000. Thermal anomaly in the waters of the Gulf of Marseilles during summer 1999. A partial explanation of the mortality of certain fixed invertebrates? *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Iii-Sciences De La Vie-Life Sciences* 323, 415-427.
- [68] Romano, J. C., Lugrezi, M. C., 2007. Série du marégraphe de Marseille: mesures de températures de la surface de la mer de 1885 à 1967. *Comptes Rendus Geoscience* 339, 57-64.
- [69] Salas, F., Marcos, C., Neto, J. M., Patricio, J., Perez-Ruzafa, A., Marques, J. C., 2006. User-friendly guide for using benthic ecological indicators in coastal and marine quality assessment. *Ocean & Coastal Management* 49, 308-331.
- [70] Sepulveda, C., Dickson, K. A., 2000. Maximum sustainable speeds and cost of swimming in juvenile kawakawa tuna (*Euthynnus affinis*) and chub mackerel (*Scomber japonicus*). *Journal of Experimental Biology* 203, 3089-3101.
- [71] Small, C., Nicholls, R. J., 2003. A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research* 19, 584-599.
- [72] Smith, S. V., 1981. Marine Macrophytes as a Global carbon Sink. *Science* 211, 838-840.
- [73] Ulses, C., 2005. Dynamique océanique et transport de la matière particulaire dans le Golfe du Lion : Crue, tempête et période hivernale. *Laboratoire d'Aérodologie Université Paul Sébastien*: 249.
- [74] Ulses, C., Grenz, C., Marsaleix, P., Schaaff, E., Estournel, C., Meule, S., Pinazo, C., 2005. Circulation in a semi-enclosed bay under influence of strong freshwater input. *Journal of Marine Systems* 56, 113-132.
- [75] UNESCO, 2001. Des outils et des Hommes pour une Gestion Intégrée des zones côtières, Guide méthodologique, manuels et guides de la Commission Océanographique Intergouvernementale. Guide méthodologique, manuels et guides de la Commission Océanographique Intergouvernementale. IFREMER 1-65.

- [76] Vagner, M., Lefrancois, C., Ferrari, R. S., Satta, A., Domenici, P., 2008. The effect of acute hypoxia on swimming stamina at optimal swimming speed in flathead grey mullet *Mugil cephalus*. *Marine Biology* 155, 183-190.
- [77] Vela, A., Pasqualini, V., Pergent-Martini, C., Leoni, V., Pergent, G., Borges, M., Mimault, B., Ferrat, L., 2002. Etat de référence des principales espèces patrimoniales du Parc Marin International des Bouches de Bonifacio. Contact GIS Posidonie & O.E.C. No.0102., :62p.
- [78] Ver, L. M. B., Mackenzie, F. T., Lerman, A., 1999. Carbon cycle in the coastal zone: effects of global perturbations and change in the past three centuries. *Chemical Geology* 159, 283-304.
- [79] Wedderburn, E.-M., 1907. the temperature of fresh water lochs of Scotland, with special reference to loch ness. *Trans. R. Soc. Edinb* 45, 407-489.
- [80] Wollast, R., 1991. The coastal organic carbon cycle: fluxes, sources and sinks. In: R.F.C. Mantoura, J.M. Martin and R. Wollast, Editors, *Ocean margin processes in global change*, John Wiley & Sons, Chichester. 365-382.

Table des Figures et Tableaux

Figure I.1: Localisation de la zone d'étude. A : positionnement de la Corse et de la Sardaigne dans le cadre Méditerranéen, B: situation du secteur de part et d'autre des bouches de Bonifacio, C: présentation de la zone et cadre géologique (Pluquet, 2006 [66]).....	10
Figure I.2: Données de vent issues du sémaphore de Pertusato entre 1981 et 1990. Rose des vents, tableau récapitulatif en pourcentage des directions et intensités des vents. . Source MétéoFrance <i>Le climat de la France (2000)</i>	13
Figure I.3: Morphologie des plates formes occidentale et orientale des Bouches de Bonifacio (ombrage couleur du Modèle. Numérique. de Terrain au pas de 50 m) et isobathes 50 mètres. (Pluquet, 2006).	15
Figure I.4: Carte de la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio, emplacement des zone de protection (office de l'environnement de la Corse, 2007).....	16
Figure I.5: Carte des formations superficielles du détroit des Bouches de Bonifacio (Pluquet, 2006).....	17
Figure I.6: Exemple de carte horizontale des courants; session effectuée durant CYRCE 5, le 29 novembre 2005 de 6h42 à 20h11.	20
Figure I.7: Carte des emplacements des stations hydrologiques effectuées durant les missions CYRCE.....	20
Figure I.8 : Formule de calcul du pourcentage de saturation en oxygène dissous (Weiss, 1970), source : Wikipédia (http://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen_saturation). ..	22
Figure I.9 : Schéma de positionnement de l'ADCP mouillé.....	24
Figure II.1 : Circulation des eaux de surface en Méditerranée. D'après Lacombe et Tchernaia, 1972.	31
Figure II.2 : Carte effectuée durant les missions Bocca, du 10/10/2000 au 11/10/2000. Vent orienté ouest, compris entre 3 et 25 nd (1.54 et 12.85 m.s^{-1}). Le flux est orienté sud et sud-est, et présent des vitesses comprises entre 12 cm.s^{-1} et 30 cm.s^{-1} . Le flux est assez homogène en direction sur cette carte.....	33
Figure II.3 : Carte effectuée durant les missions Bocca, du 01/07/1999 au 03/07/1999. Vent d'ouest en début d'enregistrement et vent nord-est en fin d'enregistrement, compris entre 1 et 15 nd (0.514 et 7.71 cm.s^{-1}). Cette carte permet d'avoir une bonne vision de l'ensemble des Bouches de Bonifacio, puisqu'elle couvre l'entièreté du golf. Un courant orienté sud (sur la côte est) est présent avec de fortes intensités au alentour de 38 cm.s^{-1} et présente une direction générale du flux majoritaire orienté sud-sud-ouest.....	33
Figure II.4: Carte effectuée durant les missions Bocca, du 05/07/1999 au 09/07/1999. Vent fort orienté nord-est. Cette carte présente un fort courant orienté ouest-est dans	

le passage le plus resserré du détroit atteignant environ $45 \text{ à } 50 \text{ cm.s}^{-1}$. Côté ouest le profil ne permet pas de dégager une tendance particulière. Côté est, le courant violent traversant le milieu du détroit ne permet pas d'identifier un autre courant..... 34

Figure II.5 : Carte effectuée durant les missions GeoCorse, du 09/05/2003 au 10/05/2003. Configuration en vent d'ouest, compris entre 4 et 29 nd (2 et 14 m.s^{-1}). En majorité, les courants présents sur cette carte sont de faibles intensités comparées aux cartes précédentes (10 cm.s^{-1}). Les courants sont plus homogènes en direction et en intensité. C'est au milieu du détroit qu'apparaît la plus forte intensité (35 cm.s^{-1}). 34

Figure II.6 : Carte effectuée durant les missions GeoCorse, du 05/05/2003 au 06/05/2003. Condition de vent d'ouest, compris entre 10 et 46 nd (5 et 23 m.s^{-1}) considérés comme vent violent. De fortes intensités sont présentes du côté ouest (30 cm.s^{-1}), avec présence de zone de cisaillement..... 35

Figure II.7 : Carte effectuée durant les missions Geodys, du 06/09/2002 au 08/09/2002. Condition de vent d'ouest, compris entre 6 et 35 nd (3 et 17 m.s^{-1}). Sur les deux traits de profil parallèle, entre eux du côté ouest, nous constatons une direction opposée entre les deux passages, montrant une forte variabilité du système du côté ouest. L'un, près de la côte avec un courant d'intensité de 6 cm.s^{-1} orienté nord-est et l'autre d'intensité de 33 cm.s^{-1} orienté ouest-nord-ouest. Au milieu du détroit, les courants sont forts 30 cm.s^{-1} , mais ils ne sont pas orientés dans une direction particulière, alors que du côté est ils sont orientés sud-est avec une intensité de 35 cm.s^{-1} 35

Figure II.8 : Carte effectuée durant les missions Mytilos, du 03/07/2005 au 04/07/2005. Situation de vent d'ouest, sud-ouest, compris entre 3 et 18 nd (1 et 9 m.s^{-1}), vent « relativement » faible par rapport aux autres missions. Du côté ouest, le courant est fort (43 cm.s^{-1}), le courant au milieu du détroit passe d'ouest en est d'après le petit bout de transect effectué sur cette zone et semble rencontré du côté est un courant orienté sud..... 36

Figure II.9 : Carte effectuée durant les missions ViveBB, du 02/05/2004 au 03/05/2004. Situation de vent nord-est, compris entre 5 et 24 nd (2 et 12 m.s^{-1}). Du côté ouest le courant est de faible intensité (6.6 cm.s^{-1}), mais présente tout de même une certaine variabilité. Le flux est orienté d'ouest en est au milieu du détroit sans intensifier sa vitesse. Puis il augmente en vitesse (30 cm.s^{-1}) à la sortie de la partie la plus resserrée orientée est..... 36

Figure II.10 : Carte effectuée durant les missions GeoBrest, le 21/05/2000. Situation de vent nord-est à sud, compris entre 1 et 23 nd (1 et 11 m.s^{-1} , moyenne de 8 nd ou 4 m.s^{-1}) considérés comme situation de vent faible. Présence d'un courant violent (48 cm.s^{-1}) orienté sud du côté est des Bouches de Bonifacio..... 37

Figure II.11 : Carte effectuée durant les missions GeoBrest, du 23/05/2000 au 24/05/2000. Situation de vent d'ouest, de vitesse moyenne de 11 nd ou 6 m.s^{-1}). Le courant montre une plus forte variabilité du côté est (orientation du flux variable et présence de zone de cisaillement) que du côté est. 37

Figure II.12: Représentation des fréquences de direction d'après les données courantologiques enregistrées par le courantomètre positionné à la sortie du goulet de Bonifacio sur la période du 3 septembre au 28 octobre 2003 à 6 m de profondeur sur un fond de 41 m. (Pelaprat and Lejeune, 2004 [56]).	40
Figure II.13 : Carte des températures, issues du satellite Sea WIFF, le 11/08/2004 (heure inconnue)	41
Figure II.14: Histogramme des directions de vent durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé	43
Figure II.15 : Histogramme des directions de courant de surface durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé	43
Figure II.16 : Histogramme des intensités de vent durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé	43
Figure II.17: Histogramme des vitesses de courant de surface durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé	43
Figure II.18 : Moyenne d'intensité de courant en cm.s^{-1} pour chaque niveau de profondeur de C30 à C1, mesure de l'ADCP fixe	46
Figure II.19 : Régression linéaire de la vitesse du courant en fonction de la profondeur	46
Figure II.20 : Intensité du courant de l'ADCP mouillé	47
Figure II.21 : Moyenne d'intensité de courant en cm.s^{-1} du côté est de Bonifacio sur 13 bins, données issues de l'ADCP embarqué du Téthys II	48
Figure II.22 : Moyenne d'intensité du courant sur la profondeur, aux îles Lavezzi, donnée issue de l'ADCP embarqué du Téthys II	48
Figure II.23 : Directions des courants en degrés sur toute la profondeur pendant la période d'enregistrement de l'ADCP mouillé	50
Figure II.24 : Direction du courant, Écart type (std) des directions de courant intégré sur la profondeur, entre 550 et 900 heures d'enregistrement de l'ADCP mouillé	51
Figure II.25 : Direction des courants en profondeur aux îles Lavezzi (correspondant aux données intensité de la Figure II.22)	55
Figure II.26 : Direction des courants en profondeur du côté est de Bonifacio (correspondant aux données intensité de la Figure II.23)	55
Figure II.27 : Diminution de la variabilité des directions de courant en fonction de l'intensité du courant pour l'ADCP fixe en surface	57
Figure II.28: Diminution de la variabilité des directions de courant en fonction de l'intensité du courant pour l'ADCP fixe en profondeur	57

Figure II.29: Diminution de la variabilité des directions de courant en fonction de l'intensité du courant pour un fichier de CYRCE 4 (juillet) au bin 3.....	59
Figure II.30: Graphique dispersion des directions de vent en fonction de l'intensité du vent	60
Figure II.31: Graphique dispersion des directions en fonction de l'intensité pour le vent Pertusato et pour le courant de surface enregistré par l'ADCP mouillé. Dispersion des directions correspond aux écarts-types de direction en degrés, les intensités de courant sont en cm.s^{-1} et les intensités de vent sont m.s^{-1}	61
Figure II.32: Courants enregistrés durant CYRCE 4, du 21/07/2005 à 23h00 au 23/07/2005 à 14h17.	63
Figure II.33 : Intensité du vent et du courant durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé du 24/11/04 à 09h50 au 07/01/05 à 09h50.	64
Figure II.34 : Direction du vent et du courant durant l'enregistrement de l'ADCP mouillé 24/11/04 à 09h50 au 07/01/05 à 09h50.	64
Figure II.35: Zoom sur un cas de vent faible enregistré par l'ADCP mouillé de 675 h à 700 h d'enregistrement	65
Figure II.36: Zoom sur un cas de vent faible enregistré par l'ADCP mouillé de 460 h à 495 h d'enregistrement	66
Figure II.37: Zoom sur un cas de vent faible enregistré par l'ADCP mouillé de 890 h à 940 h d'enregistrement	66
Figure II.38 : Intensité du vent et du courant enregistré par l'ADCP mouillé, zoom en partie isolé par les pointillés ; A : cas de courant bien établi et B : cas de courant en période d'accélération	67
Figure II.39: Accélération du vent sans réponse de courant	68
Figure II.40 : Coefficient de corrélation entre les vitesses et les directions de vent et de courant, pour des vents inférieurs et supérieurs à 7 m.s^{-1}	70
Figure II.41 : Valeurs centrées réduites de la vitesse du vent, du courant de surface et du courant de fond pour l'ensemble de la durée d'enregistrement de l'ADCP mouillé aux Lavezzi.....	71
Figure II.42 : Intensité du vent, courant de surface et courant de fond en direction binaire durant la durée d'enregistrement de l'ADCP mouillé. Cas numéro 1 et 2.	72
Figure II.43 : Valeurs centrées réduites de la vitesse du vent, du courant de surface et du courant de fond, cas 1 et 2.....	73
Figure II.44 : Variabilité du courant (-14 m) sur une petite échelle d'espace et de temps durant CYRCE 1 et zoom sur le point B. La distance entre aller et retour A et B est approximativement de 3.5 miles nautique et parcouru en une demi-heure.....	76

- Figure II.45 : Distribution de la variabilité des directions de courant (degrés) en fonction de la moyenne de l'intensité du courant (cm.s^{-1}). 77
- Figure II.46 : Intensité et direction du vent durant CYRCE4, données issues du sémaphore de Pertusato ; étude de cas 1 isolé par des pointillés entre la 30 ème et la 80 ème heure d'enregistrement durant laquelle le vent est orienté ouest et supérieur à 6 m.s^{-1} ; étude de cas 2 isolé par des pointillés entre la 120 ème et la 150 ème heure d'enregistrement durant laquelle le vent est orienté est et supérieur à 4 m.s^{-1} . 79
- Figure II.47: Carte des courants enregistrés (sélectionnés toutes les trois minutes) le long du parcours du bateau durant CYRCE 4 du 21/07/2005 à 23h00 au 23/07/2005 à 14h17. Conditions de vent fort $> 6 \text{ m.s}^{-1}$, orienté ouest. Bin 3 = -16m 80
- Figure II.48 : Carte (zoomé) des courants enregistrés (sélectionnés toutes les trois minutes) le long du parcours du bateau durant CYRCE 4 du 24/07/2005 au 25/07/2005. Conditions de vent supérieur à 4 m.s^{-1} , orienté est. Bin 3= -16 m..... 81
- Figure II.49 : Intensité moyenne du courant en cm.s^{-1} effectuée sur 12 points (12 minutes), coté est de Bonifacio en situation de vent Libeccio. 82
- Figure II.50 : Intensité moyenne du courant en cm.s^{-1} effectuée sur 12 points (12 minutes), coté est de Bonifacio en situation de vent Gregale 83
- Figure II.51 : Carte des courants enregistrés (sélectionnés toutes les trois minutes) le long du parcours du bateau durant CYRCE 4 du 21/07/2005 à 23h00 au 23/07/2005 à 14h17. Conditions de vent fort $> 6 \text{ m.s}^{-1}$, orienté ouest. Bin 3 = -16m. Zoom effectué sur l'est des Bouches de Bonifacio, l'échelle des vecteurs est divisée par deux pour permettre une meilleure visibilité. 89
- Figure II.52 : Carte (zoomé) des courants enregistrés (sélectionnés toutes les trois minutes) le long du parcours du bateau durant CYRCE 4 du 24/07/2005 au 25/07/2005. Conditions de vent supérieur à 4 m.s^{-1} , orienté est. Bin 3= -16 m. Zoom effectué sur l'est des Bouches de Bonifacio..... 89
- Figure II.53 : Cartes de courant du 21/07/2005, à gauche -10m, à droite -40m, condition : mer agitée 91
- Figure II.54 : Carte de courant du 11/03/2005 de la mission CYRCE 2, condition de mer belle 92
- Figure II.55 : Carte des vents moyens de la journée du 10 12 2006. Le vent est matérialisé par des vecteurs, l'orientation des vecteurs indique la direction du vent. L'intensité du vent est matérialisée par un dégradé de couleur : bleu pour le vent de faible intensité et rouge pour le vent de forte intensité. 97
- Figure II.56 : Carte des courants moyens en surface du 10/12/02006. Le courant est matérialisé par des vecteurs, l'orientation des vecteurs indique la direction des courants. L'intensité des courants est matérialisée par un dégradé de couleur : bleu pour les courants de faible intensité et rouge pour les courants de forte intensité. ... 97
- Figure II.57 : Vent moyen du 10/10/2006. Le vent est matérialisé par des vecteurs, l'orientation des vecteurs indique la direction du vent. L'intensité du vent est

matérialisée par un dégradé de couleur : bleu pour le vent de faible intensité et rouge pour le vent de forte intensité..... 99

Figure II.58 : Carte des courants moyens pour la journée du 10/10/2006. Le courant est matérialisé par des vecteurs, l'orientation des vecteurs indique la direction des courants. L'intensité des courants est matérialisée par un dégradé de couleur : bleu pour les courants de faible intensité et rouge pour les courants de forte intensité. ... 99

Figure II.59 : Comparaison des courants entre une carte CYRCE (gauche) et une carte Symphonie (droite)..... 100

Figure III.1: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 1 (août), numéro de profil 1 110

Figure III.2: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 4 (juillet), numéro de profil 123 110

Figure III.3: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 6 (septembre), numéro de profil 178..... 111

Figure III.4: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 2 (mars), numéro de profil 70 112

Figure III.5: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 3 (avril), numéro de profil 100..... 112

Figure III.6: Profils de température et de salinité effectués à la Station 1 durant CYRCE 5 (novembre), numéro de profil 161..... 112

Figure III.7 : Profils d'oxygène dissous et de Pourcentage de saturation effectués à la Station 1 durant CYRCE 1 (août), numéro de profil 1 116

Figure III.8 : Profils d'oxygène dissous et de pourcentage de saturation effectués à la Station 1 durant CYRCE 6 (septembre), numéro de profil 178 116

Figure III.9: Profils d'oxygène dissous et de Pourcentage de saturation effectués à la Station 1 durant CYRCE 2 (mars), numéro de profil 70 118

Figure III.10 : Profils d'oxygène dissous et de Pourcentage de saturation effectués à la Station 1 durant CYRCE 3 (avril), numéro de profil 100..... 118

Figure III.11 : Profils d'oxygène dissous et de Pourcentage de saturation effectués à la Station 1 durant CYRCE 5 (novembre), numéro de profil : 161..... 119

Figure III.12: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 1 (août), numéro de profil : 1 120

Figure III.13: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 4 (juillet), numéro de profil : 123 121

Figure III.14: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 6 (septembre), numéro de profil : 178 121

Figure III.15: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 2, numéro de profil : 70.....	122
Figure III.16: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 3, numéro de profil : 100.....	122
Figure III.17: Profils de fluorescence et de transmission effectués à la Station 1 durant CYRCE 5, numéro de profil : 161.....	123
Figure III.18: Cercle des corrélations de l'ACP effectuée sur les profils de CYRCE 3. Chaque profil est résumé par sa moyenne.	133
Figure III.19: Projection des individus du facteur 1 et 2, ACP sur les profils de CYRCE 3.....	133
Figure III.20: Carte de localisation des stations, les stations entourées par un cercle correspondent aux stations ouest considérées comme proche de la côte.	134
Figure III.21: Fluorescence et transmission du profil 89, station 5, Cyrce 3 (avril 2005)	137
Figure III.22: ACP CYRCE 4 côté ouest, facteur 1 = 56.66% avec comme variables les plus constitutives : profondeur, fluorescence et température, salinité, lumière incidente (en négatif sur le facteur 1), et facteur 2= 19.81% avec comme variables les plus constitutives : profondeur, température, fluorescence, salinité et lumière incidente (en négatif sur le facteur 1).	141
Figure III.23 : ACP CYRCE 4 côté est, facteur 1 = 61.06% avec comme variables les plus constitutives : température, salinité, lumière incidente et profondeur, fluorescence (en négatif sur le facteur 1), et facteur 2= 17.26% avec comme variables les plus constitutives : fluorescence, salinité et lumière incidente.....	142
Figure III.24: Répartition de la fluorescence sur les bouches de Bonifacio durant CYRCE 4, les valeurs de fluorescence sont intégrées sur tranche de -2 m à -10 m.	143
Figure III.25 : Répartition de la fluorescence sur les bouches de Bonifacio durant CYRCE 4, les valeurs de fluorescence sont intégrées sur la tranche de -10 m à -20 m.....	143
Figure III.26: Répartition de la fluorescence sur les bouches de Bonifacio durant CYRCE 4, les valeurs de fluorescence sont intégrées sur la tranche de -20 m à -30 m.....	144
Figure III.27 : Répartition de la fluorescence sur les bouches de Bonifacio durant CYRCE 4, les valeurs de fluorescence sont intégrées sur la tranche de -30 m à -40 m.....	144
Figure III.28: Répartition de la fluorescence sur les bouches de Bonifacio durant CYRCE 4, les valeurs de fluorescence sont moyennées dans la tranche de -40 m à -50 m.....	145

Figure III.29: Température (en °C) au cours du temps (heures) enregistrée sur la semaine du 01/05/2004 au 07/05/2004 à -11m de profondeur, donnée issue de l'équipe scientifique de la réserve des bouches de Bonifacio -Office de l'environnement de la Corse-	148
Figure III.30: Température (en °C) au cours du temps (heures) enregistrée sur la semaine du 15/08/2003 au 22/08/2003 à -11m de profondeur, donnée issue de l'équipe scientifique de la réserve des bouches de Bonifacio -Office de l'environnement de la Corse-	148
Figure III.31: Température moyenne (de -2 m à -10 m) des profils effectués durant CYRCE 2 au cours du temps. ($Y=-0.0075x + 12.459$; $R^2=0.0357$).....	149
Figure III.32: Cercle des corrélations de l'ACP effectuée sur CYRCE 2 (mars 2005)	153
Figure III.33: Projection des individus de l'ACP CYRCE 2 (mars 2005).....	153
Figure III.34: Localisation des stations présentent dans les zones de cantonnement	160
Figure III.35: Cercle des corrélations de l'ACP effectuée sur les moyennes des profils de CYRCE 2.....	161
Figure III.36: Projection des individus de l'ACP effectuée sur les moyennes des profils de CYRCE 2	162
Figure III.37: Zoom du groupe ouest de l'ACP CYRCE 2.....	163
Figure III.38: Projection des individus sur les facteurs 1 et 2 de l'ACP sur CYRCE 1 (mission d'été, août), individus résumés par une moyenne de variable de -30 m au fond. n=23.	164
Figure IV.1: Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée le 20/10/2006 à 16h00. La bouée de fond est lâchée à -3m de profondeur. Condition de vent issue du cap Pertusato le 20/10/2006 à 16h00 : vitesse= $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, direction= 90° . Orientation ouest majoritairement maintenue durant 3 jours, pour un vent plus faible. Puis changement successif entre vents d'est et d'ouest.	187
Figure IV.2 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée le 20/10/2006 à 16h00. La bouée de fond est lâchée à -35m de profondeur. Condition de vent issue du cap Pertusato le 20/10/2006 à 16h00 : vitesse= $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, direction= 90° . Orientation ouest majoritairement maintenue durant 3 jours, pour un vent plus faible. Puis changement successif entre vents d'est et d'ouest.	187
Figure IV.3 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 20/10/2006, en surface	188
Figure IV.4: Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 20/10/2006, en profondeur.....	188

Figure IV.5 : Simulation de lancement de bouée (lâchée à -3m de profondeur) représentant des individus passifs. Bouée lancée le 10/10/2006 à 08h00. La bouée de surface est. Condition de vent issue du cap Pertusato le 10/10/2006 à 08h00 : vitesse= 1.4 m.s ⁻¹ , direction= 90°. Changement de direction sur 8 heures : vent d'ouest faible (vitesse moyenne= 3.18). Puis vent fort avec orientation majoritairement est/nord-est durant 9 jours.....	190
Figure IV.6 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée le 10/10/2006 à 08h00. La bouée de fond est lâchée à -35m de profondeur. Condition de vent issue du Cap Pertusato le 10/10/2006 à 08h00 : vitesse= 1.4 m.s ⁻¹ , direction= 90°. Changement de direction sur 8 heures : vent d'ouest faible (vitesse moyenne= 3.18). Puis vent fort avec orientation majoritairement est/nord-est durant 9 jours.....	190
Figure IV.7: Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 10/10/2006, en surface	191
Figure IV.8: Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 10/10/2006, en profondeur.....	191
Figure IV.9 : Simulation d'individus passifs lancés le 12/09/2006 de 03h00 à 10h00, à -10 m. Simulation effectuée durant cinq jours. Condition de vent enregistrée au cap Pertusato le 12/09/2006 de 03h00 à 10h00 : vent nord-est, vitesse moyenne = 4.8 m.s-1. Condition d'orientation maintenue durant ≈2.5 jours, puis changement d'orientation avec un vent d'ouest.....	193
Figure IV.10 : Simulation d'individus passifs lancés le 12/09/2006 de 03h00 à 10h00, à -35 m, Simulation effectuée durant cinq jours. Condition de vent enregistrée au cap Pertusato le 12/09/2006 de 03h00 à 10h00 : vent nord-est, vitesse moyenne = 4.8 m.s-1. Condition d'orientation maintenue durant ≈2.5 jours, puis changement d'orientation avec un vent d'ouest.....	194
Figure IV.11: Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 12/09/2006, en surface	195
Figure IV.12: Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 12/09/2006, en profondeur.....	196
Figure IV.13: Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée durant CYRCE 6, le 16/09/2006 à 14h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -10m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -30 m. Condition de vent issue du cap Pertusato : vent fort (>3m.s ⁻¹), orienté nord-est, condition maintenue durant 48 heures.....	198
Figure IV.14: Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée durant CYRCE 7, le 10/12/2006 à 18h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -10m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -30 m. Condition de vent issue du Cap Pertusato : vent faible (<3m.s ⁻¹), orienté ouest, maintenu durant 24h00.	198
Figure IV.15 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 10/12/2006, en surface	199

- Figure IV.16 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 10/12/2006, en profondeur..... 199
- Figure IV.17 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée durant CYRCE 7, le 07/12/2006 à 16h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -10m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -30 m. Condition de vent issue du Cap Pertusato : vent faible ($<3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), orienté nord-est, condition maintenue pendant 24 heures, puis changement rapide de direction avec orientation ouest et vent violent ($>8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). 200
- Figure IV.18 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 07/12/2006, en surface 200
- Figure IV.19 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 07/12/2006, en profondeur..... 201
- Figure IV.20 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée durant CYRCE 7, le 05/12/2006 à 00h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -10m de profondeur et reste dans la zone de simulation 7.27 jours, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -30 m reste dans la zone de simulation 10 jours. Condition de vent issue du cap Pertusato : fort ($12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), orienté ouest (290°), condition maintenue durant 1 jour. Puis changement successif entre les deux vents dominants durant 3-4 jours avec une dominance de vent d'ouest. Les cinq derniers jours de présence de la bouée dans la zone de simulation, vent majoritairement orienté nord-est avec vitesses variables. 202
- Figure IV.21 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 05/12/2006, en surface 203
- Figure IV.22 : Carte des courants moyens simulés par Symphonie le 05/12/2006, en profondeur..... 203
- Figure IV.23 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée durant CYRCE 7, le 10/12/2006 à 18h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -10m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -30 m. Les deux bouées ne restent pas plus de trois jours dans la zone de simulation. Condition de vent issue du cap Pertusato le 10/12/2006: fort ($>3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), orienté ouest. Condition maintenue durant 1 jour, puis changement de direction en nord-est, vent faible. 204
- Figure IV.24: Cas n°4. Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée le 20/10/2006 à 16h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -3m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -35 m. Condition de vent issue du cap Pertusato le 20/10/2006 à 16h00 : vitesse= $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, direction= 90° . Orientation ouest majoritairement maintenue du rant 3 jours, pour un vent plus faible. Puis changement successif entre vents d'est et d'ouest. Temps compris dans la zone pour la bouée de surface= 10.33 jours, pour la bouée de fond=11.78 jours. 207
- Figure IV.25 : Simulation de lancement de bouée représentant des individus passifs. Bouée lancée le 10/10/2006 à 16h00. La bouée de surface, tracé bleu est lâchée à -

3m de profondeur, la bouée de profondeur, tracé rouge, à -35 m. Condition de vent issue du cap Pertusato le 10/10/2006 à 16h00 : vent faible, vitesse= 2.6 m.s^{-1} , orienté ouest, direction= 300° . Cette direction ne s'est maintenue qu'une heure. Changement direction de vent en Nord-est maintenu durant 9 jours avec vitesse variable. Temps compris dans la zone pour la bouée de surface= 14.69 jours, pour la bouée de fond=16.21 jours. 209

Figure IV.26: Utilisation du module traceur de Symphonie. Simulation lancée du 23/11/2006 au 15/12/2006 avec deux sources à - 20 m de profondeur. La première aux îlots Moines, source lancée le 23/11/2006 au 24/11/2006, la second aux îles Lavezzi du 12/12/2006. Conditions de vent durant le mois enregistrées au sémaphore de Pertusato 216

Figure IV.27: Vitesse et direction du vent enregistrée par le sémaphore de Pertusato du 24 novembre 2006 au 12 décembre 2006. 217

Figure A.IV.28: Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 1. 265

Figure A.IV.29 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 2. 266

Figure A.IV.30 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 3. 266

Figure A.IV.31: Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 4. 267

Figure A.IV.32 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 5. 267

Figure A.IV.33 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 6. 268

Figure A.IV.34 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 7. 268

Figure A.IV.35 : Résultat de l'analyse de Kruskal-Wallis sur les vitesses de vent des missions CYRCE..... 269

Figure A.IV.36 : Résultat de l'analyse de Kruskal-Wallis sur les directions de vent des missions CYRCE..... 269

Figure A.IV.37 : Résultat de l'analyse de Kruskal-Wallis –test post hoc– sur les directions de vent des missions CYRCE 269

Figure A.IV.38 : Résultat de l'analyse de Kruskal-Wallis –test post hoc– sur les vitesses de vent des missions CYRCE 270

Figure A.IV.39 : Cercle des corrélations pour CYRCE 1 271

Figure A.IV.40 : Cercle des corrélations pour CYRCE 2 272

Figure A.IV.41 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 2	273
Figure A.IV.42 : Cercle des corrélations pour CYRCE 3	274
Figure A.IV.43 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 3	274
Figure A.IV.44 : Cercle des corrélations pour CYRCE 4	275
Figure A.IV.45 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 4	275
Figure A.IV.46 : Cercle des corrélations pour CYRCE 5	276
Figure A.IV.47 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 5	277
Figure A.IV.48 : Cercle des corrélations pour CYRCE 6	278
Figure A.IV.49 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 6	278
Figure A.IV.50 : Cercle des corrélations pour CYRCE 1 côté ouest.....	281
Figure A.IV.51 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 1 côté ouest	281
Figure A.IV.52 : Cercle des corrélations pour CYRCE 1 côté est.....	282
Figure A.IV.53 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 1 côté est..	283
Figure A.IV.54 : Cercle des corrélations pour CYRCE 1 côté ouest.....	284
Figure A.IV.55 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 1 côté ouest	284
Figure A.IV.56 : Cercle des corrélations pour CYRCE 1 côté est.....	285
Figure A.IV.57 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 1 côté est..	286
Figure A.IV.58 : Cercle des corrélations pour CYRCE 3 ouest	287
Figure A.IV.59 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 3 ouest.....	287
Figure A.IV.60 : Cercle des corrélations pour CYRCE 3 est	288
Figure A.IV.61 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 3 est.....	289
Figure A.IV.62 : Cercle des corrélations pour CYRCE 4 ouest	290
Figure A.IV.63 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 4 ouest.....	290
Figure A.IV.64 : Cercle des corrélations pour CYRCE 4 est	291
Figure A.IV.65 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 4 est.....	292
Figure A.IV.66 : Cercle des corrélations pour CYRCE 5 ouest	293

Figure A.IV.67 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 5 ouest.....	293
Figure A.IV.68 : Cercle des corrélations pour CYRCE 5 est	295
Figure A.IV.69 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 5 est.....	295
Figure A.IV.70 : Cercle des corrélations pour CYRCE 6 ouest	296
Figure A.IV.71 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 6 ouest.....	297
Figure A.IV.72 : Cercle des corrélations pour CYRCE 6 est	298
Figure A.IV.73 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 6 est.....	298
Figure A.IV.74 : Cercle des corrélations pour la saison d'hiver (CYRCE 2)	300
Figure A.IV.75 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée pour la saison d'hiver (CYRCE 2)	300
Figure A.IV.76 : Cercle des corrélations pour la saison du printemps (CYRCE 3) ..	302
Figure A.IV.77 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée pour la saison du printemps (CYRCE 3)	302
Figure A.IV.78 : Cercle des corrélations pour la saison d'été (CYRCE 1, 4 et 6)....	304
Figure A.IV.79 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée pour la saison d'été (CYRCE 1, 2 et 6)	304
Figure A.IV.80 : Cercle des corrélations pour la saison d'été (CYRCE 1 et 6).....	306
Figure A.IV.81 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée pour la saison d'été (CYRCE 1 et 6)	306
Figure A.IV.82 : Cercle des corrélations pour la saison d'automne effectuée sur CYRCE 5.....	308
Figure A.IV.83 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée pour la saison d'automne sur CYRCE 5.....	308
Tableau I.1.Date de mission et durée des missions, donnée de vent durant ces missions (station météo MétéoFrance Pertusato)	18
Tableau I.2 : Distance de chaque station par rapport à la côte, ou à l'île la plus proche	21
Tableau I.3:Date de mission et durée des missions.....	23
Tableau II.1: Date de mission et durée des missions.....	32

Tableau II.2: Moyenne, Écart type, Minimum et Maximum de l'intensité du vent durant la période d'enregistrement de l'ADCP mouillé	42
Tableau. II.3: Norme des valeurs d'intensité de courant de l'ADCP mouillé	44
Tableau II.4: Rangs de directions des vents enregistrés entre le 24/11/2004 et le 07/01/2005.	52
Tableau II.5 : Effectif et pourcentage de directions des vents par rangs.....	52
Tableau II.6 : Rangs de vitesse des vents enregistrés entre le 24/11/2004 et le 07/01/2005	52
Tableau II.7 : Effectif et pourcentage de vitesse des vents par rangs.....	52
Tableau II.8 : Rangs de directions des courants de surface (niveau C30) enregistrés entre le 24/11/2004 et le 07/01/2005.....	53
Tableau II.9 : Effectif et pourcentage de directions des courants par rangs.....	53
Tableau II.10: Rangs de vitesse des courants de surface (niveau C30) enregistrés entre le 24/11/2004 et le 07/01/2005.....	53
Tableau II.11: Effectif et pourcentage de vitesse des courants de surface (niveau C30) par rangs	53
Tableau II.12 : Récapitulatif du nombre d'heures comptabilisées par cas de vent durant les missions CYRCE et fréquence de ces phénomènes.....	74
Tableau II.13: Données de l'intensité du vent issues du Sémaphore de Pertusato et du Téthys II	86
Tableau II.14 : Sens de passage du flux à l'intérieur du détroit.....	93
Tableau II.15 : Fréquence du sens du passage du flux à l'intérieur du détroit.	93
Tableau III.1: Borne des valeurs minimales et maximales pour tous les paramètres enregistrés durant CYRCE.....	103
Tableau III.2: Récapitulatif des minima et maxima pour chaque variable par missions CYRCE	106
Tableau III.3: Récapitulatif des minima et maxima pour chaque variable par saison	106
Tableau III.4: ACP par CYRCE pour toutes les variables	107
Tableau III.5: ACP par saison pour toutes les variables.....	109
Tableau III.6: Tableau des températures de l'eau de mer à 10, 20 et 40 m entre deux jeux de données. Le premier est constitué des données CYRCE toutes sessions confondues pour le mois correspondant au mois de la mission. Le second jeu de donnée est constitué de moyennes mensuelles d'enregistrement de température à	

fréquence horaire réalisées et recueillies en 2005 dans quatre sites de Méditerranée Nord Occidentale. Données programme ANR Medchange, (communication personnelle Jean Claude Romano).....	114
Tableau III.7: Minimum et maximum observé pour chaque variable au-dessus et en dessous de la thermocline pour chaque mission d'été.....	128
Tableau III.8:Variation minimale et maximale au dessus et en dessous de la thermocline pour chaque variable au cours des trois missions d'été	129
Tableau III.9:Différence entre variables pour les différents groupes de CYRCE 3..	135
Tableau III.10: récapitulatif des minima et maxima pour chaque variable pour la mission CYRCE 4	140
Tableau III.11:Comparaison de température (°C) de la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio et des missions CYRCE	157
Tableau III.12 : Donnée de température TSG issue de CYRCE 5 (novembre)	158
Tableau III.13:Récapitulatif des numéros de profil de stations présents dans les cantonnements.....	160
Tableau IV.1 : Vitesse de pointe de nage de poissons d'eau douce.....	171
Tableau IV.2 : Valeur issue de la FishBase gérée par le muséum National d'Histoire naturelle	172
Tableau IV.3 : Vitesse de nage de poisson issue de la bibliographie.....	175
Tableau IV.4 : Tableau récapitulatif des abréviations du Tableau IV.4	176
Tableau IV.5 : Vitesse de nage des larves de <i>Sparus aurata</i> d'après le niveau de stage ontogénique, issue de Koumoundouros, <i>et al.</i> , 2009 [36].	179
Tableau IV.6 : Vitesse de nage des larves ou juvénile.....	180
Tableau IV.7 : Tableau des intensités de courants (cm/s) enregistrées par l'ADCP mouillé aux îles Lavezzi pour trois niveaux dans la colonne d'eau	182
Tableau IV.8 : Tableau de la durée en jours du temps de résidence des bouées de surface et de fond dans la zone délimitée par le modèle.	210
Tableau A.IV.9 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1.....	271
Tableau A.IV.10 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1.	272
Tableau A.IV.11 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1	272

Tableau A.IV.12 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2.....	273
Tableau A.IV.13 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2.....	273
Tableau A.IV.14 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2.....	273
Tableau A.IV.15 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3.....	274
Tableau A.IV.16 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3.....	274
Tableau A.IV.17 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3.....	275
Tableau A.IV.18 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4.....	276
Tableau A.IV.19 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4.....	276
Tableau A.IV.20 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4.....	276
Tableau A.IV.21 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5.....	277
Tableau A.IV.22 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5.....	277
Tableau A.IV.23 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5.....	277
Tableau A.IV.24 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1.....	278
Tableau A.IV.25 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6.....	279
Tableau A.IV.26 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6.....	279
Tableau A.IV.27 : récapitulatif de toutes les CYRCE pour toutes les variables.....	280
Tableau A.IV.28 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest.....	282
Tableau A.IV.29 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest.....	282

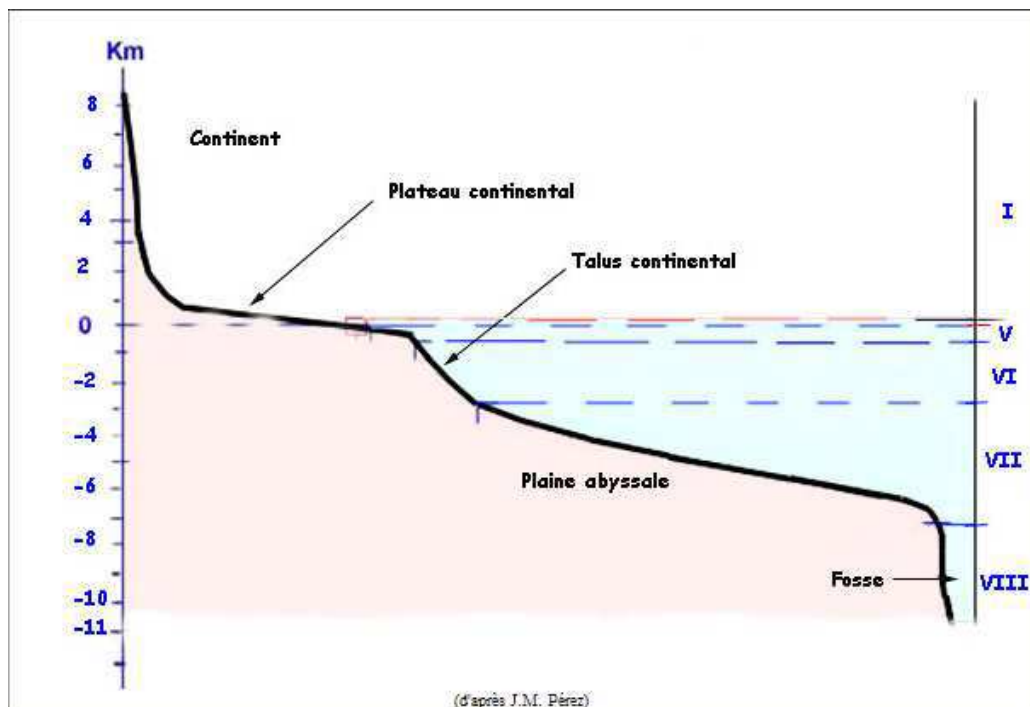
Tableau A.IV.30 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest.....	282
Tableau A.IV.31 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est.....	283
Tableau A.IV.32 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est.....	283
Tableau A.IV.33 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est.....	283
Tableau A.IV.34 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest.....	284
Tableau A.IV.35 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest.....	285
Tableau A.IV.36 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest.....	285
Tableau A.IV.37 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est.....	286
Tableau A.IV.38 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est.....	286
Tableau A.IV.39 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est.....	286
Tableau A.IV.40 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 ouest.....	287
Tableau A.IV.41 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 ouest.....	288
Tableau A.IV.42 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 ouest.....	288
Tableau A.IV.43 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 est.....	289
Tableau A.IV.44 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 est.....	289
Tableau A.IV.45 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 est.....	289
Tableau A.IV.46 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 ouest.....	290

Tableau A.IV.47 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 ouest.	291
Tableau A.IV.48 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 ouest	291
Tableau A.IV.49 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 est.....	292
Tableau A.IV.50 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 est.	292
Tableau A.IV.51 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 est	292
Tableau A.IV.52 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 ouest.....	294
Tableau A.IV.53 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 ouest.	294
Tableau A.IV.54 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 ouest	294
Tableau A.IV.55 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 est.....	295
Tableau A.IV.56 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 est.	295
Tableau A.IV.57 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 est	296
Tableau A.IV.58 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 ouest.....	297
Tableau A.IV.59 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 ouest.	297
Tableau A.IV.60 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 ouest	297
Tableau A.IV.61 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 est.....	298
Tableau A.IV.62 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 est.	299
Tableau A.IV.63 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 est	299

Tableau A.IV.64 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2 (hiver).	301
Tableau A.IV.65 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2 (hiver).	301
Tableau A.IV.66/ Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2 (hiver).	301
Tableau A.IV.67 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 (printemps).	303
Tableau A.IV.68 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 (printemps).	303
Tableau A.IV.69 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 (printemps).	303
Tableau A.IV.70 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1, 4 et 6.	305
Tableau A.IV.71 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1, 4 et 6.	305
Tableau A.IV.72 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1, 4 et 6.	305
Tableau A.IV.73 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 et 6.	307
Tableau A.IV.74 / Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 et 6.	307
Tableau A.IV.75 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 et 6.	307
Tableau A.IV.76 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5.	308
Tableau A.IV.77 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5.	309
Tableau A.IV.78 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5.	309

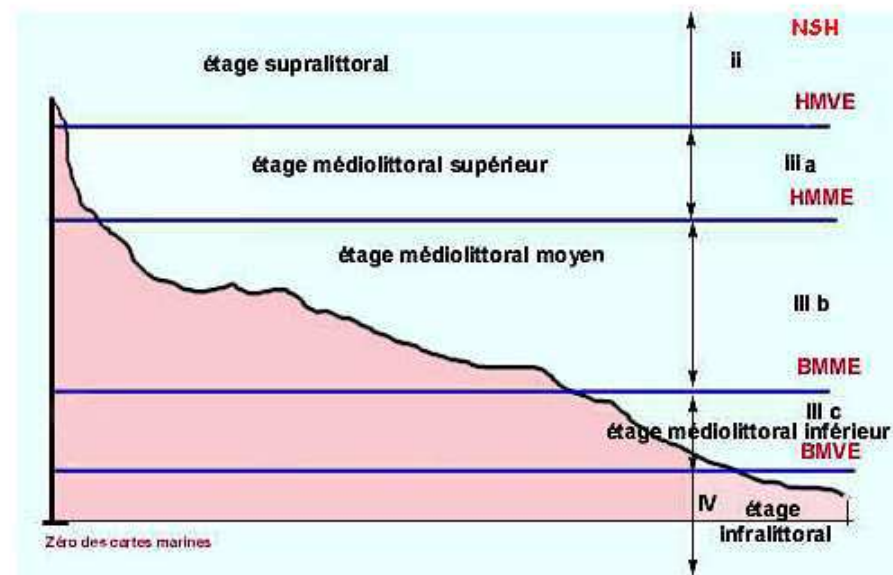
Annexes

Annexe 1 : les divisions topographiques de l'océan, d'après J.M Pérès.



I = Continent émergé
 II = étage supralittoral
 III = étage médiolittoral
 IV = étage infralittoral

V = étage circalittoral
 VI = étage bathyal
 VII = étage abyssal
 VIII = étage hadal



NSH = Niveau Supérieur d'Humectation
 HMVE = Hautes Mers de Vives Eaux; HMME = Hautes Mers de Mortes Eaux
 BMME = Basses Mers de Mortes Eaux; BMVE = Basses Mers de Vives Eaux

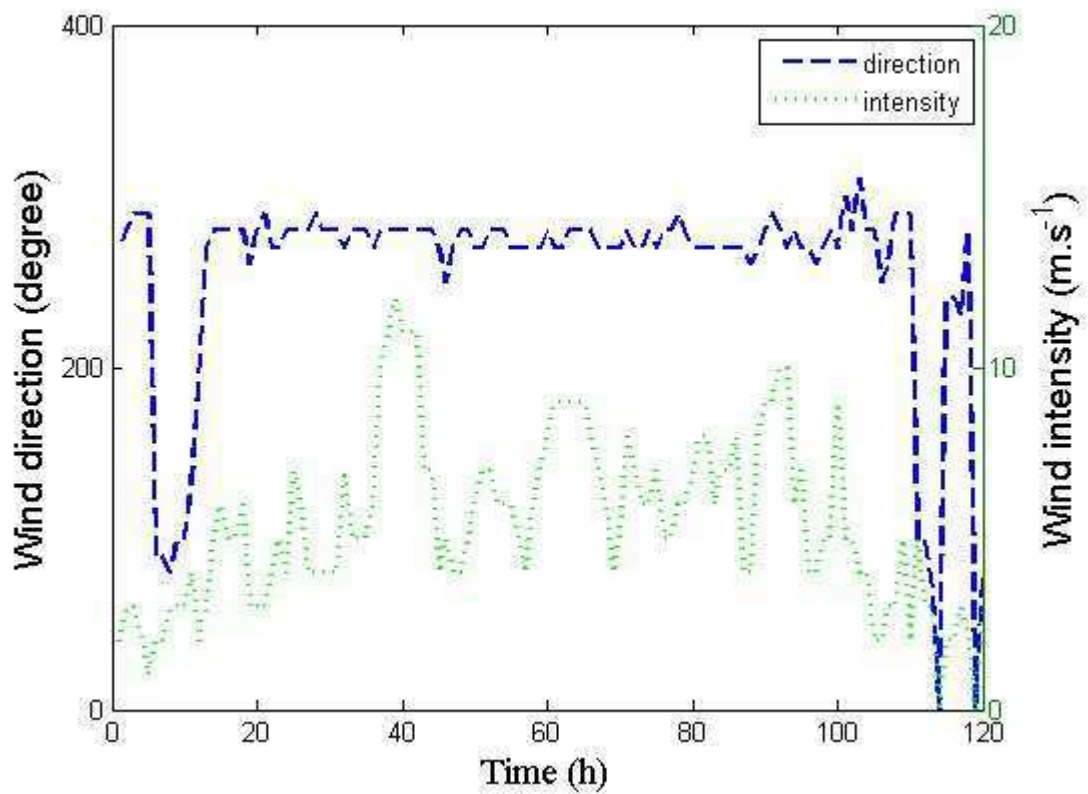
Annexe 2 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant les missions CYRCE

Figure A.IV.28: Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 1.

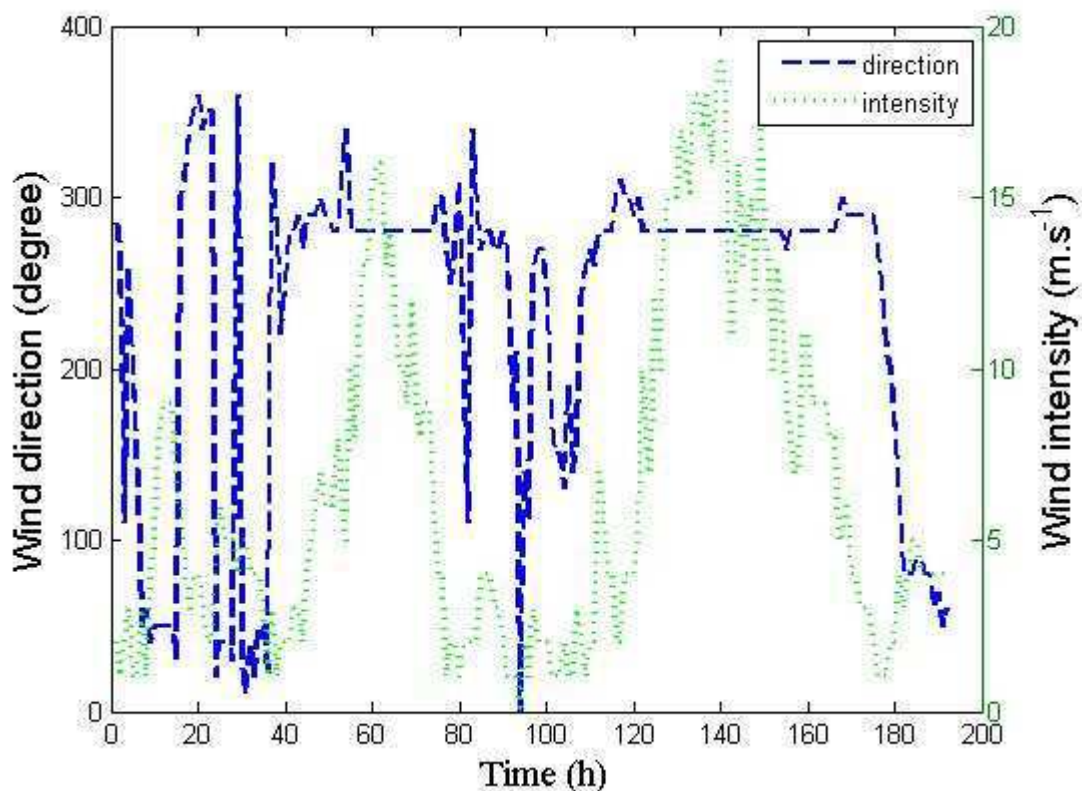


Figure A.IV.29 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 2.

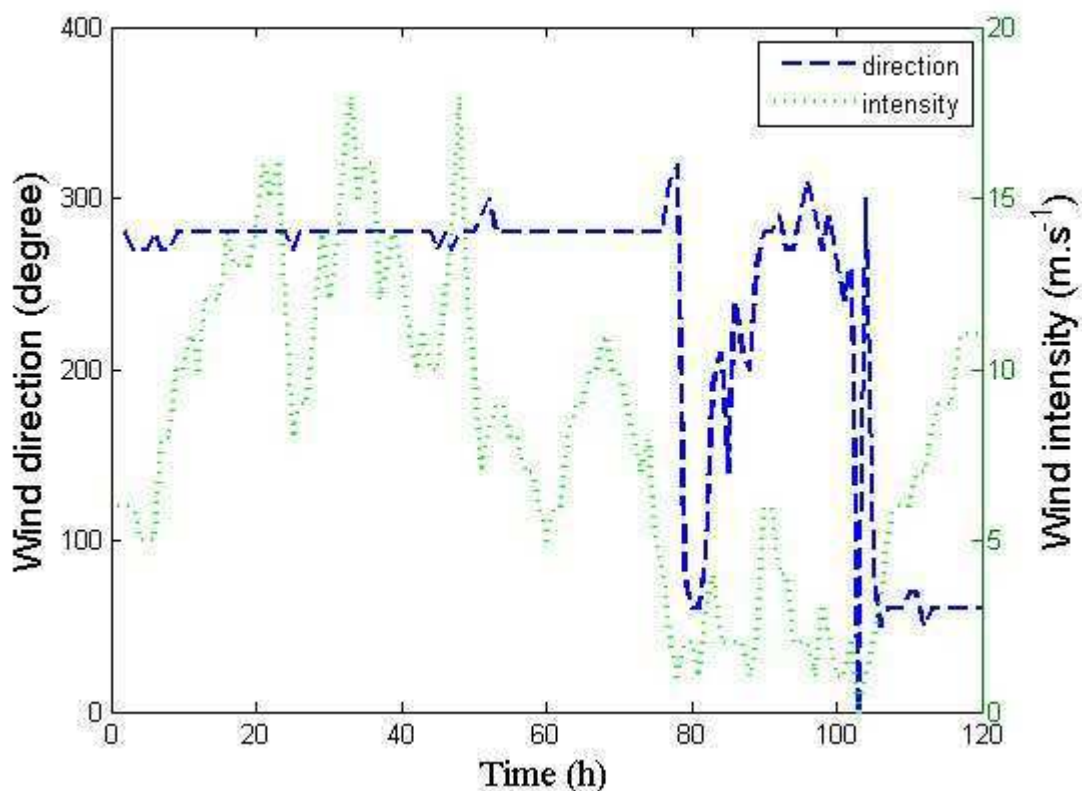


Figure A.IV.30 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 3.

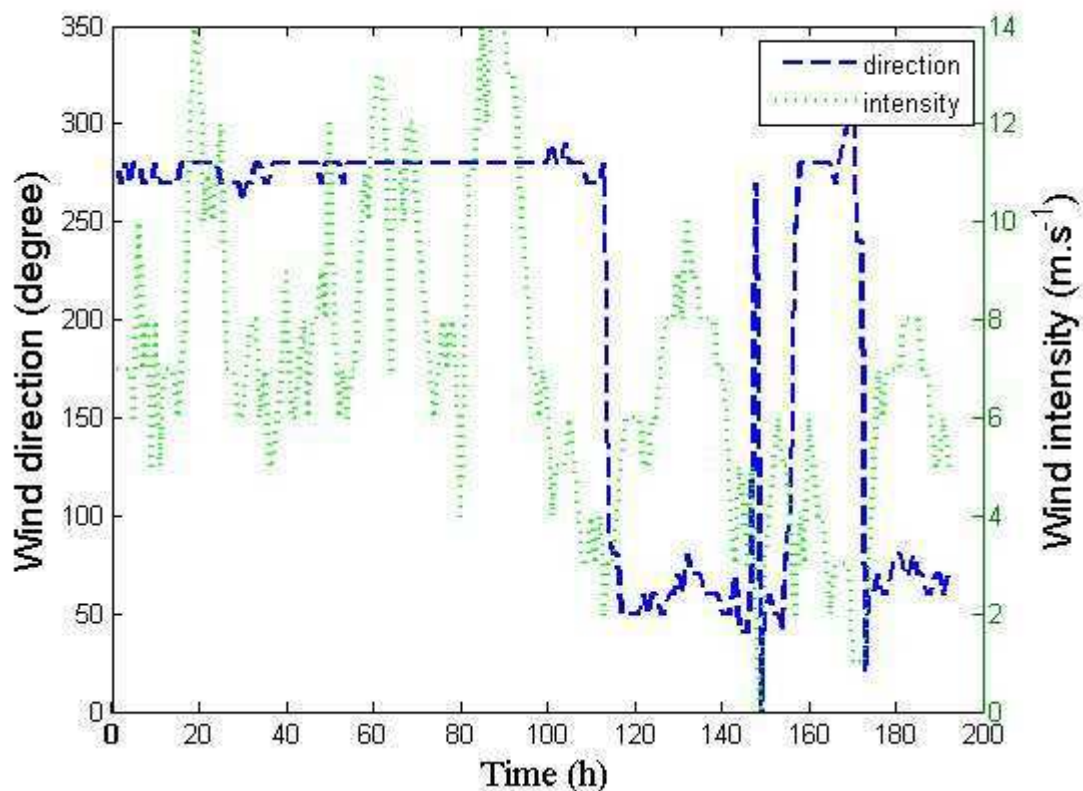


Figure A.IV.31: Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 4.

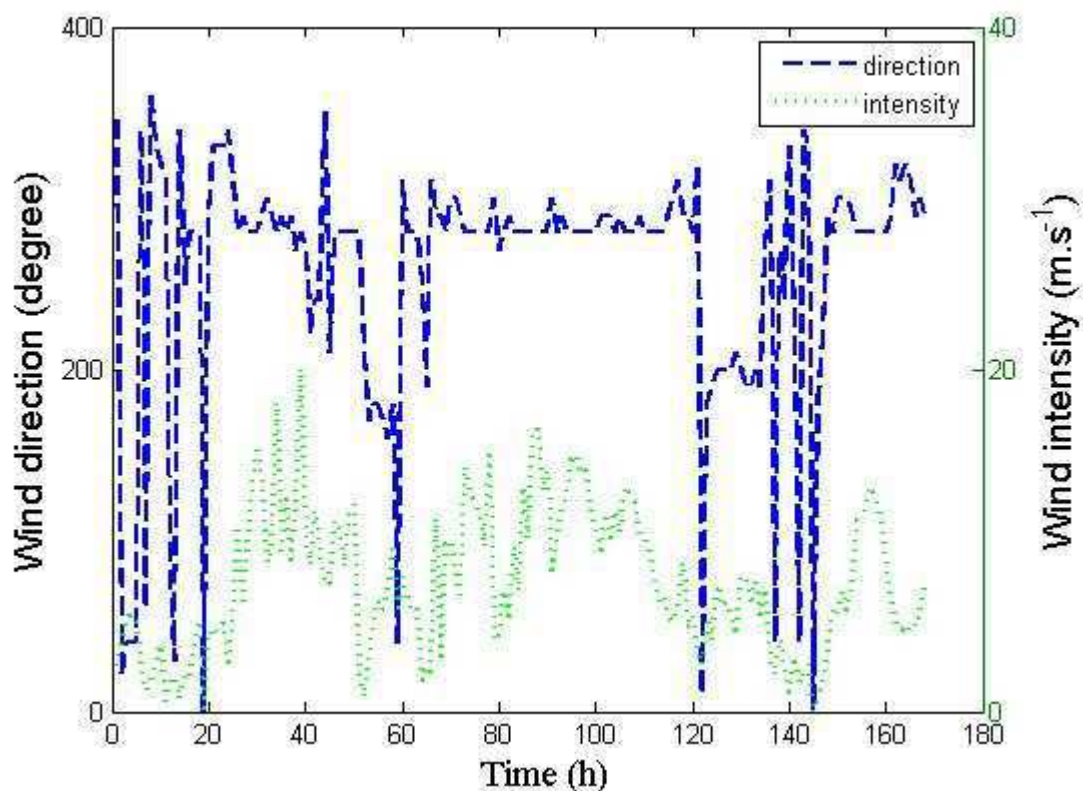


Figure A.IV.32 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 5.

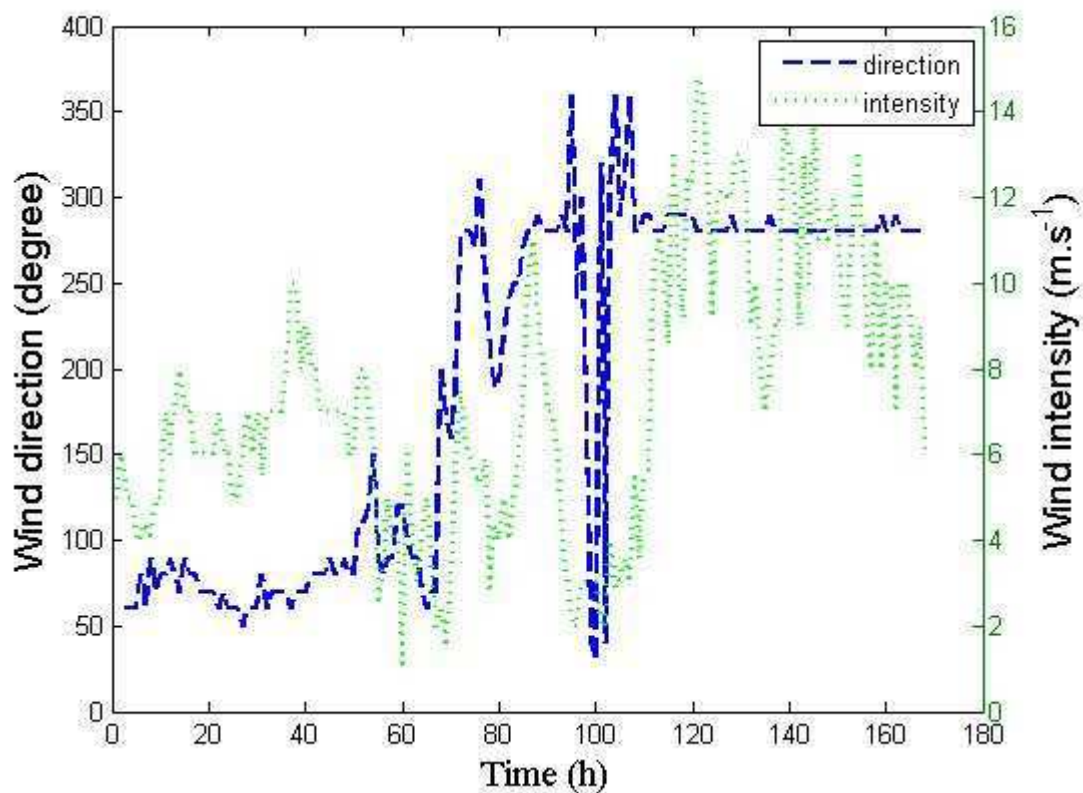


Figure A.IV.33 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 6.

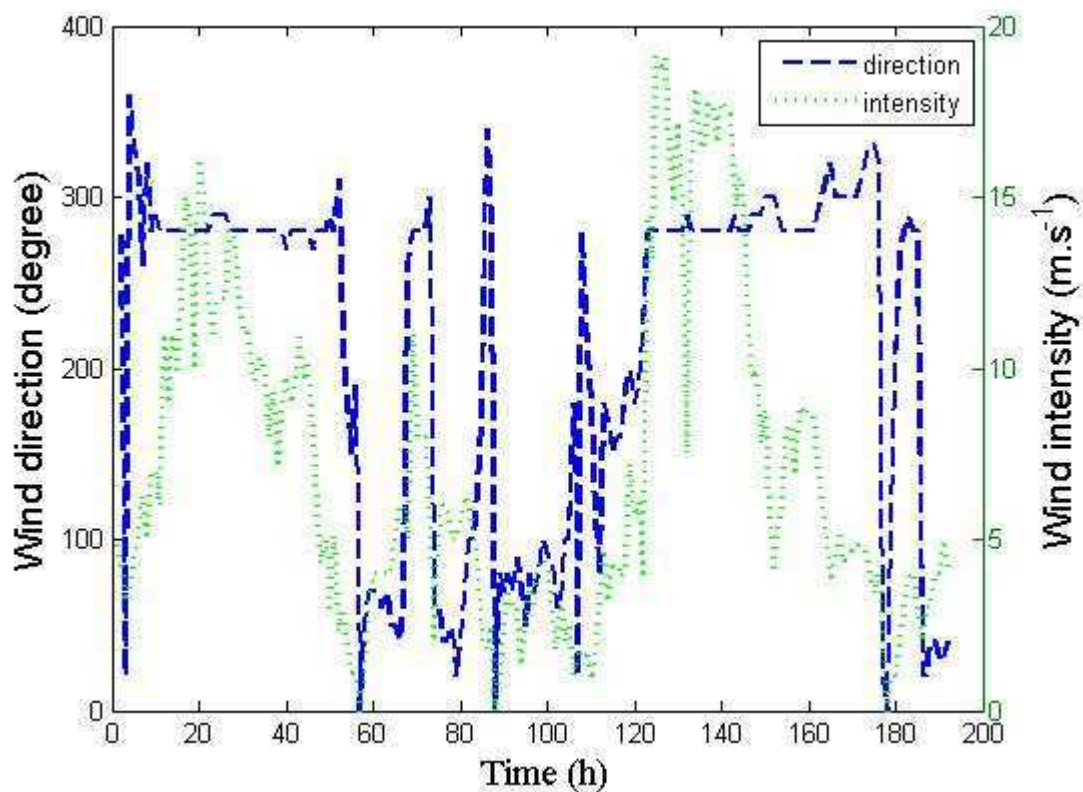


Figure A.IV.34 : Direction et intensité du vent enregistré au Sémaphore de Pertusato durant CYRCE 7.

Annexe 3 : Analyse de Kruskal-Wallis sur les données de vent, issues du sémaphore de Pertusato, enregistrée durant les missions CYRCE

ANOVA de Kruskal-Wallis par Rangs; vit_vent (vent_pertusato_été_hiver_testT)			
Var. indépendante (classement) : mission			
Test de Kruskal-Wallis : H (6, N= 1152) =44.58518 p =.000			
Dépend. :	Code	N	Somme
vit_vent	Actifs		Rangs
cyrce1	101	120	55396.0
cyrce4	102	192	116991.5
cyrce 6	103	168	104977.0
cyrce2	104	192	95301.0
cyrce3	105	120	80167.5
cyrce5	106	168	105025.5
cyrce7	107	192	106269.5

Figure A.IV.35 : Résultat de l'analyse de Kruskal-Wallis sur les vitesses de vent des missions CYRCE

ANOVA de Kruskal-Wallis par Rangs; dir_vent (vent_pertusato_été_hiver_testT)			
Var. indépendante (classement) : mission			
Test de Kruskal-Wallis : H (6, N= 1152) =54.31298 p =.000			
Dépend. :	Code	N	Somme
dir_vent	Actifs		Rangs
cyrce1	101	120	69464.0
cyrce4	102	192	94131.0
cyrce 6	103	168	84543.5
cyrce2	104	192	115711.5
cyrce3	105	120	70565.0
cyrce5	106	168	119613.0
cyrce7	107	192	110100.0

Figure A.IV.36 : Résultat de l'analyse de Kruskal-Wallis sur les directions de vent des missions CYRCE

Valeurs p des Comp. Multiples (bilatéral) ; dir_vent (vent_pertusato_été_hiver_testT)							
Var. indépendante (classement) : mission							
Test de Kruskal-Wallis : H (6, N= 1152) =54.31298 p =.000							
Dépend. :	cyrce1	cyrce4	cyrce 6	cyrce2	cyrce3	cyrce5	cyrce7
dir_vent	R:578.87	R:490.27	R:503.24	R:602.66	R:588.04	R:711.98	R:573.44
cyrce1		0.464267	1.000000	1.000000	1.000000	0.017121	1.000000
cyrce4	0.464267		1.000000	0.019583	0.242626	0.000000	0.300488
cyrce 6	1.000000	1.000000		0.098089	0.691950	0.000000	0.961516
cyrce2	1.000000	0.019583	0.098089		1.000000	0.039255	1.000000
cyrce3	1.000000	0.242626	0.691950	1.000000		0.038391	1.000000
cyrce5	0.017121	0.000000	0.000000	0.039255	0.038391		0.001698
cyrce7	1.000000	0.300488	0.961516	1.000000	1.000000	0.001698	

Figure A.IV.37 : Résultat de l'analyse de Kruskal-Wallis –test post hoc– sur les directions de vent des missions CYRCE

Valeurs p des Comp. Multiples (bilatéral) ; vit_vent (vent_pertusato_été_hiver_testT)							
Var. indépendante (classement) : mission							
Test de Kruskal-Wallis : H (6, N= 1152) =44.58518 p =.000							
Dépend. : vit_vent	cyrce1	cyrce4	cyrce 6	cyrce2	cyrce3	cyrce5	cyrce7
	R:461.63	R:609.33	R:624.86	R:496.36	R:668.06	R:625.15	R:553.49
cyrce1		0.002861	0.000850	1.000000	0.000032	0.000823	0.371010
cyrce4	0.002861		1.000000	0.018435	1.000000	1.000000	1.000000
cyrce 6	0.000850	1.000000		0.005377	1.000000	1.000000	0.887886
cyrce2	1.000000	0.018435	0.005377		0.000193	0.005208	1.000000
cyrce3	0.000032	1.000000	1.000000	0.000193		1.000000	0.064727
cyrce5	0.000823	1.000000	1.000000	0.005208	1.000000		0.870525
cyrce7	0.371010	1.000000	0.887886	1.000000	0.064727	0.870525	

Figure A.IV.38 : Résultat de l'analyse de Kruskal-Wallis –test post hoc– sur les vitesses de vent des missions CYRCE

Annexe 4 : Résultats des ACP effectuées sur toutes les missions CYRCE individuellement

1. CYRCE 1

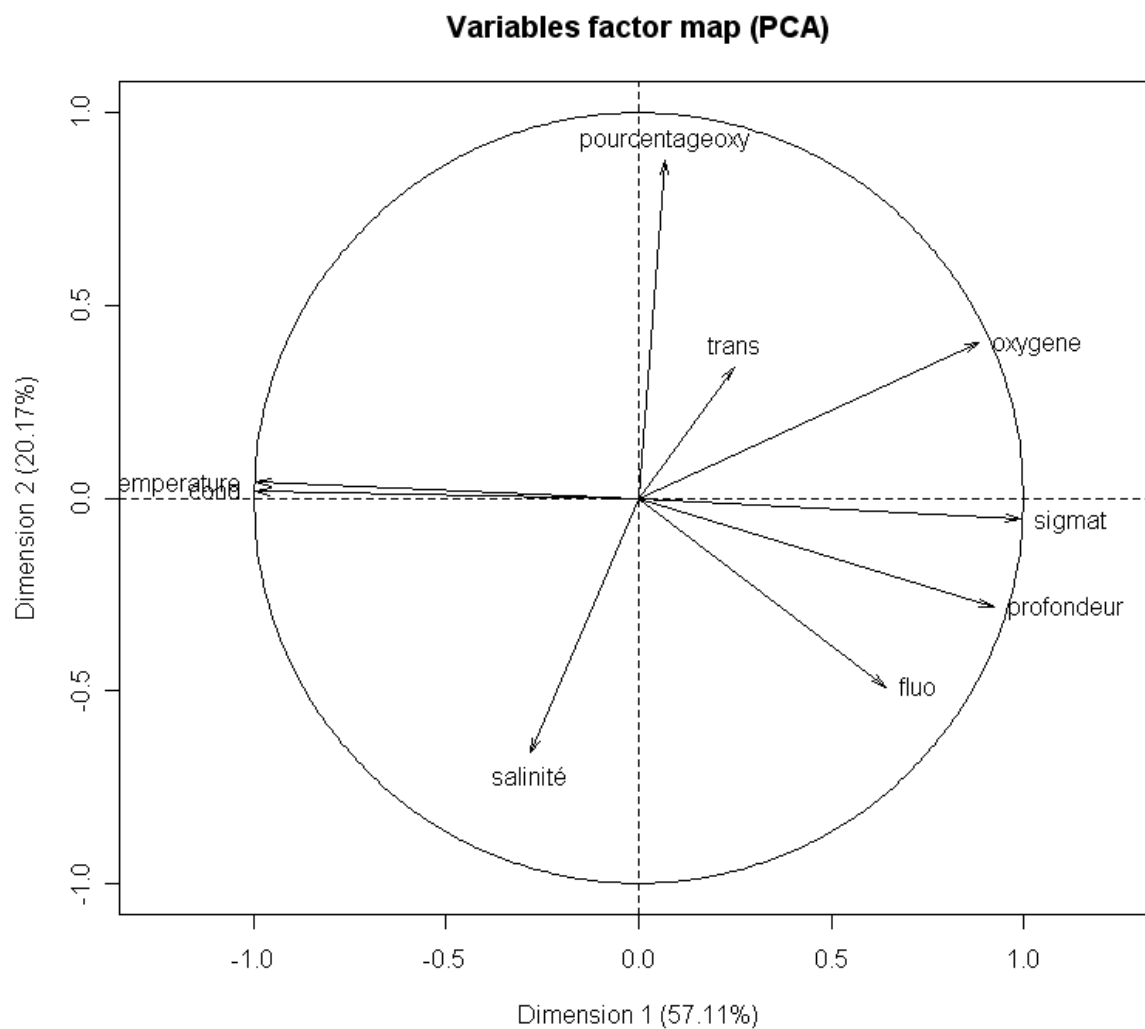


Figure A.IV.39 : Cercle des corrélations pour CYRCE 1

Tableau A.IV.9 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1.

	Eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	5.140294e+00	5.711438e+01	57.11438
Comp 2	1.815590e+00	2.017322e+01	77.28760
Comp 3	9.632056e-01	1.070228e+01	87.98988

Tableau A.IV.10 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	0.92113959	-0.28304995	0.015355738
Temperature	-0.99299710	0.04058423	-0.001873831
Cond	-0.99413561	0.01784639	0.010755005
Oxygene	0.88421551	0.40509350	-0.022751912
%oxy	0.06729464	0.87788771	-0.080307790
Fluo	0.64003137	-0.49175983	-0.152480365
Trans	0.24811985	0.34094207	0.864411605
Salinité	-0.28199429	-0.66149631	0.429896594
Sigmat	0.99012967	-0.05543494	0.024795993

Tableau A.IV.11 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1

	Dim.1	Dim.2
Profondeur	TRUE	TRUE
Temperature	TRUE	FALSE
Cond	TRUE	FALSE
Oxygene	TRUE	TRUE
%oxy	FALSE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE
Sigmat	TRUE	FALSE

2. Pour CYRCE 2 :

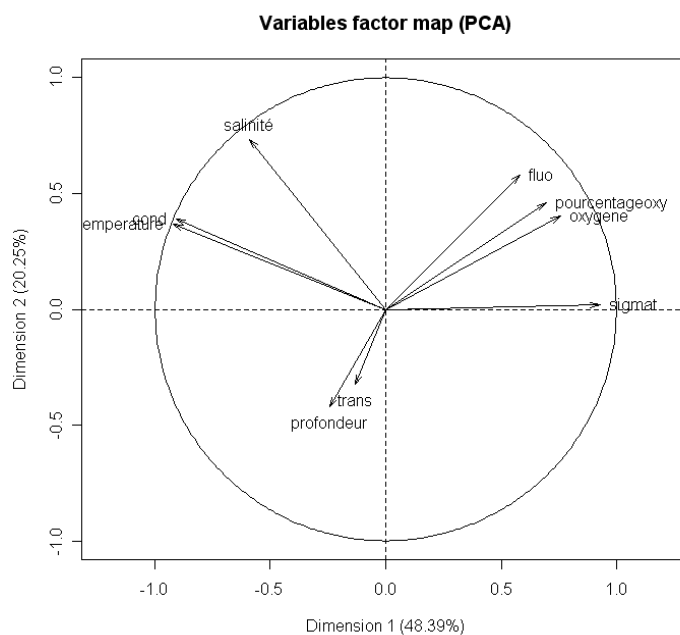


Figure A.IV.40 : Cercle des corrélations pour CYRCE 2

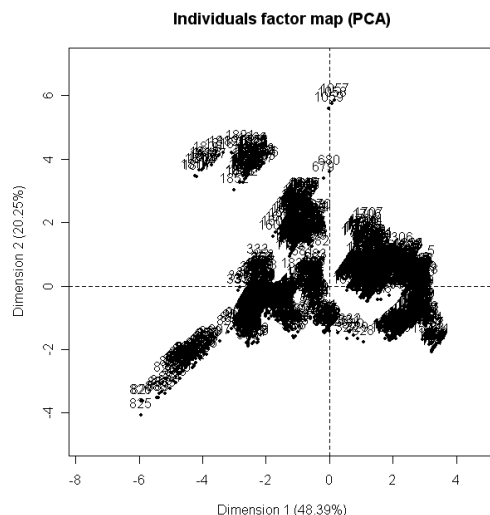


Figure A.IV.41 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 2

Tableau A.IV.12 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	4.355440e+00	4.839378e+01	48.39378
Comp 2	1.822400e+00	2.024889e+01	68.64267
Comp 3	1.325664e+00	1.472960e+01	83.37227

Tableau A.IV.13 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.2435890	-0.42196474	0.76410377
Temperature	-0.9218263	0.36797400	0.09531709
Cond	-0.9089002	0.38943404	0.14685956
Oxygene	0.7562429	0.40173528	0.48455353
%oxy	0.6949784	0.46087713	0.51731310
Fluo	0.5823075	0.58092040	-0.31535115
Trans	-0.1309647	-0.32537626	0.30980981
Salinité	-0.5898522	0.73466861	0.11120799
Sigmat	0.9279996	0.02018161	-0.03091175

Tableau A.IV.14 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Température	TRUE	TRUE	FALSE
Cond	TRUE	TRUE	TRUE
Oxygène	TRUE	TRUE	TRUE
%oxy	TRUE	TRUE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	FALSE	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE	FALSE
Sigmat	TRUE	FALSE	FALSE

3. CYRCE 3:

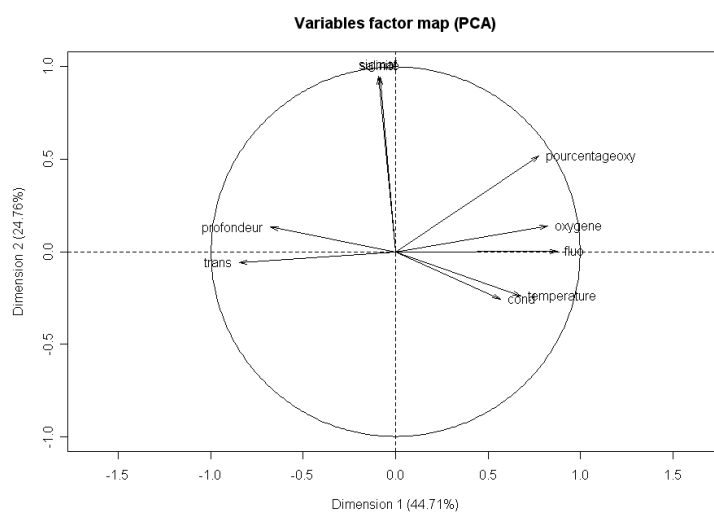


Figure A.IV.42 : Cercle des corrélations pour CYRCE 3

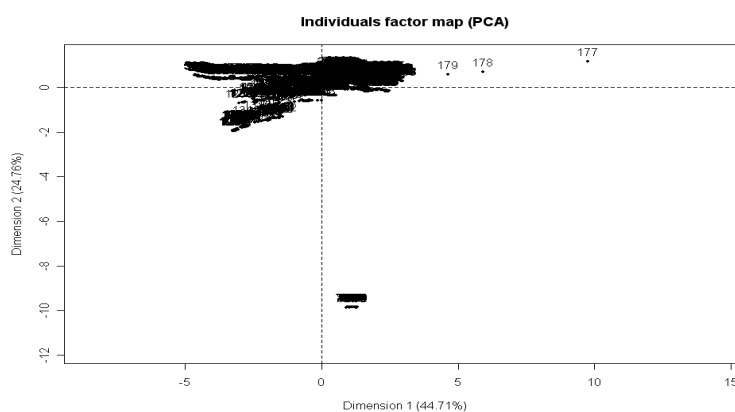


Figure A.IV.43 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 3

Tableau A.IV.15 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	4.023776e+00	4.470863e+01	44.70863
Comp 2	2.228355e+00	2.475950e+01	69.46813
Comp 3	1.543004e+00	1.714448e+01	86.61261

Tableau A.IV.16 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.67844929	0.132979274	-0.05198729
Température	0.67767442	-0.238780871	0.67974116
Cond	0.56786898	-0.257748094	0.76478063
Oxygène	0.82320996	0.140746168	-0.43158464
%oxy	0.77565224	0.517002421	-0.21801011
Fluo	0.87625542	0.002228138	-0.16307808
Trans	-0.84768019	-0.058075431	0.24845871
Salinité	-0.08444634	0.946781228	0.29774494
Sigmat	-0.09453891	0.948866527	0.28738731

Tableau A.IV.17 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	FALSE
Temperature	TRUE	TRUE	TRUE
Cond	TRUE	TRUE	TRUE
Oxygène	TRUE	TRUE	TRUE
%oxy	TRUE	TRUE	TRUE
Fluo	TRUE	FALSE	TRUE
Trans	TRUE	FALSE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE	TRUE
SigmaT	TRUE	TRUE	TRUE

4. CYRCE4:

Variables factor map (PCA)

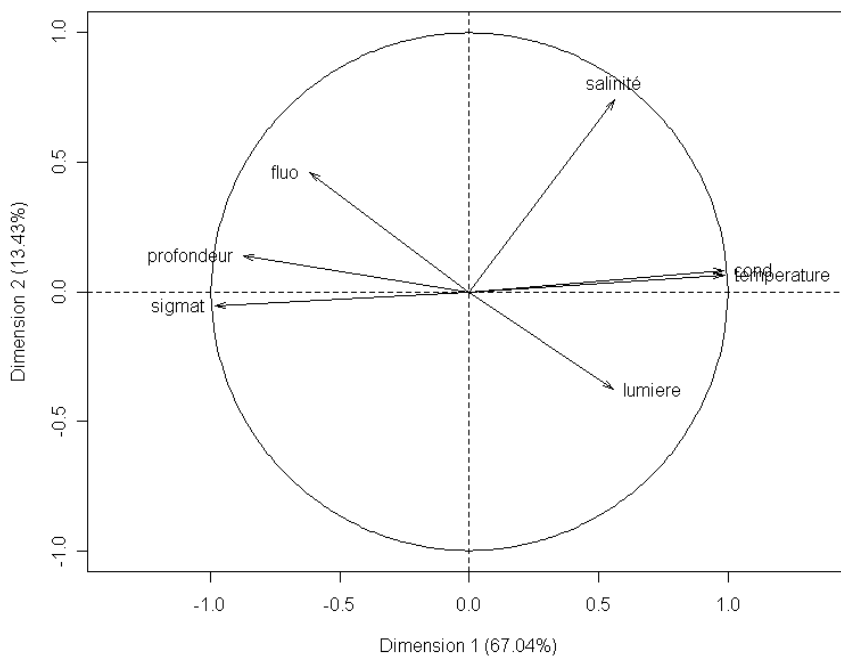


Figure A.IV.44 : Cercle des corrélations pour CYRCE 4

Individuals factor map (PCA)

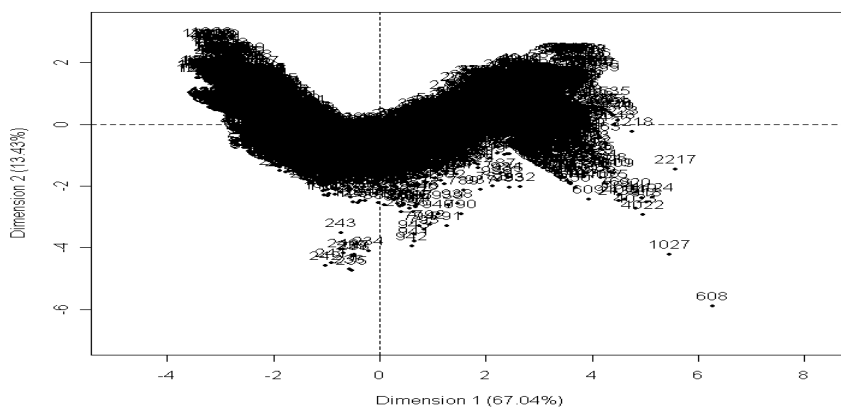


Figure A.IV.45 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 4

Tableau A.IV.18 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	4.693136e+00	6.704479e+01	67.04479
Comp 2	9.399471e-01	1.342782e+01	80.47261
Comp 3	7.371108e-01	1.053015e+01	91.00276

Tableau A.IV.19 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.8760080	0.13967596	-0.07485477
Température	0.9867611	0.06469972	-0.07096610
Cond	0.9865871	0.08325699	-0.06746721
Fluo	-0.6185499	0.46159476	0.47879952
Salinité	0.5621330	0.74176438	0.08823311
Sigmat	-0.9849428	-0.05621915	0.06923741
Lumière	0.5567622	-0.37798839	0.69288648

Tableau A.IV.20 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4

	Dim.1	Dim.2
Profondeur	TRUE	TRUE
Temperature	TRUE	TRUE
Cond	TRUE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE
SigmaT	TRUE	FALSE
Lumiere	TRUE	TRUE

5. CYRCE 5:

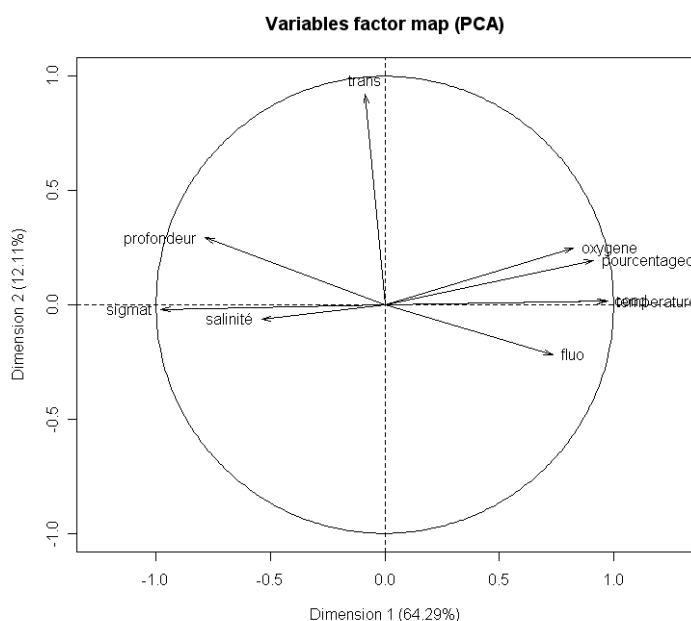


Figure A.IV.46 : Cercle des corrélations pour CYRCE 5

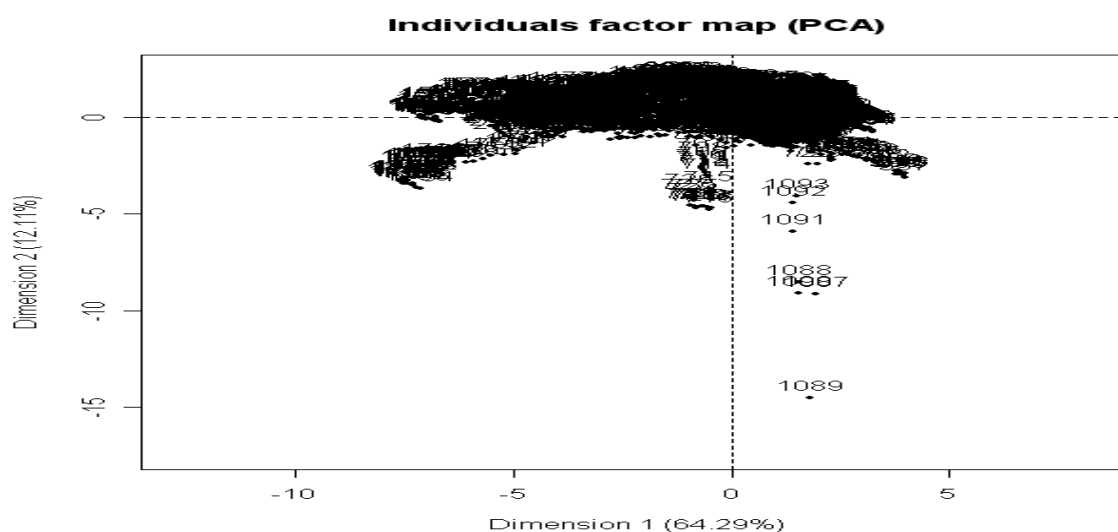


Figure A.IV.47 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 5

Tableau A.IV.21 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5.

	Eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	5.785691e+00	6.428546e+01	64.28546
Comp 2	1.090082e+00	1.211203e+01	76.39748
Comp 3	8.137771e-01	9.041967e+00	85.43945

Tableau A.IV.22 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.78306706	0.29311882	0.07069182
Température	0.97227084	0.01539761	0.04715801
Cond	0.96493929	0.01658205	0.08841312
Oxygène	0.82310166	0.24878776	0.32841021
%oxy	0.91120368	0.19351721	0.26940870
Fluo	0.73341808	-0.21809683	-0.17438897
Trans	-0.08466626	0.92312331	-0.15729852
Salinité	-0.53769771	-0.06418764	0.74642343
Sigmat	-0.97678080	-0.02154953	0.07747500

Tableau A.IV.23 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	FALSE
Temperature	TRUE	FALSE	TRUE
Cond	TRUE	FALSE	FALSE
Oxygène	TRUE	TRUE	TRUE
%oxy	TRUE	TRUE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE	TRUE
SigmaT	TRUE	FALSE	TRUE

6. CYRCE 6 :

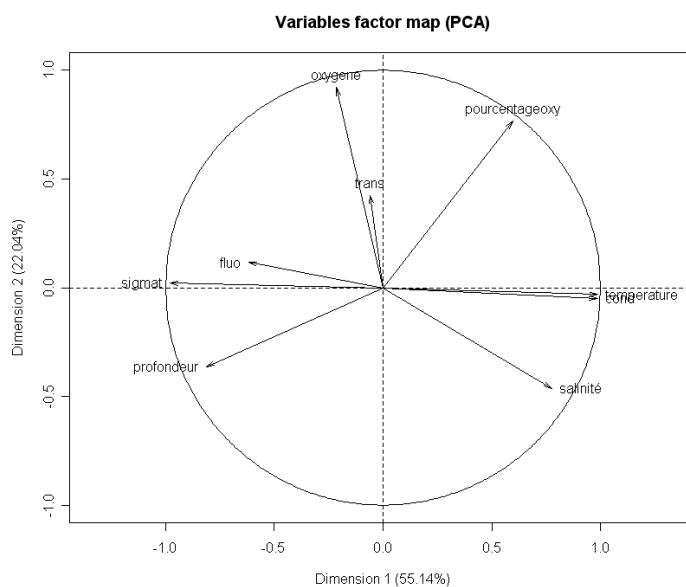


Figure A.IV.48 : Cercle des corrélations pour CYRCE 6

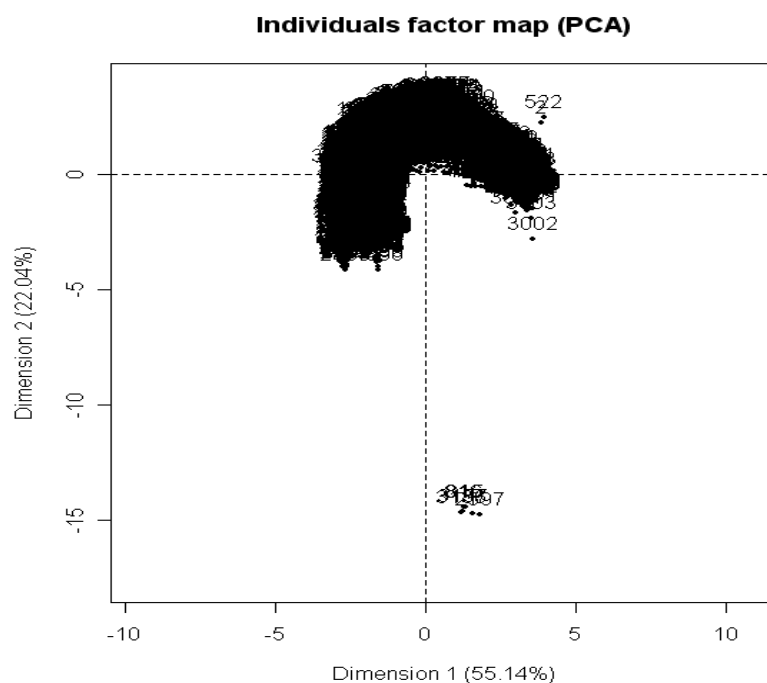


Figure A.IV.49 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 6

Tableau A.IV.24 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	4.962423e+00	5.513804e+01	55.13804
Comp 2	1.983690e+00	2.204100e+01	77.17903
Comp 3	9.589339e-01	1.065482e+01	87.83386

Tableau A.IV.25 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.81375929	-0.36396060	0.12330397
Température	0.98674461	-0.03155435	0.09416961
Cond	0.98692591	-0.04918537	0.09252925
Oxygène	-0.21343975	0.92160387	-0.27133159
%oxy	0.59688554	0.76744176	-0.16669323
Fluo	-0.61800282	0.11616753	0.04163671
Trans	-0.05846785	0.42558001	0.89359255
Salinité	0.77664053	-0.46302203	-0.10335853
Sigmat	-0.98091084	0.02200977	-0.11818932

Tableau A.IV.26 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Temperature	TRUE	FALSE	TRUE
Cond	TRUE	FALSE	TRUE
Oxygène	TRUE	TRUE	TRUE
%oxy	TRUE	TRUE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE	FALSE
Trans	FALSE	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE	TRUE
SigmaT	TRUE	FALSE	TRUE

Annexe 5 : Récapitulatif des ACP de toutes les missions CYRCE pour toutes les variables

Tableau A.IV.27 : récapitulatif de toutes les CYRCE pour toutes les variables

	axe 1	axe 2	axe 3
CYRCE 1	température conductivité sigma t 00	% saturation O2	
CYRCE 2	température conductivité sigma t 00	salinité	
CYRCE 3	Oxygène fluorescence turbidité	salinité sigma t 00	
CYRCE 4	température conductivité sigma t 00	salinité	
CYRCE 5	température conductivité sigma t 00	turbidité	
CYRCE 6	température conductivité sigma t 00	Oxygène dissous	turbidité

Annexe 6 : Résultats des ACP effectuées sur toutes les missions CYRCE individuellement, du côté ouest et est de Bonifacio, sans Sigma T00

1- ACP CYRCE 1 coté ouest (sans sigma t=densité)

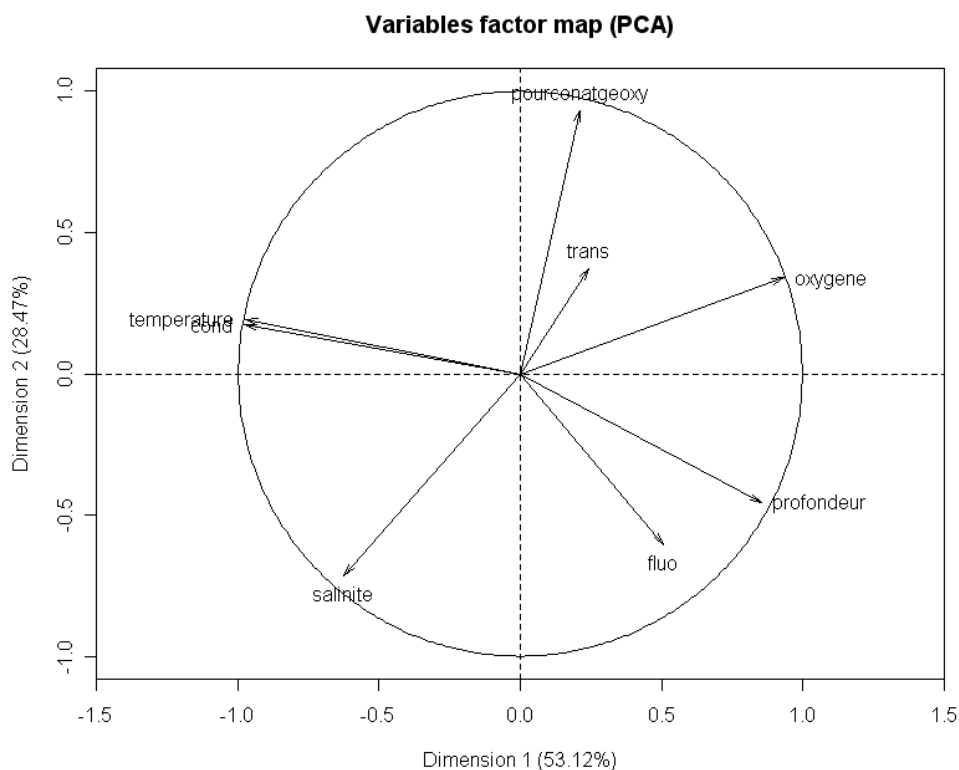


Figure A.IV.50 : Cercle des corrélations pour CYRCE 1 côté ouest

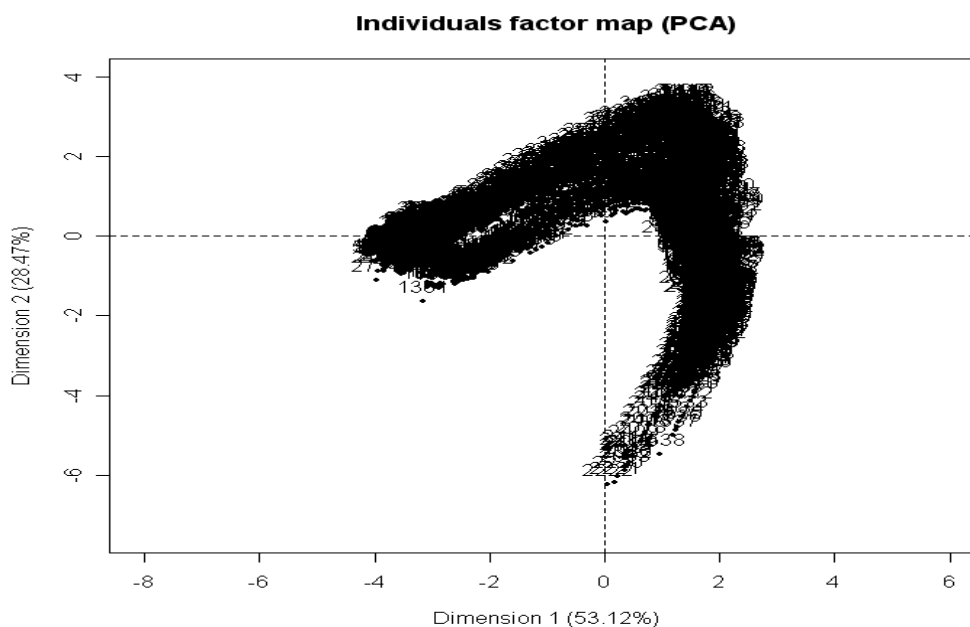


Figure A.IV.51 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 1 côté ouest

Tableau A.IV.28 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	4.249576e+00	5.311970e+01	53.11970
Comp 2	2.277201e+00	2.846501e+01	81.58471
Comp 3	8.908418e-01	1.113552e+01	92.72024

Tableau A.IV.29 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	0.8547300	-0.4570079	0.05581056
Température	-0.9712212	0.1922419	-0.02668565
Cond	-0.9757391	0.1720683	-0.02032072
Oxygène	0.9317030	0.3396246	-0.07312521
%oxy	0.2108675	0.9333676	-0.20154002
Fluo	0.5084332	-0.6042730	-0.12161488
Trans	0.2442451	0.3731252	0.88229560
Salinité	-0.6268808	-0.7147672	0.21771670

Tableau A.IV.30 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest.

	Dim.1	Dim.2
Profondeur	TRUE	TRUE
Température	TRUE	TRUE
Cond	TRUE	TRUE
Oxygène	TRUE	TRUE
%oxy	TRUE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE

2-ACP CYRCE 1 coté est (sans sigma t=densité)

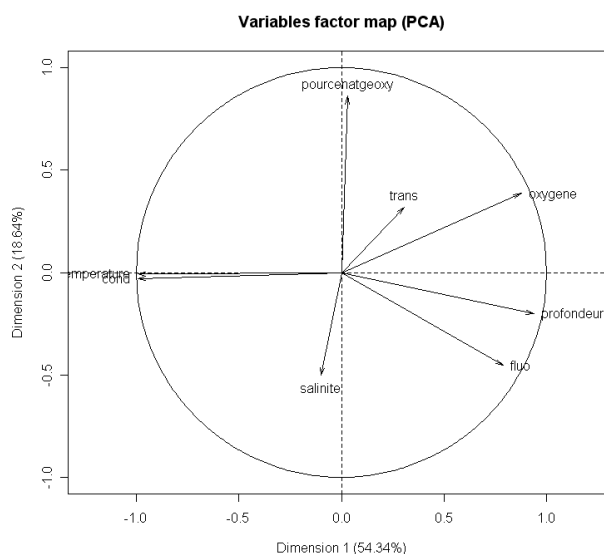


Figure A.IV.52 : Cercle des corrélations pour CYRCE 1 côté est

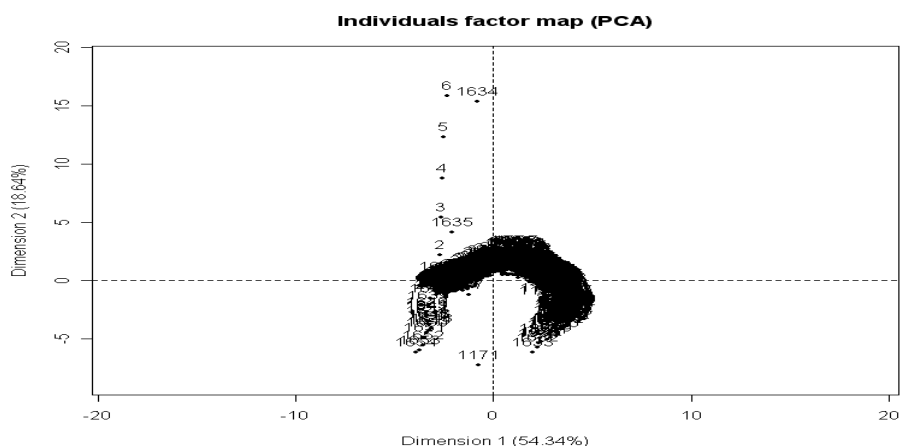


Figure A.IV.53 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 1 côté est

Tableau A.IV.31 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	4.3473050601	5.434131e+01	54.34131
Comp 2	1.4912809061	1.864101e+01	72.98232
Comp 3	1.0324731574	1.290591e+01	85.88824

Tableau A.IV.32 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	0.93907622	-0.200980791	-0.007041993
Température	-0.99251946	-0.006856683	0.018254649
Cond	-0.99197907	-0.029435371	0.043611490
Oxygène	0.87684345	0.385859662	0.009881014
%oxy	0.02915189	0.860834534	0.060824496
Fluo	0.78944246	-0.454367698	-0.122581972
Trans	0.30532137	0.318865819	0.732981026
Salinité	-0.10088981	-0.501921291	0.688551811

Tableau A.IV.33 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	FALSE
Température	TRUE	FALSE	FALSE
Cond	TRUE	FALSE	FALSE
Oxygène	TRUE	TRUE	FALSE
%oxy	FALSE	TRUE	FALSE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE	TRUE

3-ACP CYRCE 2 côté ouest (sans sigma t=densité)

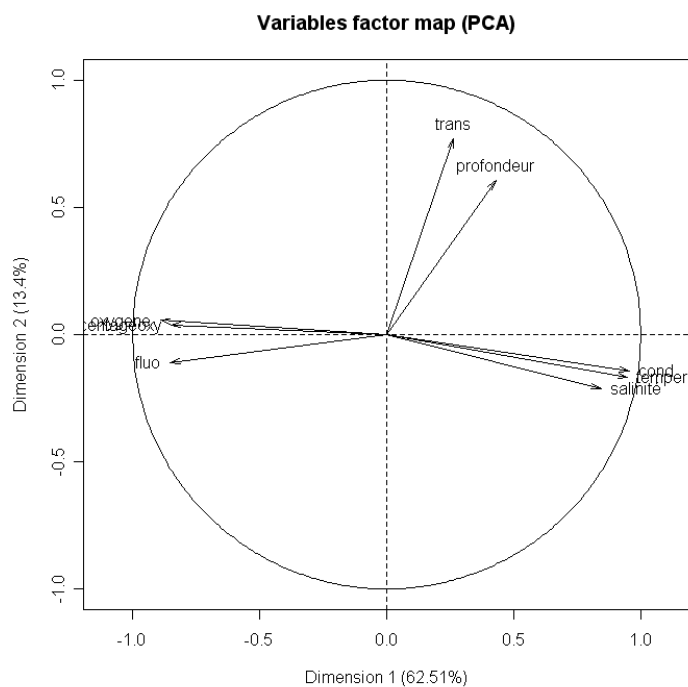


Figure A.IV.54 : Cercle des corrélations pour CYRCE 1 côté ouest

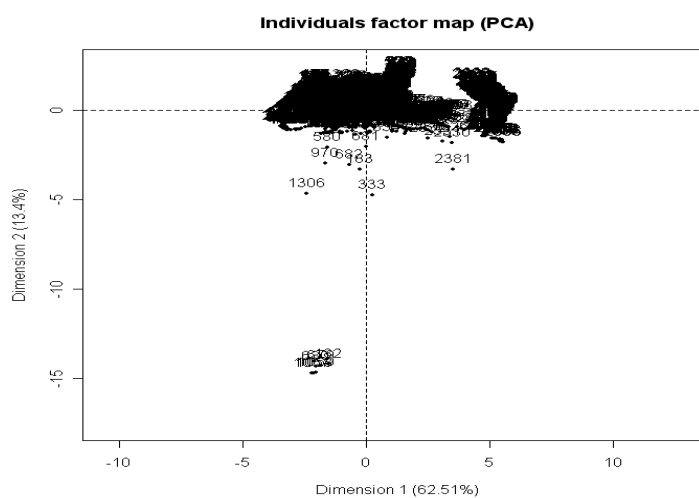


Figure A.IV.55 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 1 côté ouest

Tableau A.IV.34 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	5.000775e+00	6.250968e+01	62.50968
Comp 2	1.071962e+00	1.339952e+01	75.90921
Comp 3	8.310844e-01	1.038855e+01	86.29776

Tableau A.IV.35 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	0.4280486	0.60564675	0.60754979
Température	0.9473978	-0.16705086	0.07223999
Cond	0.9524995	-0.14217281	0.10288706
Oxygène	-0.8884626	0.05542067	0.28668681
%oxy	-0.8485833	0.03866901	0.32323556
Fluo	-0.8502672	-0.10892555	-0.15904887
Trans	0.2635476	0.77155320	-0.47159729
Salinité	0.8431252	-0.21285909	0.10859165

Tableau A.IV.36 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté ouest

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Temperature	TRUE	TRUE	TRUE
Cond	TRUE	TRUE	TRUE
Oxygène	TRUE	FALSE	TRUE
%oxy	TRUE	FALSE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE	TRUE

4- ACP CYRCE 2 coté est (sans sigma t=densité)

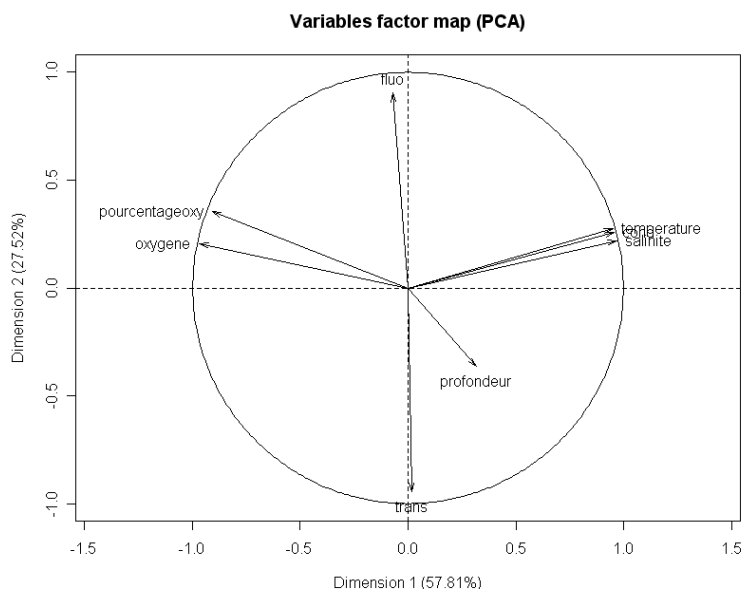


Figure A.IV.56 : Cercle des corrélations pour CYRCE 1 côté est

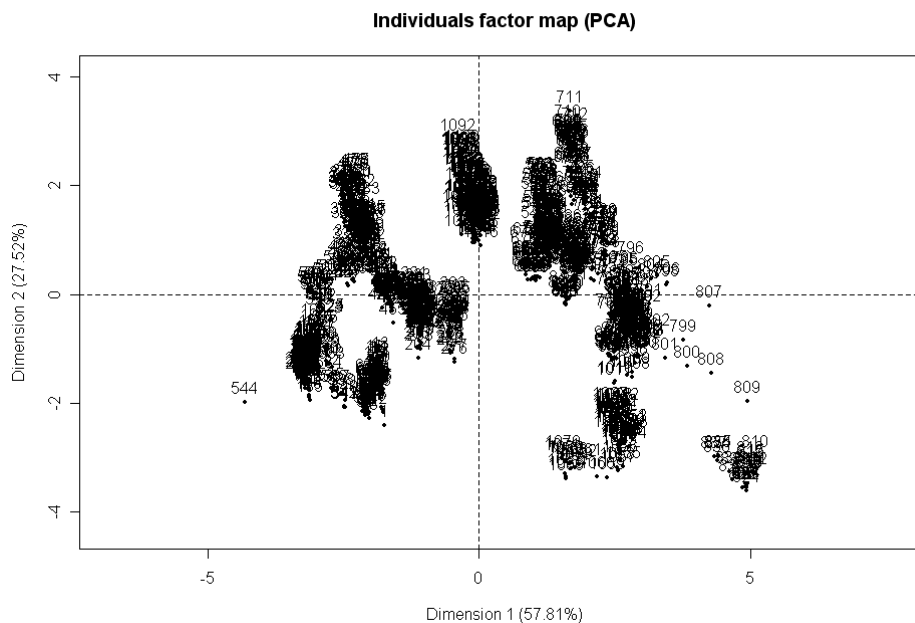


Figure A.IV.57 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 1 côté est

Tableau A.IV.37 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	4.624678e+00	5.780848e+01	57.80848
Comp 2	2.201853e+00	2.752317e+01	85.33165
Comp 3	8.519444e-01	1.064931e+01	95.98095

Tableau A.IV.38 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	0.31551611	-0.3644631	0.87393922
Température	0.94922762	0.2757102	-0.06460385
Cond	0.95742047	0.2574364	-0.04193540
Oxygène	-0.96788392	0.2066044	0.05073416
%oxy	-0.90949877	0.3549840	0.04230046
Fluo	-0.07223791	0.9033220	0.23720619
Trans	0.01817158	-0.9455631	-0.12960493
Salinité	0.96845497	0.2189781	-0.06938985

Tableau A.IV.39 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 côté est

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Température	TRUE	TRUE	TRUE
Cond	TRUE	TRUE	FALSE
Oxygène	TRUE	TRUE	FALSE
%oxy	TRUE	TRUE	FALSE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	FALSE	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE	TRUE

5- ACP CYRCE 3 coté ouest (sans sigma t=densité) :

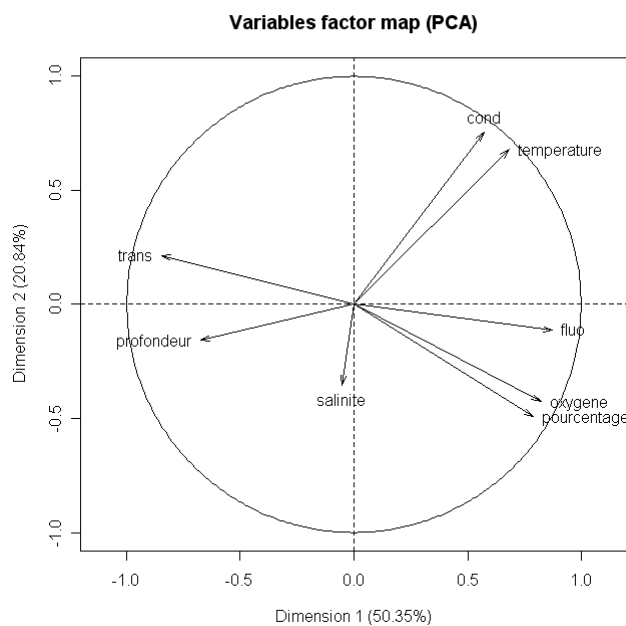


Figure A.IV.58 : Cercle des corrélations pour CYRCE 3 ouest

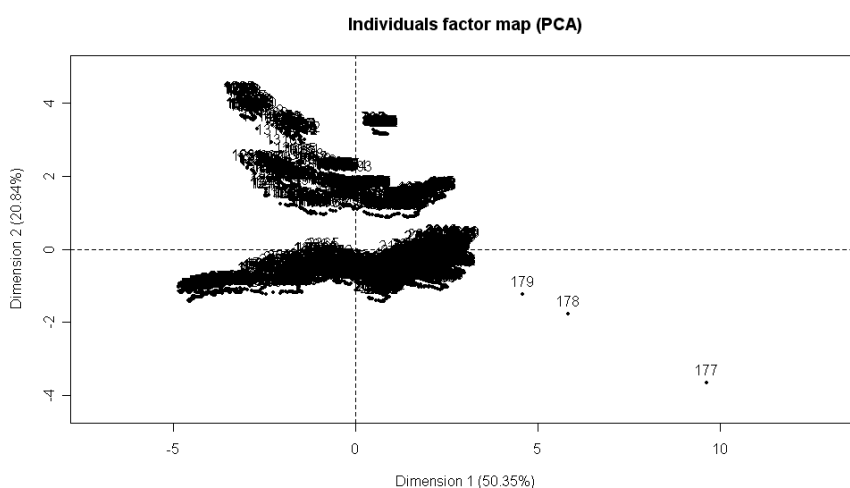


Figure A.IV.59 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 3 ouest

Tableau A.IV.40 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 ouest.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	4.027621e+00	5.034526e+01	50.34526
Comp 2	1.667515e+00	2.084393e+01	71.18919
Comp 3	1.123710e+00	1.404638e+01	85.23557

Tableau A.IV.41 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 ouest.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.67600901	-0.1585329	0.1653047
Température	0.68120871	0.6789784	0.2352966
Cond	0.57163393	0.7563293	0.2791199
Oxygène	0.82181694	-0.4270289	-0.1413174
%oxy	0.78786335	-0.4930330	0.2767703
Fluo	0.87425797	-0.1134240	-0.1417659
Trans	-0.84645729	0.2155806	0.1622764
Salinité	-0.05379125	-0.3529320	0.9055985

Tableau A.IV.42 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 ouest

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Température	TRUE	TRUE	TRUE
Cond	TRUE	TRUE	TRUE
Oxygène	TRUE	TRUE	TRUE
%oxy	TRUE	TRUE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE	TRUE
Salinité	FALSE	TRUE	TRUE

6- ACP CYRCE 3 coté est (sans sigma t=densité) :

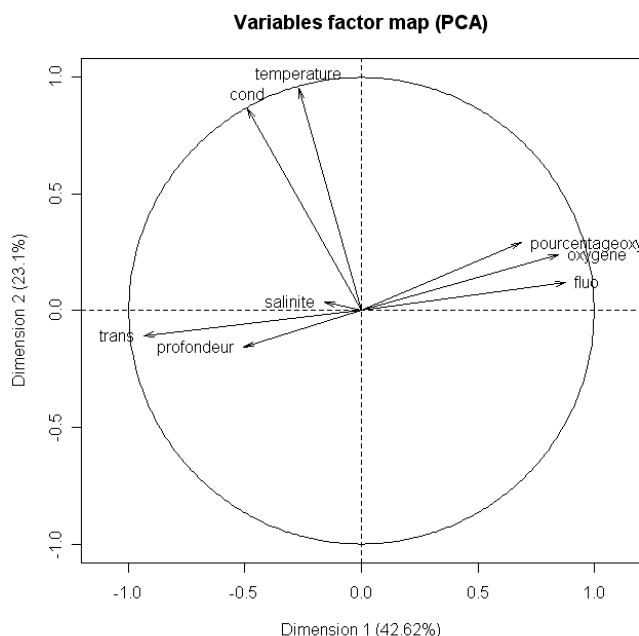


Figure A.IV.60 : Cercle des corrélations pour CYRCE 3 est

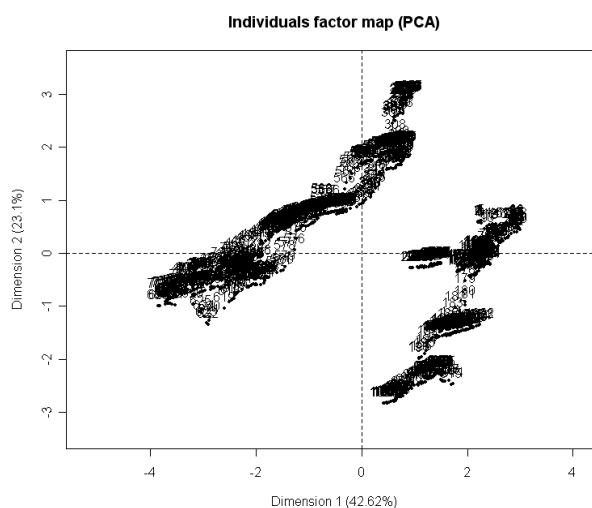


Figure A.IV.61 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 3 est

Tableau A.IV.43 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 est.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	3.409987e+00	4.262484e+01	42.62484
Comp 2	1.848393e+00	2.310491e+01	65.72975
Comp 3	1.438979e+00	1.798724e+01	83.71699

Tableau A.IV.44 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 est.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.5046398	-0.15508315	0.4250000
Température	-0.2684252	0.95194568	-0.1143419
Cond	-0.4898192	0.86532393	-0.0555322
Oxygène	0.8454793	0.23970448	0.1741401
%oxy	0.6857061	0.29073255	0.6399873
Fluo	0.8746530	0.12153769	-0.1787919
Trans	-0.9318166	-0.10590081	0.1461852
Salinité	-0.1581862	0.03722446	0.8654195

Tableau A.IV.45 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 est

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Température	TRUE	TRUE	TRUE
Cond	TRUE	TRUE	FALSE
Oxygène	TRUE	TRUE	TRUE
%oxy	TRUE	TRUE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	FALSE	TRUE

7-ACP CYRCE 4 côté ouest (sans sigma t=densité) :

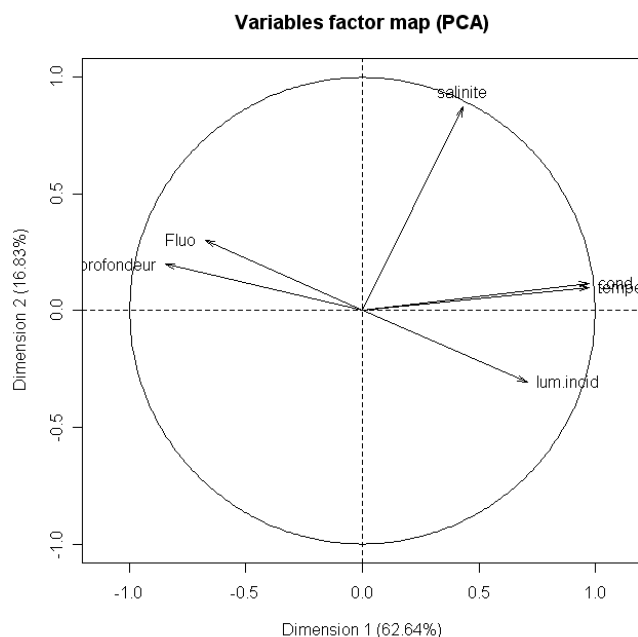


Figure A.IV.62 : Cercle des corrélations pour CYRCE 4 ouest

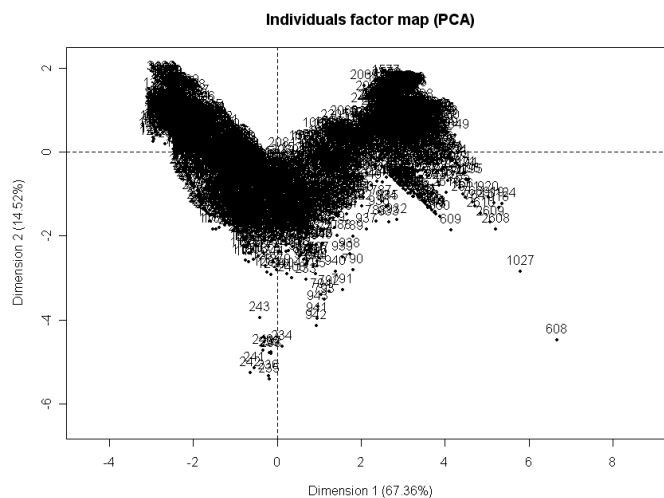


Figure A.IV.63 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 4 ouest

Tableau A.IV.46 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 ouest.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	3.758129e+00	6.263549e+01	62.63549
Comp 2	1.009967e+00	1.683279e+01	79.46828
Comp 3	6.276749e-01	1.046125e+01	89.92953

Tableau A.IV.47 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 ouest.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.8471903	0.19833478	-0.29347834
Température	0.9736961	0.09927324	-0.01274191
Cond	0.9726337	0.11864641	-0.01402587
Fluo	-0.6760839	0.30328516	0.65401292
Salinité	0.4335299	0.87217404	-0.03973037
Lum. incid	0.7079971	-0.30664177	0.33447695

Tableau A.IV.48 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 ouest

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Température	TRUE	TRUE	FALSE
Cond	TRUE	TRUE	FALSE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE	FALSE
Lum. incid	TRUE	TRUE	TRUE

8- ACP CYRCE 4 coté est (sans sigma t=densité) :

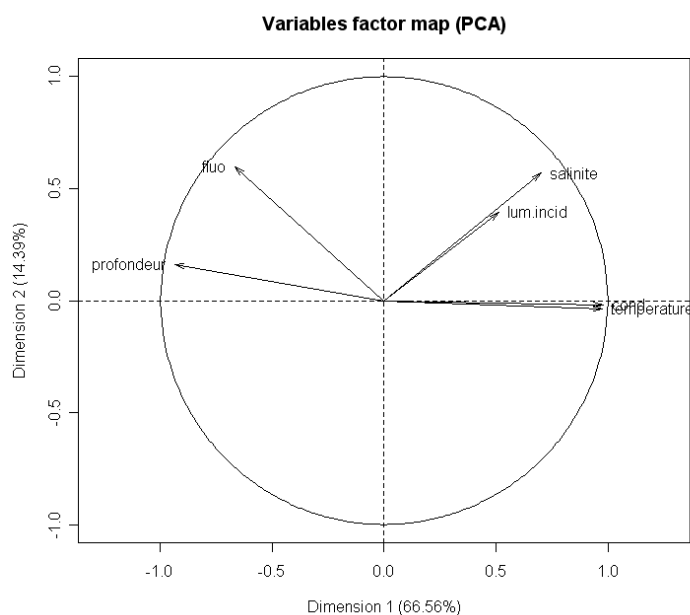


Figure A.IV.64 : Cercle des corrélations pour CYRCE 4 est

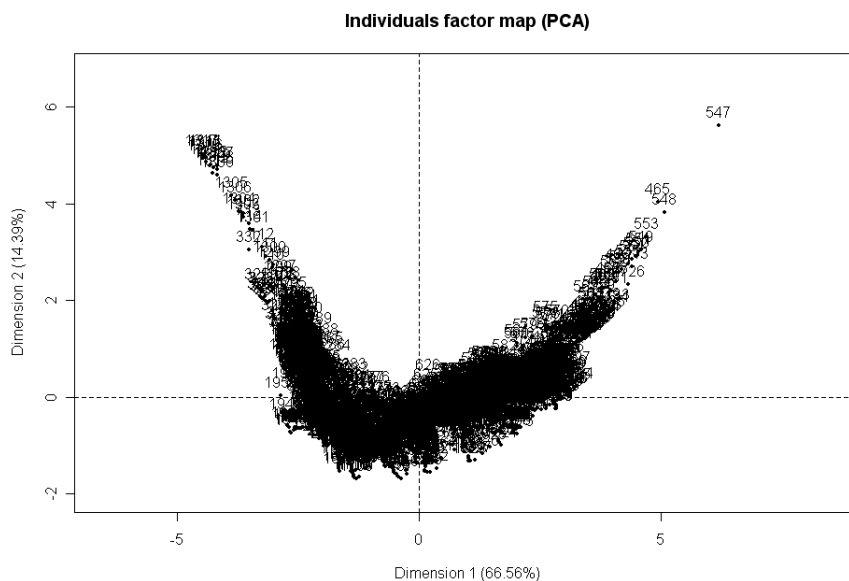


Figure A.IV.65 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 4 est

Tableau A.IV.49 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 est.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	3.993323e+00	6.655538e+01	66.55538
Comp 2	8.634205e-01	1.439034e+01	80.94572
Comp 3	7.831273e-01	1.305212e+01	93.99784

Tableau A.IV.50 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 est.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.9365048	0.16131925	-0.05965215
Température	0.9777960	-0.03534062	0.16555086
Cond	0.9783706	-0.01787982	0.17129996
Fluo	-0.6664497	0.59837662	0.27523733
Salinité	0.7028692	0.56825309	0.26802256
Lum. incid	0.5145943	0.39352479	-0.75843688

Tableau A.IV.51 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 4 est

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	FALSE
Temperature	TRUE	FALSE	TRUE
Cond	TRUE	FALSE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE	TRUE
Lum. incid	TRUE	TRUE	TRUE

9- ACP CYRCE 5 coté ouest (sans sigma t=densité) :

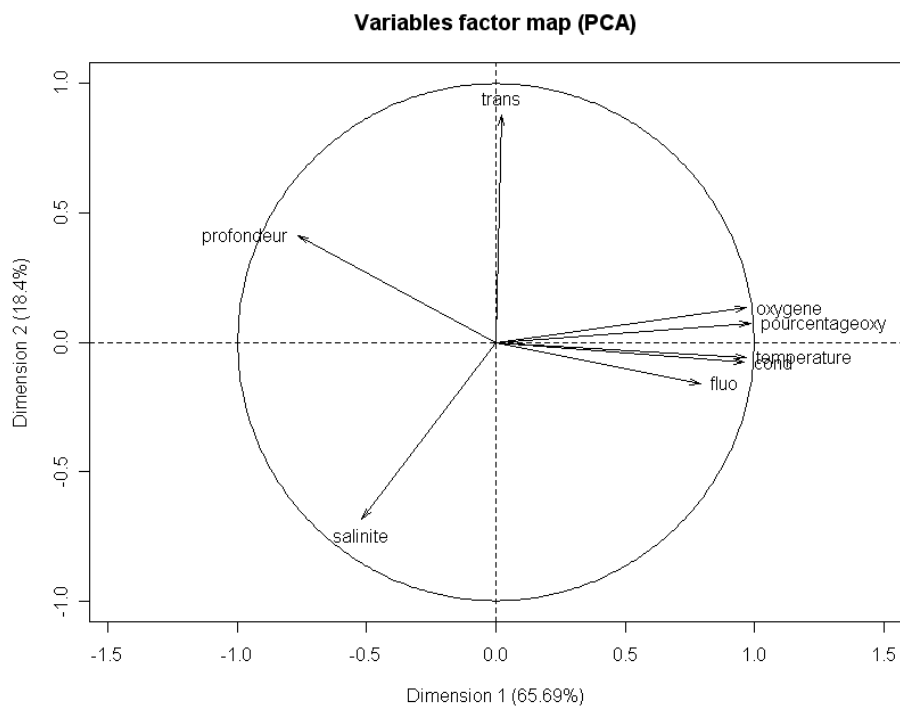


Figure A.IV.66 : Cercle des corrélations pour CYRCE 5 ouest

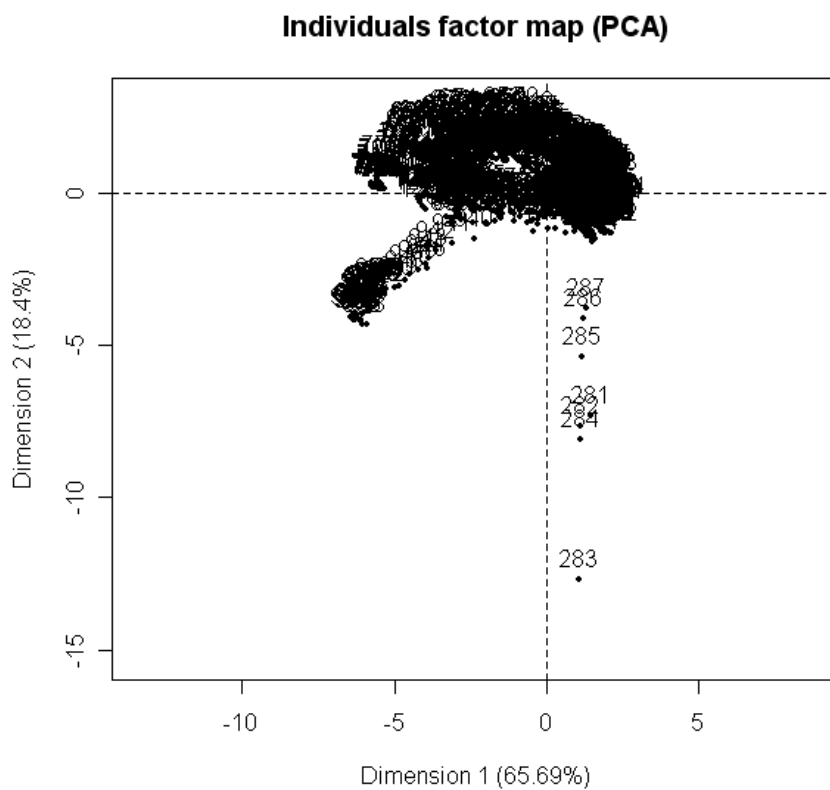


Figure A.IV.67 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 5 ouest

Tableau A.IV.52 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 ouest

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	5.254957e+00	6.568696e+01	65.68696
Comp 2	1.472266e+00	1.840333e+01	84.09029
Comp 3	4.945715e-01	6.182144e+00	90.27243

Tableau A.IV.53 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 ouest.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.76651723	0.41316873	-0.06861018
Température	0.96828155	-0.05746753	0.11904788
Cond	0.96172915	-0.07877347	0.13979107
Oxygène	0.96909380	0.13222832	-0.07311577
%oxy	0.98450229	0.07426291	-0.01376378
Fluo	0.79228738	-0.16087510	0.03440333
Trans	0.02289709	0.88073240	0.45389025
Salinité	-0.51796211	-0.68372548	0.49337097

Tableau A.IV.54 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 ouest

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Température	TRUE	FALSE	TRUE
Cond	TRUE	TRUE	TRUE
Oxygène	TRUE	TRUE	TRUE
%oxy	TRUE	TRUE	FALSE
Fluo	TRUE	TRUE	FALSE
Trans	FALSE	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE	TRUE

10- ACP CYRCE 5 coté est (sans sigma t=densité) :
--

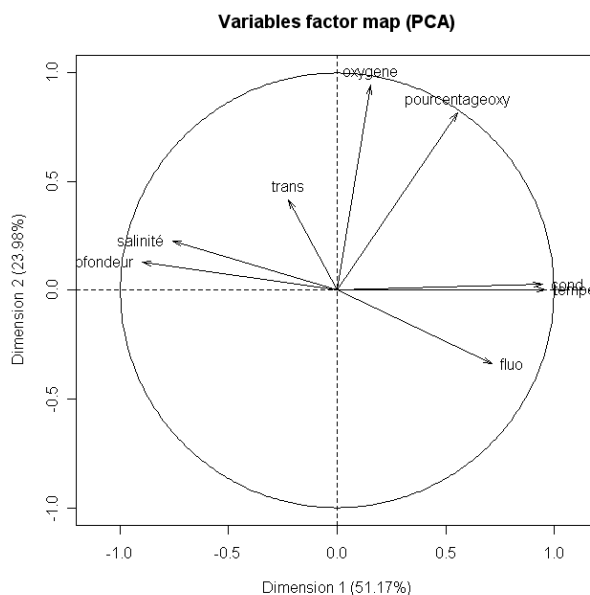


Figure A.IV.68 : Cercle des corrélations pour CYRCE 5 est

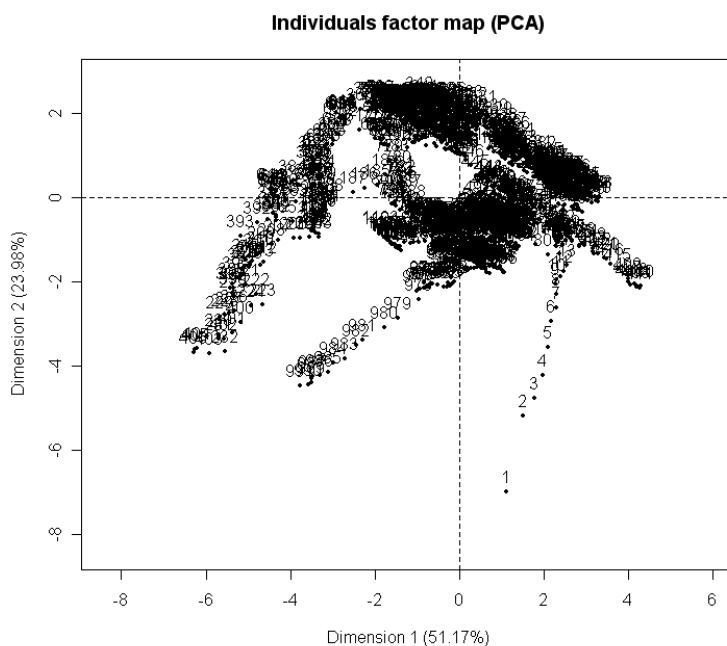


Figure A.IV.69 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 5 est

Tableau A.IV.55 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 est

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	4.093536e+00	5.116919e+01	51.16919
Comp 2	1.918233e+00	2.397792e+01	75.14711
Comp 3	9.452377e-01	1.181547e+01	86.96258

Tableau A.IV.56 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 est.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.8995641	0.129421034	-0.2139268

Température	0.9615019	0.003250421	0.1166903
Cond	0.9456981	0.026510007	0.1435453
Oxygène	0.1538324	0.944976491	-0.2454563
%oxy	0.5537719	0.816093212	-0.1580100
Fluo	0.7143032	-0.338692272	0.0691611
Trans	-0.2241312	0.417989845	0.8500376
Salinité	-0.7580880	0.228808833	0.2295389

Tableau A.IV.57 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5 est

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Temperature	TRUE	FALSE	TRUE
Cond	TRUE	FALSE	TRUE
Oxygène	TRUE	TRUE	TRUE
%oxy	TRUE	TRUE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	FALSE	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE	TRUE

11- ACP CYRCE 6 coté ouest (sans sigma t=densité) :

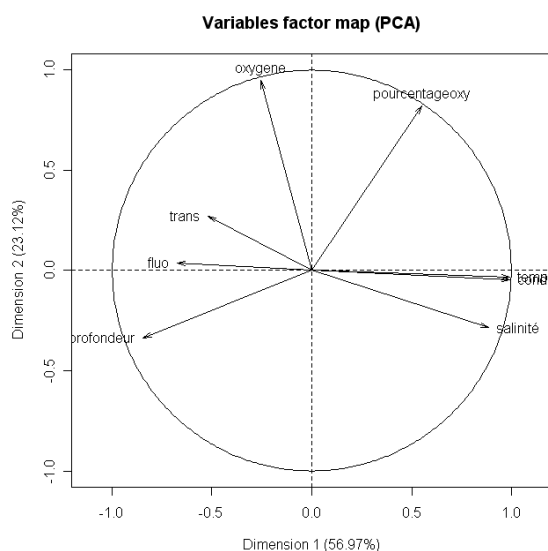


Figure A.IV.70 : Cercle des corrélations pour CYRCE 6 ouest

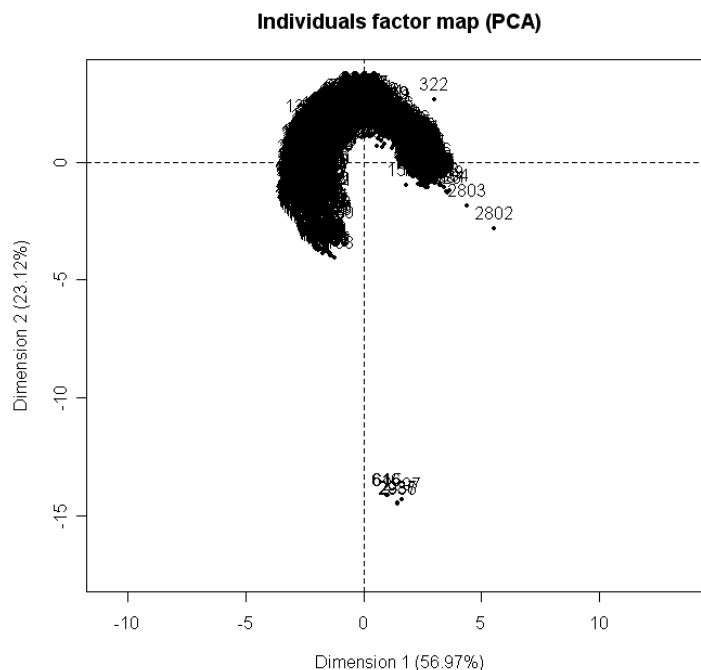


Figure A.IV.71 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 6 ouest

Tableau A.IV.58 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 ouest.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	4.557763e+00	5.697204e+01	56.97204
Comp 2	1.849409e+00	2.311761e+01	80.08966
Comp 3	8.264103e-01	1.033013e+01	90.41978

Tableau A.IV.59 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 ouest.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.8456920	-0.33625591	0.08709788
Température	0.9911009	-0.03104903	0.05269556
Cond	0.9906407	-0.04462127	0.05226874
Oxygène	-0.2546013	0.94816359	-0.10856710
%oxy	0.5493249	0.82294864	-0.05362528
Fluo	-0.6744826	0.03708689	-0.53292776
Trans	-0.5206642	0.27245132	0.71719673
Salinité	0.8867473	-0.28552092	-0.01642361

Tableau A.IV.60 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 ouest

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Temperature	TRUE	FALSE	FALSE
Cond	TRUE	FALSE	FALSE
Oxygène	TRUE	TRUE	TRUE

%oxy	TRUE	TRUE	FALSE
Fluo	TRUE	FALSE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE	TRUE
Salinité	TRUE	TRUE	FALSE

12- ACP CYRCE 6 coté est (sans sigma t=densité) :

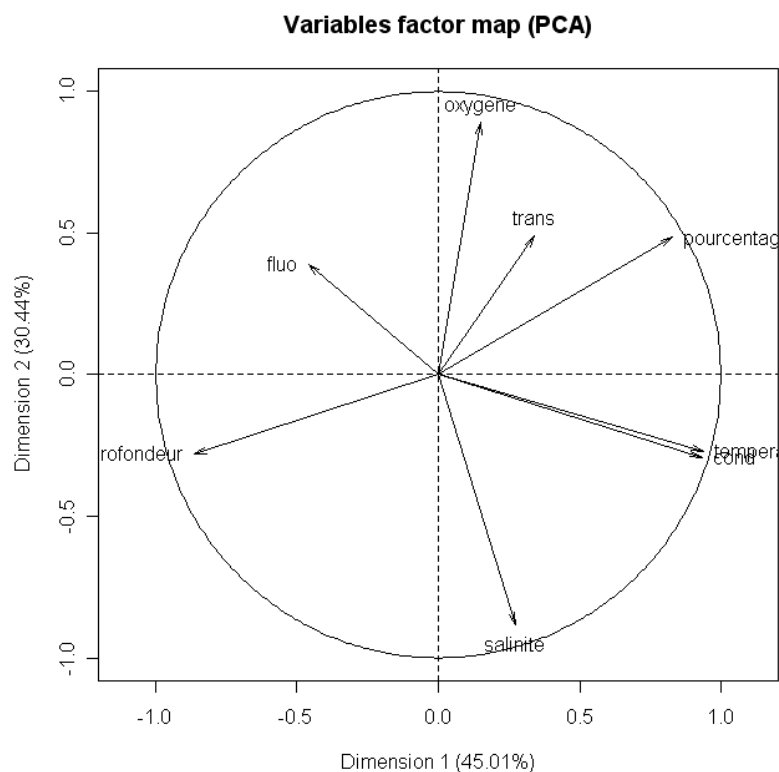


Figure A.IV.72 : Cercle des corrélations pour CYRCE 6 est

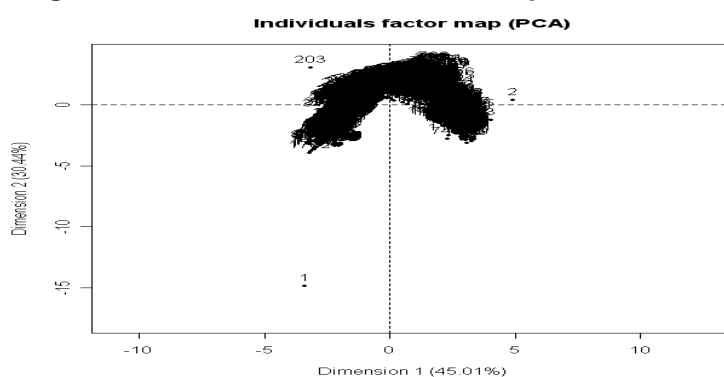


Figure A.IV.73 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée sur CYRCE 6 est

Valeur propre :

Tableau A.IV.61 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 est.

	eigenvalue	% of variance	cumulative % of variance
Comp 1	3.600907e+00	4.501134e+01	45.01134
Comp 2	2.435594e+00	3.044493e+01	75.45626
Comp 3	8.815176e-01	1.101897e+01	86.47523

Tableau A.IV.62 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 est.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	-0.8634371	-0.2800520	-0.24822899
Température	0.9373850	-0.2694194	0.19290886
Cond	0.9318504	-0.2916462	0.18907246
Oxygène	0.1484007	0.8916491	-0.34071532
%oxy	0.8278739	0.4851904	-0.13616974
Fluo	-0.4596822	0.3885549	0.76695653
Trans	0.3405499	0.4893064	-0.04445402
Salinité	0.2714177	-0.8824269	-0.14869479

Tableau A.IV.63 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 6 est

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Profondeur	TRUE	TRUE	TRUE
Température	TRUE	TRUE	TRUE
Cond	TRUE	TRUE	TRUE
Oxygène	TRUE	TRUE	TRUE
%oxy	TRUE	TRUE	TRUE
Fluo	TRUE	TRUE	TRUE
Trans	TRUE	TRUE	FALSE
Salinité	TRUE	TRUE	TRUE

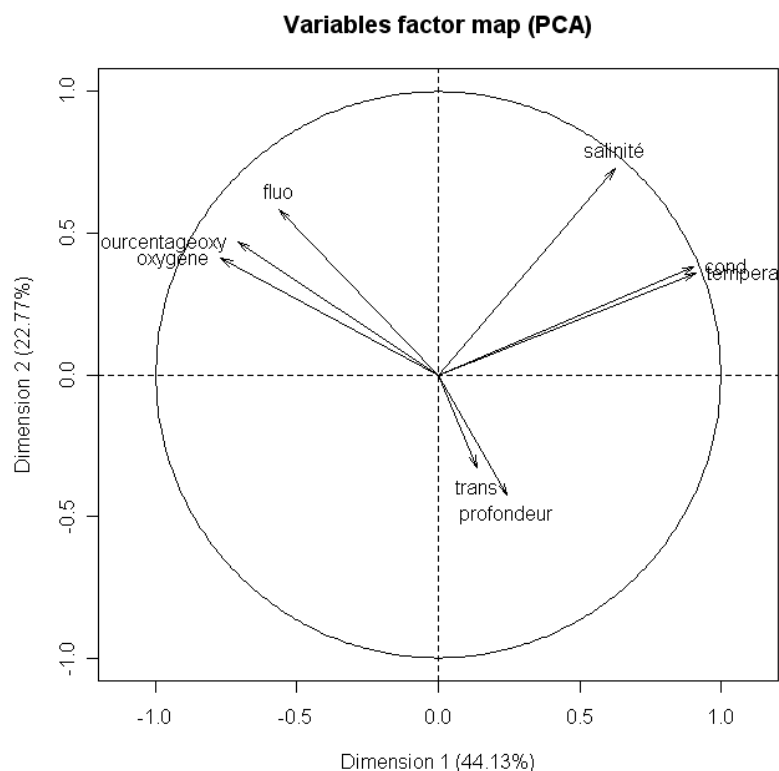
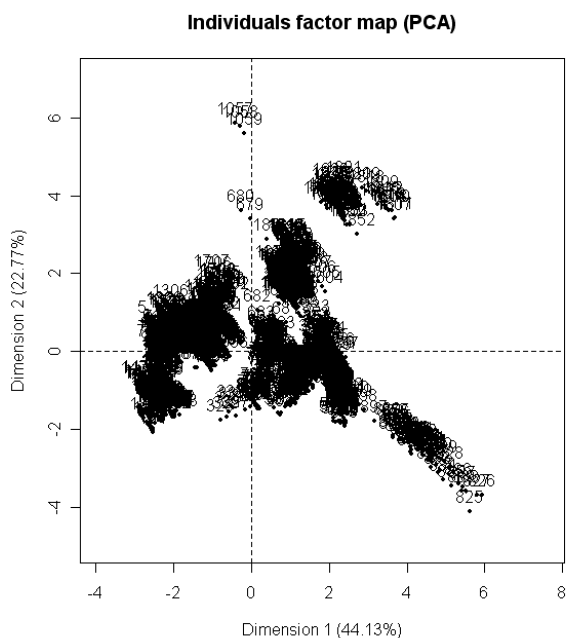
Annexe 7 : ACP effectuée pour connaître les variables dominantes sur la saison hiver à partir de la mission CYRCE 2 (sans sigma T00 =densité)**Figure A.IV.74 : Cercle des corrélations pour la saison d'hiver (CYRCE 2)****Figure A.IV.75 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée pour la saison d'hiver (CYRCE 2)**

Tableau A.IV.64 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2 (hiver).

```
> acpnhiver$eig
      eigenvalue percentage of variance cumulative percentage of variance
comp 1 3.530193e+00      4.412741e+01      44.12741
comp 2 1.821860e+00      2.277326e+01      66.90067
comp 3 1.324546e+00      1.655683e+01      83.45749
comp 4 9.071996e-01      1.134000e+01      94.79749
comp 5 3.196872e-01      3.996090e+00      98.79358
comp 6 9.651203e-02      1.206400e+00      99.99998
comp 7 1.209610e-06      1.512013e-05      99.99999
comp 8 4.809770e-07      6.012213e-06      100.00000
> |
```

Tableau A.IV.65 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2 (hiver).

```
comp 8 4.809770e-07      6.012213e-06      100.00000
> acphiver$var$cor
      Dim.1      Dim.2      Dim.3      Dim.4      Dim.5
profondeur  0.2443886 -0.4240643  0.7691730 -0.214539996  0.35028350
temperature 0.9122303  0.3595392  0.1040402  0.002382063 -0.07758888
cond        0.9045274  0.3808484  0.1561336 -0.002230708 -0.03694563
oxygene     -0.7689129  0.4109265  0.4733941 -0.029996599 -0.12122881
pourcentageoxy -0.7091285  0.4696074  0.5065573 -0.030888450 -0.13476679
fluo        -0.5631509  0.5854879 -0.3209071  0.284991813  0.38285199
trans       0.1356528 -0.3272697  0.3152649  0.878656206 -0.05489818
salinité    0.6249018  0.7269268  0.1210022  0.077785719  0.08459113
> |
```

Tableau A.IV.66/ Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 2 (hiver).

```
> abs(acphiver$var$cor[,1:3])>0.0619
      Dim.1 Dim.2 Dim.3
profondeur  TRUE  TRUE  TRUE
temperature TRUE  TRUE  TRUE
cond        TRUE  TRUE  TRUE
oxygene     TRUE  TRUE  TRUE
pourcentageoxy TRUE  TRUE  TRUE
fluo        TRUE  TRUE  TRUE
trans       TRUE  TRUE  TRUE
salinité    TRUE  TRUE  TRUE
> |
```

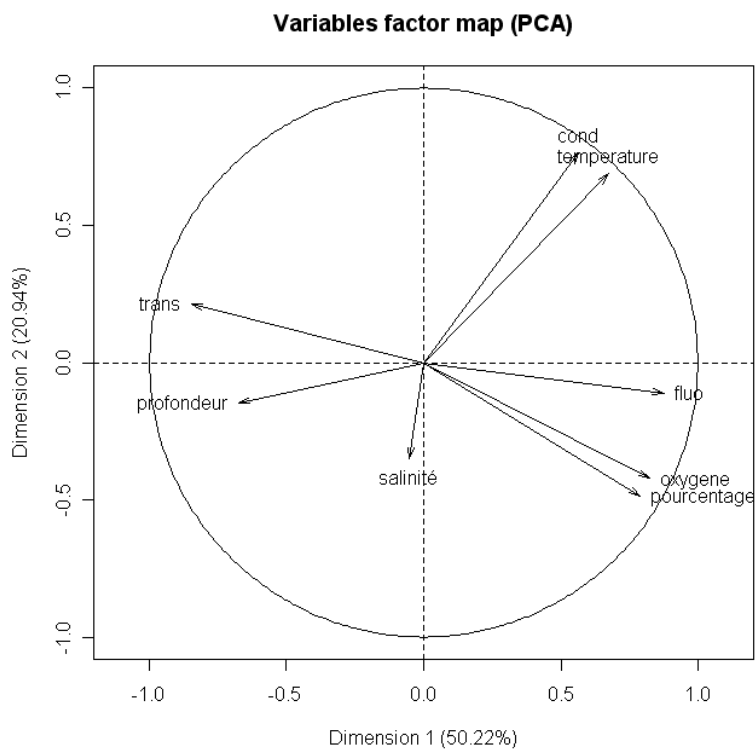
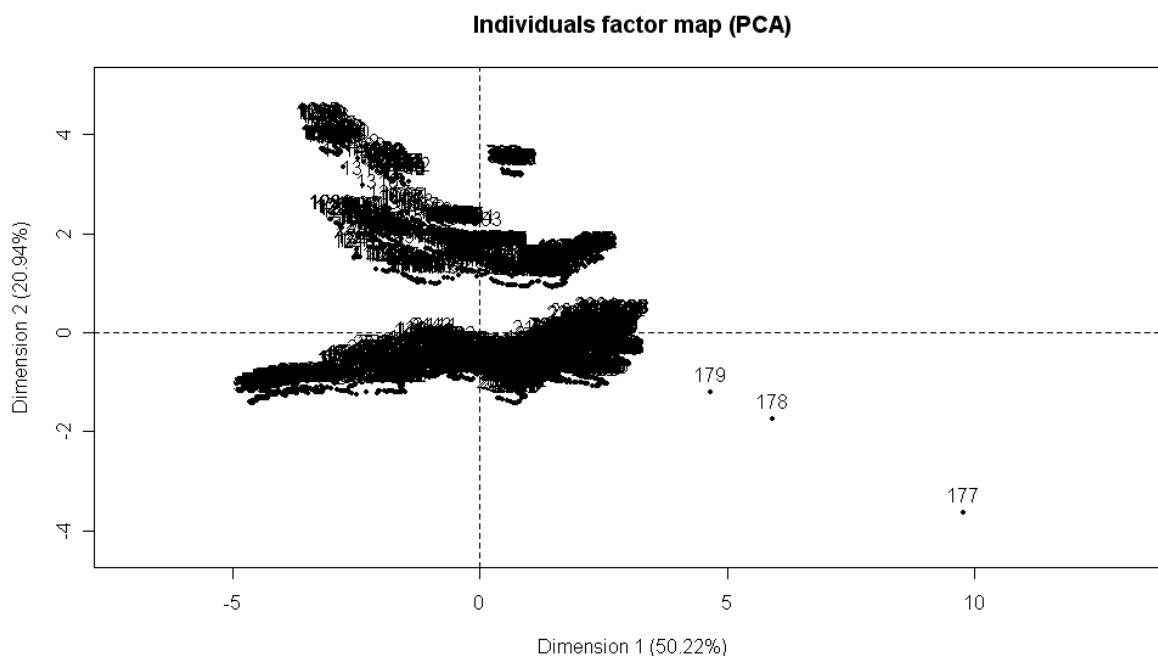
Annexe 8 : ACP effectuée pour connaitre les variables dominantes sur la saison printemps à partir de la mission CYRCE 3 (sans sigma T00 =densité)**Figure A.IV.76 : Cercle des corrélations pour la saison du printemps (CYRCE 3)****Figure A.IV.77 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée pour la saison du printemps (CYRCE 3)**

Tableau A.IV.67 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 (printemps).

```
> acpprintemps=PCA(printemps)
> acpprintemps$eig
      eigenvalue percentage of variance cumulative percentage of variance
comp 1 4.017968e+00      5.022460e+01      50.22460
comp 2 1.675256e+00      2.094070e+01      71.16531
comp 3 1.122819e+00      1.403524e+01      85.20054
comp 4 5.955269e-01      7.444086e+00      92.64463
comp 5 3.919504e-01      4.899380e+00      97.54401
comp 6 1.893602e-01      2.367003e+00      99.91101
comp 7 7.112418e-03      8.890522e-02      99.99992
comp 8 6.554749e-06      8.193436e-05      100.00000
> |
```

Tableau A.IV.68 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 (printemps).

```
comp 8 6.554749e-06      8.193436e-05      100.00000
> acpprintemps$var$cor
      Dim.1      Dim.2      Dim.3      Dim.4      Dim.5
profondeur -0.67487775 -0.1476564  0.1684504  0.690823623 -0.12751144
temperature  0.67416679  0.6872649  0.2330199  0.108886795  0.04672091
cond         0.56439320  0.7637523  0.2761412  0.130443407  0.03579152
oxygene      0.82374817 -0.4227643 -0.1382452  0.187459031  0.29703285
pourcentageoxy 0.79006919 -0.4875119  0.2790776  0.103115781  0.22252842
fluo         0.87493561 -0.1125056 -0.1410524  0.093729012 -0.30299427
trans        -0.84767444  0.2126042  0.1603932  0.009755476  0.35382665
salinité     -0.05131251 -0.3514935  0.9062414 -0.186450451 -0.13221625
> |
```

Tableau A.IV.69 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 3 (printemps).

```
salinité      -0.05131251 -0.3514935  0.9
> abs(acpprintemps$var$cor[,1:3])>0.0619
      Dim.1 Dim.2 Dim.3
profondeur  TRUE  TRUE  TRUE
temperature  TRUE  TRUE  TRUE
cond         TRUE  TRUE  TRUE
oxygene      TRUE  TRUE  TRUE
pourcentageoxy TRUE  TRUE  TRUE
fluo         TRUE  TRUE  TRUE
trans        TRUE  TRUE  TRUE
salinité     FALSE TRUE  TRUE
> |
```


Annexe 9 : ACP effectuée pour connaître les variables dominantes sur la saison d'été à partir de la mission CYRCE 1, 4 et 6 (sans sigma T00 =densité)

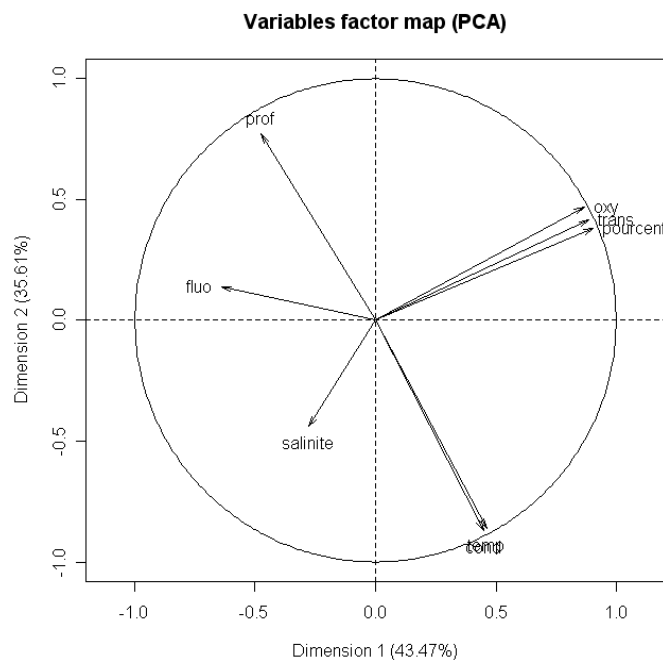


Figure A.IV.78 : Cercle des corrélations pour la saison d'été (CYRCE 1, 4 et 6)

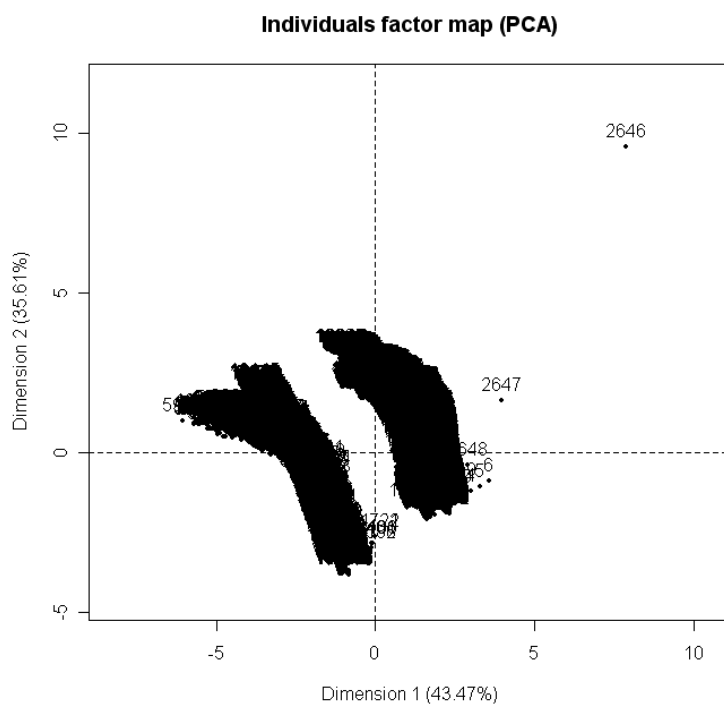


Figure A.IV.79 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée pour la saison d'été (CYRCE 1, 2 et 6)

Tableau A.IV.70 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1, 4 et 6.

```
> acpete$eig
      eigenvalue percentage of variance cumulative percentage of variance
comp 1 3.477821e+00          4.347276e+01          43.47276
comp 2 2.848911e+00          3.561139e+01          79.08414
comp 3 8.080811e-01          1.010101e+01          89.18516
comp 4 6.526111e-01          8.157638e+00          97.34280
comp 5 2.035842e-01          2.544803e+00          99.88760
comp 6 6.595259e-03          8.244073e-02          99.97004
comp 7 2.380261e-03          2.975326e-02          99.99979
comp 8 1.650253e-05          2.062816e-04          100.00000
> |
```

Tableau A.IV.71 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1, 4 et 6.

```
> acpete$var$cor
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
prof   -0.4767500  0.7717105  0.15095628 -0.13990883  0.36711882
temp    0.4608982 -0.8614815 -0.08828451  0.07583869  0.17845999
cond    0.4472983 -0.8706126 -0.05578506  0.07915780  0.18045088
oxy     0.8655868  0.4705741  0.11331822  0.11663659 -0.02579167
pourcentageoxy 0.9041699  0.3824921  0.09719064  0.15569501  0.01036107
fluo   -0.6402191  0.1388023 -0.10375204  0.74779684  0.02977912
trans   0.8856290  0.4154724  0.13682429  0.13603988  0.03874931
salinite -0.2775686 -0.4400382  0.85006751  0.07394009 -0.03516628
> |
```

Tableau A.IV.72 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1, 4 et 6.

```
salinite      -0.2775686 -0.4400382
> abs(acpete$var$cor[,1:3])>0.0619
      Dim.1 Dim.2 Dim.3
prof      TRUE  TRUE  TRUE
temp      TRUE  TRUE  TRUE
cond      TRUE  TRUE FALSE
oxy       TRUE  TRUE  TRUE
pourcentageoxy TRUE  TRUE  TRUE
fluo      TRUE  TRUE  TRUE
trans     TRUE  TRUE  TRUE
salinite  TRUE  TRUE  TRUE
> |
```

ACP effectuée pour connaître les variables forçantes sur la saison d'été mais uniquement à partir de CYRCE1 et CYRCE 6 car CYRCE 4 ne possède pas les variables oxygène dissous et transmission.

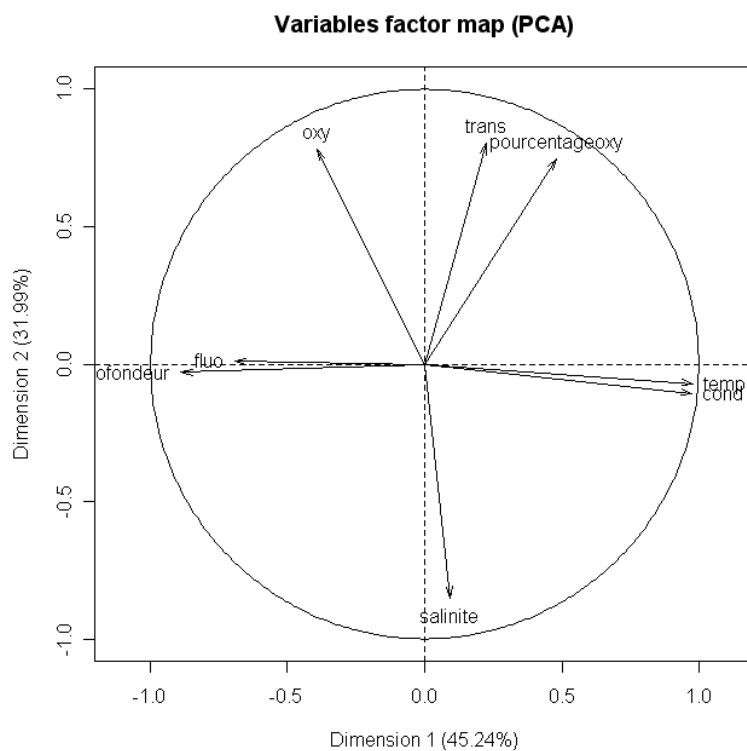


Figure A.IV.80 : Cercle des corrélations pour la saison d'été (CYRCE 1 et 6)

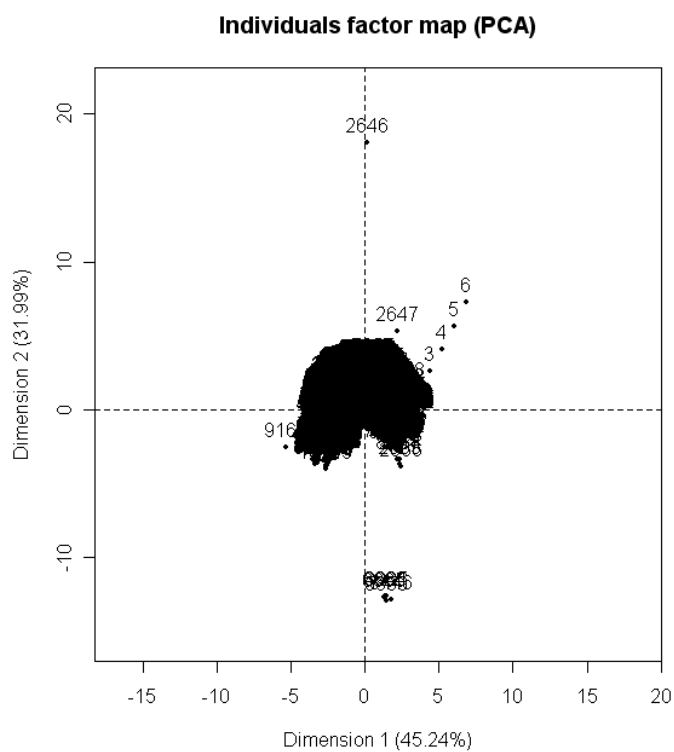


Figure A.IV.81 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée pour la saison d'été (CYRCE 1 et 6)

Tableau A.IV.73 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 et 6.

```
> acpete2=PCA(ete2)
> acpete2$eig
      eigenvalue percentage of variance cumulative percentage of variance
comp 1 3.618955e+00          4.523694e+01          45.23694
comp 2 2.559432e+00          3.199289e+01          77.22983
comp 3 8.529743e-01          1.066218e+01          87.89201
comp 4 6.076325e-01          7.595407e+00          95.48742
comp 5 2.486834e-01          3.108542e+00          98.59596
comp 6 9.496577e-02          1.187072e+00          99.78303
comp 7 1.734607e-02          2.168259e-01          99.99986
comp 8 1.133567e-05          1.416958e-04          100.00000
> |
```

Tableau A.IV.74 / Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 et 6.

```
comp 8 1.133567e-05          1.416958e-04          100.00000
> acpete2$var$cor
      Dim.1      Dim.2      Dim.3      Dim.4      Dim.5
profondeur -0.88779914 -0.030351070 -0.25487142 -0.22251550 0.24869408
temp        0.97821606 -0.070625867 -0.10686238 0.12381248 0.05039155
cond        0.97551232 -0.106269819 -0.09611838 0.12501785 0.06523084
oxy         -0.39335665 0.783374132 0.46800227 -0.04594317 0.03605022
pourcentageoxy 0.47896537 0.748723207 0.41987264 0.05460901 0.10544645
fluo        -0.69161656 0.009896915 -0.03711037 0.72026979 0.01954358
trans       0.22597276 0.803176086 -0.47161276 0.04348425 0.23957535
salinite    0.09328664 -0.850163422 0.38502156 0.03725625 0.33142626
> |
```

Tableau A.IV.75 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 1 et 6

```
> abs(acpete2$var$cor[,1:3])>0.0619
      Dim.1 Dim.2 Dim.3
profondeur TRUE FALSE TRUE
temp       TRUE TRUE TRUE
cond       TRUE TRUE TRUE
oxy        TRUE TRUE TRUE
pourcentageoxy TRUE TRUE TRUE
fluo       TRUE FALSE FALSE
trans      TRUE TRUE TRUE
salinite   TRUE TRUE TRUE
> |
```

Annexe 10 : ACP effectuée pour connaître les variables dominantes sur la saison d'automne à partir de la mission CYRCE 5 (sans sigma T00 =densité)

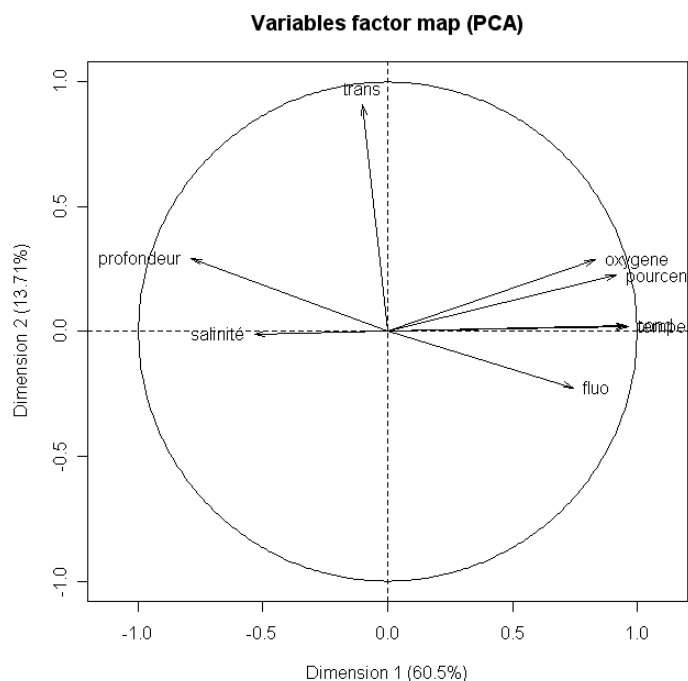


Figure A.IV.82 : Cercle des corrélations pour la saison d'automne effectuée sur CYRCE 5

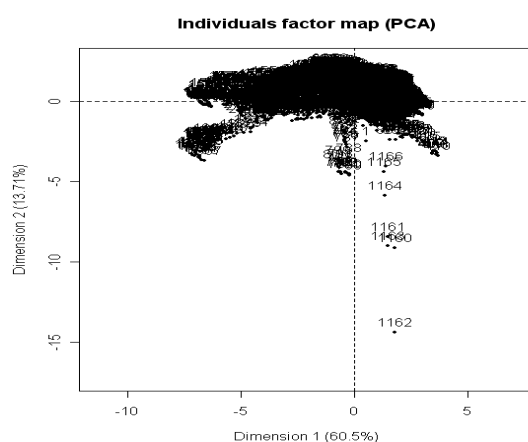


Figure A.IV.83 : Nuage d'individu issu de l'ACP effectuée pour la saison d'automne sur CYRCE 5

Tableau A.IV.76 : Tableau des valeurs propres de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5.

```
> acpautomne=PCA(automne)
> acpautomne$eig
      eigenvalue percentage of variance cumulative percentage of variance
comp 1  4.840289e+00      6.050361e+01      60.50361
comp 2  1.097107e+00      1.371384e+01      74.21745
comp 3  8.122220e-01      1.015277e+01      84.37023
comp 4  6.364871e-01      7.956089e+00      92.32632
comp 5  3.952953e-01      4.941191e+00      97.26751
comp 6  2.185171e-01      2.731463e+00      99.99897
comp 7  8.070317e-05      1.008790e-03      99.99998
comp 8  1.517652e-06      1.897065e-05      100.00000
> |
```

Tableau A.IV.77 : Tableau des corrélations des variables/dimension de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5.

```
comp 8 1.517652e-06          1.897065e-05          100.00000
> acpautomne$var$cor
      Dim.1      Dim.2      Dim.3      Dim.4      Dim.5
profondeur -0.7884055  0.294207320  0.08143979 -0.31376671  0.33157359
temperature 0.9628344  0.019250069  0.02807090  0.08370659 -0.12065312
cond        0.9557923  0.023394345  0.06878846  0.10482591 -0.11868757
oxygene     0.8308215  0.287714748  0.31131020 -0.29705848  0.11393966
pourcentageoxy 0.9159140  0.225123738  0.25137999 -0.20157659  0.05173640
fluo        0.7448258 -0.224674165 -0.19619443  0.34088366  0.48890420
trans       -0.1012236  0.908624992 -0.23023908  0.32975090 -0.02939438
salinité    -0.5328623 -0.009652932  0.74058186  0.40771082  0.03406020
. |
```

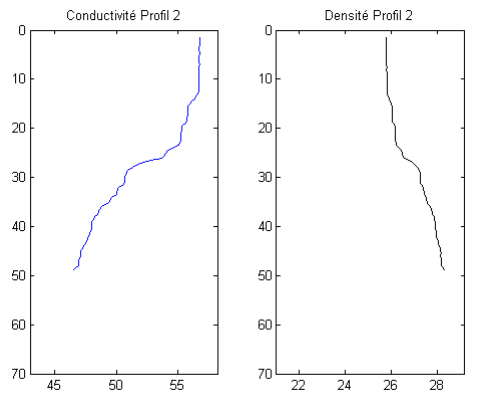
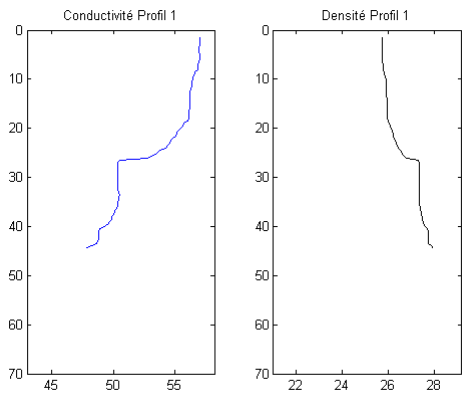
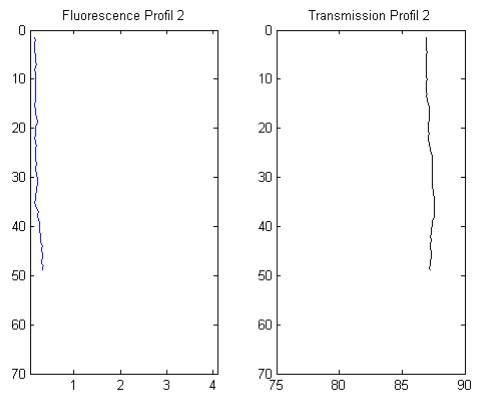
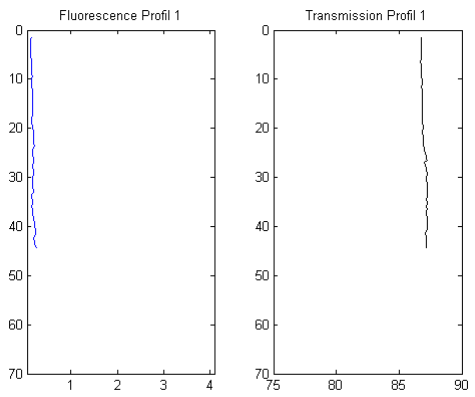
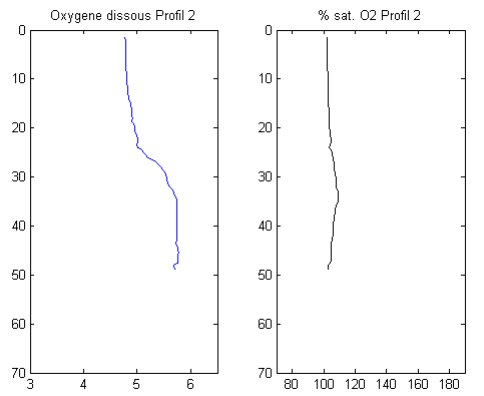
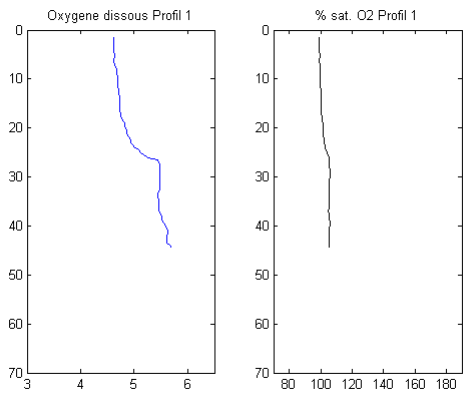
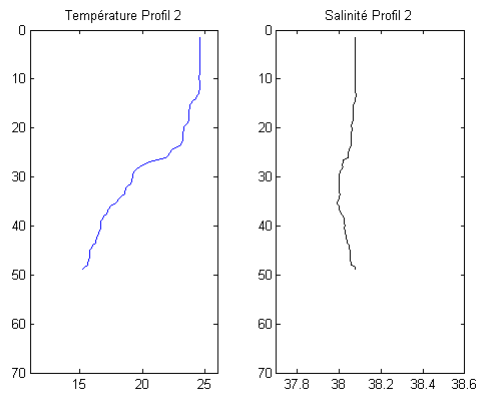
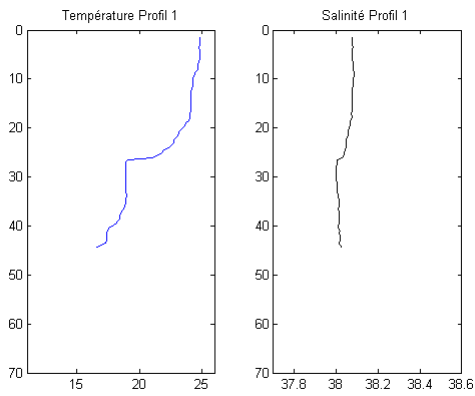
Tableau A.IV.78 : Tableau activations des variables sur les dimensions de l'ACP effectuée sur les variables de CYRCE 5

```
> abs(acpautomne$var$cor[, 1:3]) > 0.0619
      Dim.1 Dim.2 Dim.3
profondeur  TRUE  TRUE  TRUE
temperature TRUE FALSE FALSE
cond        TRUE FALSE  TRUE
oxygene     TRUE  TRUE  TRUE
pourcentageoxy TRUE  TRUE  TRUE
fluo        TRUE  TRUE  TRUE
trans       TRUE  TRUE  TRUE
salinité    TRUE FALSE  TRUE
> |
```

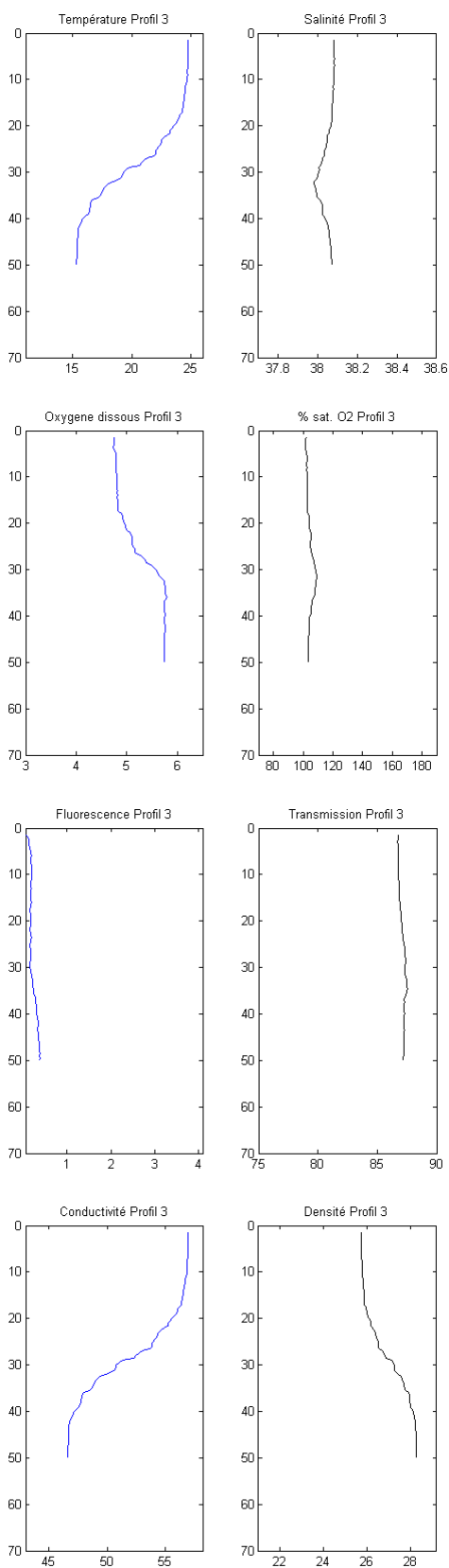
Annexe 11 : Profils hydrologiques réalisés durant les missions CYRCE

Profil 1-Station 1

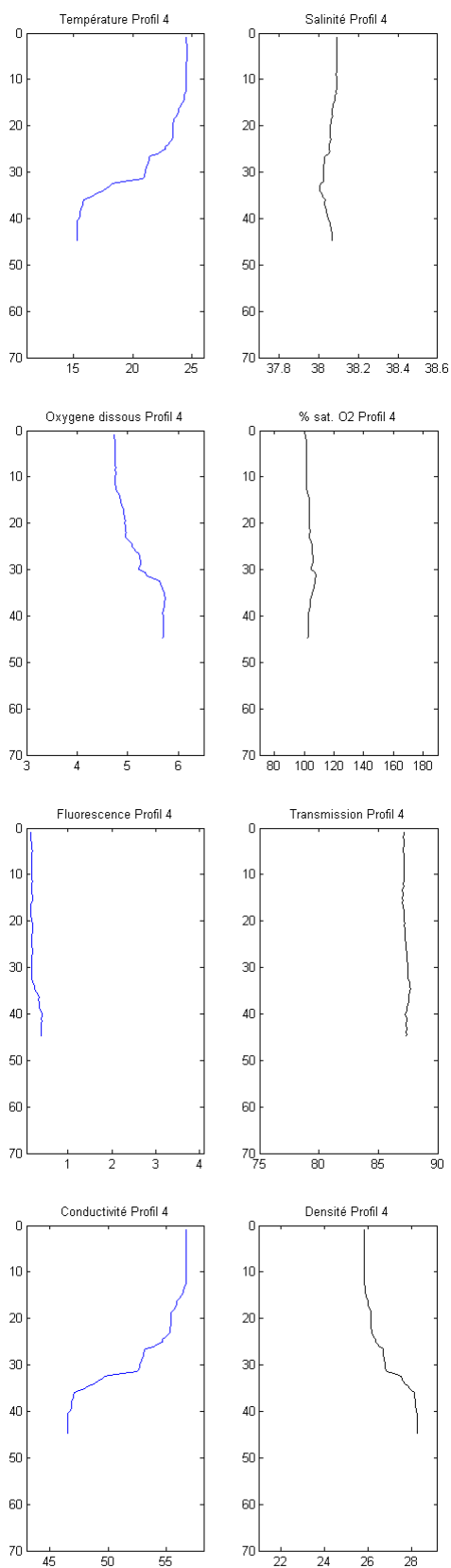
Profil 2-Station 2



Profil 3-Station 1

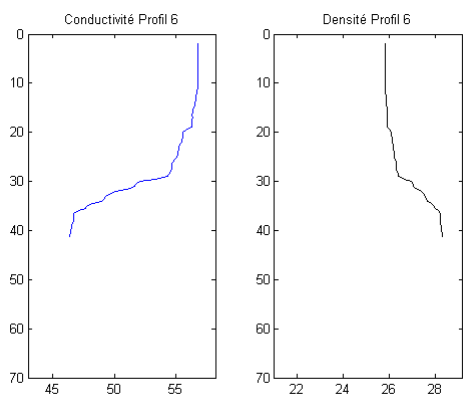
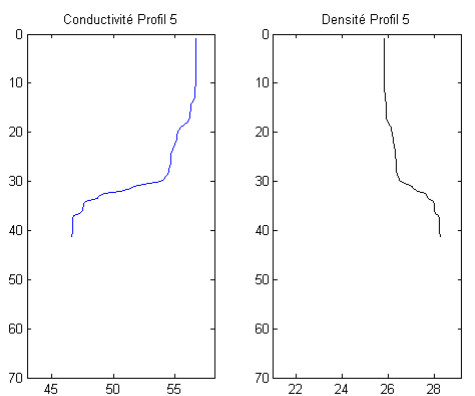
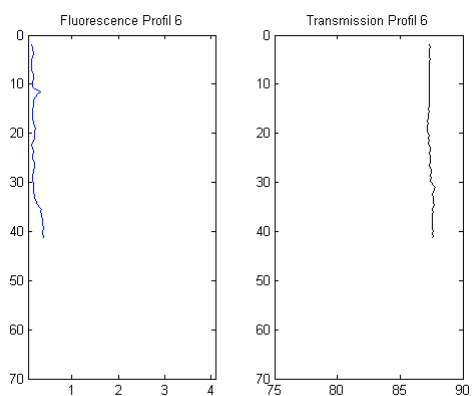
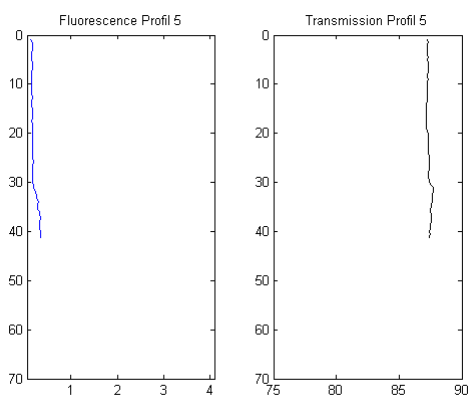
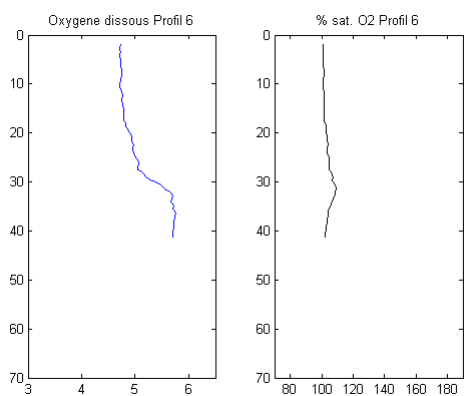
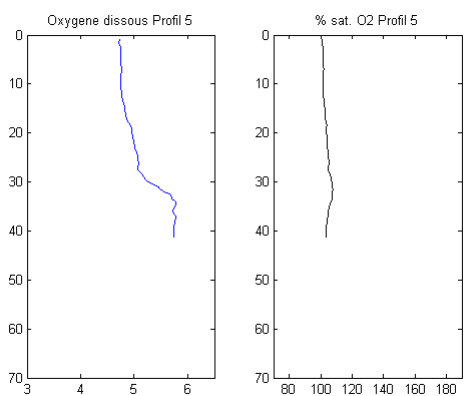
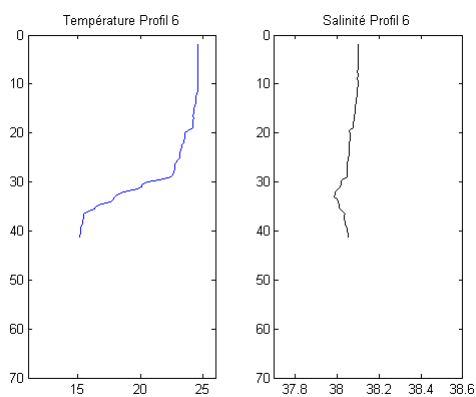
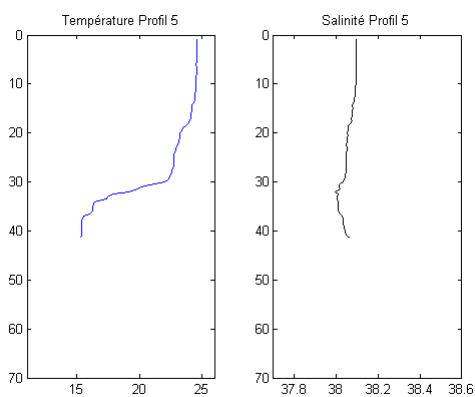


Profil 4-Station 16

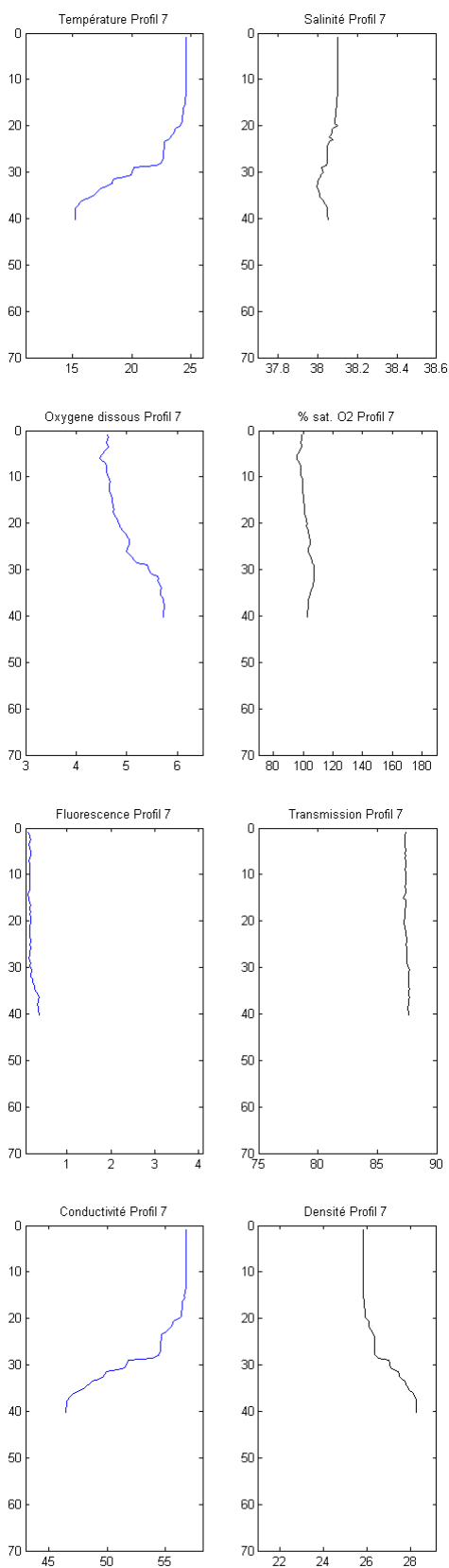


Profil 5 -Station 1

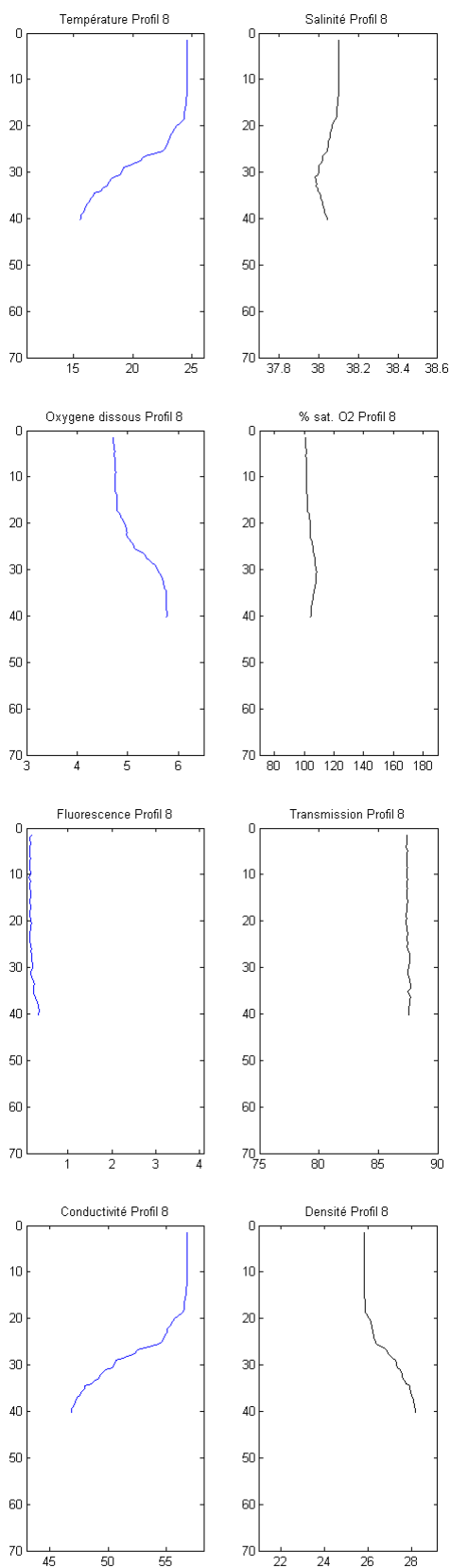
Profil 6 -Station 13



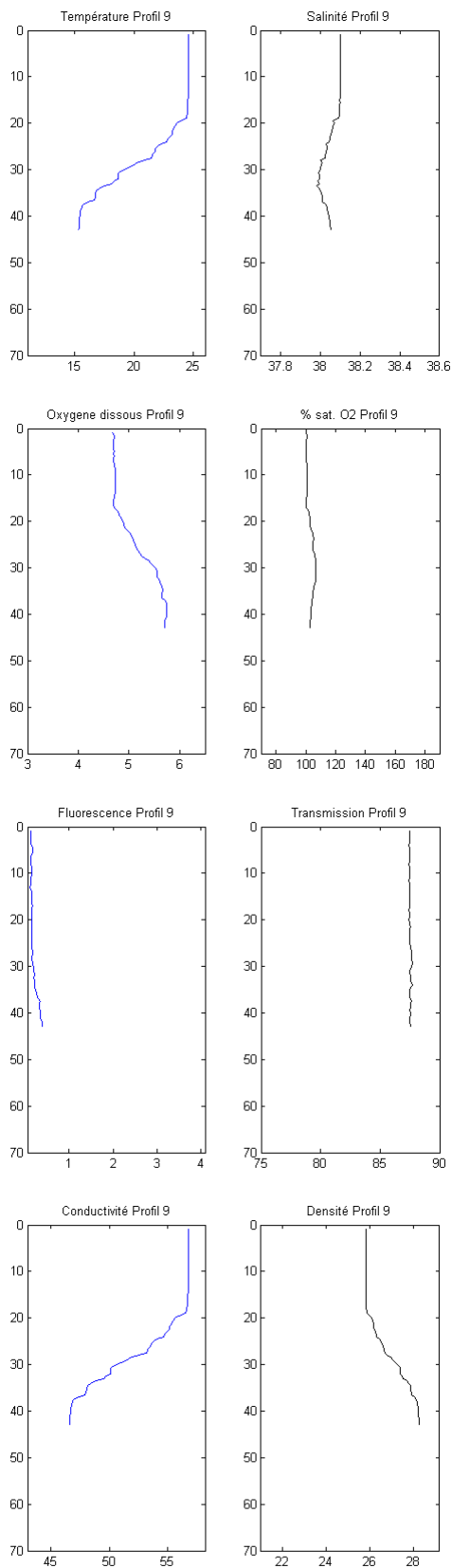
Profil 7 -Station 1



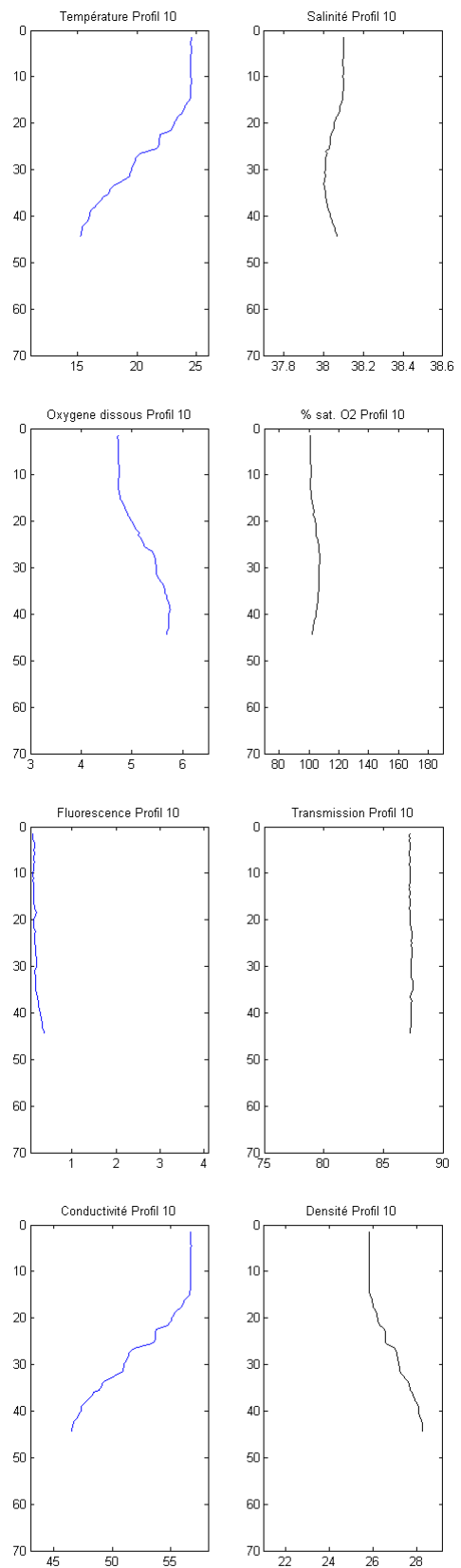
Profil 8 -Station 15



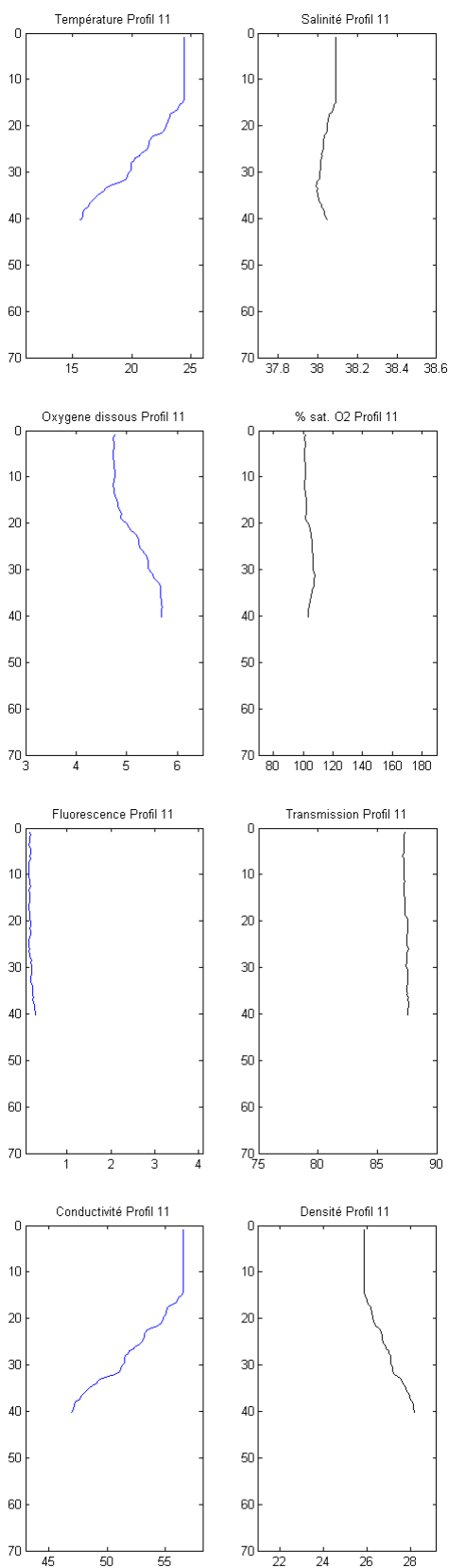
Profil 9 – Station 1



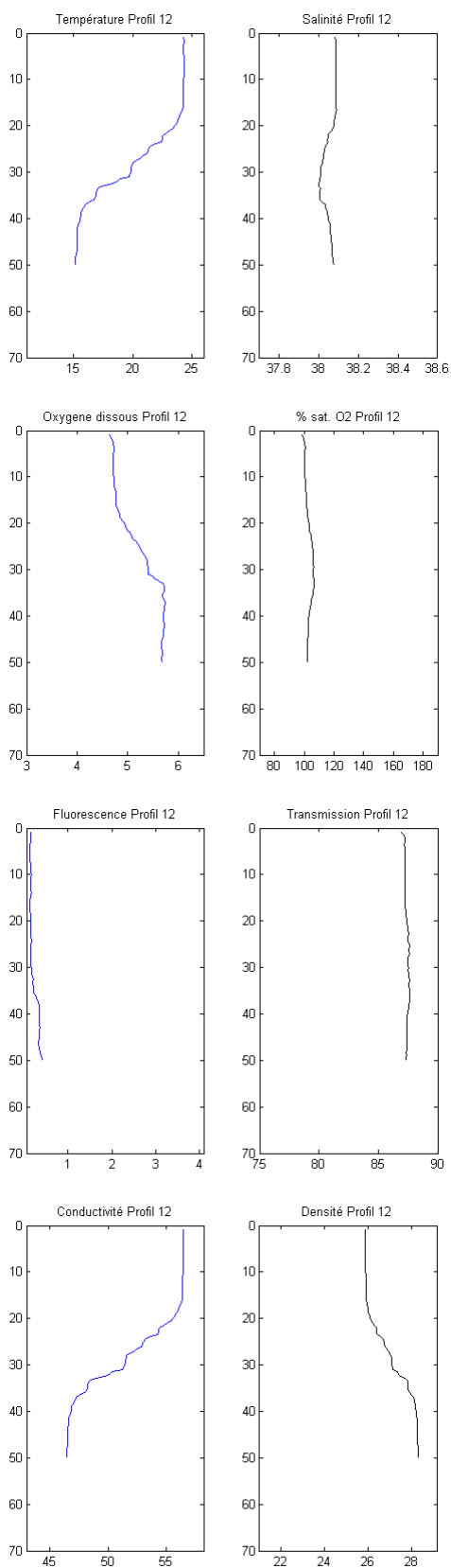
Profil 10 – Station 10



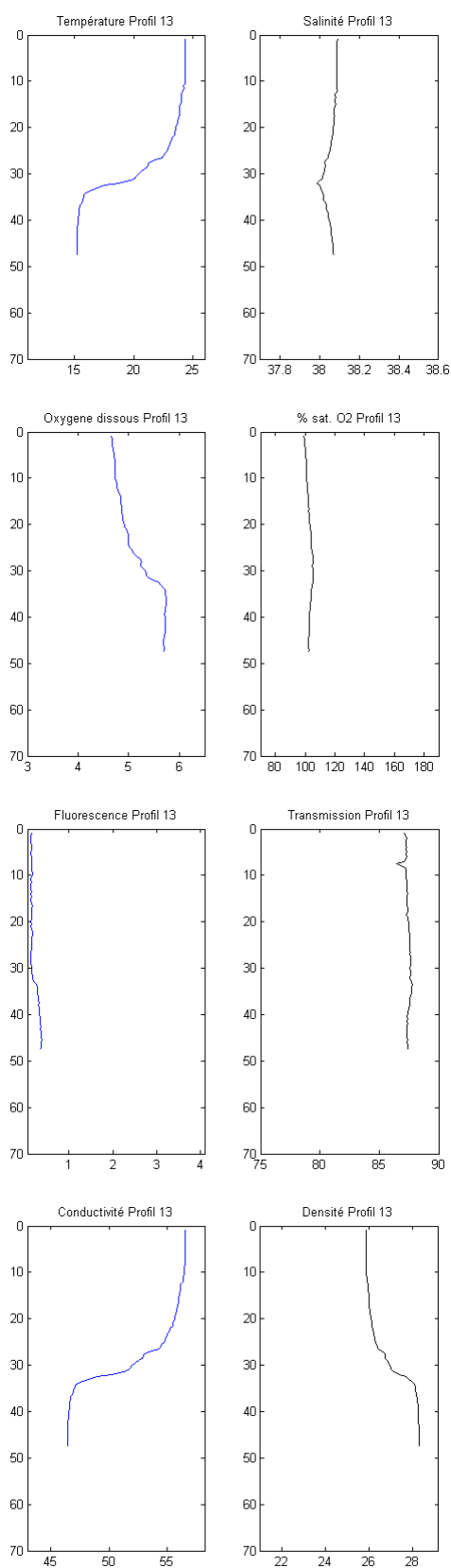
Profil 11 – Station 1



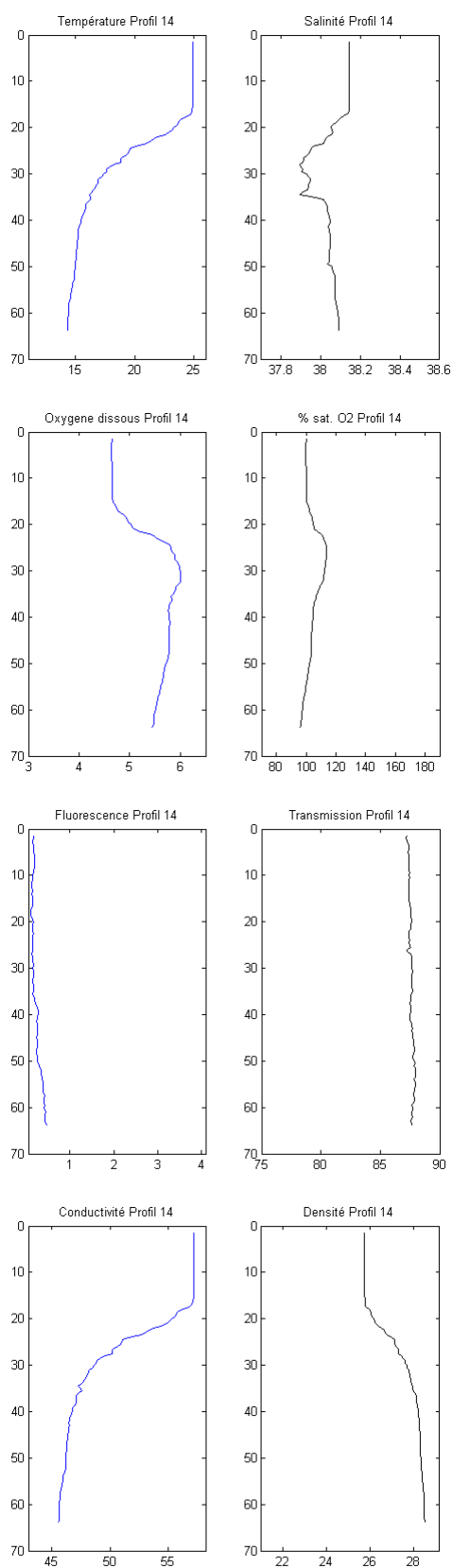
Profil 12 – Station 14



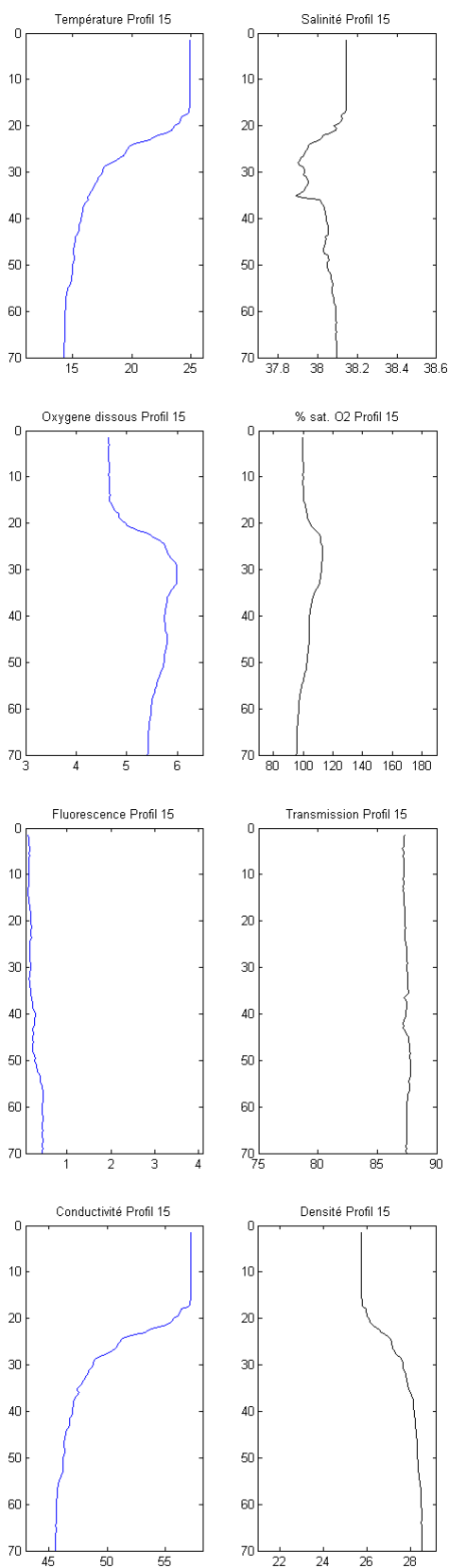
Profil 13 – Station 1



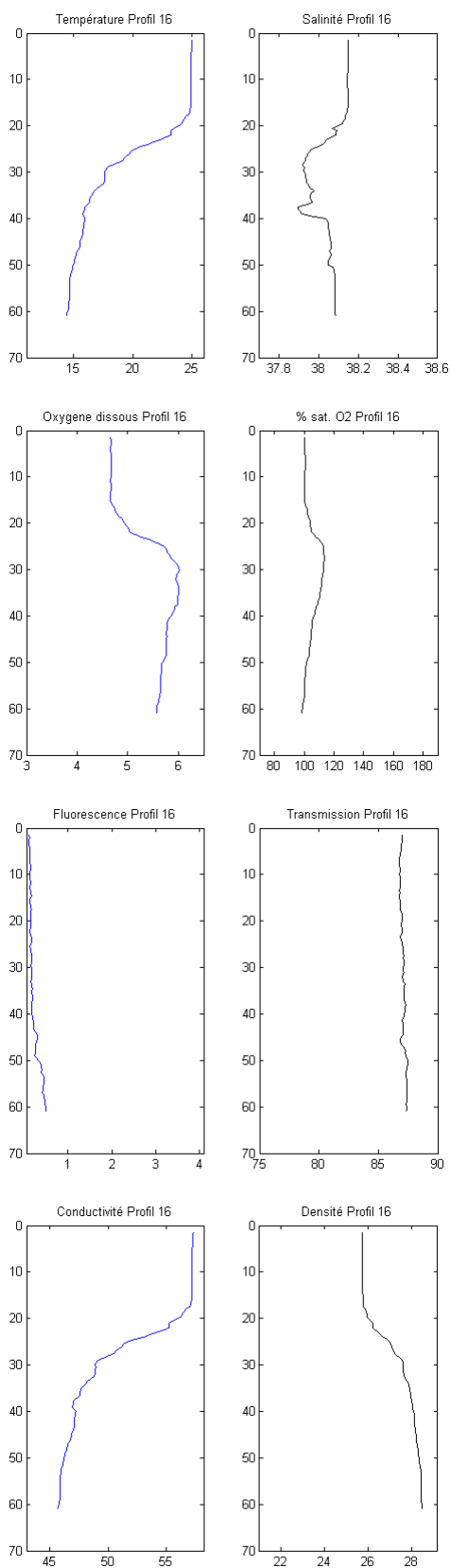
Profil 14 – Station 4



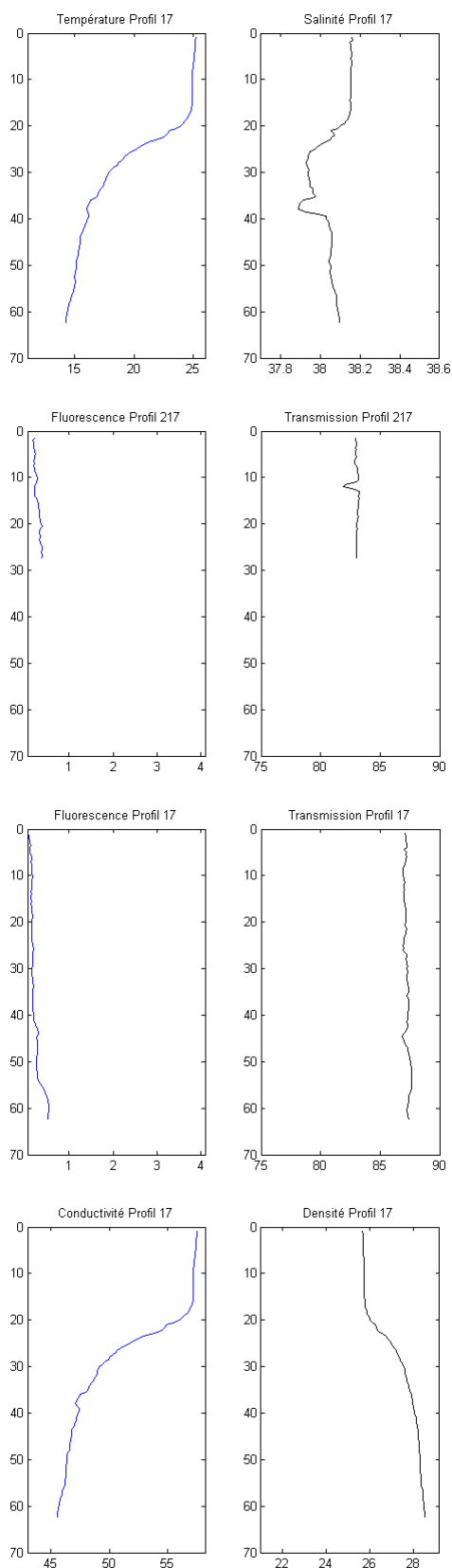
Profil 15 – Station 5



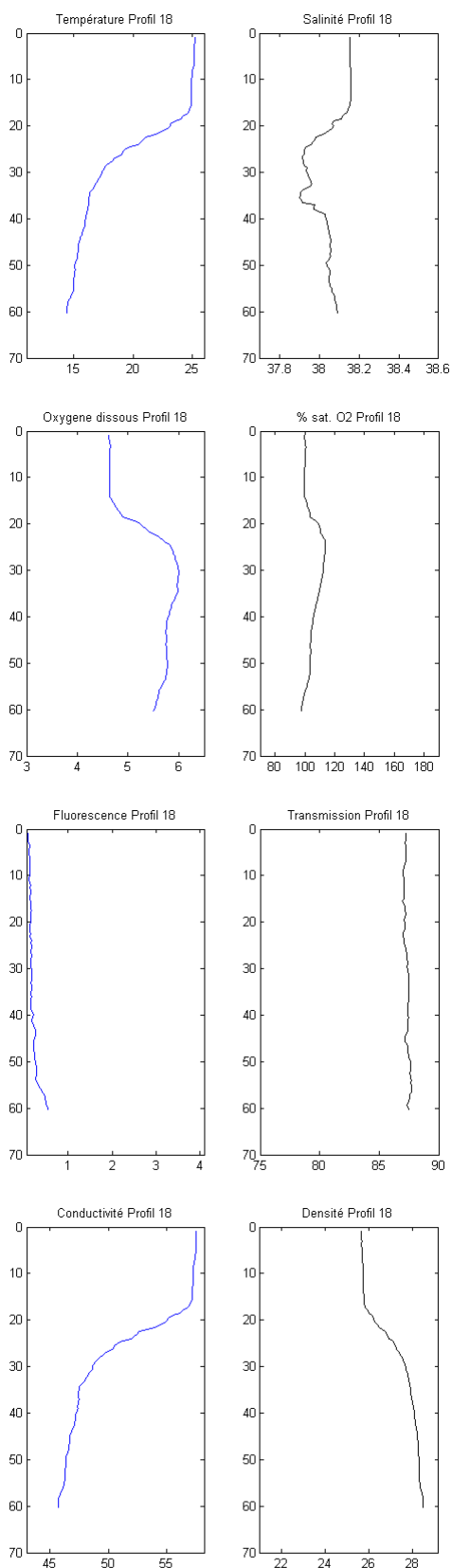
Profil 16 – Station 12



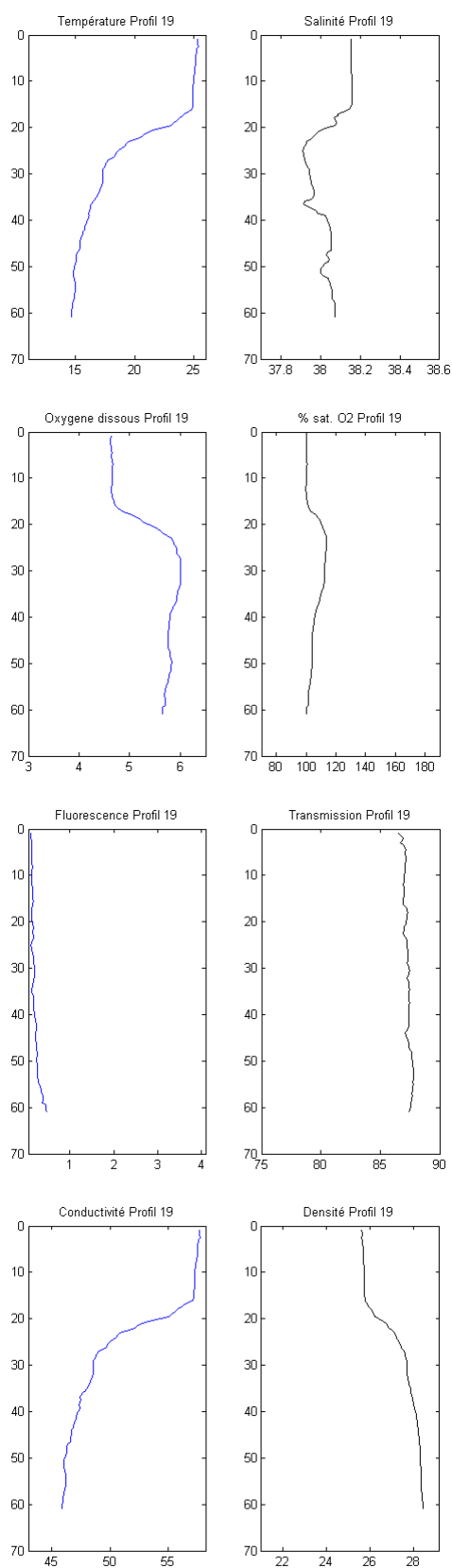
Profil 17 – Station 4



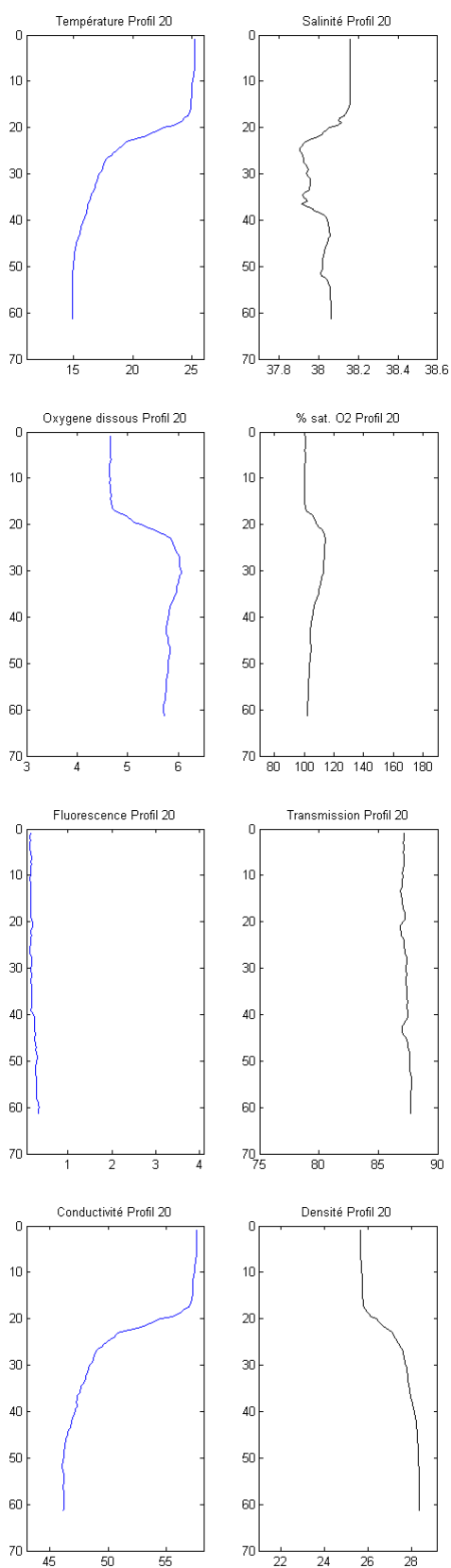
Profil 18 – Station 22



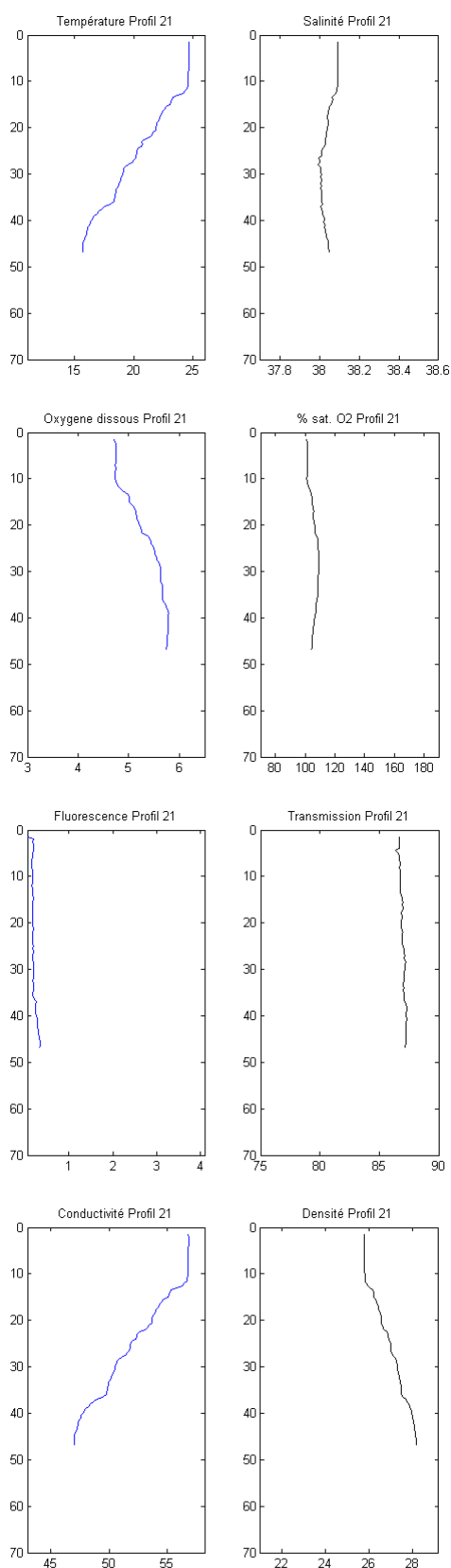
Profil 19 – Station 4



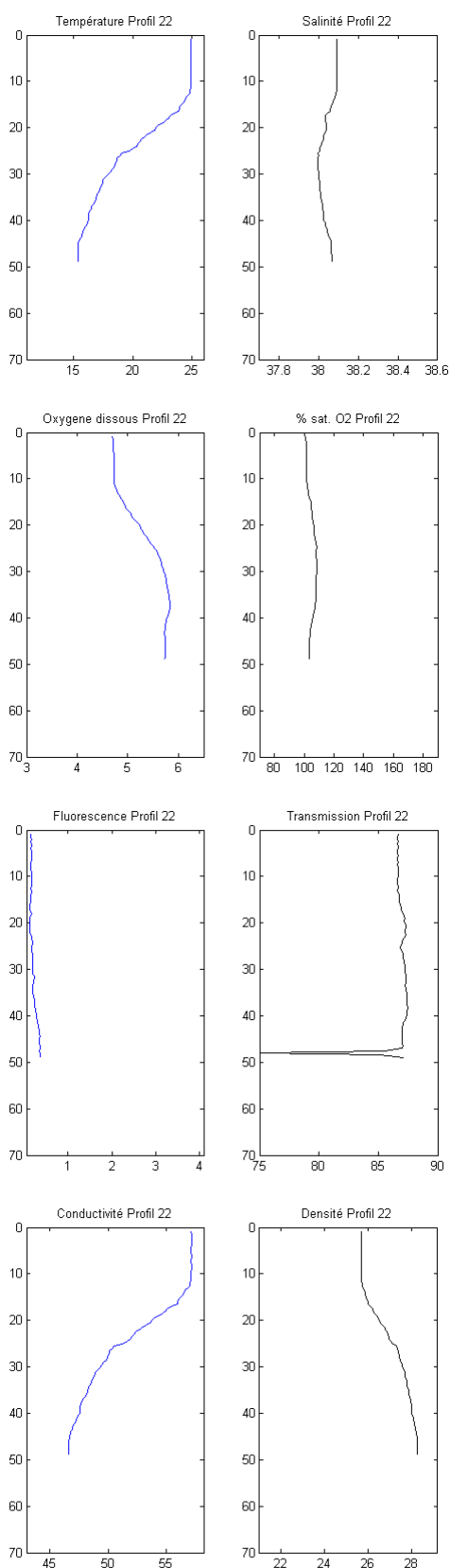
Profil 20- Station 1



Profil 21 – Station 4

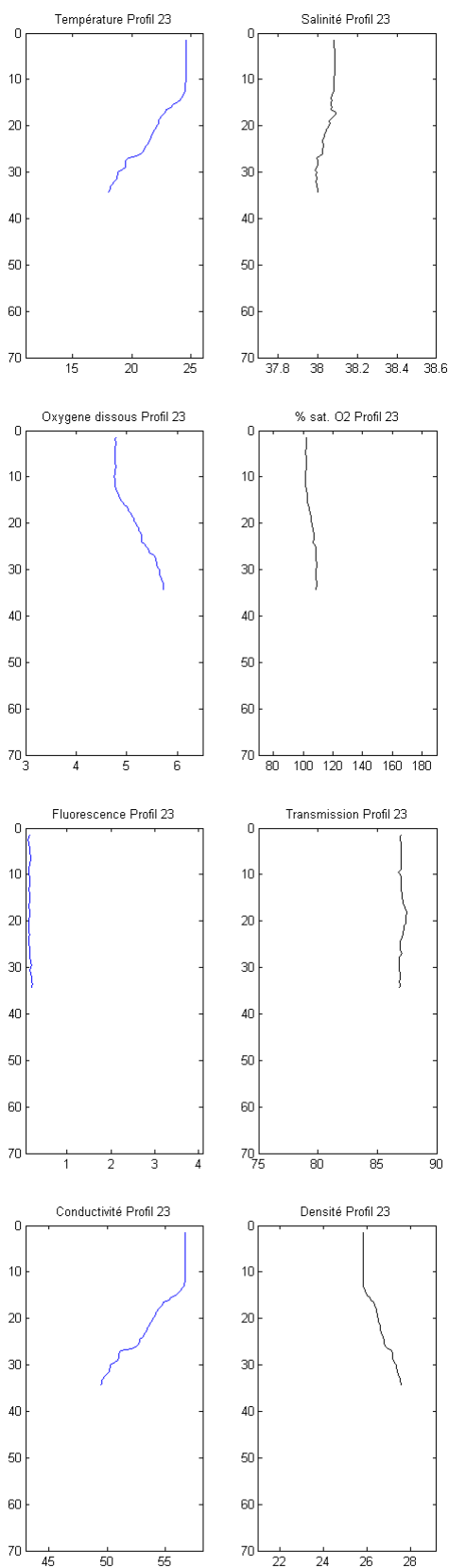


Profil 22- Station 16

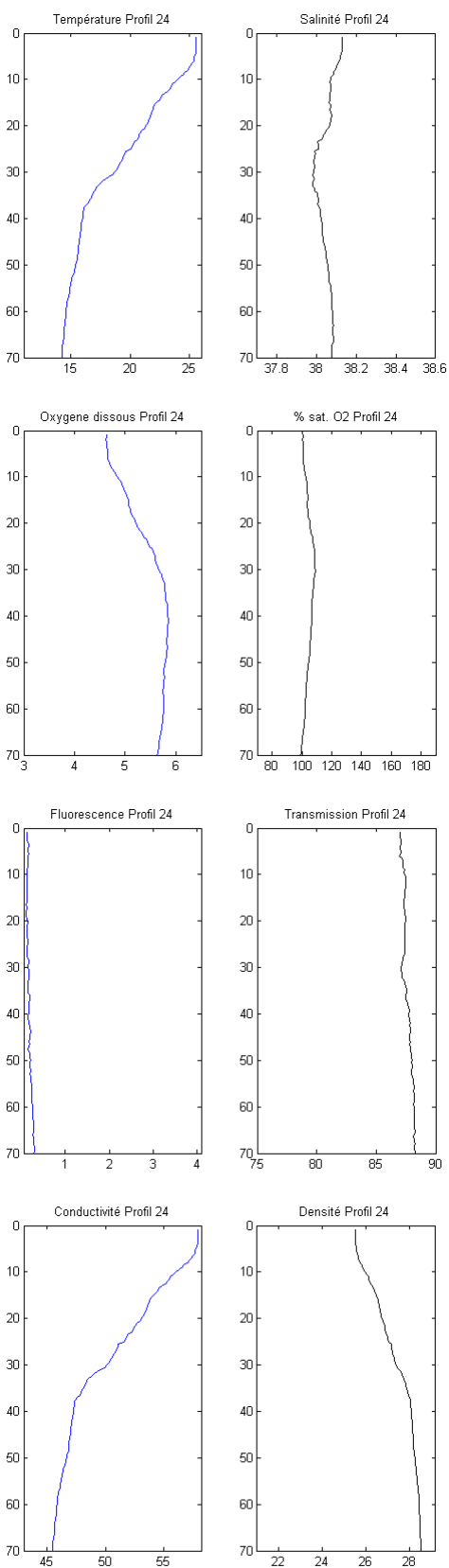


* Valeur manifestement aberrante liée sans doute à un problème instrumental et que nous avons écarté dans le traitement des données

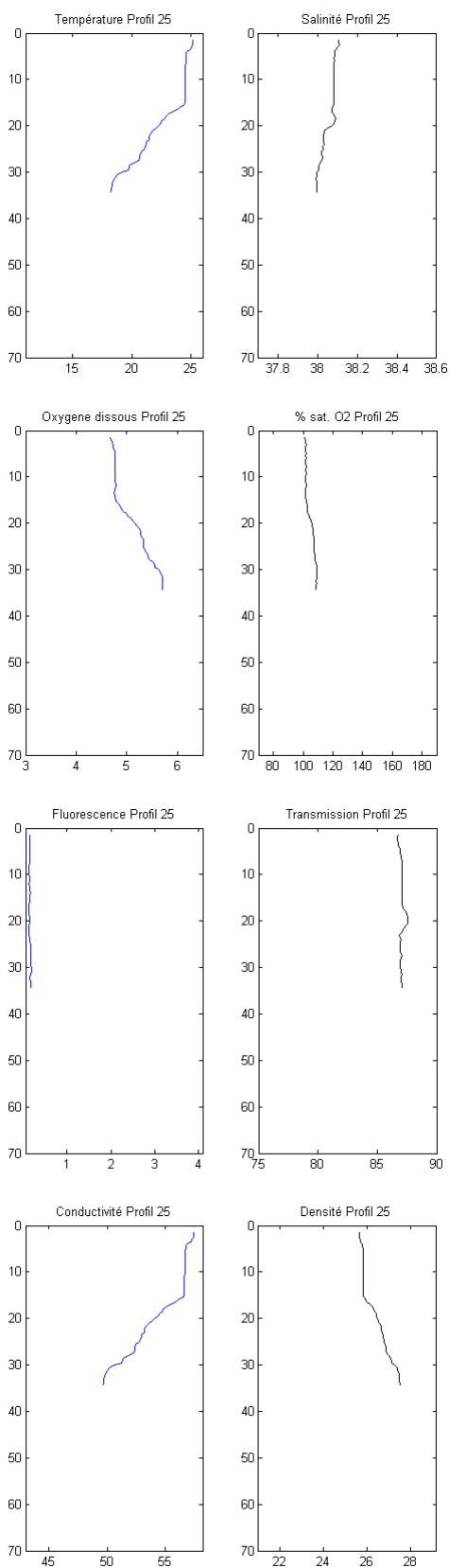
Profil 23 – Station 17



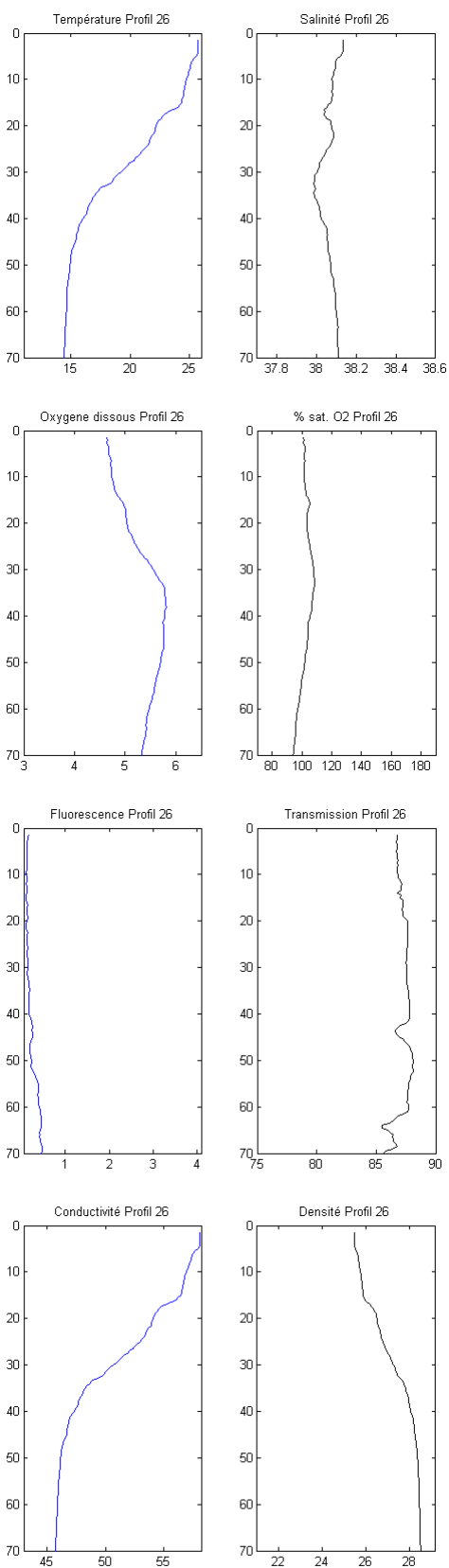
Profil 24 – Station 18



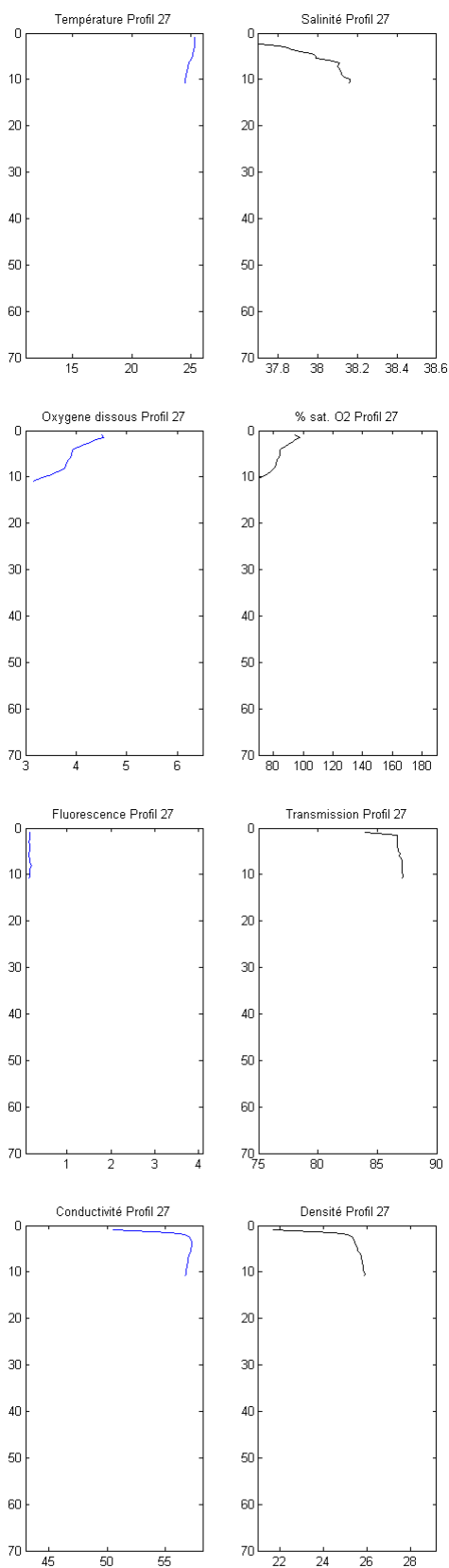
Profil 25 – Station 17



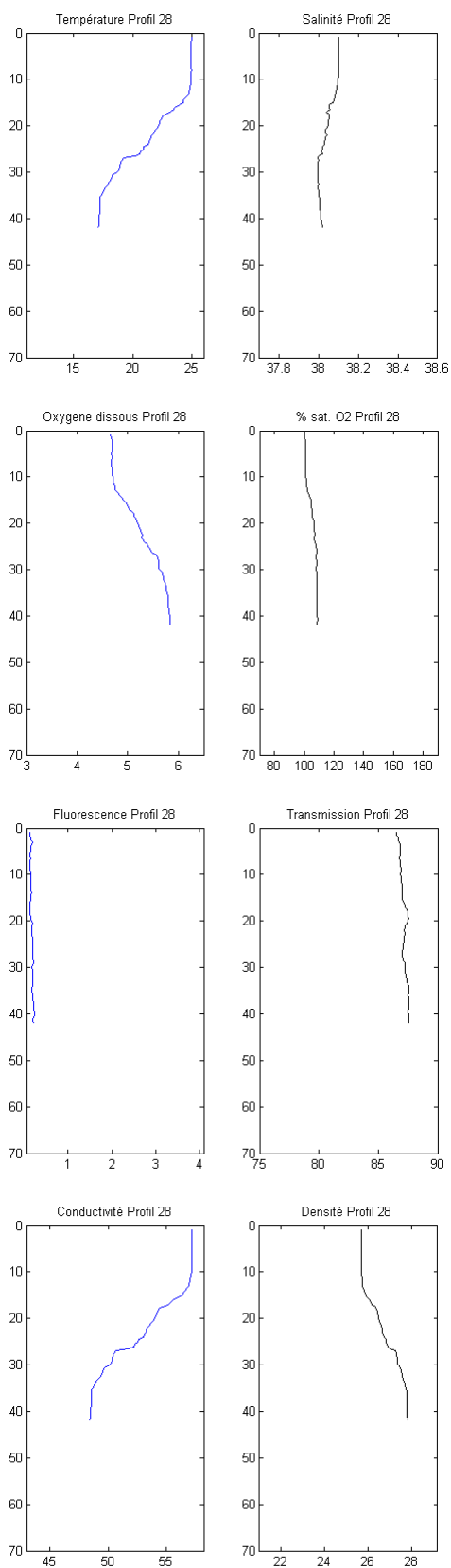
Profil 26 – Station 19



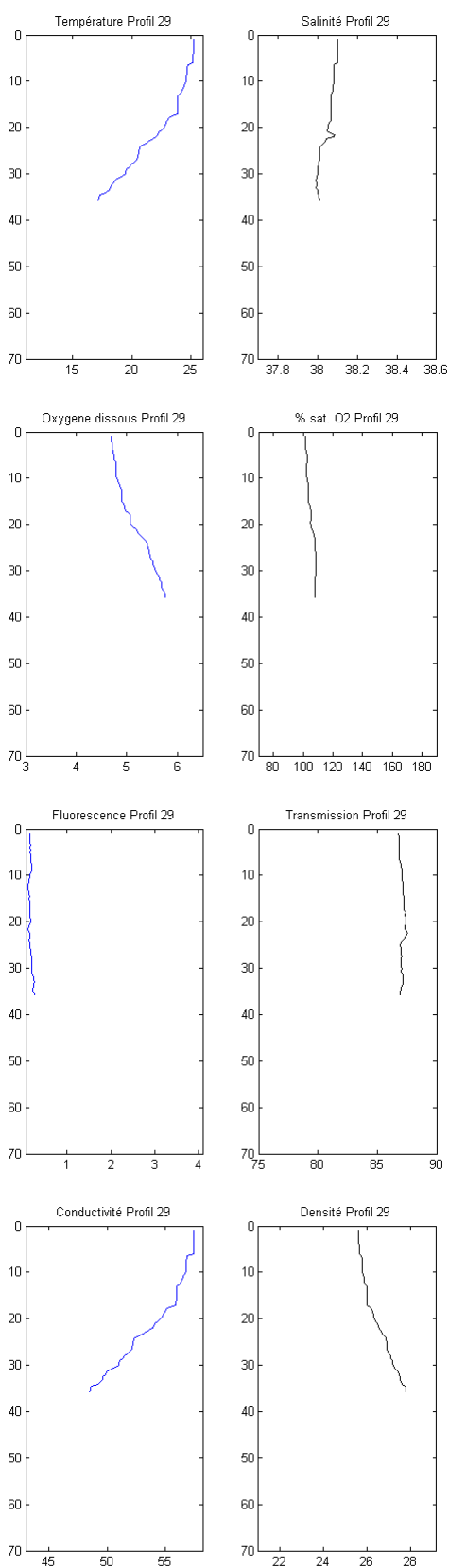
Profil 27 – Station 17



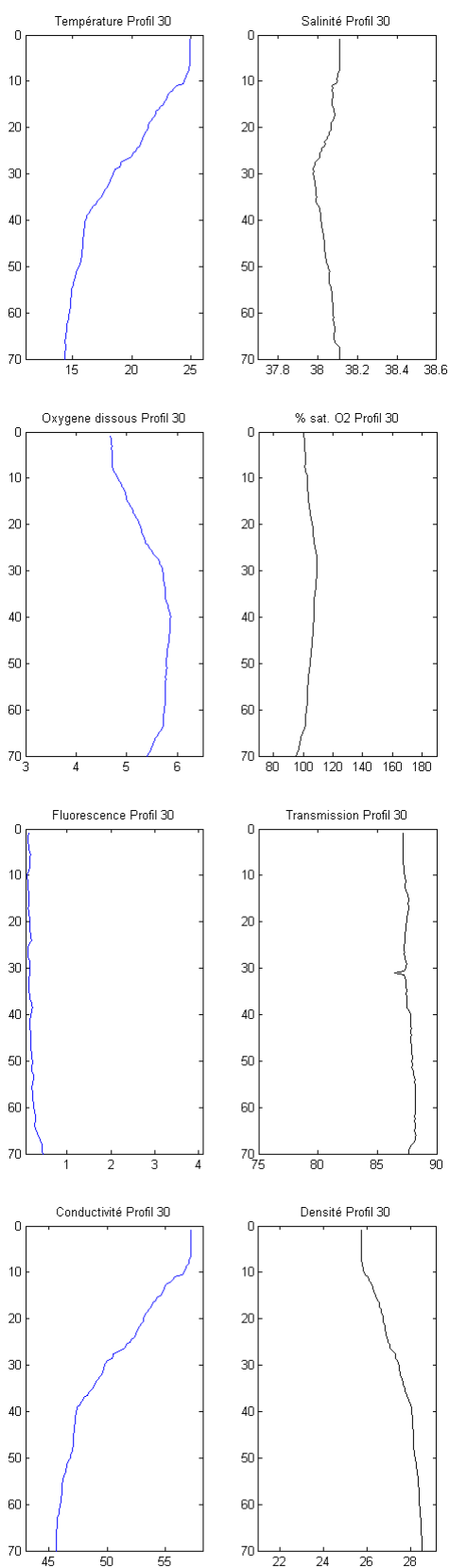
Profil 28 – Station 16



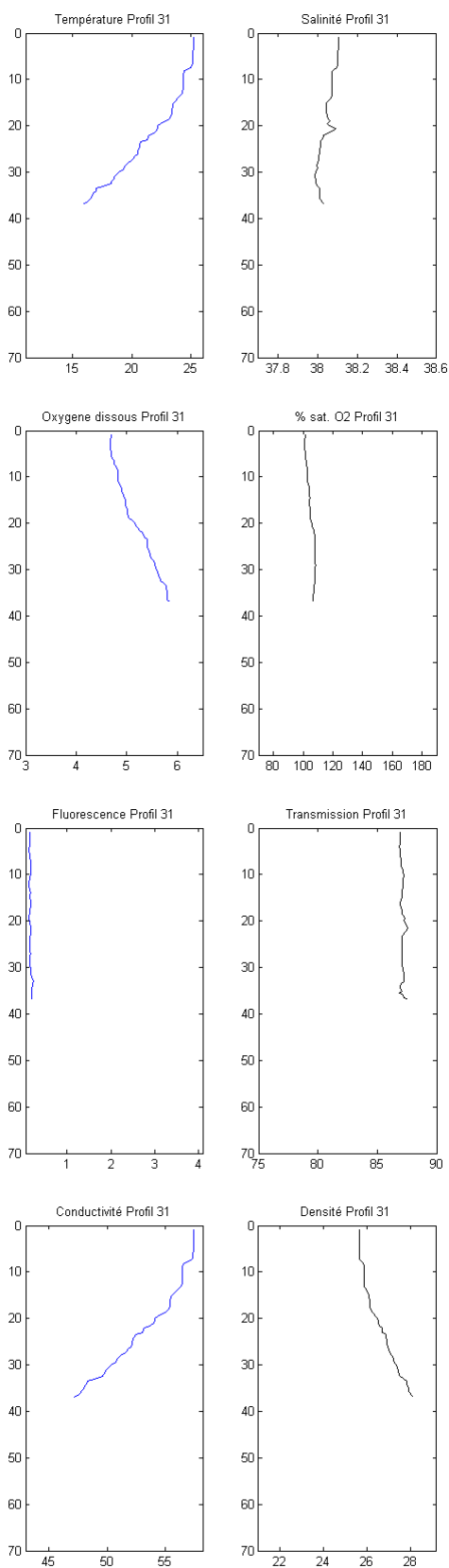
Profil 29 – Station 17



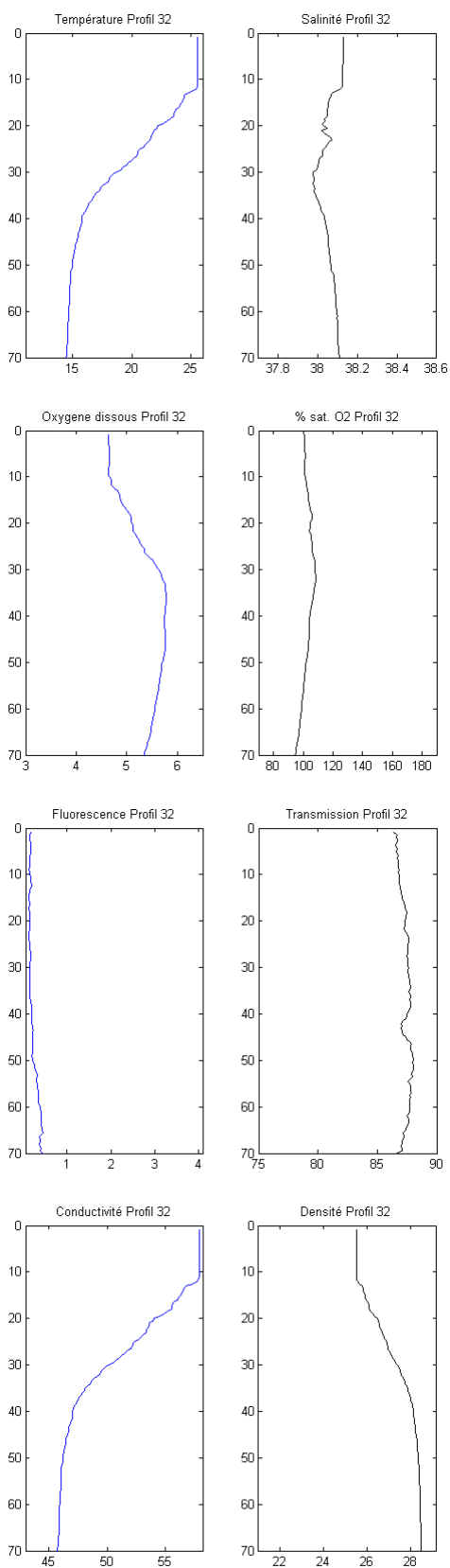
Profil 30 – Station 18



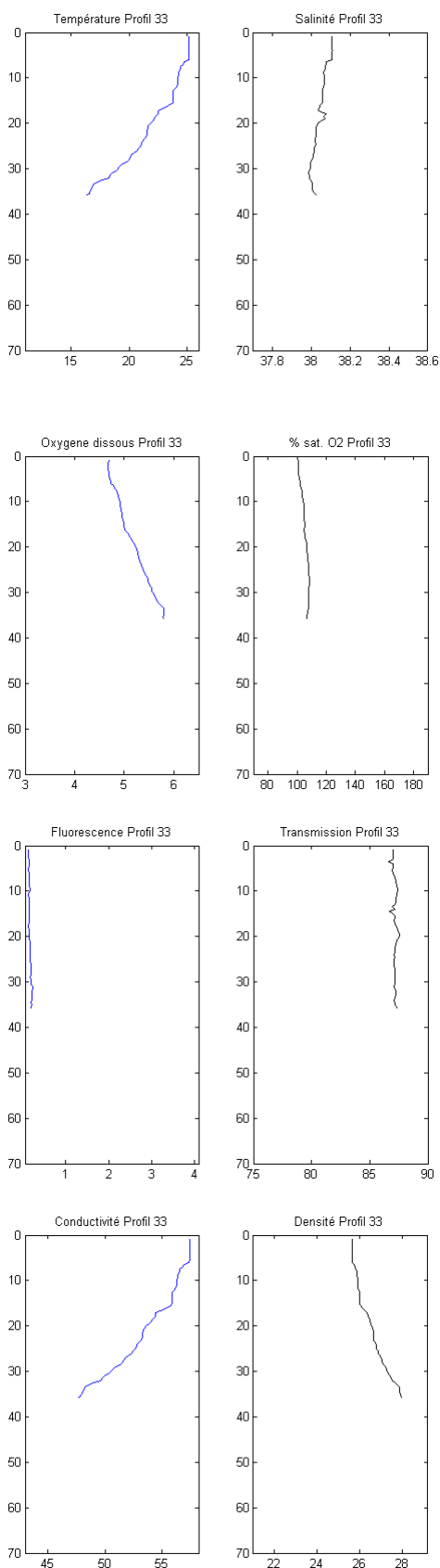
Profil 31 – Station 17



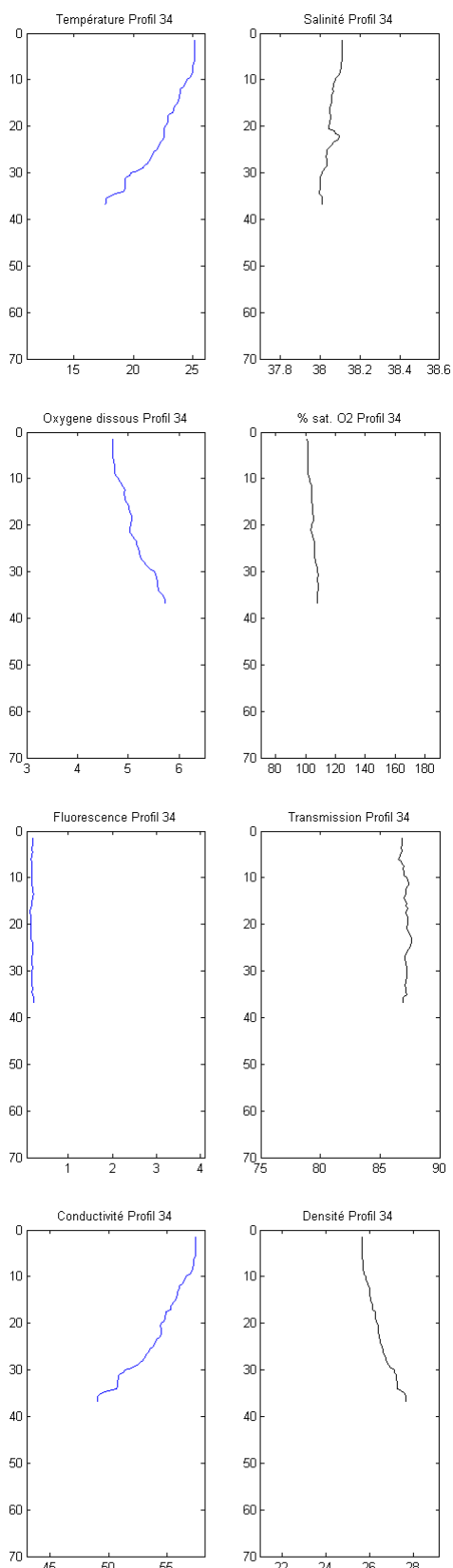
Profil 32 – Station 19



Profil 33 – Station 17

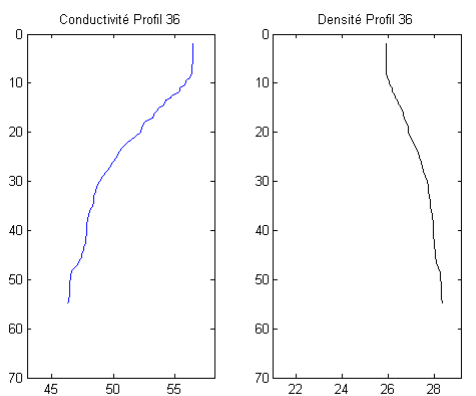
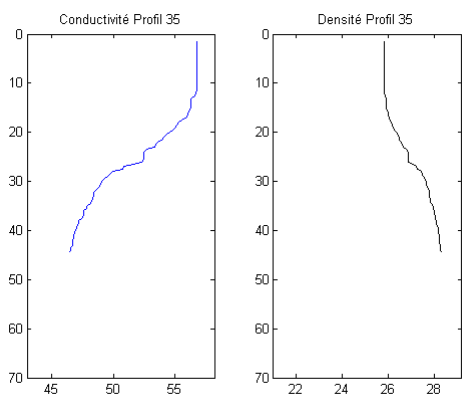
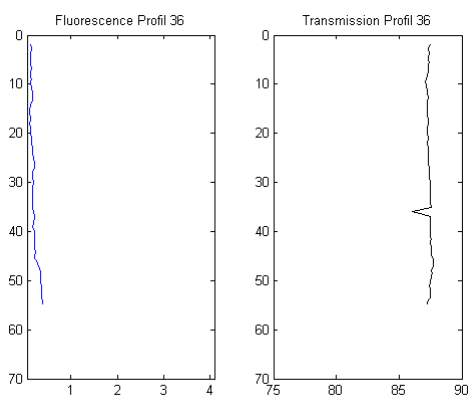
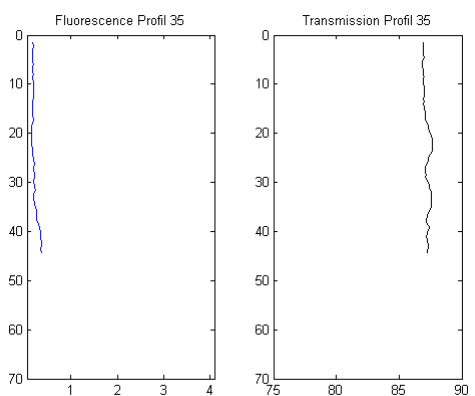
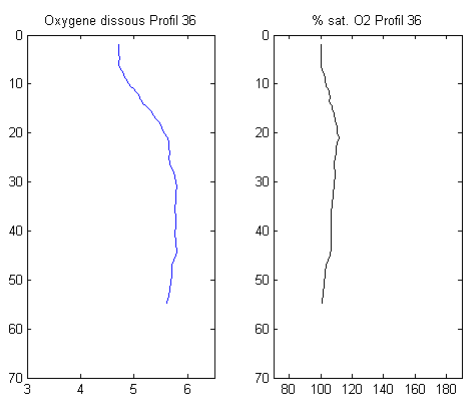
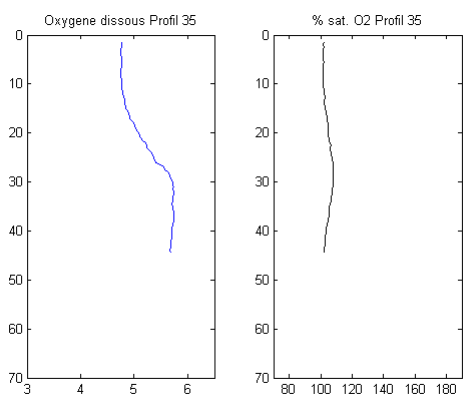
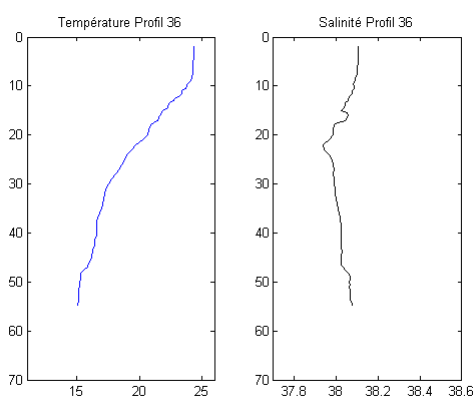
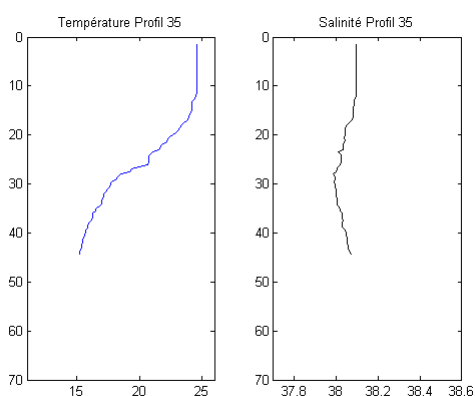


Profil 34 – Station 17

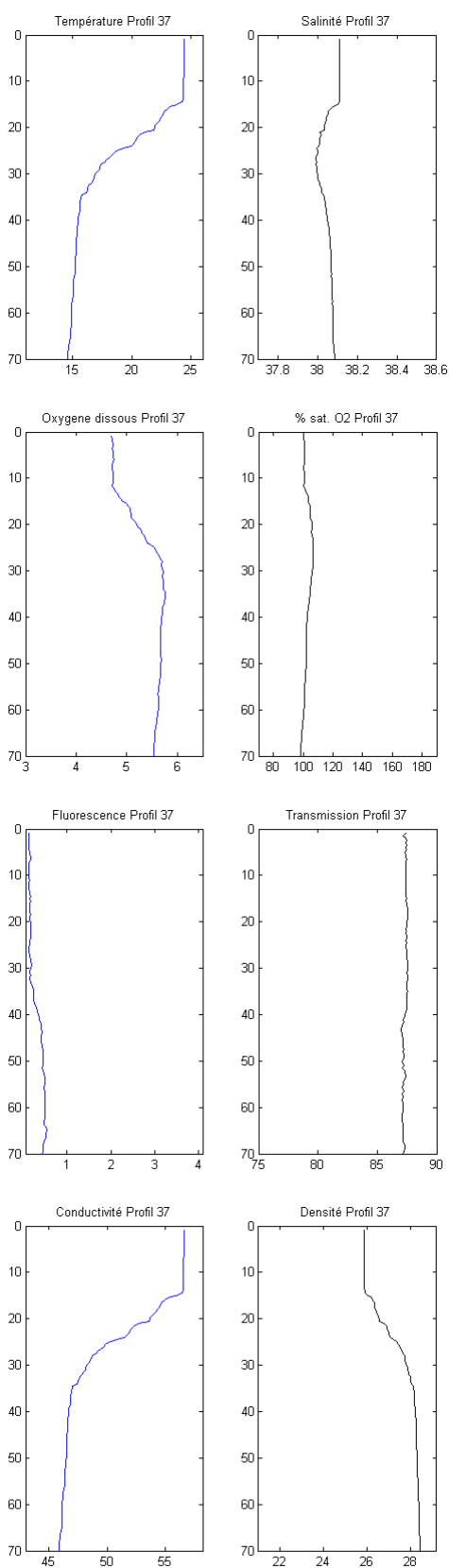


Profil 35 – Station 16

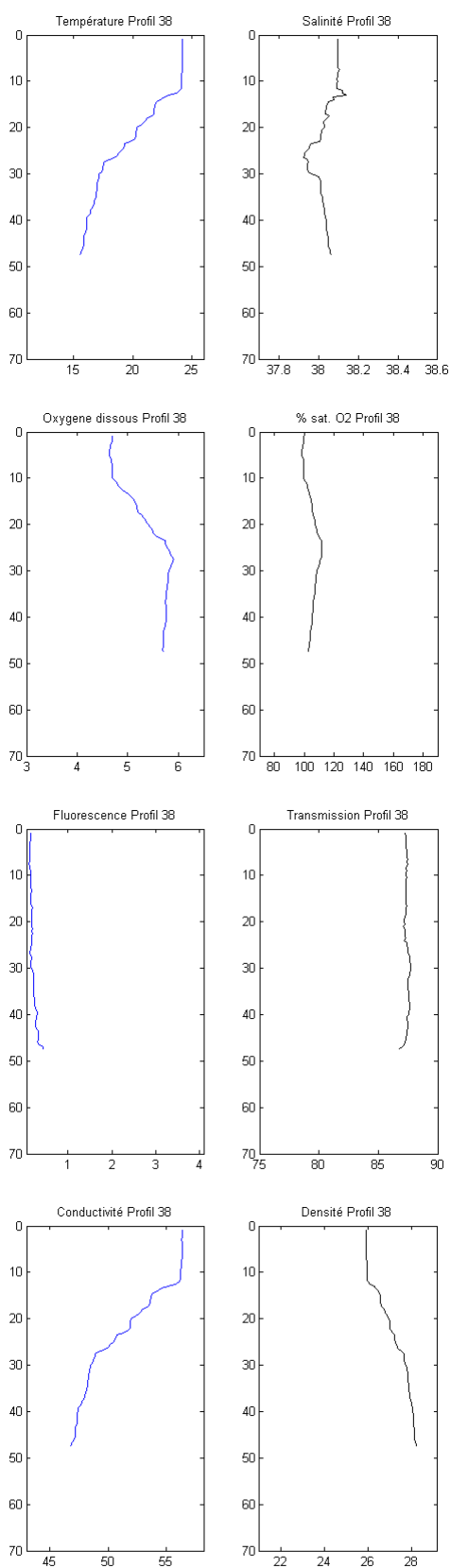
Profil 36 – Station 24



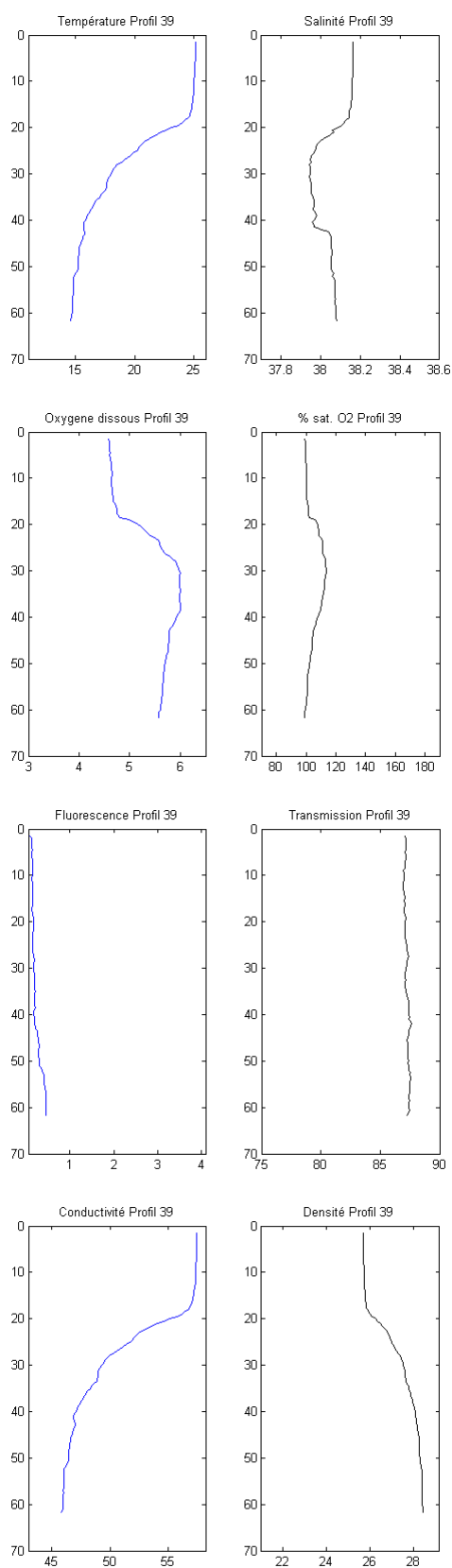
Profil 37 – Station 11



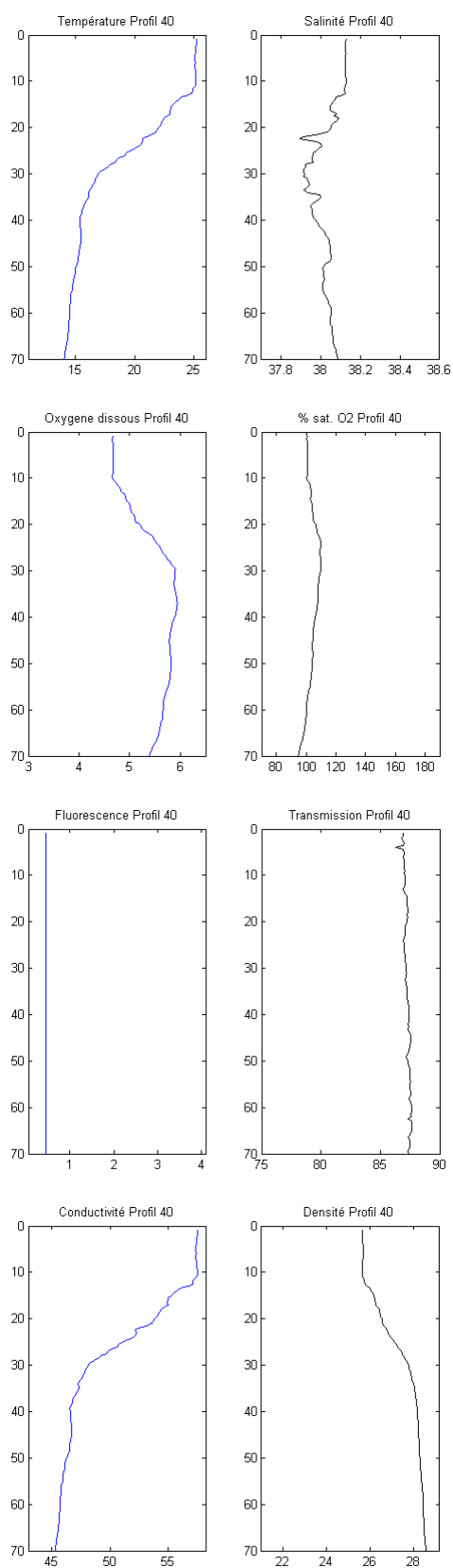
Profil 38 – Station 3



Profil 39 – Station 4

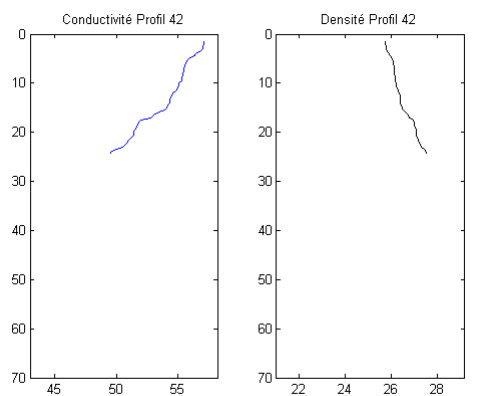
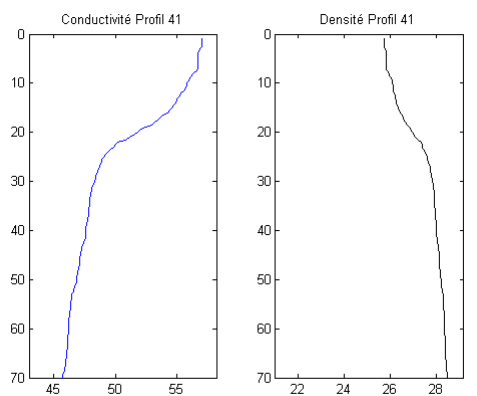
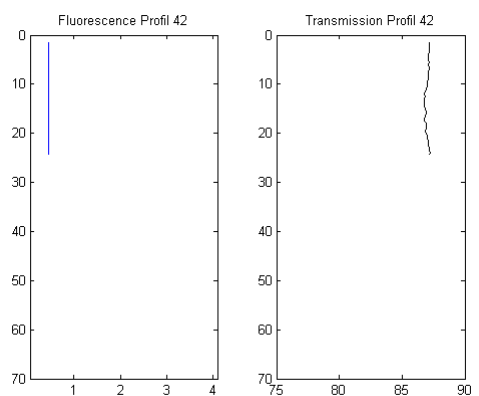
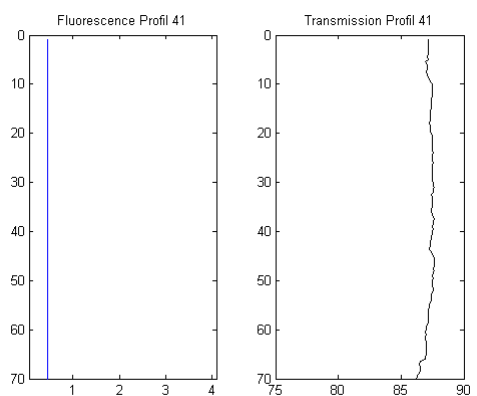
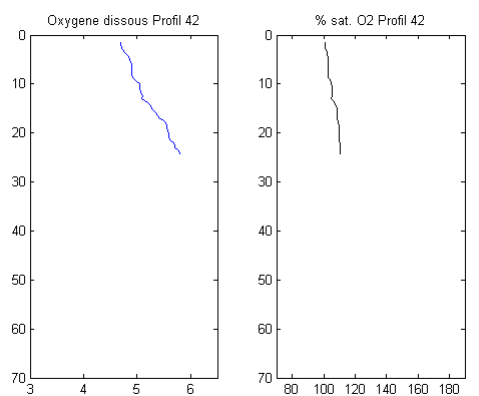
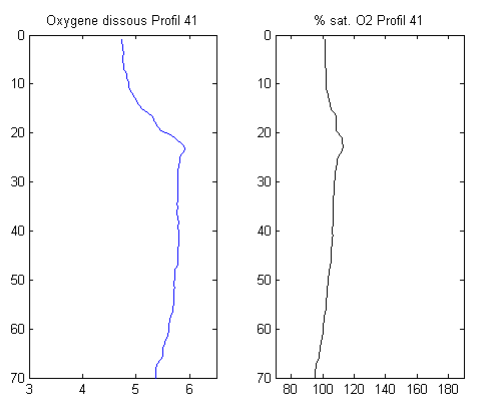
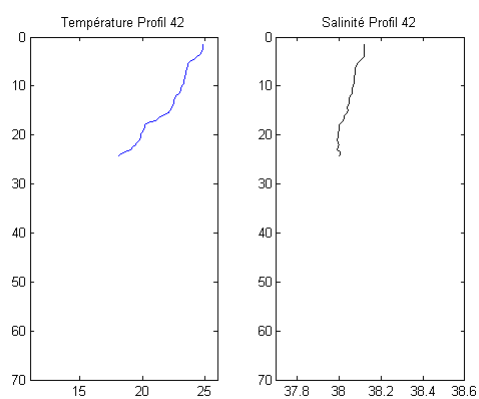
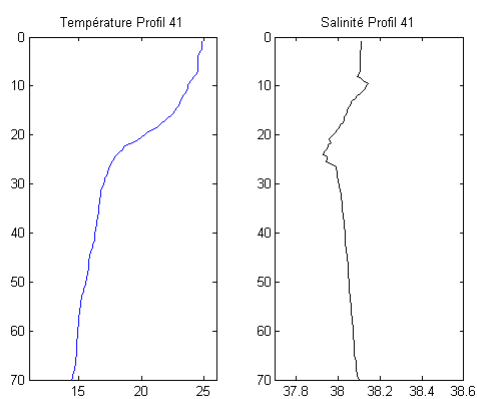


Profil 40 – Station 5



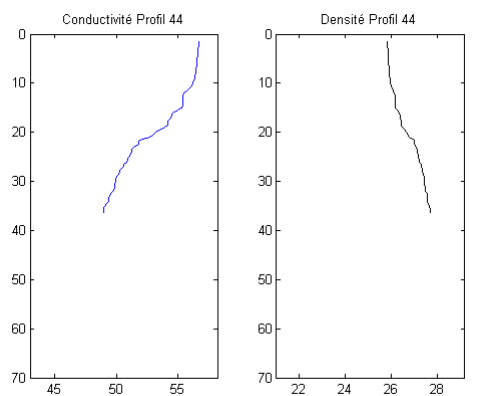
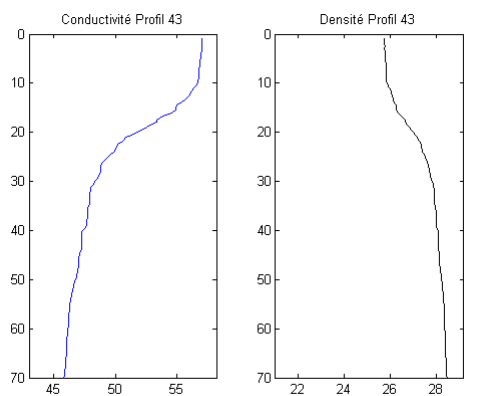
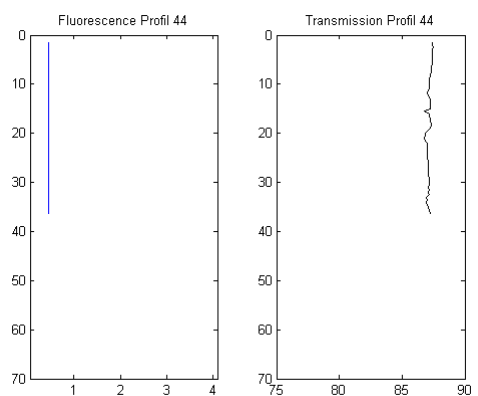
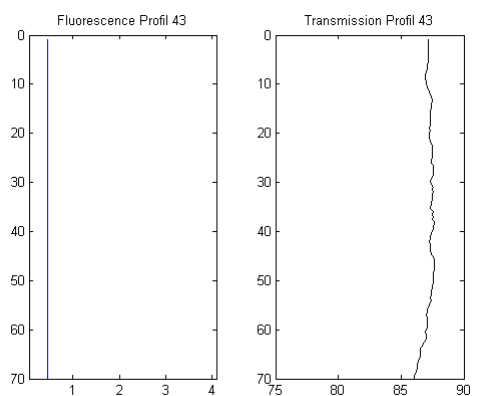
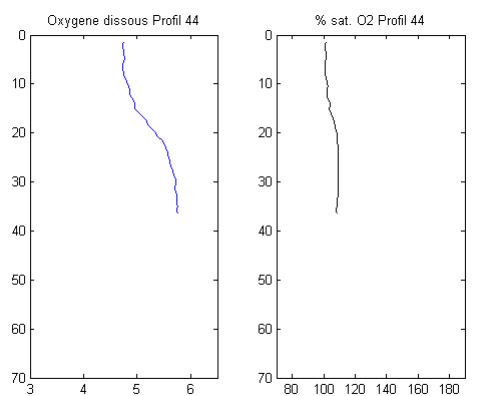
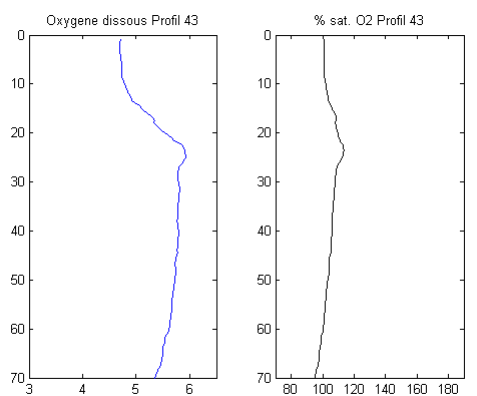
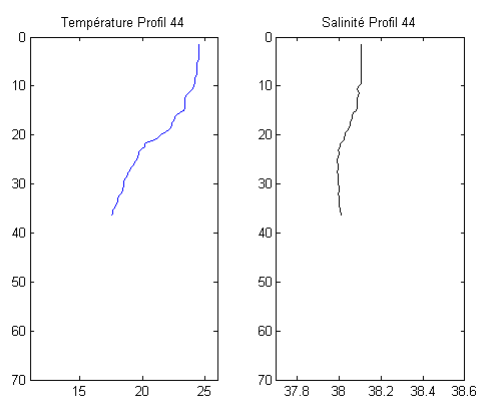
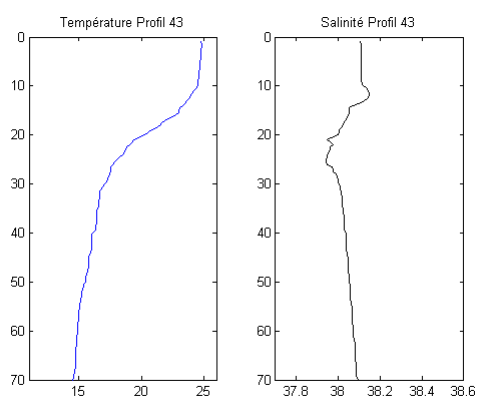
Profil 41 – Station 6

Profil 42 – Station 7

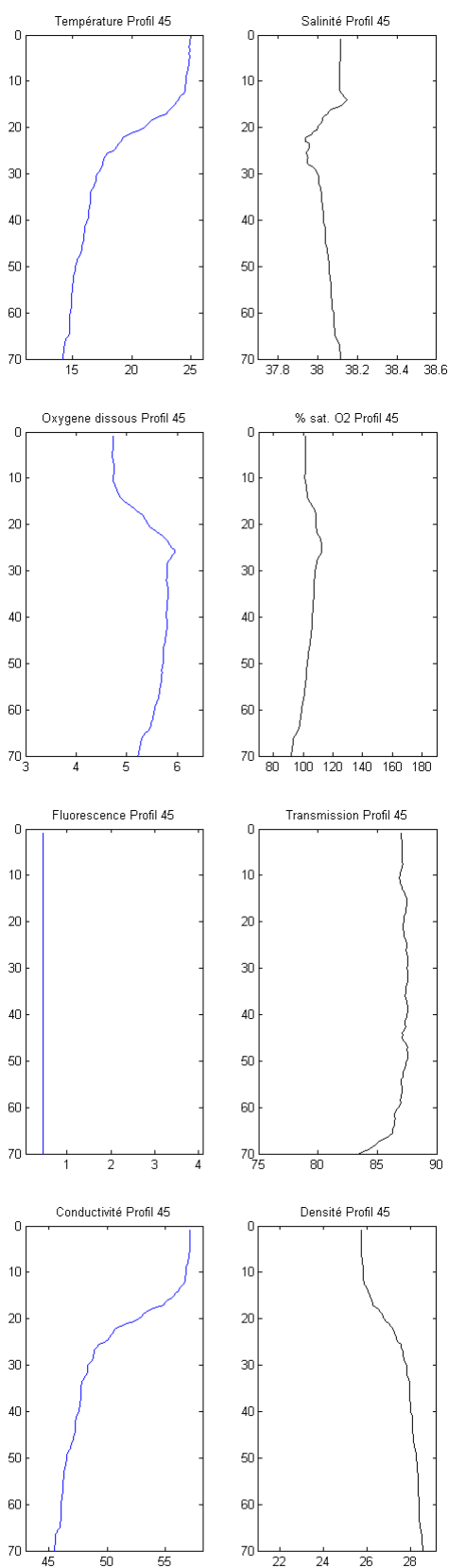


Profil 43 – Station 6

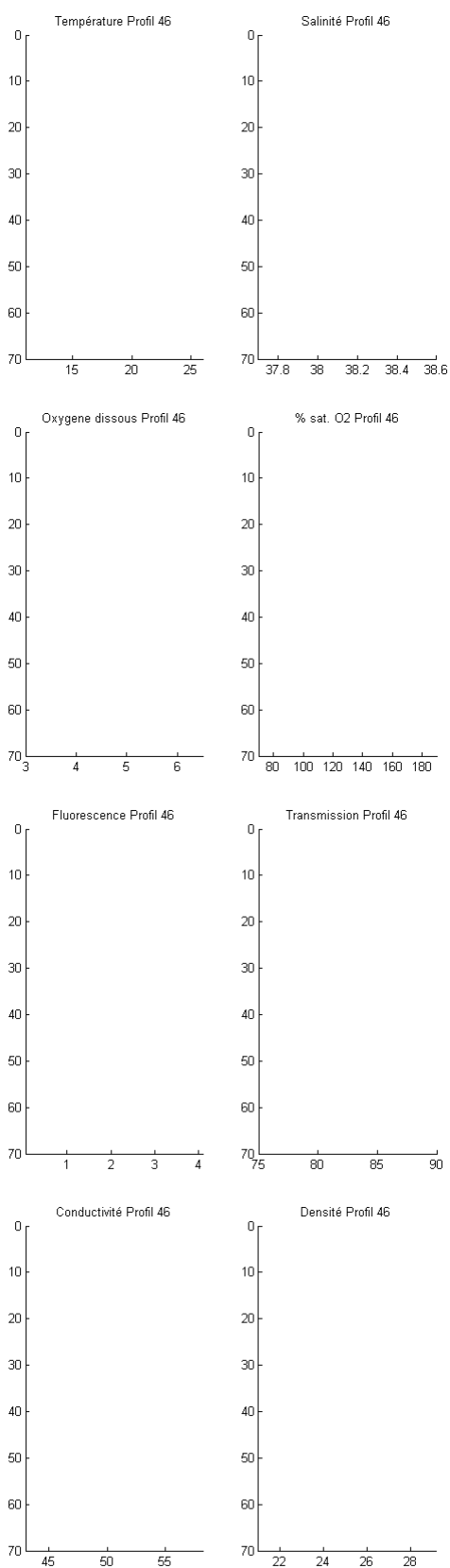
Profil 44 – Station 8



Profil 45 – Station 6

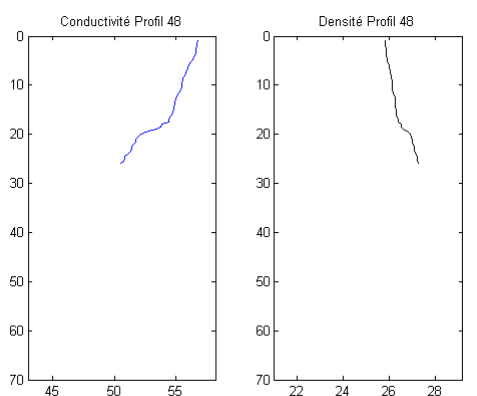
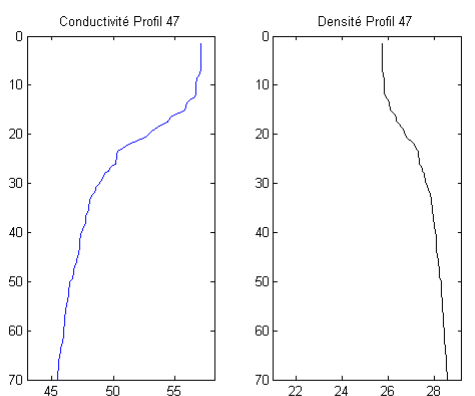
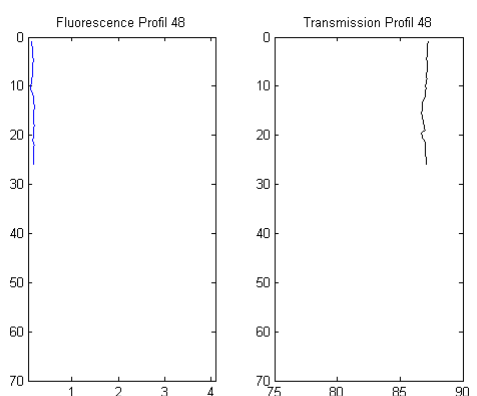
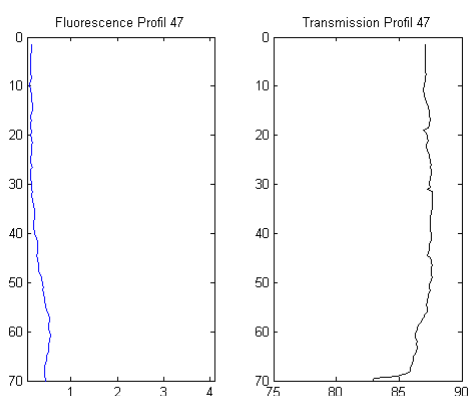
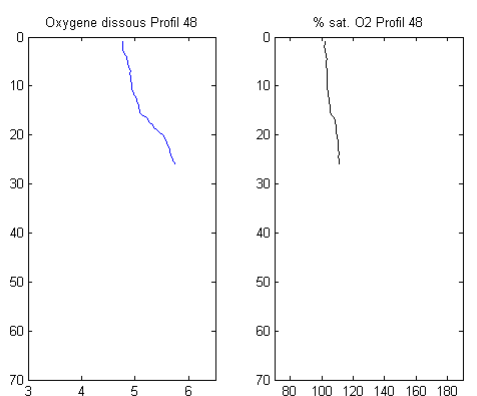
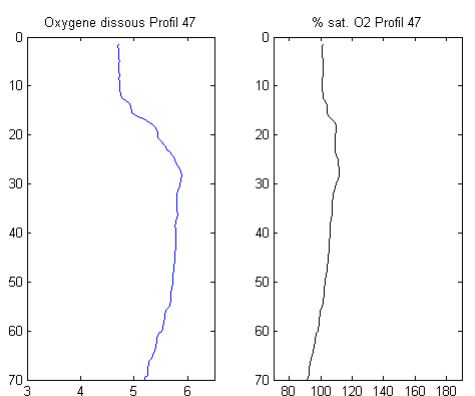
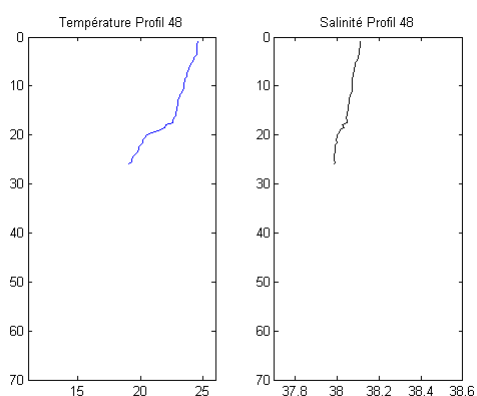
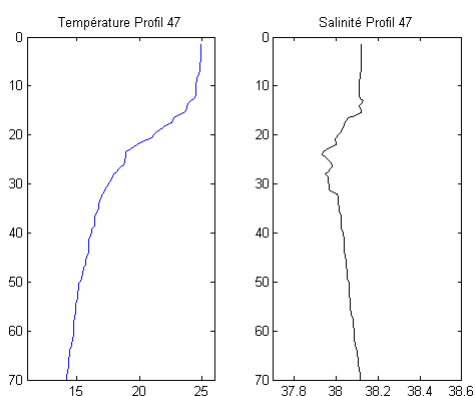


Profil 46 – Station



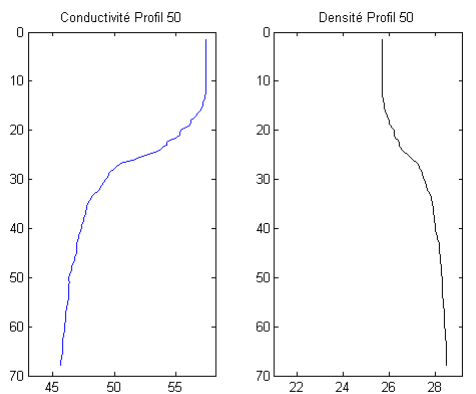
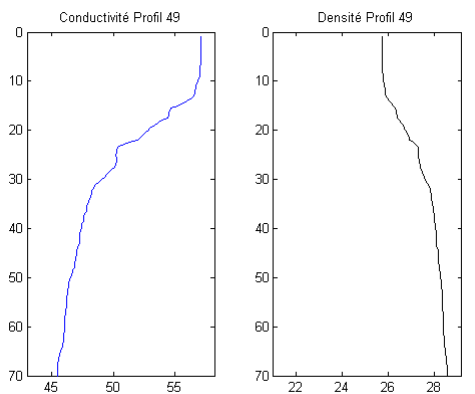
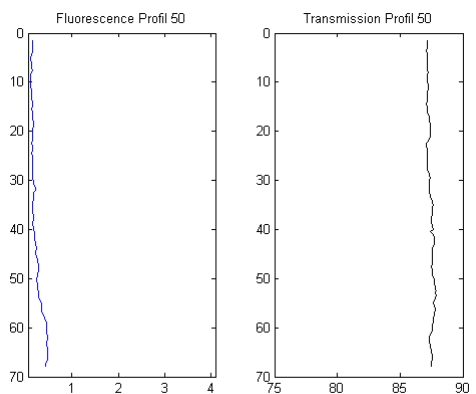
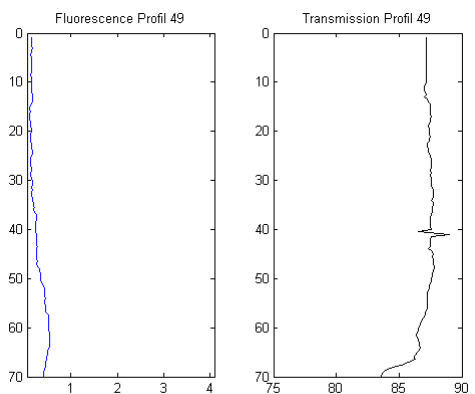
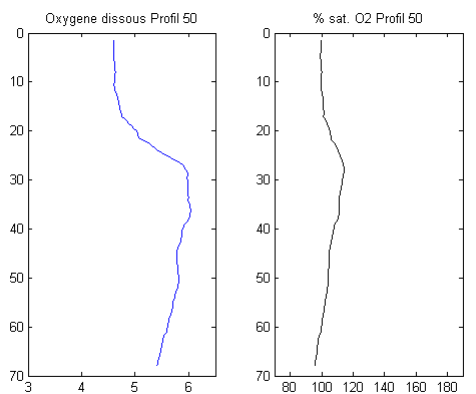
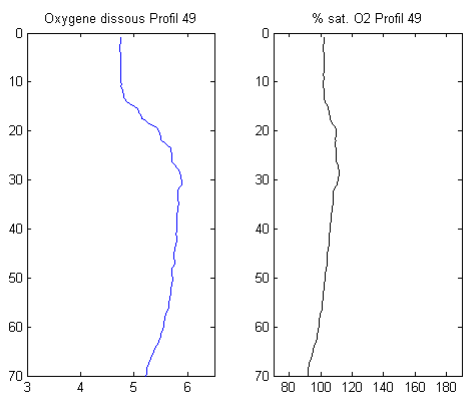
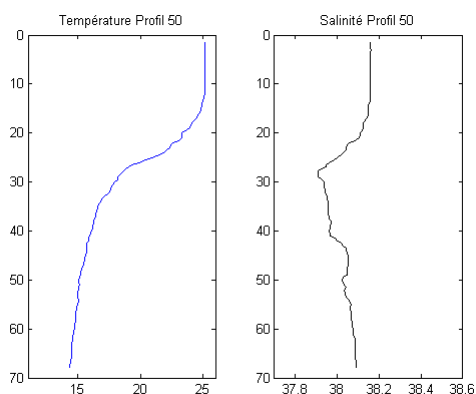
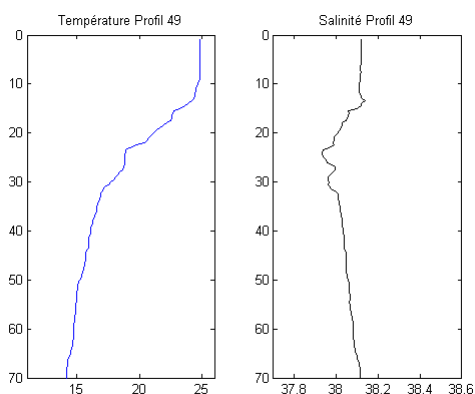
Profil 47 – Station 6

Profil 48 – Station 7



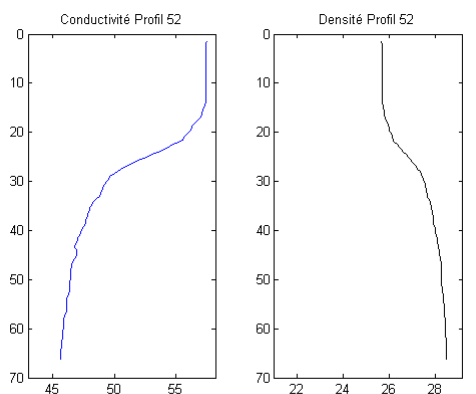
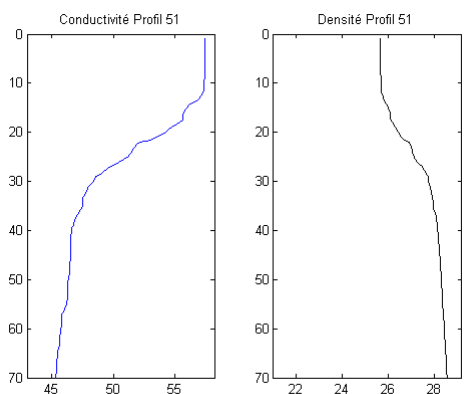
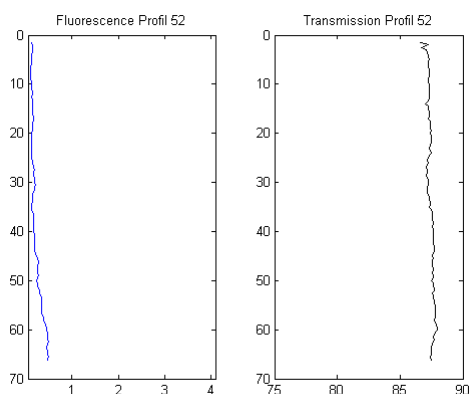
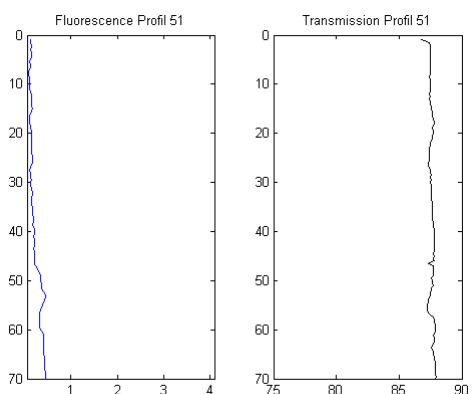
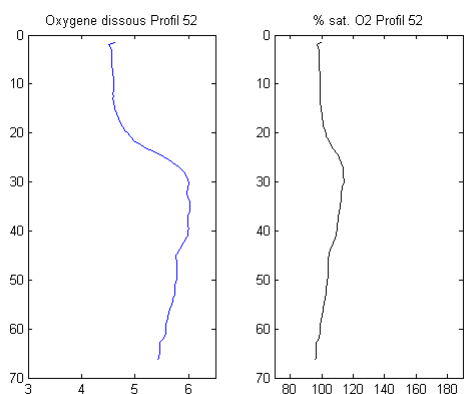
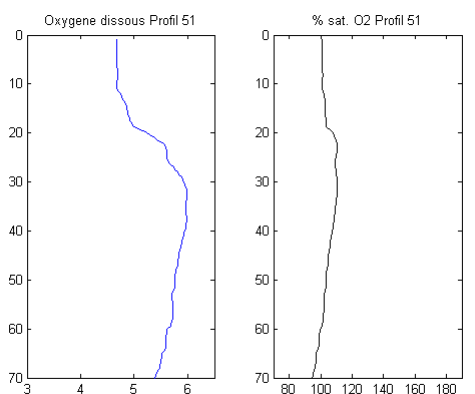
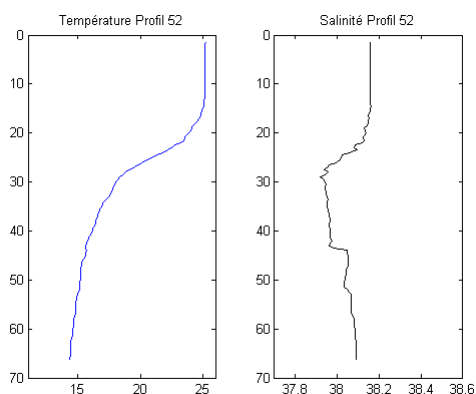
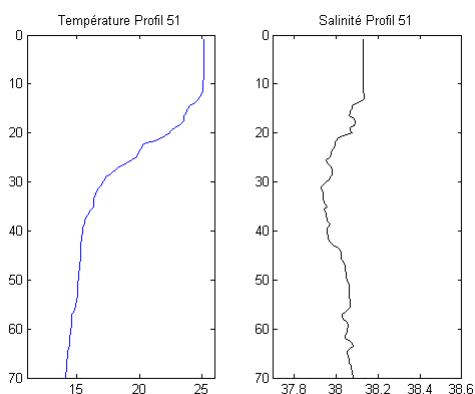
Profil 49 – Station 6

Profil 50 – Station 4

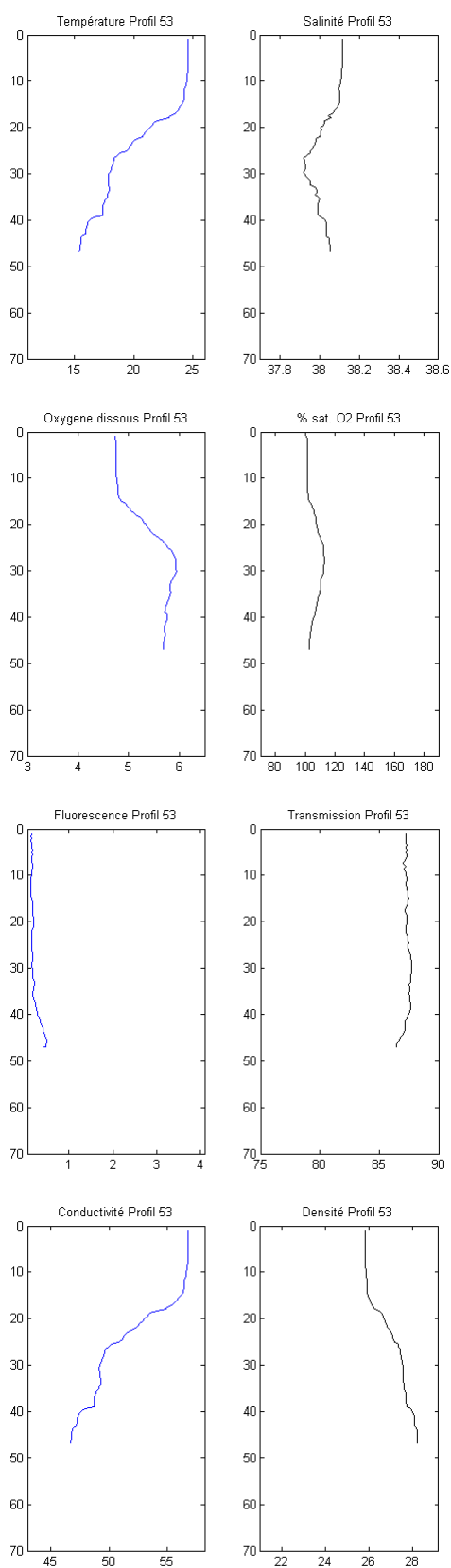


Profil 51 – Station 5

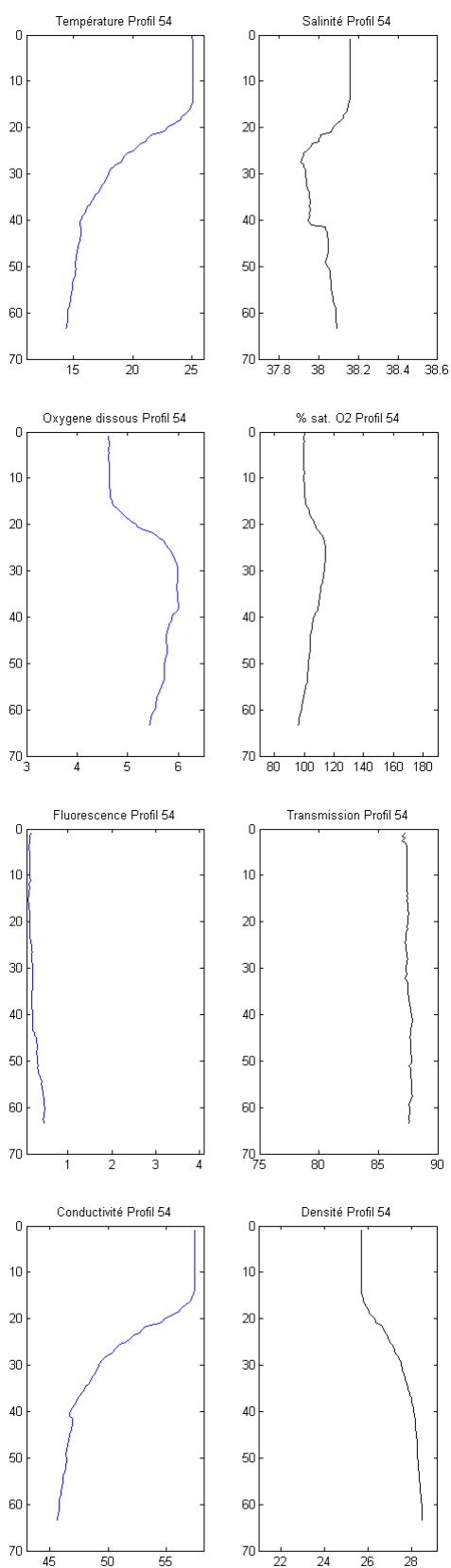
Profil 52 – Station 4



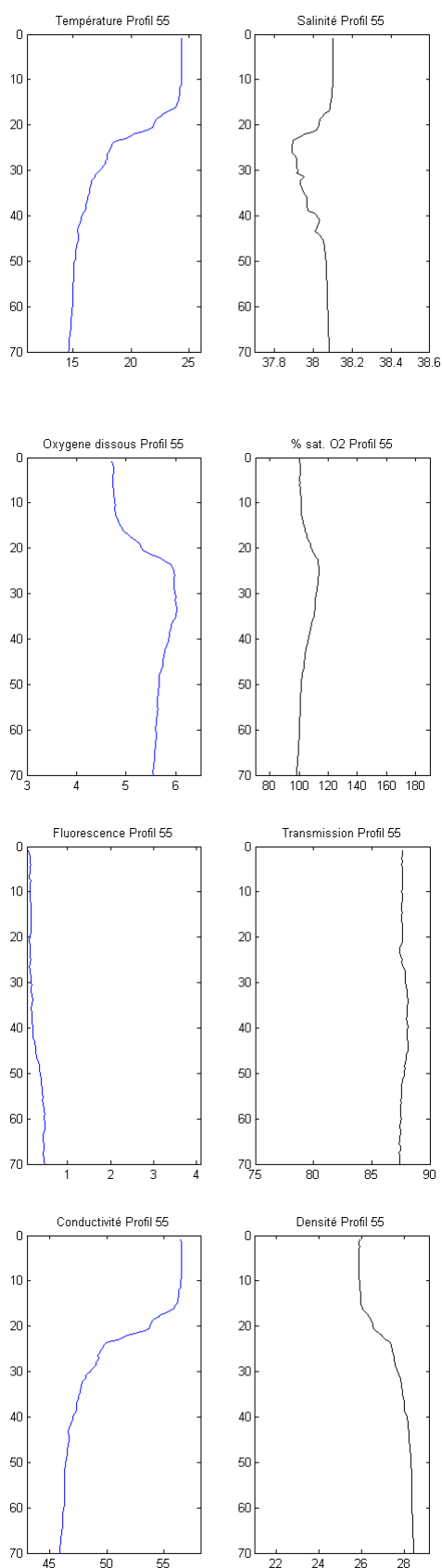
Profil 53 – Station 3



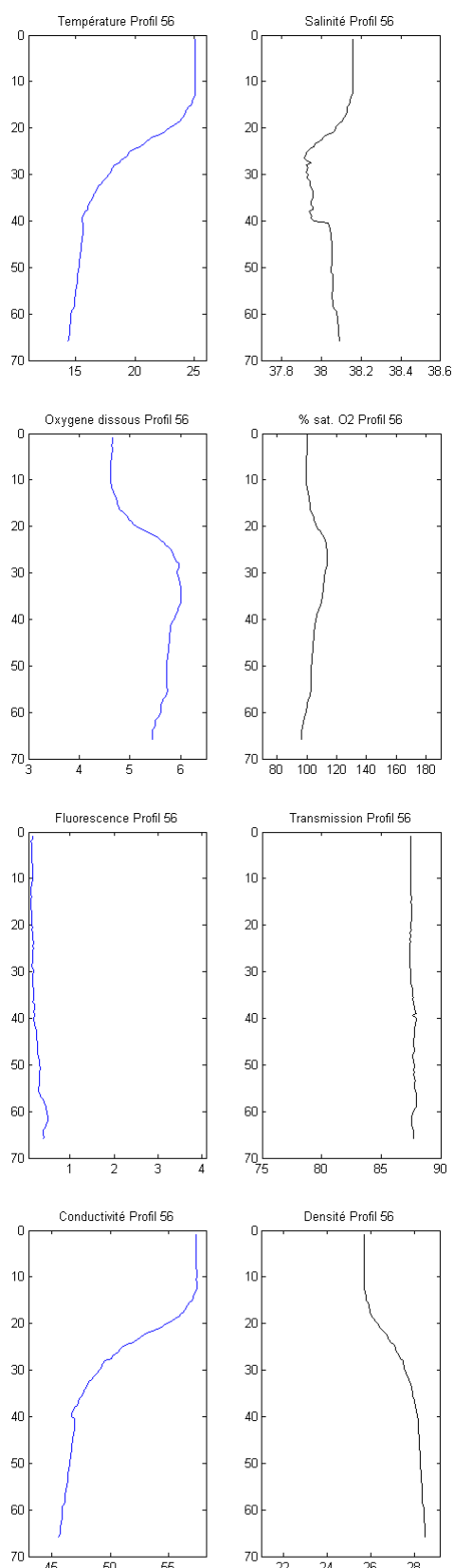
Profil 54 – Station 4



Profil 55 – Station 12

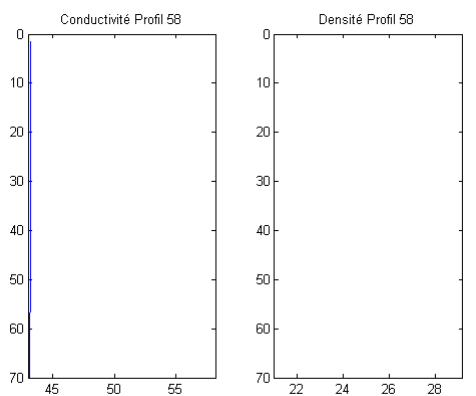
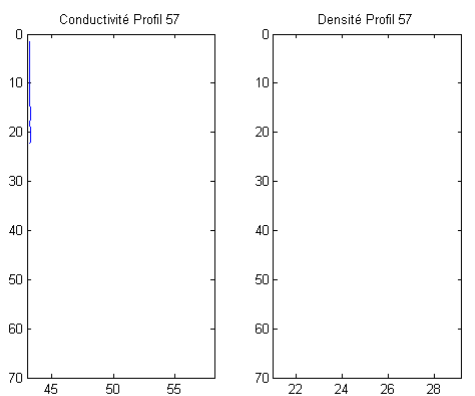
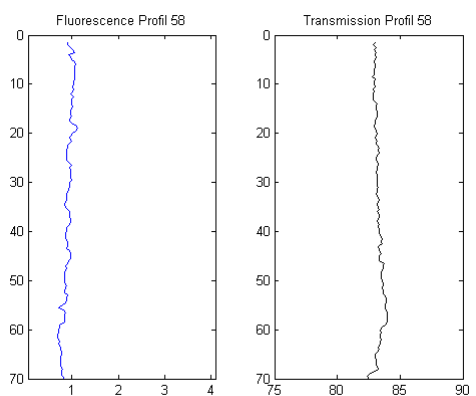
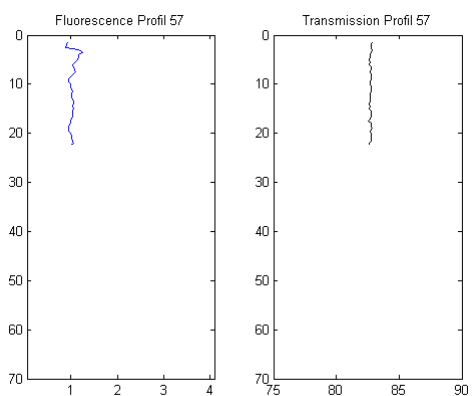
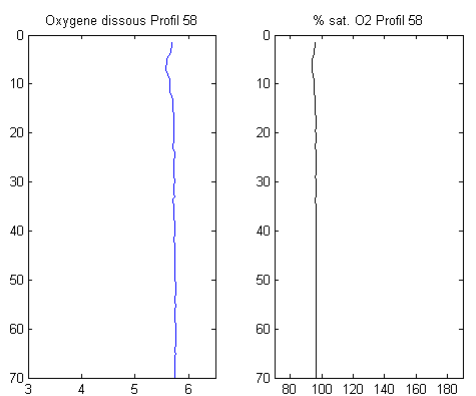
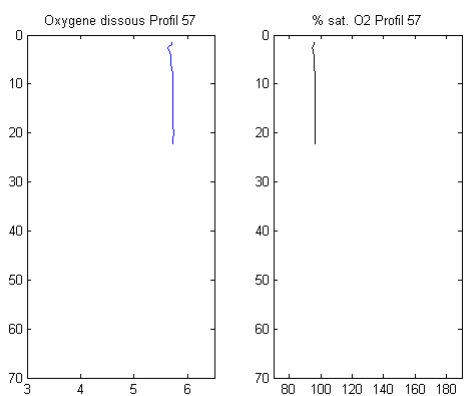
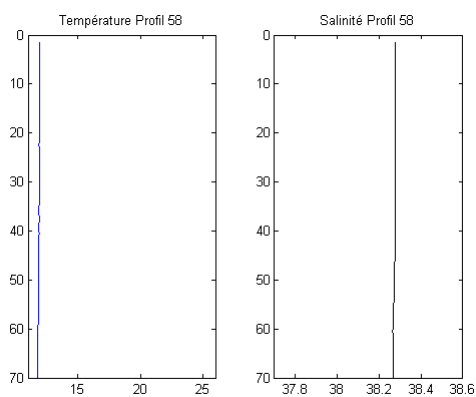
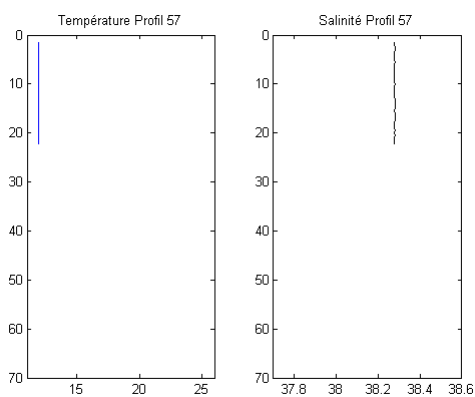


Profil 56 – Station 4



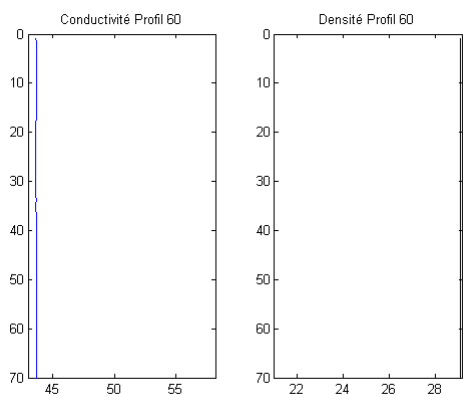
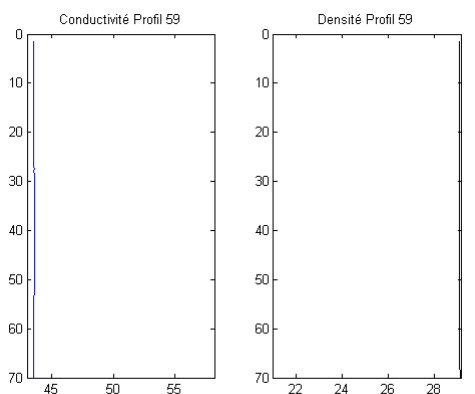
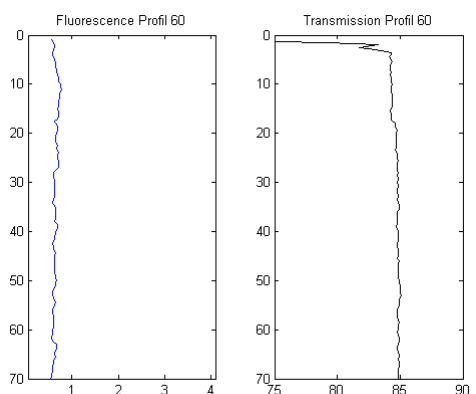
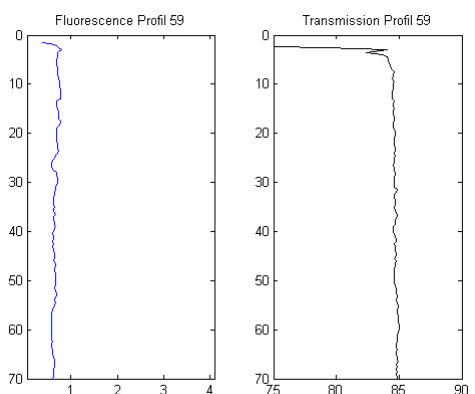
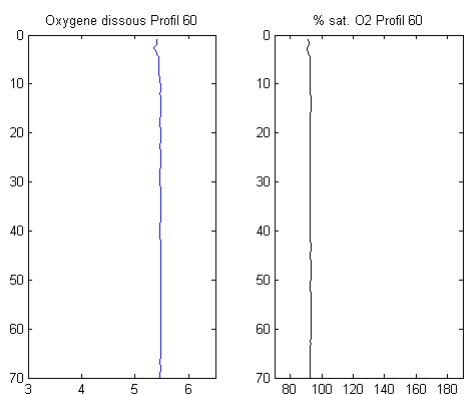
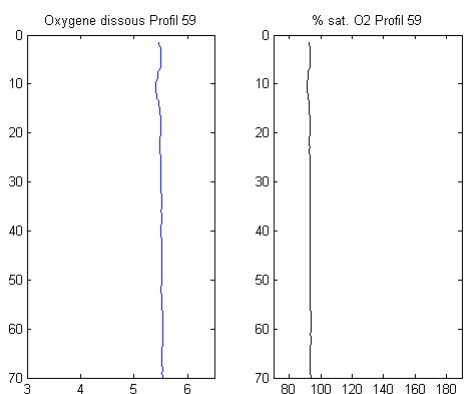
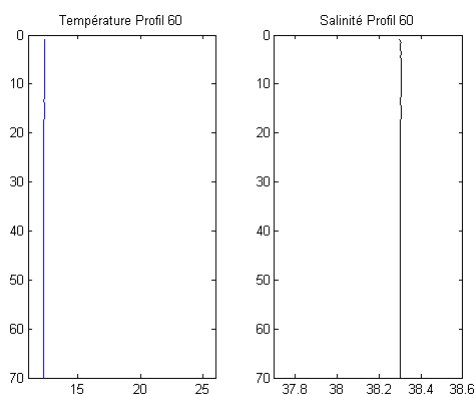
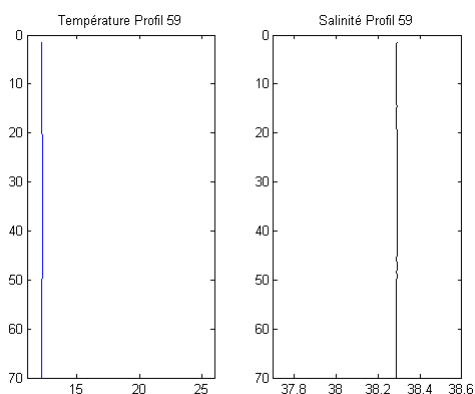
Profil 57 – Station 7

Profil 58 – Station 6



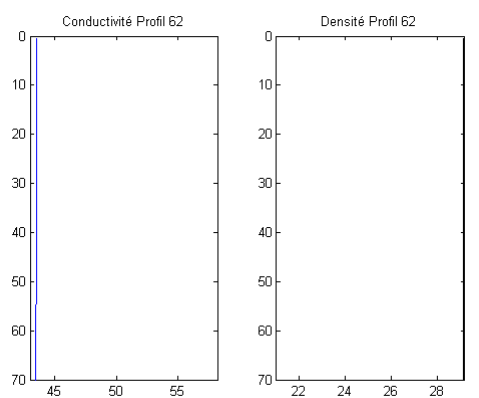
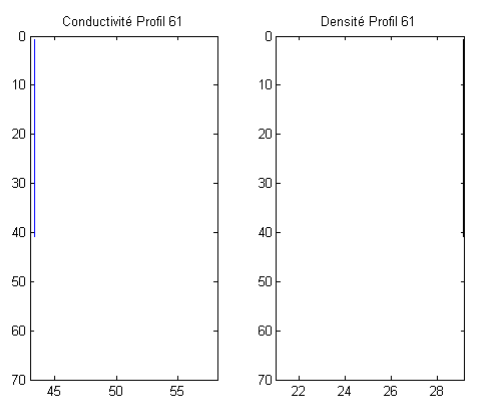
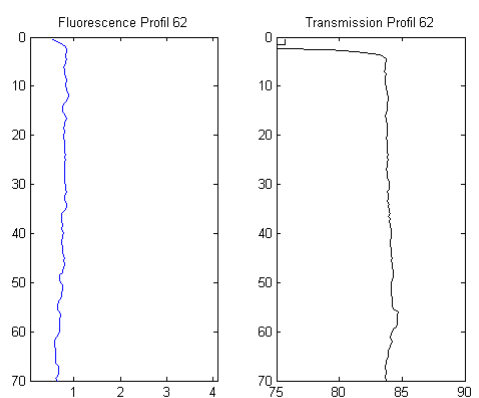
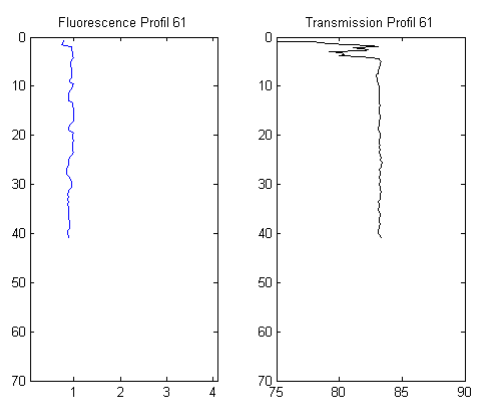
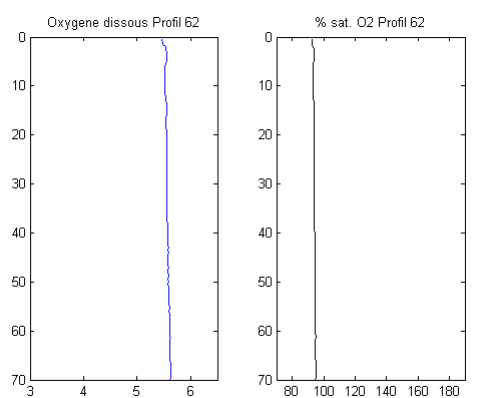
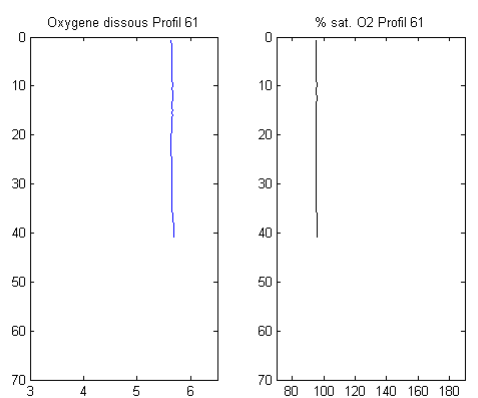
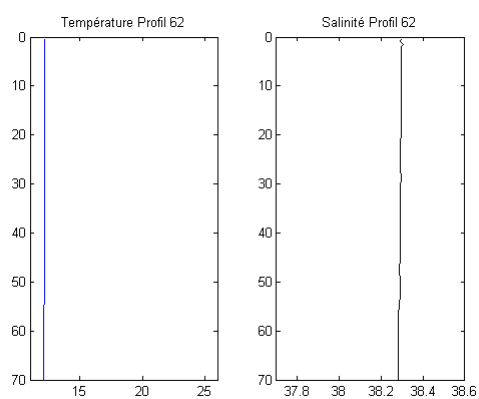
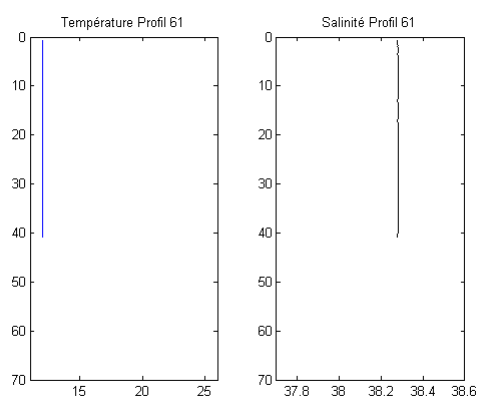
Profil 59 – Station 5

Profil 60 – Station 23



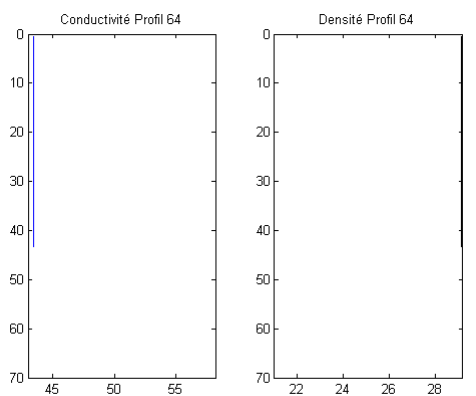
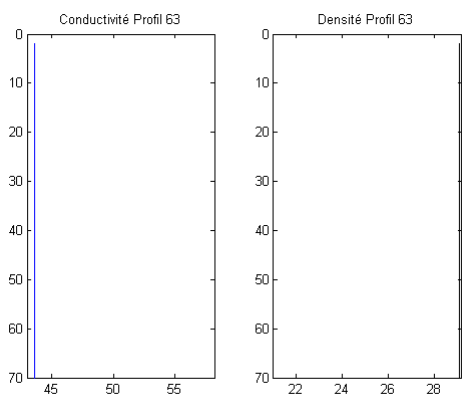
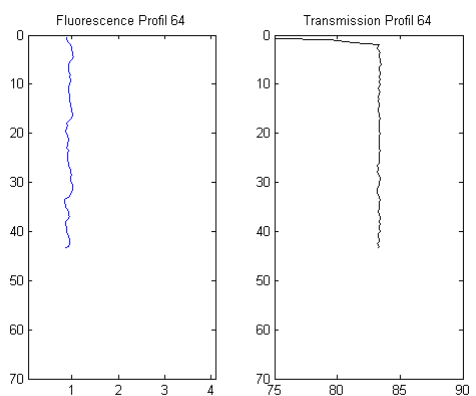
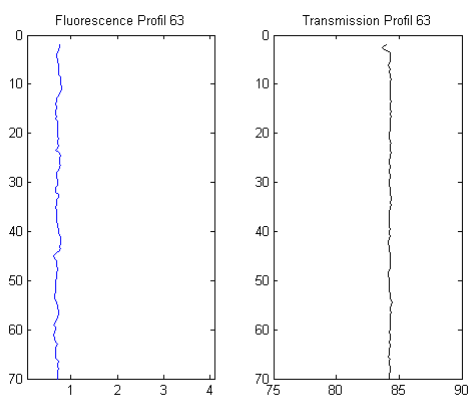
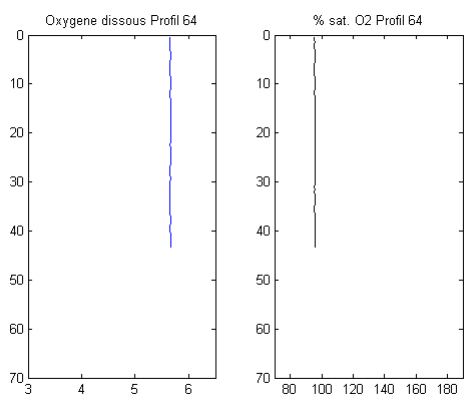
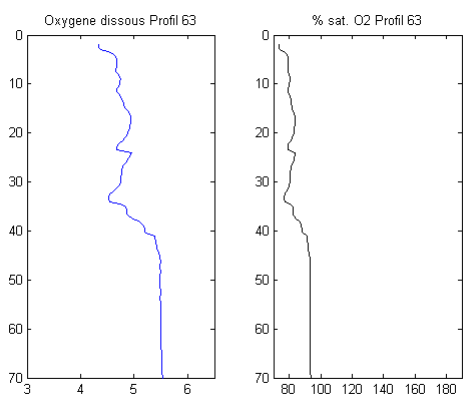
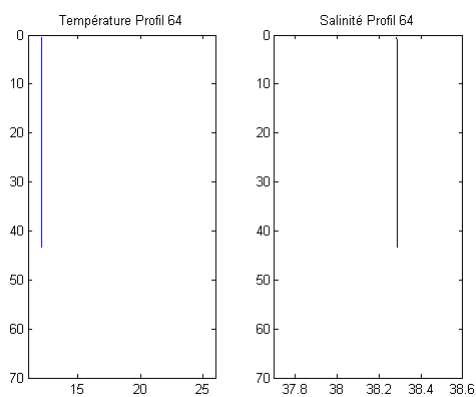
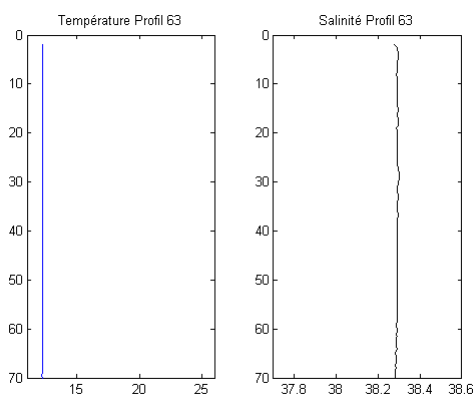
Profil 61 – Station 8

Profil 62 – Station 9



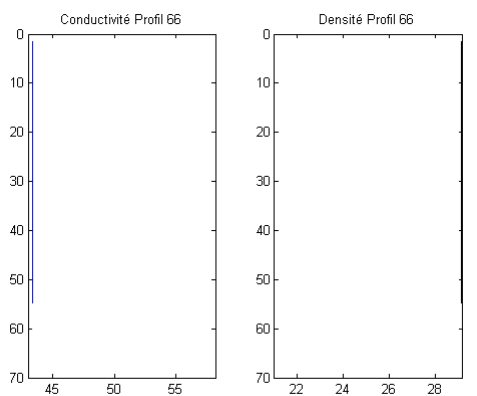
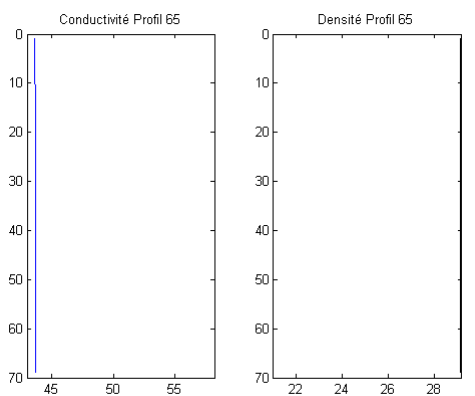
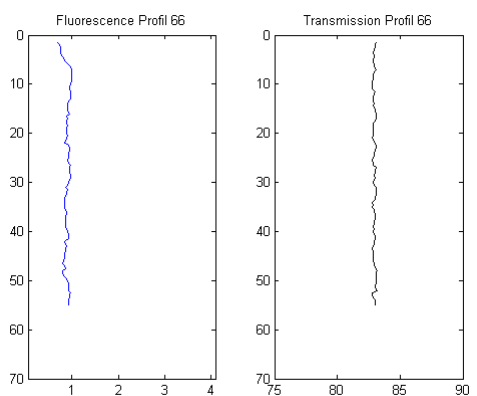
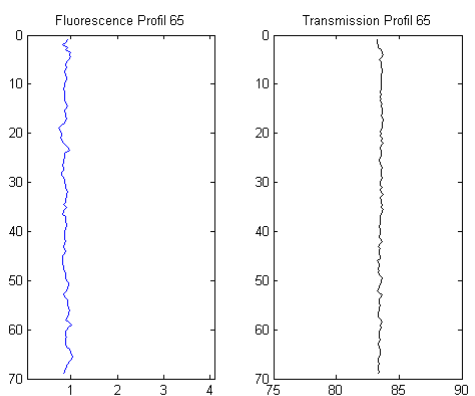
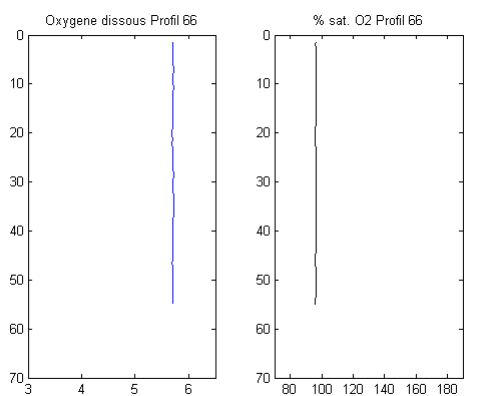
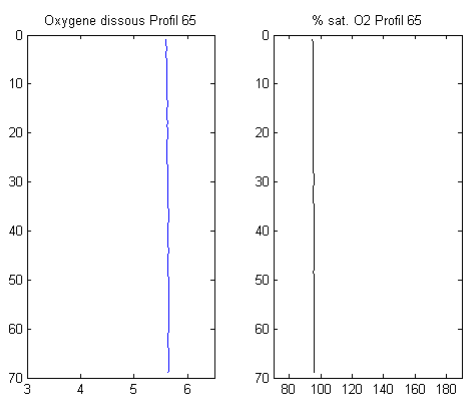
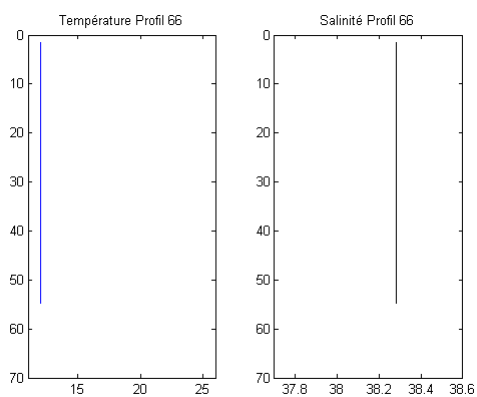
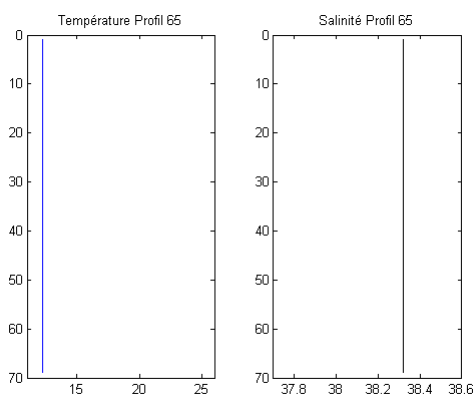
Profil 63 – Station 4

Profil 64 – Station 11



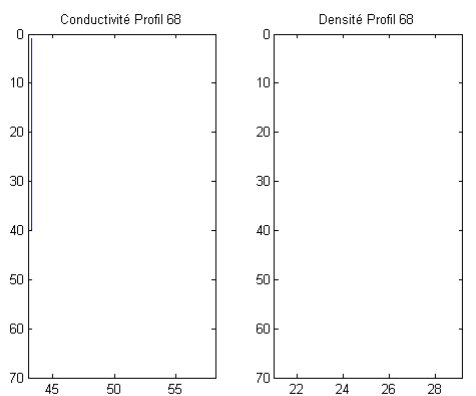
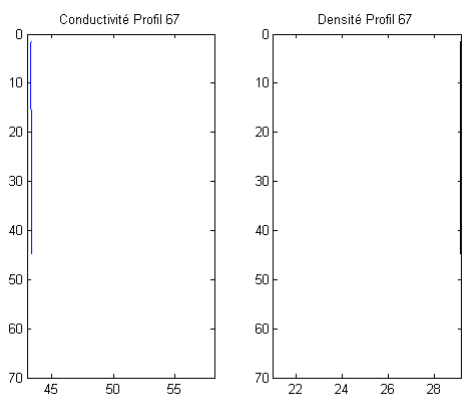
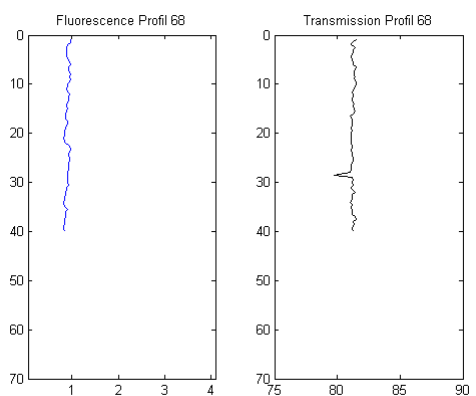
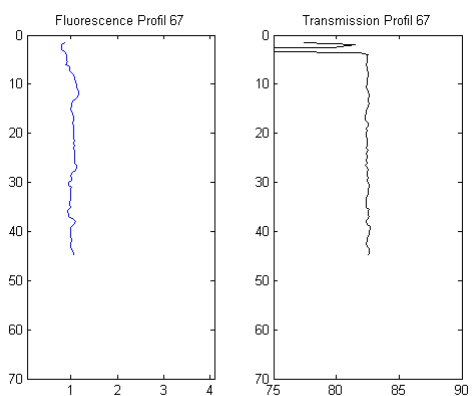
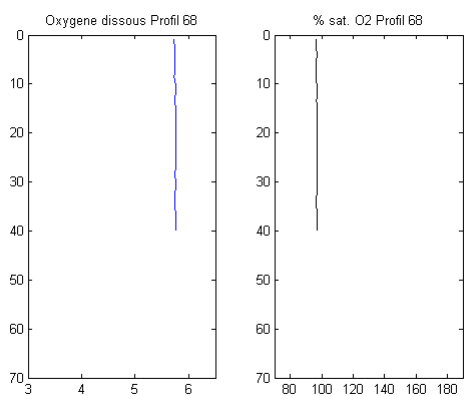
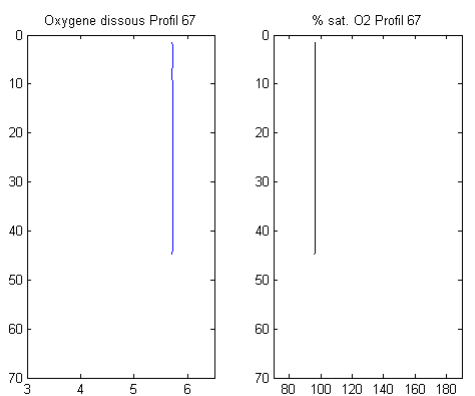
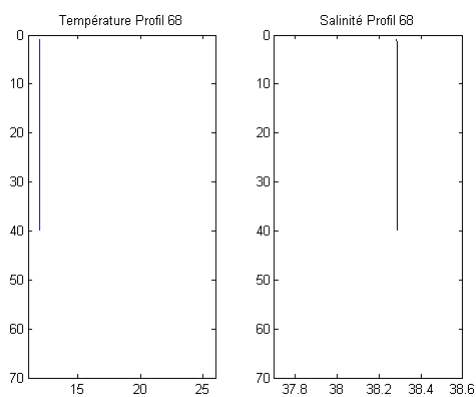
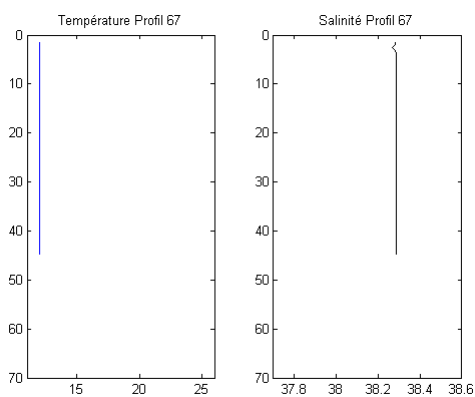
Profil 65 – Station 12

Profil 66 – Station 2

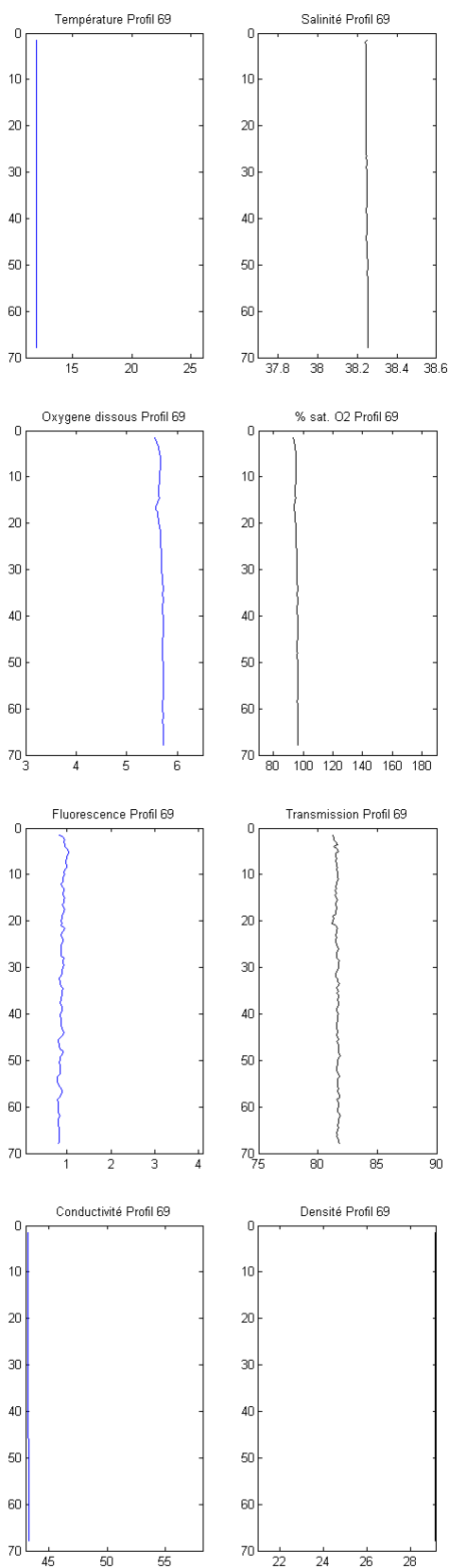


Profil 67 – Station 3

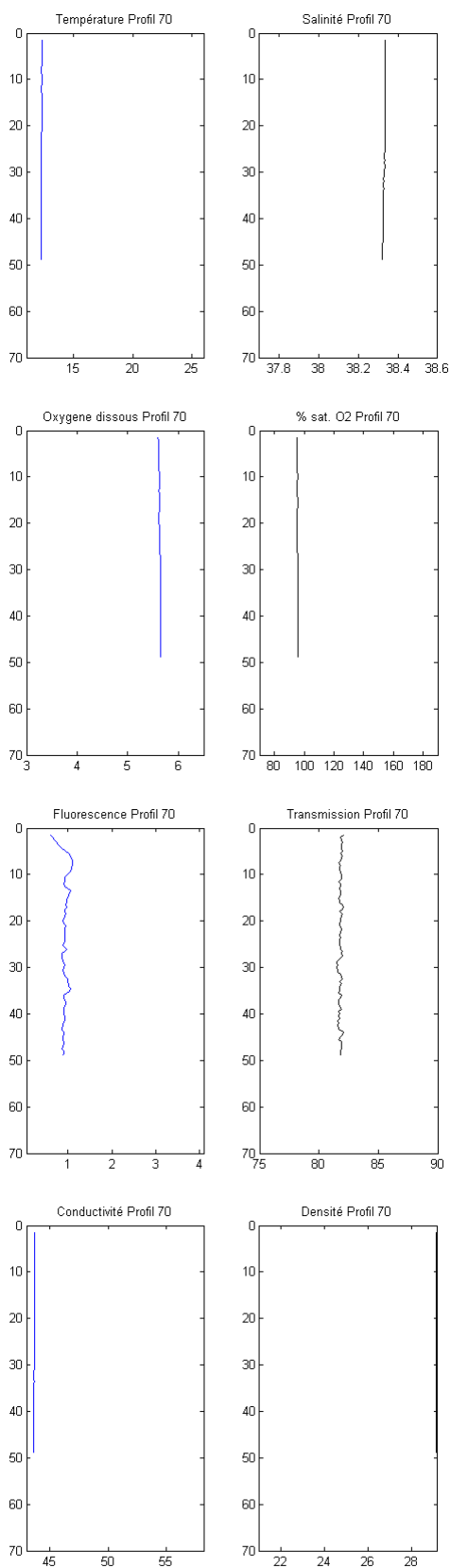
Profil 68 – Station 2



Profil 69 – Station 10

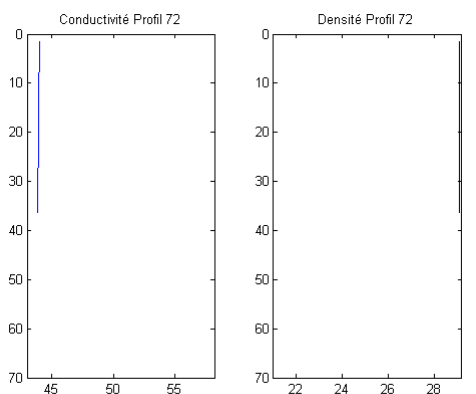
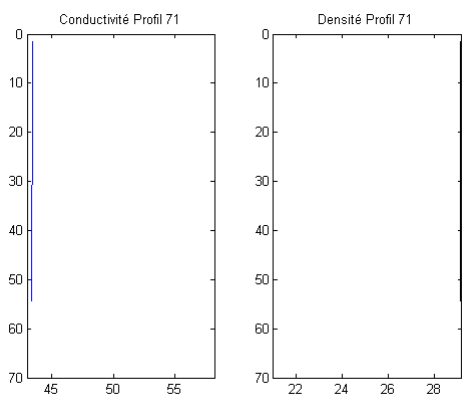
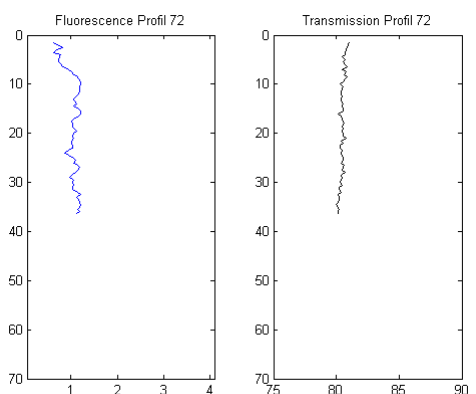
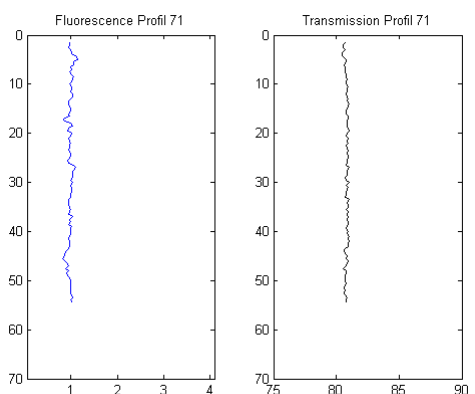
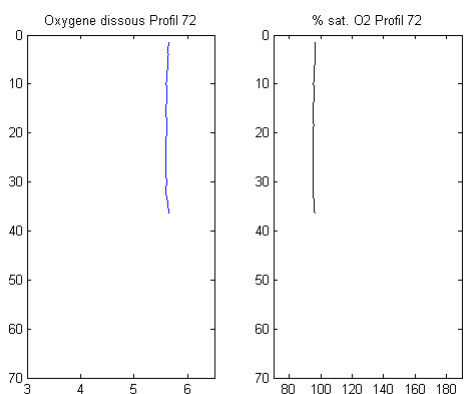
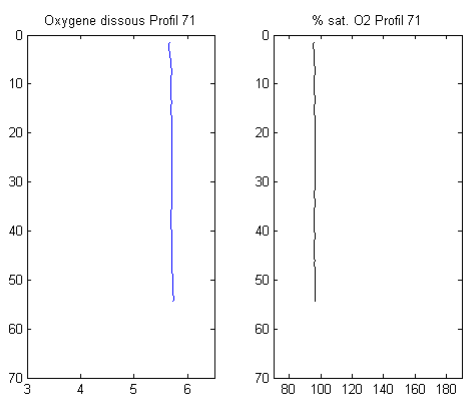
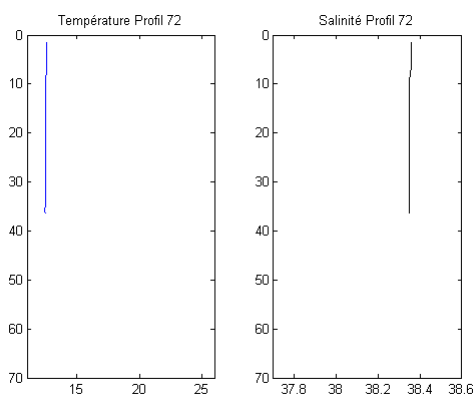
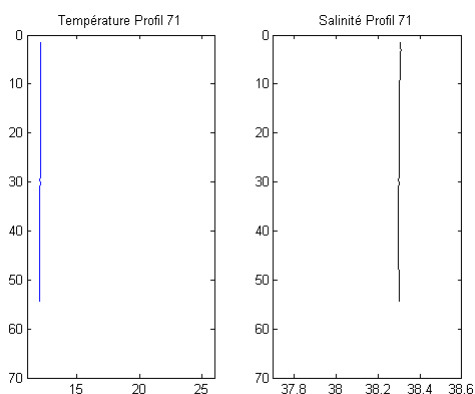


Profil 70 – Station 1

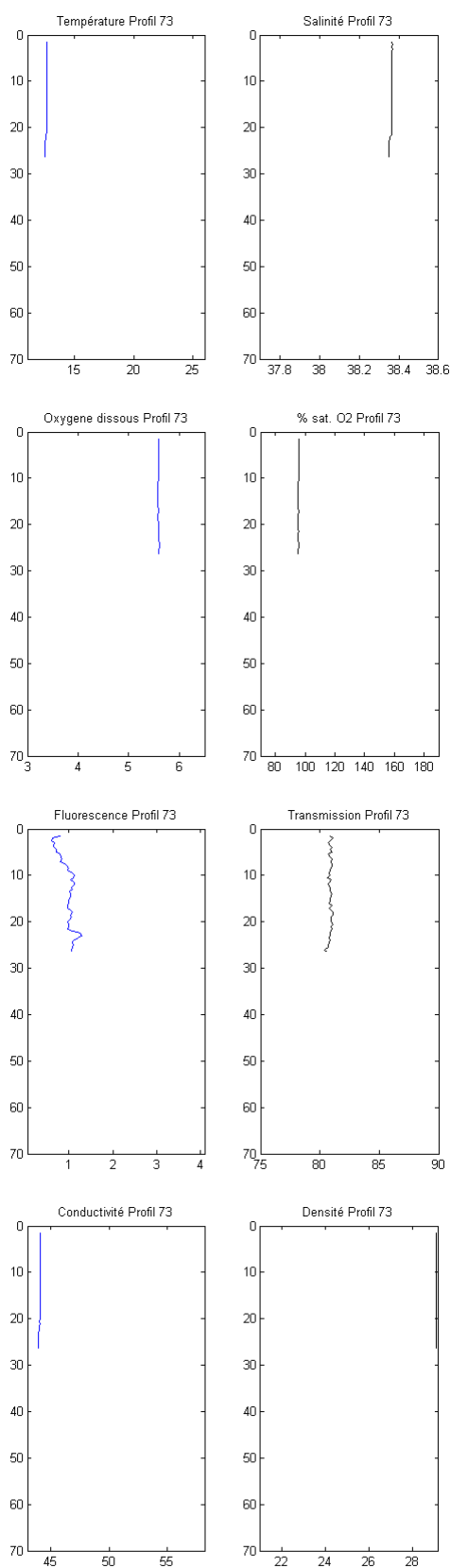


Profil 71 – Station 13

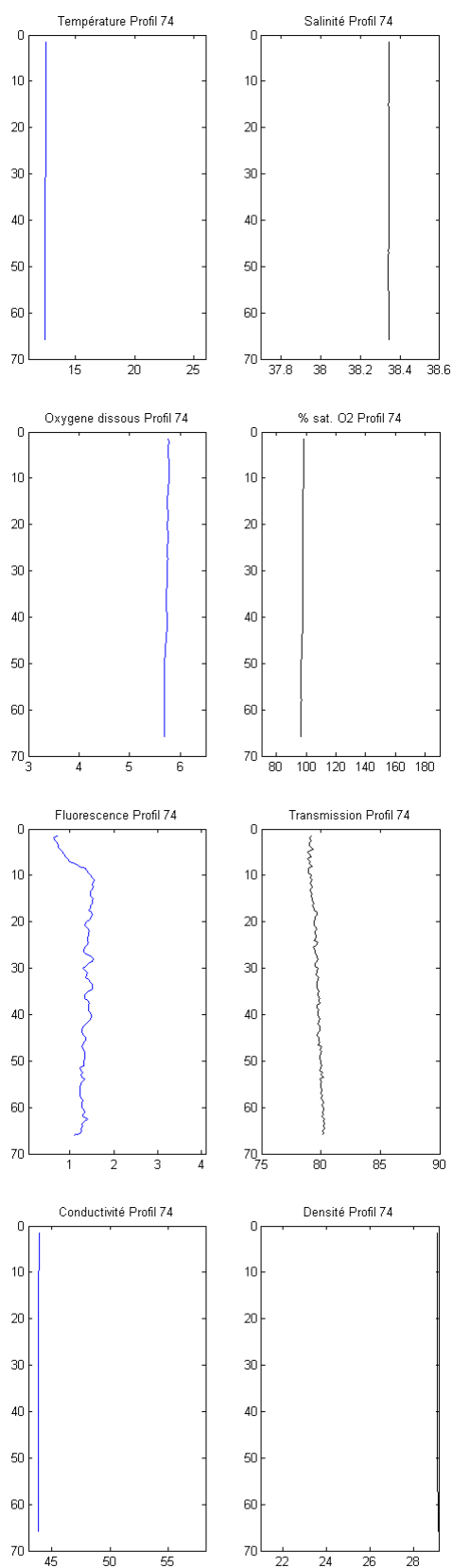
Profil 72 – Station 16



Profil 73 – Station 15

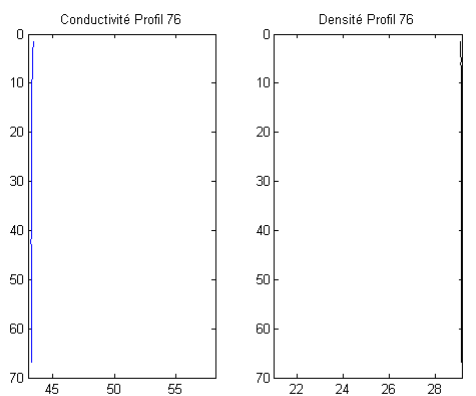
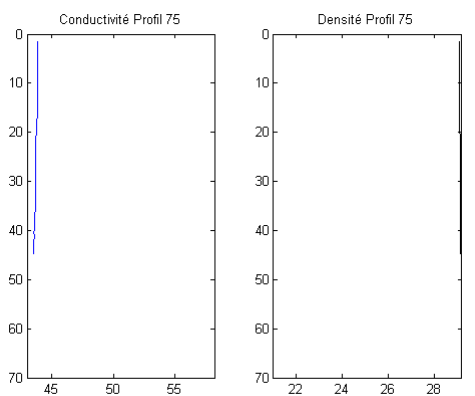
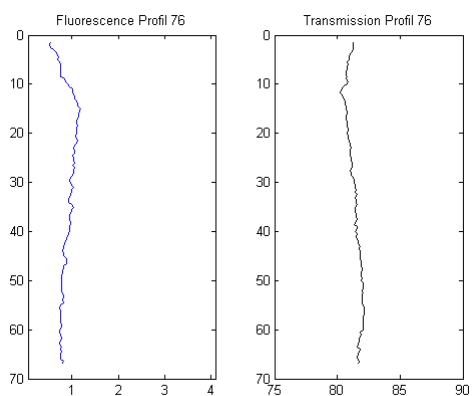
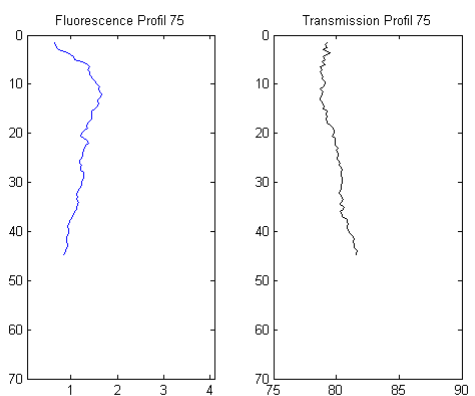
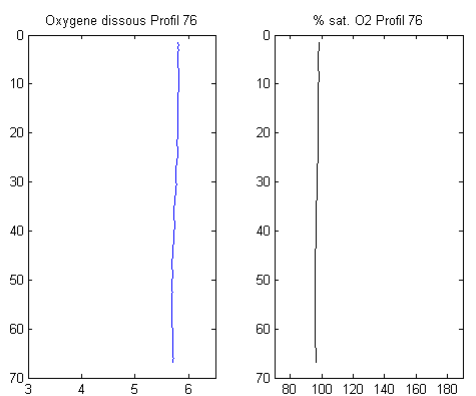
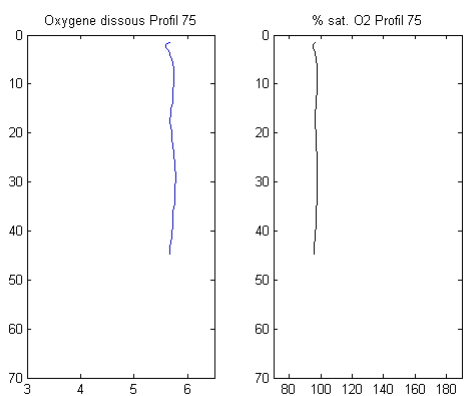
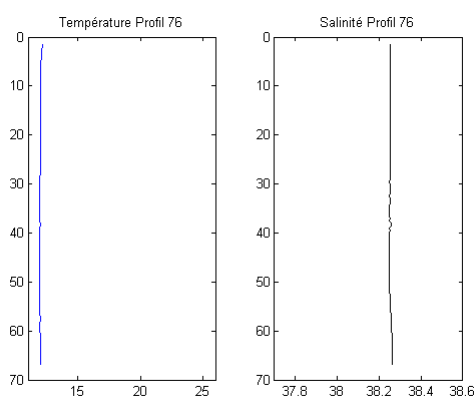
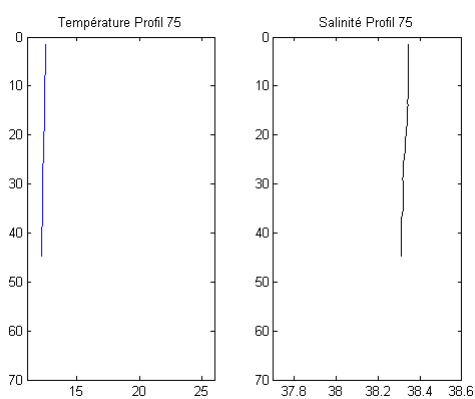


Profil 74 – Station 14



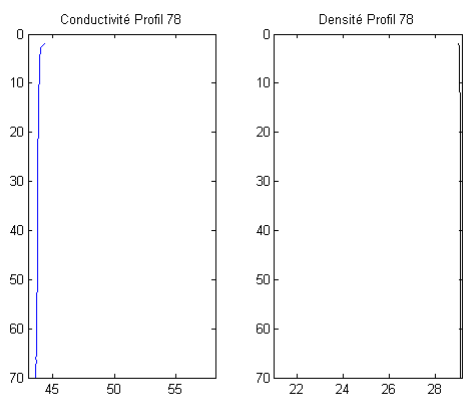
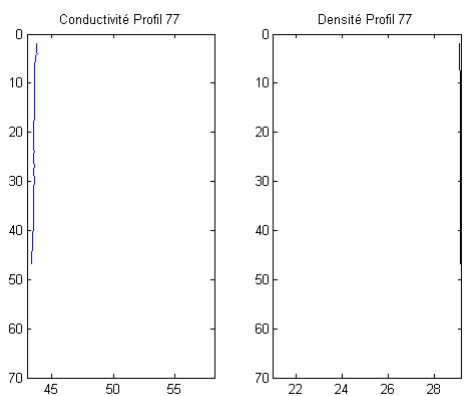
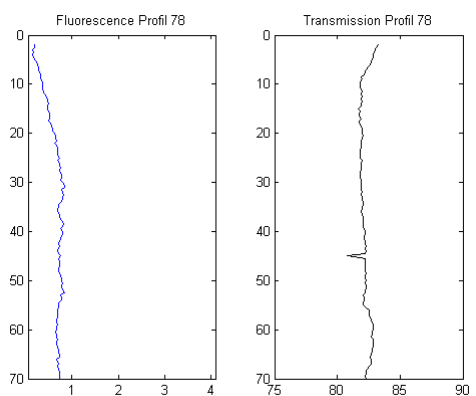
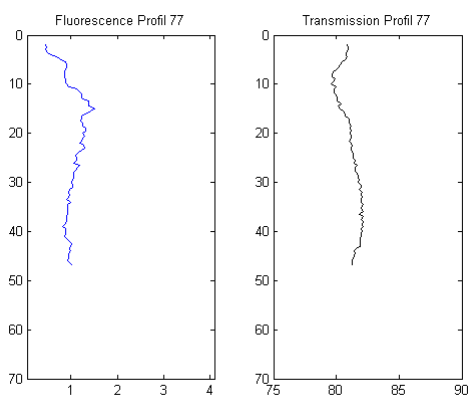
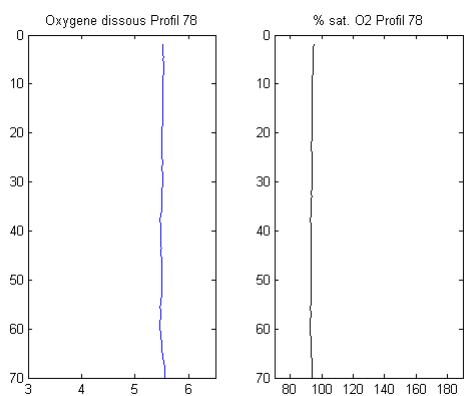
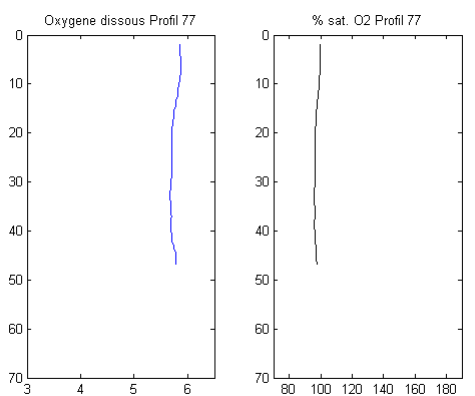
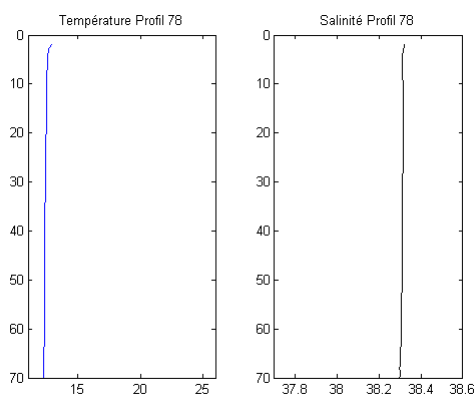
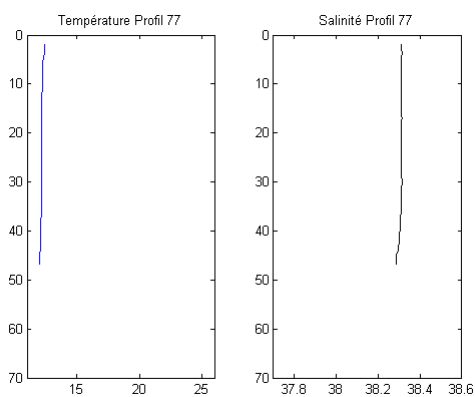
Profil 75 – Station 1

Profil 76 – Station 12



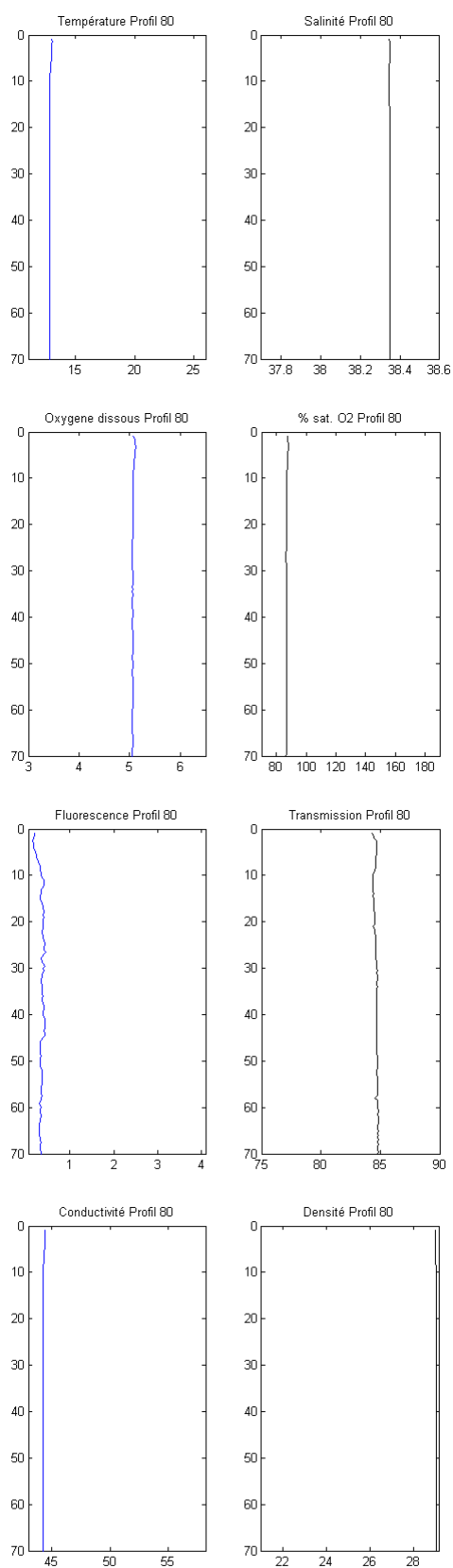
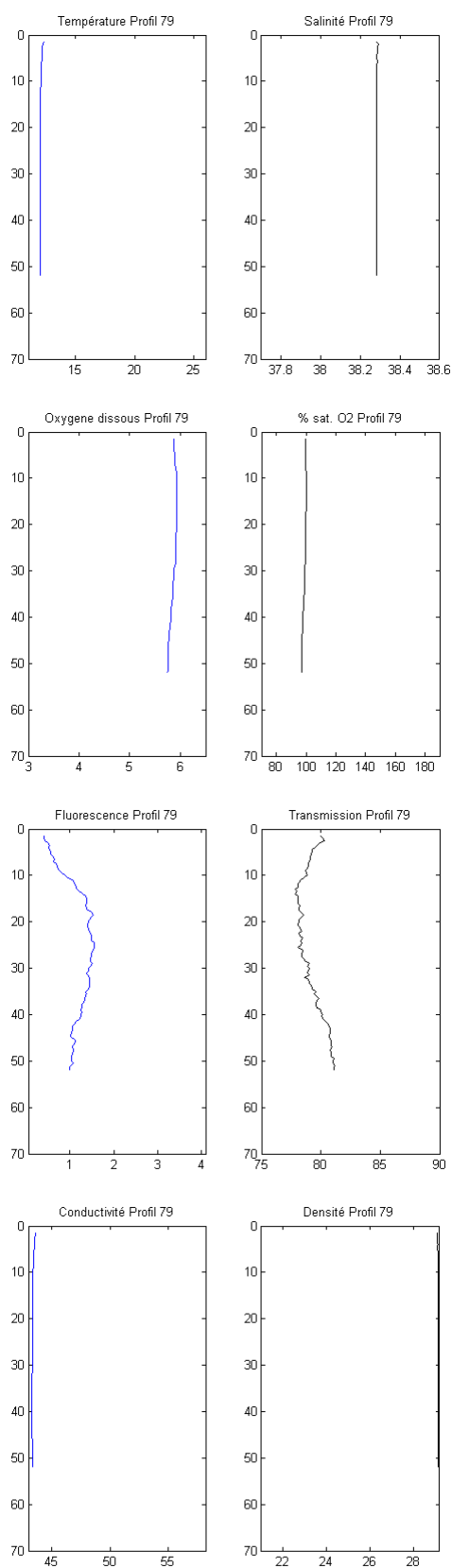
Profil 77 – Station 22

Profil 78 – Station 4



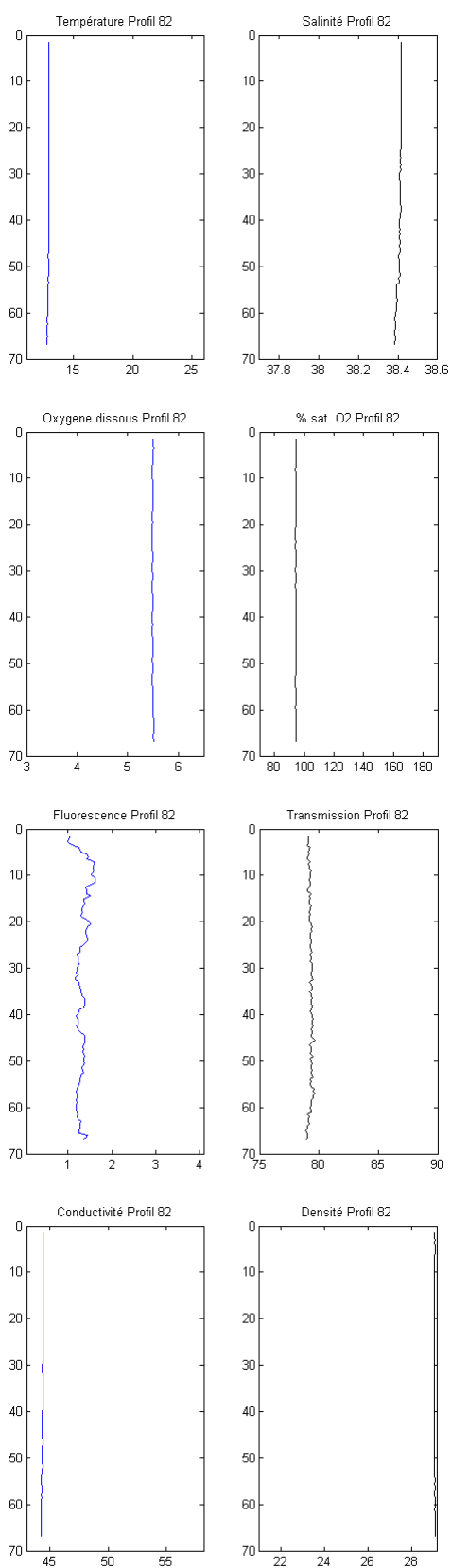
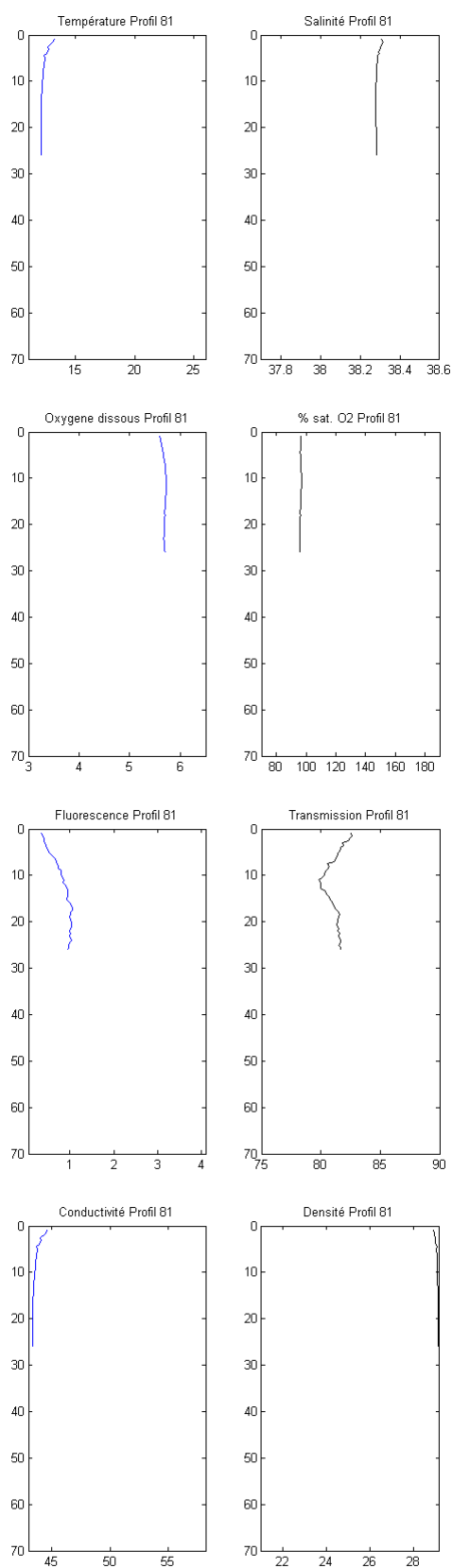
Profil 79 – Station 8

Profil 80 – Station 23



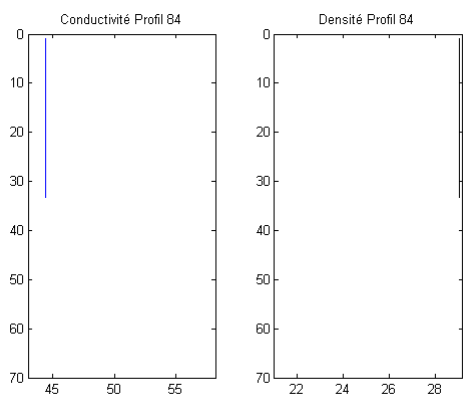
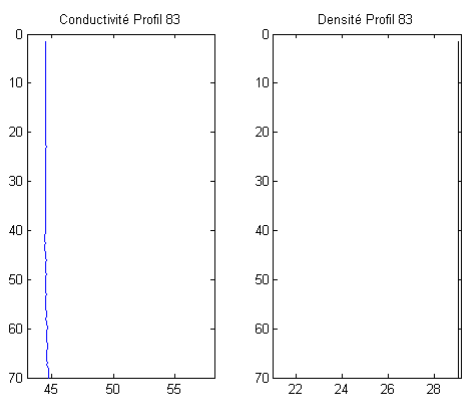
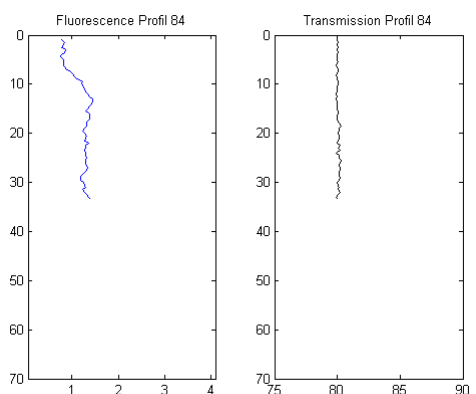
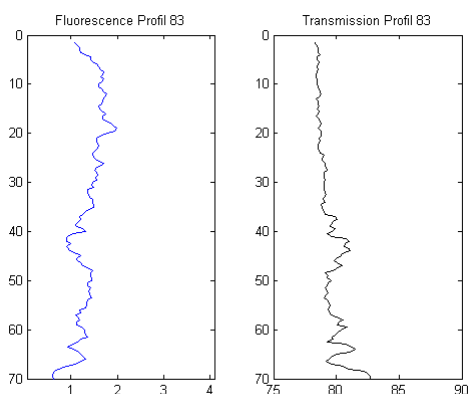
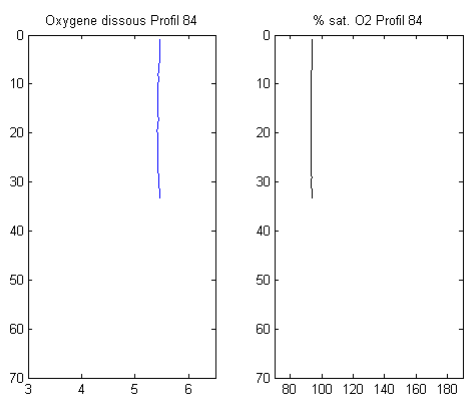
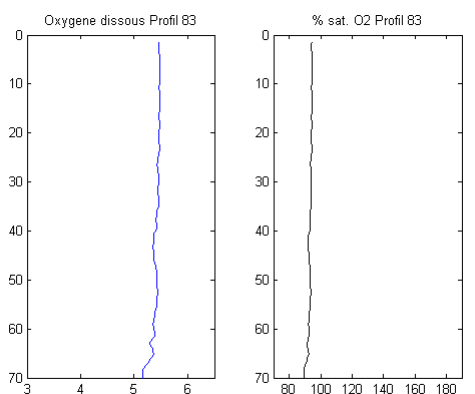
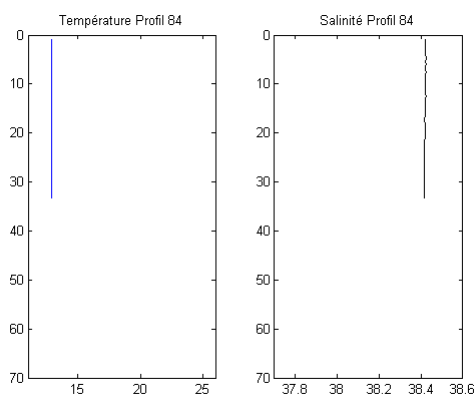
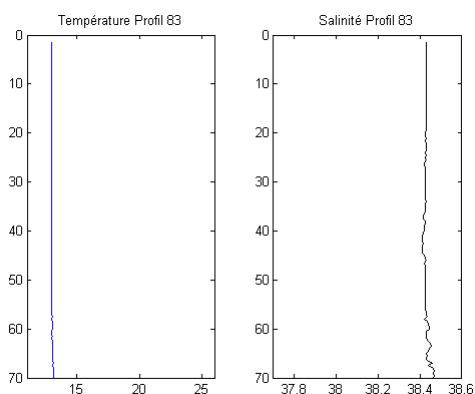
Profil 81 – Station 7

Profil 82 – Station 19



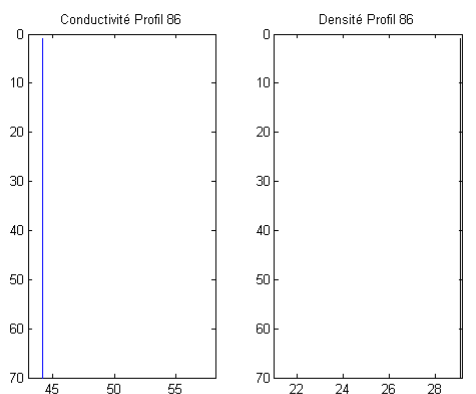
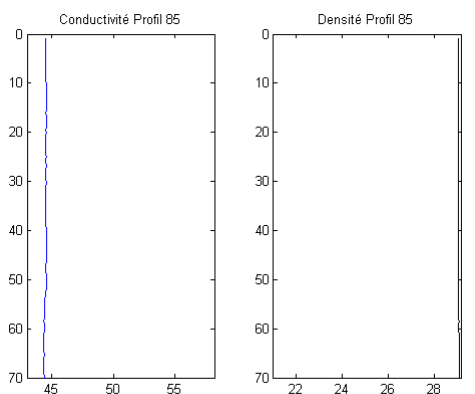
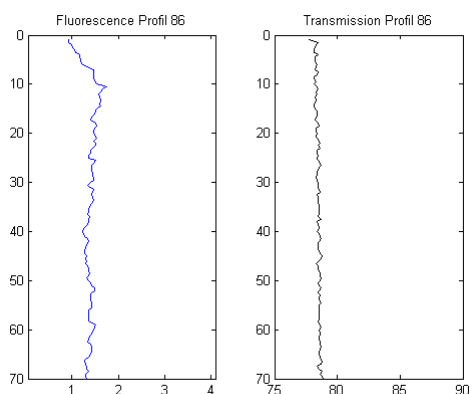
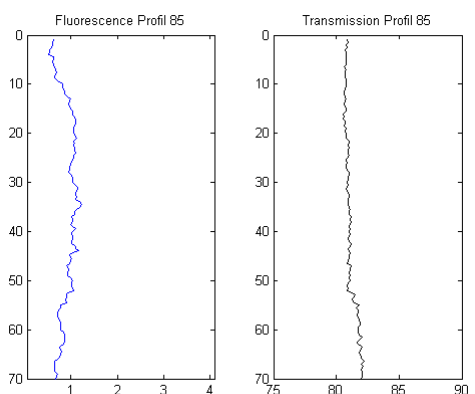
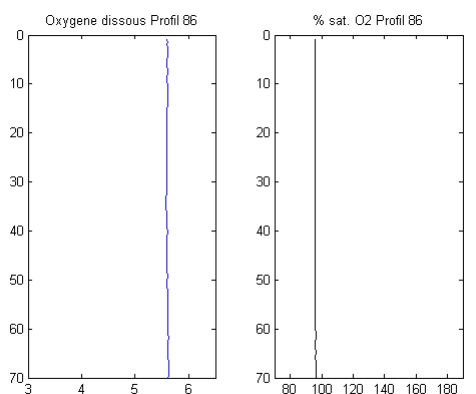
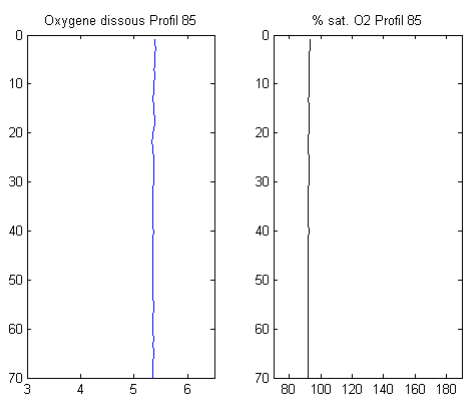
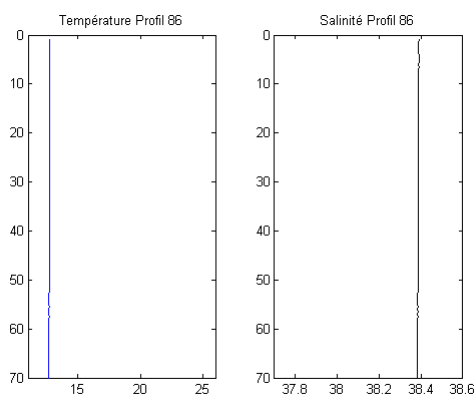
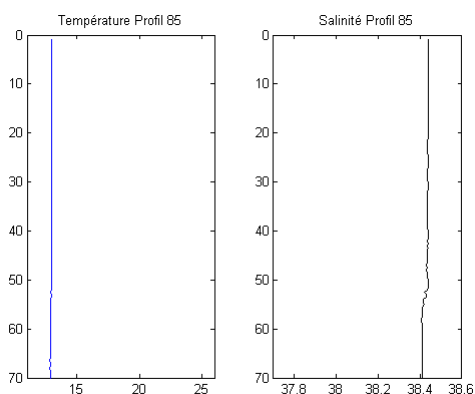
Profil 83 – Station 20

Profil 84 – Station 17

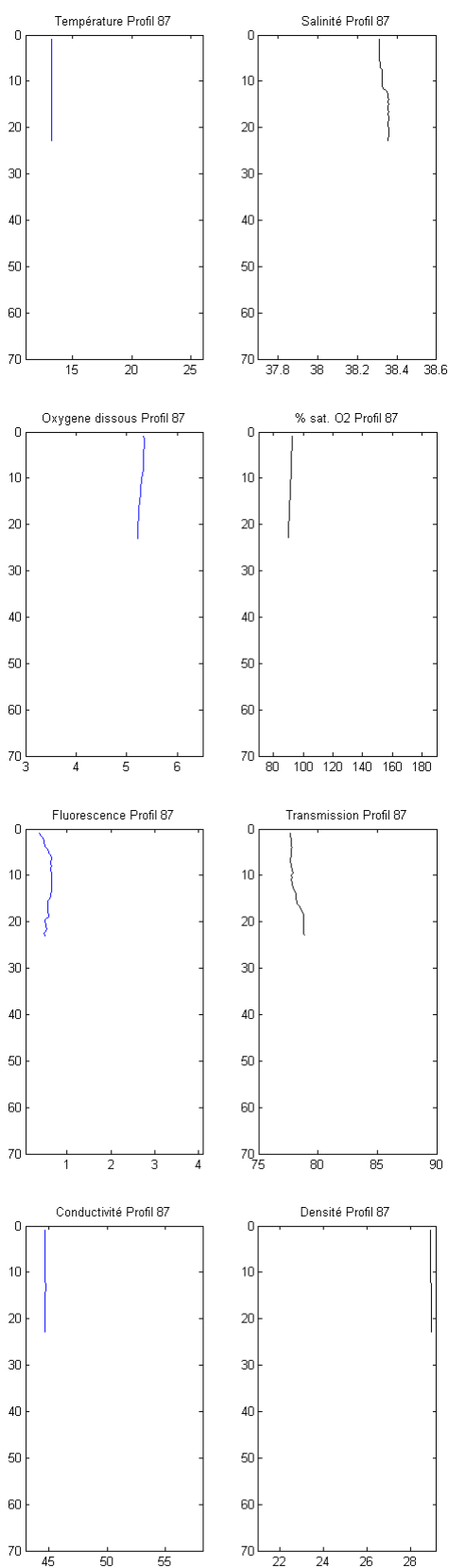


Profil 85 – Station 18

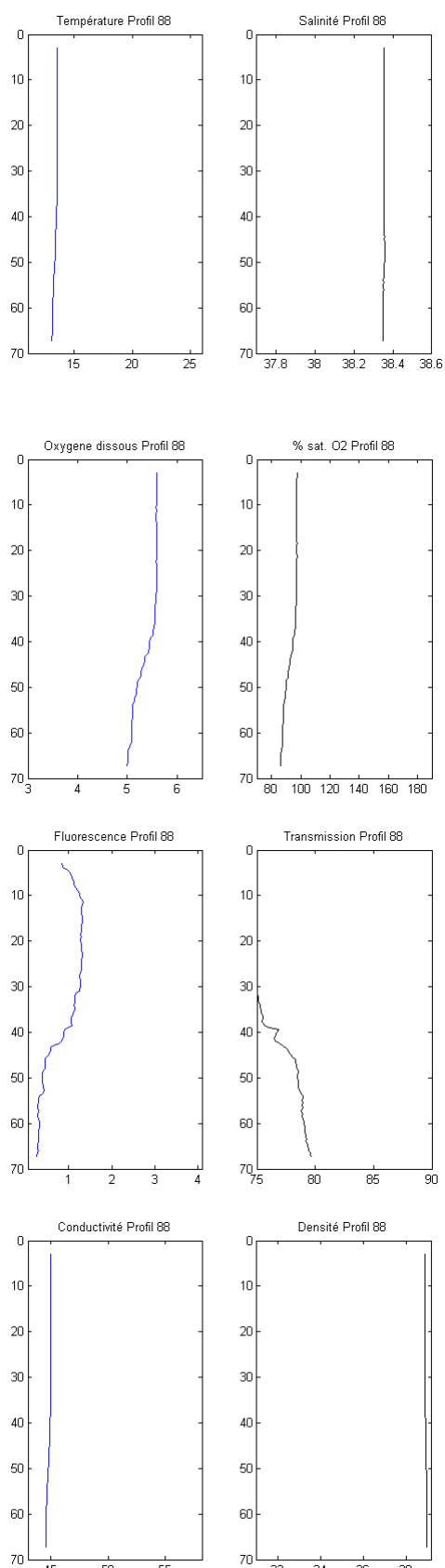
Profil 86 – Station 21



Profil 87 – Station 7

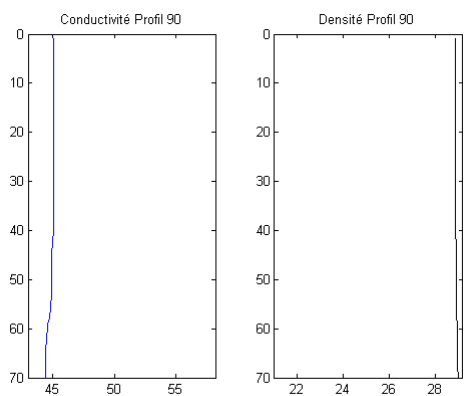
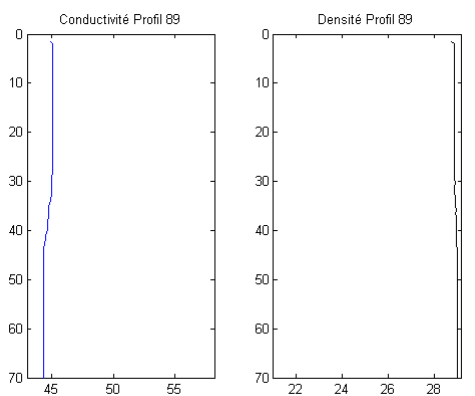
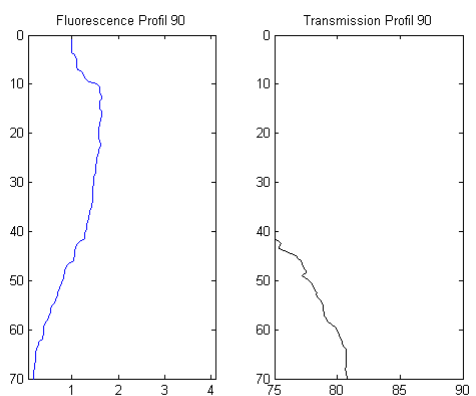
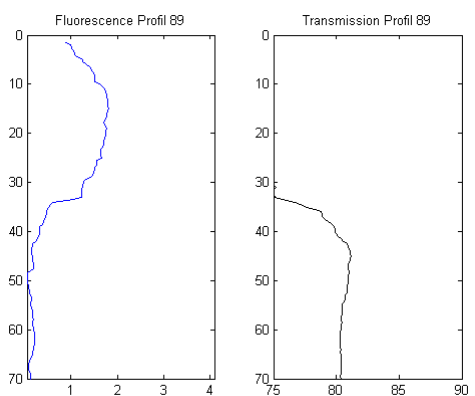
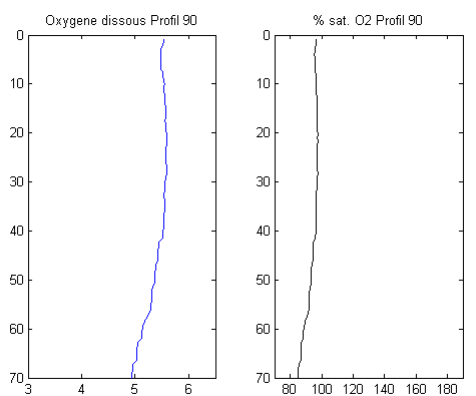
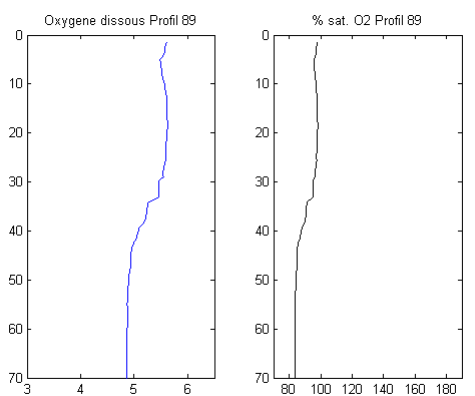
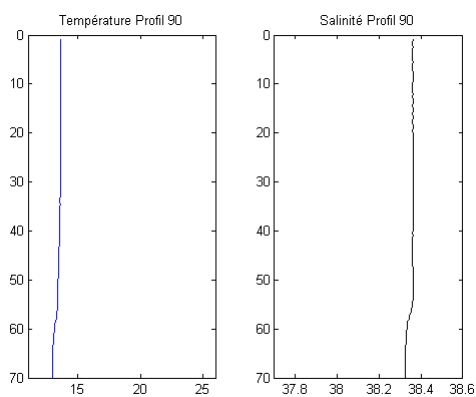
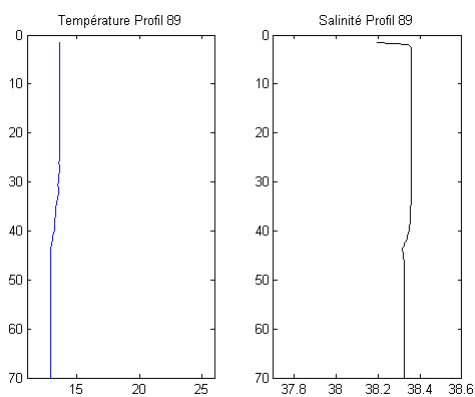


Profil 88 – Station 6



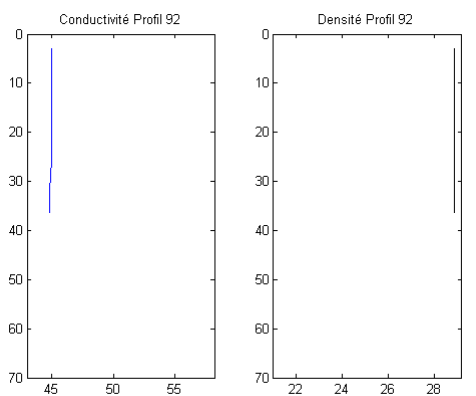
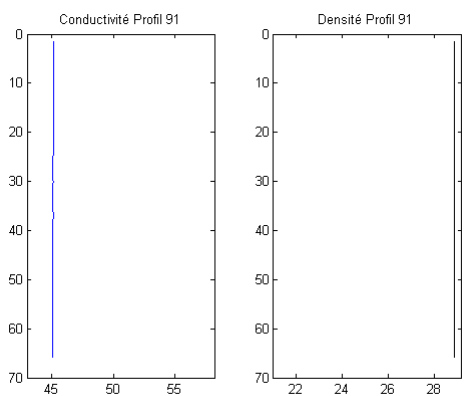
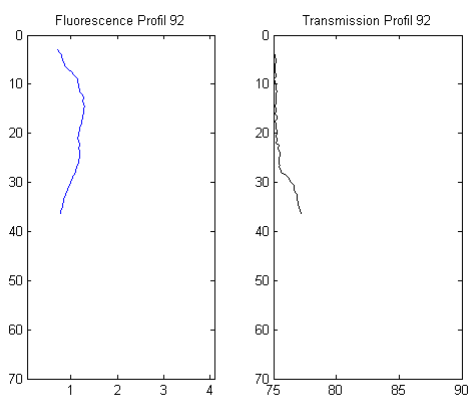
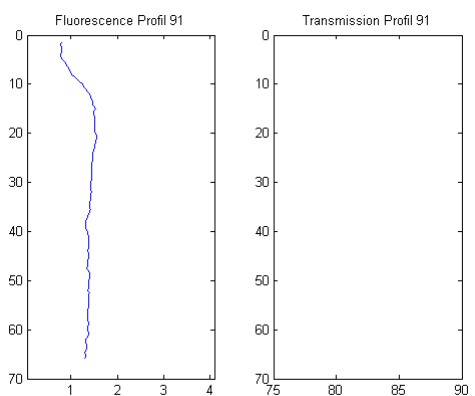
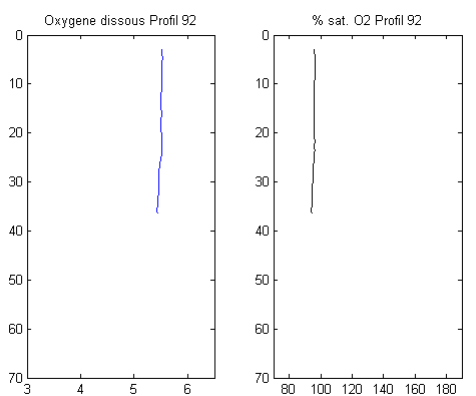
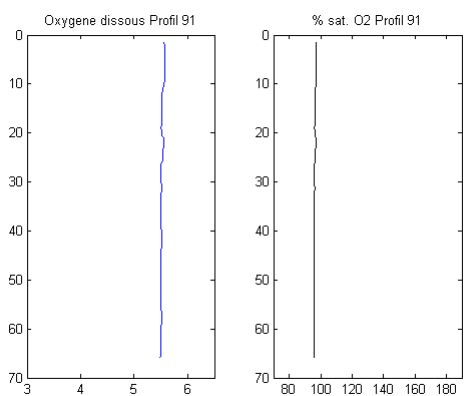
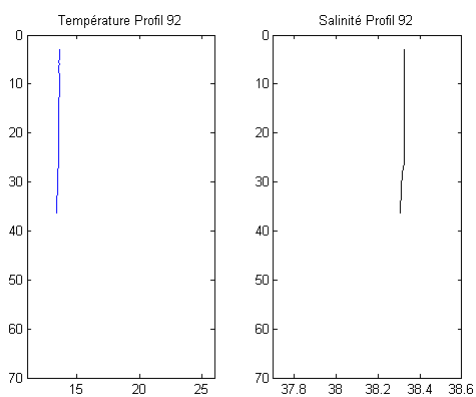
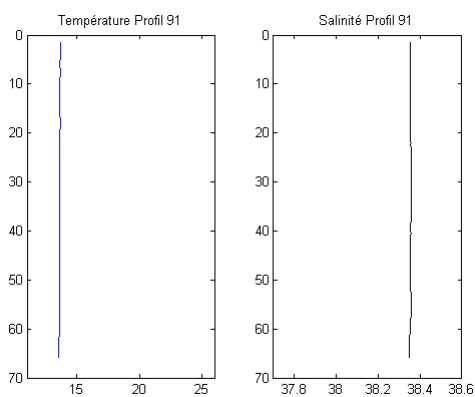
Profil 89 – Station 5

Profil 90 – Station 23



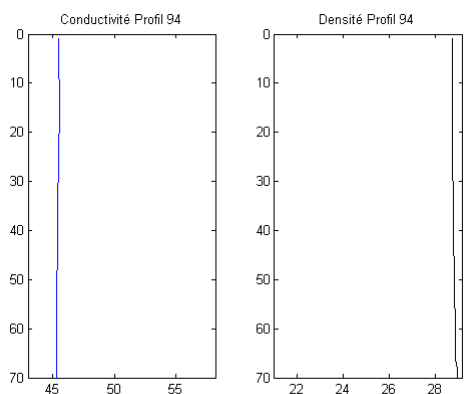
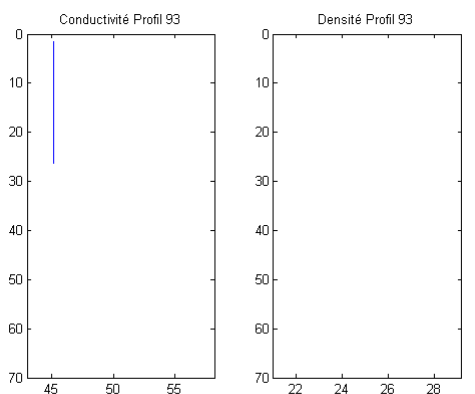
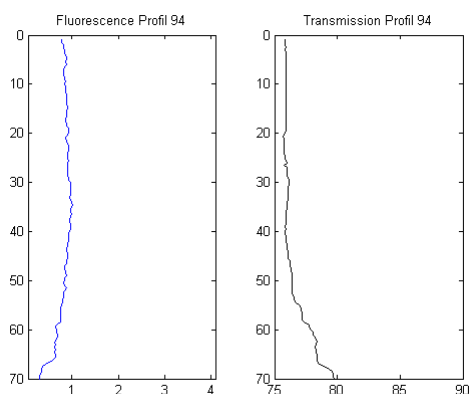
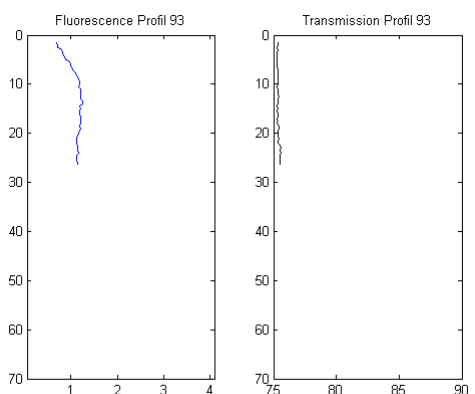
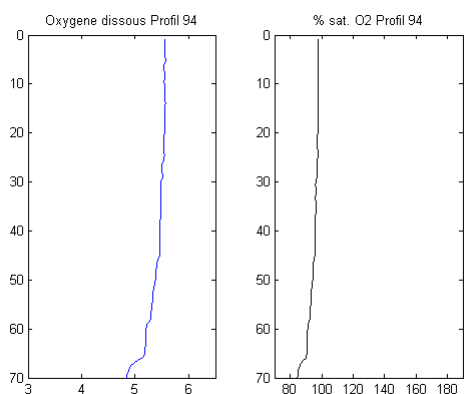
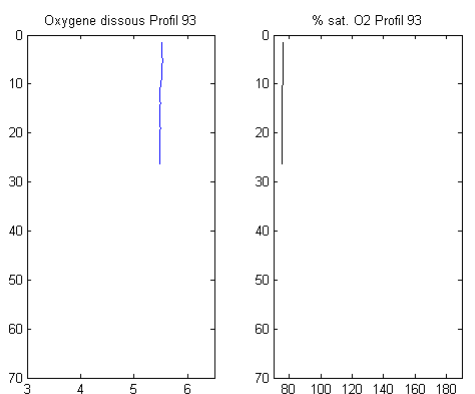
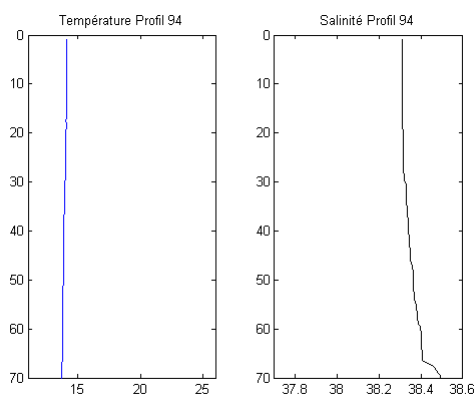
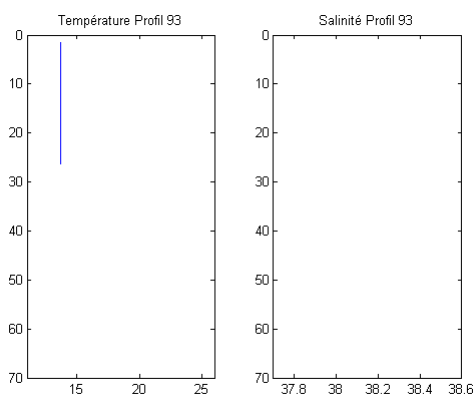
Profil 91 – Station 14

Profil 92 – Station 16

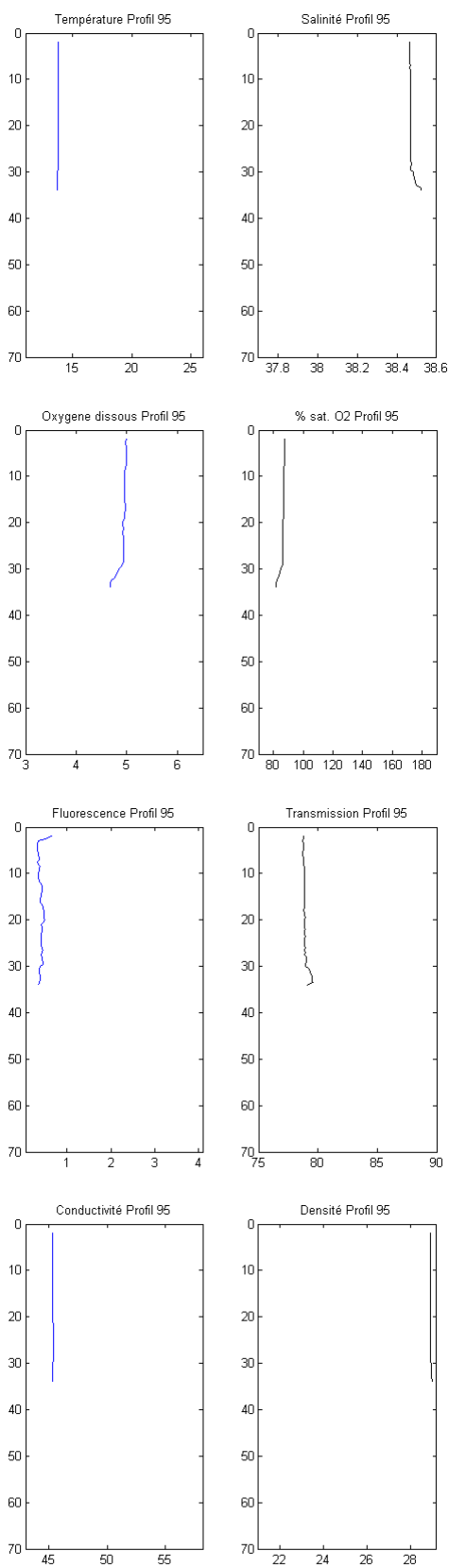


Profil 93 – Station 15

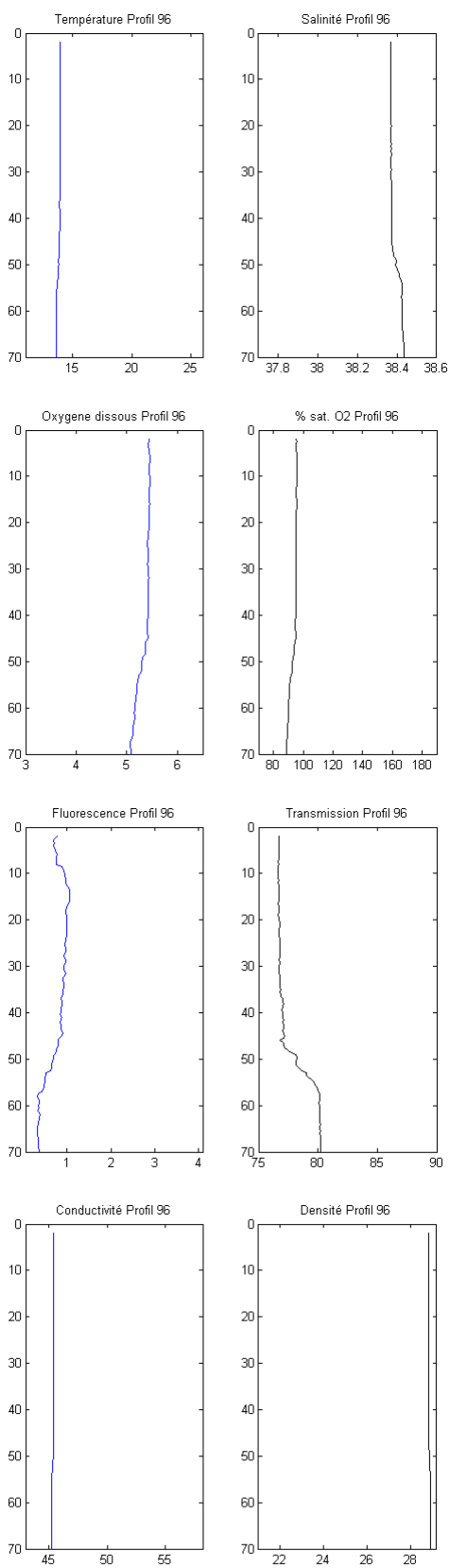
Profil 94 – Station 21



Profil 95 – Station 17

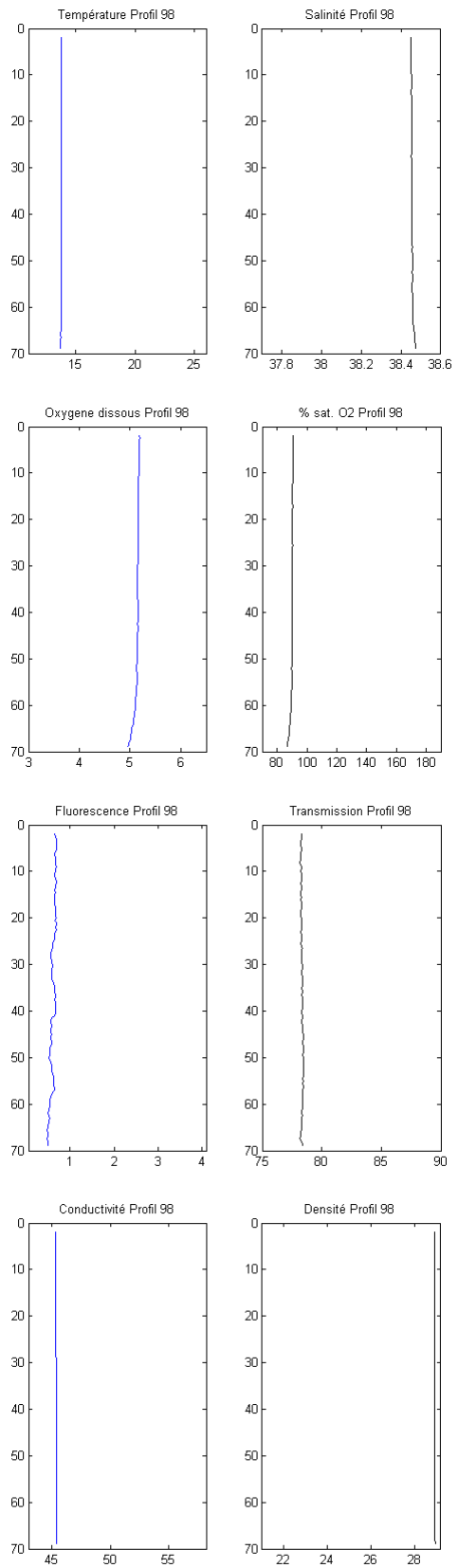
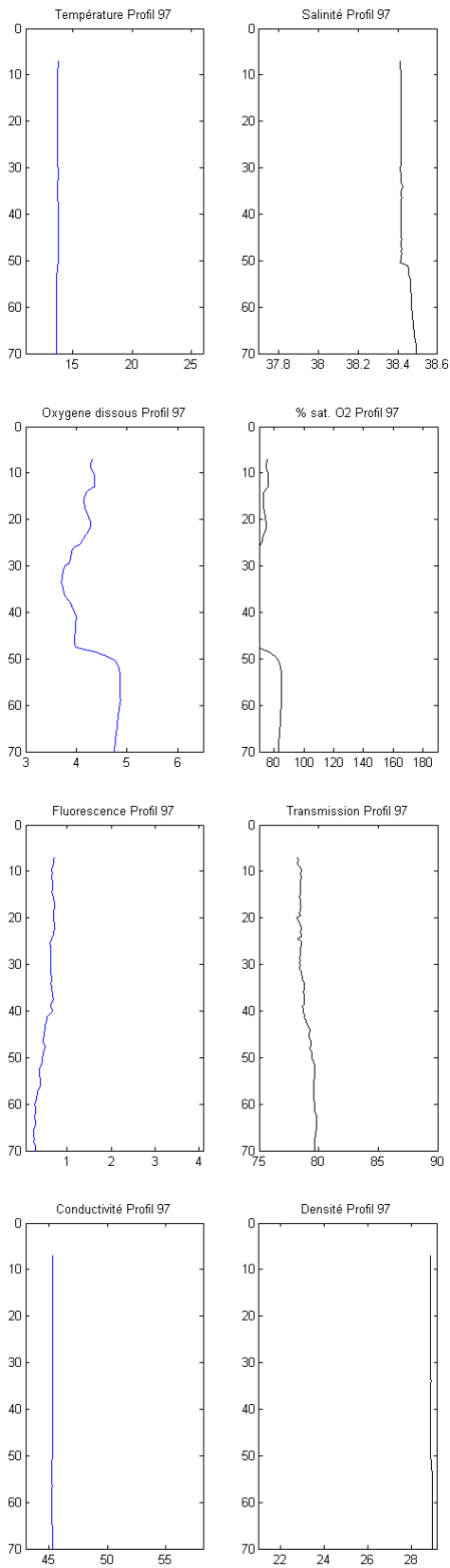


Profil 96 – Station 18



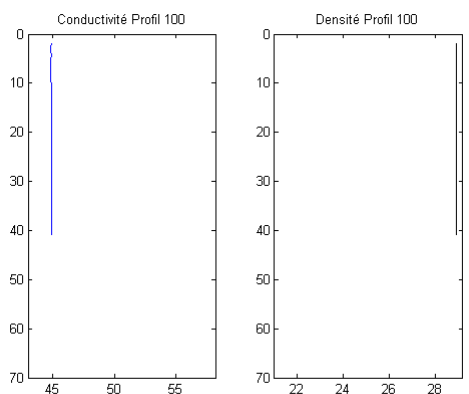
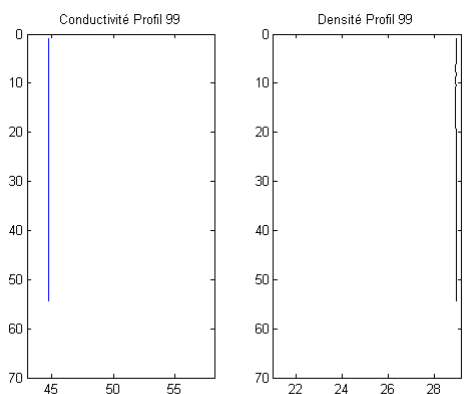
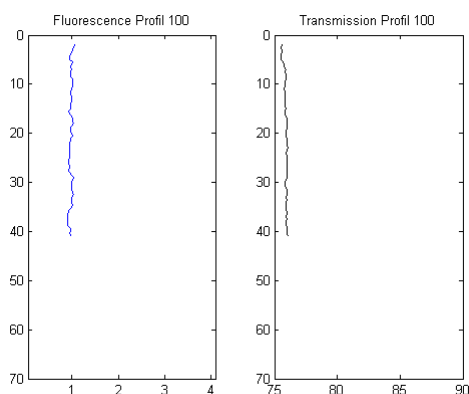
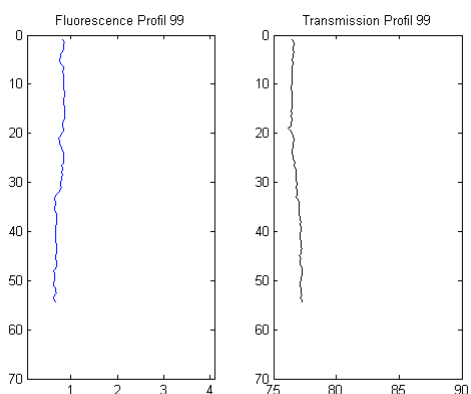
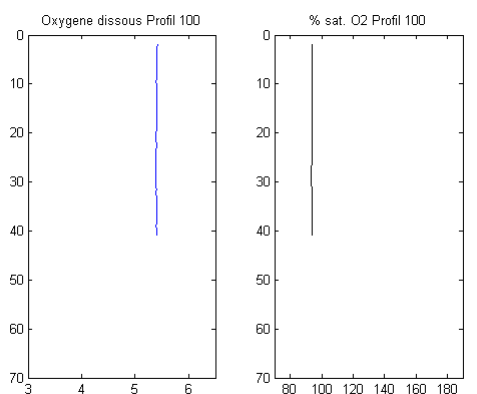
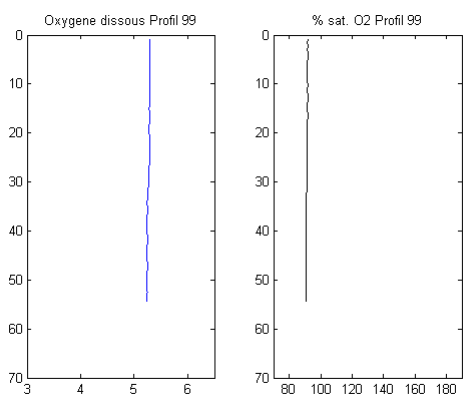
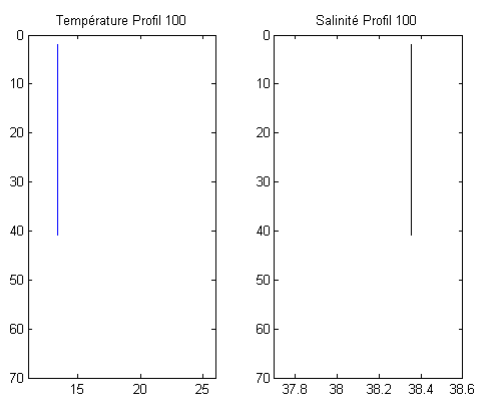
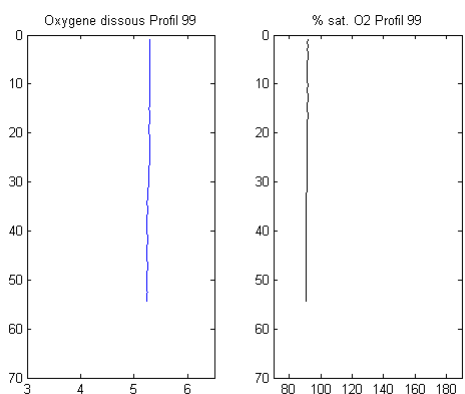
Profil 97 – Station 20

Profil 98 – Station 19

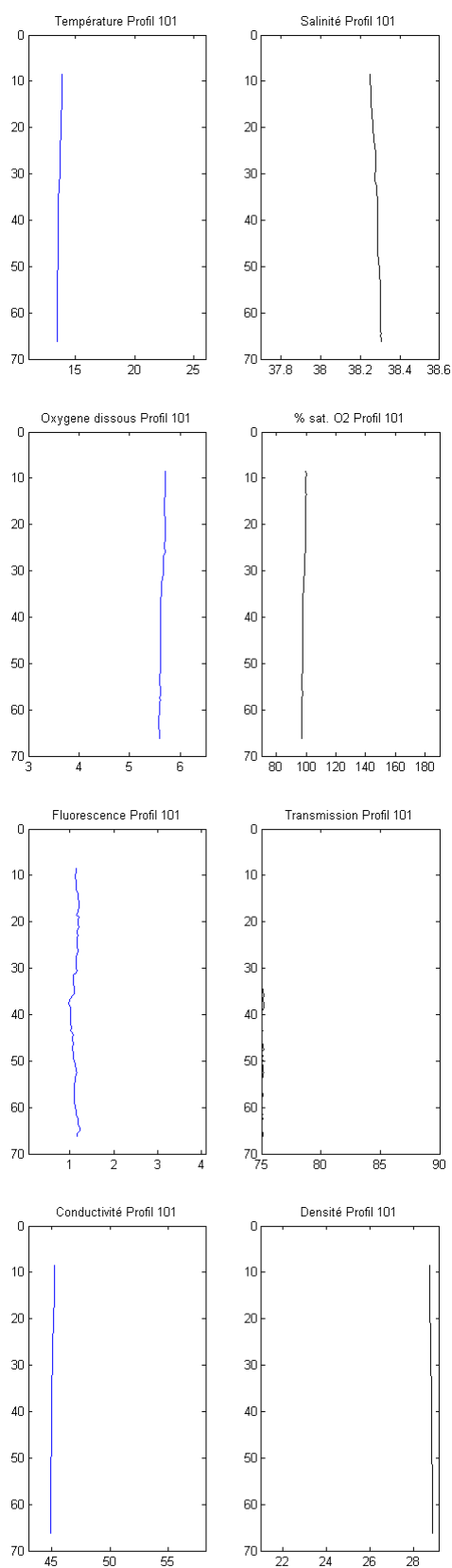


Profil 99 – Station 13

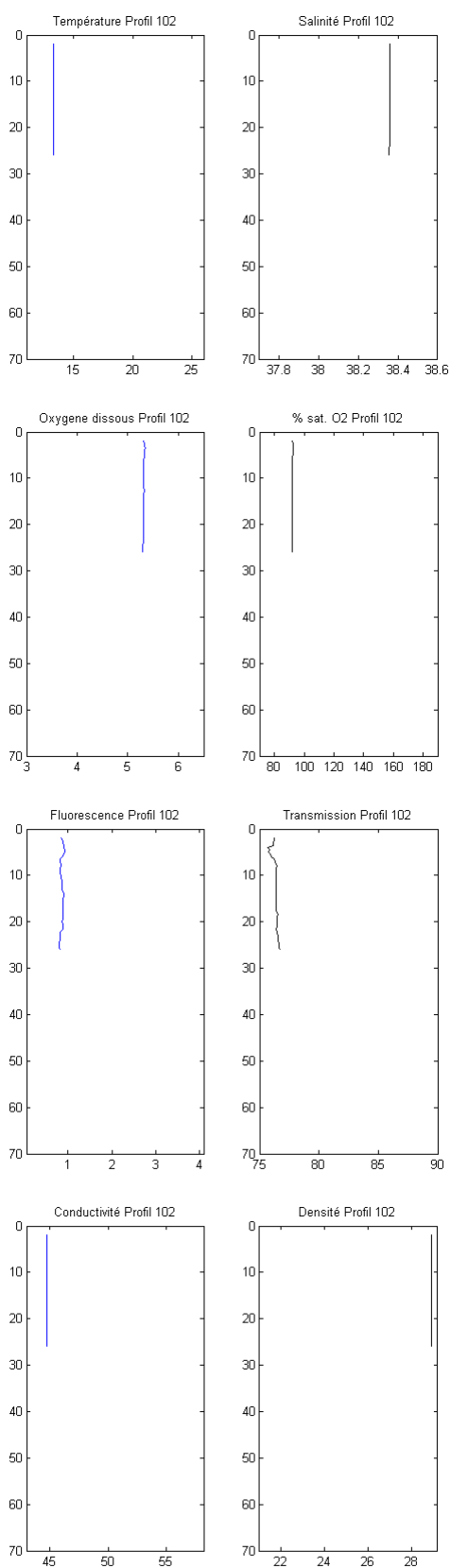
Profil 100 – Station 1



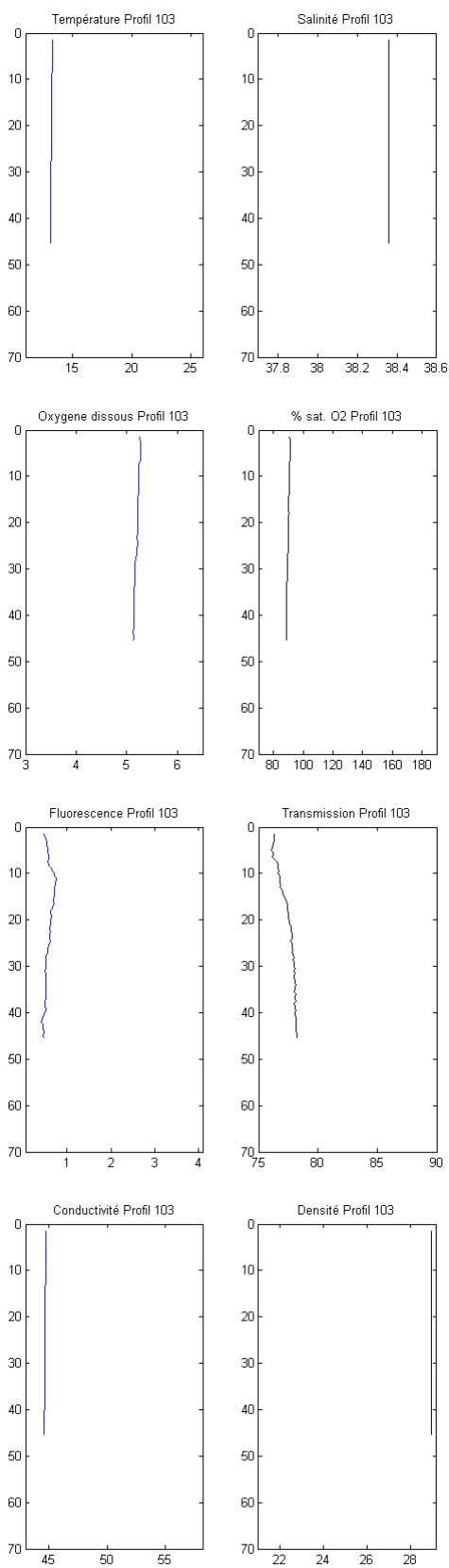
Profil 101 – Station 10



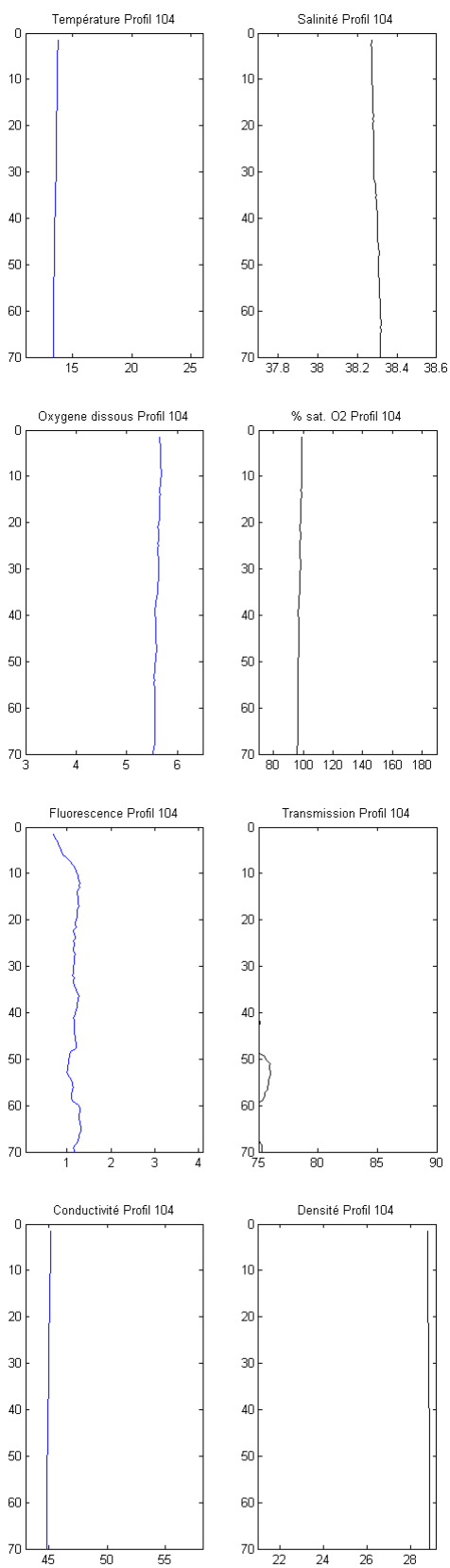
Profil 102 – Station 2



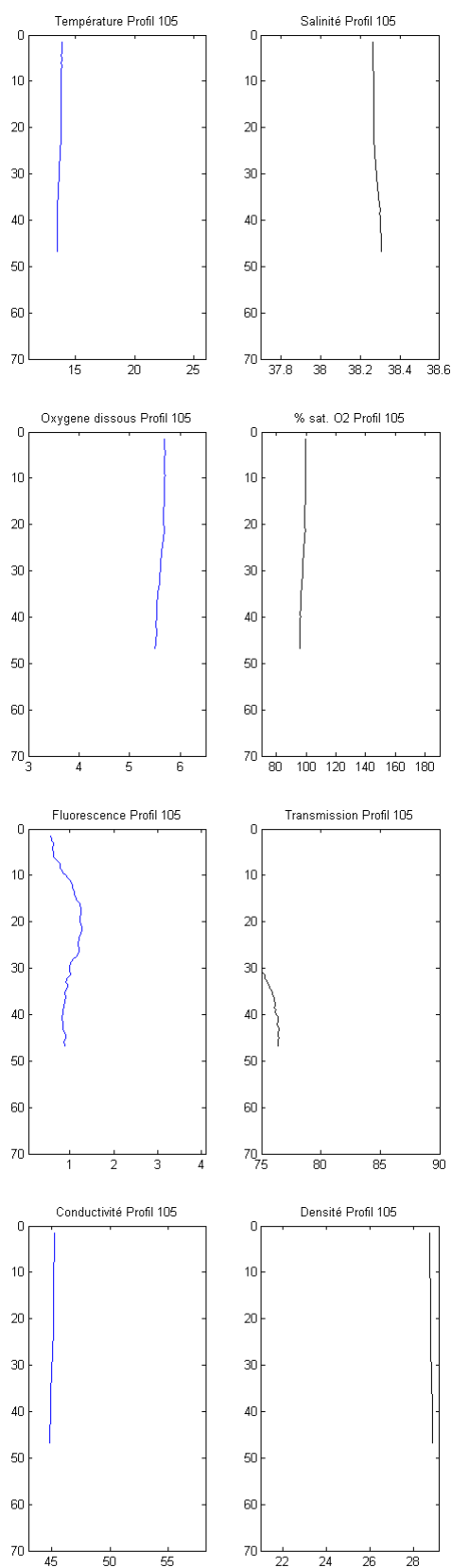
Profil 103 – Station 3



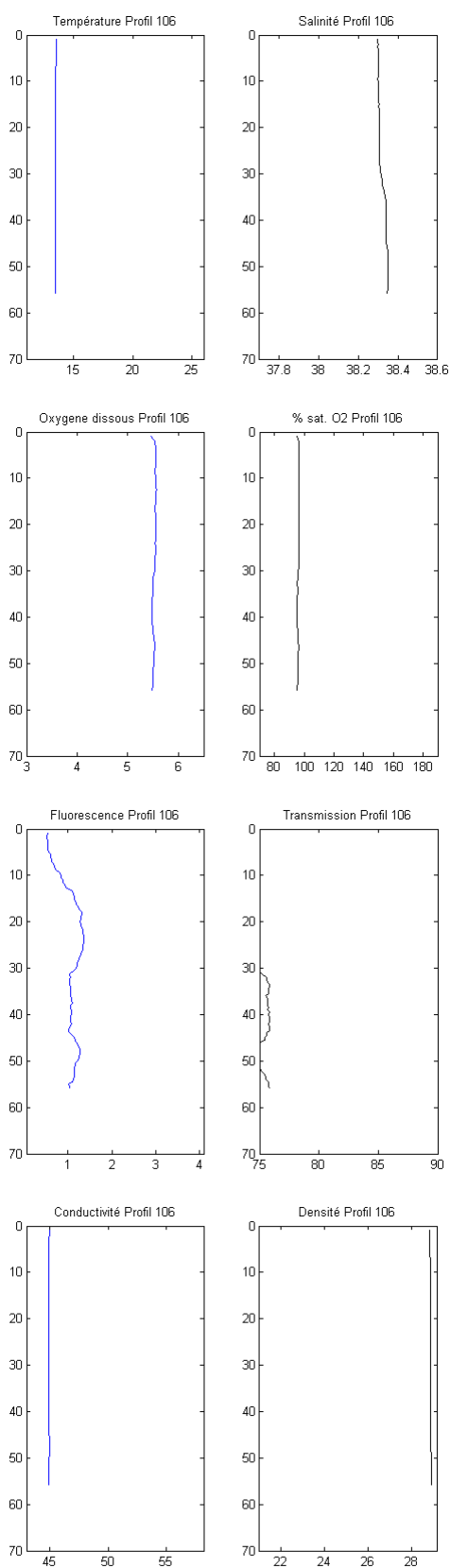
Profil 104 – Station 12



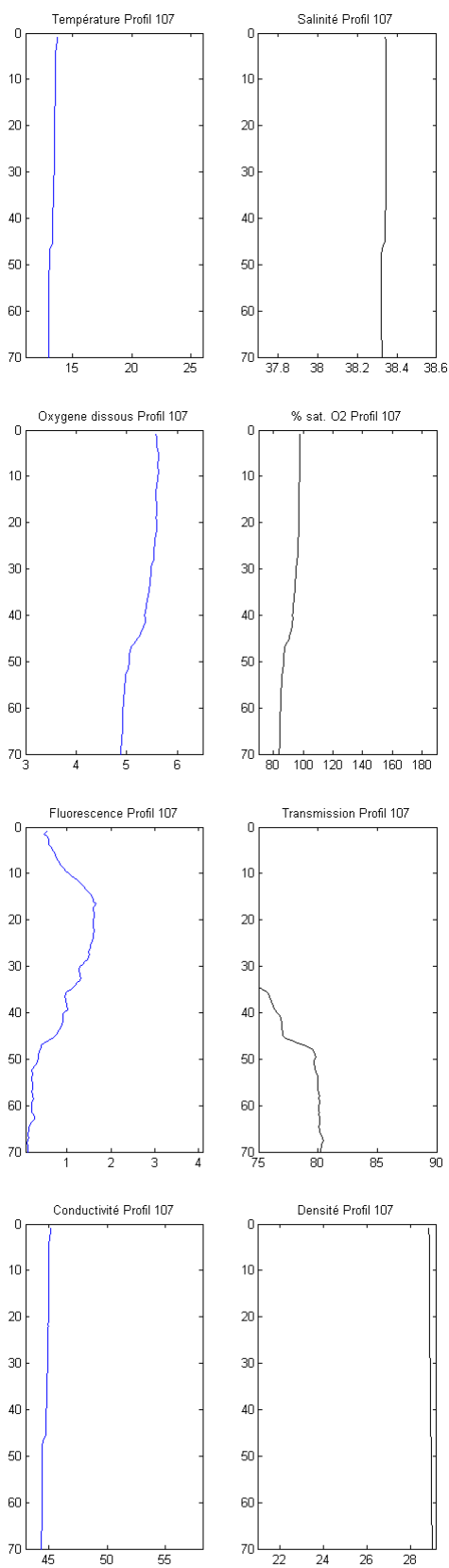
Profil 105 – Station 11



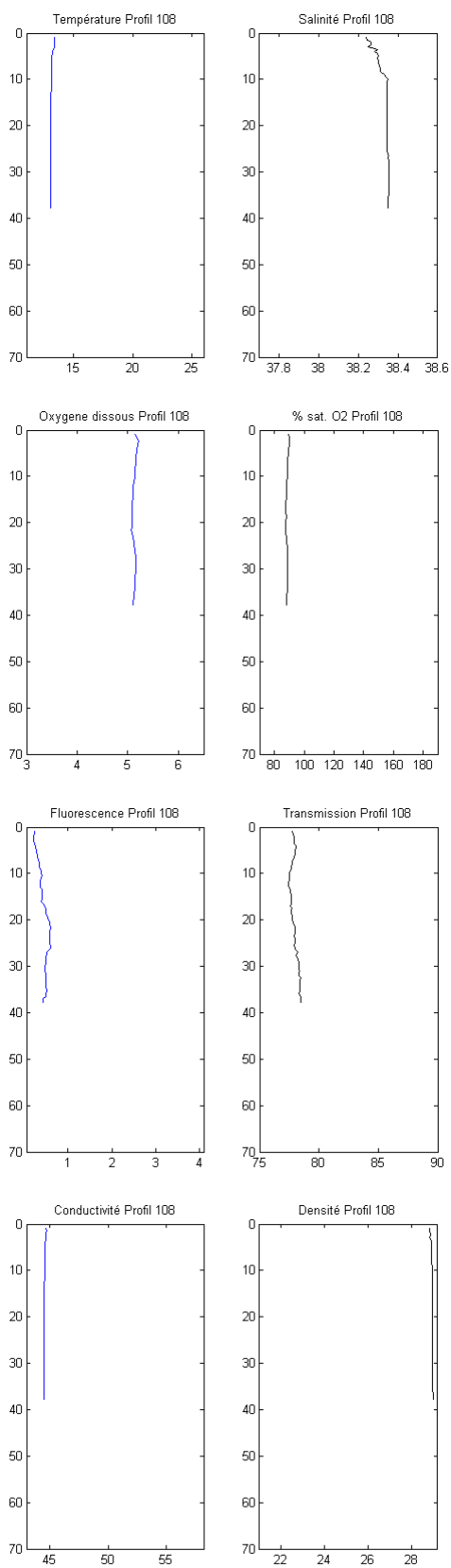
Profil 106 – Station 4



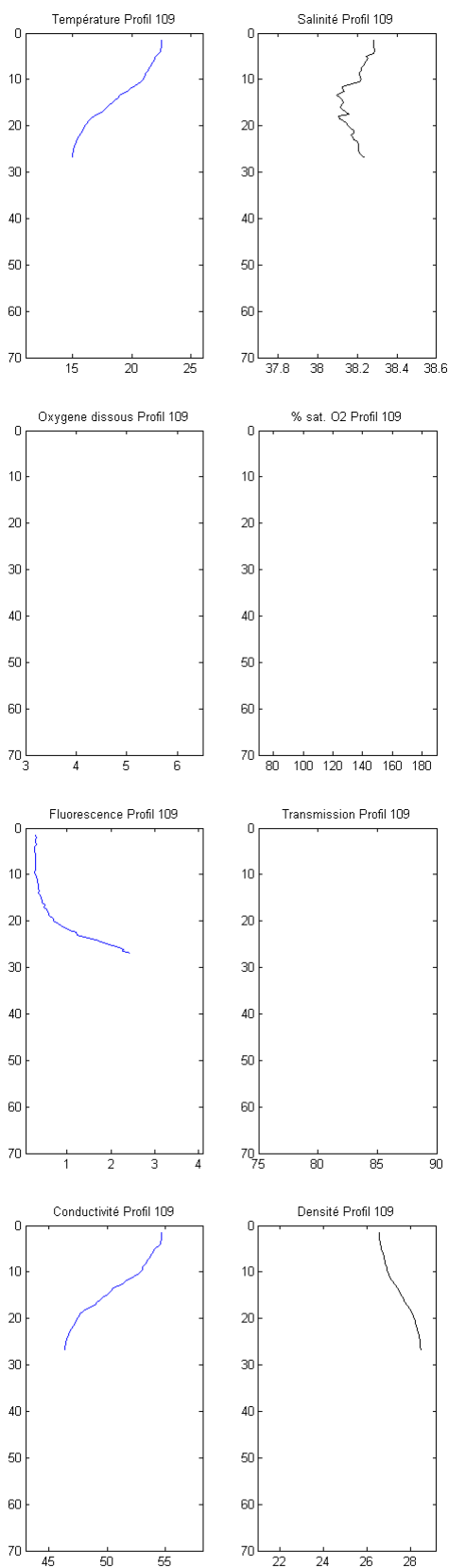
Profil 107 – Station 9



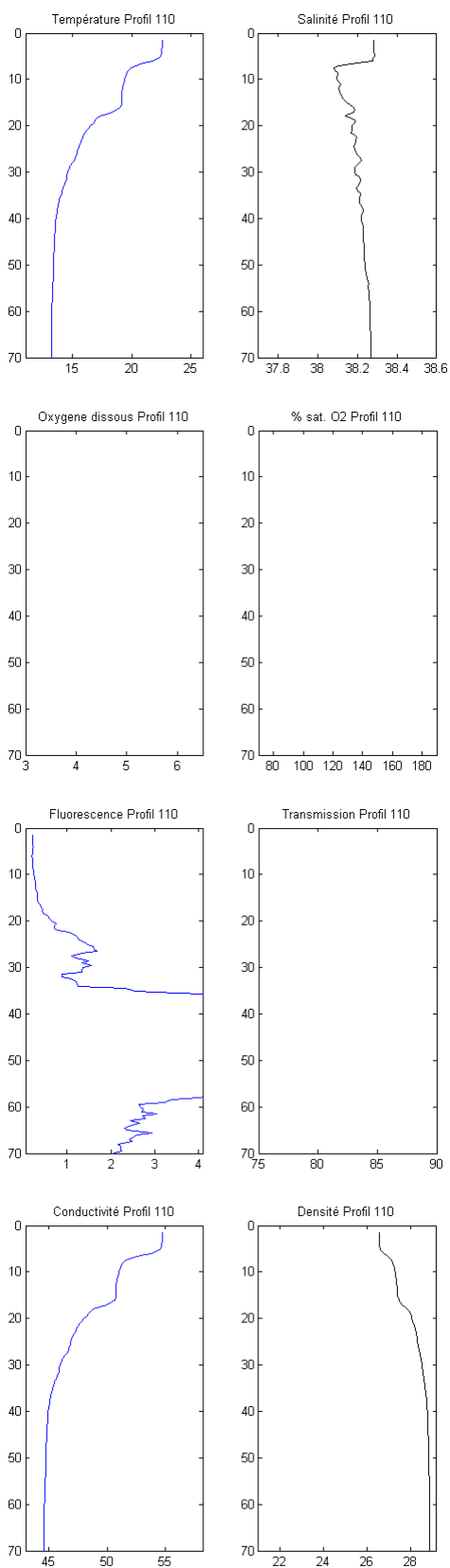
Profil 108 – Station 8



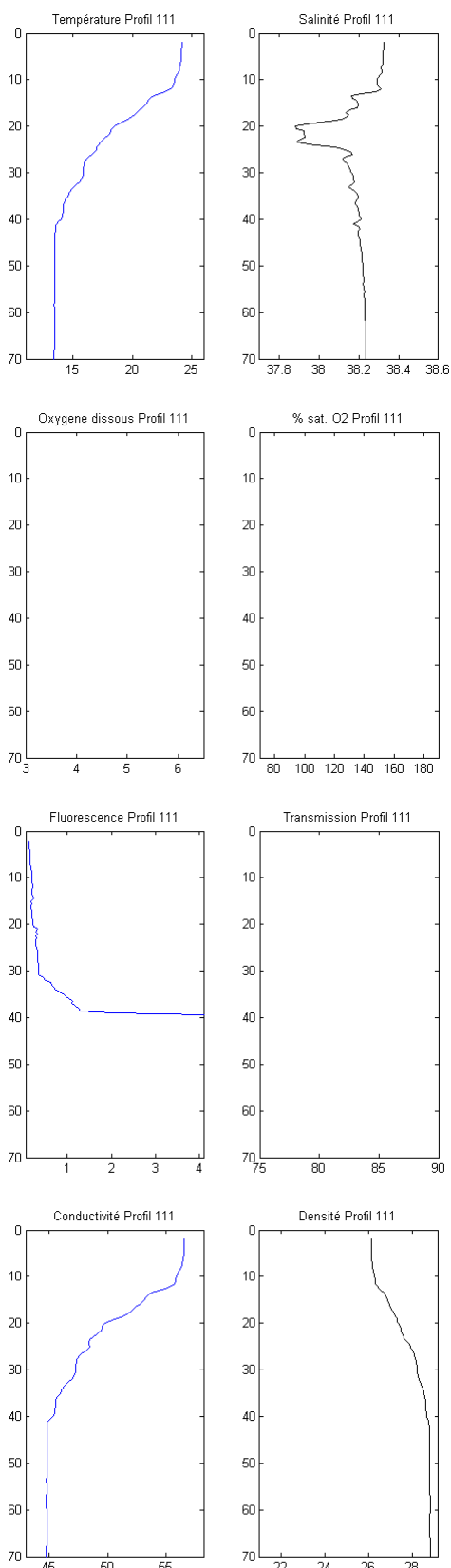
Profil 109 – Station 7



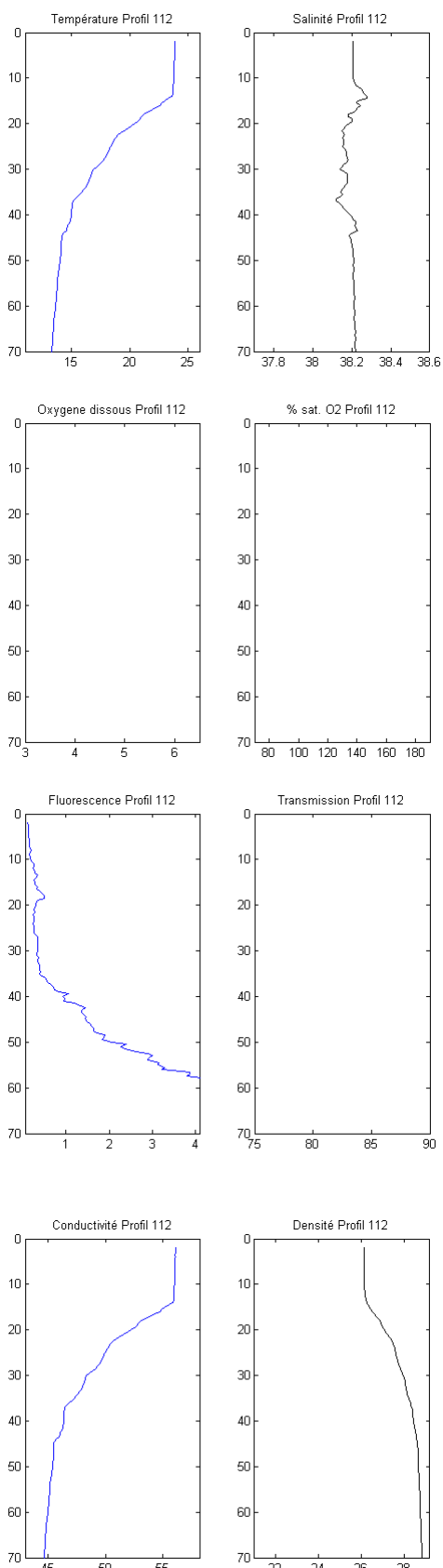
Profil 110 – Station 6



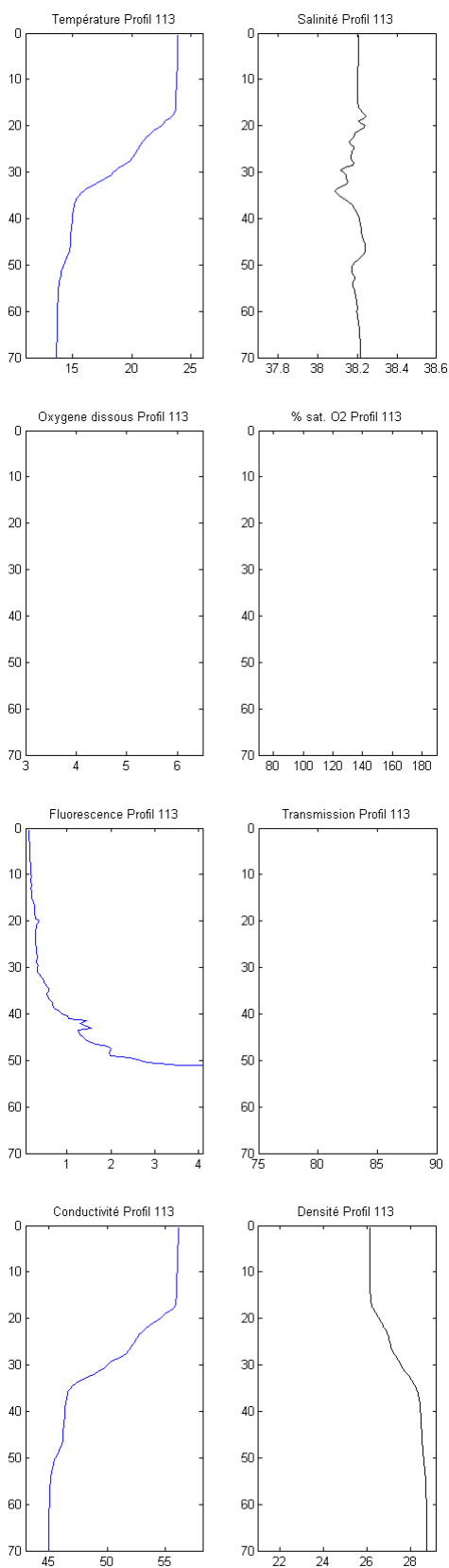
Profil 111 – Station 5



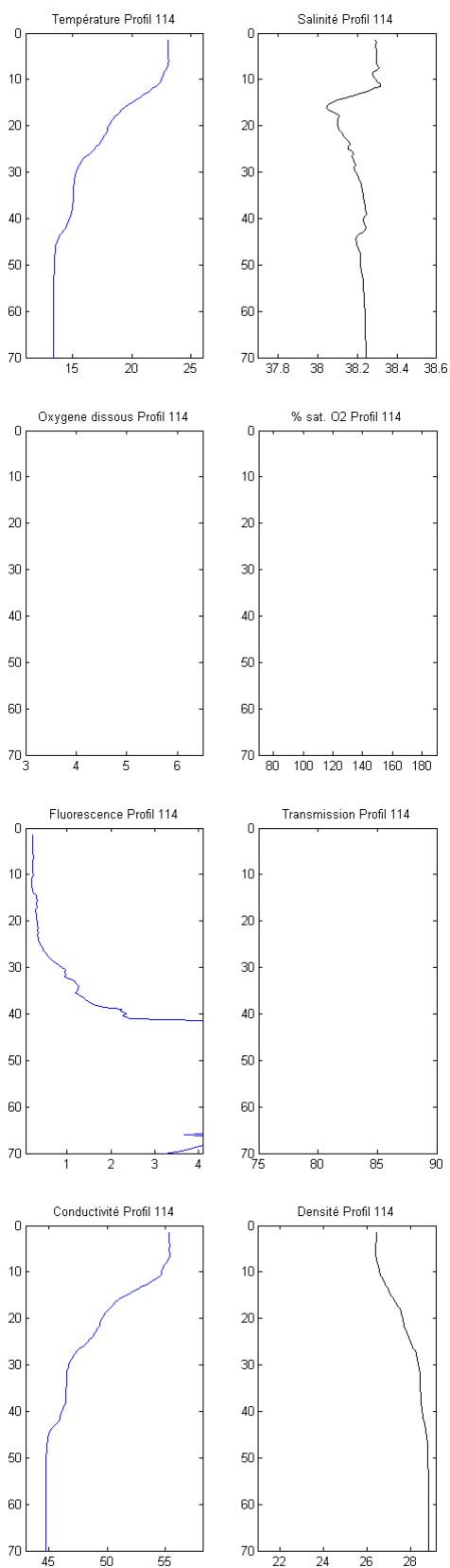
Profil 112 – Station 23



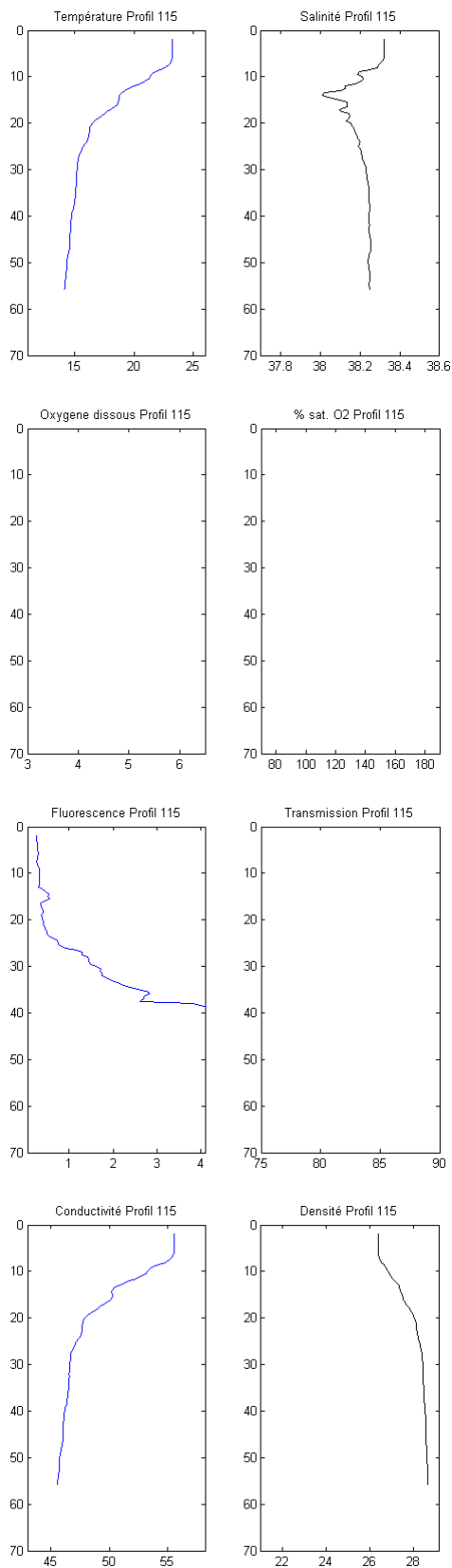
Profil 113 – Station 4



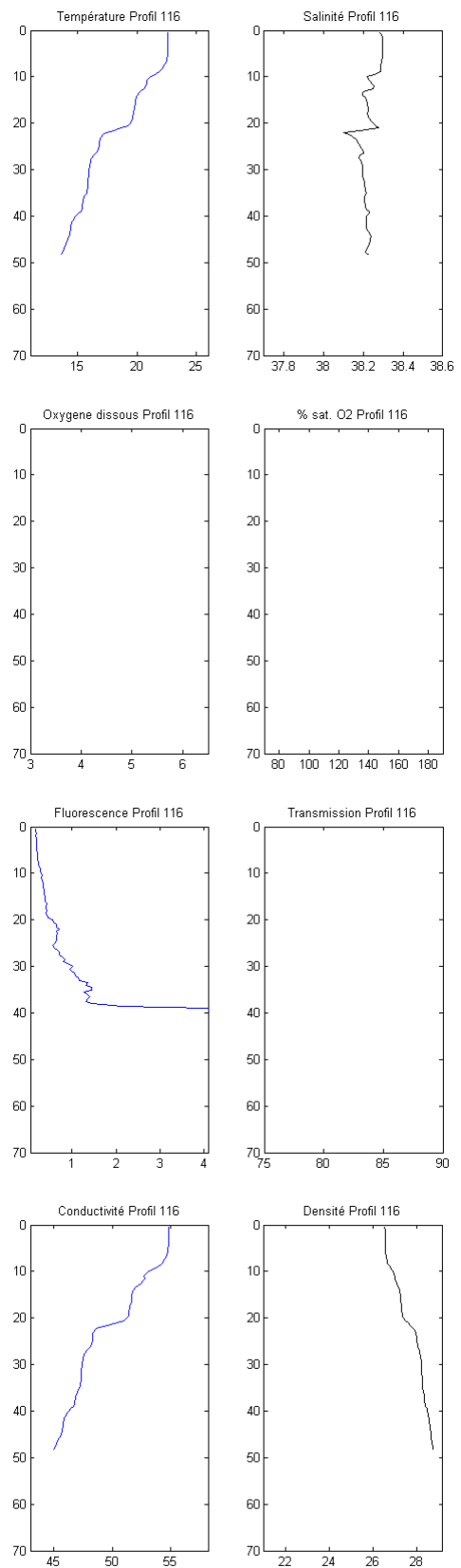
Profil 114 – Station 9



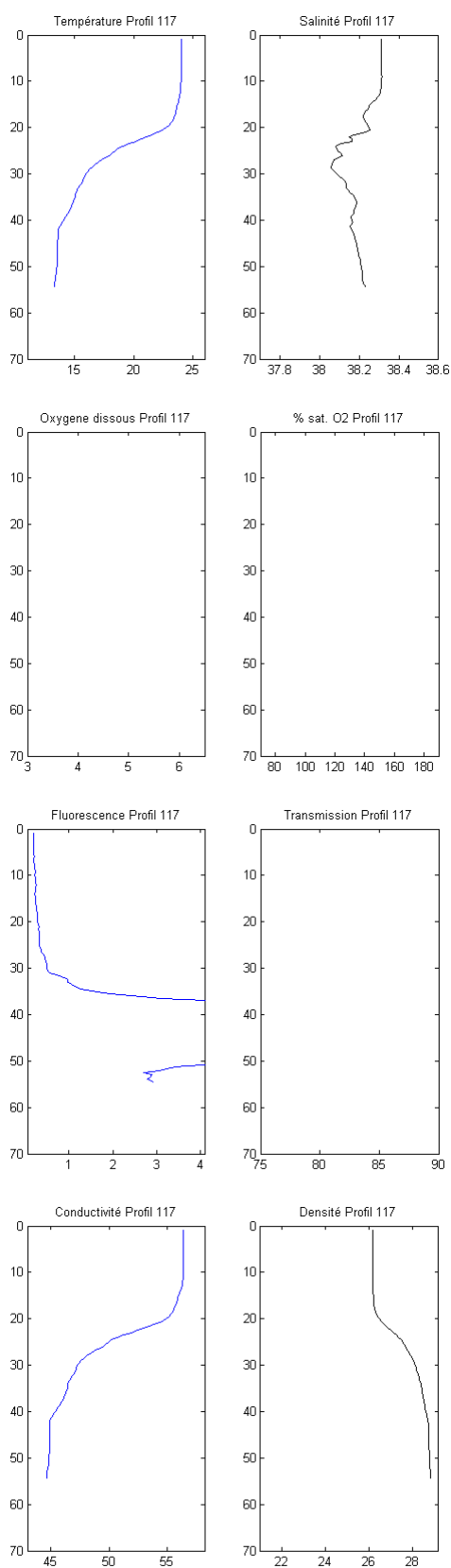
Profil 115 – Station 8



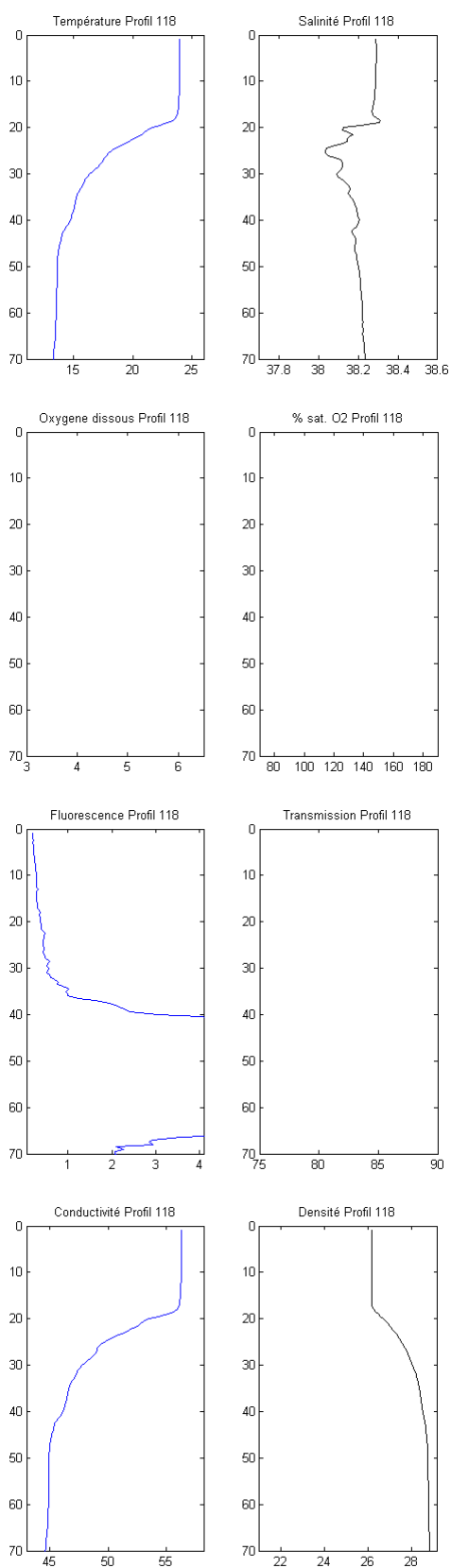
Profil 116 – Station 22



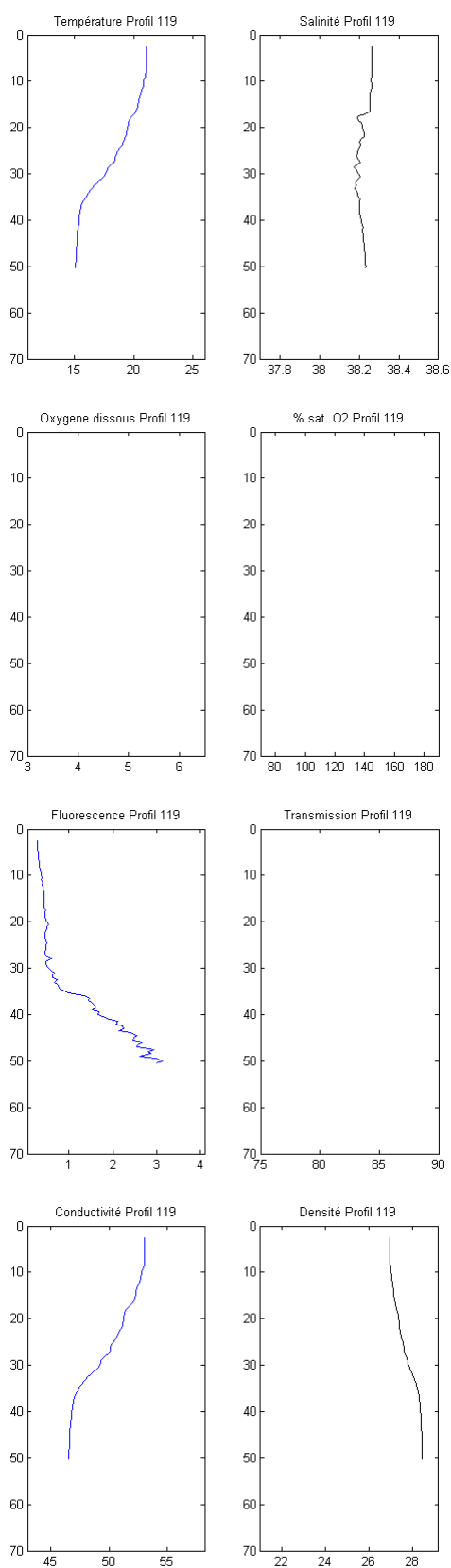
Profil 117 – Station 11



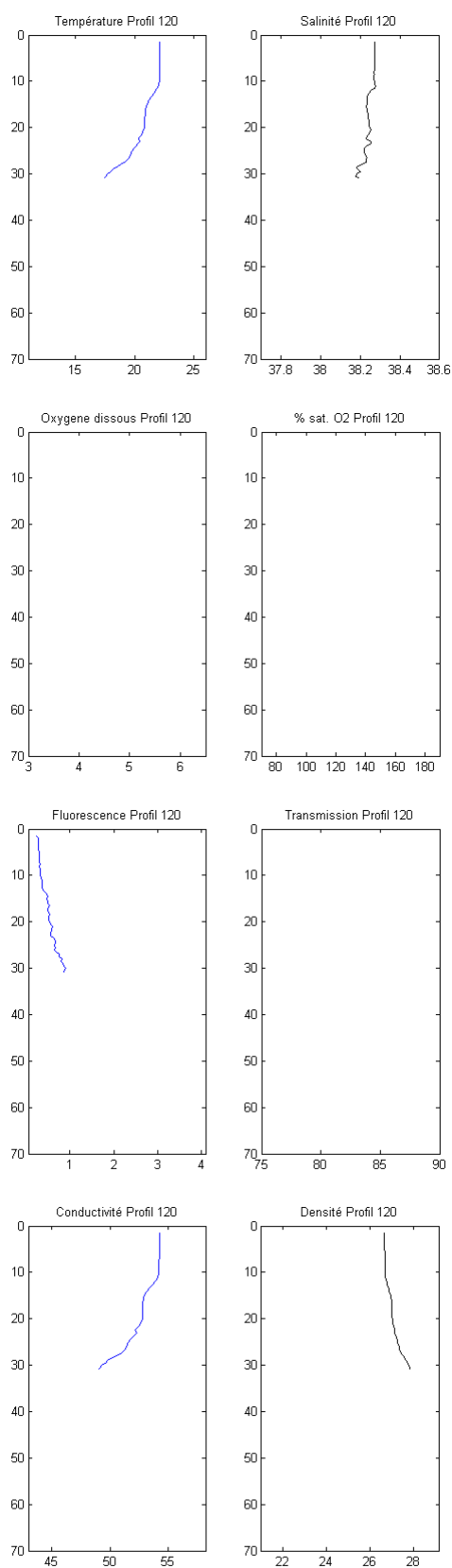
Profil 118 – Station 12



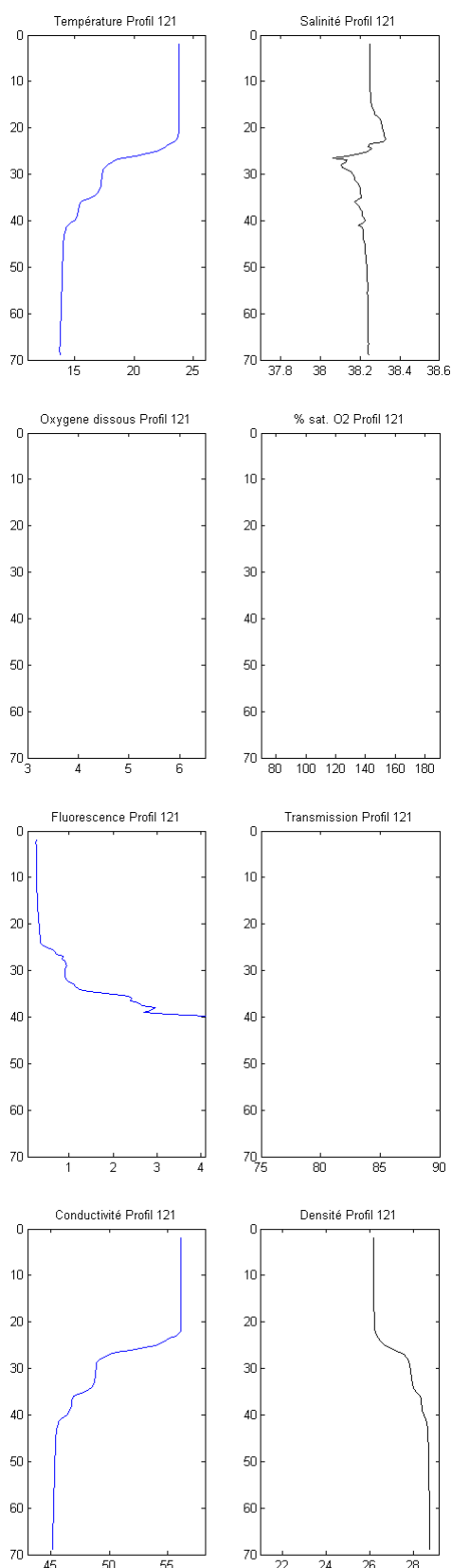
Profil 119 – Station 3



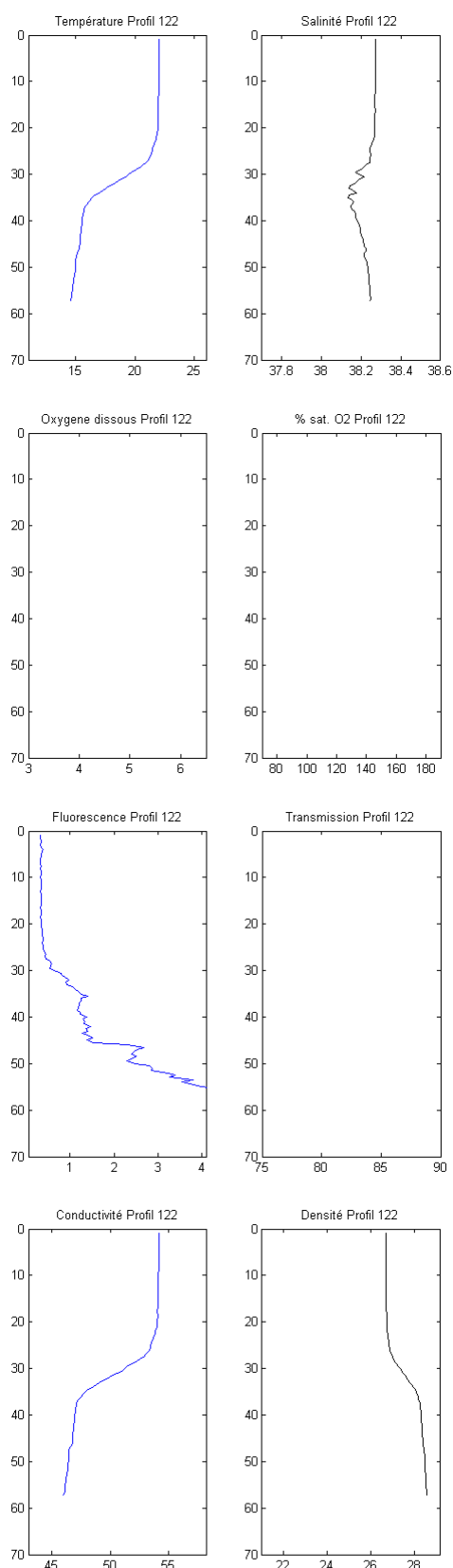
Profil 120 – Station 2



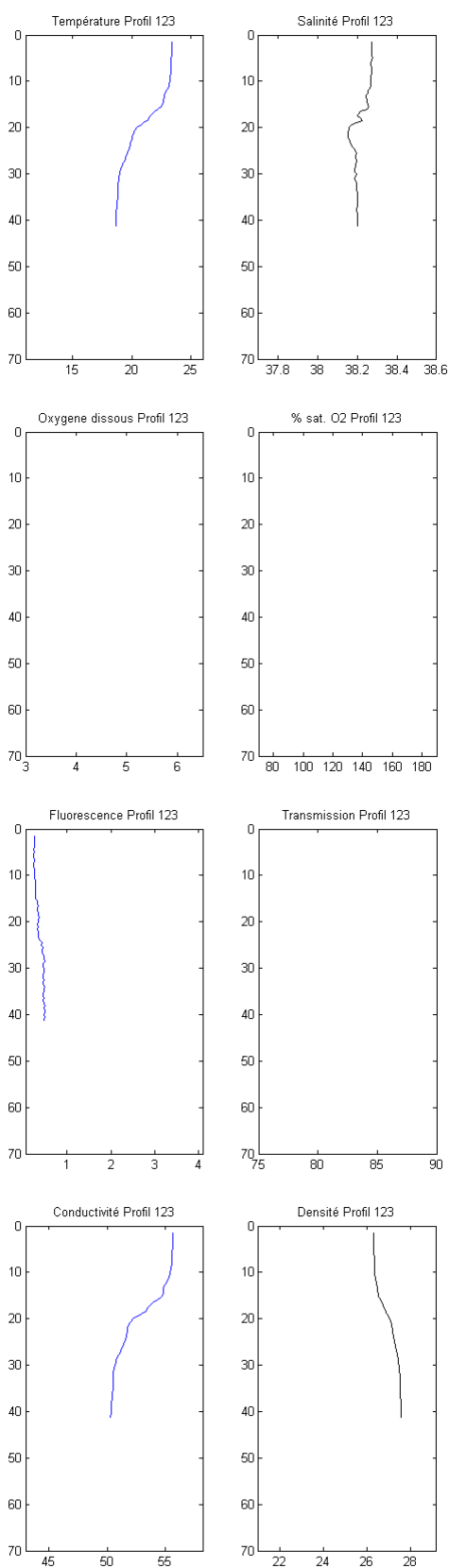
Profil 121 – Station 10



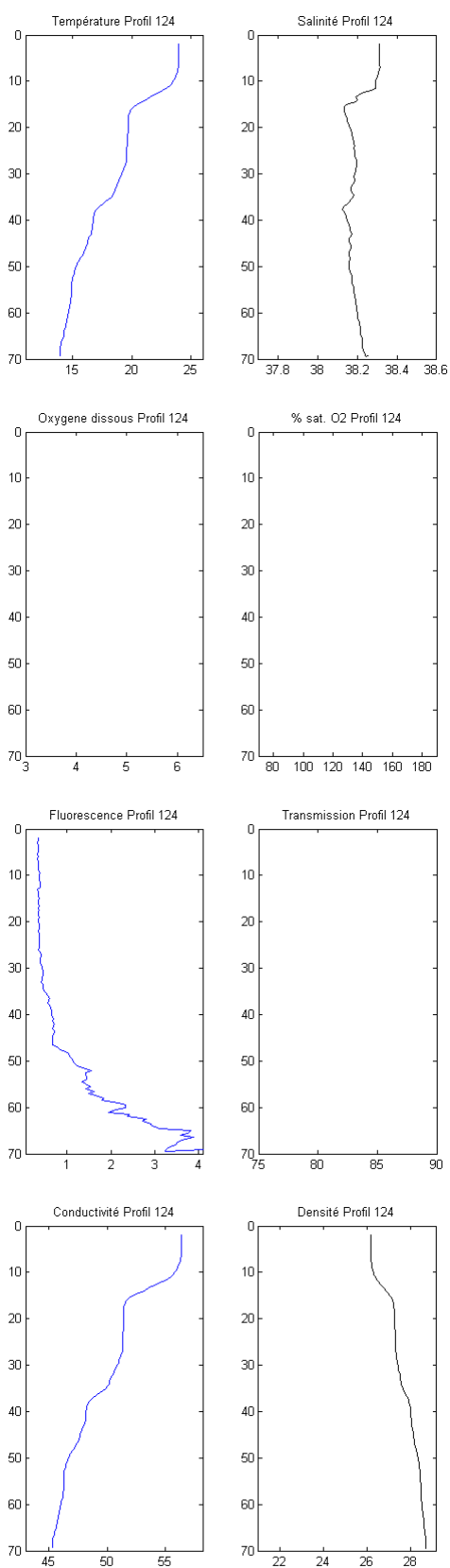
Profil 122 – Station 13



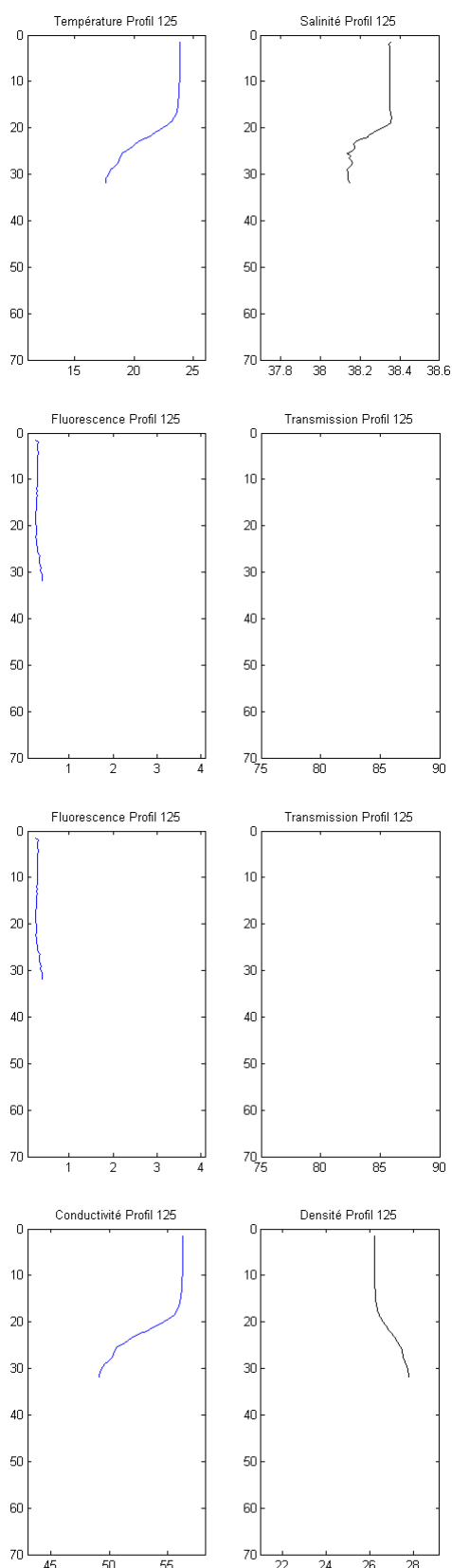
Profil 123 – Station 1



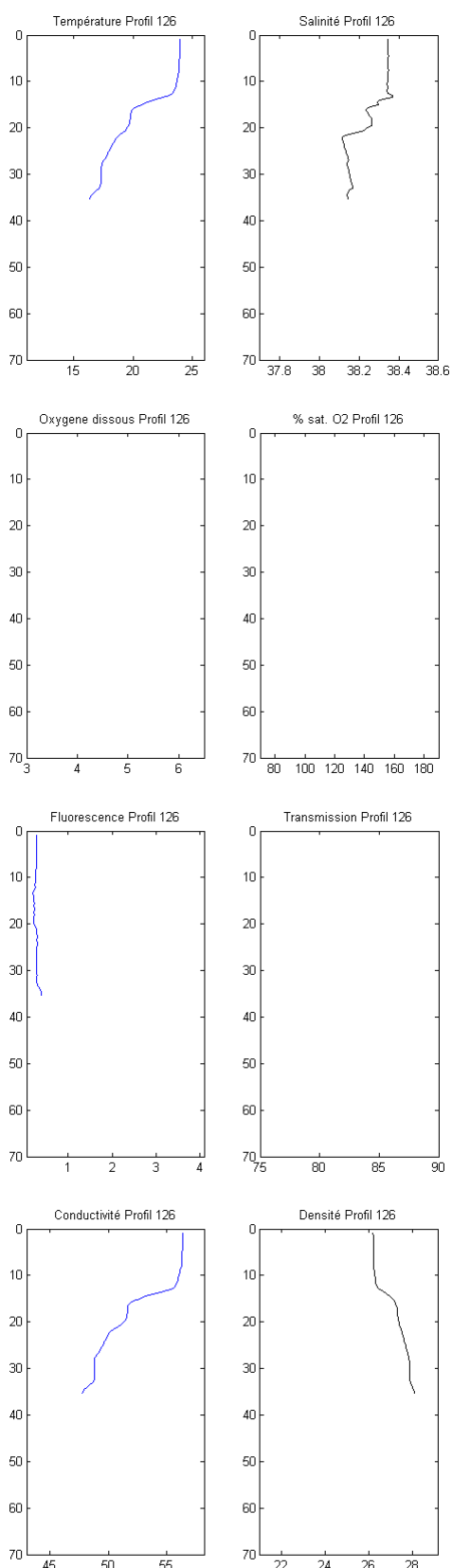
Profil 124 – Station 14



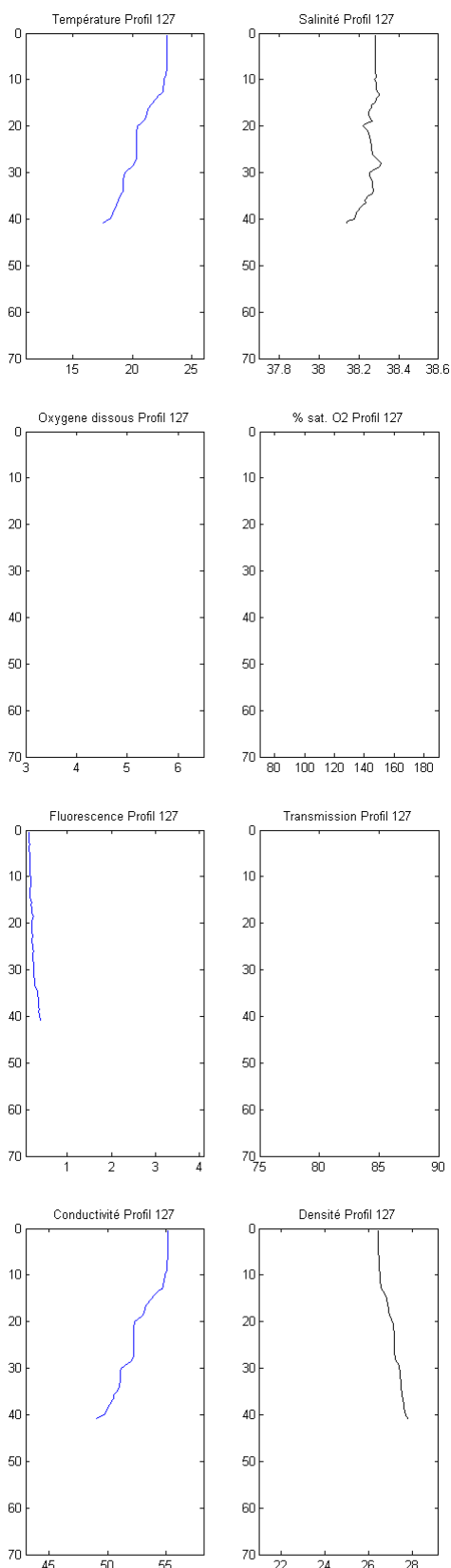
Profil 125 – Station 15



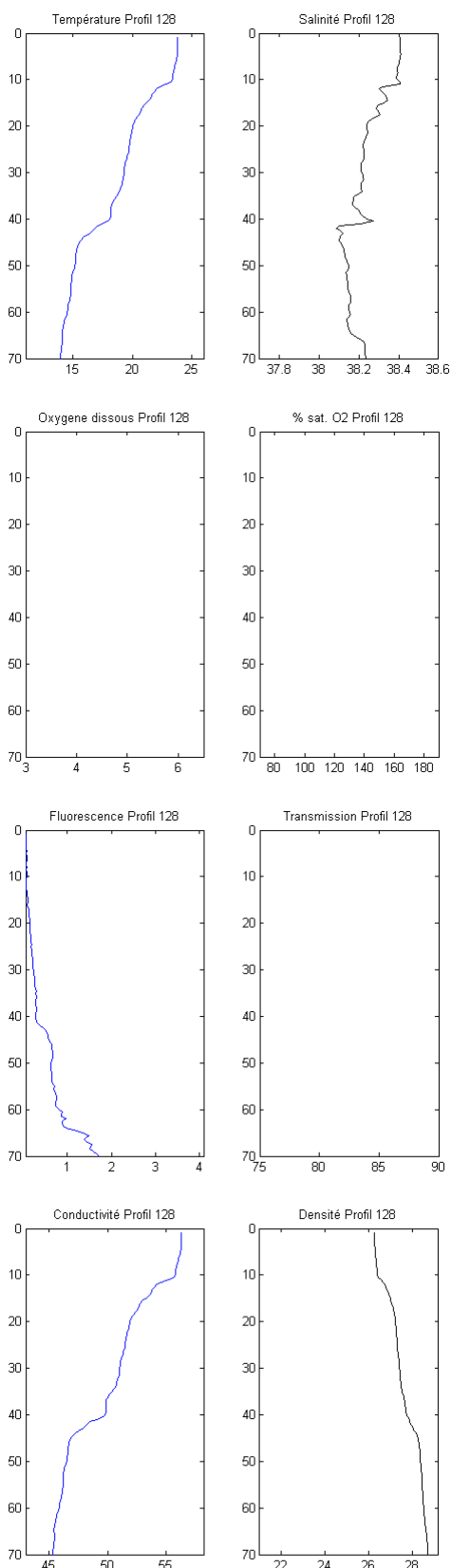
Profil 126 – Station 16



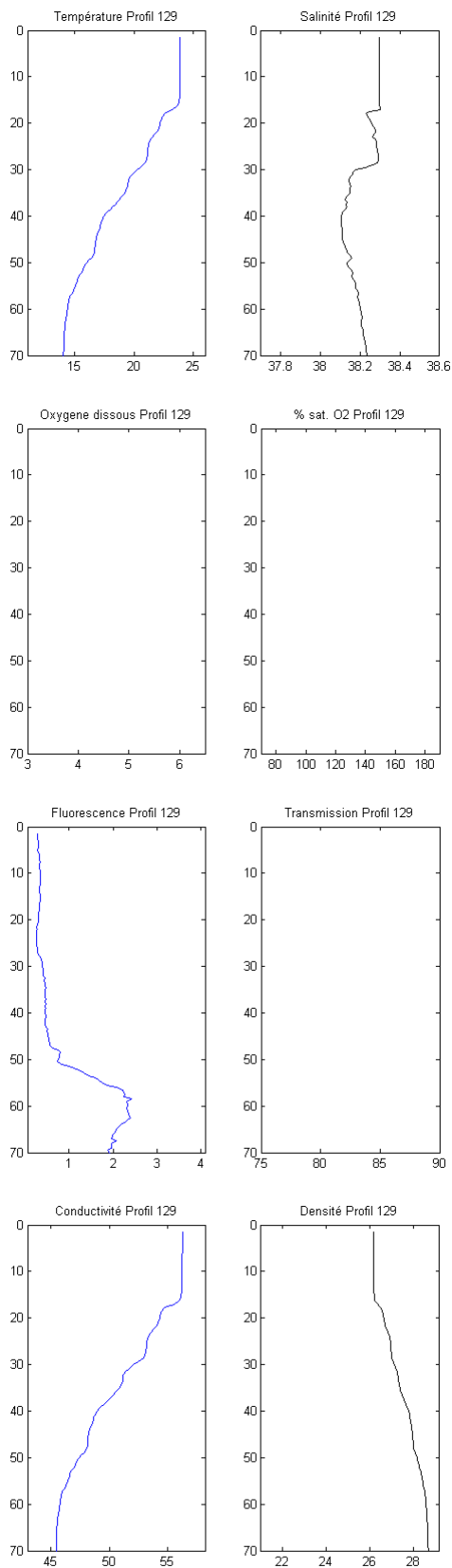
Profil 127 – Station 17



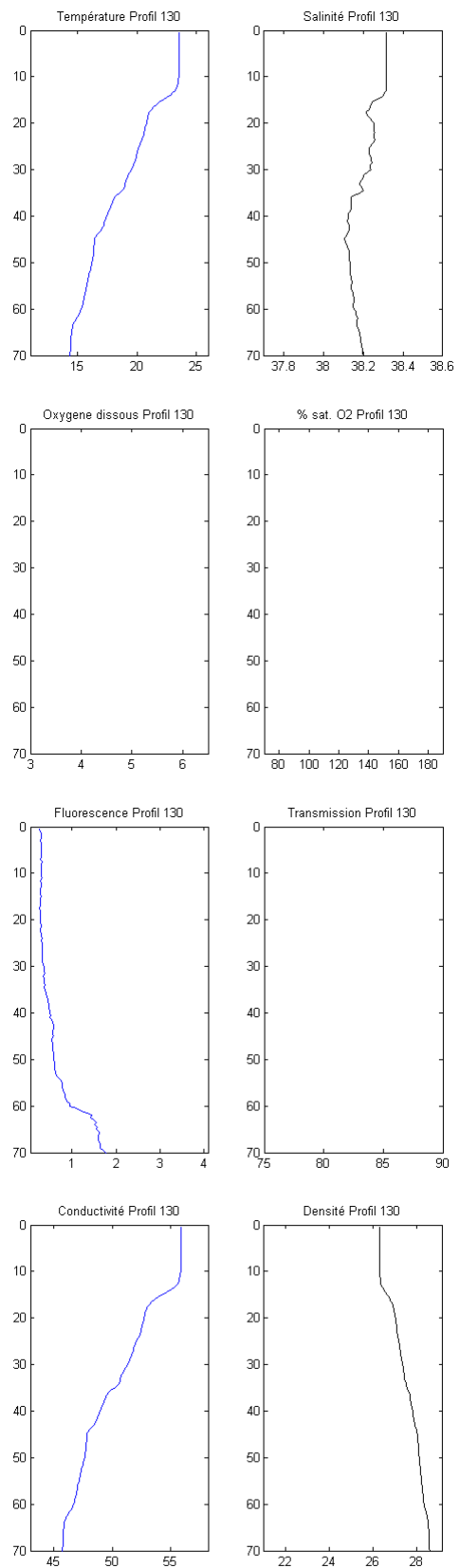
Profil 128 – Station 18



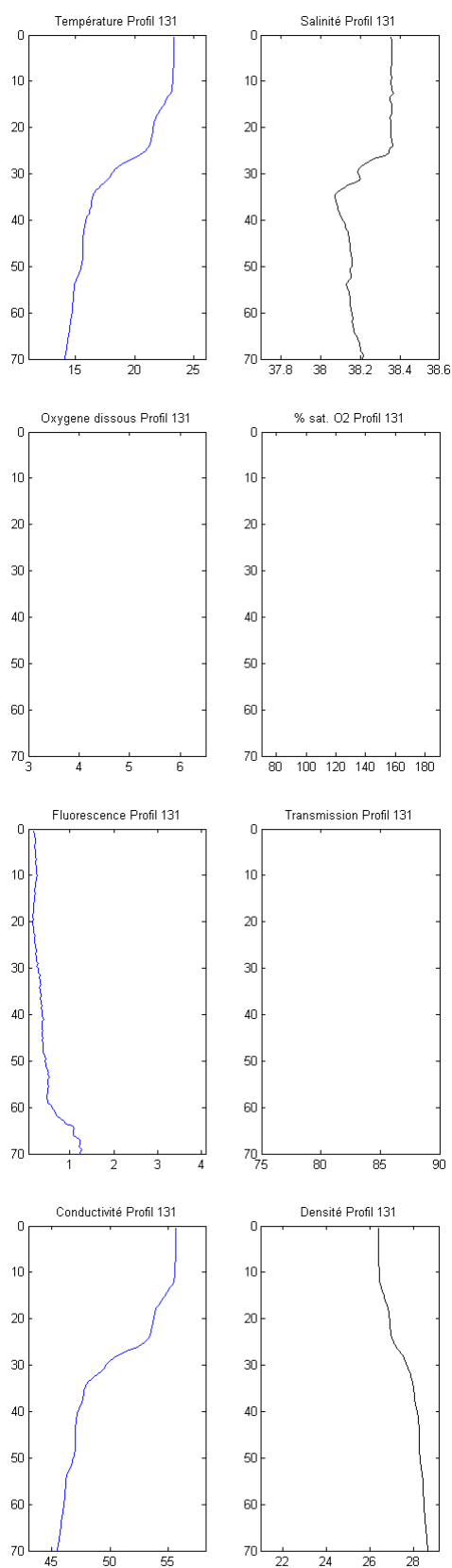
Profil 129 – Station 19



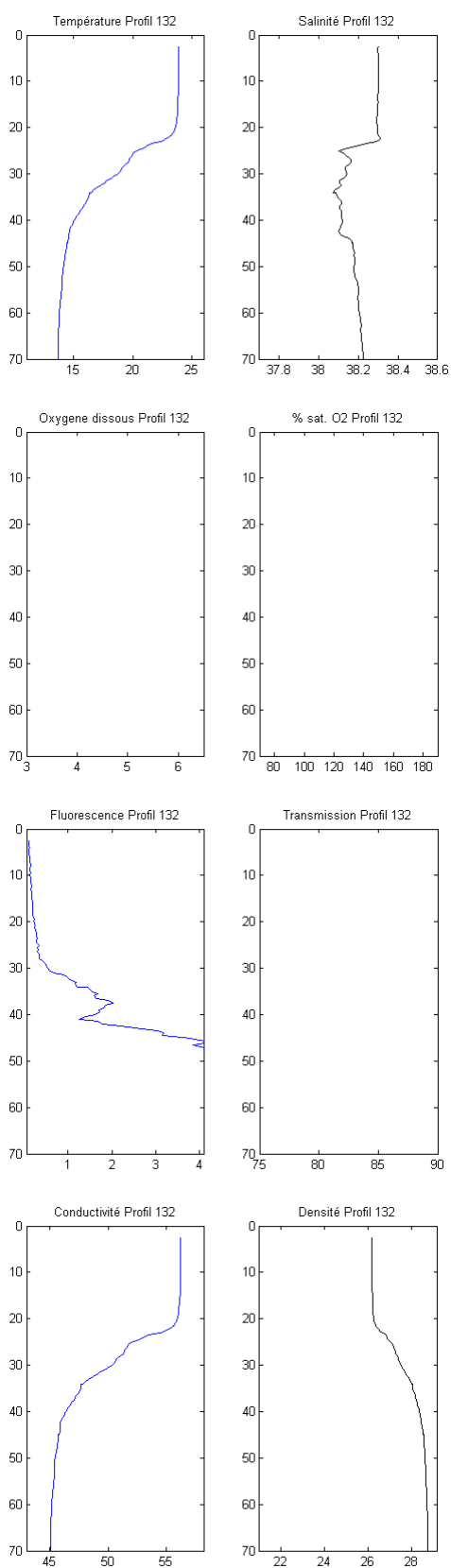
Profil 130 – Station 20



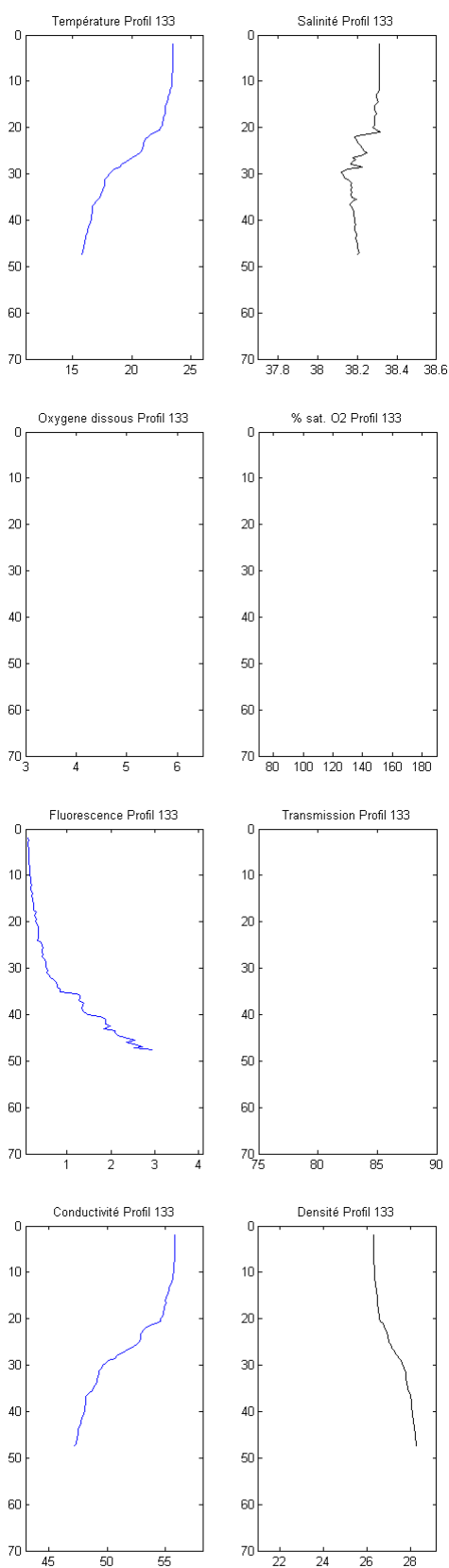
Profil 131 – Station 21



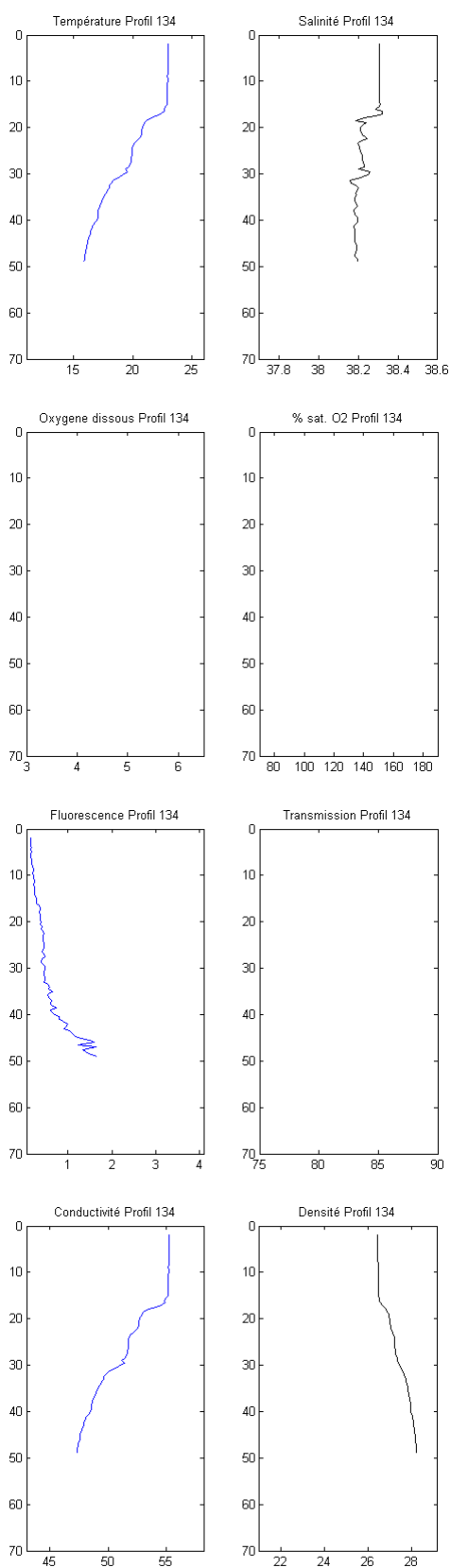
Profil 132 – Station 9



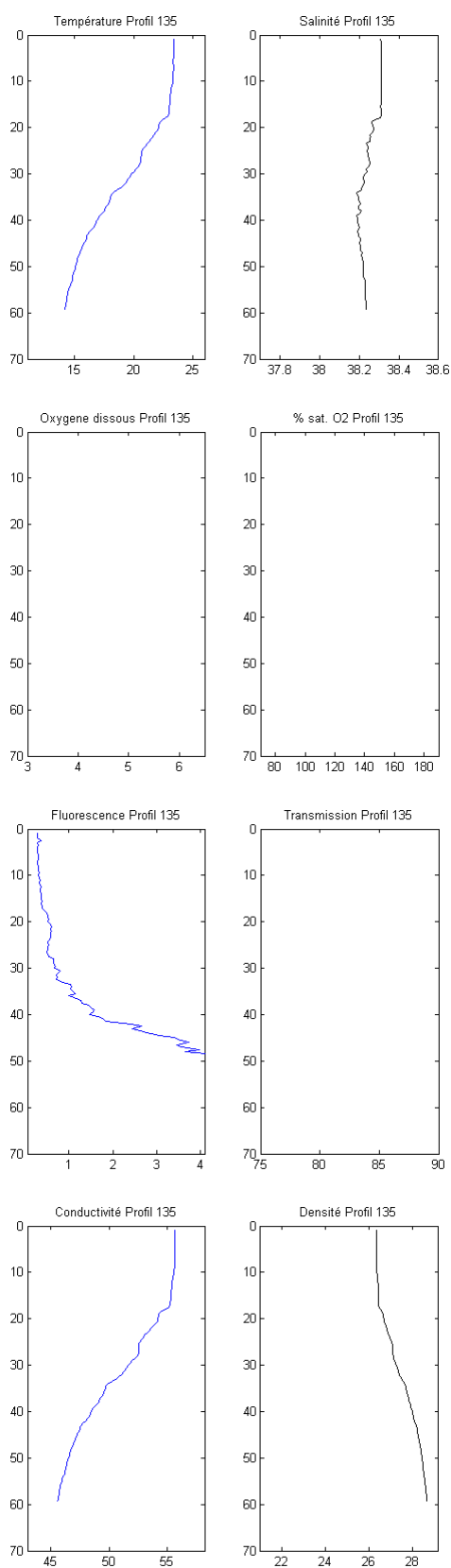
Profil 133 – Station 22



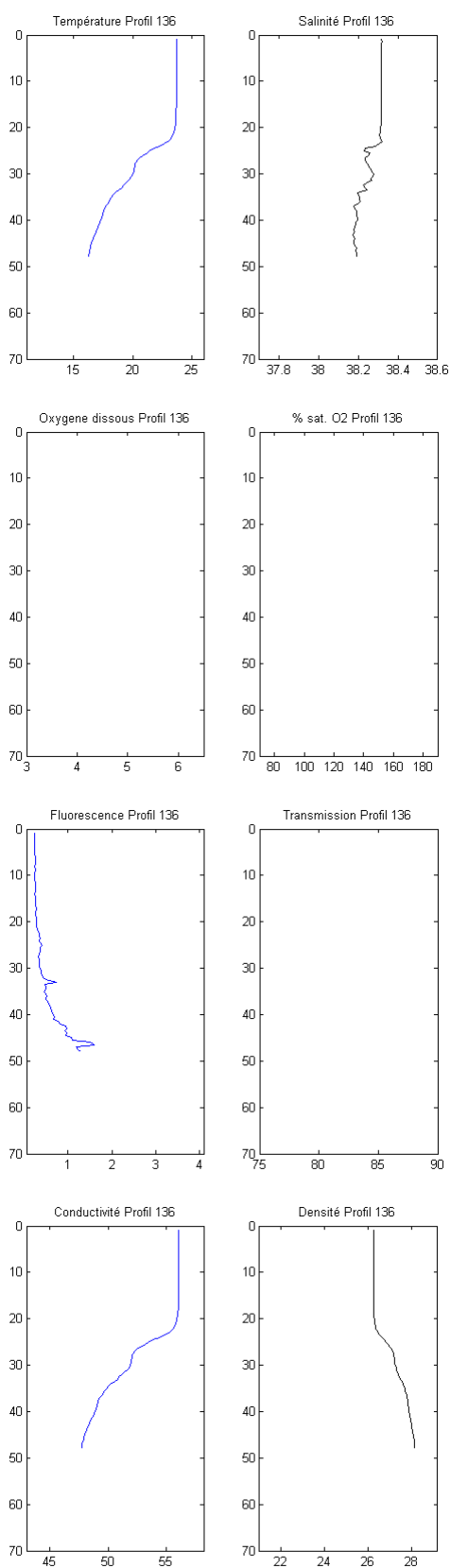
Profil 134 – Station 3



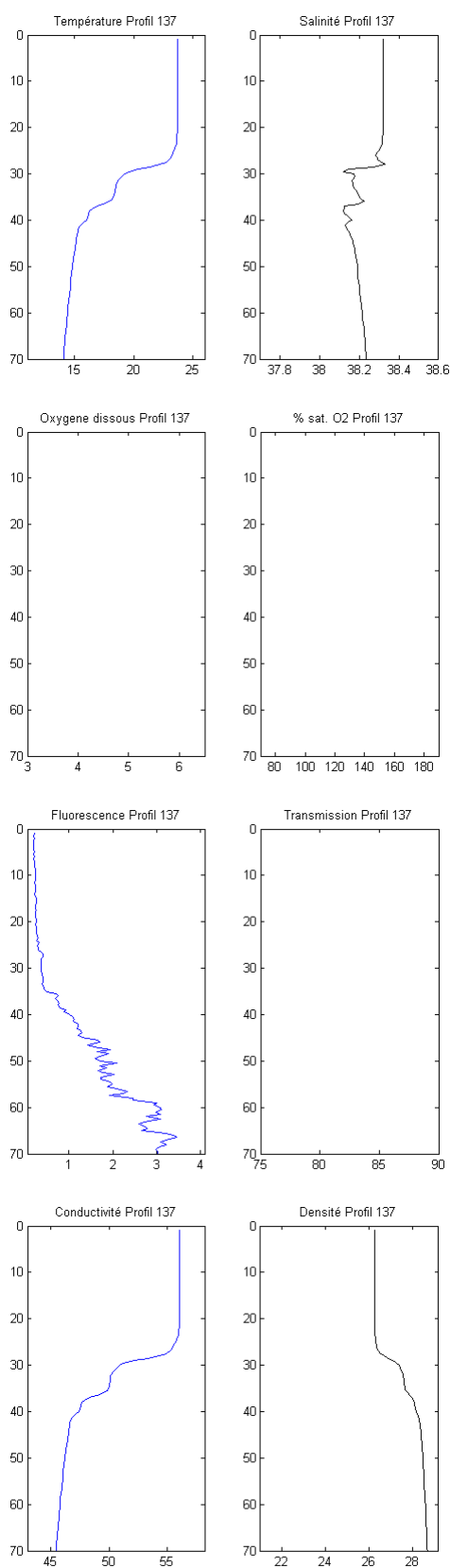
Profil 135 – Station 13



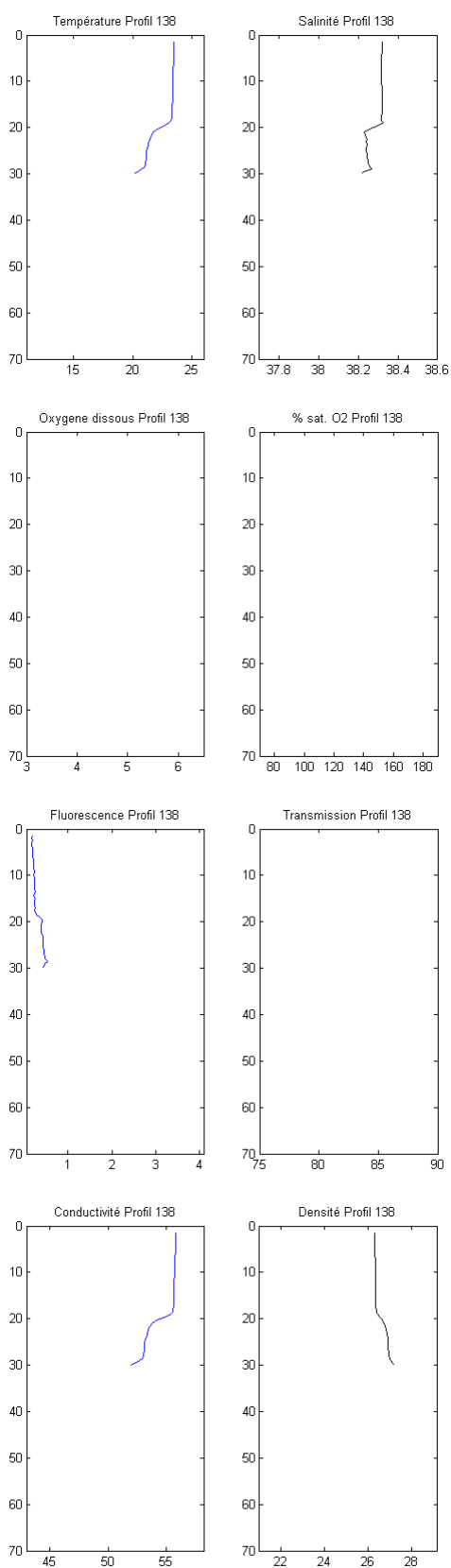
Profil 136 – Station 1



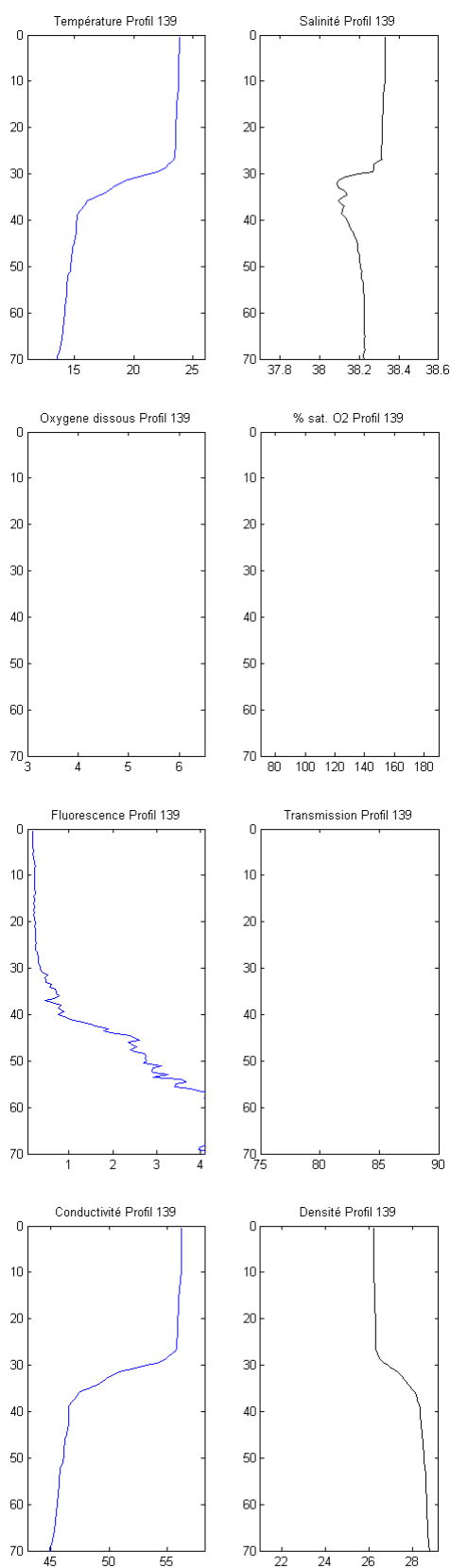
Profil 137 – Station 10



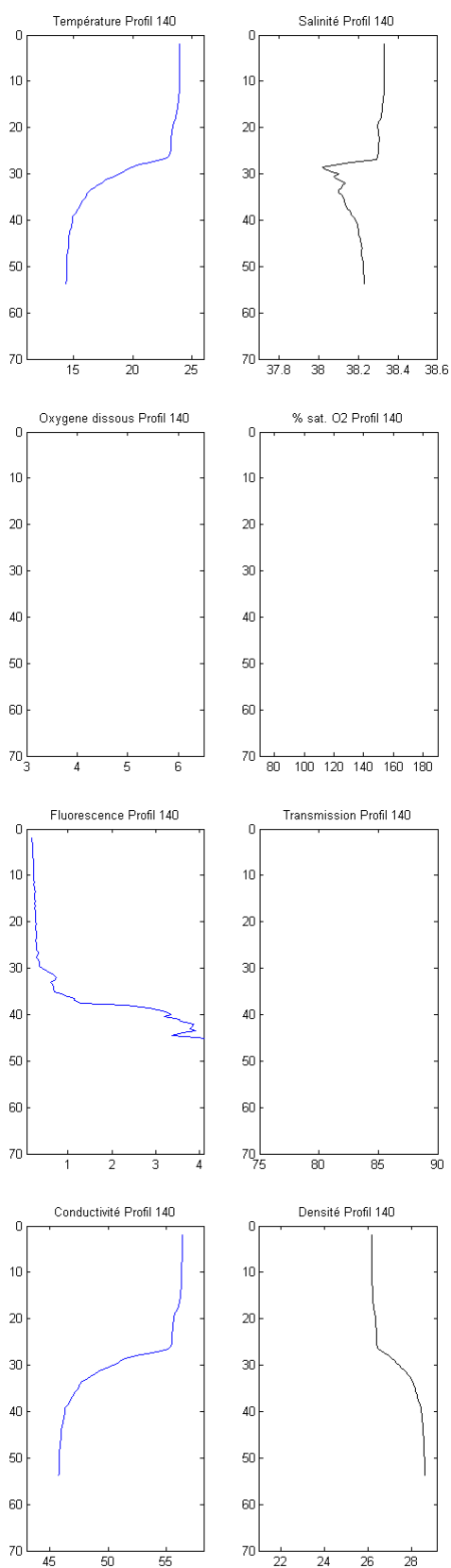
Profil 138 – Station 2



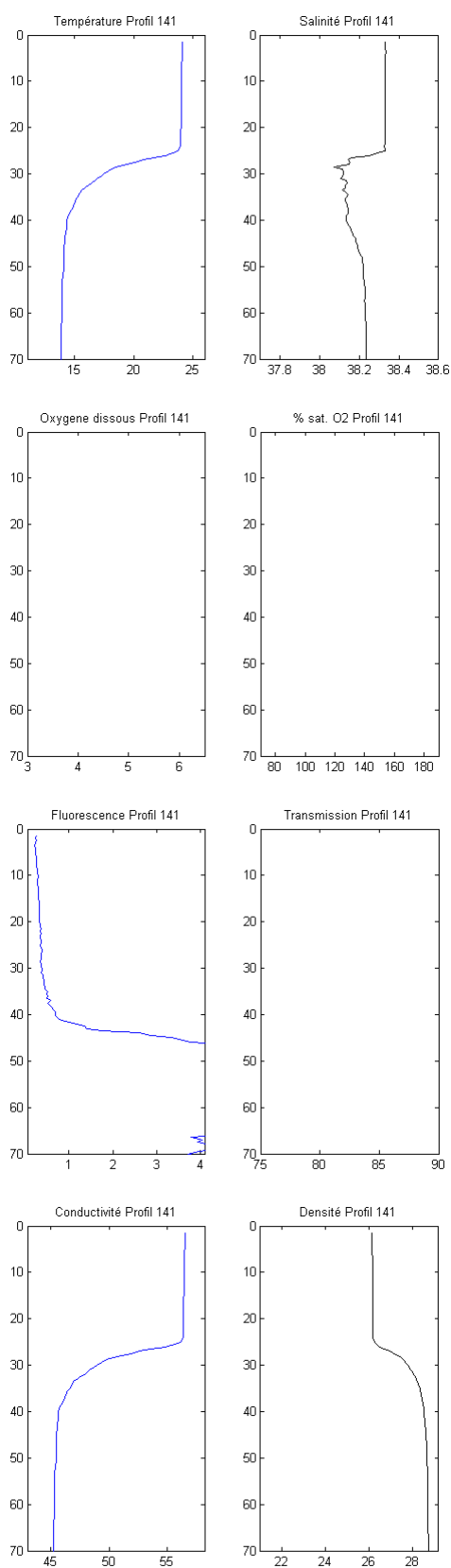
Profil 139 – Station 12



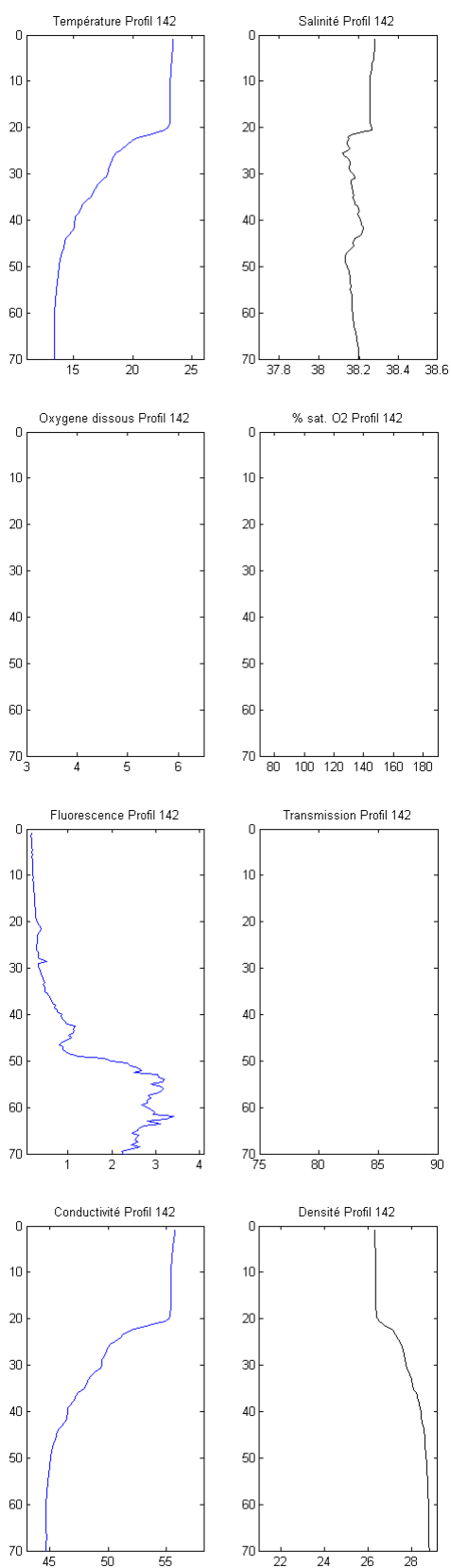
Profil 140 – Station 11



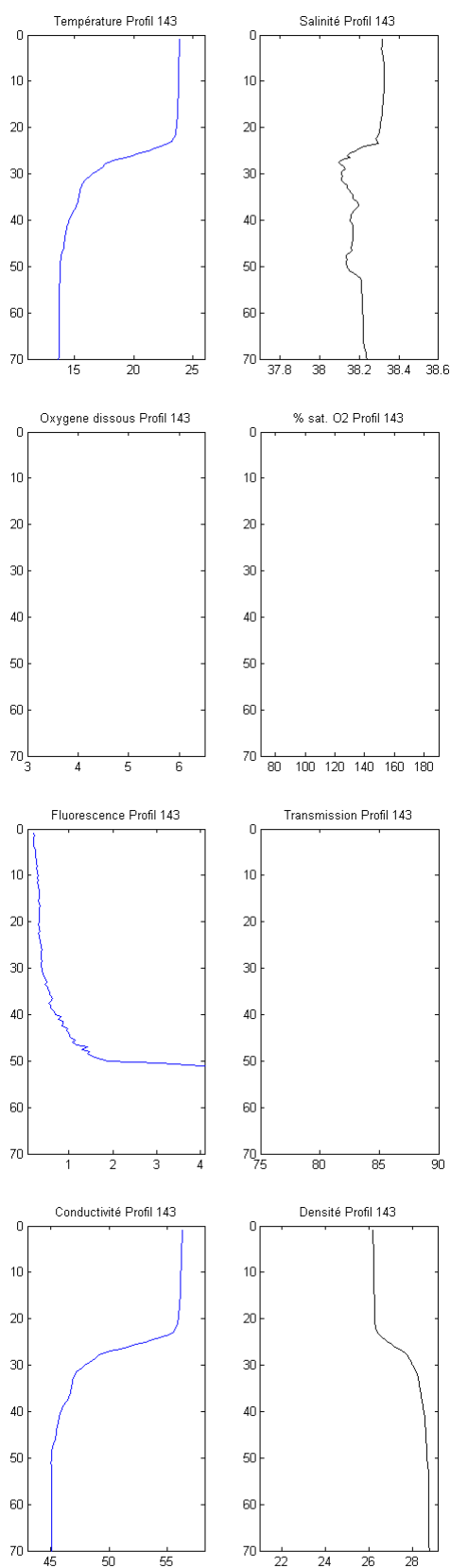
Profil 141 – Station 4



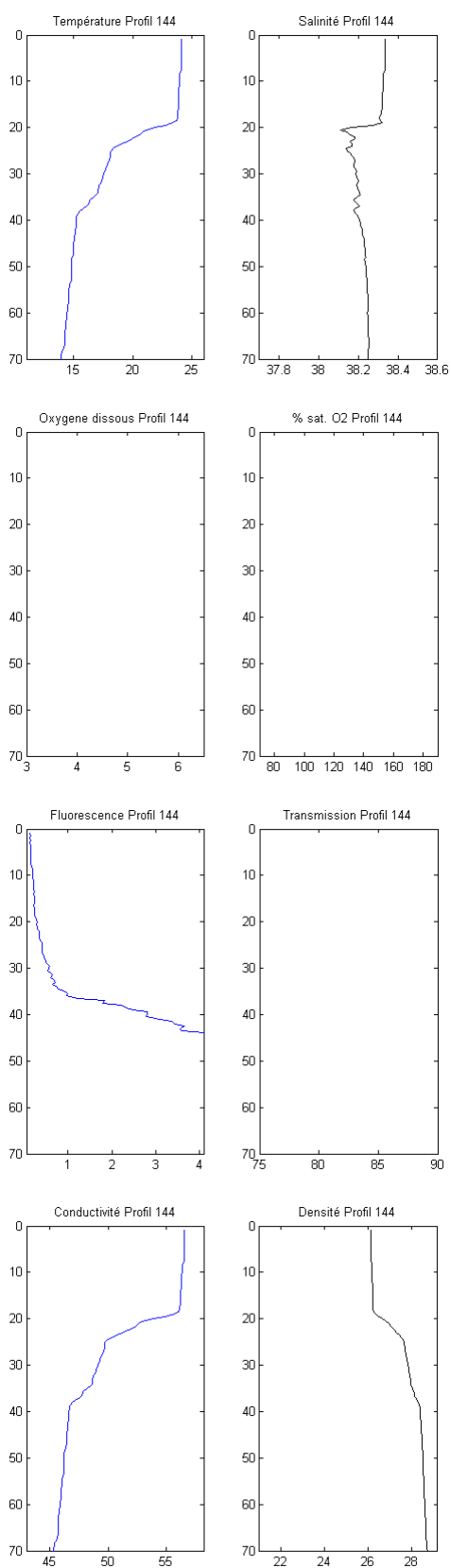
Profil 142 – Station 23



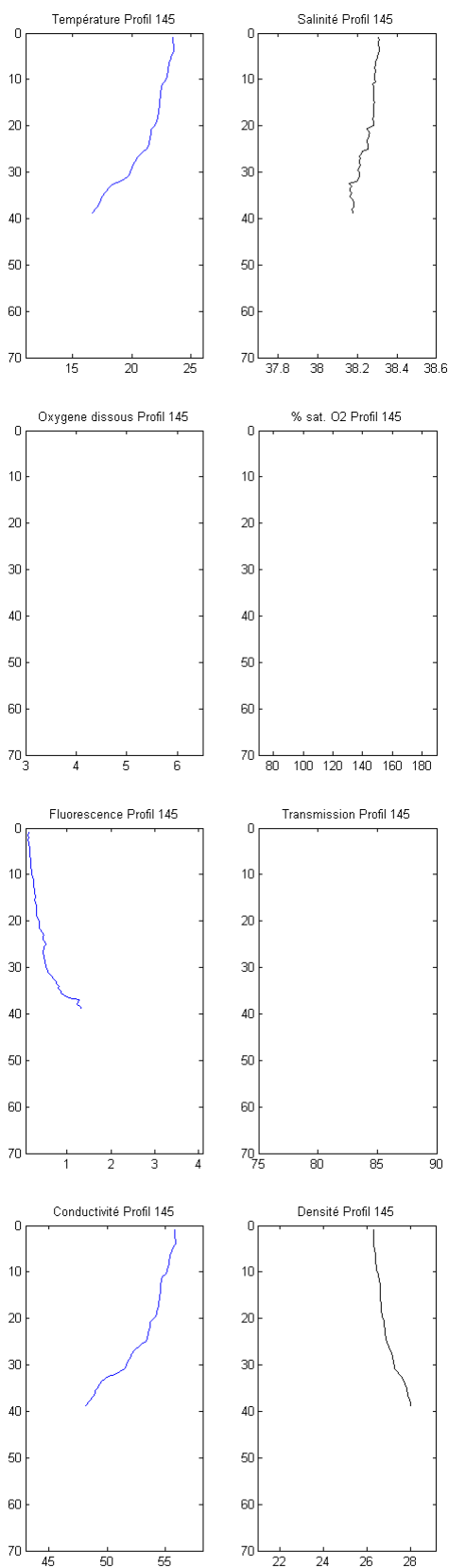
Profil 143 – Station 5



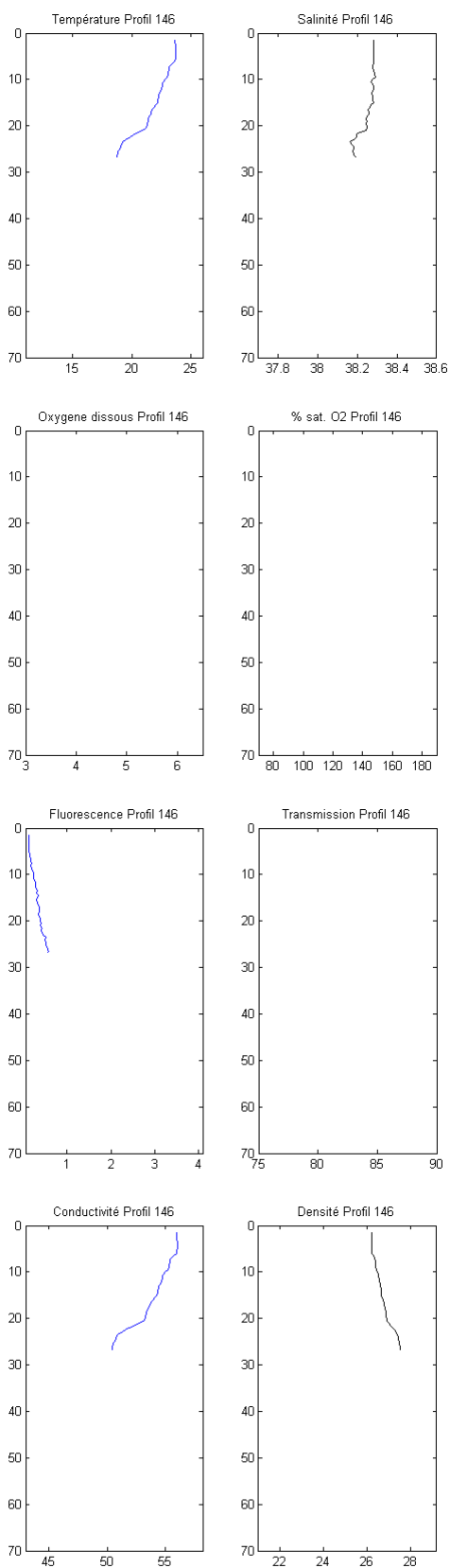
Profil 144 – Station 6



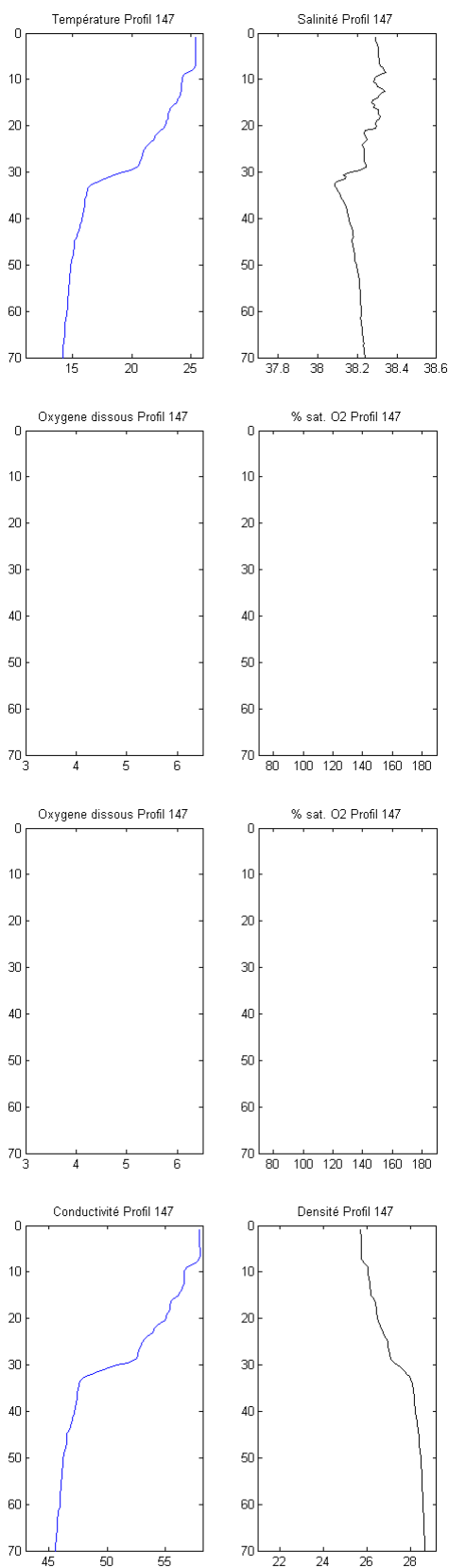
Profil 145 – Station 8



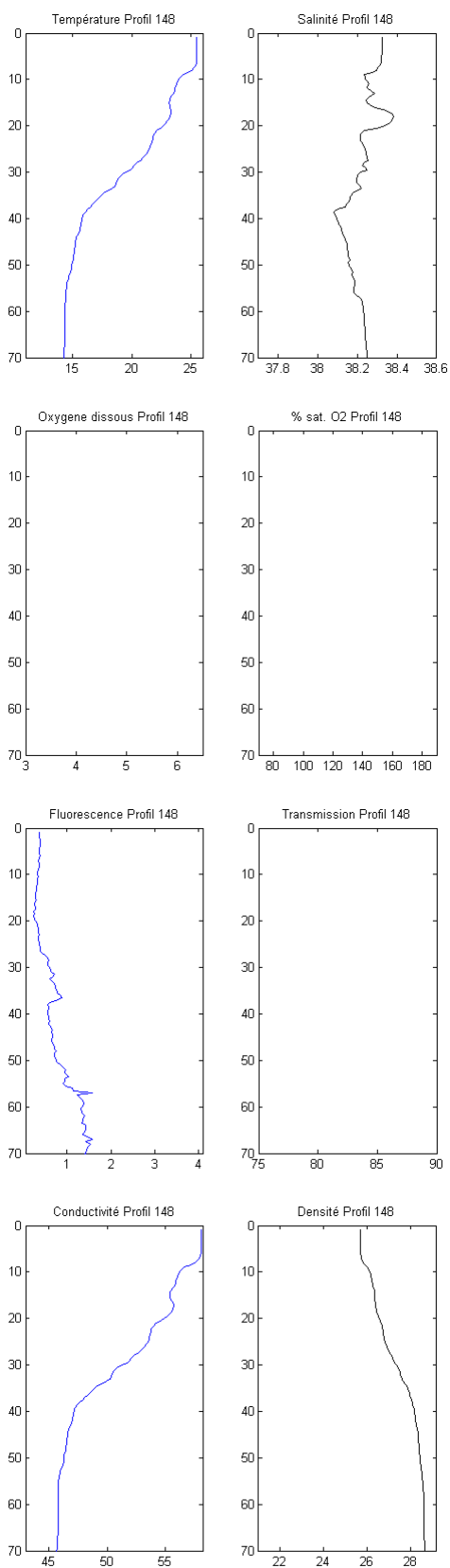
Profil 146 – Station 7



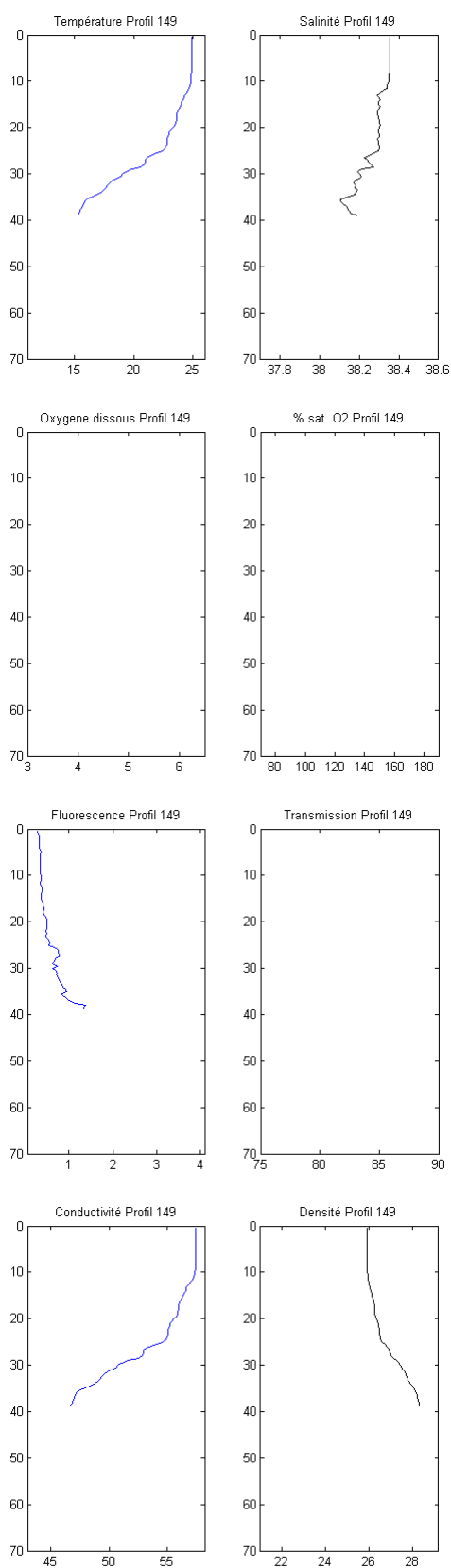
Profil 147 – Station 19



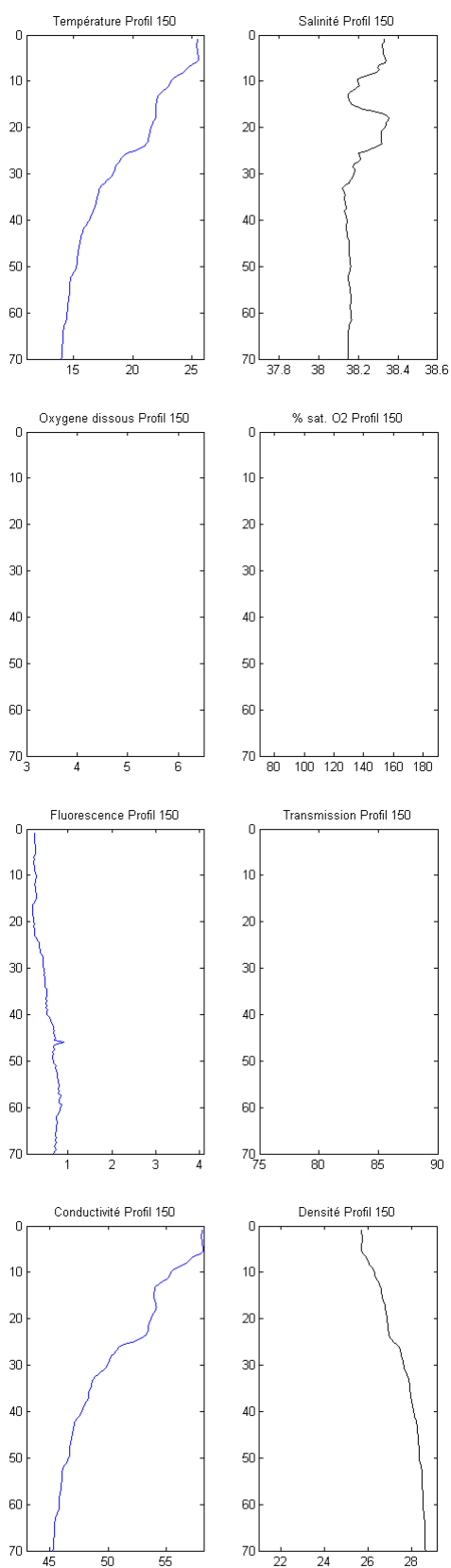
Profil 148 – Station 20



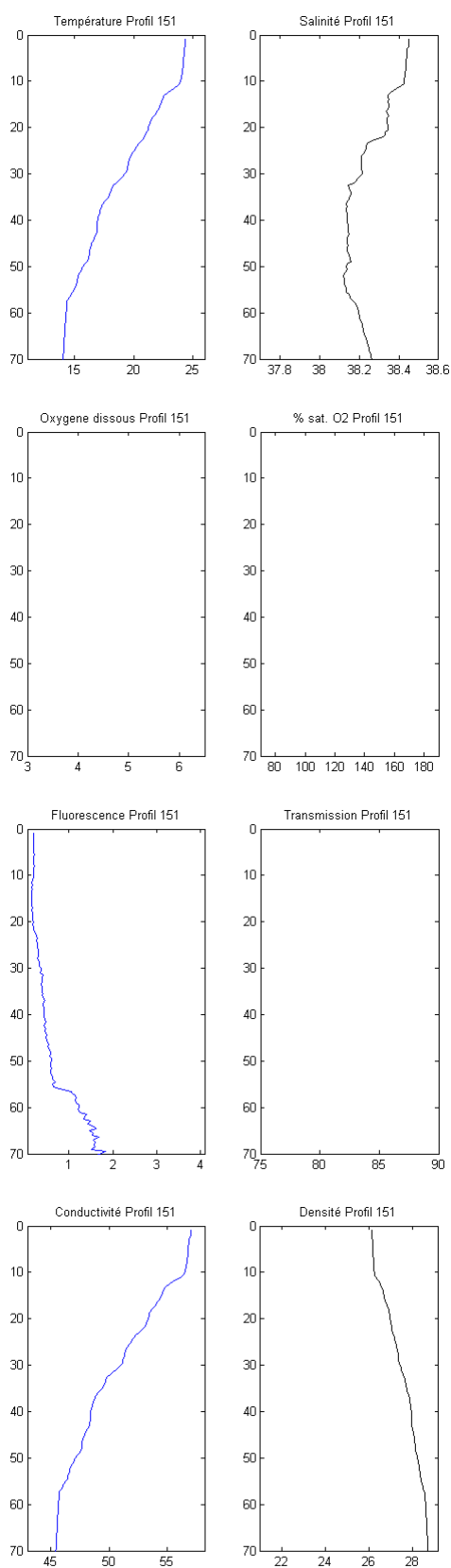
Profil 149 – Station 17



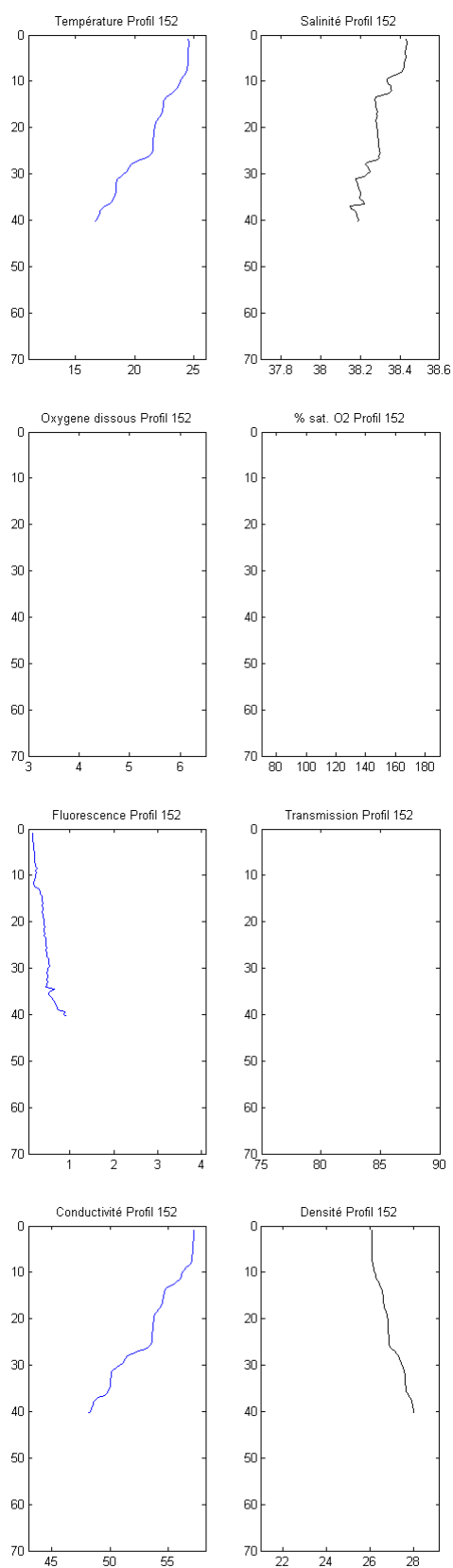
Profil 150 – Station 18



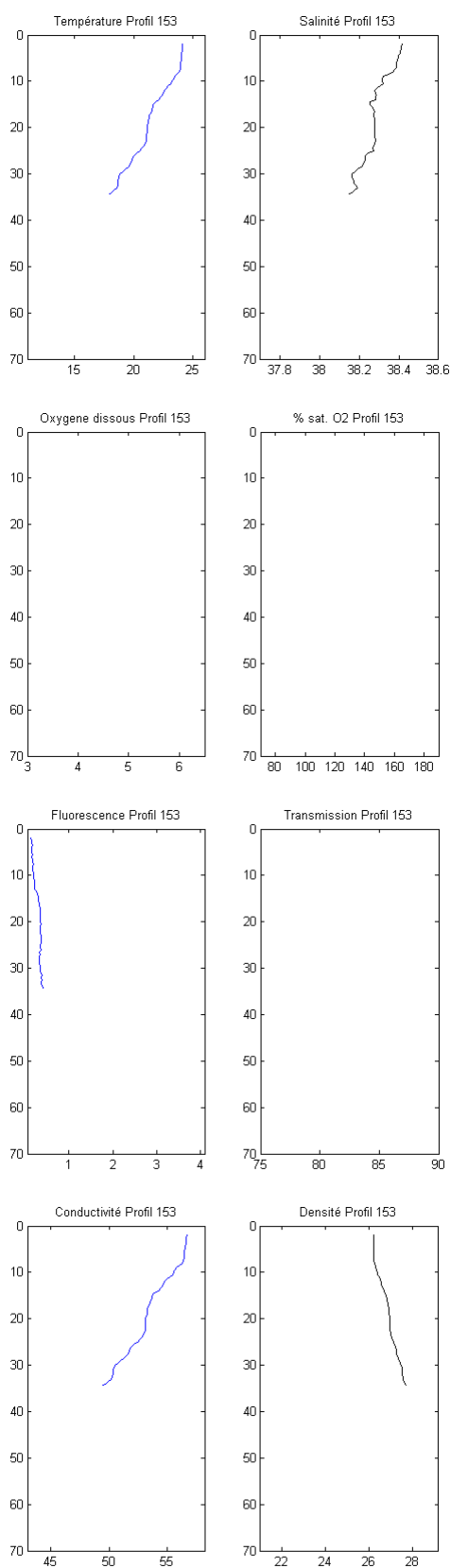
Profil 151 – Station 21



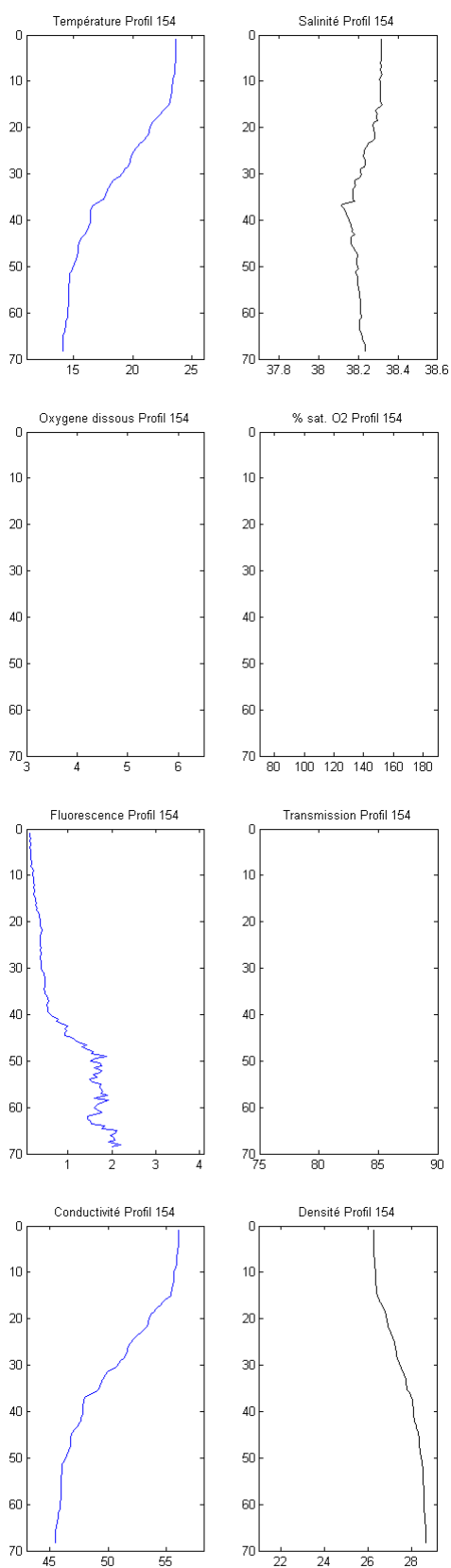
Profil 152 – Station 16



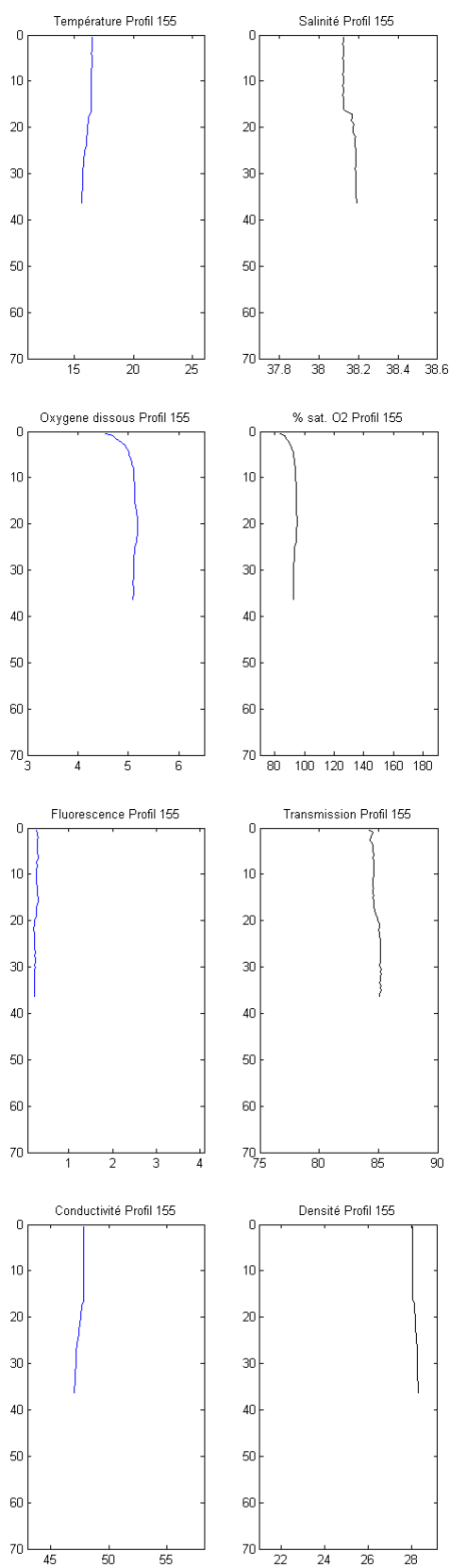
Profil 153 – Station 15



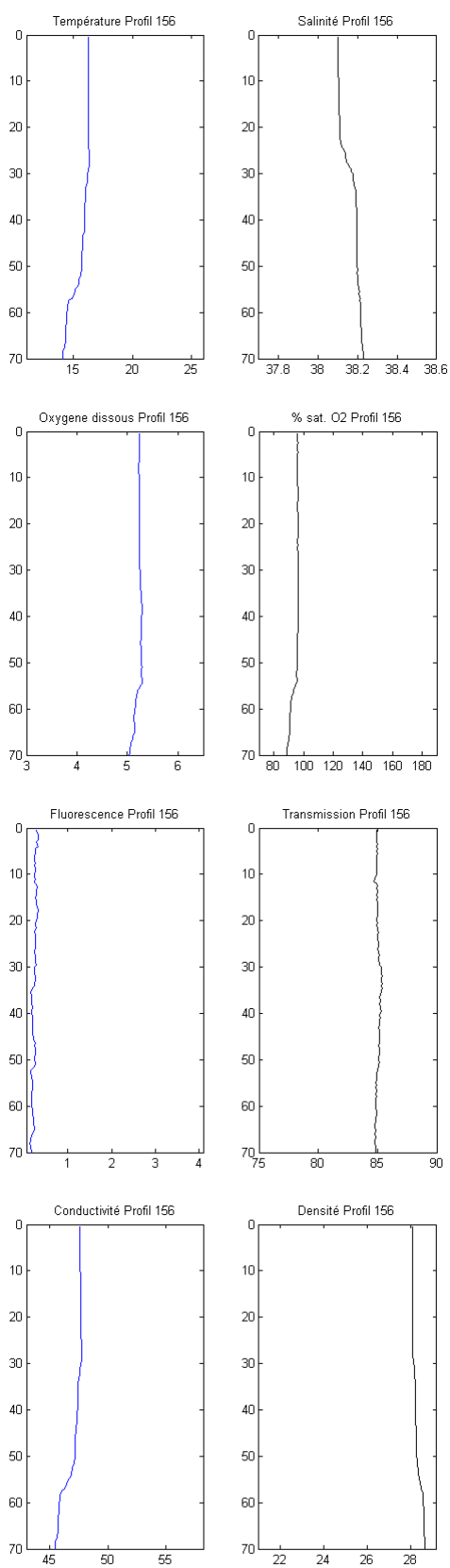
Profil 154 – Station 14



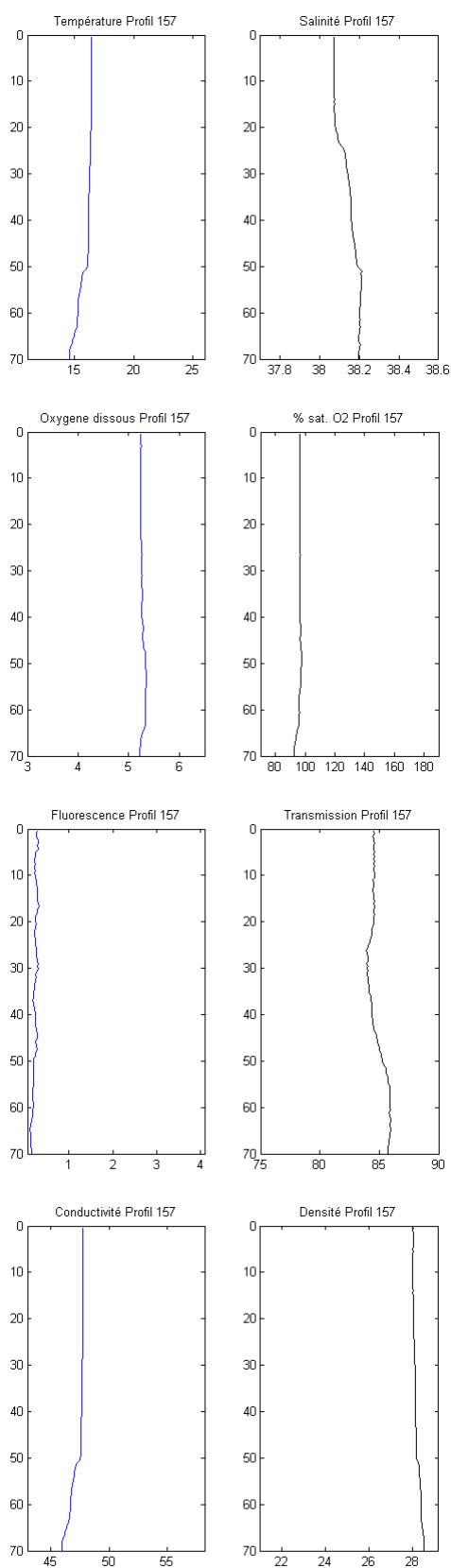
Profil 155 – Station 16



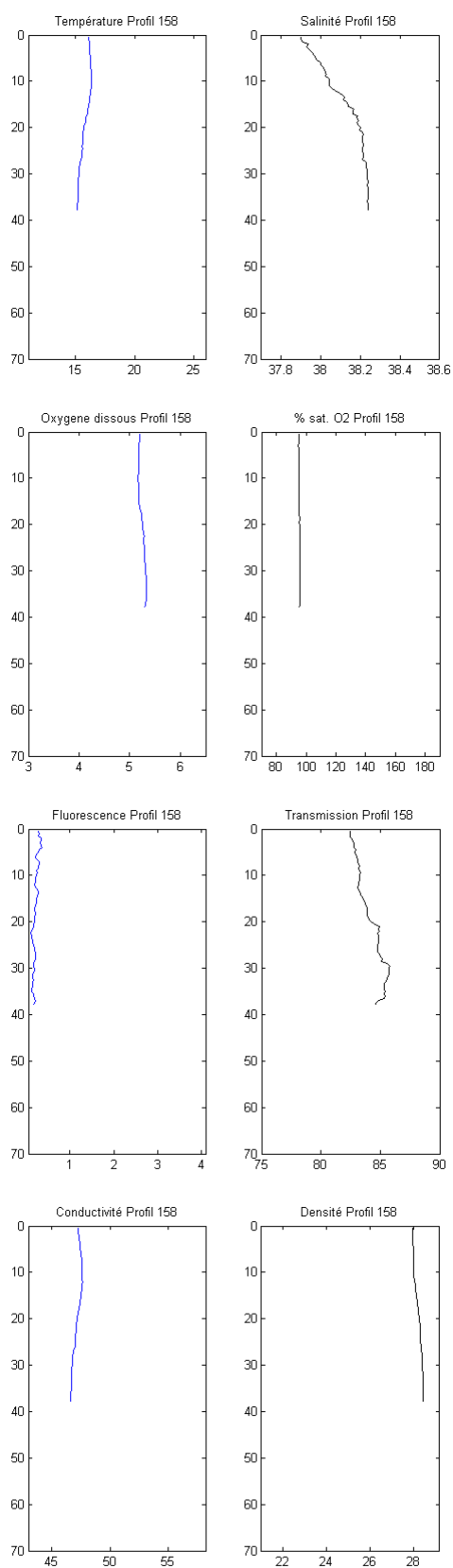
Profil 156 – Station 21



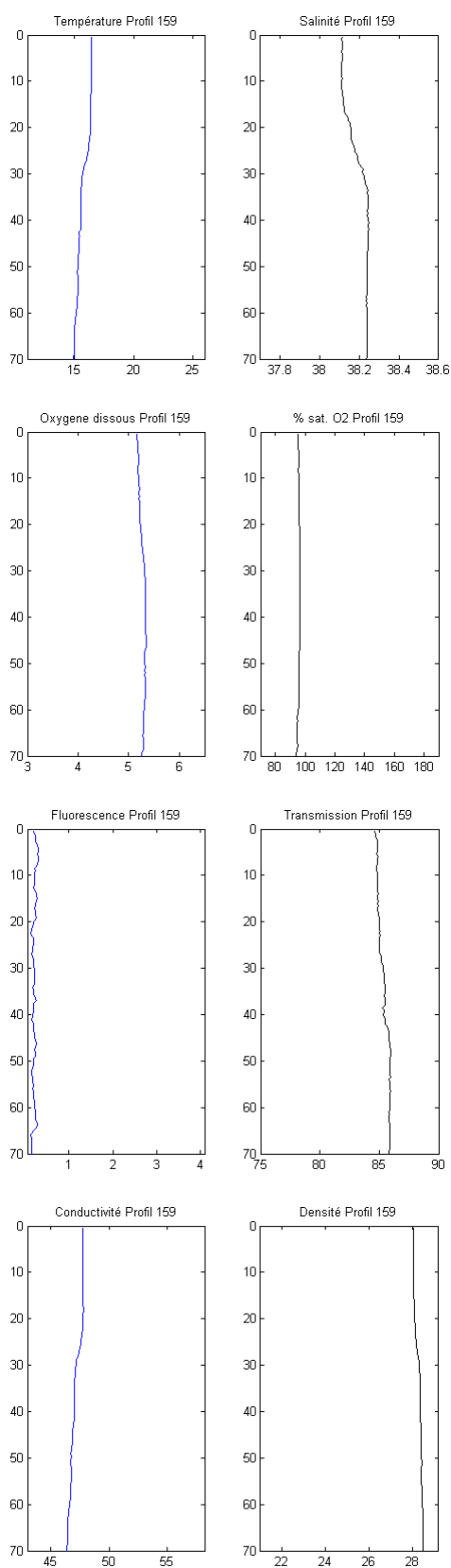
Profil 157 – Station 18



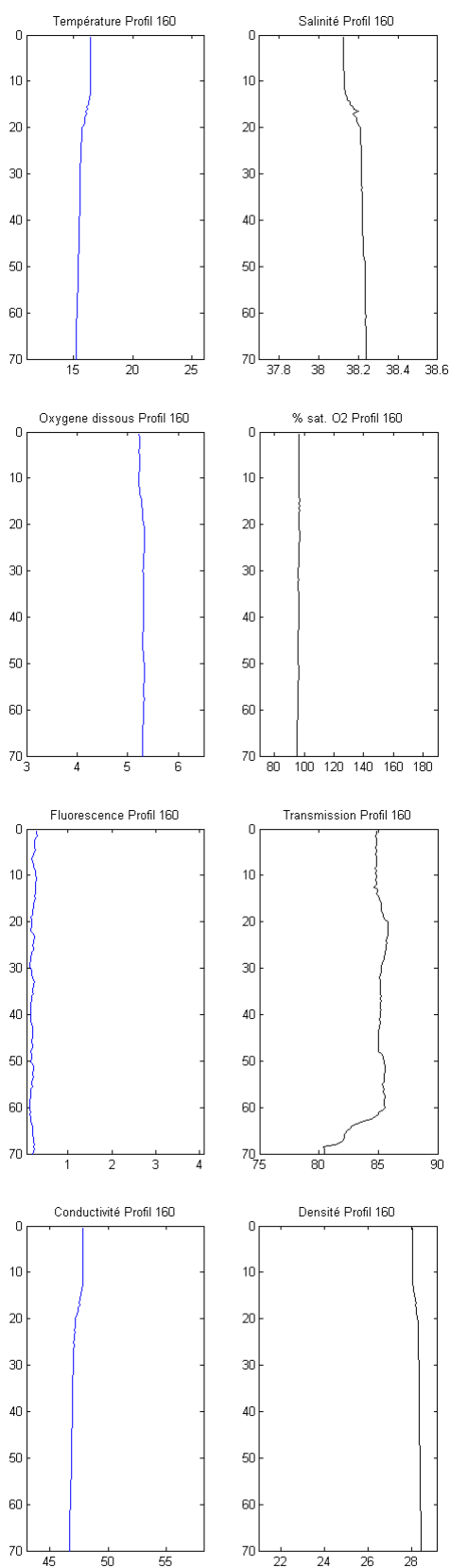
Profil 158 – Station 17



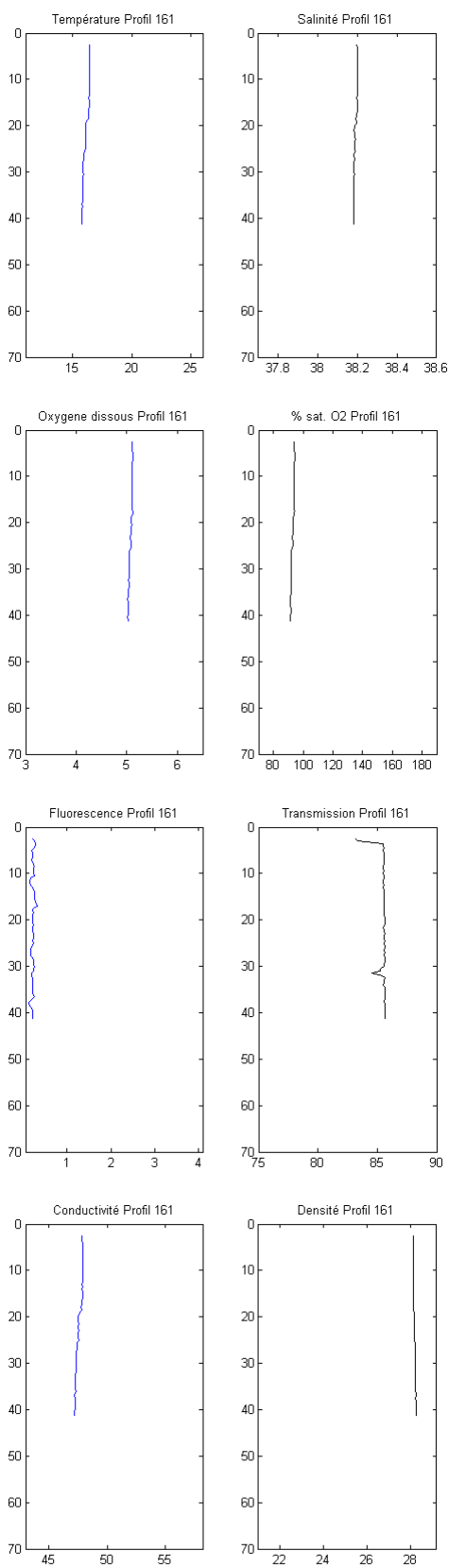
Profil 159 – Station 20



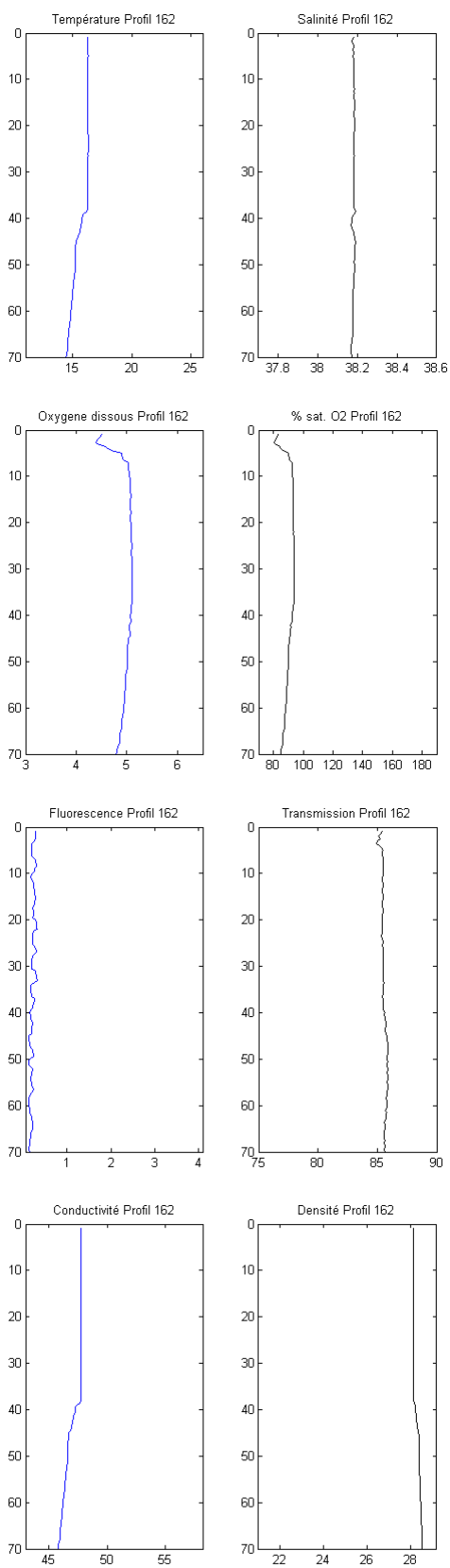
Profil 160 – Station 19



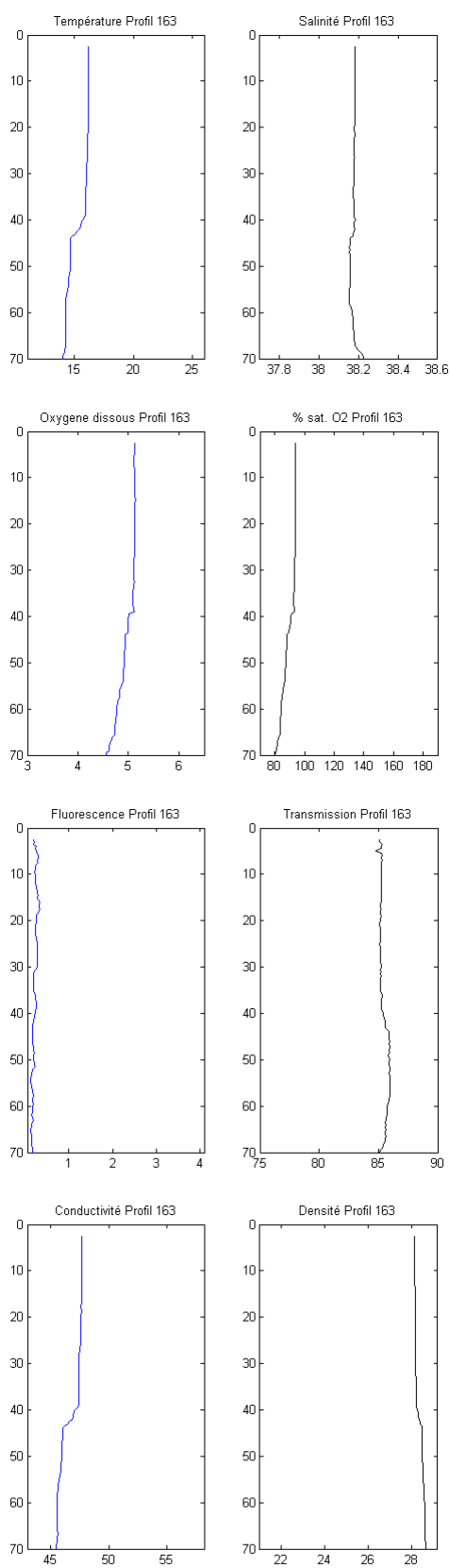
Profil 161 – Station 1



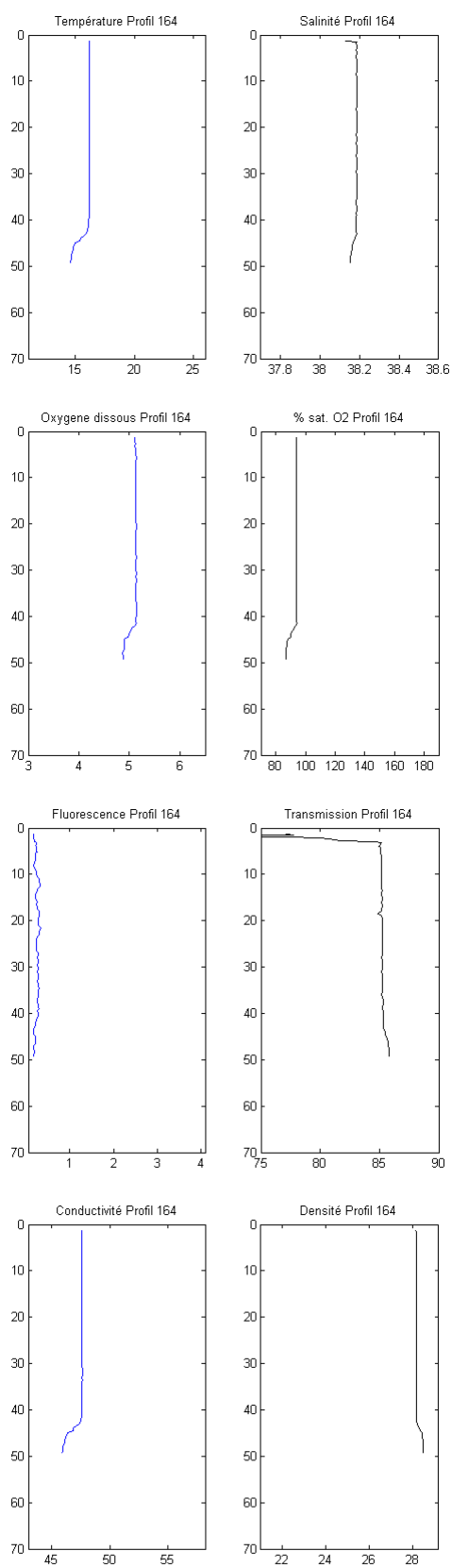
Profil 162 – Station 10



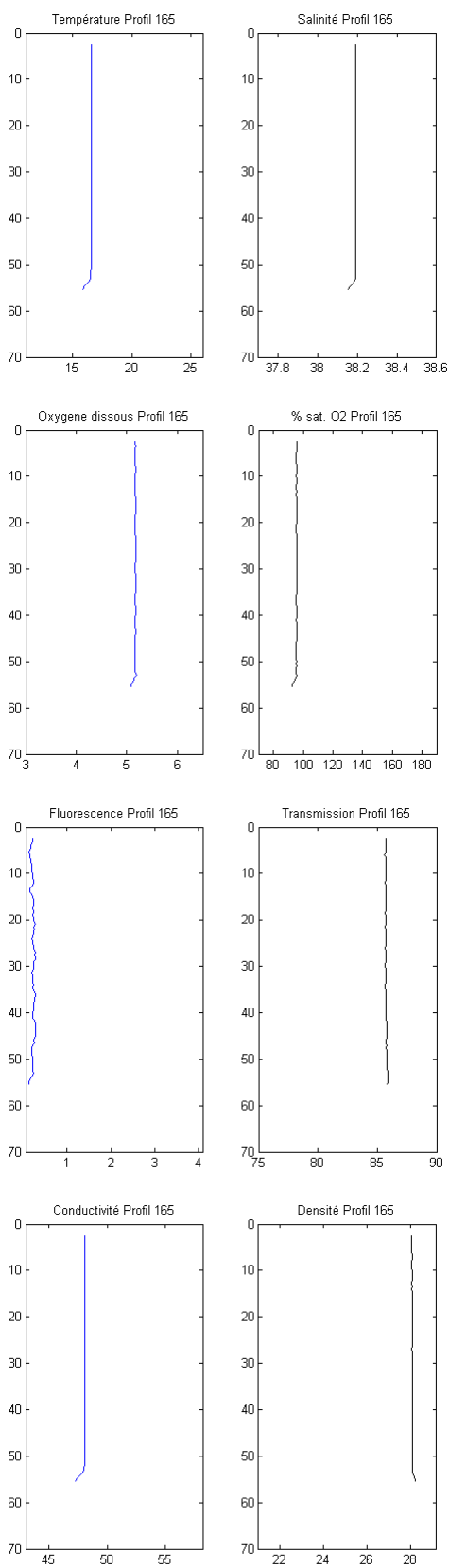
Profil 163 – Station 12



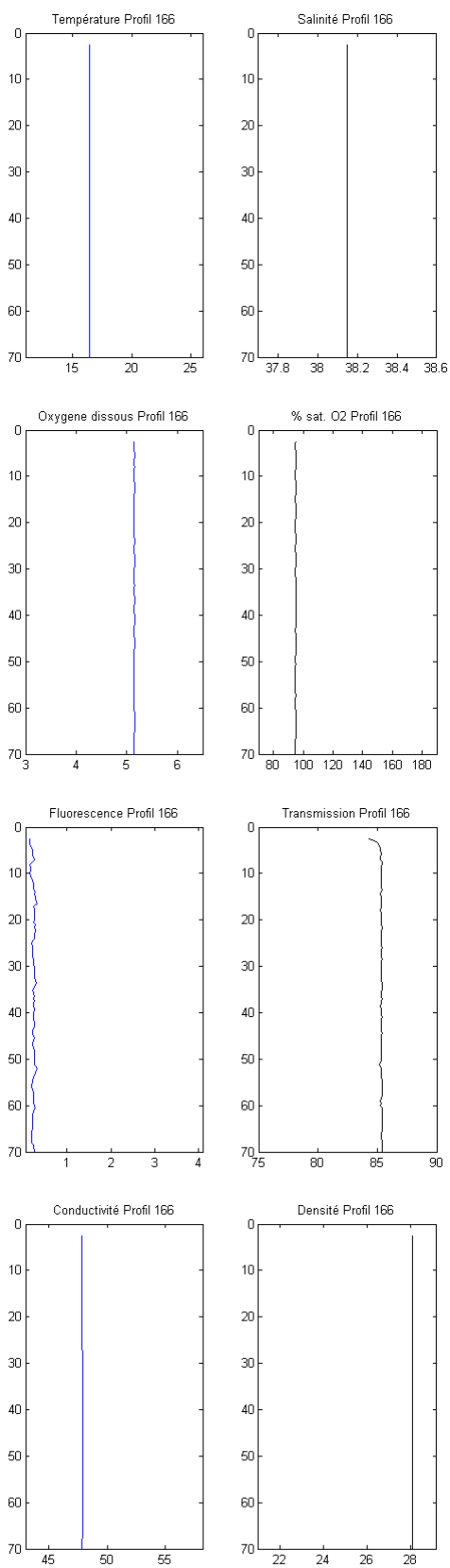
Profil 164 – Station 11



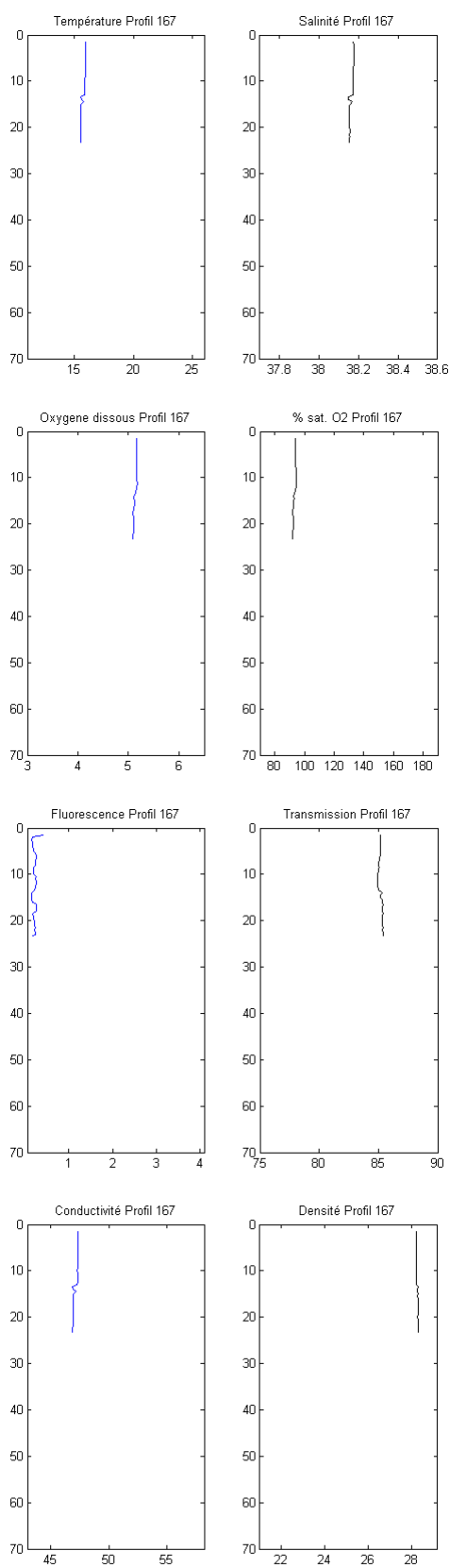
Profil 165 – Station 4



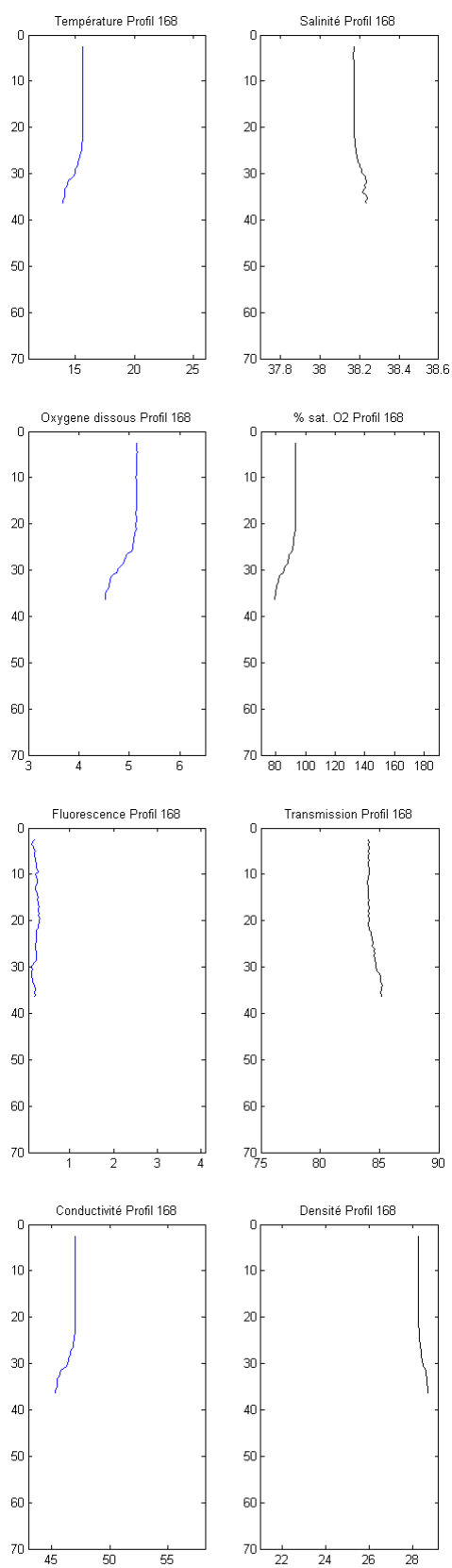
Profil 166 – Station 23



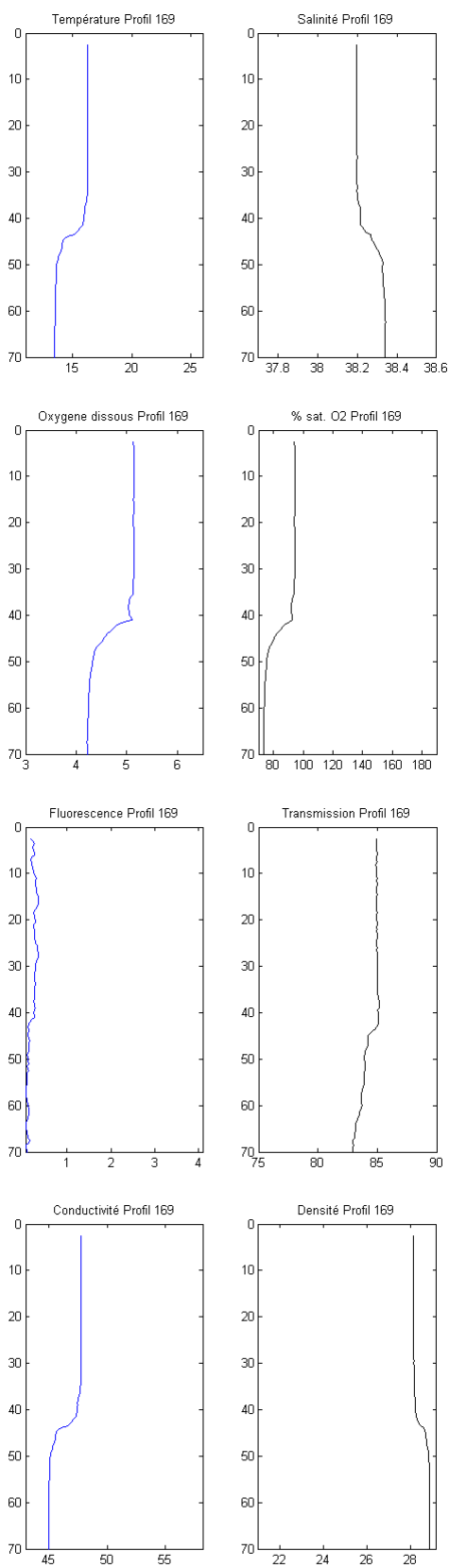
Profil 167 – Station 7



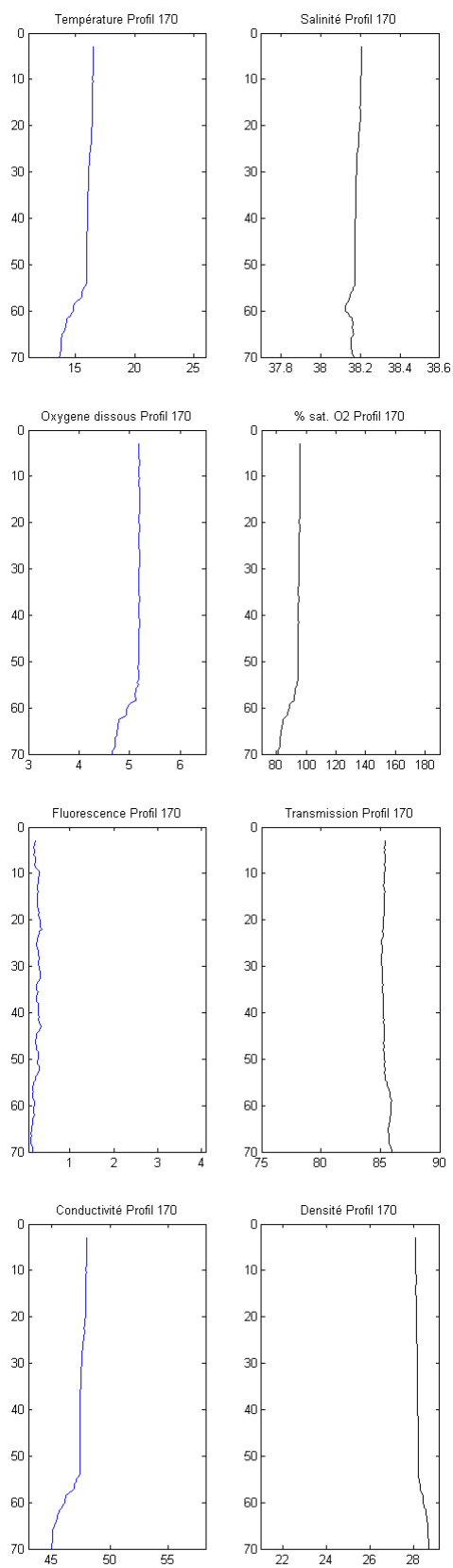
Profil 168 – Station 8



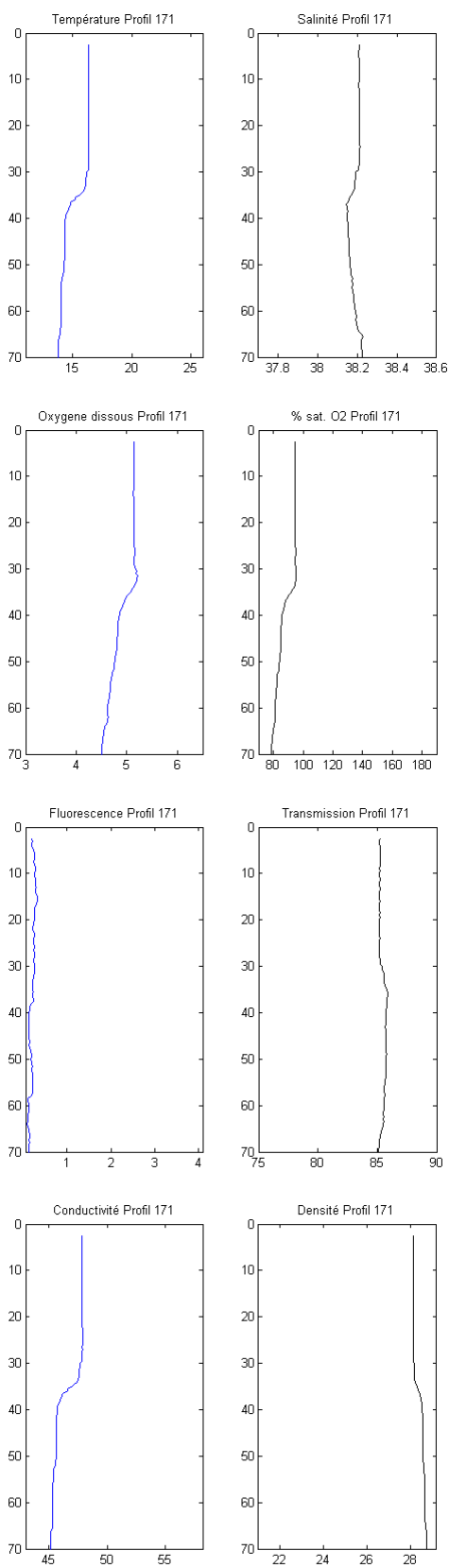
Profil 169 – Station 6



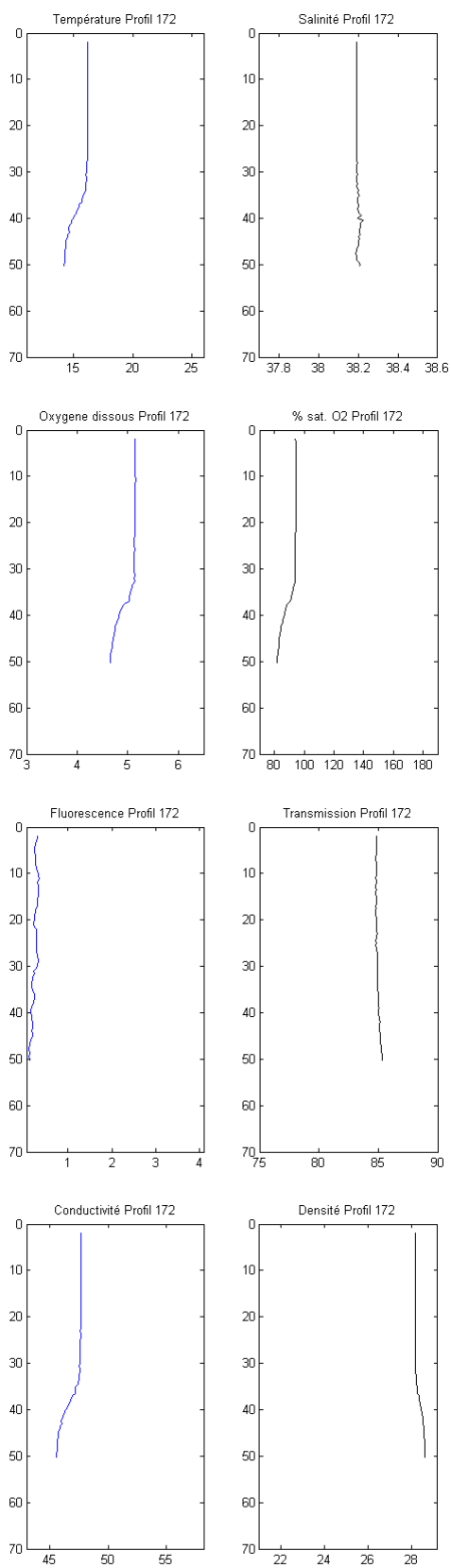
Profil 170 – Station 5



Profil 171 – Station 9

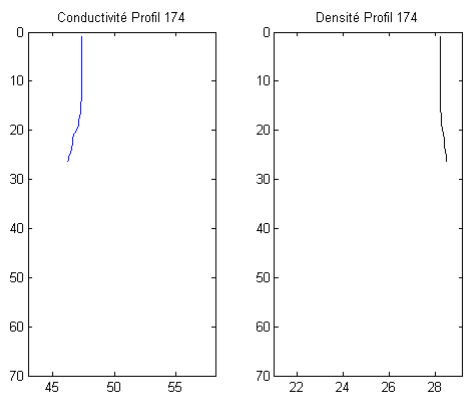
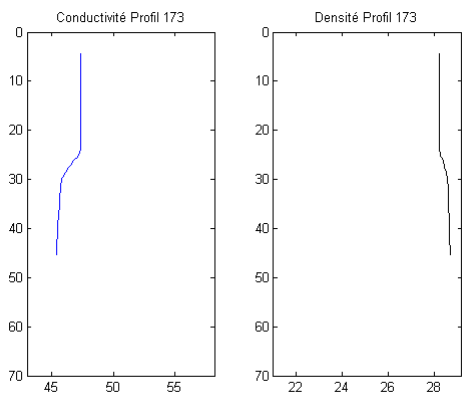
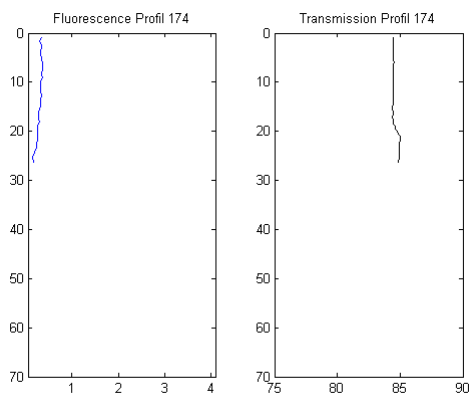
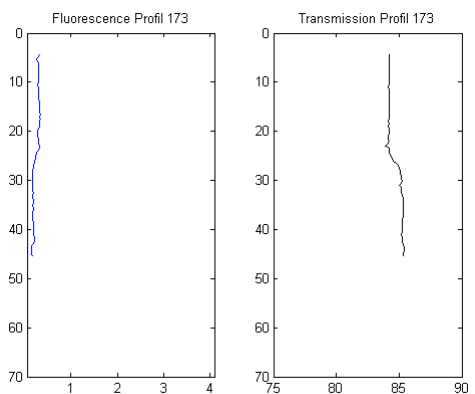
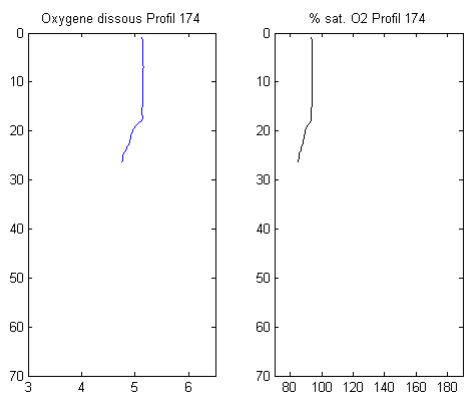
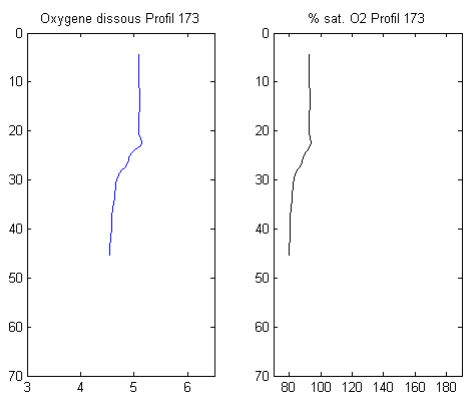
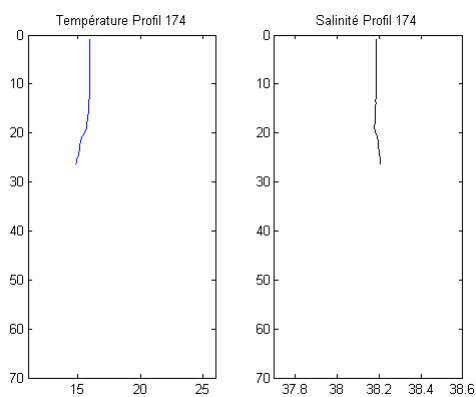
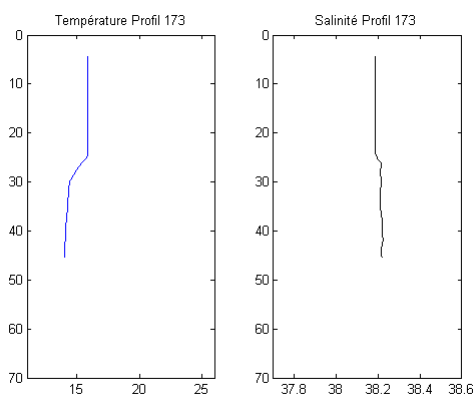


Profil 172 – Station 22

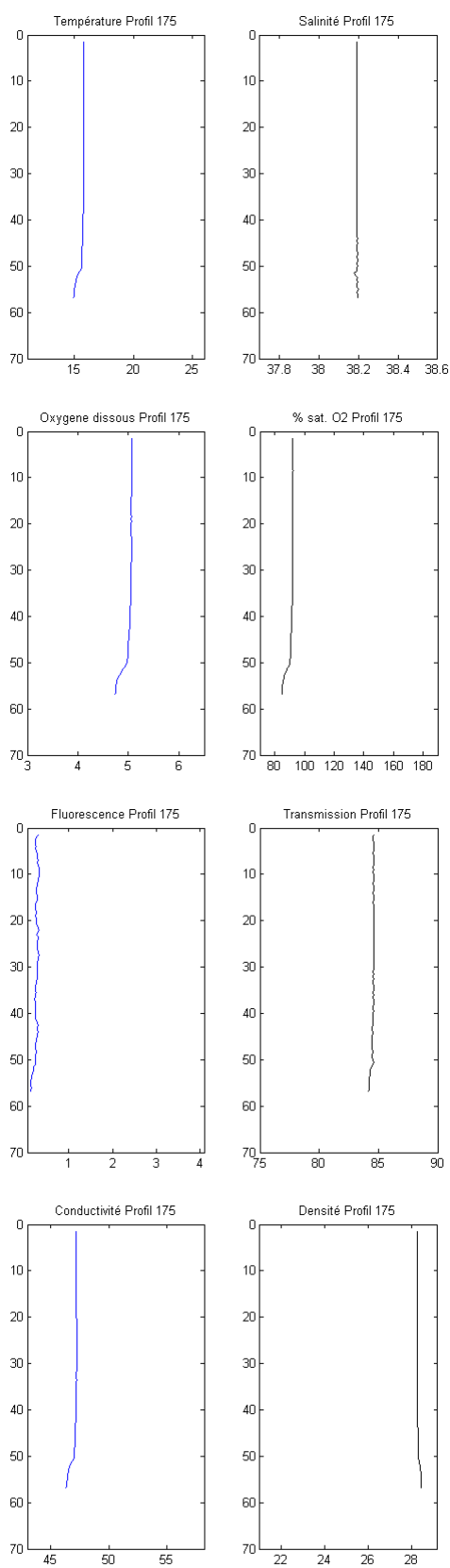


Profil 173 – Station 3

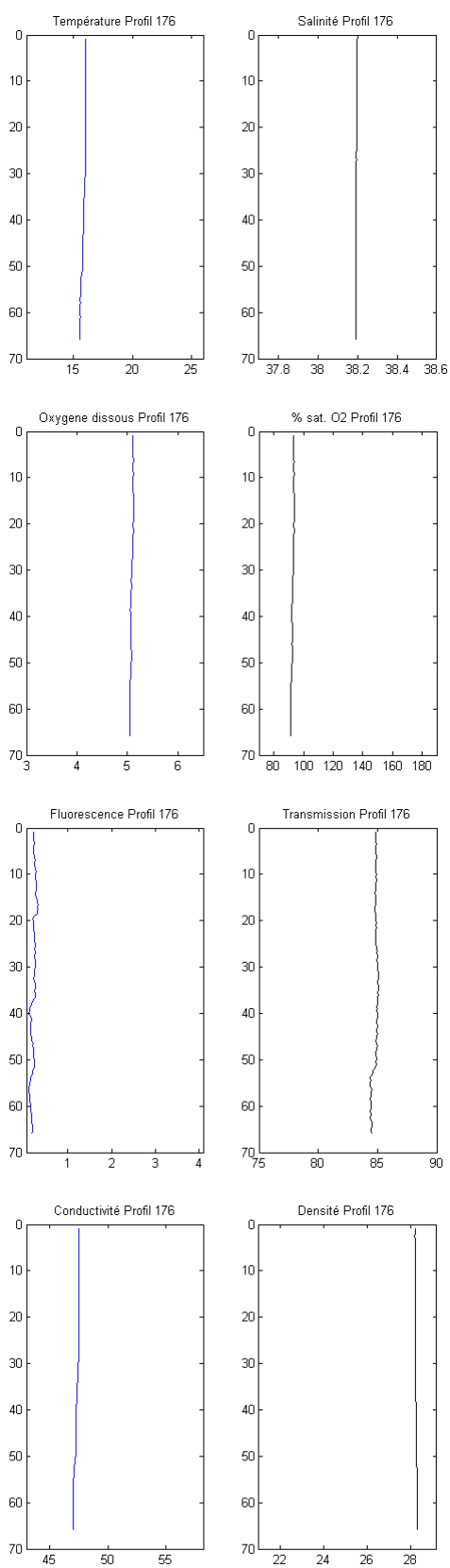
Profil 174 – Station 2



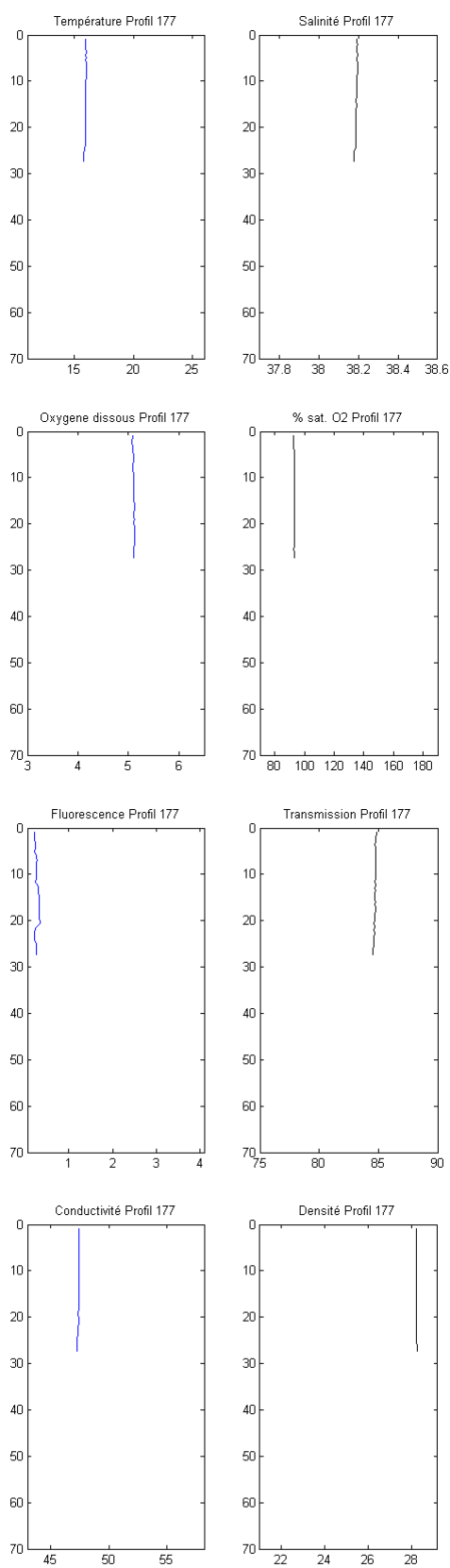
Profil 175 – Station 13



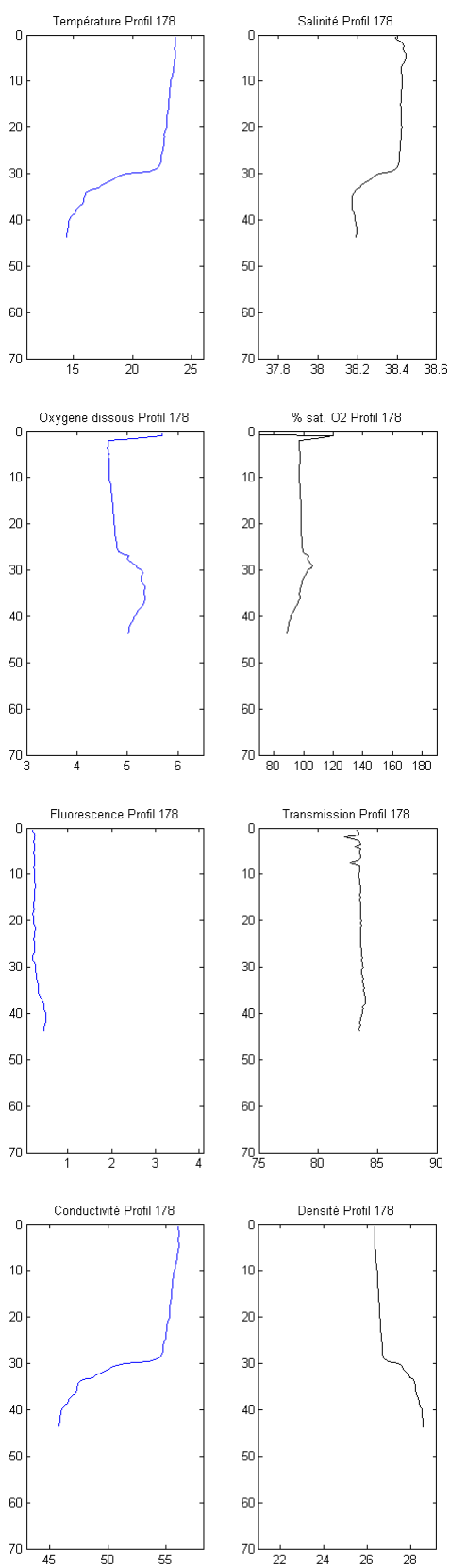
Profil 176 – Station 14



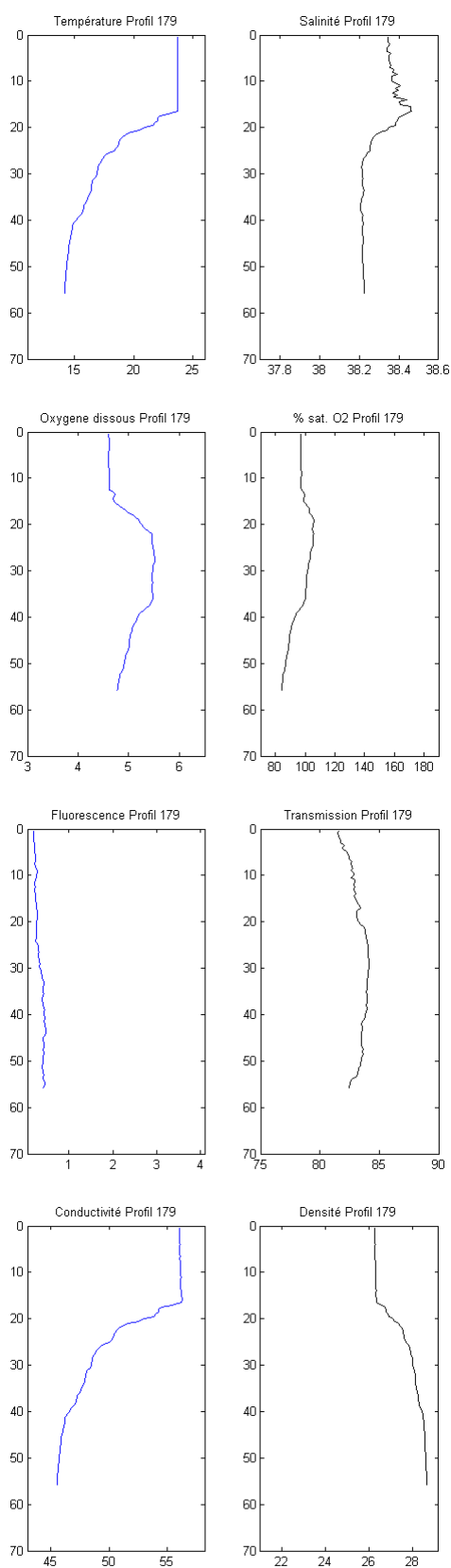
Profil 177 – Station 15



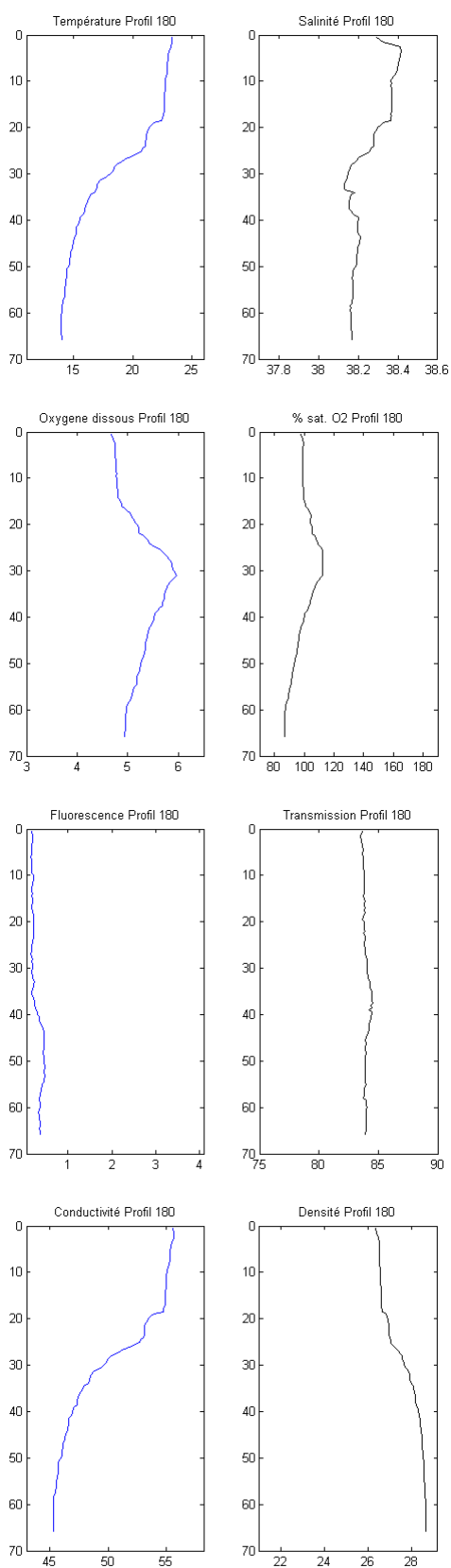
Profil 178 – Station 1



Profil 179 – Station 13

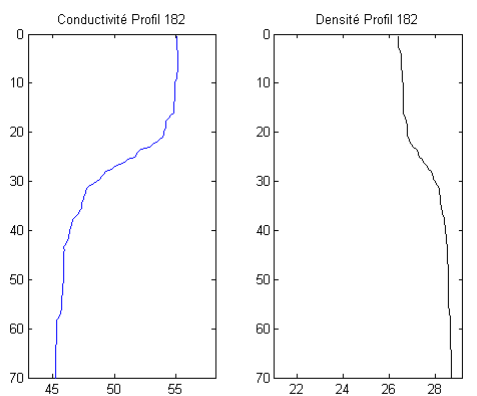
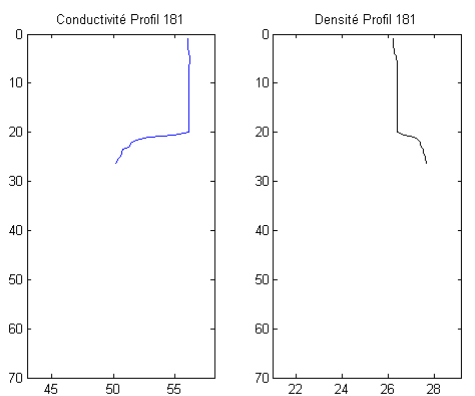
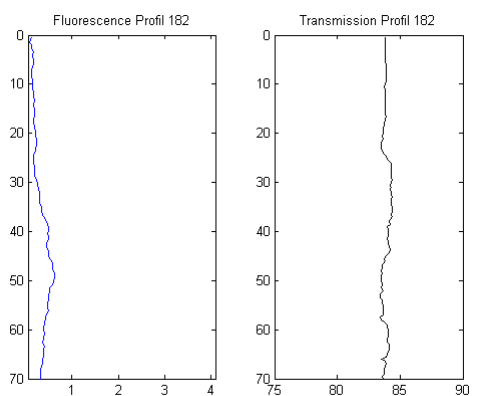
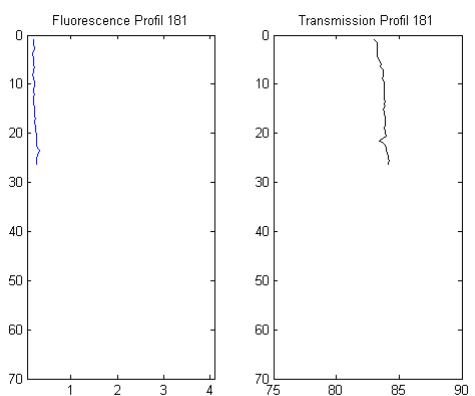
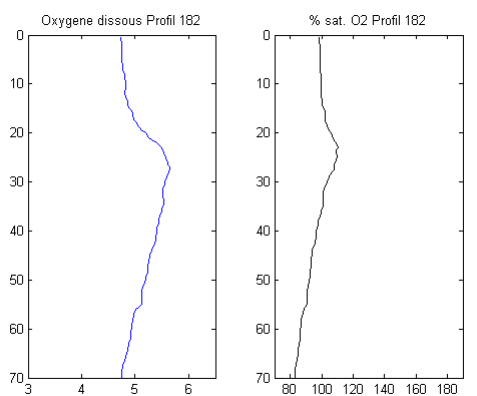
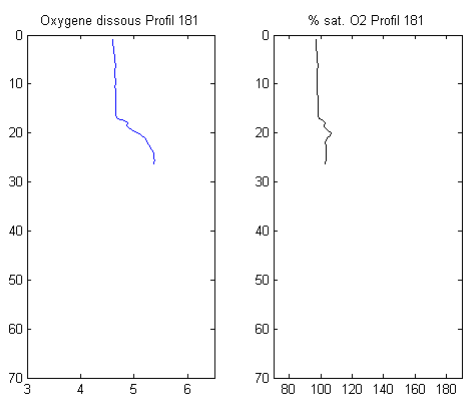
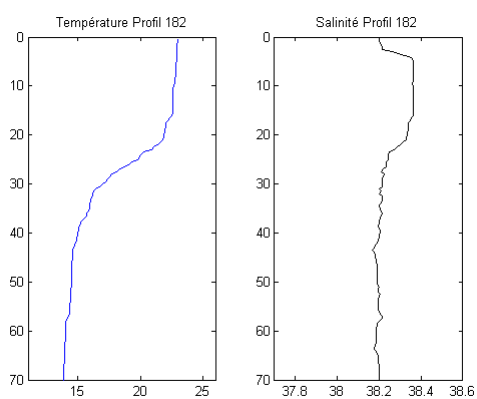
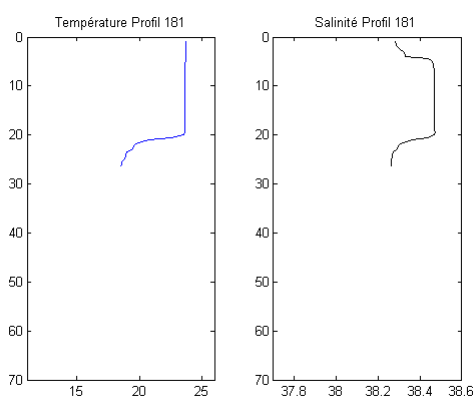


Profil 180 – Station 10

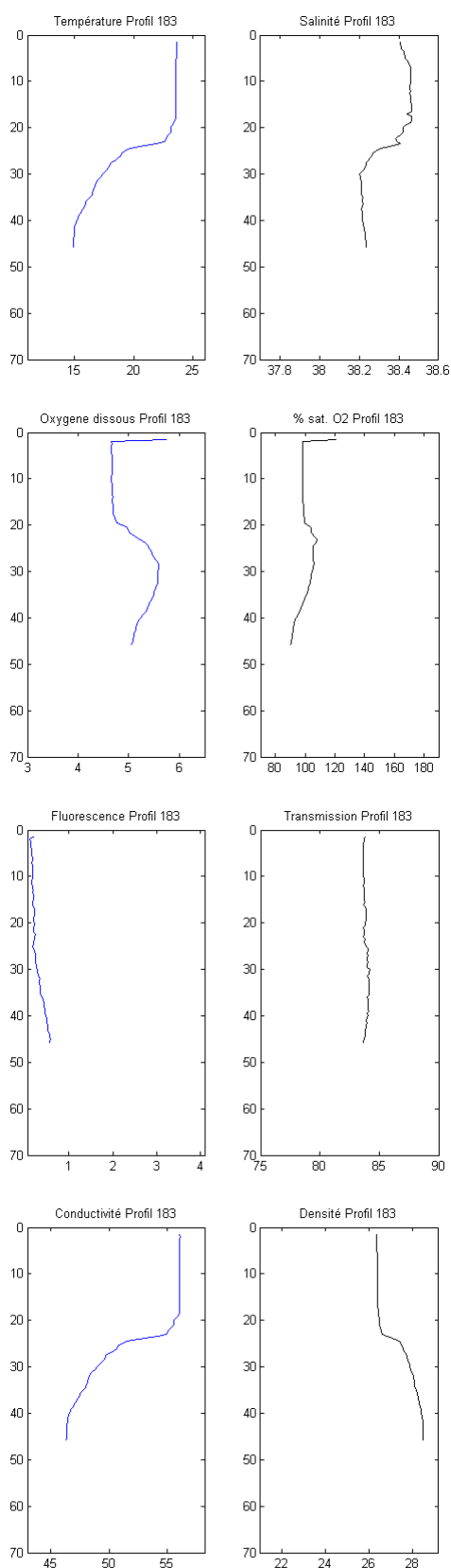


Profil 181 – Station 2

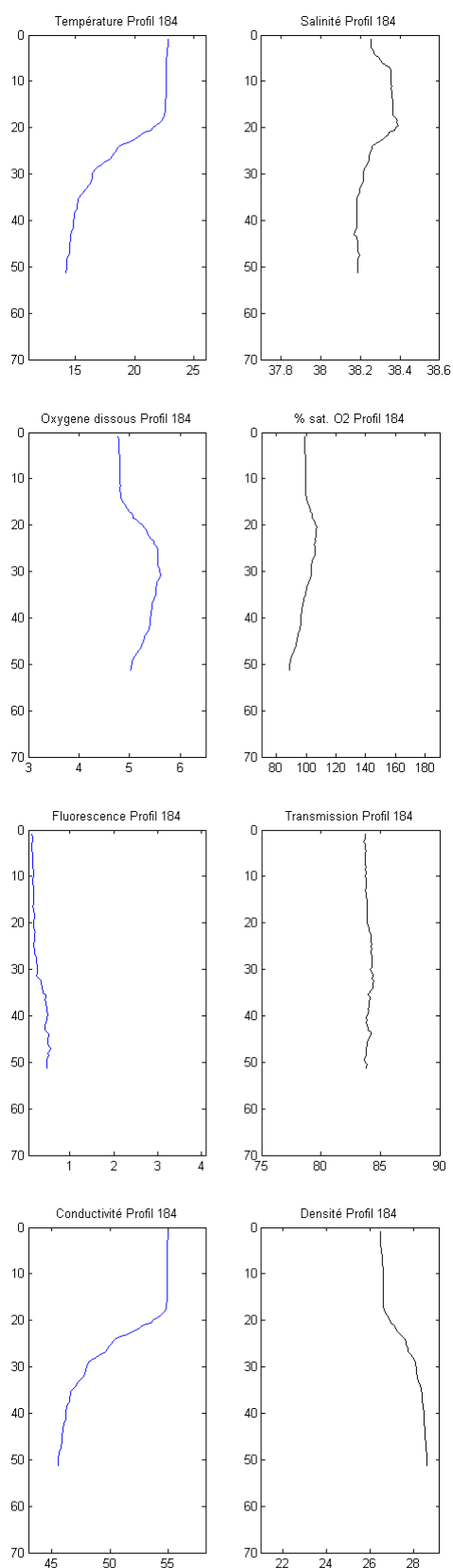
Profil 182 – Station 12



Profil 183 – Station 3

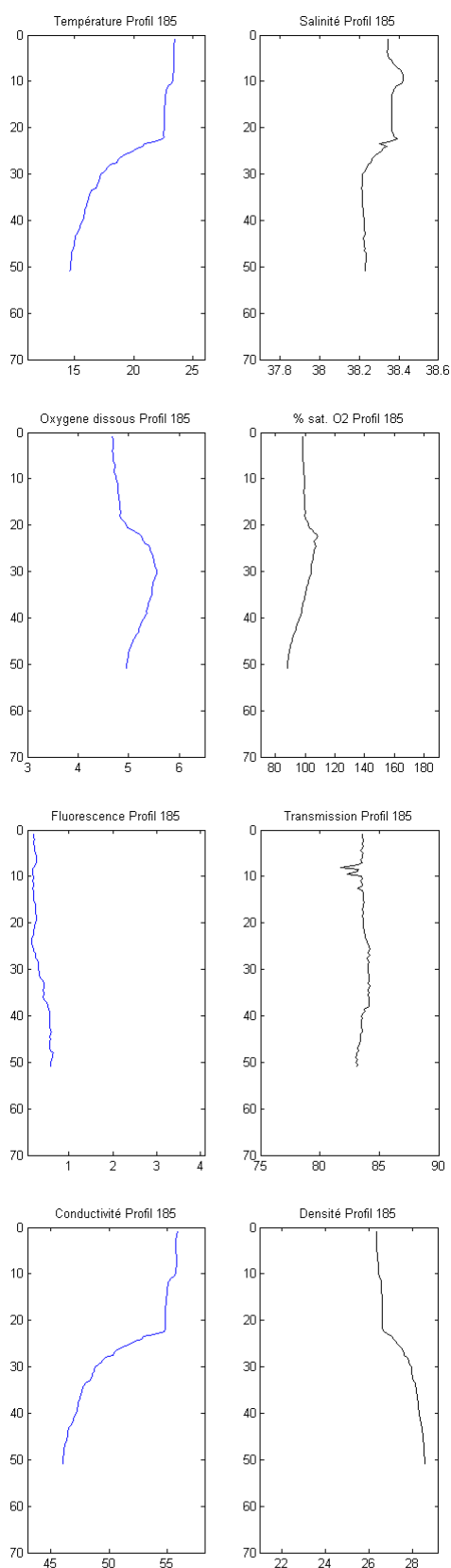


Profil 184 – Station 11

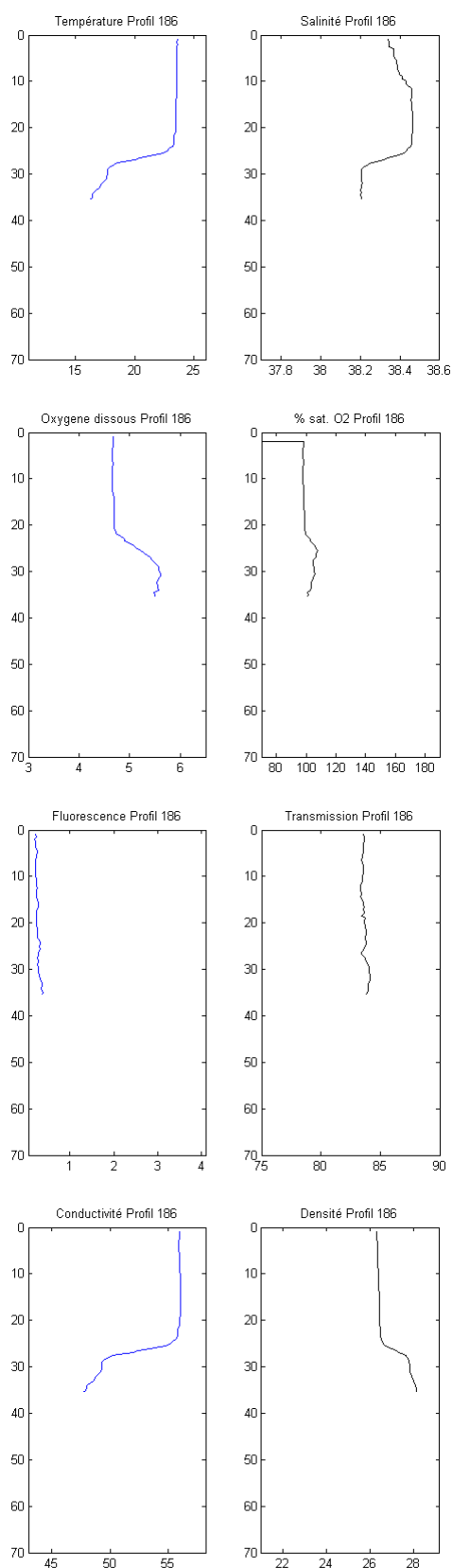


* Valeur manifestement aberrante liée sans doute à un problème instrumental et que nous avons écarté dans le traitement des données

Profil 185 – Station 22



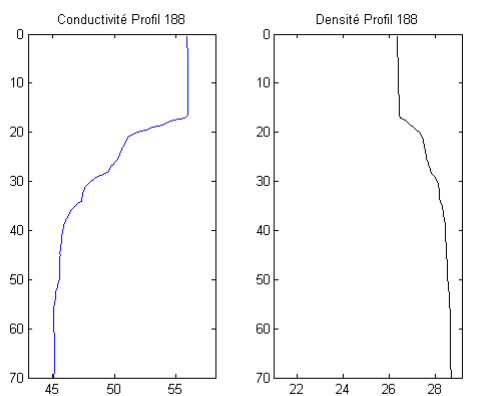
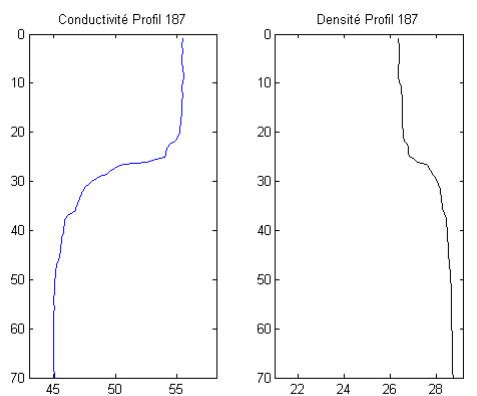
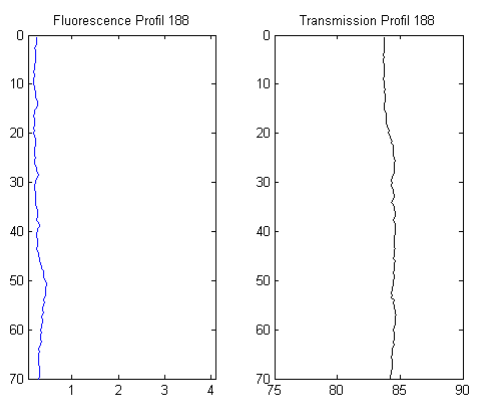
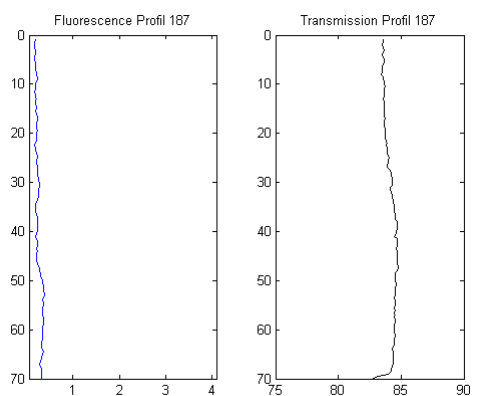
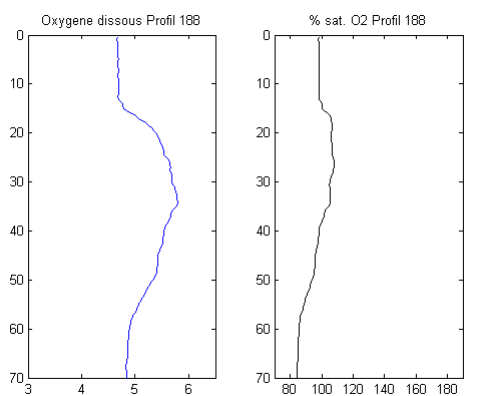
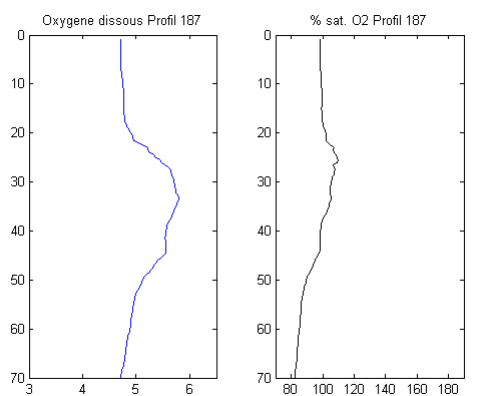
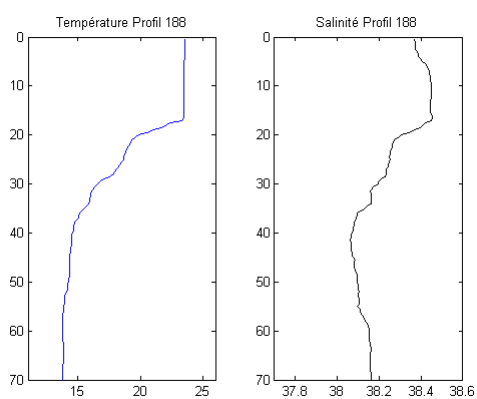
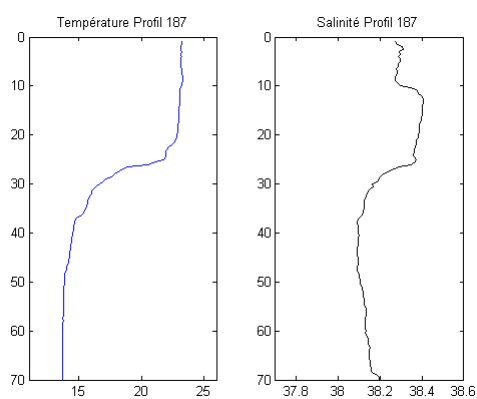
Profil 186 – Station 8



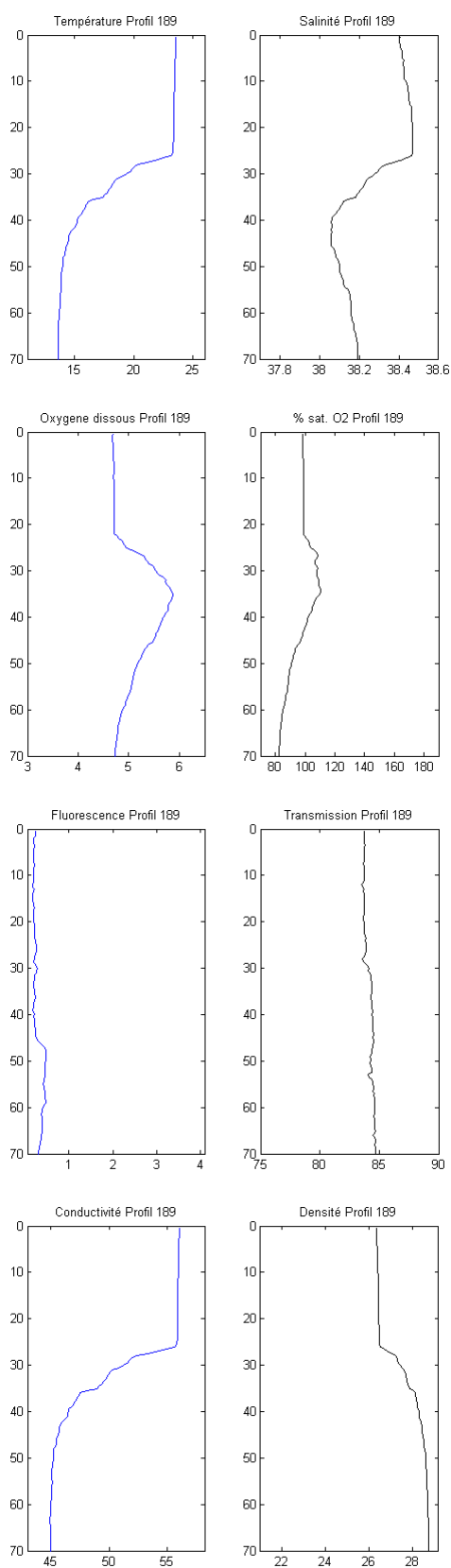
* Valeur manifestement aberrante liée sans doute à un problème instrumental et que nous avons écarté dans le traitement des données

Profil 187 – Station 9

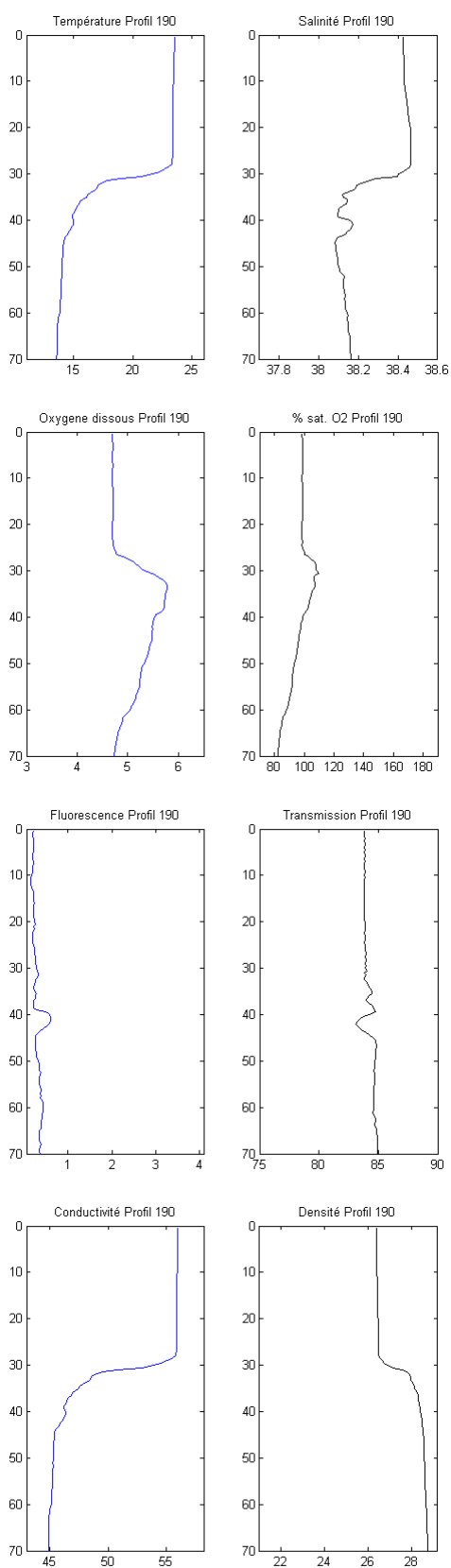
Profil 188 – Station 4



Profil 189 – Station 23

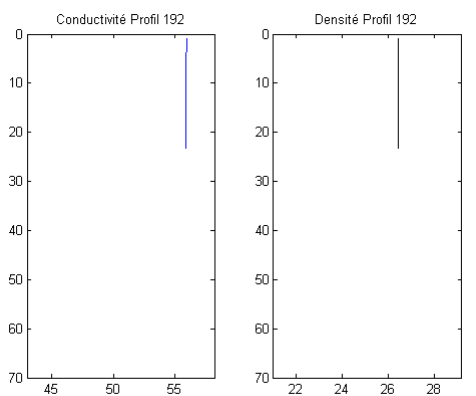
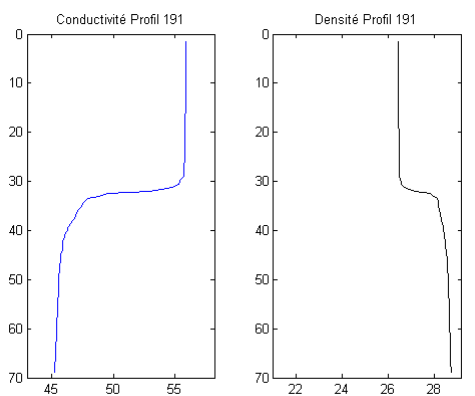
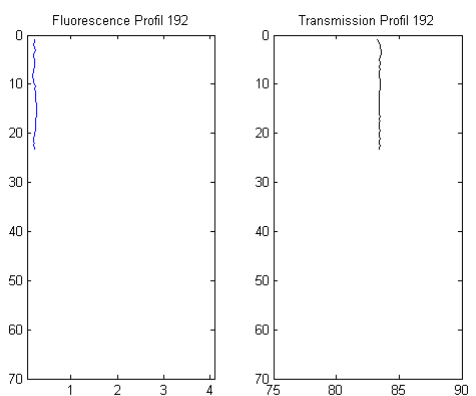
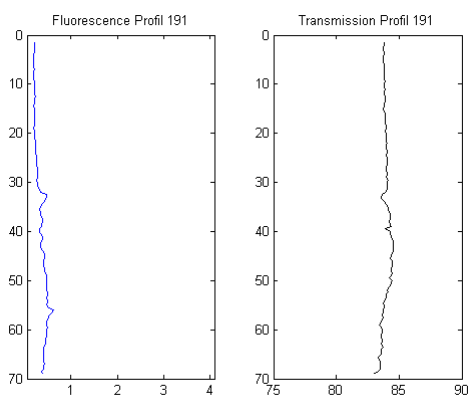
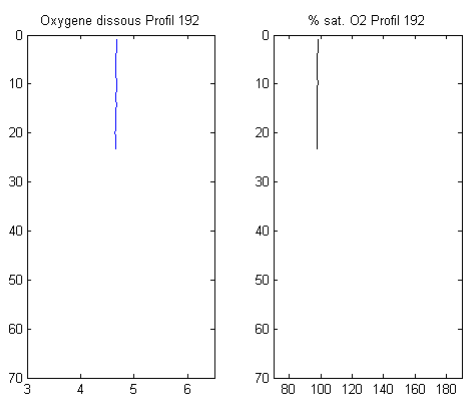
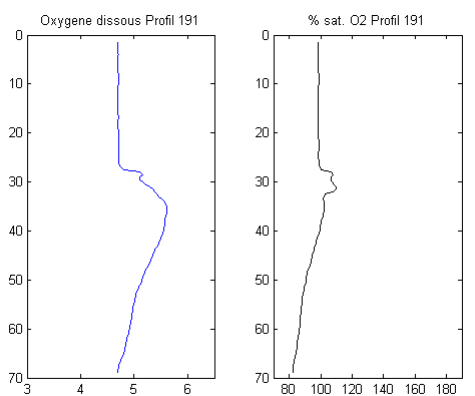
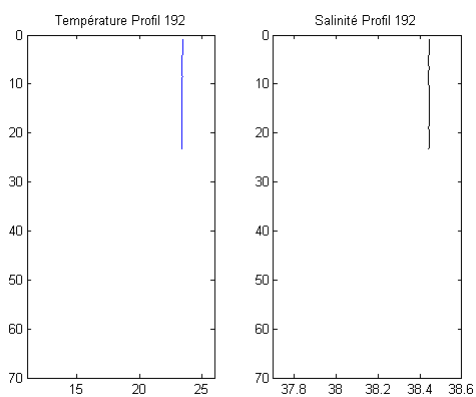
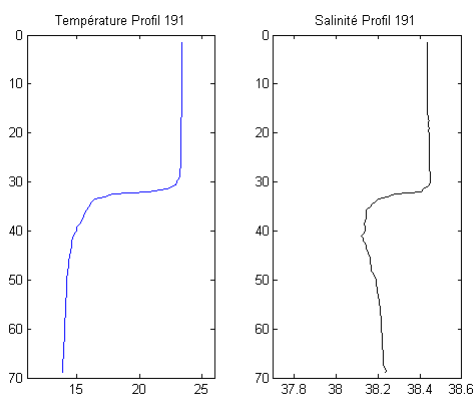


Profil 190 – Station 5

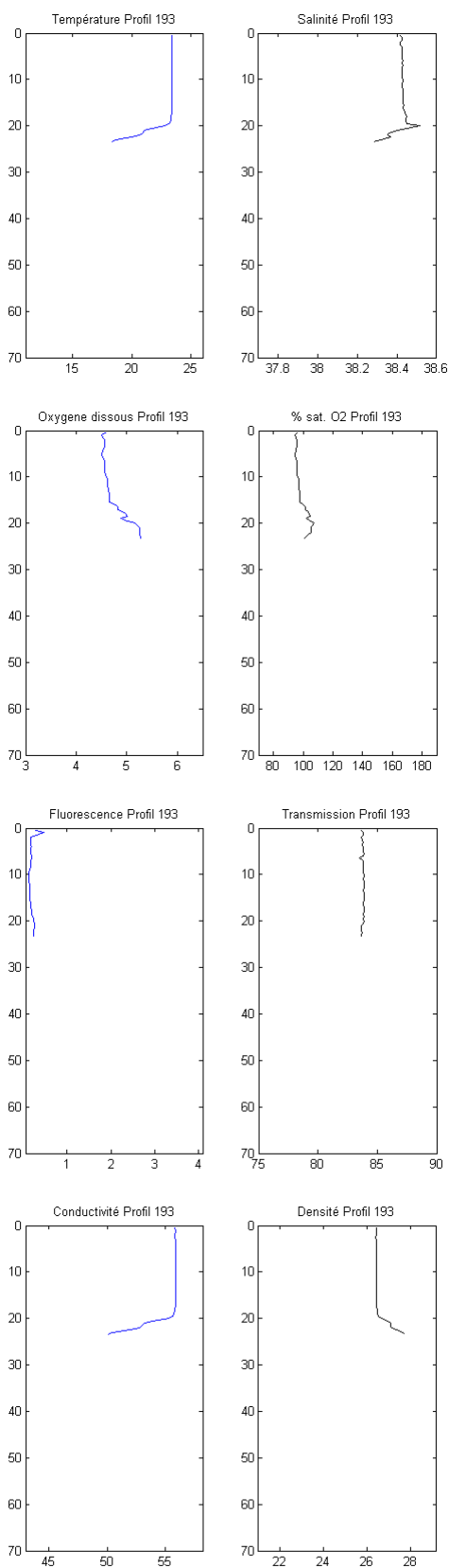


Profil 191 – Station 6

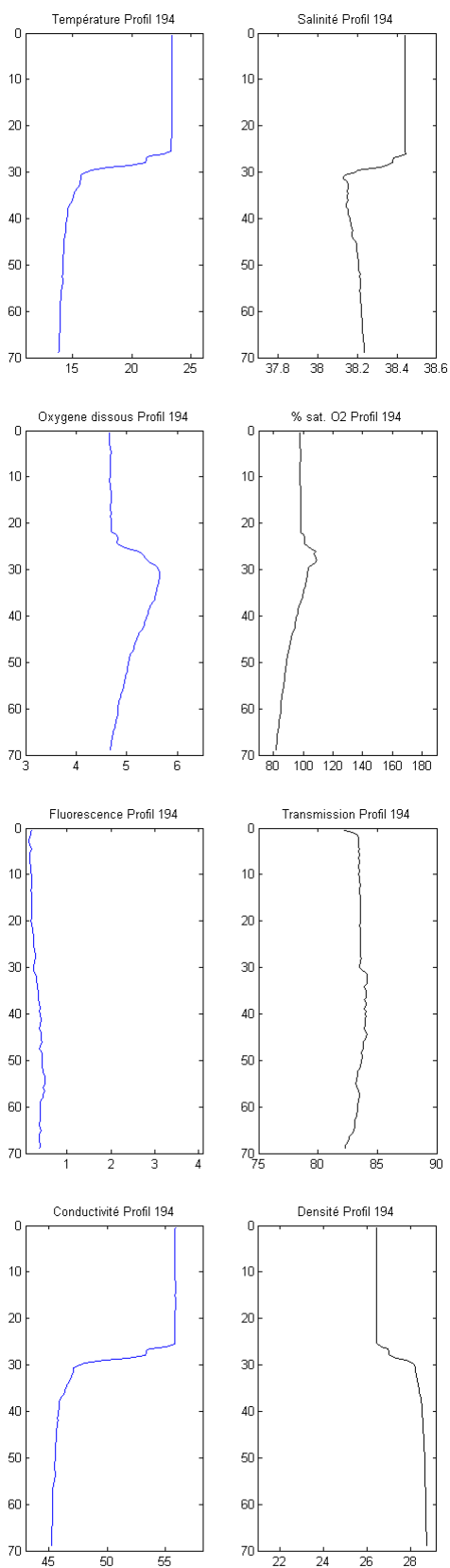
Profil 192 – Station 7



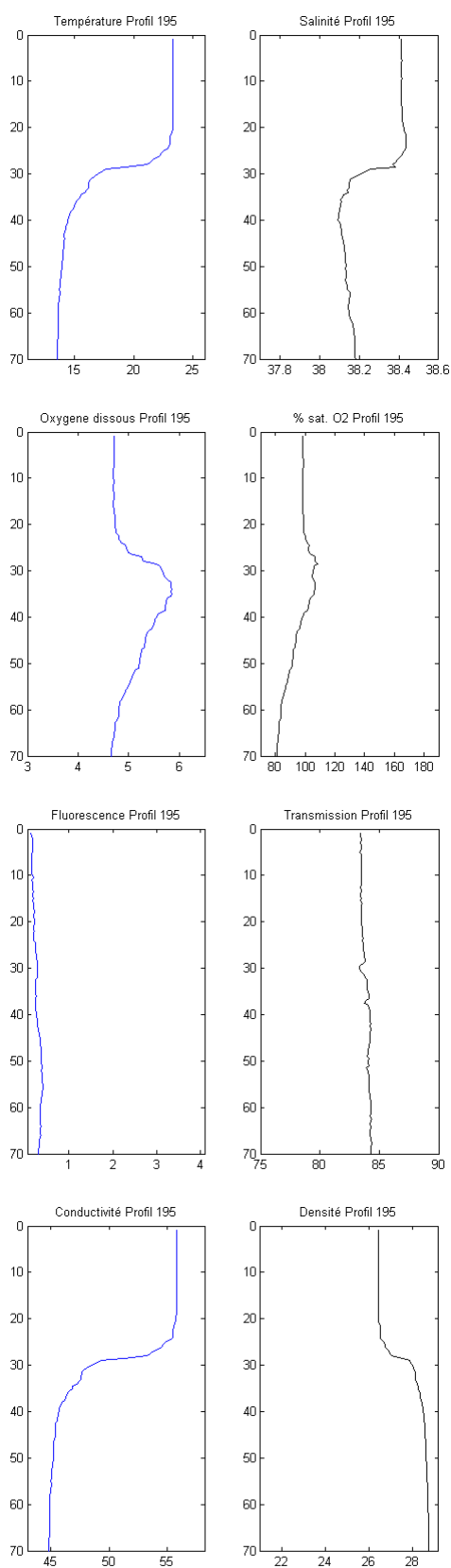
Profil 193 – Station 7



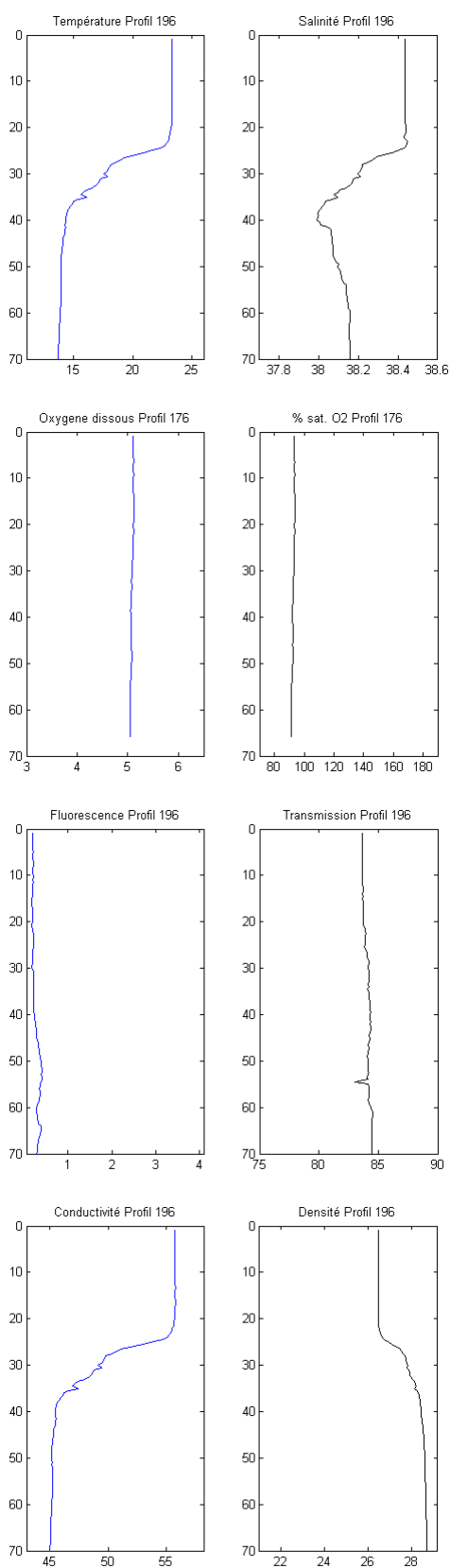
Profil 194 – Station 6



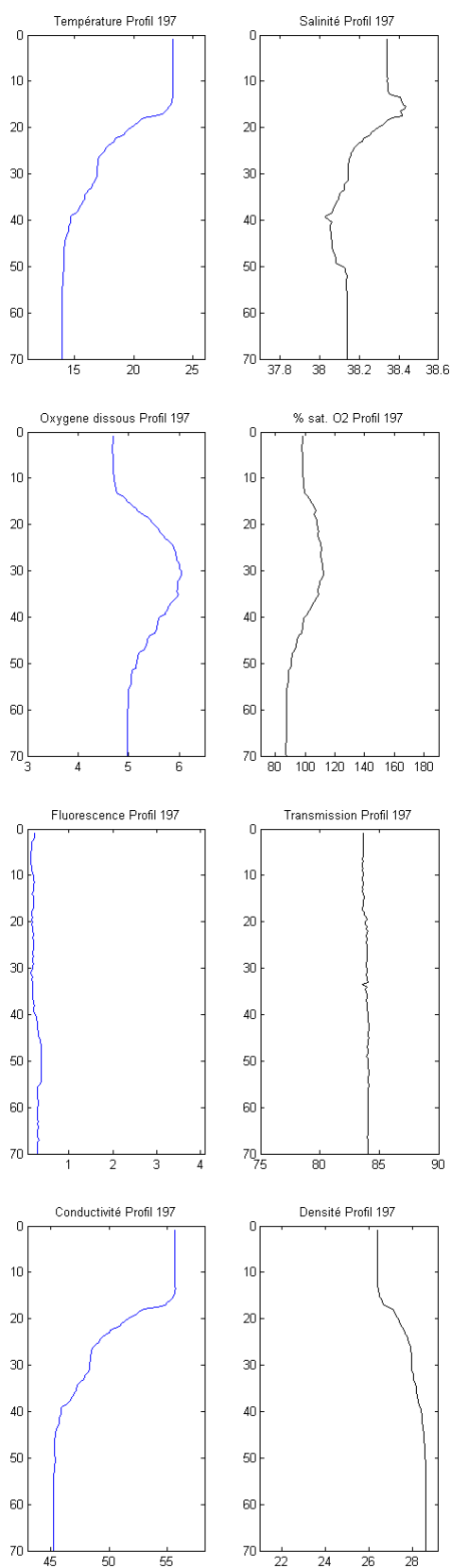
Profil 195 – Station 5



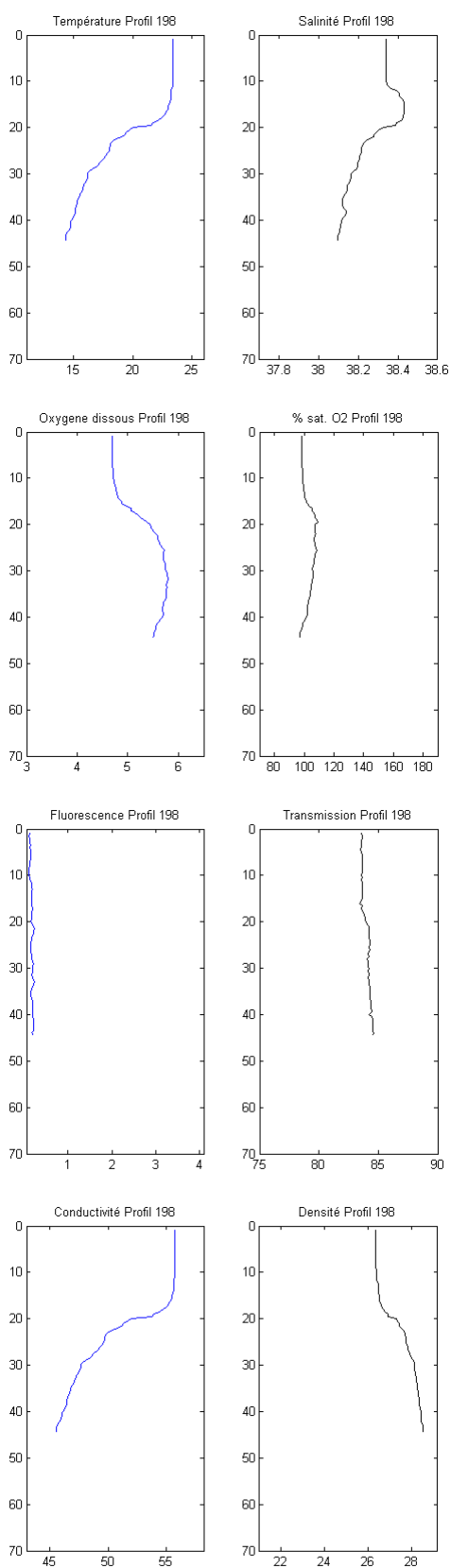
Profil 196 – Station 23



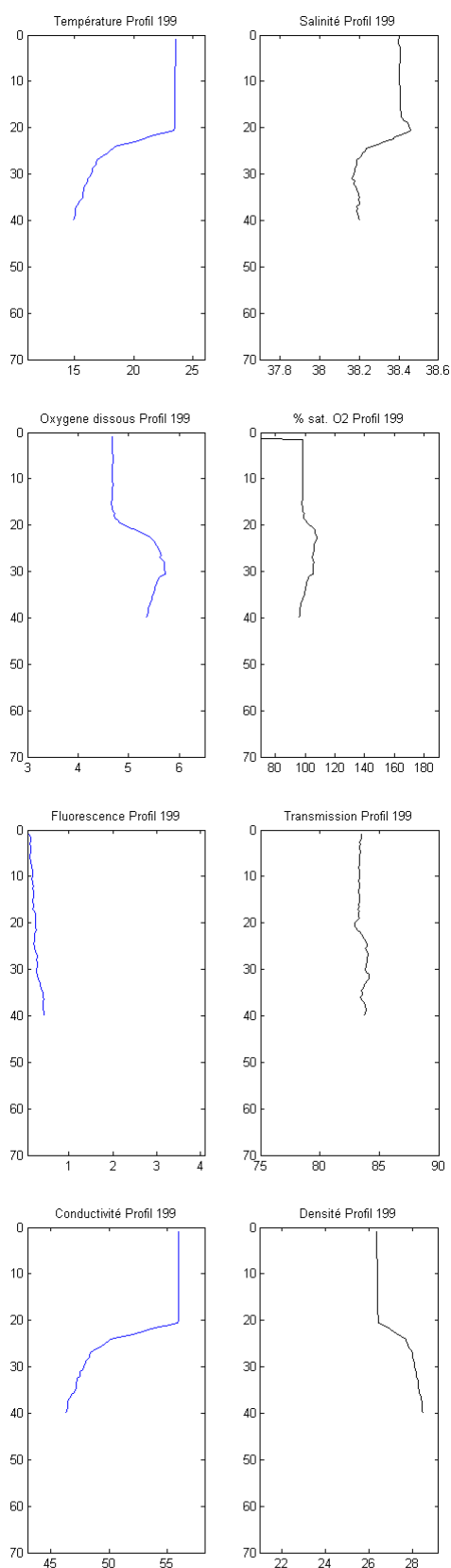
Profil 197 – Station 4



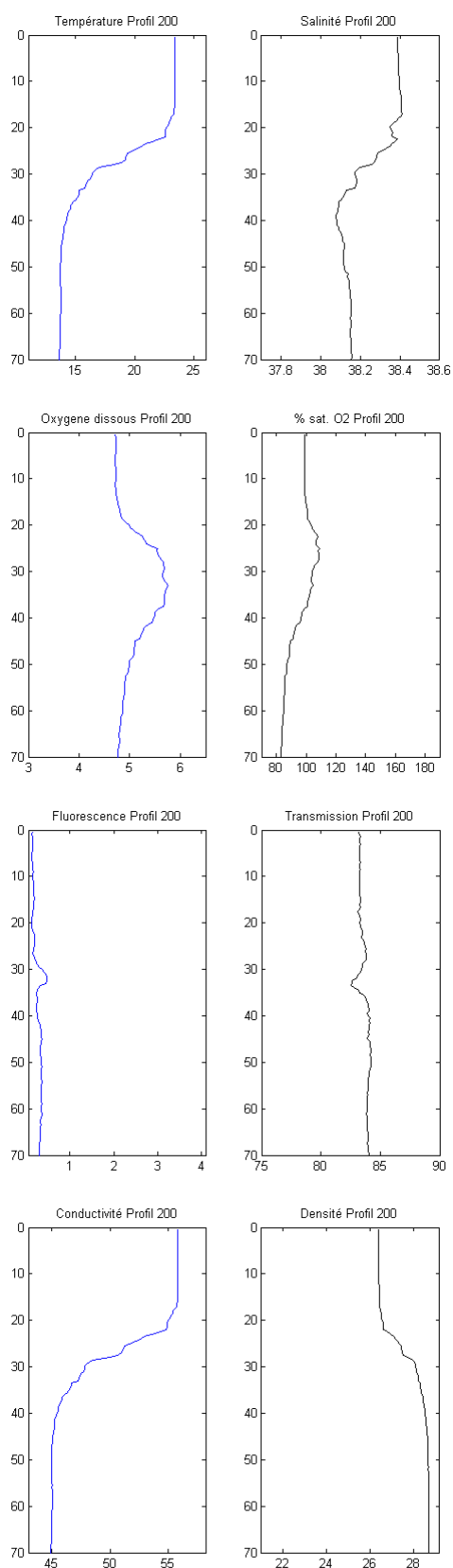
Profil 198 – Station 11



Profil 199 – Station 8

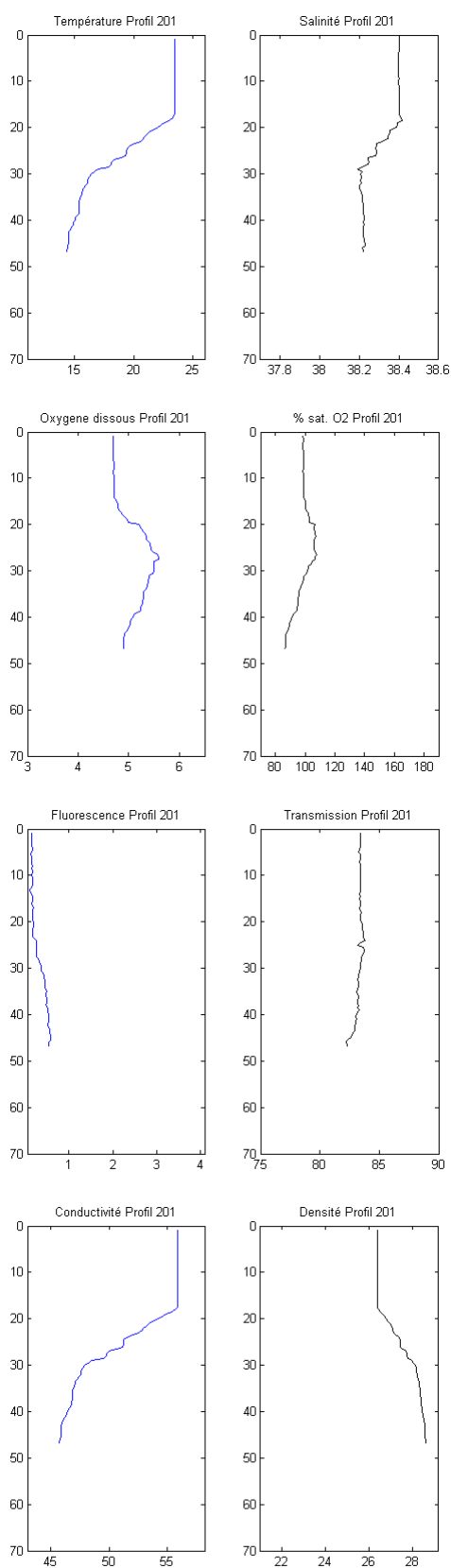


Profil 200 – Station 9

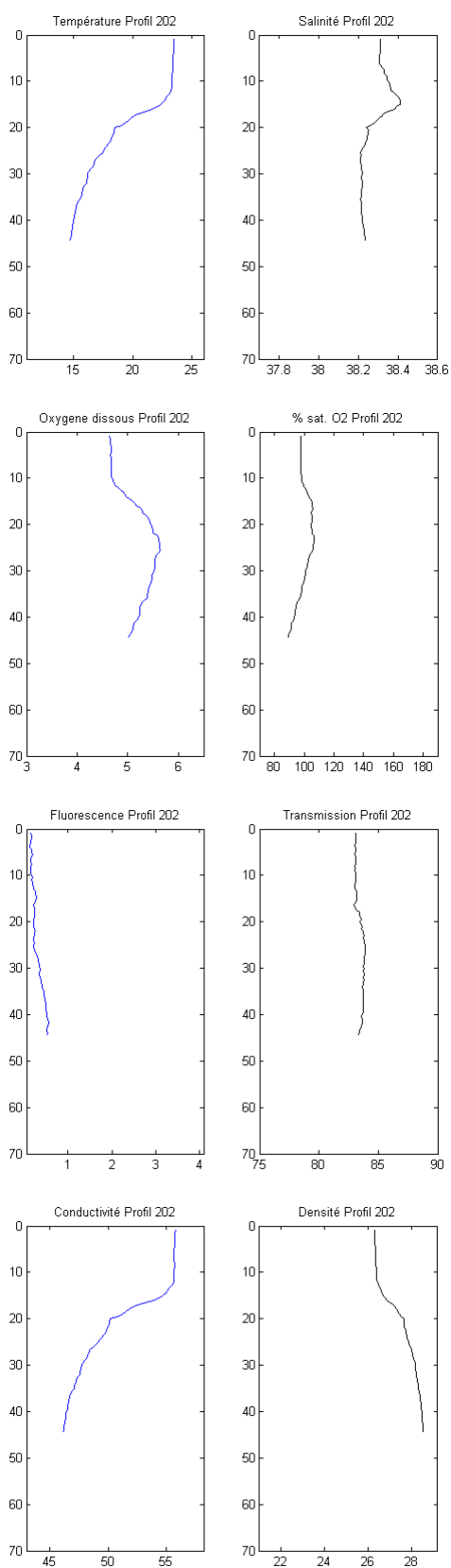


* Valeur manifestement aberrante liée sans doute à un problème instrumental et que nous avons écarté dans le traitement des données

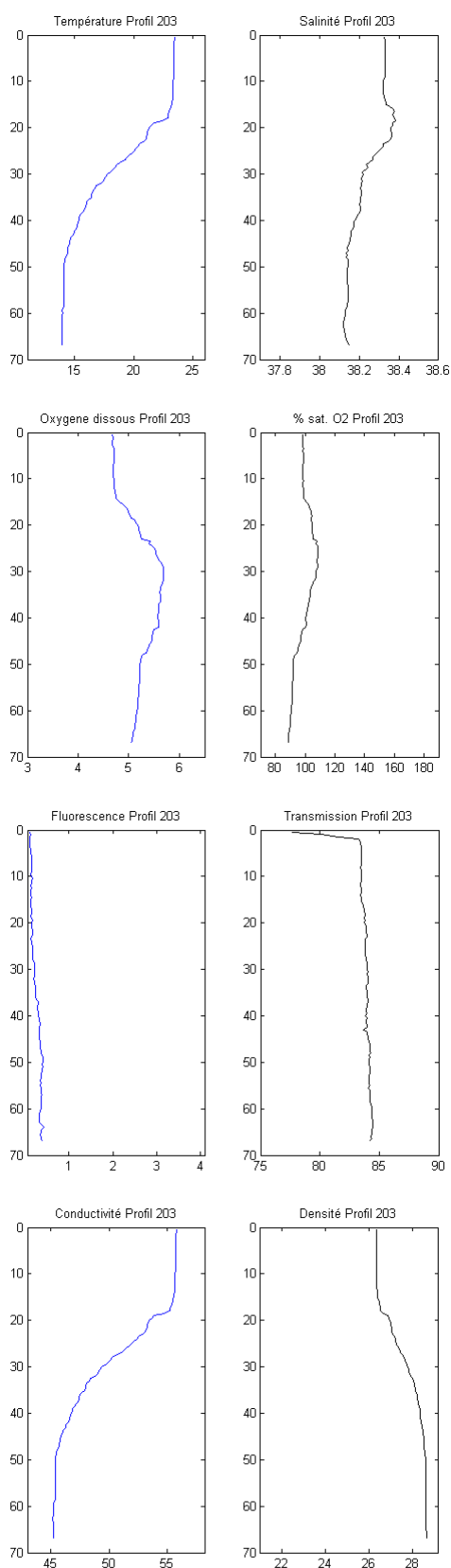
Profil 201 – Station 22



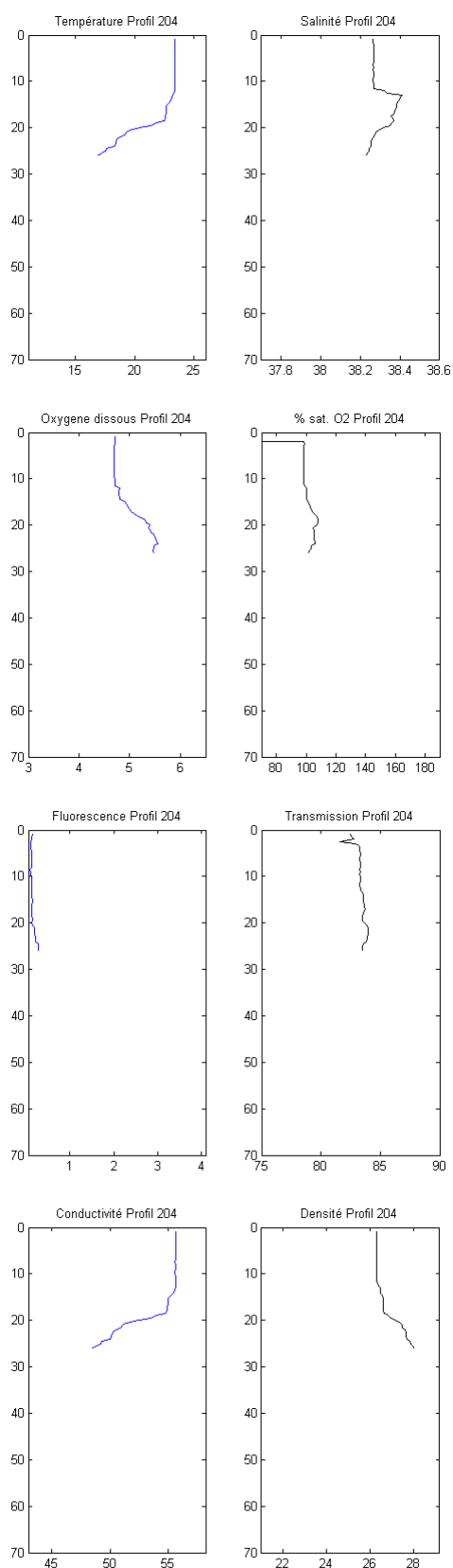
Profil 202 – Station 3



Profil 203 – Station 12

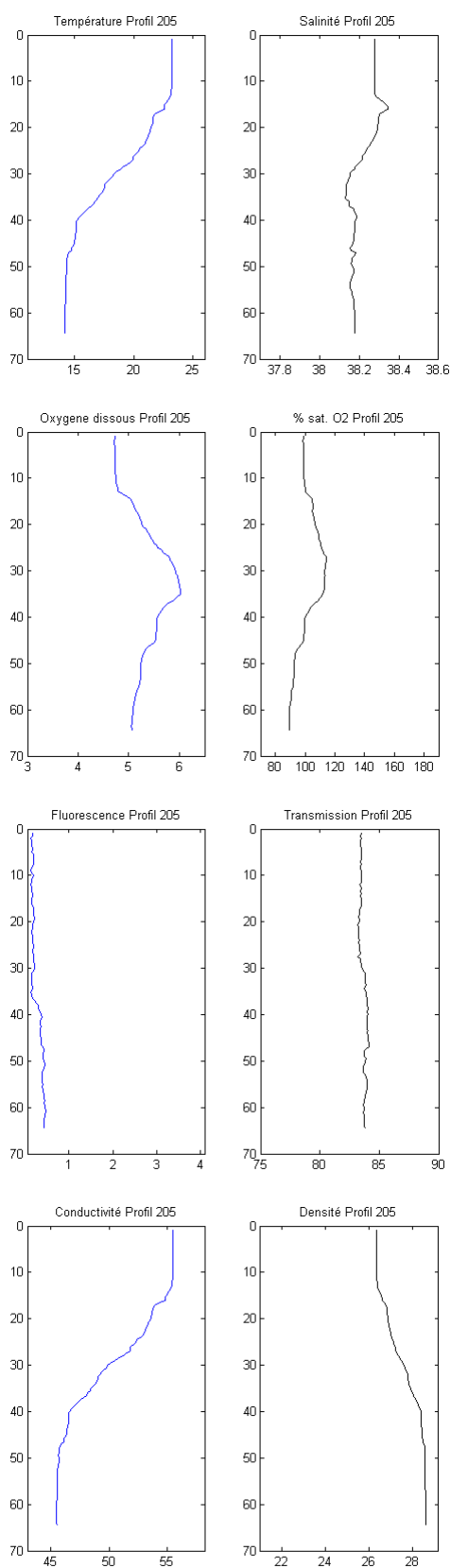


Profil 204 – Station 2

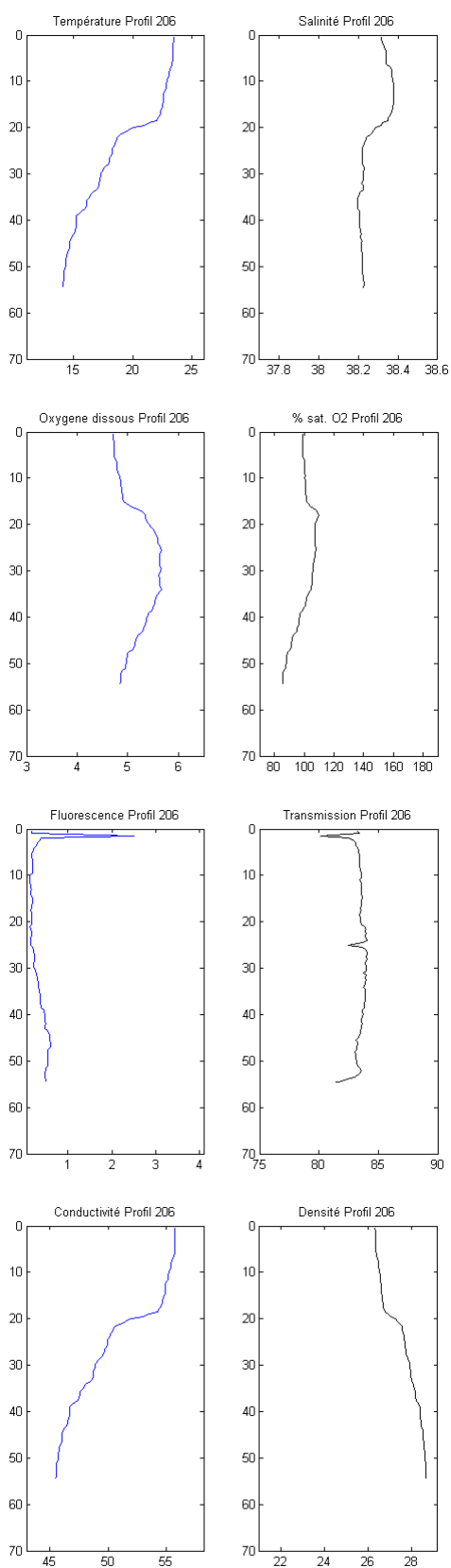


* Valeur manifestement aberrante liée sans doute à un problème instrumental et que nous avons écarté dans le traitement des données

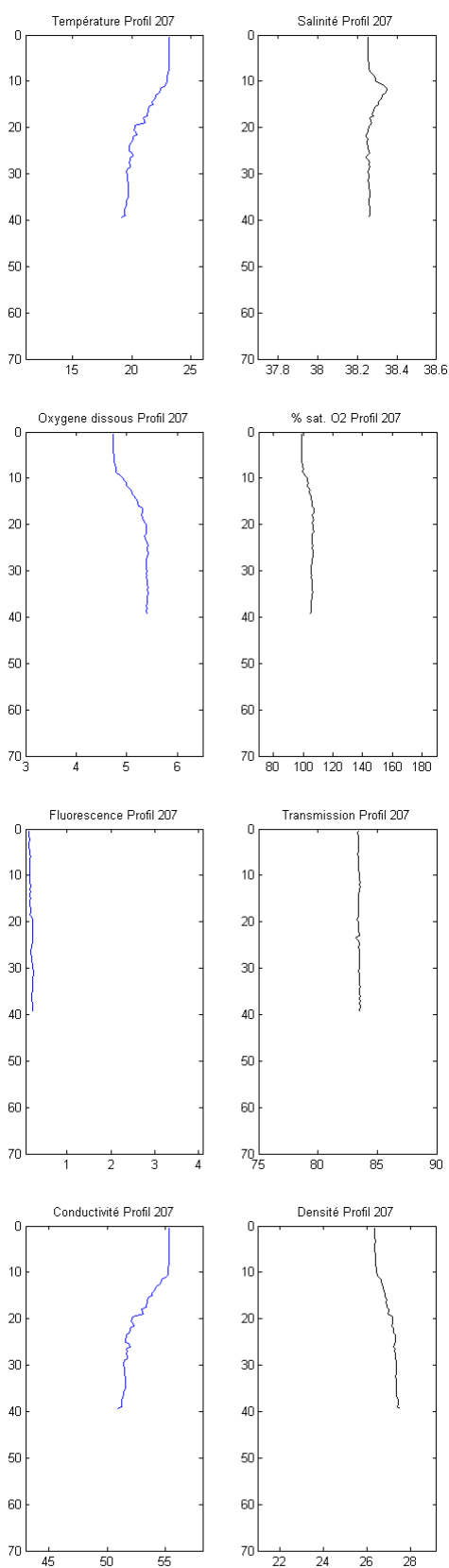
Profil 205 – Station 10



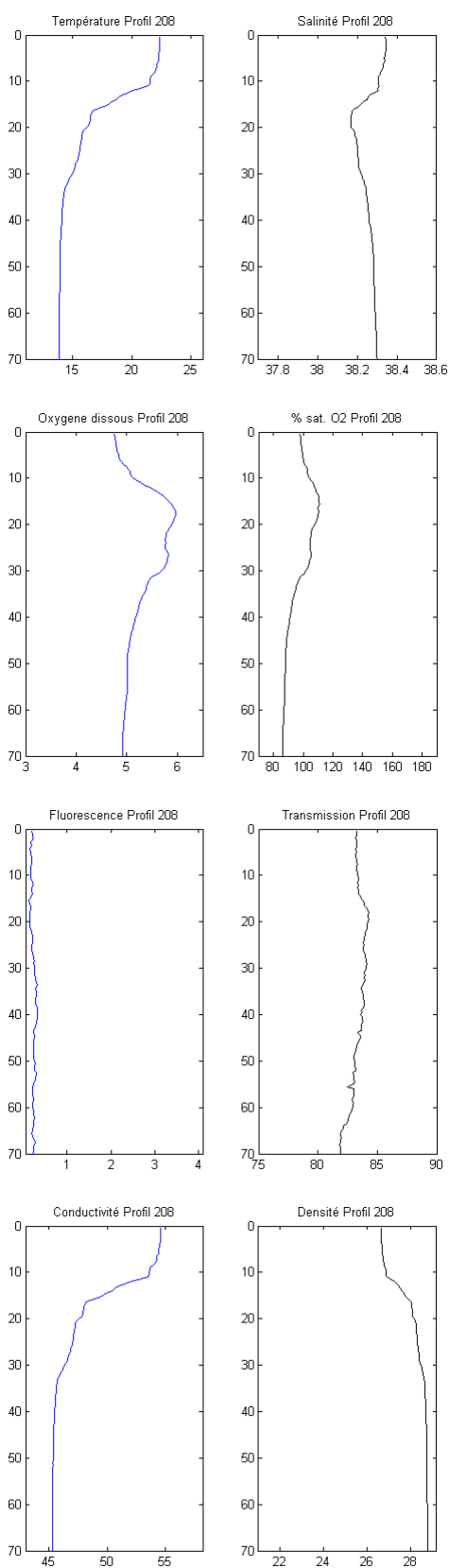
Profil 206 – Station 13



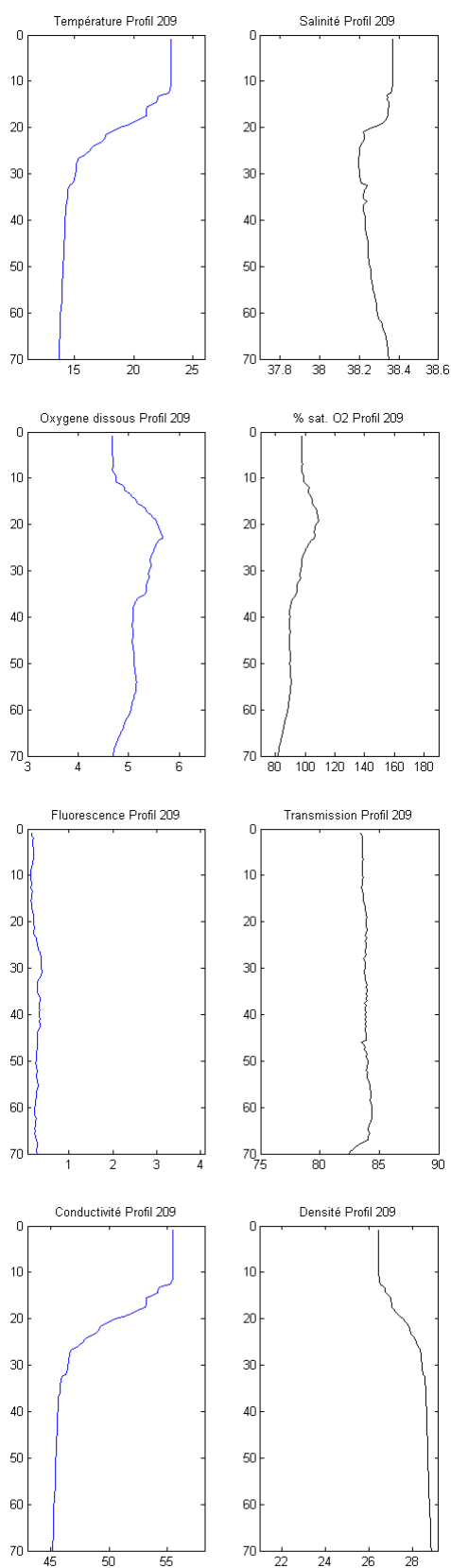
Profil 207 – Station 1



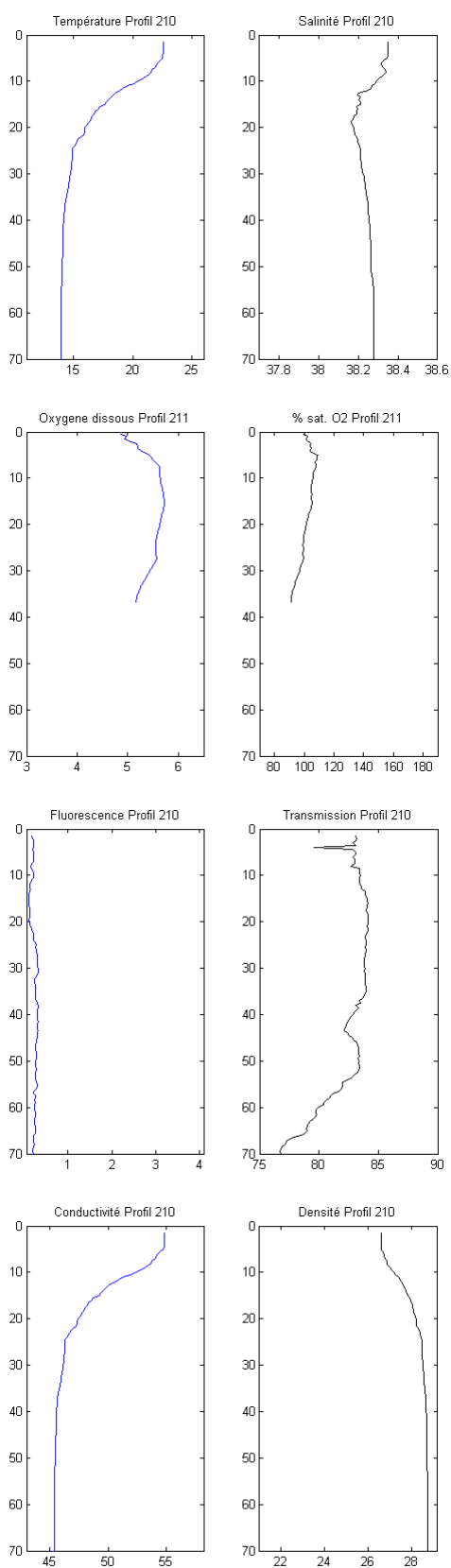
Profil 208 – Station 20



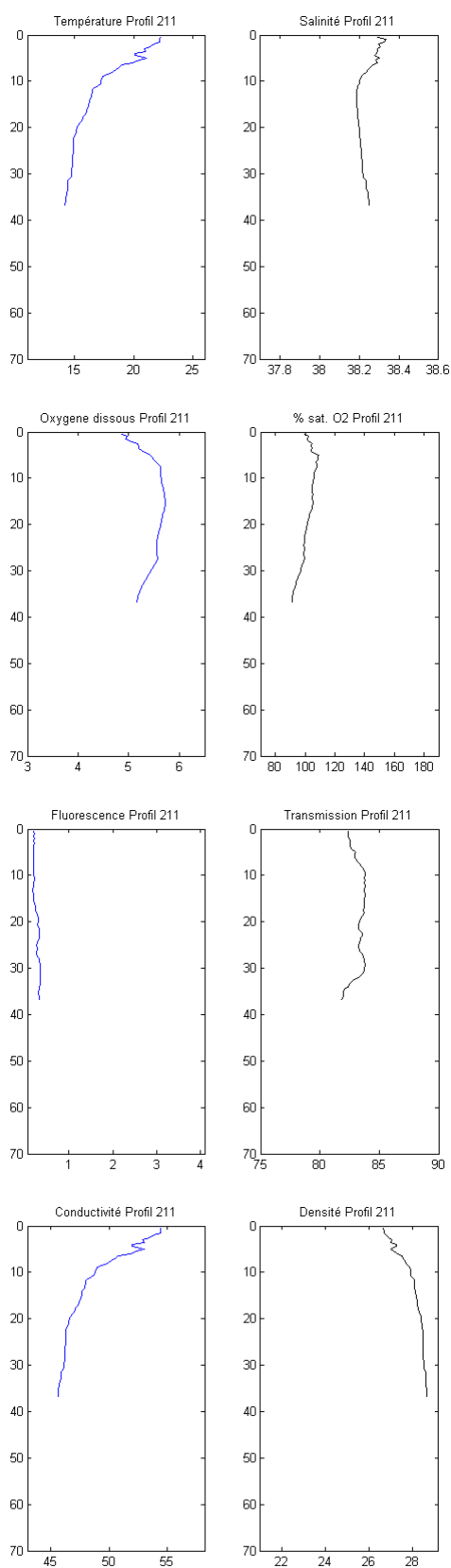
Profil 209 – Station 18



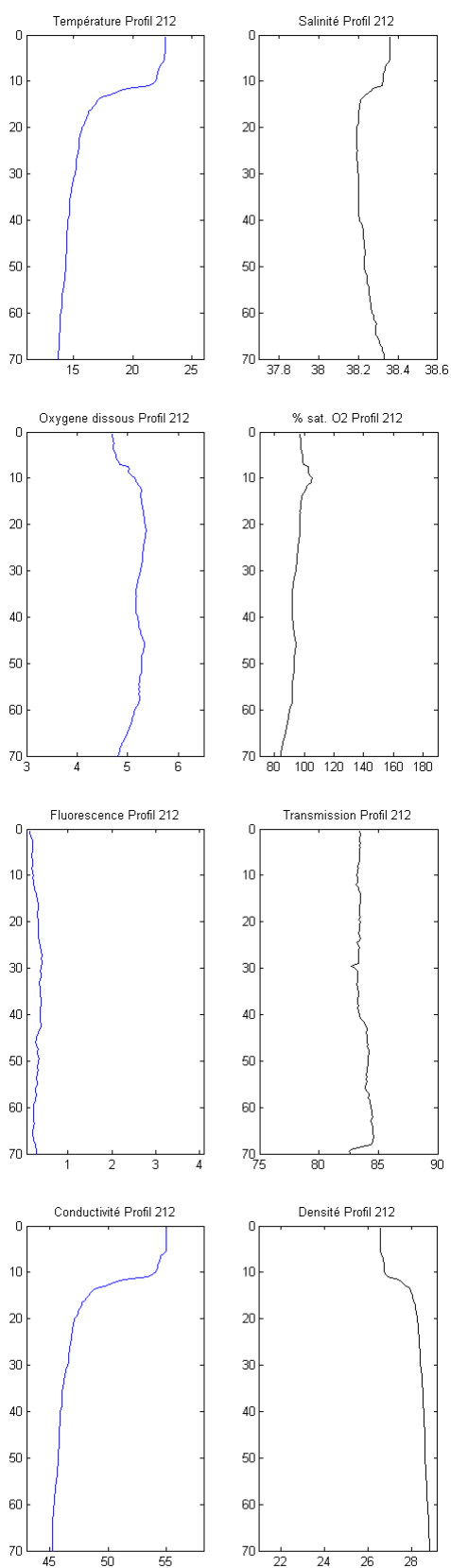
Profil 210 – Station 19



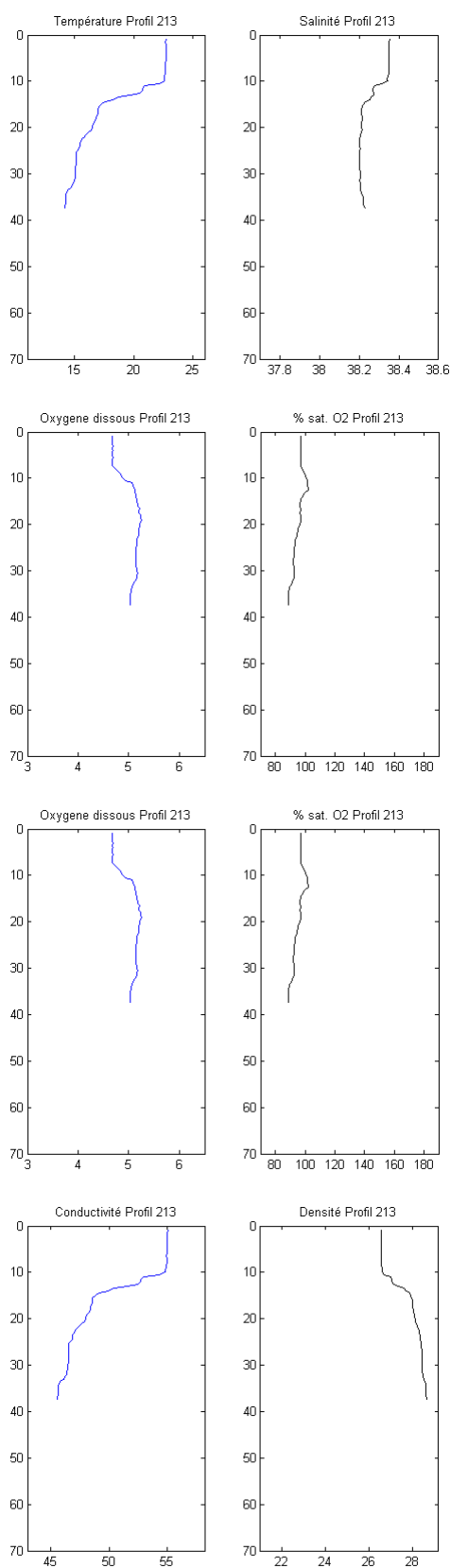
Profil 211 – Station 17



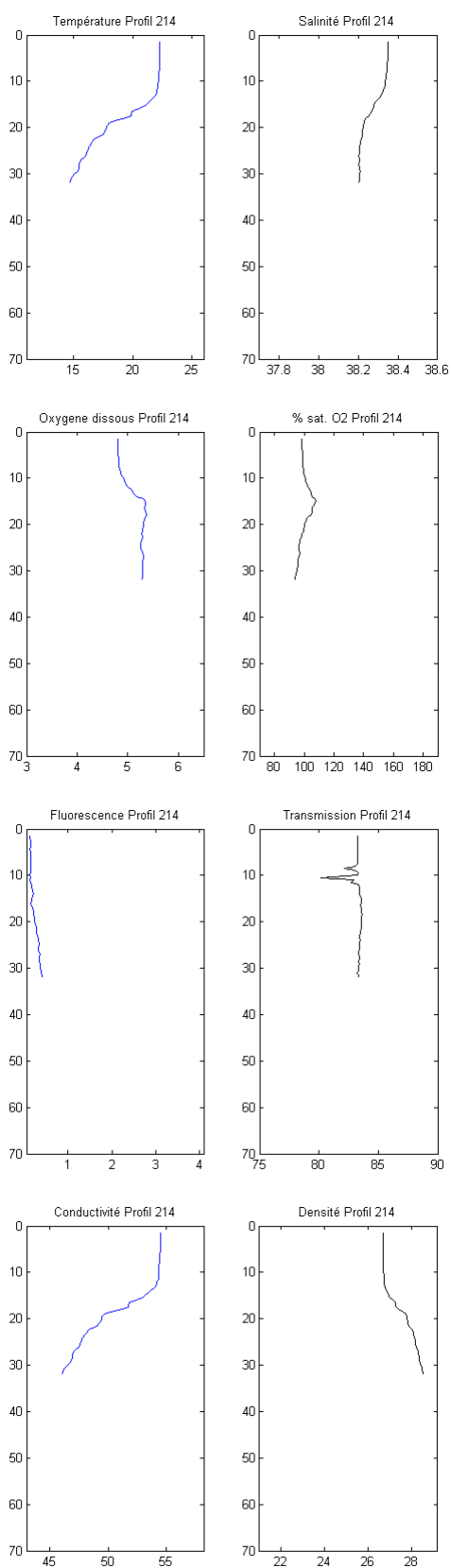
Profil 212 – Station 21



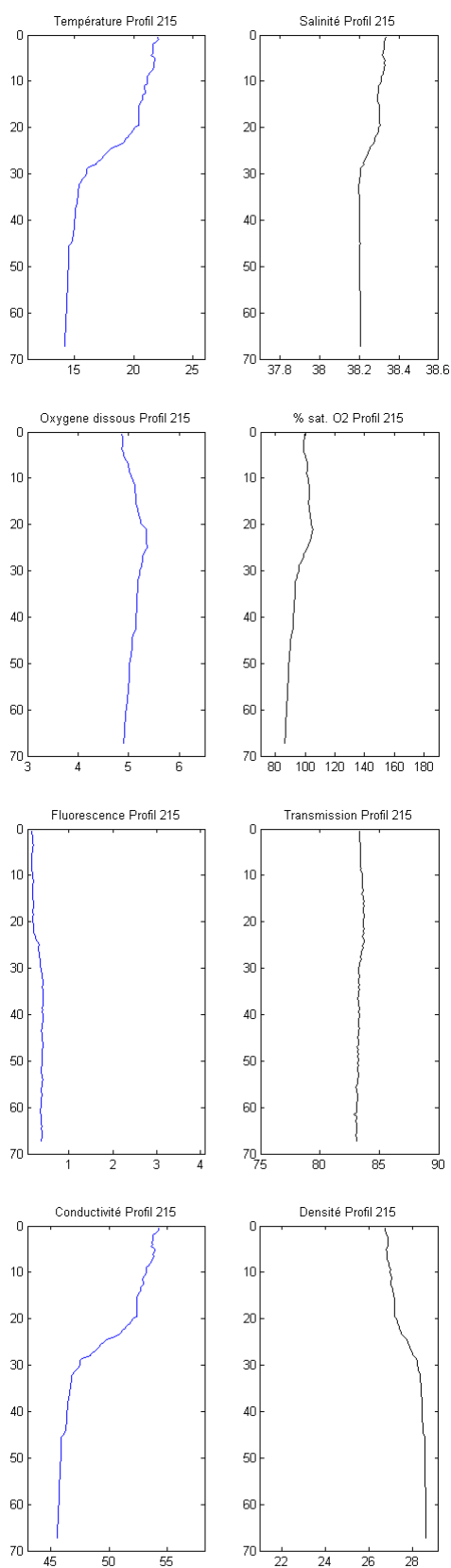
Profil 213 – Station 16



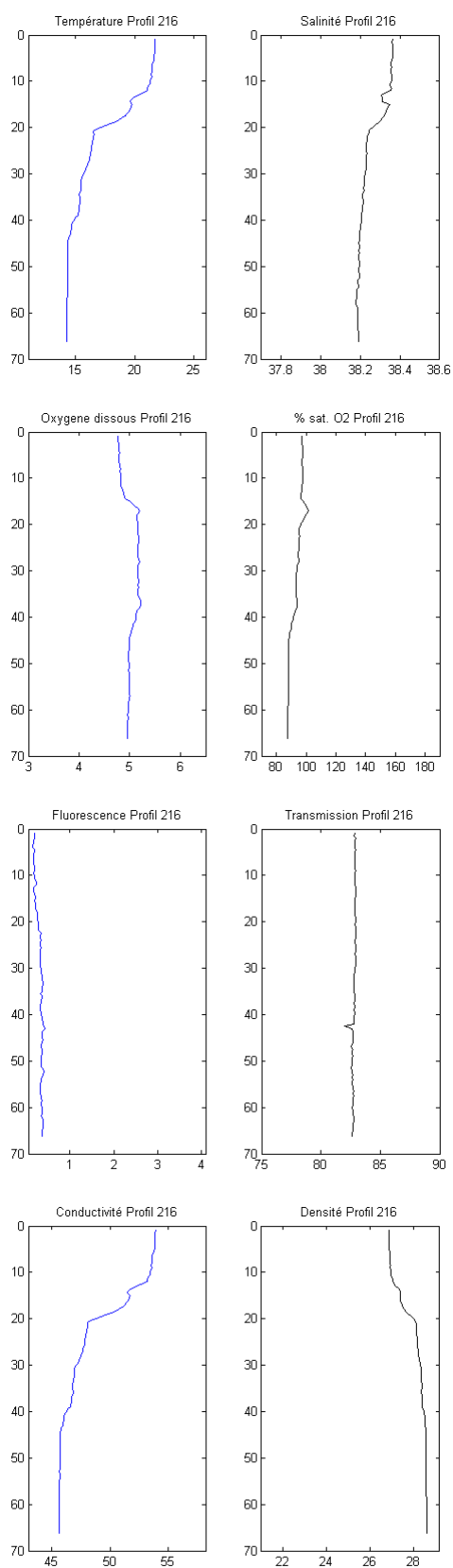
Profil 214 – Station 15



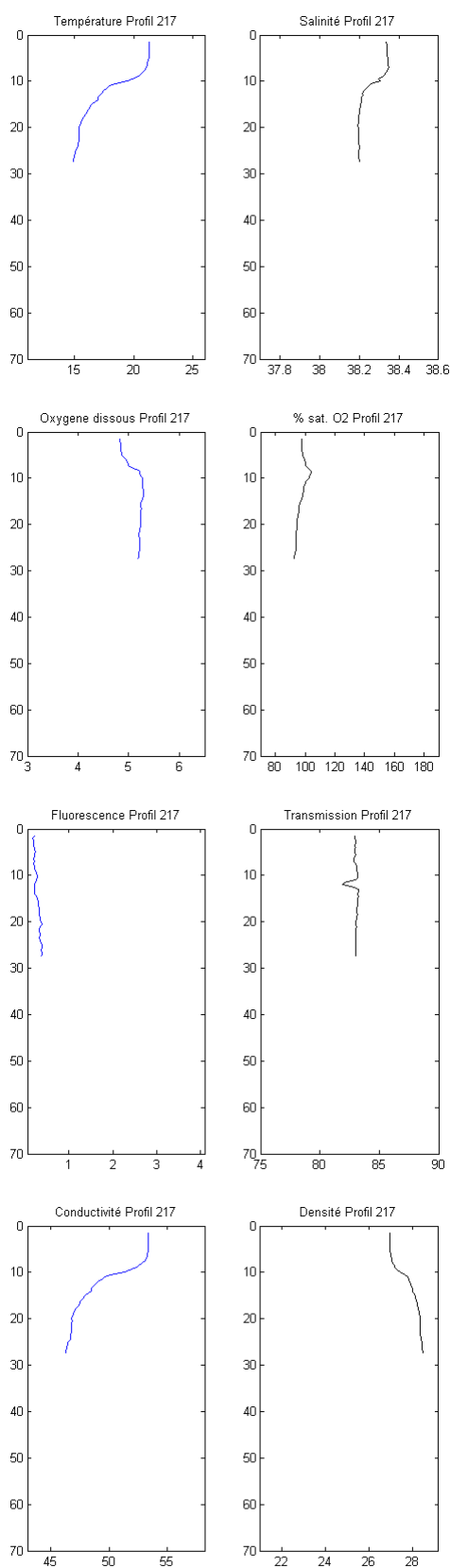
Profil 215 – Station 14



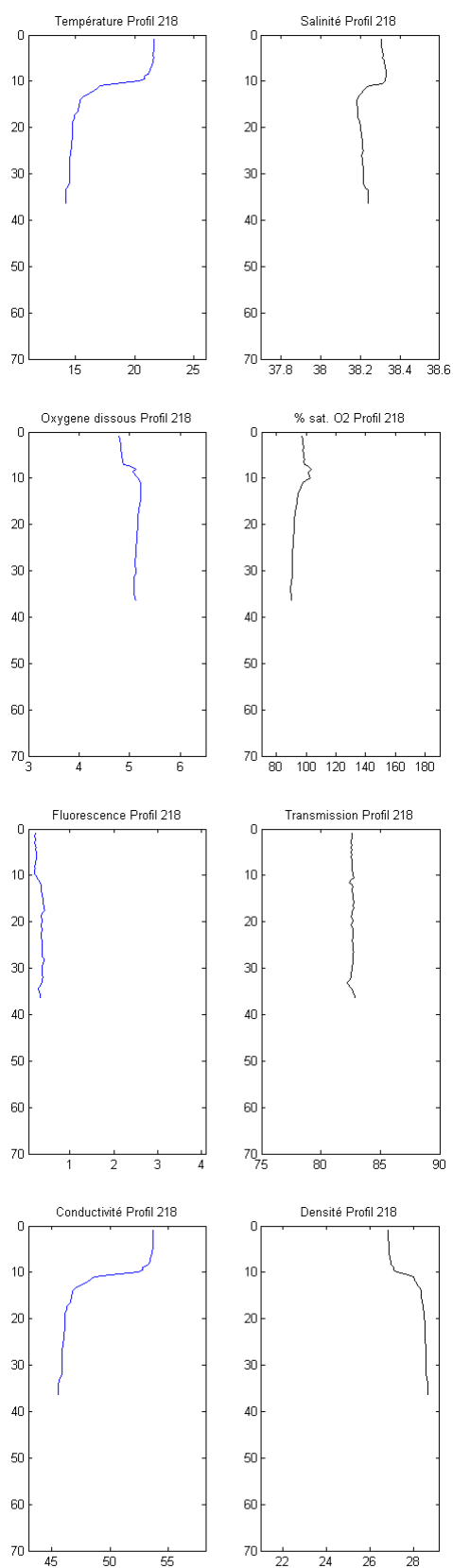
Profil 216 – Station 14



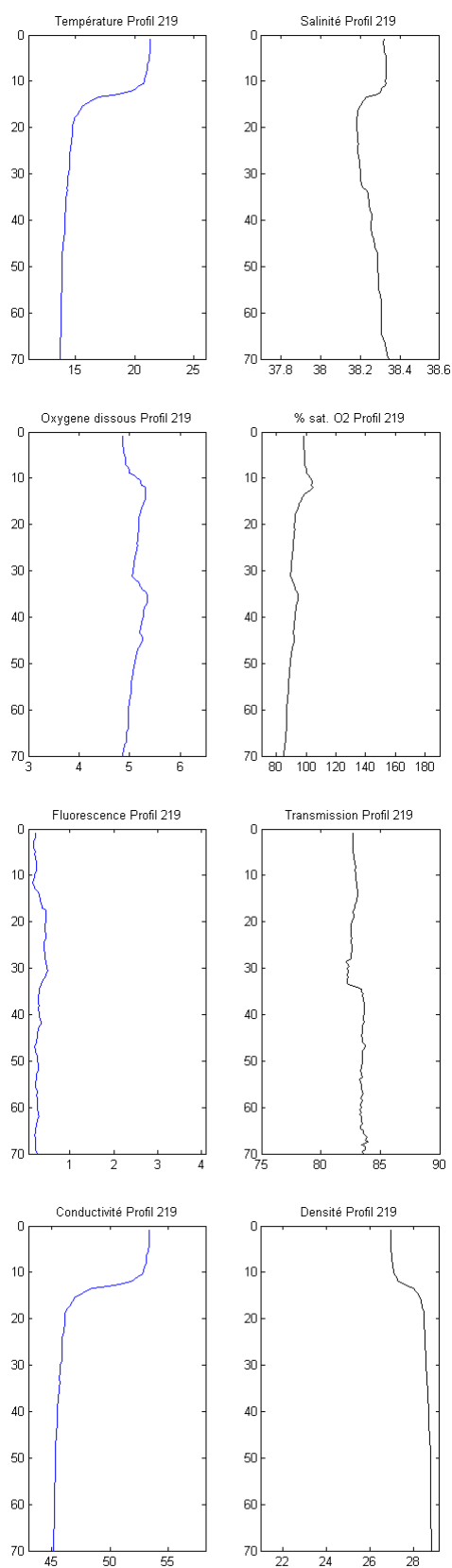
Profil 217 – Station 15



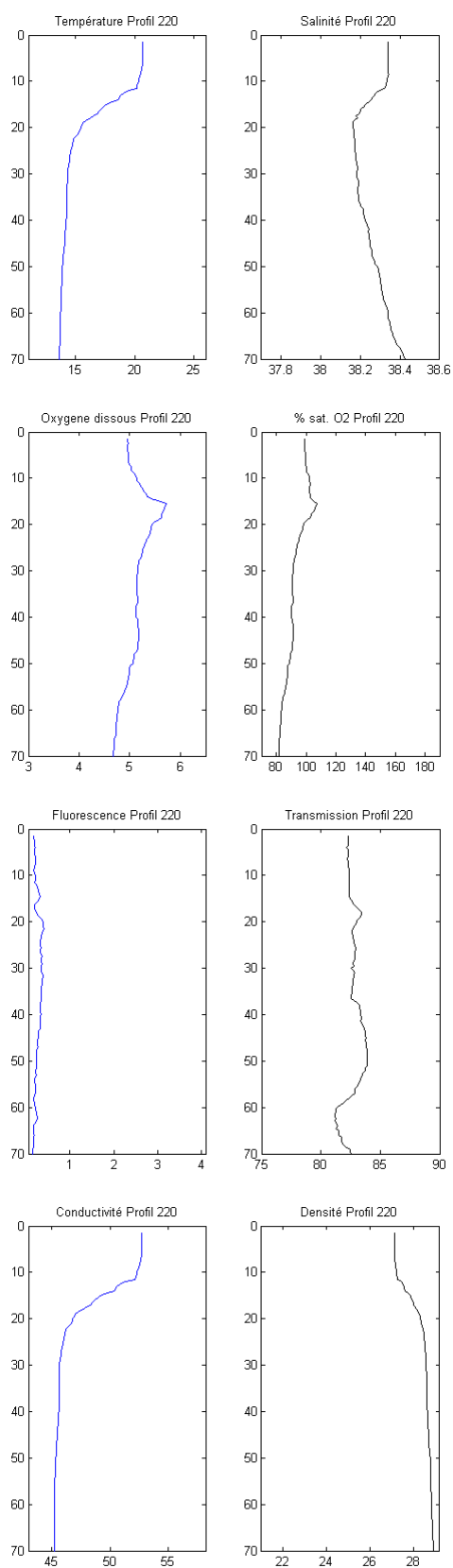
Profil 218 – Station 16



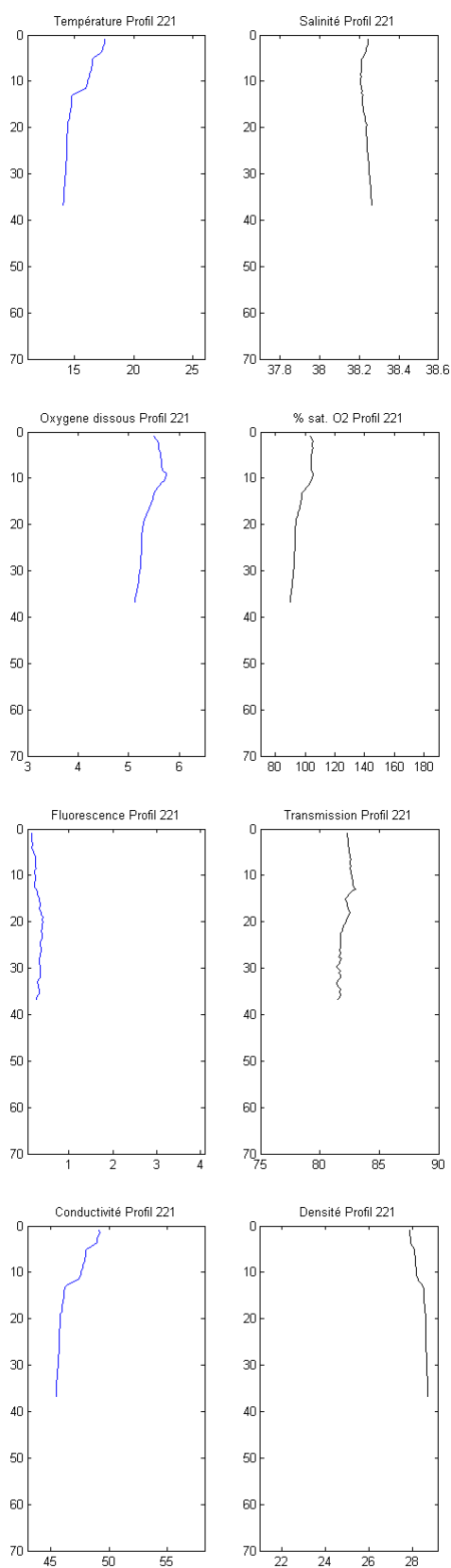
Profil 219 – Station 21



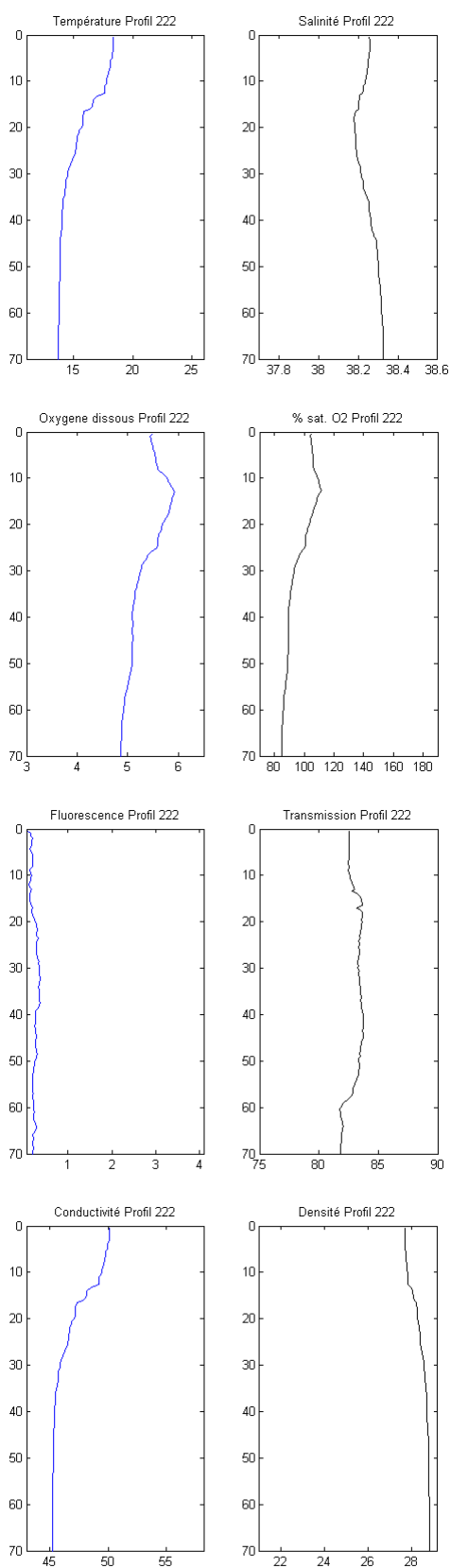
Profil 220 – Station 18



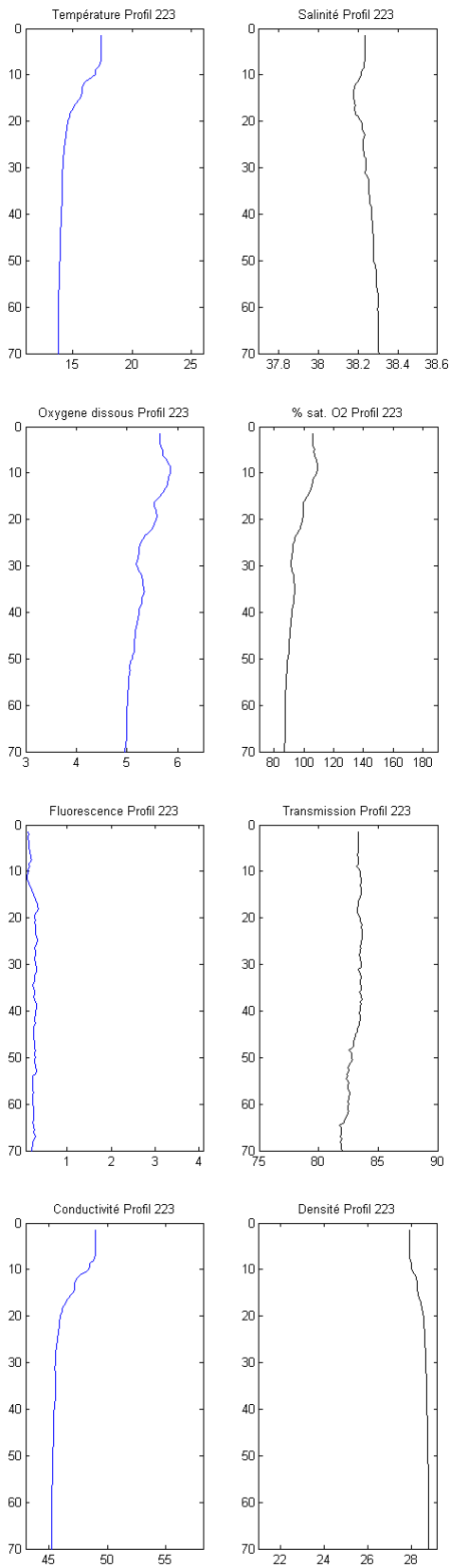
Profil 221 – Station 17



Profil 222 – Station 20



Profil 223 – Station 19



Annexe 12: The current dynamics inside the strait of Bonifacio: Impact of the wind effect in a little coast strait

Annexe 13 : methodology to build a local current map using sets of inboard ADCP data