

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Badji-Mokhtar, Annaba



Faculté des Sciences

Année 2010

Département des Sciences de la Mer

T H È S E

Présentée en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES DE LA MER

Spécialité : Environnement littoral

**ÉTUDE ÉCOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE DU MAFRAG :
DISTRIBUTION DES MASSES D'EAUX, DES MATIÈRES NUTRITIVES
MINÉRALES ET ORGANIQUES (NORD EST D'ALGÉRIE).**

Par

Ahcène HARIDI

Soutenue publiquement le :

Devant Le Jury :

Président: M. DERBAL F. (Maître de conférence A, Université Badji-Mokhtar – Annaba)

Directeur : M. OUNISSI M. (Professeur, Université Badji-Mokhtar – Annaba)

Examineurs: M. MAHMOUDI E. (Maître de conférence A, Faculté des sciences de Bizerte, Tunisie)

M. DJEBBAR Y. (Maître de conférence A, Centre Universitaire de Souk-Ahras)

M. FREHI H. (Maître de conférence A, Université Badji-Mokhtar – Annaba)

M. DJORFI S. (Maître de conférence A, Université Badji-Mokhtar – Annaba)

Résumé

L'hydrosystème du Mafrag est un estuaire temporaire de plaine côtière qui recèle des zones humides singulières en Méditerranée par le régime hydrologique et par la diversité d'entités hydrologiques (rivières, estuaires, marécages). La distribution des masses d'eaux et des nutriments a été suivie deux fois par mois en 2005 & en 2006 dans quatre stations de l'estuaire aval, alors que la distribution spatiale a fait l'objet de quatre campagnes saisonnières en 2006. Sur le plan hydrologique, on considère que la Mafrag est estuaire atypique, évoluant en phase rivière en hiver et au début du printemps, passant à la phase estuaire au printemps et au début de l'été et le cycle hydrologique se termine par une phase lagune. En phase rivière, le fort débit des rivières recule l'eau salée jusqu'à la mer et l'intrusion marine est y donc limitée au maximum à l'aval. En phase estuaire, le régime de marée semi-diurne crée un système hydrologique à deux couches très stratifiées dont la couche salée en profondeur représente près de 80% de la colonne d'eau. La phase lagune, caractérisée par la salinisation et le bon mélange des eaux, est modulée par l'importance des apports continentaux pouvant réduire sa durée à seulement quelques jours (en 2005) et à plusieurs mois en 2006. D'un point de vue chimique, la teneur des nitrates dans les eaux de surface est toujours 2 à 3 plus élevée que celle des eaux du fond, ce qui souligne l'origine continental de cet ion. Dans les stations aval, les teneurs en nutriments minéraux sont comparables et sont de l'ordre de 11-16 μM pour les nitrates NO_3^- , 10-13 μM pour l'ammonium NH_4^+ et 2-4 μM pour les phosphates PO_4^{3-} . et 50 μM pour les silicates $\text{Si}(\text{OH})_4$. L'estuaire est remarquablement riche en azote organique dissous NOD (0,25 mg.l^{-1}), indiquant l'existence d'une forte activité biologique. Cette activité est également exprimée par l'abondance du carbone organique COP (3 mg.l^{-1} C) et de la biomasse phytoplanctonique (8,82 mg.m^{-3}). La côte adjacente est donc plutôt soumise à un enrichissement organique que minéral. Enfin, même si l'estuaire reste encore propre, son régime hydrologique devrait être contrôlé de l'usage non coordonné du capital en eau.

Mots-clés : Salinité, Stratification, Azote, Phosphore, Matière organique, estuaire du Mafrag, Méditerranée.

ABSTRACT

The Mafrag hydrosystem is a coastal plain estuary temporarily open to sea in. It comprises large and unique wetlands in the Mediterranean as the hydrologic regime and the diversity of its hydrographical components. This unique pristine estuarine complex is however under large damming. The distribution of water masses and nutrients has been investigated two times per month during the period February 2005-January 2006 at four stations of the lower estuary and its tributaries (Bouamoussa and El-Kébir branches). Spatially, the sampling covered the water mass extending horizontally during four seasons cruises in 2006. Hydrologically the Mafrag is a coastal plain estuary uncommon with salt-wedge. The hydrological cycle is mainly controlled by continental inputs entertained by swamps knowing that the tide effect is limited to only one period during the year. There for, the estuary evolves in 3 hydrological phases, starting by the river phase, transiting by an estuary phase and ending by a lagoon phase when the dry season is uncommonly longer. The salt-wedge can reach 20 km a long El Kebir and can attain the anti-salt dam point built at 15 km up stream Bouamoussa in case of obstruction. Then the estuarine system expands in a very stratified system, with two layers in which the salt-water layer occupies over 80% of water column. Water masses stability remains up to 9 months where very few mixing occurs at the halocline layer thickness (50-110 cm), according to the increasing of the marine intrusion. Surface salinity varied between 0.10-20 according to the season and the deep salt-water salinity fluctuated between 28-36. Concentrations of NO_3^- in surface water were always 2-3 times higher than those of the bottom. Mean surface concentrations in all inorganic nutrients were comparable for the studied stations and mean values were in order of 11-16 μM for NO_3^- , 10-13 μM for NH_4^+ and 2-4 μM for PO_4^{3-} . Waters were remarkably rich in dissolved organic nitrogen DON (mean value 0,25 mg.l^{-1}), indicating the existence of strong biological activity. This activity is also expressed by the abundance of particulate organic carbon POC with a mean stock of 3 mg l^{-1} C. The adjacent coast seems to be highly enriched by the organic matter rather than by inorganic nutrients. Even if the Mafrag estuary still not however considered as developed, its regime should be controlled from uncoordinated dams use.

Keywords: Salinity, Stratification, Nitrogen, Phosphorus, Organic matter, Mafrag Estuary, Mediterranean Sea

7 10 2006 2005

_____ :

(4 2)
 96 15 .(34 28)
 . 50 . 11
 , "1 . 8.82 1 . 3
 . 1 . 0.25

.(¹ . 268 34.8)

,
 .

AVANT PROPOS

Aussi originelle que puisse être une thèse, elle demeure le fruit d'un travail de groupe «équipe environnement littoral» dirigé constamment par la présence de Mr Ounissi Makhlouf.

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de thèse, en la personne du professeur Ounissi Makhlouf, qui m'a suivi depuis mon DEA. Ses grandes compétences scientifiques, son attention constante, son dévouement, sa remarquable tendresse, sa simplicité et son esprit de groupe, c'est vraiment l'homme de tous les moments.

Avant tout c'est un ami de longue date «depuis les années d'Olivier», avec qui j'ai partagé des moments agréables & inoubliables.

Je remercie Monsieur DERBAL Farid (Maître de conférence, Université Badji-Mokhtar) qui fait l'honneur de présider ce Jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Monsieur MAHMOUDI Ezzeddine (Maître de conférence, Faculté de Bizerte, Tunisie), qui m'a fait l'honneur d'accepter sans hésitation de déplacer pour juger ce travail, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Monsieur DJEBBAR Youcef (Maître de conférence, Centre universitaire de Souk-Ahras), qui m'a fait l'honneur d'accepter de juger ce travail. Je le remercie d'avoir participé à ce jury.

Monsieur DJORFI Saâdane (Maître de conférence, Université Badji-Mokhtar), qui m'a fait l'honneur d'accepter de juger ce travail, sa gentillesse et son expérience dans le domaine des eaux de surface me serait certainement profitable, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Monsieur FREHI Hocine (Maître de conférence, Université Badji-Mokhtar -Annaba), qui m'a fait l'honneur d'accepter de juger ce travail. Grâce à sa spécialité d'écologie marine, ses remarques seront certainement un plus pour ce travail. Qu'il trouve ici tout mon respect.

J'adresse mes sincères remerciements à l'ensemble de l'équipe environnement littoral qui sont derrière ce travail. Sans eux, cette thèse n'aurait jamais vu le jour. Il s'agit d'une équipe de laboratoire «TAZIR Karima, DIAF Assia, BENDJEDID Radia et HADEF Hala» et une équipe de terrain «SAKER Imed, ZIOUCH Omar-Ramzi, BELBACHA Said, KHEMMAR Med Hichem et le capitaine à bord Si-Wahab»

Je remercie également Monsieur CHAAB Salah d'avoir nous aidé dans l'utilisation du logiciel cartographique pour traiter les données hydrographiques.

J'adresse mes remerciements à mes collègues qui m'ont encouragé et soutenu durant ces années: Meriem, Ibrahim, Yacine, Abdelkhalek, Abdenour, Moussa, Larbi, Rafik et autre dont je ne pourrais tous les citer, mais que chacun soit assuré de toute ma gratitude.

Mes remerciements vont également à tous les gens des secteurs qui nous ont aidé par des données et des propos en relation avec notre thématique. Il s'agit de : DHW d'El-Taref, DSA d'El-Taref, les responsables des deux unités d'exploitation de barrages (Mexna, Cheffia).

Enfin, mes sincères remerciements à ma petite famille : ma femme, mes enfants, yama, mes frères et mes sœurs pour leur soutien moral et matériel.

*A Baba el-aziz
A Walid el-habib
A Mes mères, Mama Aquila, Yama azouzza, Yama Hlima
Que Dieu les protège dans la vie ultérieure (El-Djana in chaaâllah)*

Liste des tableaux

N°	Titres	Page
1	Classification des estuaires d'après Mac-Lusky, 1993.	7
2	Différents types d'estuaires selon l'amplitude de la marée (D'après Elliot & McLusky, 2004).	11
3	Données sur les deux barrages en exploitation (d'après Mébarki, 2009).	15
4	Données sur le barrage de Bougous en cours de réalisation dans la région d'EL-Tarf (d'après DHW de Tarf, 2010).	15
5	Données morphohydrologiques des oueds Bounamoussa & El-Kébir. Débits moyens mensuels étalés sur une série de 42 ans (1946-1988). D'après Labar (2003).	16
6	Caractéristiques géographiques des stations étudiées. Les stations d'El-Kébir sont dénommées K1 à K10 et les stations de Bounamoussa sont dénommées B1 à B7. K1 = K dans le suivi bimensuel et B1 = B	21
7	Profils verticaux de salinité effectués bimensuellement entre janvier 2005 et décembre 2006. (-): profil non relevé; (+) : profil relevé. 1 à 12 les mois.	22
8	Résumé des méthodes utilisées dans l'analyse des sels nutritifs.	24
9	Caractéristiques morphométriques de la branche d'El-Kébir le 26 février 2006. R : rayon hydraulique ou largeur de la section mouillée, D : distance inter-station, Nr : nombre de relevés, Zm : profondeur moyenne, Sp : surface partielle, Qp : volume partiel.	28
10	Caractéristiques morphométriques de la branche Bounamoussa le 27 février 2006. R : rayon hydraulique ou largeur de la section mouillée, D : distance inter-station, Nr : nombre de relevés, Zm : profondeur moyenne, Sp : surface partielle, Qp : volume partiel.	29
11	Fraction d'eau douce (F%) en chaque point de l'estuaire d'El-Kébir en période de coin salé (avril 2006).	39
12	Fraction d'eau douce (F%) en chaque point de l'estuaire de Bounamoussa en période de coin salé (avril 2006).	44
13	Valeurs moyennes, intervalle de variation et fraction des différentes formes de l'azote inorganique dissous (NID) de l'estuaire El-Kébir en 2006.	67
14	Valeurs moyennes saisonnières, intervalle de variation des teneurs en phosphates (μM) et du rapport N/P dans l'estuaire d'El-Kébir en 2006. 1 : moyenne surface, 2 : moyenne fond, 3 : moyenne S+F, 4 : maximum, 5 : minimum.	70
15	Valeurs moyennes, intervalle de variation et fraction des différentes formes de l'azote inorganique dissous (NID) de l'estuaire de Bounamoussa en 2006.	73
16	Valeurs moyennes saisonnières, intervalle de variation des teneurs en phosphates (μM) et du rapport N/P dans l'estuaire de Bounamoussa en 2006. 1 : moyenne surface, 2 : moyenne fond, 3 : moyenne S+F, 4 : maximum, 5 : minimum.	76
17	Valeurs moyennes saisonnières, intervalle de variation des différentes formes de matières organiques (Chlorophylle a phytoplanctonique : Chla (mg. m^{-3}), Carbone Organique Particulaire : COP, azote organique dissous : NOD) et des Matières en Suspension : MES exprimées en mg. l^{-1} dans l'estuaire El-Kébir en 2006.	79
18	Valeurs des différentes formes de matières organiques (mg. l^{-1}) dans l'estuaire El-Kébir en 2006. Les teneurs en Chl a sont exprimées en mg. m^{-3} .	79
19	Valeurs moyennes saisonnières (mg. l^{-1}), intervalle de variation des différentes formes de matières organiques dans l'estuaire Bounamoussa en 2006. Les teneurs en Chl a sont exprimées en mg. m^{-3} .	81
20	Valeurs des différentes formes de matières organiques (mg. l^{-1}) dans l'estuaire Bounamoussa en 2006. Les teneurs en Chla sont exprimées en mg. m^{-3} .	81
21	Comparaison de l'intervalle de la variation haline dans différents estuaires dans le monde.	85
22	Teneurs en azote inorganiques dissous et en phosphates dans différents estuaires dans le monde.*Présente étude.	88
23	Valeurs moyennes du rapport N/P dans quelques cours d'eau Méditerranéens (repris et modifié de AAE, 1999).* Présente étude.	89
24	Valeurs moyennes de silicium, de l'azote et de rapport Si/N dans plusieurs rivières propres et anthropisés aux différentes périodes (Vörösmarty et al., 1998).	90
25	Valeurs moyennes de carbone organique particulaire (COP) dans plusieurs estuaires dans le monde.*Présente étude.	92
26	Valeurs moyennes de la chlorophylle a (mg. m^{-3}) dans plusieurs estuaires dans le monde.*Présente étude.	92
27	Valeurs moyennes de l'azote organique dissous (en mg. l^{-1}) quelques estuaire et Baie en Amérique (in Bianchi, 2007).*Présente étude.	92

Liste des figures

N°	Titres	Page
1	Schéma des différentes parties d'un estuaire. D'après Dalrymple et al, (1992).	6
2	Distribution des espèces biologiques selon le gradient de salinité dans les estuaires (Diagramme de Remane, 1934, in Atrill & Rundle, 2002).	8
3	Répartition verticale de la salinité dans les trois type d'estuaires : a) estuaire positif b) estuaire inverse c) estuaire neutre (D'après Elliot & McLusky, 2004)	9
4	Principaux types d'estuaires selon leurs propriétés de circulation et de distribution de masses d'eaux associées à la salinité d'état d'équilibre. a) Verticalement homogène, b) fortement stratifié, c) partiellement mélangé (D'après Dyer, 1997).	11
5	Distribution longitudinale de la salinité le long d'un estuaire bien mélangé (D'après Hubert, 2005). (1) minimum d'intrusion marine ; (2) intrusion à marée moyenne ; (3) maximum d'intrusion marine.	12
6	Contexte géographique de l'estuaire du Mafrag et de son bassin versant. ☉: Barrages ; ☊ : Limite de coin salé.	14
7	Valeurs moyennes mensuelles de la température de l'air (a), des précipitations (b), de l'évaporation (c) et de la vitesse du vent (d) au cours de la période d'étude, de septembre 2004 - septembre 2006. D'après la station météorologique des salines, Annaba.	19
8	Positionnement des stations étudiées en 2006. E : station embouchure, C : station confluence, K1-K10 : stations 1 à 10 de la branche El-Kébir, B1-B7 : stations 1-7 de la branche Bounamoussa. K1 = K dans le suivi bimensuel et B1 = B dans le suivi bimensuel.	20
9	Configuration bathymétrique de l'estuaire du Mafrag de l'embouchure jusqu'à 11 kilomètres dans la branche El-Kébir le 26 février 2006.	27
10	Configuration bathymétrique de l'estuaire du Mafrag de l'embouchure jusqu'à 7 kilomètres dans la branche Bounamoussa le 27 février 2006.	29
11	Variations des salinités de surface et de fond relevées au niveau des stations aval (2005 /2006).	31
12	Variations verticales de la température dans les stations aval (2005 en haut) & (2006 en bas): ●Hiver, ○ Printemps, ■ Eté, □ Automne.	32
13	Variations des salinités de surface et de fond relevées au niveau des stations aval (2005 /2006).	35
14 a	Distribution verticale de la salinité dans les stations aval étudiées en 2005.	36
14 b	Distribution verticale de la salinité dans les stations aval étudiées en 2006.	37
15	Distribution spatiale de salinité de surface et de fond relevée lors des quatre campagnes en 2006 dans la branche d'El-Kébir.	40
16	Distribution spatiale de la salinité entre l'embouchure et le point kilométrique 11 (Pk11) dans la branche de l'estuaire El-Kébir lors des quatre campagnes saisonnières en 2006.	41
17	Distribution verticale de la salinité dans les stations étudiées de la branche de l'estuaire El-Kébir lors des quatre campagnes saisonnières en 2006.● Hiver, ○ Printemps, ■ Eté, □ Automne.	42
18	Distribution spatiale des salinités de surface et de fond relevées lors des quatre campagnes en 2006 dans la branche Bounamoussa.	45
19	Distribution spatiale de la salinité entre l'embouchure et le point kilométrique 8 (Pk8) dans la branche de l'estuaire Bounamoussa lors des quatre campagnes saisonnières en 2006.	46
20	Distribution verticale de la salinité dans les stations étudiées de la branche de l'estuaire Bounamoussa lors des quatre campagnes saisonnières en 2006. ● Hiver, ○ Printemps, ■ Eté, □ Automne.	47
21	Variations saisonnières des teneurs en nitrates (NO ₃ ⁻) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 24 février 2005 - 31 janvier 2006.	50
22	Variations saisonnières des teneurs en nitrites (NO ₂ ⁻) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 24 février 2005 - 24 décembre 2006.	51
23	Variations saisonnières des teneurs en ammonium (NH ₄ ⁺) dans les eaux de surface du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 24 février 2005 - 24 décembre 2006.	53
24	Variations saisonnières des teneurs en phosphate (PO ₄ ³⁻) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période du 24 février 2005 au 24 décembre 2006.	55
25	Variations saisonnières des teneurs en silicate Si(OH) ₄ ⁻ dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période du 27 mars 2005 au 24 décembre 2006.	57
26	Variations saisonnières des teneurs en azote organique dissous (NOD) dans les eaux de surface du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période du 24 février 2005 au 24 décembre 2006.	59
27	Variations saisonnières des teneurs en chlorophylle a (Chl.a) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 24 février- 24 décembre 2006.	61

28	Variations saisonnières de la matière en suspension (MES) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 24 février-31 décembre 2006.	63
29	Variations saisonnières des teneurs en carbone organique particulaire (COP) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 24 février 2005 -24 décembre 2006.	64
30	Variations saisonnières des teneurs de l'azote ammoniacal et des nitrates dans la branche El-Kébir de l'estuaire du Mafrag en 2006.	68
31	Variations saisonnières des teneurs des nitrites et de l'azote inorganique dissous dans la branche El-Kébir de l'estuaire du Mafrag en 2006.	69
32	Variations saisonnières des teneurs en phosphates dans la branche El-Kébir de l'estuaire du Mafrag en 2006.	71
33	Variations saisonnières des teneurs de l'azote ammoniacal et des nitrates dans la branche Bounamoussa de l'estuaire du Mafrag en 2006.	74
34	Variations saisonnières des teneurs des nitrites et de l'azote inorganique dissous (NID) dans la branche Bounamoussa de l'estuaire du Mafrag en 2006.	75
35	Variations saisonnières des teneurs en phosphates dans la branche Bounamoussa de l'estuaire du Mafrag en 2006.	77
36	Diagramme simplifié des masses d'eau et de leur dynamique Durant la période humide (A) et la période sèche (B) dans l'estuaire en 2005.	83
37	Situation Haline saisonnière de la partie aval du complexe estuarien du Mafrag selon la classification de Venise des eaux saumâtres. L'estuaire est méso-polyhalin en été, mésohalin en automne et oligohalin en hiver et au printemps.	85
38	Diagramme $\text{Si}(\text{OH})_4$ -salinité (ou courbes de dilution) pour les eaux étudiées de l'estuaire Mafrag. A: courbe de la moyenne annuelle des valeurs de surface, B: courbe de la moyenne annuelle des valeurs de fond, C: courbe de la moyenne annuelle de surface et de fond).	87

Liste des annexes

Figures, tableaux & encadré	
Encadré I	Agriculture en chiffre.
Tableau I	Recensement sur l'activité agricole dans quelques communes (BNEDER, 1995).
Tableau II	Effectifs de bovins, ovins et caprins.
Encadré II	L'industrie dans la wilaya c'est une question de vocation.
Tableau III	Bilan d'irrigation 2008-2009 par mode d'irrigation.
Tableau IV	Valeurs d'indices de stratification relevés aux stations aval pour la période 2005-2006. It : indice de stratification des eaux selon la température ; Is : indice de stratification des eaux selon la salinité.
Figure I	Diagramme PO_4^{3-} - salinité (Courbe de dilution) pour les eaux de surface et du fond dans les stations avales.
Figure II	Diagramme NH_4^+ -salinité (Courbes de dilution) pour les eaux de surface et du fond dans les stations avales.
Figure III	Diagramme NO_3^- - salinité (Courbes de dilution) pour les eaux de surface et du fond dans les stations avales.
Figure IV	Diagramme PO_4^{3-} - salinité (Courbes de dilution spatiale) pour les eaux de surface et du fond durant les quatre campagnes saisonnières dans El-Kébir en 2006.
Figure V	Diagramme NH_4^+ - salinité (Courbes de dilution spatiale) pour les eaux de surface et du fond durant les quatre campagnes saisonnières dans El-Kébir en 2006.
Figure VI	Diagramme NO_3^- - salinité (Courbes de dilution spatiale) pour les eaux de surface et du fond durant les quatre campagnes saisonnières dans El-Kébir en 2006.
Encadré III	Le plan national hydrologique Espagnol (PHN).

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I. Généralités	5
1. Définition & classification des estuaires	5
CHAPITRE II. Matériel & méthodes	14
2. Système estuarien du Mafrag	14
2.1. Zone d'étude	14
2.2. Géomorphologie	16
2.3. Conditions météorologiques	17
2.3.1. Température atmosphérique	17
2.3.2. Précipitation et évaporation	18
2.3.3. Régime éolien	18
2. Echantillonnage et méthodes d'analyse	20
2.1. Choix des stations	20
2.2. Relevés hydrologiques	21
2.3. Relevés bathymétriques	22
• Profils transversaux	22
• Profils longitudinaux	23
• Estimation des volumes et des fractions d'eaux douce et salée	23
2.4. Sels nutritifs	24
2.5. Matières organiques	24
• Azote organique dissous	25
• Dosage de la chlorophylle <i>a</i>	25
• Matière en suspension	25
• Carbone organique particulaire	26
CHAPITRE III. Résultats	27
3. Hydrologie	27
3.1. Configuration morphologique de l'estuaire	27
3.1.1. El-Kébir	27
3.1.2. Bounamoussa	28
3.2. Masses d'eaux et salinité	29
3.2.1. Température	30
3.2.1.1. Variations saisonnières dans l'estuaire aval	30
3.2.1.2. Variations verticales dans l'estuaire aval	30
3.2.2. salinité	32
3.2.2.1. Variations saisonnières dans l'estuaire aval	32
3.2.2.2. Variations verticales dans l'estuaire aval	33
3.2.2.3. Distribution spatiale de la salinité	38
3.2.2.3.1. El-Kébir	38
3.2.2.3.2. Bounamoussa	43

4. Matières nutritives minérales & organiques	48
4.1. Variations saisonnières des sels nutritifs dans l'estuaire aval	48
4.1.1. Nitrates	48
4.1.2. Nitrites	49
4.1.3. Ammonium	52
4.1.4. Phosphates	54
4.1.5. Silicates	56
4.2. Variations saisonnières des matières organiques dans l'estuaire aval	58
4.2.1. Azote organique dissous	58
4.2.2. Chlorophylle <i>a</i>	60
4.2.3. Carbone organique particulaire & matières en suspension	62
4.3. Variations spatiales des sels nutritifs	65
4.3.1. El-Kébir	65
4.3.1.1. Azote Minéral	65
4.3.1.2. Phosphore	70
4.3.2. Bounamoussa	72
4.3.2.1. Azote minéral	72
4.3.2.2. Phosphore	76
4.4. Variations spatiales des matières organiques	78
4.4.1. El-Kébir	78
4.4.2. Bounamoussa	80
Discussion	82
conclusions	95
Résumés	96
Références bibliographiques	99
Annexes	107

INTRODUCTION

Les estuaires et la plate forme continentale occupent jusqu'à 5,2 % de la surface de la terre et 2% du volume de l'océan mondial. Cependant, ils supportent d'importantes activités économiques : construction de barrages en aval, pêche, aquaculture, extraction de sédiments, navigation et transport. Les estuaires sont ainsi soumis à de fortes pressions anthropiques directe et indirecte. Actuellement, environ de 60% de la population mondiale vivent le long des estuaires et de la côte (Wolanski, 2007). En dépit de ces perturbations, la relation directe entre les apports hydriques de nutriments fluviaux et la productivité biologique des écosystèmes marins est universellement bien établi (Budgen *et al.*, 1982; Estrada, 1996; Tsai *et al.*, 1997 ; Daskalov, 1999). Ainsi, la construction du barrage d'Assouan sur le Nil a eu de graves conséquences sur la production côtière pélagique et démersale. Wahby & Bishara (1981) rapportent que le débarquement des sardines a diminué de 95% (passant de 18 000 tonnes en 1962 à seulement 400 tonnes en 1968 et 600 tonnes en 1969) et les prises de crevettes ont connues une baisse dramatique. Dans le même contexte, Postel *et al.* (1998) rapportent que la diminution des prises de poissons est la conséquence de la réduction des apports du fleuve à la mer. De même, Deegan *et al.* (1986) montrent que dans le golfe du Mexique, les mises à terres de poissons sont directement corrélées à la surface des estuaires et au débit des fleuves. S'ils constituent la source majeure de fertilisation et production des mers, les estuaires sont également le siège de la plus forte productivité des écosystèmes formant environ 1,2% de la production mondiale terrestre et marine alors qu'ils représentent en espace seulement 0,3%.

De plus, les milieux estuariens offrent des potentialités unique au profit de l'homme : ils entretiennent la santé des écosystèmes par le piégeage des contaminants dans leurs sédiments (Ridgway & Shimmield, 2002) alors qu'ils accueillent les poissons marins et les oiseaux migrateurs et leurs offrent les meilleurs conditions de fraye et de nourriture.

On constate qu'au gradient de salinité, qui caractérise les estuaires, se superposent une large variété d'habitats pour les populations marines, saumâtres et dulçaquicoles (Attrill & Rundle, 2002). Ce sont des zones de transition entre le continent et la mer formant ainsi des écosystèmes aquatiques particuliers, caractérisés par d'intenses processus d'échanges et de transformations chimiques, physiques et biologiques (Telesh, 2004) et

constituent ainsi de véritables zones « filtres » (Lisitzin, 1999). Ces zones agissent comme filtres de piégeage et de transformations chimiques et biologiques des matières en transit. En ce sens, les estuaires fonctionnent comme de véritables zones tampons entre le fleuve et la mer.

Dans les pays tempérés industrialisés (Europe et Amérique du Nord), les estuaires et les eaux de surface plus généralement connaissent de véritables problèmes de pollutions chimiques issues d'activités agricoles et industrielles (Miller, 1983 ; Conley *et al.*, 2000; Okapian *et al.*, 2002 ; Seirra *et al.*, 2002 ; Tappin, 2002 ; Domingues *et al.*, 2005). La directive européenne sur l'eau du 23 octobre 2000 (Dir. 2000/60/CE) vient en tant qu'outil juridique pour faire face à cette situation de dégradation des eaux de surface. Les effets les plus néfastes que sévissent plusieurs estuaires dans le monde c'est l'enrichissement exagéré des eaux par les sels nutritifs Howarth *et al.* (2000). En effet, le long des côtes d'Amérique du Nord Bricker *et al.* (1999) recensent quarante quatre estuaires diagnostiqués en tant que milieux fortement eutrophisés. Dans le même contexte d'idée, Billen *et al.* (2001) soulignent comme conclusion sur le programme Seine aval que durant les cinquante dernières années les teneurs en nitrate et en phosphate ont augmentés respectivement d'un facteur de 5 et 3.

La connaissance de ces environnements écotones (Attrill & Rundle, 2002) suppose un suivi continu dans le temps et dans l'espace des paramètres hydrologiques entre le continent et l'effet de la marée (Hardisty, 2007). Toutefois, il faut signaler que la qualité des eaux dans ces milieux vulnérables ainsi que leurs cycles biogéochimiques sont liés dans une large mesure à la forte variabilité hydrologique et l'importance de l'anthropisation du bassin versant (Elliot & McLusky, 2002).

Sur un autre plan, les estuaires ont fait l'objet de nombreuses études par suite de la variété des problèmes qui s'y posent de différents points de vue : dynamique (marée), physico-chimique (mélange d'eau douce et salée), sédimentologique (dépôt de vases, ensablement), biologique, par suite de leur faune euryhaline, et pratique pour finir, puisque beaucoup d'estuaires servent de grands ports, fluviaux et marins. La géographie comme critère essentiel a fait que les auteurs des deux façades atlantiques qui sont d'origine anglophone ont contribué amplement dans le domaine de la recherche sur les estuaires. En Angleterre par exemple, et dès le début de siècle, la Tamise et le Tees ont fait l'objet des recherches pionnières sur les estuaires. Aussi, d'importants travaux

ont été réalisés en Amérique par les canadiens sur le Saint-Laurent, le Hudson, la baie de Chesapeake et le Mississipi par Russel, Moore, Shepard et d'autres. De même, l'Université de Delaware a créé un Institut pour la recherche sur les estuaires, en publiant une revue spécialisée qui prend le nom de la baie « Chesapeake » et qui devient ultérieurement « Estuaries ». En France, les recherches furent particulièrement développées par Bourcart et ses élèves : la Seine par Rajcevic, la Rance par Morales, la Gironde par Glangeaud, la Vilaine par Rivière et la Loire par Berthois. Les Hollandais et la lutte qu'ils mènent depuis des siècles pour gagner des terres sur la mer ont en grande partie fait développé le domaine de la sédimentologie dans les estuaires.

Dans la région méditerranéenne, ces hydrosystèmes sont considérés comme fleuves à marée et sont donc peu connus sous la vocation d'estuaire. Dans un contexte local, les estuaires d'Algérie sont très peu connus, seulement deux ont été très récemment explorés : Pauc (1989 & 2003) pour l'estuaire du Mazafran et Khélifi-Touhami *et al.* (2006) pour l'estuaire du Mafrag. Si l'estuaire du Mazafran avait été bien documenté sur le plan de l'intrusion marine et du comportement de la matière en suspension, les sels nutritifs et la biomasse phytoplanctonique n'ont jamais été considérées dans ces études. Il est à souligner que la totalité de travaux et études portant sur la Mafrag, voire sa plaine, s'attachent essentiellement à d'autres problématiques et contextes, toute en traitant l'estuaire comme une rivière. On cite à ce titre les travaux de De-Bellair (1987) et Labar (2003). La Mafrag en tant que estuaire, mentionné pour la première fois par Khélifi-Touhami *et al.* (2006), et avec ses multiples intérêts scientifiques, environnementaux et socio-économique va fournir certainement un nouveau champs d'investigation pour les scientifiques de la région dont la méconnaissance de ce genre de milieux et l'actuel constat qui se concrète.

La présente étude s'insère dans le cadre d'un programme de surveillance environnementale portant sur le transfert de matières des bassins seyhouse/Mafrag au littoral (projets de recherche : F3101/04/05 MESRS ; F01120070008 MESRS ; South European Seas Assessment and Modelling Ecosystem changes 2006/2009) et tente d'étudier l'hydrologie et l'importance des rivières-estuaires dans le fonctionnement du système estuarien du Mafrag. Elle se focalise sur la dynamique de charge en sels nutritifs et en matières

organiques dissoute et particulaire dans les sites étudiés en relation avec le régime hydrologique.

Ce manuscrit est structuré en trois chapitres dont le premier strictement documentaire forme un essai de synthèse sur les milieux estuariens. Le deuxième chapitre décrit les sites étudiés et les méthodes d'échantillonnage et d'analyses chimiques. Le troisième chapitre expose les résultats d'hydrologie et d'analyses des matières nutritives minérales et organiques. La thèse s'achève par une discussion approfondie des résultats et une conclusion générale.

CHAPITRE II. MATERIEL & METHODES

2. Le système estuarien du Mafrag

2.1. Zone d'étude

Les principales caractéristiques géographiques, océanographiques, hydrologiques et chimiques de l'estuaire du Mafrag sont consignées dans la publication de Khélifi-Touhami *et al.* (2006) insérée à la fin de ce chapitre.

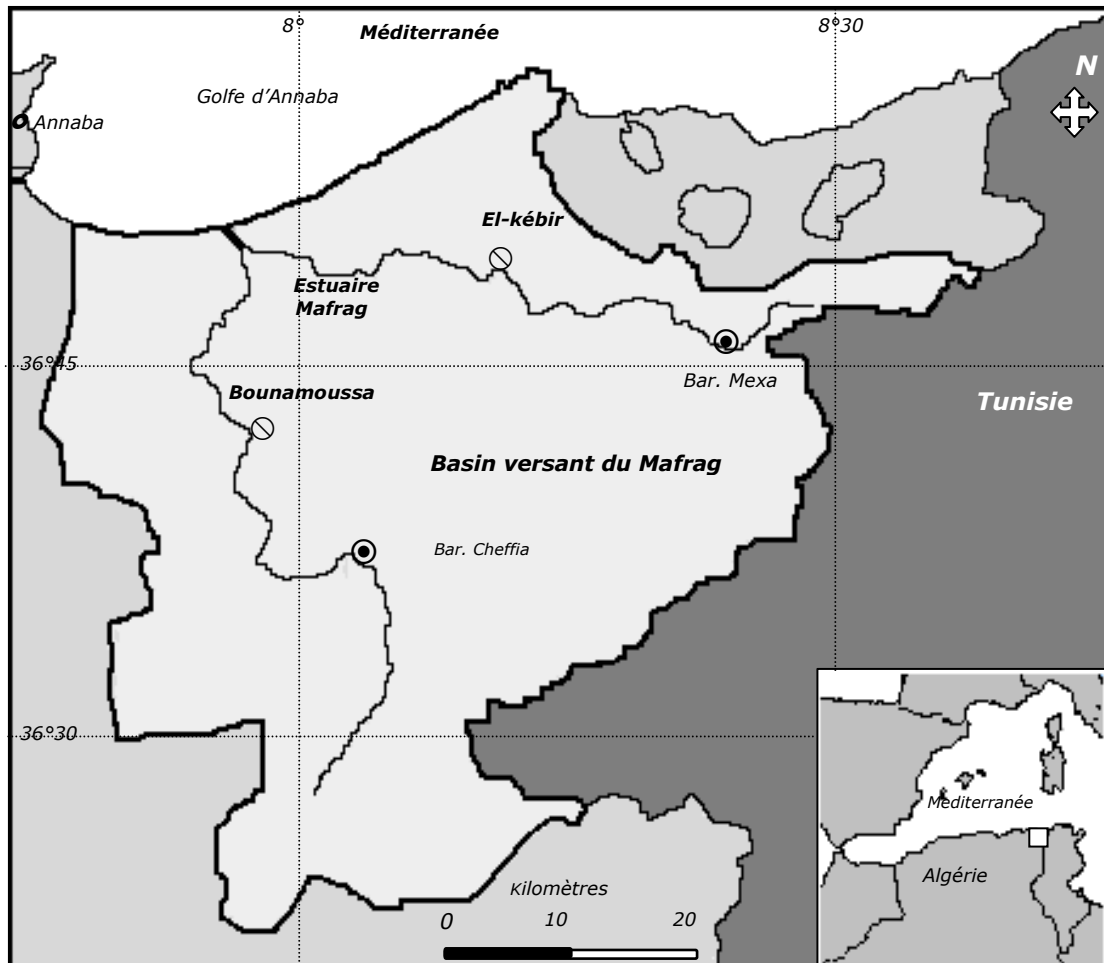


Figure 6. Contexte géographique de l'estuaire du Mafrag et de son bassin versant. ● : Barrages ; ⊖ : Limite de coin salé.

Le bassin de la vallée Mafrag est aménagé en amont par deux ouvrages de rétention (fig.6). Il s'agit des barrages Cheffia et Mexa (tab. 3), construits respectivement sur Bounamoussa et El-Kébir. Un autre barrage est actuellement en construction au sud de Mexa dans le sous-bassin d'El-Kébir (tab. 4), c'est le barrage de Bougous. L'ensemble des systèmes de régulation devrait aboutir à une artificialisation du cycle hydrologique de l'estuaire. Il est à signaler qu'au

niveau de la branche Bounamoussa existe un barrage seuil juste au pont de Ben-Mhidi empêchant la remontée des eaux salées.

Tableau 3. Données sur les deux barrages en exploitation (d'après Mébarki, 2009). AEP : Alimentation en eau potable ; IND : Industrie ; IRR : Irrigation.

Caractéristiques	Barrage Mexa	Barrage Cheffia
Bassin versant	680 Km ²	575 Km ²
Wilaya	El-Tarf	El-Tarf
Oueds	Kébir-Est	Bounamoussa
Année de mise en eau	1999	1965
Capacité initiale en Hm ³	51	171
Capacité estimée en 1986 Hm ³	//	168,4
Volume régularisé en 2006 Hm ³	42	101
Destination	AEP (Annaba & El-Tarf)	AEP ; IND ; IRR

Tableau 4. Données sur le barrage de Bougous en cours de réalisation dans la région d'El-Tarf (d'après la direction d'hydraulique de la wilaya d'El-Tarf, 2010).

Non du Barrage	Capacité en Hm³	Volume régularisable Hm³/an	Destination
Bougous	63.3	34.51	AEP

Les études de Labar (2003) donnent une description hydrologique complète des rivières tributaires de l'estuaire (tab. 5). Les débits estimés à l'aval des barrages sur 42 ans sont de l'ordre de 7 et 5 m³. s⁻¹ respectivement pour El-Kébir et Bounamoussa. Il est important de remarquer que le coefficient d'écoulement est de l'ordre du 30-37%. Ces études n'ont malheureusement pas considéré la partie estuarienne représentant en longueur plus de 25% du parcours des rivières-estuaires.

Sur le plan socio-économique le bassin versant de la Mafrag est moyennement peuplé (353 686 habitants), caractérisé par la présence des activités rurales. Il s'agit principalement de l'agriculture et l'élevage. L'agriculture y est essentiellement intensive dont l'irrigation est assurée en grande partie par les rivières tributaires de l'estuaire. L'industrie dans la région se limite à de petites usines agro-alimentaires (tableaux I, II & III ; encadré I & II en annexe).

Tableau 5. Données morphohydrologiques des oueds Bounamoussa & El-Kébir. Débits moyens mensuels étalés sur une série de 42 ans (1946-1988). D'après Labar (2003).

Paramètres	El-Kébir	Bounamoussa
Débit (Qm ³ /s)	6,71	4,45
Superficie (K m ²)	1740	1158
Précipitation P (mm)	792,70	722,71
Apport Max. mensuel V (Hm ³)	40,99	24,52
Apport Min. mensuel V (Hm ³)	0,20	1,86
Apport Moyen annuel V (Hm ³)	210,05	139,75
Déficit D (mm)	499,02	504,84
Ecoulement E (mm)	293,68	217,87
Coefficient d'écoulement K _e =E/P	37,05	30,15

Pour ce qui est de l'exploitation biologique, les données de l'enquête réalisée entre septembre 2004 et avril 2005 ont révélé la situation suivante :

A l'exception de la campagne crevette (de mai à juillet) et les prélèvements occasionnels visant les espèces migratrices remontant l'estuaire (Mulet, loup), l'activité de pêche proprement dite est de type artisanale et récréative se pratique essentiellement dans la zone littorale de proximité et non dans le lit de l'estuaire. L'embouchure de l'estuaire sert comme plage d'échouage pour les petits métiers, non règlementée en tant que zone de pêche. Le nombre d'embarcations existant sur le site est de 40 embarcations actives dont la taille varie entre 3,5 et 6 m. L'effectif des marins actifs est de l'ordre d'une centaine de pêcheurs y compris les propriétaires d'embarcation. La majorité des marins sont des jeunes chômeurs exerçant l'activité de pêche à des fins de subsistance, ou par complémentarité aux activités rurales traditionnelles (élevage, agriculture). Le site en question constitue un pôle par excellence pour la pêche de loisirs (pêche à la ligne & palangrotte). Des dizaines d'amateurs des localités limitrophes (Guelma, Souk Ahras) fréquentent souvent les lieux pour la pêche et la quiétude de la zone.

2.2. Géomorphologie

La région est formée par trois zones géomorphologiques hydrologiquement distinctes. Au Sud des vallées profondes où coulent d'une part, entre les djebels Oum Ali, Ghora et Tegma, les oueds Bougous, Ballouta et Sbaa d'une densité de 4 km/km² et qui rejoignent l'oued El Kébir dans la vallée de Mexa noyée en partie par le lac barrage qu'on y a érigé. D'autre part, sur les monts de Bouhadjar où la Bounamoussa prend naissance et jaillit sur une pente régulière

jusqu'à l'entrée au Barrage de Cheffia. Au nord, des basses collines et des dépressions fermées où sont localisés les lacs et les marécages alimentés par des cours d'eau de faible densité ($2\text{km}/\text{km}^2$). Entre ces deux zones, une troisième, constituée de plaines alluviales au fond desquelles coulent l'oued El-Kébir et Bounamoussa. El-Kébir avec ses affluents (Guergour ; Dardan, Bou-Halloufa) et Bounamoussa (Soudan ; Guerriah) se confluent et forment ainsi l'artère hydrologique qui draine les eaux de la région jusqu'à la zone d'épandage de crue que constituent les marécages de la Mekkada. A la faveur d'une géologie avantageuse formée de la superposition des formations poreuses des grès numidiens dans les reliefs ou des sables dunaires dans les zones basses sur le substratum imperméable des argiles de Numidie, l'eau apportée par les pluies hivernales est emmagasinée pour être ensuite lentement restituée au réseau hydrographique. Par ailleurs, le relief de la zone d'étude est caractérisé par la présence de pentes fortes en amont et douce à l'aval, et que l'indice de pente globale (m/km) est de 7,15 pour El-Kébir et 11,02 pour la Bounamoussa (Labar, 2003).

2.3. Conditions météorologiques

La région d'étude est soumise à un climat méditerranéen, caractérisé par la présence de deux périodes bien distinctes. Une période humide s'étendant de septembre à avril et l'autre sèche située entre mai et août. Ce type de climat encouragé par de forte dénivellation et de médiocrité de la couverture végétale en région méditerranéen aura une importante influence sur le régime hydrologique des eaux de surface (Loup, 1974).

2.3.1. Température atmosphérique

La température moyenne mensuelle de la région est d'environ 17°C . Concernant la période d'étude, l'intervalle a varié entre de $9,2^\circ\text{C}$ (janvier et février 2005) à $25,6^\circ\text{C}$ (juillet) (fig. 7a). On note une augmentation régulière de la température à partir de la troisième semaine du mois de mars pour atteindre le maximum en juillet au lieu d'août. D'une manière générale, les fluctuations thermiques mensuelles moyennes coïncident avec celles relevées dans les eaux du Mafrag.

2.3.2. Précipitation et évaporation

La région limitrophe à l'estuaire est connue comme étant la plus arrosée du pays (de 500 à 900 mm). L'étendue du bassin de la Mafrag (3 200km²) reçoit des précipitations directes influençant fortement leur régime hydrologique et en particulier les variations de salinité. Les données pluviométriques des deux années de suivi montrent la présence d'un minimum de précipitation (1,1 mm) en juillet et un maximum de 184 mm en décembre 2005 (fig. 7b). Une telle variation d'amplitude reflète le régime pluviométrique méditerranéen caractérisé essentiellement par l'irrégularité et la torrencialité des pluies. En effet, les quantités de précipitations élevées enregistrées coïncident valablement avec les périodes de crue caractéristiques de la région : les crues de décembre février et avril (Labar, 2003).

L'humidité relative est élevée durant toute l'année suivent une évolution comparable à l'allure de la courbe des températures (fig. 7c), avec une moyenne annuelle de l'ordre de 70 à 80%. Ces valeurs confortent les données de la littérature qui précise que l'évapotranspiration réelle dépasse parfois la quantité des précipitations. Enfin, il semble que la répartition de la majorité des précipitations pendant la saison humide favorise un excès d'eaux en cette période de l'année, alors que durant les mois hyper secs (juillet et août), la région connaît un déficit hydrique considérable. De tel schéma antagoniste se retentit absolument sur le bilan hydrologique ainsi que le régime d'écoulement des eaux de surface dans l'estuaire.

2.3.3. Régime éolien

Les vents ont une action double sur la température des eaux de l'estuaire. En effet, les eaux se refroidissent en hiver sous l'action des vents du Nord (Mistral et Tramontane), et se réchauffe en été par l'influence du vent du sud (Sirocco). De plus, c'est sous l'influence des vents dominants que le niveau de la mer s'élève (marée barométrique), et par suite la cote dans l'estuaire en amplifiant le brassage vertical des masses d'eaux (Scully *et al.*, 2005). Pendant notre période d'étude, l'intensité du vent a seulement varié entre 2,8 et 5,7 m.s⁻¹ avec une moyenne de 3,8. Il s'agit des valeurs mensuelles moyennes montrant une allure presque rectiligne, et que les relevés ponctuels sont d'intensité aussi importants à ne pas écarter (fig. 7d). D'ailleurs, des vents très violents ont été observés lors des sorties de terrain. Dans l'estuaire, et surtout que son

embouchure s'ouvre sur un couloir des vents dominants, où le rôle des vents se fait sentir aisément.

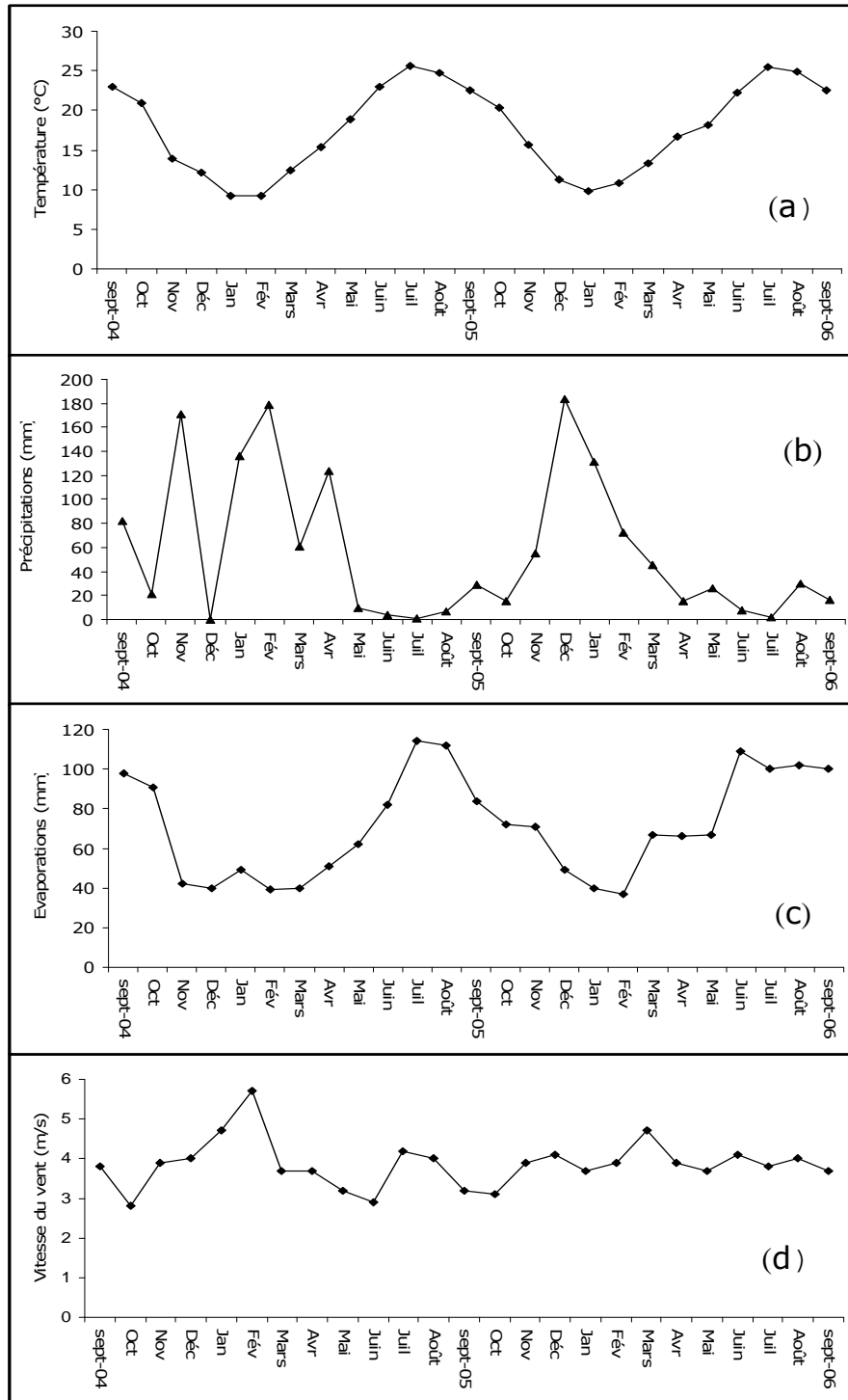


Figure 7. Valeurs mensuelles moyennes de la température atmosphérique (a), des précipitations (b), de l'évaporation (c) et de la vitesse du vent (d) au cours de la période d'étude, de septembre 2004 – septembre 2006 (Source : la station météorologique des salines, Annaba).

2. Echantillonnage & Méthodes d'analyse

2.1. Choix des stations

Les programmes de surveillance de l'environnement suggèrent des contrôles spatio-temporels bien serrés. Ainsi, pour mieux comprendre les conditions hydrologiques de forte variabilité en milieu estuarien, nous avons échantillonné deux fois par mois quatre stations dans l'estuaire aval au cours de cycles annuels 2005 & 2006. La station d'embouchure ou *E* située à environ 100 m du niveau du rivage (N 36° 50' 739:E 7° 56' 913), la station Confluence *C*, se situe à environ 1Km (N 36° 50' 308:E 7° 57' 428) de la mer au point de confluence de Bounamoussa et du Kébir. Les stations du Kébir ou *K* (N 36° 49' 931 : E 7° 58' 001) et de Bounamoussa ou *B* (N 36° 49' 561:E 7° 57' 639) sont situées à environ 1Km de leur confluence.

Pour mieux cerner la variabilité spatiale, des campagnes saisonnières ont été effectuées en 2006. Les stations choisies équidistantes de 1 kilomètre, ont été situées tout au long de l'estuaire, depuis l'embouchure jusqu'à 11,5 km dans la branche El-Kébir et 8 km dans la branche Bounamoussa (tab. 6 & fig. 8).

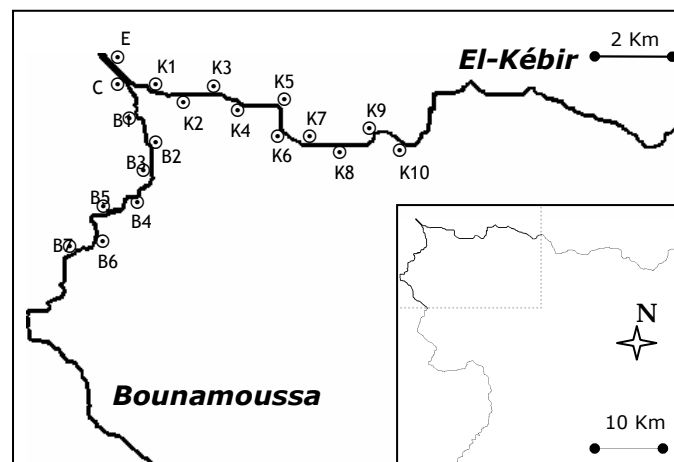


Figure 8. Positionnement des stations étudiées en 2006. *E* : station embouchure, *C* : station confluence, *K1-K10* : stations 1 à 10 de la branche El-Kébir, *B1-B7* : stations 1-7 de la branche Bounamoussa. *K1 = K* dans le suivi bimensuel et *B1 = B* dans le suivi bimensuel.

Dix neuf stations y compris celle de suivi bimensuel ont été suivies saisonnièrement lors de 4 campagnes au cours de l'année 2006 correspondant à l'hiver (26-27 février), le printemps (26 avril), l'été (9 juillet) et l'automne (31

octobre- 1 novembre). Les relevés morphométriques ont comporté des profils transversaux de chaque station et le profil longitudinal le long de la distance explorée sur les deux tributaires (Bouamoussa & Kébir). Pour des raisons pratiques, les stations aval K1 et B1 équivalent aux stations K et B dans le suivi bimensuel.

Tableau 6. Caractéristiques géographiques des stations étudiées. Les stations d'El-Kébir sont dénommées K1 à K10 et les stations de Bouamoussa sont dénommées B1 à B7. K1 = K dans le suivi bimensuel et B1 = B dans le suivi bimensuel.

Stations	Positionnement géographique (latitude, longitude)		Profondeur (m)	Distance à l'embouchure (km)
Embouchure (E)	N 36°50.739'	E 07°56.913'	3	0,2
Confluence ©	N 36°50.308'	E 07°57.428'	4,5	1,1
K1	N 36°49.931'	E 07°58.001'	4,1	2,3
K2	N 36°49.532'	E 07°58.446'	3,7	3,3
K3	N 36°49.551'	E 07°59.027'	3,3	4,2
K4	N 36°49.630'	E 07°59.581'	2,9	5
K5	N 36°49.476'	E 08°00.024'	2,2	6
K6	N 36°49.513'	E 08°00.611'	1,5	7
K7	N 36°49.463'	E 08°01.249'	1,6	8
K8	N 36°49.168'	E 08°01.694'	2,2	9,5
K9	N 36°48.696'	E 08°01.988'	2,2	10,5
K10	N 36°48.629'	E 08°02.690'	2,2	11,5
B1	N 36°49.561'	E 07°57.639'	1,7	2,6
B2	N 36°49.117'	E 07°57.969'	2,6	3,6
B3	N 36°48.640'	E 07°58.244'	2,2	4,6
B4	N 36°48.173'	E 07°58.324'	3,4	5,5
B5	N 36°47.778'	E 07°58.073'	2,2	6,4
B6	N 36°47.598'	E 07°57.636'	2,5	7,2
B7	N 36°47.221'	E 07°57.272'	3,8	8

2.2. Relevés hydrologiques

La connaissance des masses d'eaux est d'une importance primordiale dans l'étude des milieux aquatiques. En effet, les volumes d'eaux possédant des caractéristiques spécifiques de température et de salinité leur permettent une extension horizontale et verticale différentielle dans l'espace et le temps. Pour ce qui est de salinité, les propos sur la classification des estuaires déjà entamé dans le premier Chapitre approuve pleinement la prédominance de ce facteur écologique (Mac Lusky, 1993). En deuxième ordre, la température comme

paramètre très important dans toute étude portant sur la qualité des eaux. Celle-ci agit sur les propriétés physiques, chimiques et biologique de l'eau.

Les relevés de température et de salinité ont été mesurés à la surface et près du fond, avec un multiparamètre de terrain de type WTW 197i, d'une précision haline et thermique respective de (0,1 à 0,2) et 0,1°C. Les valeurs de salinité sont ainsi exprimées en échelle de salinité pratique Practical Salinity Unit ou PSU).

En plus des relevés hydrologiques des eaux de surface et de fond, des profils verticaux de température et de salinité ont été réalisés bimensuellement (tab. 7), et lors des quatre campagnes dans chaque station. Il est à noter que les points des relevés sont espacés de 10 et de 20cm. Cette échelle d'observation très serrée de la colonne d'eau, permet une meilleure identification des masses d'eaux. Les données collectées au cours des campagnes sur l'ensemble des stations, ont été traitées par le logiciel de cartographie Surfer 8 (Golden Software Surfer, 2002) afin de faciliter l'interprétation de la distribution verticale et spatiale de la salinité et donc des masses d'eaux en présence.

Tableau 7. Profils verticaux de salinité effectués bimensuellement entre janvier 2005 et décembre 2006 ((-): profil non relevé; (+) : profil relevé. 1 à 12 les mois.

2005	Hiver			Printemps			Eté			Automne											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12									
E	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	
C	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
K	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
B	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2006	Hiver			Printemps			Eté			Automne											
E	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
C	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
K	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
B	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

2.3. Relevés bathymétriques

- **Profils transversaux**

Les profils transversaux ont été réalisés aux points de prélèvements (stations) lors des quatre campagnes. Le sondage transversal de la profondeur à un pas de relevés de 1m. Ces profils permettent de déterminer la surface de la section mouillée à partir de calcul suivant :

Soit R le rayon hydraulique (distance en mètre entre les deux rives)

Soit n le nombre de points de sondage répartis sur le rayon R espacés d'un pas (p)

Soit A_{n-1} et A_n deux points de sondage qui se succèdent et $S_p (m^2)$ est une surface partielle tels que $S_p (m^2) = A_{n-1} + A_n / 2$

La section mouillée est la somme des surfaces partielles soit $S_m (m^2) = S_{p1} + S_{p2} + \dots + S_{pn}$

- **Profils longitudinaux**

La configuration topographique très précise de l'estuaire a été obtenue par un sondage longitudinal de la profondeur à un pas de relevés de 10 m sur 20 km dans le Kébir (soit 1169 relevés) et sur 15 km dans Bounamousa (soit 971 relevés), le 26 et le 27 février 2006. Les données de profils transversaux et longitudinaux sont nécessaires à l'évaluation du volume et de la surface que recèle l'estuaire :

Soit R_m le rayon hydraulique ou largeur du lit.

Soit D en mètre la distance entre deux stations qui se succèdent.

Soit N_r le nombre de points de sondage longitudinal de profondeur entre deux stations qui se succèdent et $Z_m (m)$ la moyenne de profondeurs :

$$Z_m = (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n) / N_r$$

Soit S_p la surface partielle de station tels que $S_p (m) = Z_m \times R_m$

Soit Q_p le volume partiel (entre deux stations) tels que $Q_p (m^3) = S_p (m) \times D (m)$.

- **Estimation des volumes et des fractions d'eaux douce et salée**

L'estimation de la fraction d'eau douce ou salée présente en chaque moment dans l'estuaire est calculée selon l'équation de Giovanardi et Tromellini (1992):

$$F (\%) = 100 (S - s) / S$$

F : fraction d'eau douce

S : salinité de l'eau de mer

s : salinité de l'échantillon

A partir de la fraction d'eau douce, on peut estimer le volume total instantané d'eau fluviale que contient l'estuaire. Ces estimations sont facilitées et par la profondeur de la lame d'eau indiquée par les valeurs de salinités et par le volume partiel inter-station. Il s'agit de multiplier la valeur de la fraction par le volume partiel pour déterminer la quantité en eau douce en présence.

2.4. Sels nutritifs

Les nutriments minéraux sont des sels sous formes d'électrolytes sous lesquelles les végétaux sont généralement capables d'absorber les éléments biogènes (N, P, Si). Les principaux sels sont les anions nitrate (NO_3^-), nitrite (NO_2^-), phosphates (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}), silicates (SiO_4^-), et le cation ammonium (NH_4^+). Ils sont présent dans les eaux naturelles en quantités infimes, mais peuvent avoir des concentrations extrêmes reflétant ainsi une eau de mauvaise ou de bonne qualité.

Les sels nutritifs ont été dosés sur des échantillons d'eaux prélevés bimensuellement dans les quatre stations (2005 et 2006) et au cours des campagnes saisonnières dans les 19 stations estuariennes (2006). Les échantillons de surface ont été prélevés en immergeant directement une bouteille de prélèvement à environ 10 cm de la surface. Les eaux de fond sont prélevées à l'aide d'une bouteille à renversement type Niskin. Les méthodes d'analyse de ces éléments sont succinctement résumées dans le tableau 8.

Tableau 8. Résumé des méthodes utilisées dans l'analyse des sels nutritifs.

Eléments	Méthodes	Références
Azote ammoniacal (NH_3 + NH_4^+)	Dosage spectrophotométrique ($\lambda = 630 \text{ nm}$)	Parsons <i>et al.</i> (1989)
Nitrates (NO_3^-)	Dosage spectrophotométrique ($\lambda = 543 \text{ nm}$)	Parsons <i>et al.</i> (1989)
Nitrites (NO_2^-)	Réduction des nitrates en nitrites et dosage spectrophotométrique des nitrites ($\lambda = 543 \text{ nm}$)	Parsons <i>et al.</i> (1989)
Phosphate (PO_4^{3-})	Dosage spectrophotométrique : ($\lambda = 885 \text{ nm}$)	Aminot et Chaussepied (1983)
Silicate Si (OH) ₄	Dosage spectrophotométrique ($\lambda = 885 \text{ nm}$)	Parsons <i>et al.</i> (1989)

2.5. Matières organiques

Les nutriments organiques, particulaire ou dissoute, jouent un rôle majeur dans les cycles biologiques et géochimiques. D'une part, une partie de ces molécules organiques servent également comme source de nourriture non négligeable pour la faune. D'autre part, la richesse organique reflète directement

la productivité des milieux ainsi que le degré de conversion de la fraction minérale.

- **Azote organique dissous**

L'azote organique dissous est dosé suivant la méthode de Solorzano et Sharp (Parson *et al.*, 1989). La méthode consiste à une double technique répartit en deux étapes, l'une chimique est l'autre spectrophotométrique. La première étape est une minéralisation chimique par le persulfate de sodium ($K_2S_2O_8$) en milieu basique (NaOH), la deuxième est spectrophotométrique consiste à lire indirectement l'équivalent d'azote sous forme de nitrate.

- **Dosage de la chlorophylle a**

La détermination des pigments photosynthétiques par la technique spectroscopique de Lorenzen (Aminot et Chaussepied, 1983), s'avère satisfaisante, plus simple et plus rapide que des méthodes basées sur le comptage des cellules. Après prélèvement et conservation dans des bouteilles ombrées, on filtre 1000 ml sur un filtre en fibre de verre (GF/C Wathman de 0,45 μm de porosité). Le filtre utilisé est déchiqueté dans 10 ml d'acétone à 90%. Après avoir resté immergé dans l'acétone pendant 24 heures, les échantillons sont centrifugés à 3000 t/min durant 20 min. L'absorbance de l'extrait ainsi obtenu est mesurée à une longueur d'onde de 665 nm avant et après acidification.

- **Matières en suspension**

La détermination de la charge des matières en suspension dans l'eau a été effectuée selon la méthode de pesée différentielle (Aminot et Chaussepied, 1983). Après filtration d'eau sur filtre Whatman GF/C de 0,45 μm de porosité et séchage ou dessiccation à 105°C. Dans notre cas, le volume de l'échantillon a varié en fonction de la charge en seston (50 à 150 ml). La balance utilisée est de type Sartorius d'une précision de 0,01 mg. Les résultats sont exprimés en milligramme par litre.

- **Carbone organique particulaire**

La matière organique particulaire est dosée selon la méthode de Le Corre (Aminot et Chaussepied, 1983). La méthode consiste à une oxydation de la matière organique déposée sur filtre par un mélange sulfo-chromique. L'oxydant en excès est dosé en retour par une solution de fer ferreux (sels de Mohr). L'étalonnage est réalisé à partir d'une solution de glucose. On obtient alors quantité de matière organique exprimée en équivalents carbone de glucose.

CHAPITRE III. RESULTATS

3. Hydrologie

3.1. Configuration morphologique de l'estuaire

3.1.1. El-Kébir

La configuration bathymétrique de l'embouchure à 11 Km dans la branche El-Kébir montre un fond très accidenté avec une profondeur maximale de 5,8 m à la confluence (fig. 9). La profondeur moyenne d'El-Kébir atteint 3 m alors qu'on peut rencontrer des fosses de plus de 5 m à environ 6km de l'embouchure. Selon la profondeur moyenne, on peut distinguer 4 parties : embouchure-PK2: 4 m, K2-K5 : 3,2 m, K5-K8 : 1,8 m et K8-K10 : 2,5 m.

D'autre part, les profils transversaux effectués en chaque station, permettent d'estimer les surfaces des sections mouillées correspondantes (tab. 9).

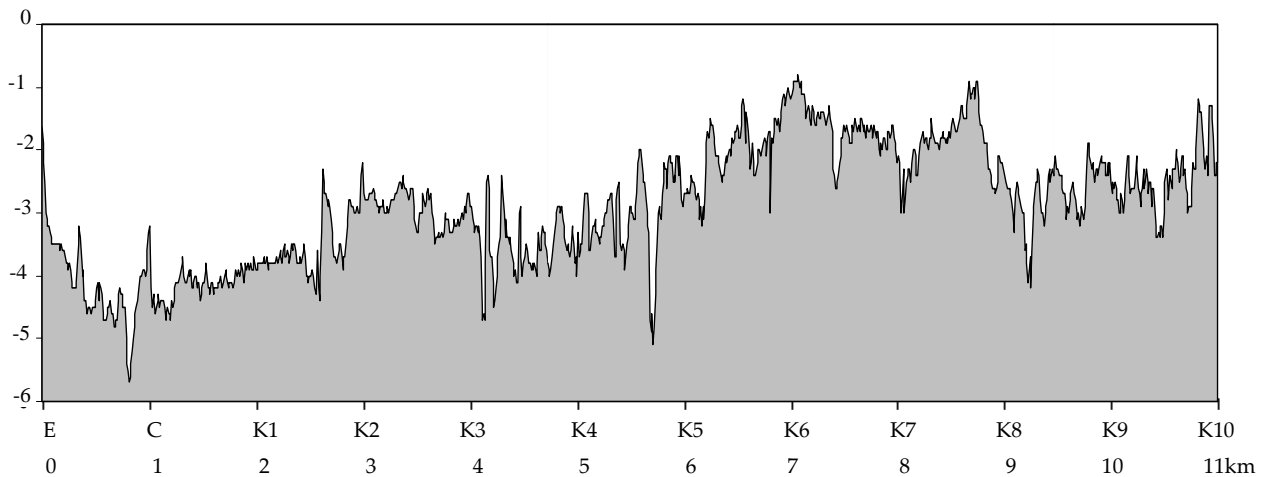


Figure 9. Configuration bathymétrique de l'estuaire du Mafrag de l'embouchure jusqu'à 11 kilomètres dans la branche El-Kébir le 26 février 2006.

Ces surfaces varient entre 47 et 397 m² selon la largeur de la section mouillée et la profondeur. Pour les 11,5 km explorés, on estime que l'estuaire recèle un volume de 1,35 Millions de m³ dont environ 30% revient à la portion embouchure-confluence. La surface totale de l'embouchure au Pk20 (partie estuarienne) avoisine 600 Milles m² et couvre un volume d'eau d'environ 1,8 Millions m³. Ces données hydrauliques devront servir à l'évaluation du temps de résidence des eaux continentales transitant l'estuaire.

Tableau 9 : Caractéristiques morphométriques de la branche d'El-Kébir le 26 février 2006. R : rayon hydraulique ou largeur de la section mouillée, D : distance inter-station, Nr : nombre de relevés, Zm : profondeur moyenne, Sp : surface partielle, Qp : volume partiel.

Stations	R (m)	D (m)	Nr	Zm (m)	Sp (m ²)	Qp (m ³)
E-C	100	1200	81	3,97	397,04	476444
C-K1	33	1000	106	4,27	140,75	140748
K1-K2	36	869	110	3,72	133,99	116433
K2-K3	33	932	109	2,94	96,88	90293
K3-K4	33	784	110	3,45	113,88	89282
K4-K5	24	933	109	3,16	75,81	70730
K5-K6	42	1100	109	2,13	89,32	98249
K6-K7	30	1500	111	1,57	47,11	70662
K7-K8	30	1000	109	1,88	56,31	56312
K6-K9	27	1100	108	2,68	72,35	79585
K9-K10	24	1000	107	2,45	58,79	58789
Total		11 382	1 169		1 282,22	1 347 528

3.1.2. Bounamoussa

La topographie du fond de Bounamoussa est peu accidentée montrant des profondeurs variant entre 1 et 4 m avec une profondeur moyenne de 2,3 m (fig. 10). La partie aval est cependant peu profonde. A partir du Pk5, l'estuaire devient plus profond ou la profondeur moyenne avoisine 3 m. La largeur moyenne de la section mouillée (60 m) est beaucoup plus importante que celle d'El-Kébir. On retrouve en revanche une configuration contraire à celle d'El-Kébir dont le lit est profond mais peu élargit. Pour les 9 km explorés, on estime que Bounamoussa recèle un volume d'eau de 1 Million m³ et une surface en eau très comparable à celle d'El-Kébir (tab. 10).

La partie estuarienne s'étendant sur 15 km environ, devrait avoir un volume total de l'ordre de 1,5 Millions de m³. En conséquence, le système estuarien peut avoir un volume d'environ 3,3 millions de m³ auquel il faut ajouter les quantités d'eau marines introduites lors des advections de marée, encore mal connues. On peut remarquer en outre que les deux branches de l'estuaire ont curieusement des surfaces en eau et des volumes sensiblement comparables.

Figure 10 : Configuration bathymétrique de l'estuaire du Mafrag de l'embouchure jusqu'à 7 kilomètres dans la branche Bounamoussa le 27 février 2006.

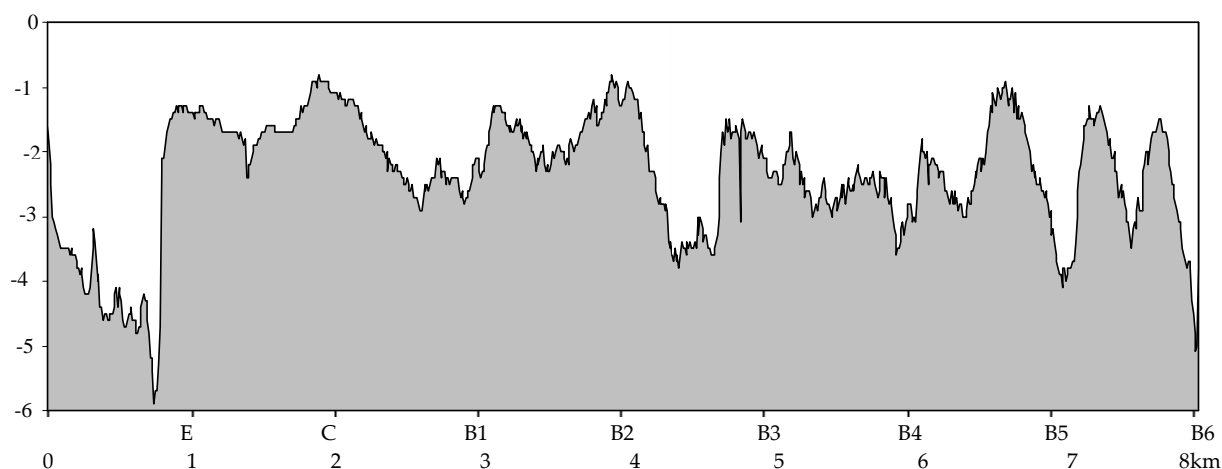


Tableau 10 : Caractéristiques morphométriques de la branche Bounamoussa le 27 février 2006. R : rayon hydraulique ou largeur de la section mouillée, D : distance inter-station, Nr : nombre de relevés, Zm : profondeur moyenne, Sp : surface partielle, Qp : volume partiel.

Stations	R (m)	D (m)	Nr	Zm (m)	Sp (m ²)	Qp (m ³)
E-C	100	1200	81			
C-B1	60	1100	108	2,01	120,39	132428
B1-B2	60	1500	103	1,56	93,50	140243
B2-B3	63	1000	104	2,14	134,84	134844
B3-B4	54	1000	105	1,76	95,09	95091
B4-B5	63	875	101	2,57	162,05	141797
B5-B6	60	933	108	2,64	158,11	147518
B6-B7	51	734	109	2,24	114,21	83832
B7-B8	51	849	109	2,58	131,76	111862
B8-B9	27	968	43	3,16	85,21	82480
Total		10 159	971		1 095,16	1 070 095

3.2. Masses d'eaux et salinité

Les masses d'eaux et leurs variations dans l'estuaire aval pour l'année 2005 sont présentées dans la publication insérée à la fin de ce chapitre (Haridi *et al.*, 2008). Dans le texte principal du manuscrit on traite les variations verticales et saisonnières de la température et salinité dans un contexte de comparaison entre les deux années du suivi bimensuel (2005/2006).

3.2.1. Température

3.2.1.1. Variations saisonnières dans l'estuaire aval

Les variations de température (fig. 11) présentent toujours la même allure au niveau de toutes les stations. La température des eaux de surface diffère toujours de celle des eaux du fond soulignant déjà l'existence de masses d'eaux individualisées. Au printemps et en été, les eaux de surface sont plus chaudes atteignant un maximum exceptionnel de 36,3°C enregistrée le 14 août 2005 dans la station Bounamoussa. Le réchauffement est généralisé à l'ensemble de la colonne d'eau durant la saison estivale avec un léger écart (1 à 1,5°C) entre les masses d'eau de fond et de surface. Ce gradient s'inverse en automne et en hiver où les eaux profondes restent plus chaudes et témoignant non seulement de la faible influence des températures atmosphériques mais aussi de la forte inertie de la masse d'eau profonde. Les eaux superficielles se refroidissent rapidement à la fin de l'automne (novembre) pour conserver un minimum calorifique en hiver (9,5-10°C). A l'échelle de l'année (fig. 11), la température des eaux a varié entre 9,5 et 36,3°C avec une forte saisonnalité. L'amplitude thermique annuelle s'élève à 26,8°C et reflète une des caractéristiques du climat méditerranéen.

3.2.1.2. Variations verticales dans l'estuaire aval

D'une manière globale, l'évolution verticale de la température montre une nette différence entre les deux années de suivi (fig. 12). En effet, durant l'année 2005, on remarque (fig. 12a) l'existence d'une thermocline s'établissant entre 50 à 100 cm, peu épaisse (10 à 50 cm) mais très accusée (1,6-6,6°C). Toutefois, la station Bounamoussa et en raison de sa faible profondeur est beaucoup plus sensible aux influences des températures atmosphériques. Il s'agit d'une forte stratification thermique qui s'installe durant l'hiver et le printemps, et s'atténue progressivement en été par suite de gain de chaleur au niveau des couches profondes (6 à 7,3 °C par rapport aux valeurs de printemps). En revanche les profils de températures durant l'année 2006 sont similaires dans toutes les stations montrant une certaine homogénéité entre les eaux de surface et celles du fond avec une amplitude de l'ordre de 1. Ponctuellement, l'indice de stratification thermique (tab. IV en annexe) reflète une forte discontinuité thermique en 2005 (0 à 3,55°C) et une homogénéité de la colonne d'eau en 2006 (0 à 1,5°C), excepté la thermocline observée au niveau de la station

Bounamoussa le 13 mai où l'indice est à 2,35°C. En moyenne, la température a diminué dans la colonne d'eau selon une cadence de 0,5 à 1°C par mètre.

Température (°C)

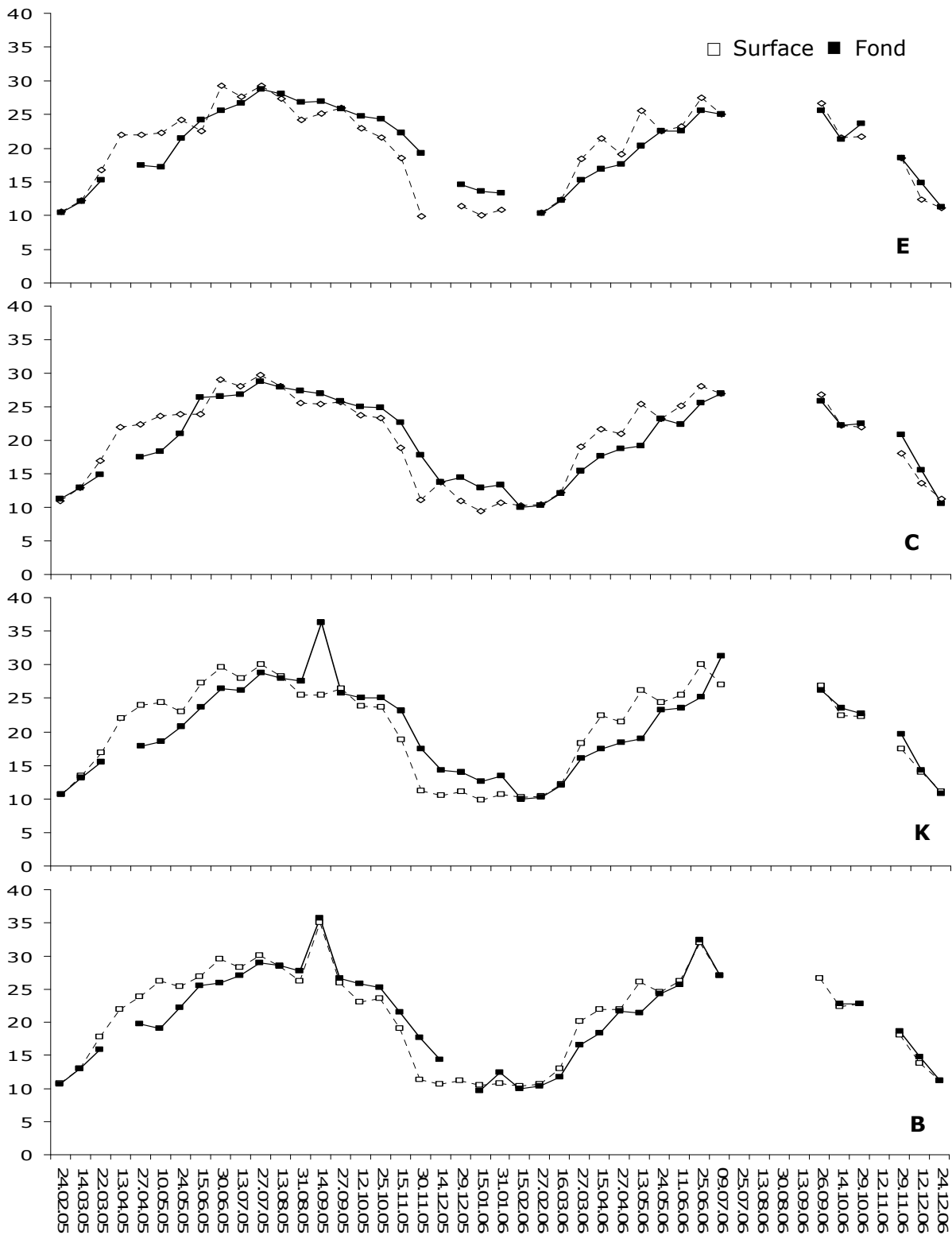


Figure 11. Variations de la température de surface et de fond relevées au niveau des stations aval (2005 /2006).

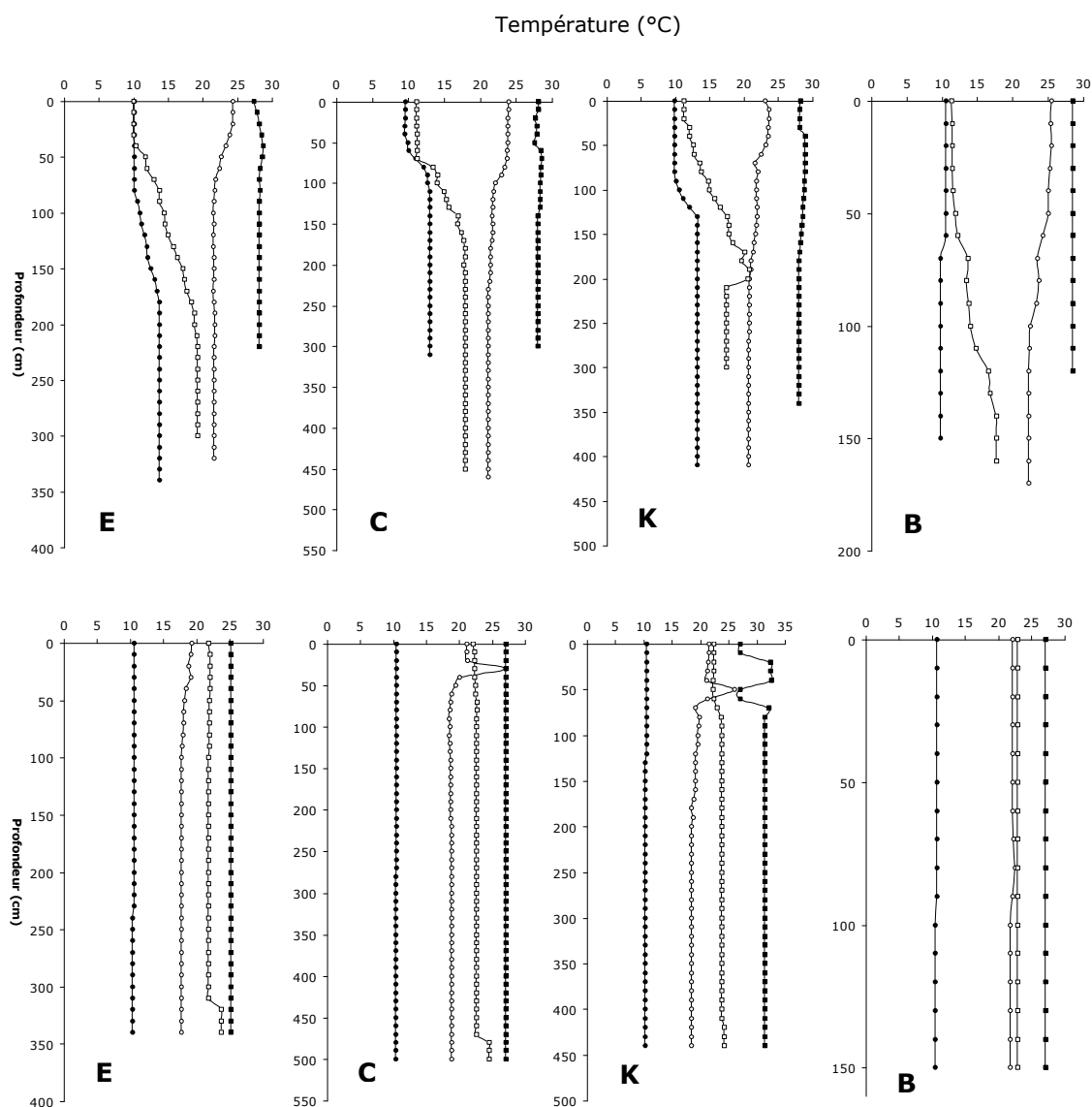


Figure 12. Variations verticales de la température dans les stations aval (2005 en haut) & (2006 en bas): ● Hiver, ○ Printemps, ■ Été, □ Automne.

3.2.2. Salinité

3.2.2.1. Variations saisonnières dans l'estuaire aval

Comme pour la température, l'évolution des valeurs de salinité est similaire dans l'ensemble des stations toute en conservant les écarts entre les différentes stations (fig. 13). Les salinités des eaux de fond sont toujours supérieures à celles de surface variant entre 6,2 et 37,6, à l'exception des relevés du 14 février 2005 et du 16 février 2006 où la salinité de fond est égale celle de surface. Cette situation reflète franchement un écoulement d'eau douce

(0,1 à 0,5) qui ne perdure que 45 jours (début février jusqu'à la fin de la première quinzaine de mars).

Pour ce qui est des deux cycles annuels, l'allure générale de fluctuations de salinité fait ressortir deux situations distinctes, la première en 2005 où la salinité de fond se rapproche de celles de la mer (34 à 37,3), alors que les eaux de surface se situent entre 0,1 et 20,1, sauf pour la station embouchure (32,5) enregistrée le 15 juin 2005.

En 2006, le gradient halin suit la même tendance de l'hiver et le printemps observée en 2005, excepté les valeurs relevées en surface le 24 mai au niveau des quatre stations (37,6; 35,5; 32,8; 30,2), respectivement dans l'embouchure, la confluence, El-kébir et la Bounamoussa. Ces prélèvements coïncident sans doute avec la phase de flot. A partir de la deuxième quinzaine du mois d'août l'écart de salinité entre les eaux du fond et celui de surface se réduit considérablement (5,55 à 1,13) pour atteindre une situation de bon mélange des masses d'eau dans l'estuaire.

3.2.2.2. Variations verticales dans l'estuaire aval

D'une manière globale, la répartition verticale de la salinité dans la colonne d'eau montre une discontinuité dans l'ensemble des stations, et que la profondeur de l'halocline traduit l'importance de la remontée d'eau marine dans l'estuaire. Néanmoins, les situations se distinguent dans l'espace et dans le temps, en relation directe avec l'apport d'eau douce et l'eau marine en période de fermeture où d'ouverture de l'embouchure.

En février 2005 et à la première quinzaine de mars, les valeurs de salinité traduisent celles de l'eau douce (0,1 à 0,5). A partir du 23 mars l'eau marine s'installe progressivement et occupe d'avantage la colonne d'eau pour la dominer tout en allant vers l'été (20 à 80 %). Il est à souligner que le printemps est caractérisé par la formation d'une halocline très épaisse (environ ½ m), établissant ainsi les conditions de mauvais échange dans la colonne d'eau.

En été, la stratification s'accroît rapidement dans l'ensemble du système au rythme de 7 à 10,85 unité de salinité par mètre répartis sur toute la profondeur comme l'indique l'indice de stratification (tab. IV en annexe). La lame d'eau douce s'est conjointement réduite pour être remplacée par une eau superficielle mésohaline (5 à 18). Cette forte stratification perdure durant le long de la saison de l'automne mais avec de légères diminutions de salinité des eaux

de surface. En effet, les prélèvements de la fin de novembre et de décembre montrent des salinités de surface proches de celles de l'eau douce (1,8 à 6,9). Cette situation hydrologique peut être dû aux dilutions des premières pluies torrentielles de l'automne (14a).

Durant l'année 2006, on note une stratification similaire à celle de l'hiver et de l'automne observée en 2005. Néanmoins, le cycle se poursuit différemment en été et en automne. Bien que la stratification de l'automne persiste jusqu'à la mi-janvier de l'année qui suit, la salinité décente aux valeurs d'eau douce et occupe toute la colonne d'eau (fig. 14b). L'estuaire coule franchement en phase rivière de la fin janvier jusqu'au 16 mars. Une semaine après, le régime hydrologique change rapidement et on assiste à l'installation d'une épaisse halocline. Les salinités de fond passent de 0,9 à 37,4 indiquant l'invasion de la mer qui induit un brassage dans le bas estuaire.

Pour ce qui est de l'été et l'automne, la période coïncide absolument avec la durée de fermeture du chenal (du 18 juin au 22 décembre 2006) et montre une situation nouvelle de bon mélange de la colonne d'eau. En effet, la salinité de surface augmente (16 à 23) tandis que celle du fond diminue (33,5 à 16,2) pour atteindre une gamme caractéristique des eaux mésopolyhaline (fig. 14b). A la fin de septembre, la stratification recommence progressivement et les salinités de surface regagnent de nouveau les valeurs d'hiver comme le montre le profil du 12 décembre où la salinité atteint 0,1 avec la formation d'une faible halocline déjà installée au niveau de la confluence (fig. 14b).

Salinité

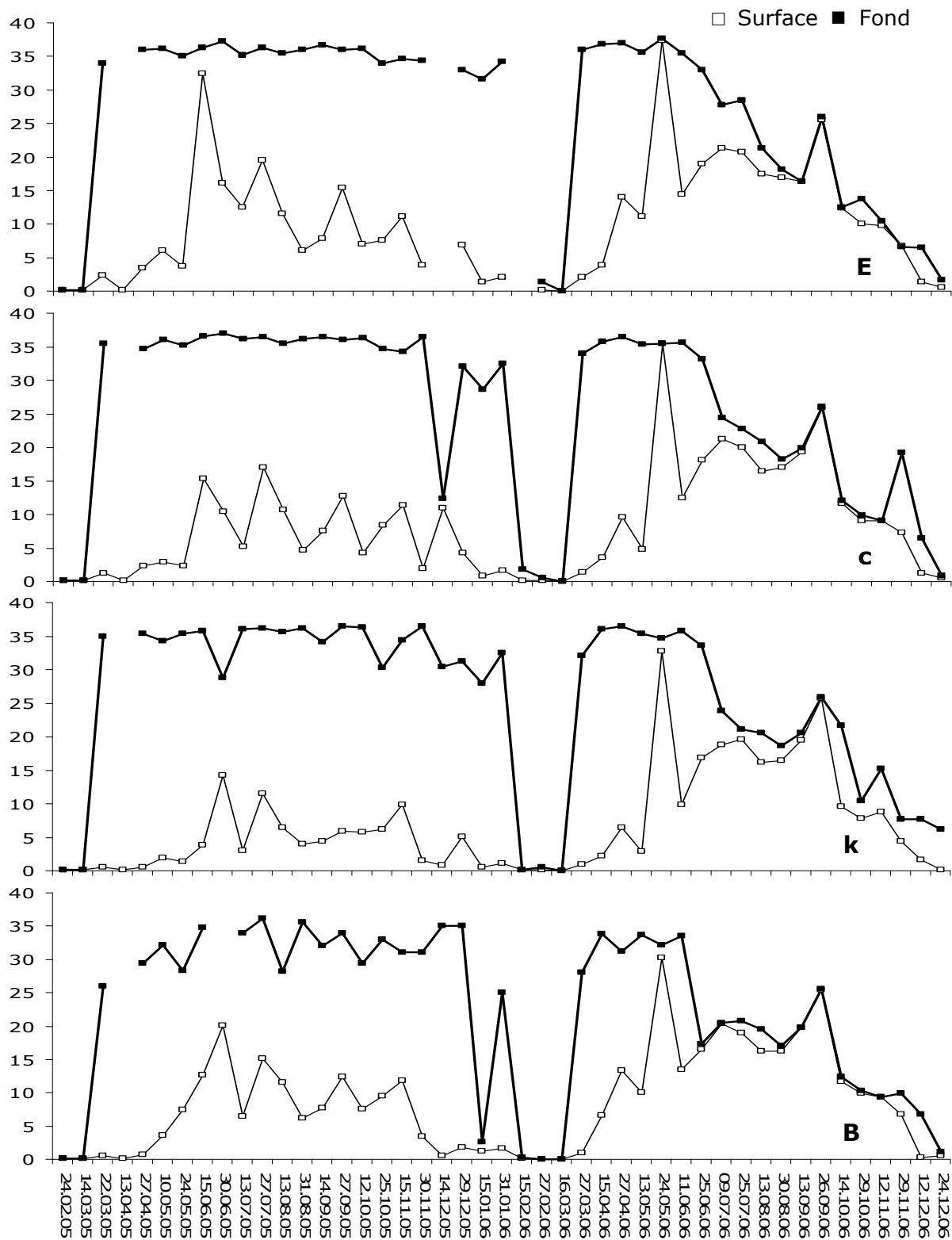


Figure 13. Variations des salinités de surface et de fond relevées au niveau des stations aval (2005 /2006).

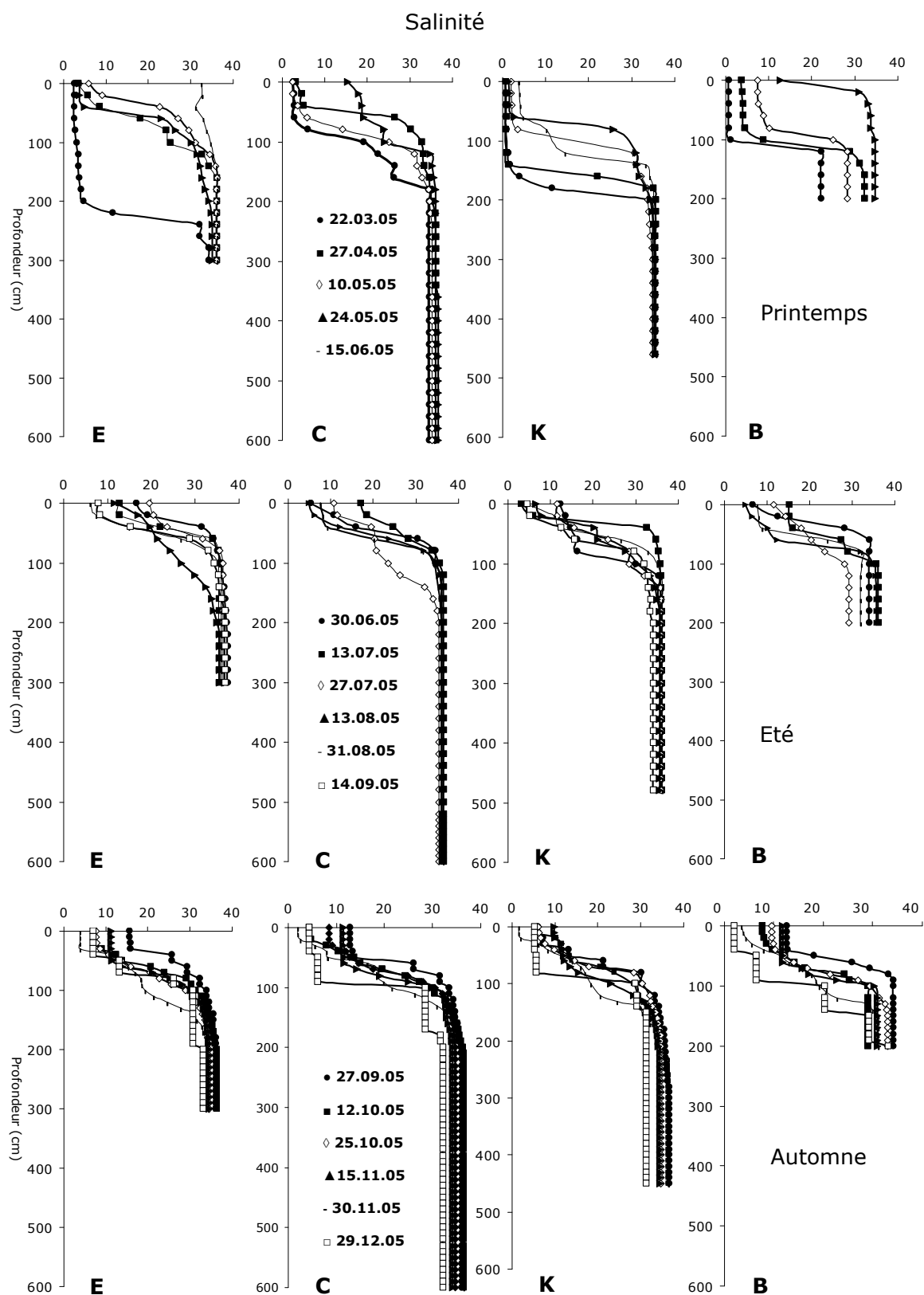


Figure 14a : Distribution verticale de la salinité dans les stations aval de l'estuaire du Mafrag en 2005.

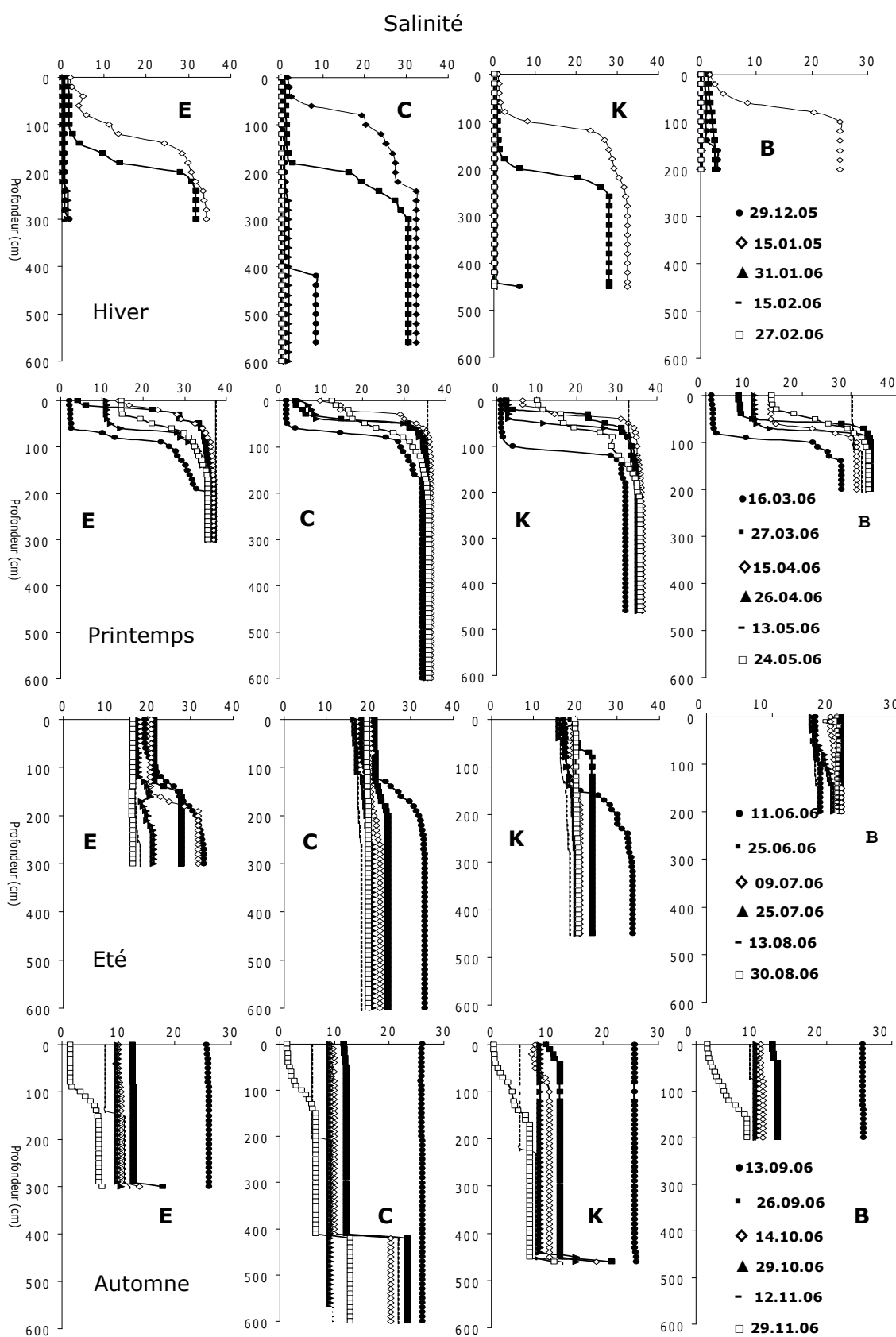


Figure 14b : Distribution verticale de la salinité dans les stations aval de l'estuaire du Mafrag en 2006.

3.2.2.3. Distribution spatiale de la salinité

Dans les milieux de transition, ouvert et à salinité variable, les conditions halines conditionnent le chimisme, la biologie et la distribution des peuplements estuariens. En raison de l'importance écologique qu'elle constitue et de sa forte variabilité dans un estuaire très dynamique, la salinité a été représentée dans trois formes de graphique afin de pouvoir faciliter l'interprétation.

3.2.2.3.1. El-Kébir

L'examen des données représentées sur les figures 15, 16, 17 permet de constater que l'estuaire a connu trois phases très distinctes.

(1) phase rivière. En période d'hiver l'estuaire fonctionne comme un véritable fleuve avec des salinités typiquement d'eaux douces. Les eaux salées accumulées antérieurement se trouvent entièrement entraînées à la mer : l'estuaire étant entièrement renouvelés et occupé par les eaux fluviales et les eaux de marécages avoisinants.

(2) phase estuaire à coin salé. Au printemps on assiste à la formation de coin salé où l'intrusion marine envahit l'ensemble de l'estuaire (fig. 15). De l'embouchure au Pk5 (station K4), on retrouve des salinités de fond typiquement marines. A partir de la station 5, la salinité de fond diminue graduellement pour atteindre 20 à la station K10. Parallèlement, la salinité de surface diminue fortement passant de 15 à l'embouchure à 0,10 à la station K10. L'estuaire à coin salé se caractérise par une forte halocline (fig. 16 et 17) séparant franchement les eaux de surfaces des eaux de fond salées. La profondeur de cette halocline ne dépasse pas 0,5 m et son épaisseur est de l'ordre de 0,1-0,2 m dans l'estuaire aval (Embouchure-station K3). A partir de K4 l'halocline s'enfonce régulièrement pour atteindre 1,20 m en même temps que son épaisseur augmente jusqu'à 1,20 m (fig. 17). Si l'enfoncement de l'halocline indique l'augmentation de la fraction d'eau douce, l'augmentation de son épaisseur souligne l'existence d'un certain mélange à l'interface eau superficielle coin salé. Ce mélange affecte donc la zone d'interface qui se limite à 0,2-0,5 m (fig. 16, 17) alors qu'à ce niveau spatial de l'estuaire, le coin salé reste franchement isolé et représente 60-85% de la colonne d'eau. Cet isolement aura certainement des répercussions à la fois sur le chimisme à l'interface eau sédiment et sur les échanges chimiques entre la couche de surface et les eaux salées du fond.

Sur un autre plan hydrodynamique, la phase estuaire à coin salé est caractérisée par de forts apports d'eau douce se diluant rapidement d'amont en aval. Le tableau 11 donne la distribution de la fraction d'eau douce le long de l'estuaire qui traduit également le pourcentage du mélange des eaux. Les valeurs des fractions en eau douce concordent avec la distribution spatiale et verticale de la salinité au sein de l'estuaire (fig. 16 & 17). On y remarque que l'eau douce ($S < 2$) superficielle occupe le haut estuaire, depuis le Pk8 jusqu'à la fin de la partie estuarienne alors que les eaux marines du fond ($S > 33$) occupent le bas et l'aval de l'estuaire, entre l'embouchure et le Pk4. Approximativement, l'eau douce représente 15-20% du volume total, ce qui correspond à environ 250 000 m³.

Tableau 11. Fraction d'eau douce (F%) en chaque point de l'estuaire d'El-Kébir en période de coin salé (avril 2006).

Stations	E	C	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10
F (%) Surface	62,3	74,1	82,5	86,8	86,5	90,3	94,8	95,9	97,8	95,9	97,3	98,6
F (%) Fond	0,54	1,88	2,15	3,23	4,03	5,38	13,9	20,9	31,1	27,4	28,7	45,1

(3) phase lagune fermée. De la fin juin jusqu'à la fin décembre, l'estuaire est resté déconnecté de la mer par suite de la fermeture de l'embouchure. Les apports en eaux douces sont négligeables et l'estuaire devient donc sous la double influence de l'atmosphère (évaporation, mélange sous l'action des vents) et du souterrain (apports par nappe) cependant que rôle des eaux de surfaces s'effacent pratiquement. Le mélange des eaux par l'action éolienne et l'évaporation ont pour effet l'augmentation de la salinité de surface (fig. 15, 16 & 17) et la diminution de celle de fond. En été la salinité des eaux de surface augmente conférant ainsi un caractère mésohalin à l'estuaire alors que la salinité du fond diminue jusqu'à 20-27, caractéristiques des eaux méso-polyhalines. Cette phase caractérise un estuaire bien mélangé en automne avec des eaux typiquement mésohalines $18 > S > 5$. D'autre part, il n'est pas exclu que les apports de sources immergées soient responsables de la diminution générale de la salinité de fond.

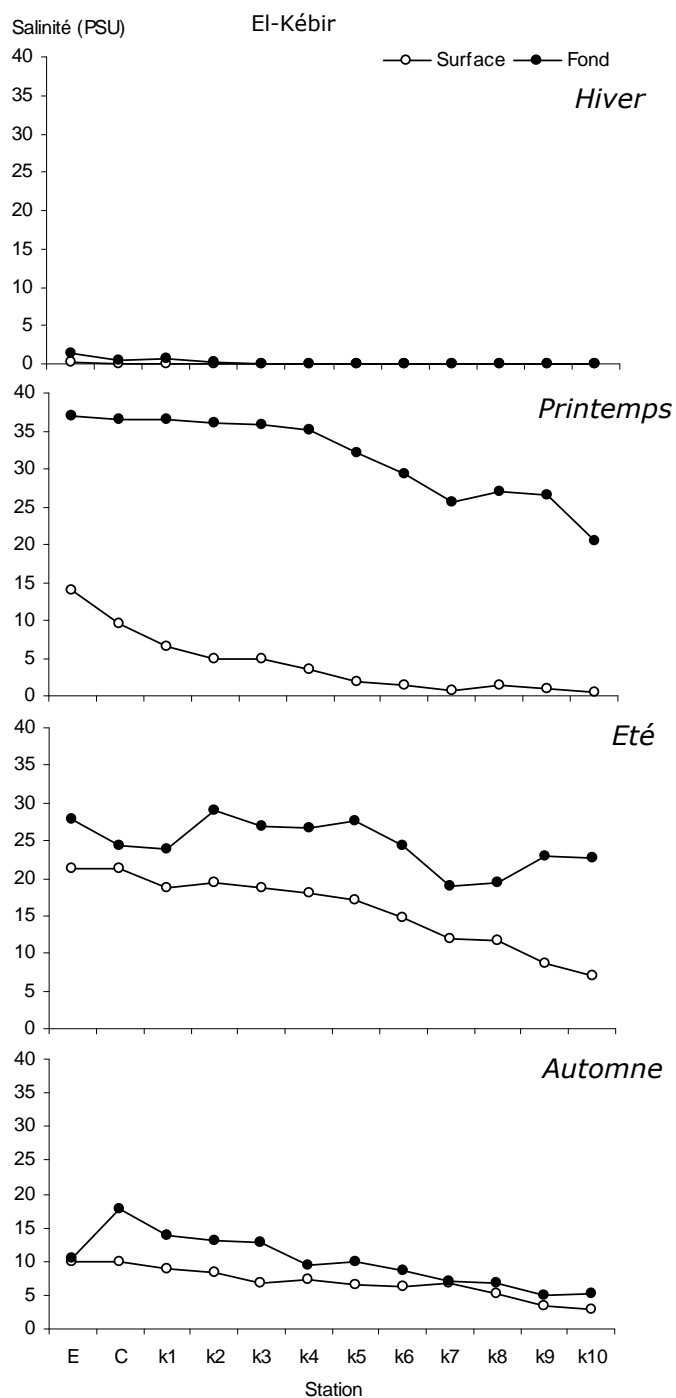


Figure 15. Distribution spatiale de la salinité de surface et de fond relevées lors des quatre campagnes saisonnières en 2006 dans la branche d'El-Kébir.

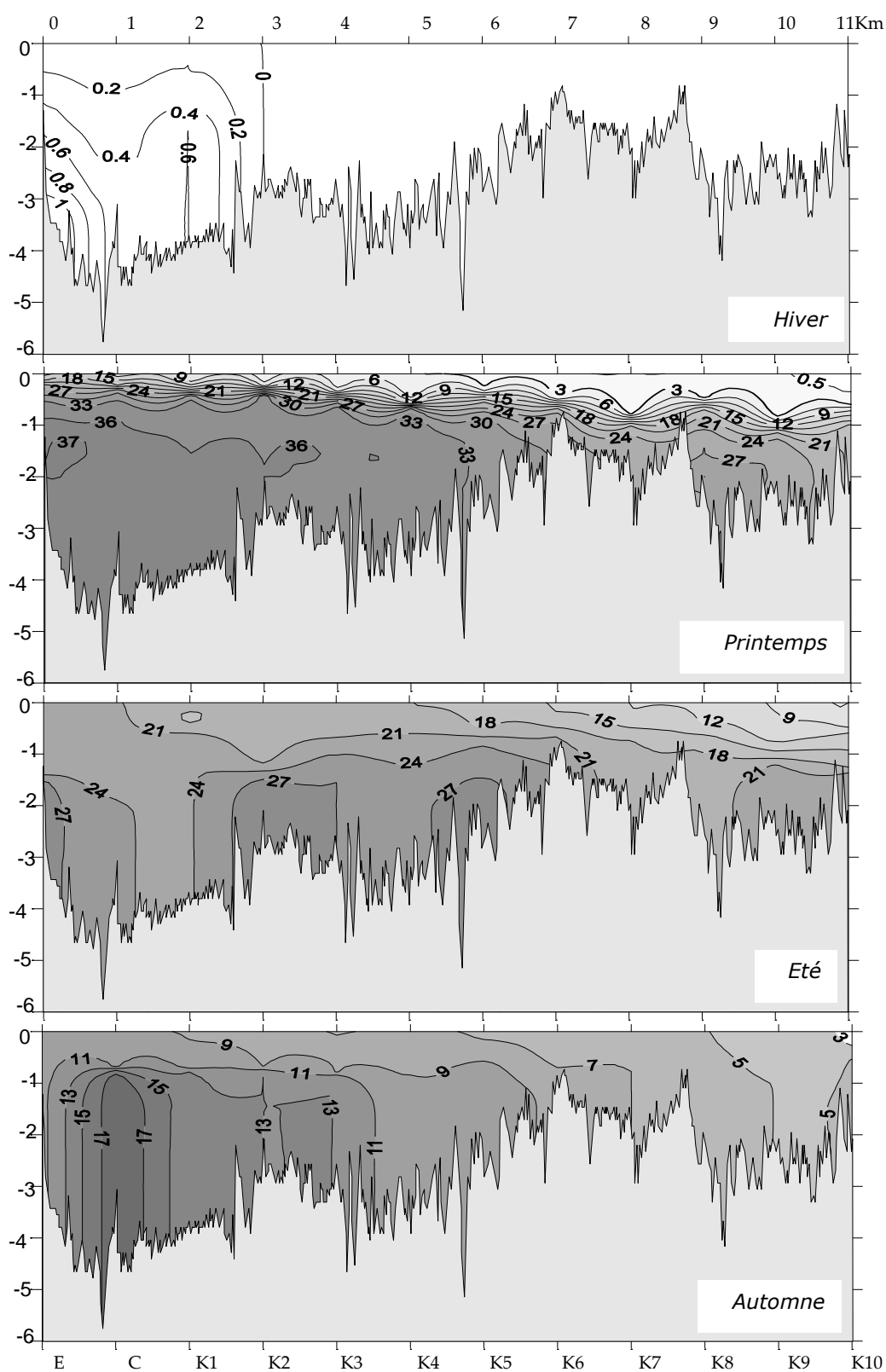


Figure 16. Distribution spatiale de la salinité entre l’embouchure et le point kilométrique 11 (Pk11) dans la branche de l’estuaire El-Kébir lors des quatre campagnes saisonnières en 2006.

El-Kébir

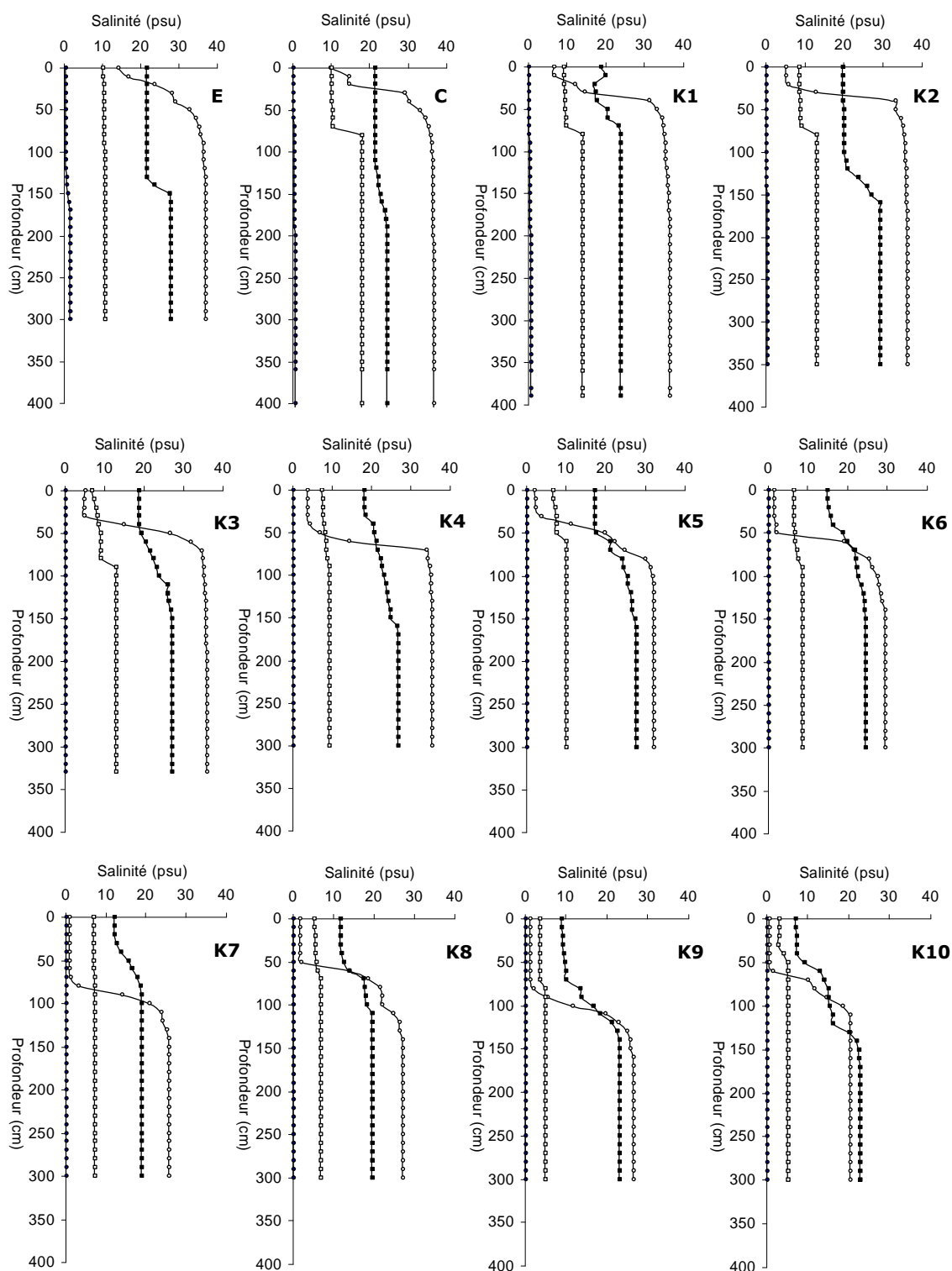


Figure 17. Distribution verticale de la salinité dans les stations étudiées de la branche de l'estuaire El-Kébir lors des quatre campagnes saisonnières en 2006. ● Hiver, ○ Printemps, ■ Eté, □ Automne.

3.2.2.3.2. Bounamoussa

Les conditions halines subissent les mêmes variations que celles de la branche d'El-Kébir avec l'existence de trois phases distinctes se succédant au cours des saisons. En hiver, les apports d'eau douce envahissent l'estuaire et font repousser le coin salé jusqu'à la mer. La marée étant ainsi masquée par l'importance du flux continental réduisant l'estuaire à un fleuve avec des salinités typiquement d'eau douce (fig. 18, 19 & 20). Au printemps, l'intrusion marine s'étend sur l'ensemble de l'estuaire et occupe la quasi-totalité de la colonne d'eau. Sous l'effet de ces apports marins, la salinité de surface reste élevée et configuration varie seulement de 15-10, passant de 15 en aval à 10 en amont de l'estuaire (fig. 18). La faible inertie de cette branche devant l'intrusion marine est due à la du lit peu profond et très large, comparé à la branche d'El-Kébir. De même, la salinité du fond reste comparable à celle de la mer jusqu'au Pk5 (station B4) et diminue à 27 en amont de l'estuaire (Pk8 : station B7). A la même distance à l'embouchure (Pk5, par exemple), l'eau de surface de la branche Bounamoussa est 5 fois plus salé que la branche d'El-Kébir. Au Pk8, la salinité de d'El-Kébir ne dépasse pas 2, alors qu'elle atteint 10 à Bounamoussa (fig. 18 & 19). Ces différences de salinités devront retentir différemment sur la biologie de l'estuaire. On peut supposer que le contingent biologique marin devrait avoir plus d'affinité pour la branche Bounamoussa.

Cette période de coin salé est également marquée par une forte stratification des eaux. L'halocline s'installe à 0,7-1,7 m selon la station et son épaisseur varie de 0,3-1,7 m. On peut remarquer (Fig. 19) que la stratification et la rigidité de l'halocline augmentent avec la profondeur. Néanmoins, bien que profonde, la station B7 présente des eaux plus mélangées pour la tranche d'eau 0,8-2 m.

D'autre part, on estime que les eaux de surface de Bounamoussa recèlent beaucoup moins d'eau douce (64 -74%) qu'El-Kébir (tab. 12). On peut constater aussi que la profondeur joue un rôle principal dans la sensibilité à l'intrusion marine. Les données représentées dans le tableau 12 et les figures 18 et 19 montrent que les stations peu profondes (B2 et B3) recèlent moins d'eau douce en raison de leur faible résistance aux intrusions marines.

Tableau 12. Fraction d'eau douce (F%) en chaque point de l'estuaire de Bounamoussa en période de coin salé (avril 2006).

Stations	E	C	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
F (%) Surface	5,11	55,11	63,98	62,10	62,37	66,13	69,62	71,51	73,66
F (%) Fond	0,27	2,15	16,13	10,48	4,57	16,67	19,09	21,51	29,03

Lorsque l'on passe à la phase de la fermeture de l'estuaire, la stratification commence à s'estomper en été et disparaît totalement en automne (fig. 19 & 20). En l'absence de marée, la faible inertie de la masse d'eau subit facilement l'action du vent sur toute la colonne d'eau, rendu entièrement homogène pour la salinité. L'ensemble de l'estuaire étant ainsi mélangé avec une salinité identique (10) typiquement mésohaline (fig. 19 & 20). Par ailleurs, la diminution de la salinité à seulement 10 peut être le fait des apports souterrains car les apports d'eau continentale sont pratiquement nuls.

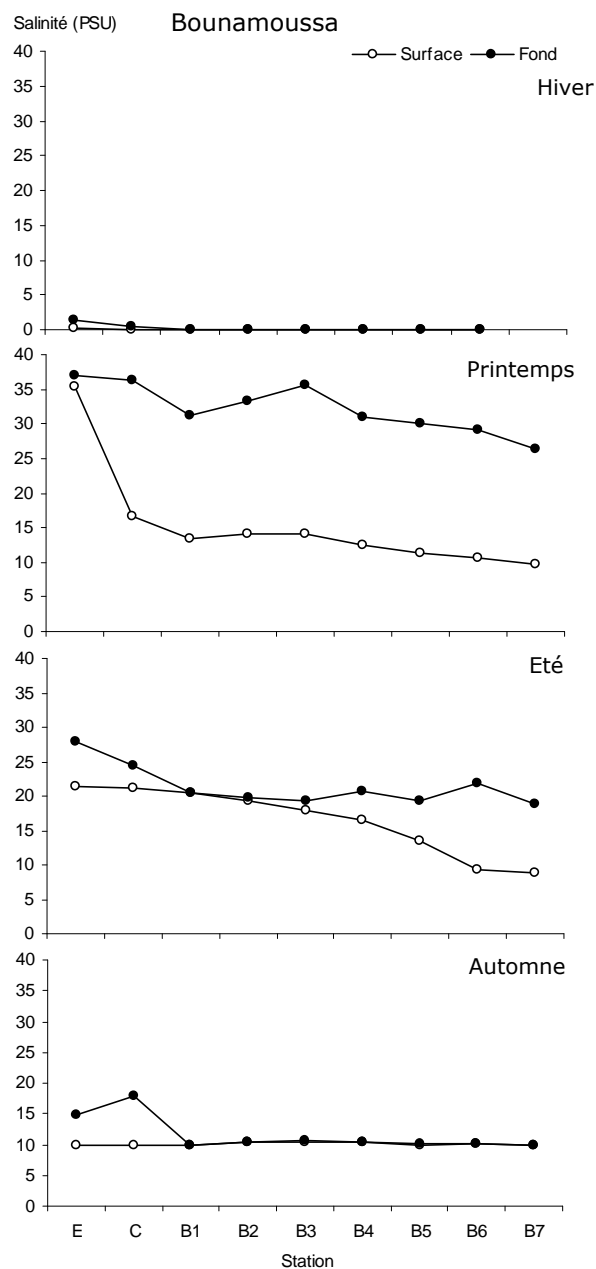


Figure 18. Distribution spatiale de salinité de surface et de fond relevées lors des quatre campagnes saisonnières en 2006 dans la branche Bouamoussa.

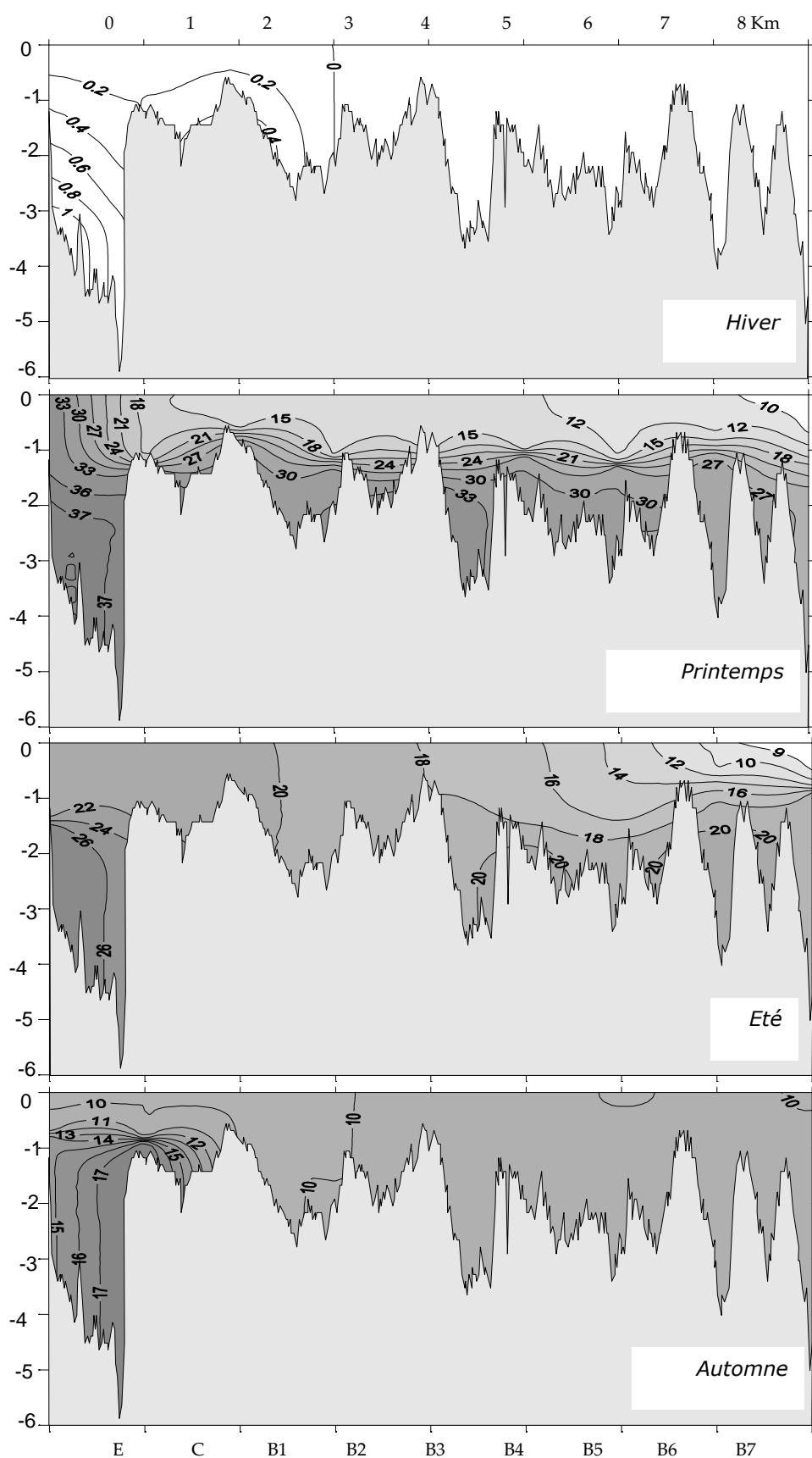


Figure 19. Distribution spatiale de la salinité entre l'embouchure et le point kilométrique 8 (Pk8) dans la branche de l'estuaire Bounamoussa lors des quatre campagnes saisonnières en 2006.

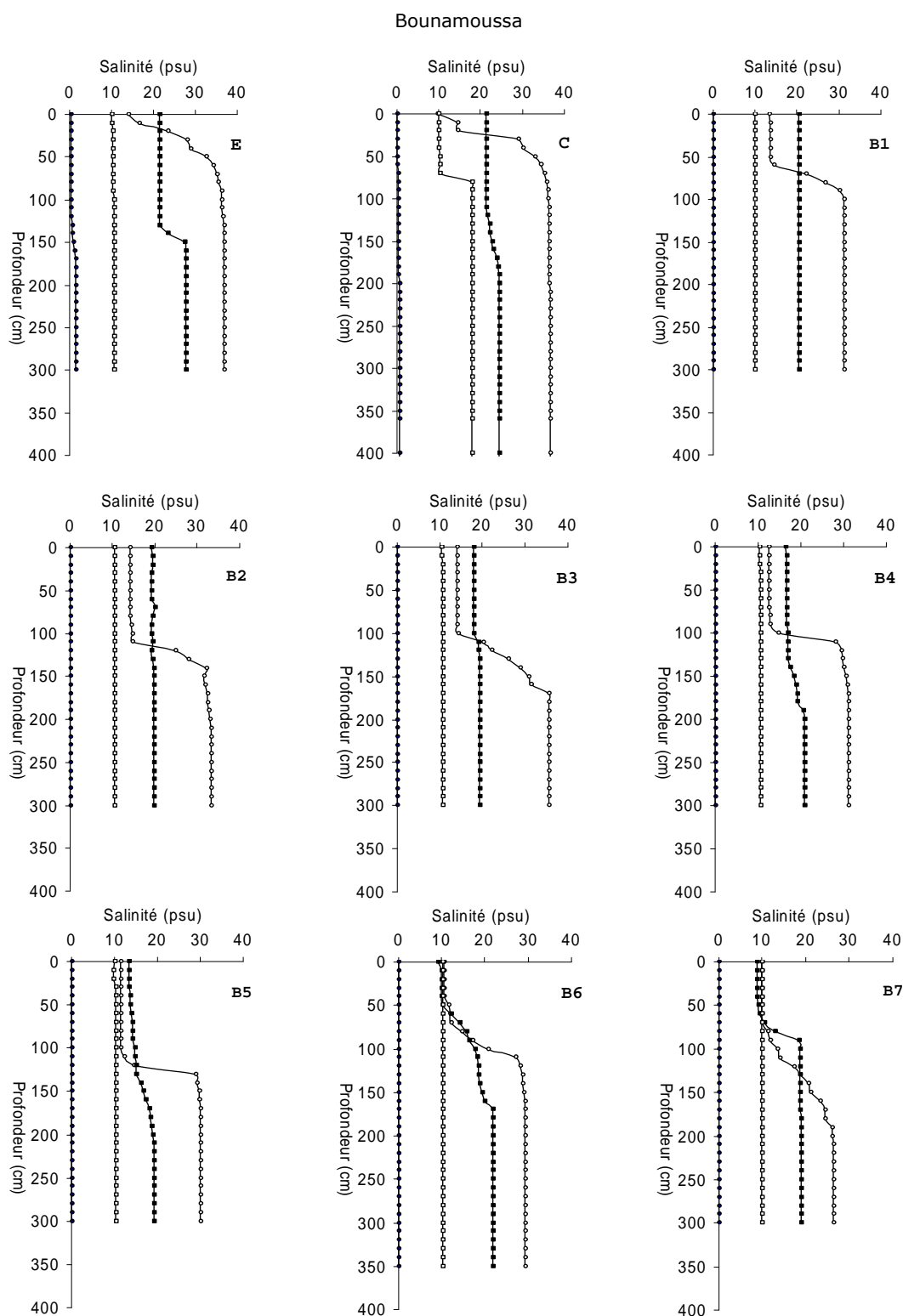


Figure 20. Distribution verticale de la salinité dans les stations étudiées de la branche de l'estuaire Bouamoussa lors des quatre campagnes saisonnières en 2006. ● Hiver, ○ Printemps, ■ Été, □ Automne.

4. Matières nutritives minérales & organiques

4.1. Variations saisonnières des sels nutritifs dans l'estuaire aval

A l'exception du silicium pour la fraction minérale dissoute, la chlorophylle a et la matière en suspension pour le particulaire. Les résultats de l'année 2005 relatives à l'estuaire aval sont détaillés dans la publication de Ounissi *et al.* (2009) insérée à la fin de ce chapitre.

4.1.1. Nitrates

Les fortes teneurs en nitrates caractérisent les eaux côtières soumises aux influences dulçaquicoles. L'ion nitrique provient également de l'oxydation d'ammonium par les bactéries nitrifiantes lorsque l'eau est bien oxygénée. Son abondance indique une bonne oxygénation de l'eau tandis que sa raréfaction en milieu estuarien peut être attribuée à la déficience en oxygène dissous où a une importante dilution marine.

Les teneurs en nitrates ont beaucoup varié avec la saison (0,12 à 52 μM) mais restent globalement élevées, traduisant la richesse des eaux du système estuarien (fig. 21). Les plus fortes concentrations sont relevées en automne par suite d'apports supplémentaire d'azote d'origine agricole. Dans la région, les amendements de terrains agricoles par les engrais se font en effet en automne. Les eaux s'appauvrissent en été par suite de la dominance des intrusions marines pauvres d'une part et de la diminution des apports d'eau douce en cette période d'étiage d'autre part. Les eaux de surface sont toujours plus chargées en nitrates (10,5-16 μM en moyenne, selon la station, (fig. 21) que les eaux du fond (4,71-10 μM en moyenne) et reflètent la forte influence continentale à ce niveau. Excepté les teneurs élevées des eaux de fond enregistrées pendant les périodes de crue où l'écoulement est franchement en phase rivière (27 février 2006 et 12 décembre 2006). Les eaux du fond restent pauvres en nitrate en particulier en été. La faible teneur en azote oxydé des eaux du fond semble être dû à l'établissement de conditions de mauvaises oxygénations dans le compartiment benthique.

Sur le plan spatial, les tributaires de la Mafrag, au point de leur confluence ou à l'embouchure, on observe (fig. 21) la même tendance ainsi que le même ordre de teneurs en nitrates. Toutefois, les concentrations augmentent quelque peu à la confluence et à l'embouchure par suite des apports cumulés des tributaires.

4.1.2. Nitrites

Dans le cycle de l'azote, les ions nitrites sont les intermédiaires entre l'azote ammoniacal et les ions nitrates. En général, cette forme est minoritaire par rapport aux autres formes d'azote inorganique.

L'évolution saisonnière des teneurs en nitrites suit sensiblement celles des nitrates avec une forte valeur en automne et un appauvrissement généralisé en été (fig. 22). La valeur maximale de 10 μM est relevée en septembre de la première année de suivi à la station El-Kébir. Alors que la concentration minimale de 0,05 μM est décelée dans la même station le 16 mars 2006. Les ions nitrites sont présents en faibles quantités (1,6 à 3,4 en moyenne) formant ainsi un petit stock convertible d'azote minéral. Les nitrites forment une fraction de 12% de l'azote minéral total. Dans l'ensemble des stations, les ions nitreux suivent les mêmes fluctuations, marquée par un pic en automne.

Les eaux du fond bien que moins riches en nitrites que les eaux de surface, semblent s'approvisionner par les largages sédimentaires par suite des processus d'oxydation de l'ammonium, très abondant au niveau du fond.

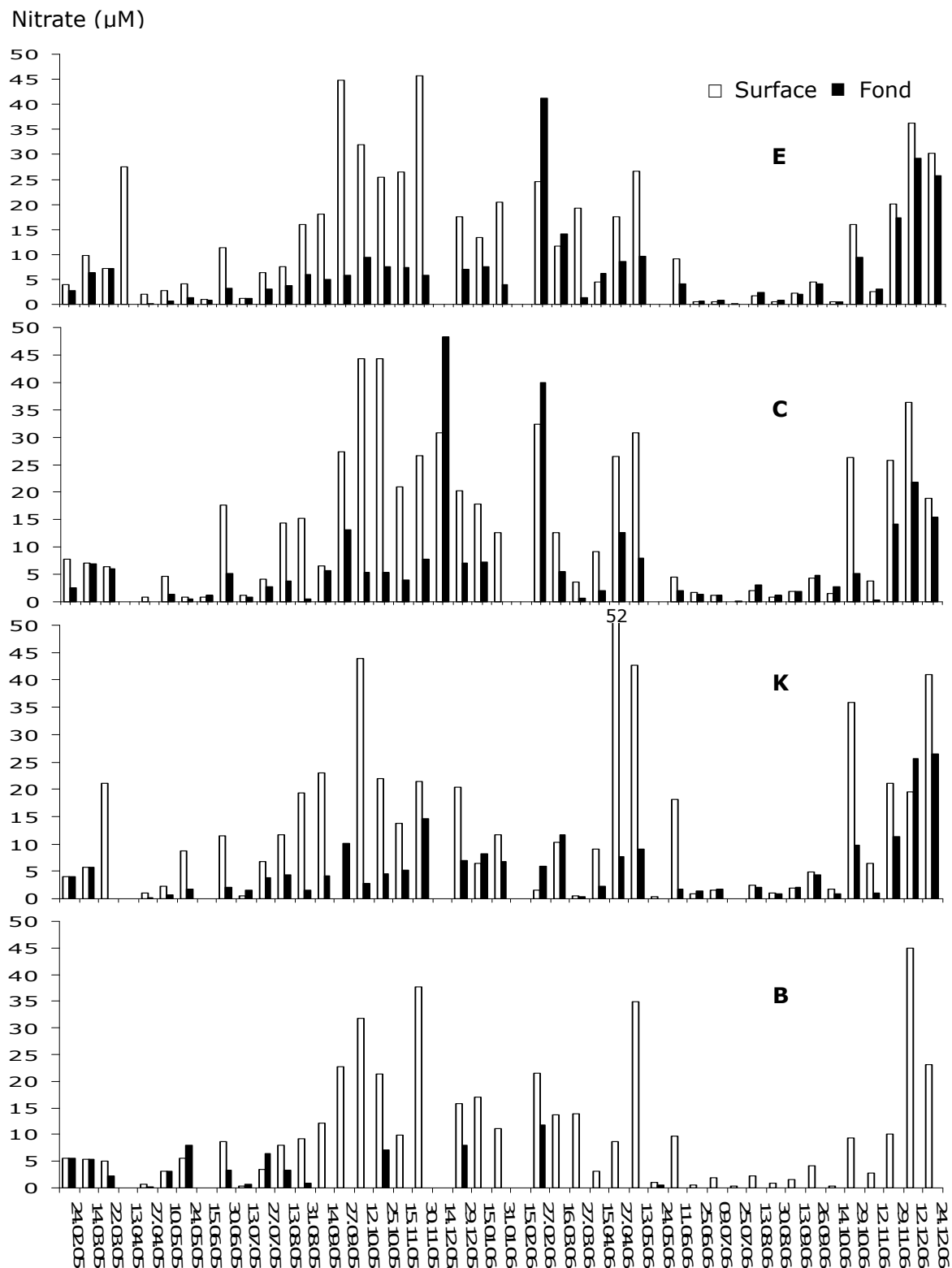


Figure 21. Variations saisonnières des teneurs en nitrates (NO_3^-) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 24 février 2005 – 24 décembre 2006.

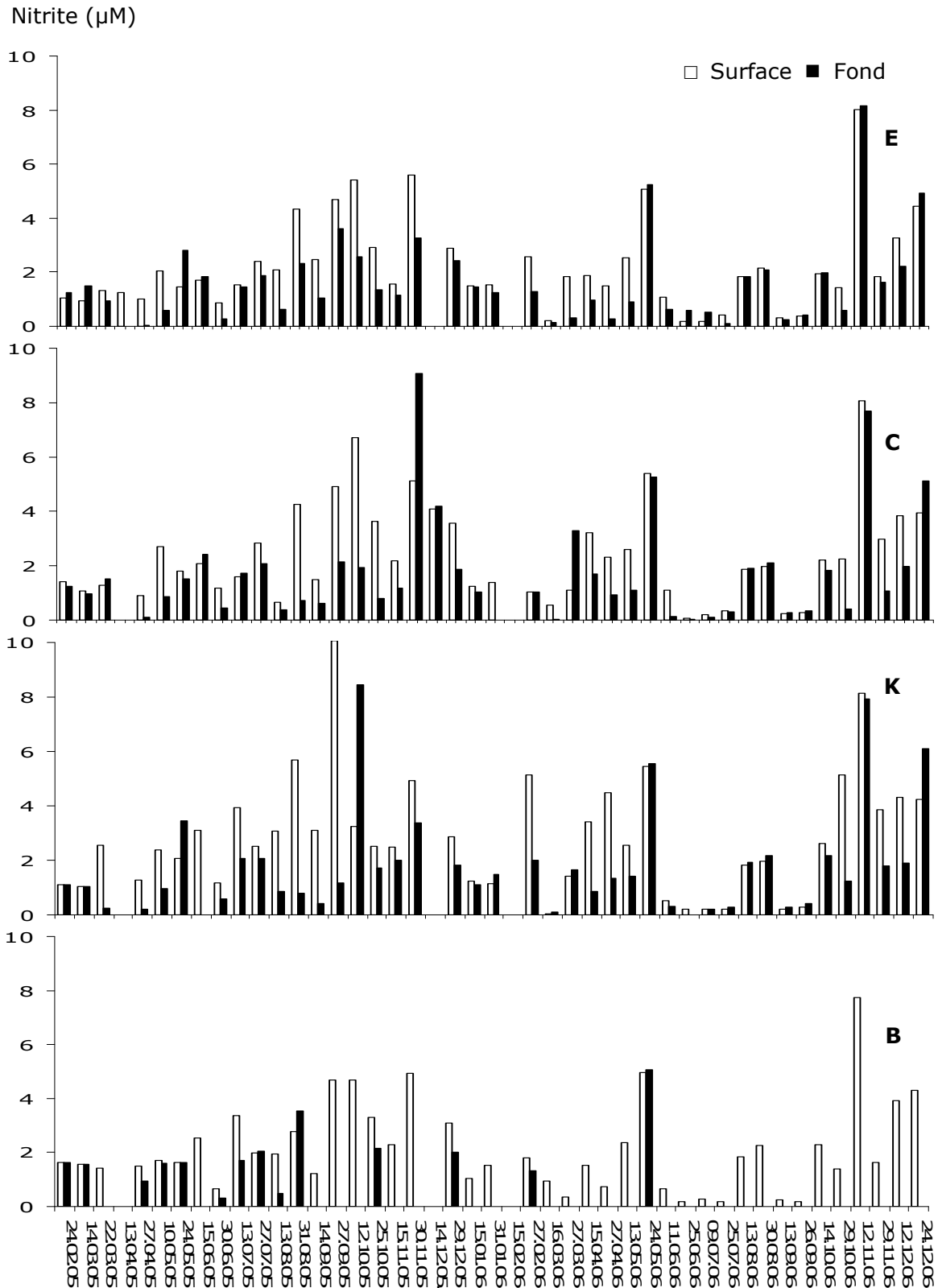


Figure 22. Variations saisonnières des teneurs en nitrites (NO_2^-) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 24 février 2005–24 décembre 2006.

4.1.3. Ammonium

Les ions NH_4^+ constituent la forme réduite des composés minéraux azotés. Ils sont peu représentés dans les milieux ouverts (Océan et cours d'eau), préférentiellement utilisés par les microphytes.

Les eaux du système estuarien du Mafrag sont très riches en ammonium (10-15 μM en moyenne, selon la station) en particulier en hiver (jusqu'à 83 μM) et au printemps par suite d'importants apports continentaux (jusqu'à 46 μM , figure 23). Des teneurs anormalement élevées (jusqu'à 130 μM) sont enregistrées en relation semble-t-il avec la fertilisation des terrains agricoles pour les cultures de légumes d'été.

En été le stock de cette forme d'azote réduit s'atténue (fig. 23) mais n'arrive pas à l'épuisement comme se produit dans les milieux estuariens ouverts. Les teneurs restent élevées même dans les eaux du fond exprimant ainsi des conditions de mauvaises oxygénations dans le sédiment. L'importance du stock dans les eaux du fond semble refléter incontestablement un fort largage à partir du sédiment, devenu réducteur par suite de l'isolement hydrologique des eaux du fond. Le mauvais renouvellement de la masse d'eau profonde, suppose la dominance des conditions d'hypoxie favorisant le largage de formes chimiques réduites à partir du sédiment, très riche en matière organique par ailleurs. La richesse des eaux en ammonium ne s'étend pas aux conditions de pollution puisque les valeurs restent souvent inférieures à la valeur norme (19 μM) pour les eaux de surface, comme on peut le remarquer à la figure 23.

Ammonium (μM)

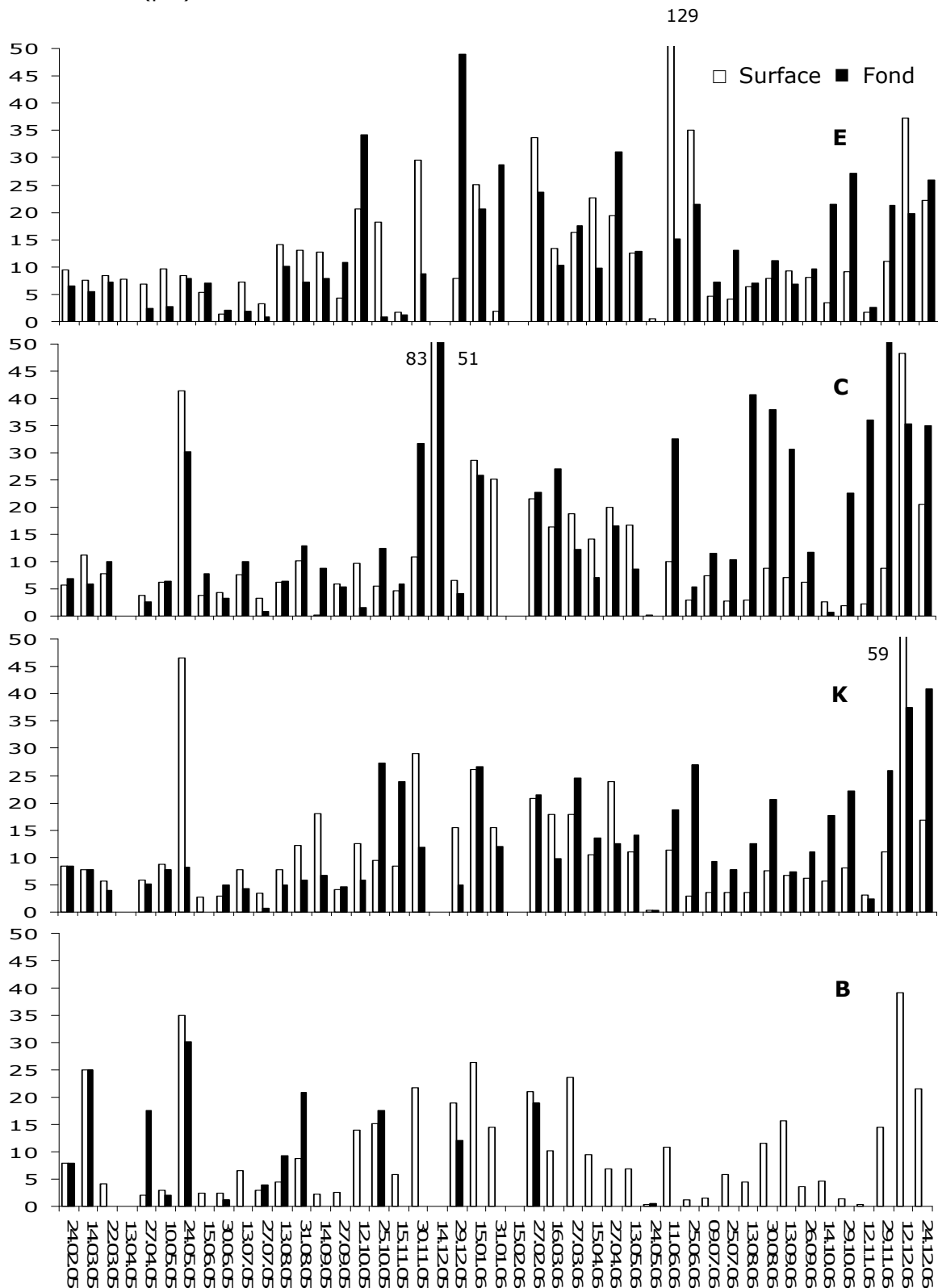


Figure 23. Variations saisonnières des teneurs en ammonium (NH_4^+) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 24 février 2005–24 décembre 2006.

4.1.4. Phosphates

Dans l'estuaire, et à l'exception des quelques valeurs élevées enregistrées dans l'ensemble des stations durant des deux années de suivi (fig. 24), les teneurs des ions phosphates sont comprises entre 0,50 et 7 μM . En ce qui concerne la répartition verticale, parfois les eaux du fond semblent être plus riches, comparées à celles de surface. Cette allure est surtout constatée dans le Kébir et à l'embouchure alors qu'à la confluence les teneurs varient très sporadiquement. Pour la station de Bounamoussa, les difficultés pratiques nous ont empêché d'échantillonner le fond (fig. 24) mais l'ordre des teneurs reste sensiblement comparable à celui des autres stations.

Globalement, les teneurs en ions phosphates ne reflètent pas une tendance saisonnière bien claire, et que les eaux de l'estuaire ne sont pas polluées par cet élément puisque la valeurs rencontrées sont très souvent inférieures à la norme (9 μM pour les eaux de surface).

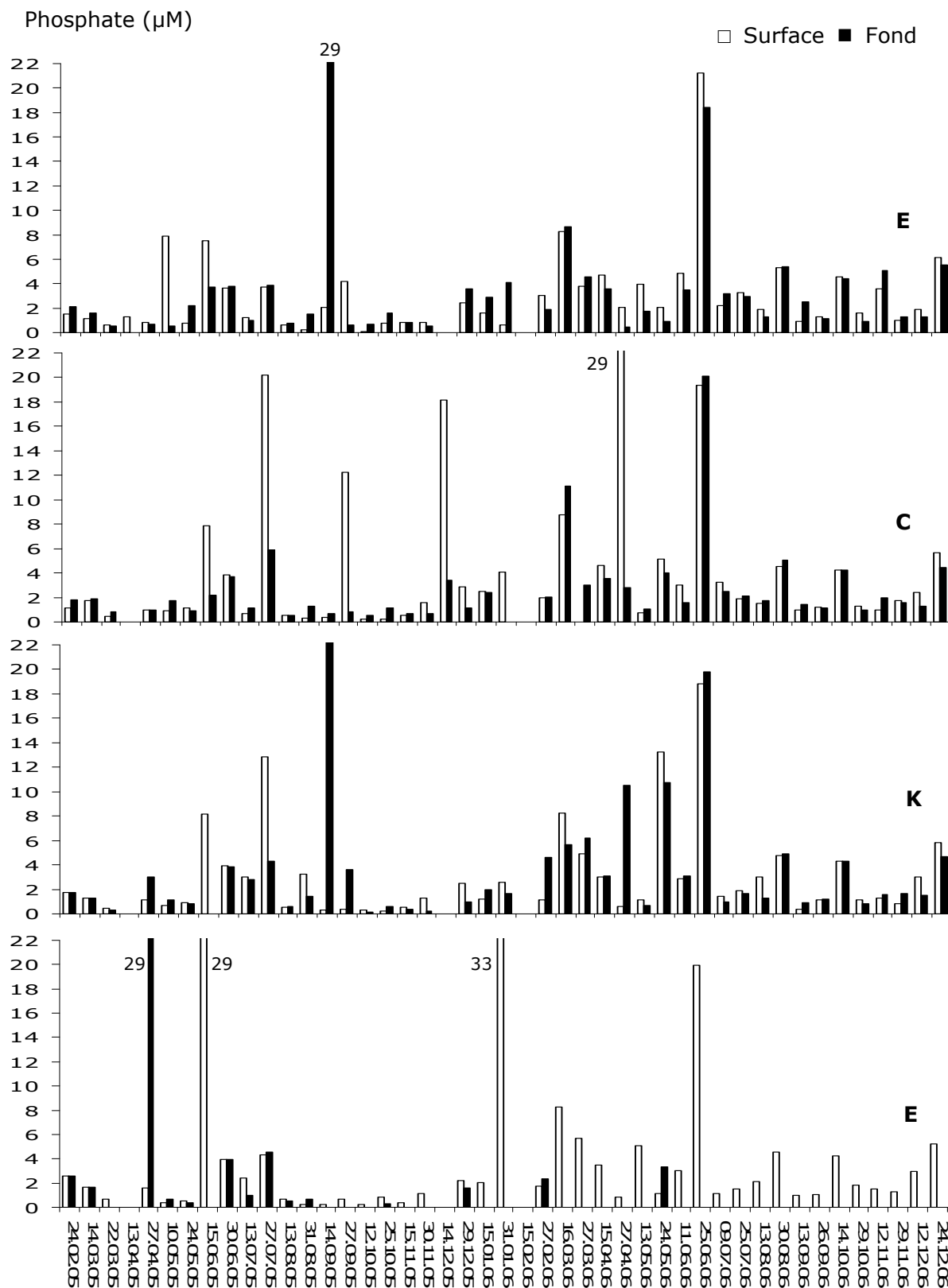


Figure 24. Variations saisonnières des teneurs en phosphate (PO_4^{3-}) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période du 24 février 2005 au 24 décembre 2006.

4.1.5. Silicates

Le silicium est un autre élément aussi important que l'azote et le phosphore. Il peut même devenir un facteur limitant de la fertilité d'un écosystème lorsqu'il recèle de forts peuplements de diatomées.

Contrairement aux autres éléments d'origine quasiment anthropique, le suivi bimensuel de la répartition du silicium dans l'estuaire n'a concerné que l'année 2006. Le profil de variations est similaire dans les quatre stations (fig. 25), montrant une première augmentation en plein printemps et une seconde en automne ayant respectivement pour origine semble-t-il la crue d'avril et les crues des premières pluies de l'automne dans la région.

Les eaux de surface sont souvent bien chargées que celle du fond sauf les teneurs décelées au niveau de la confluence durant le mois d'août, le 12 novembre et le 24 décembre. A l'échelle de l'estuaire les concentrations ont beaucoup varié (7,51 à 305 μM) avec une moyenne de l'ordre de 50 μM . Pour ce qui est des deux tributaires, le parcours de la branche d'El-Kébir semble être envahit une plaine de faciès riche en silice.

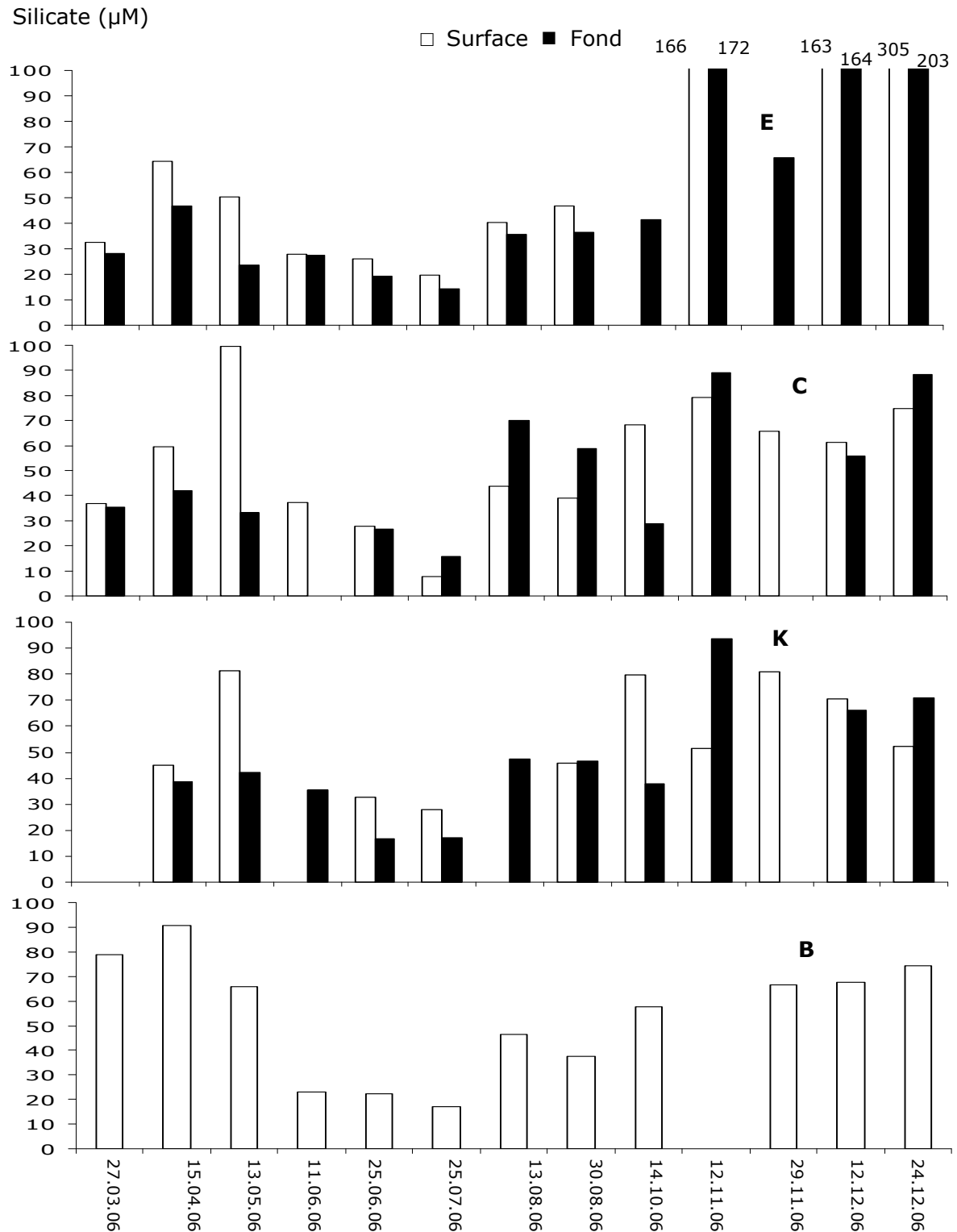


Figure 25. Variations saisonnières des teneurs en silicate $\text{Si}(\text{OH})_4$ dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période du 27 mars 2005 au 24 décembre 2006.

4.2. Variations saisonnières de matières organiques dans l'estuaire aval

Pour ce qui est des nutriments organiques, que se soit particulaire ou dissoute, leurs abondances ainsi que leurs répartition joue un rôle important dans les cycles biologiques et géochimiques. D'une part, une partie de ces molécules organiques servent également comme source de nourriture non négligeable pour la faune. D'autre part, la richesse organique reflètent directement la productivité des milieux ainsi que le degré de conversion de la fraction minérale.

4.2.1. Azote organique dissous

L'azote organique dissous est présent principalement sous forme d'urée, d'acides uriques, d'enzyme, de protéines et de leurs dérivés (acides aminés) qui représentent la majeure partie de la matière organique azotée. L'origine du NOD est essentiellement endogène dont la fraction planctonique y contribue pour l'essentiel. La lyse des cellules phytoplanctoniques et les déchets métaboliques zooplanctoniques (urée notamment) constituent des sources majeurs de NOD dans l'estuaire.

Les teneurs en NOD ont varié fortement entre 0,04 et 1,46 mg.l⁻¹ au cours des saisons comme on peut le remarquer à la figure 26. La première année de suivi montre une nette supériorité par rapport à l'année suivante. Cette différence est liée avec la période de fermeture et d'ouverture de l'embouchure. Les valeurs les plus faibles sont observées entre mai et juin alors que le maximum est noté à la fin de l'été et en automne. Les eaux du fond sont souvent plus riches que les eaux de surface en particulier en été et en automne où la masse d'eau profonde est franchement isolée.

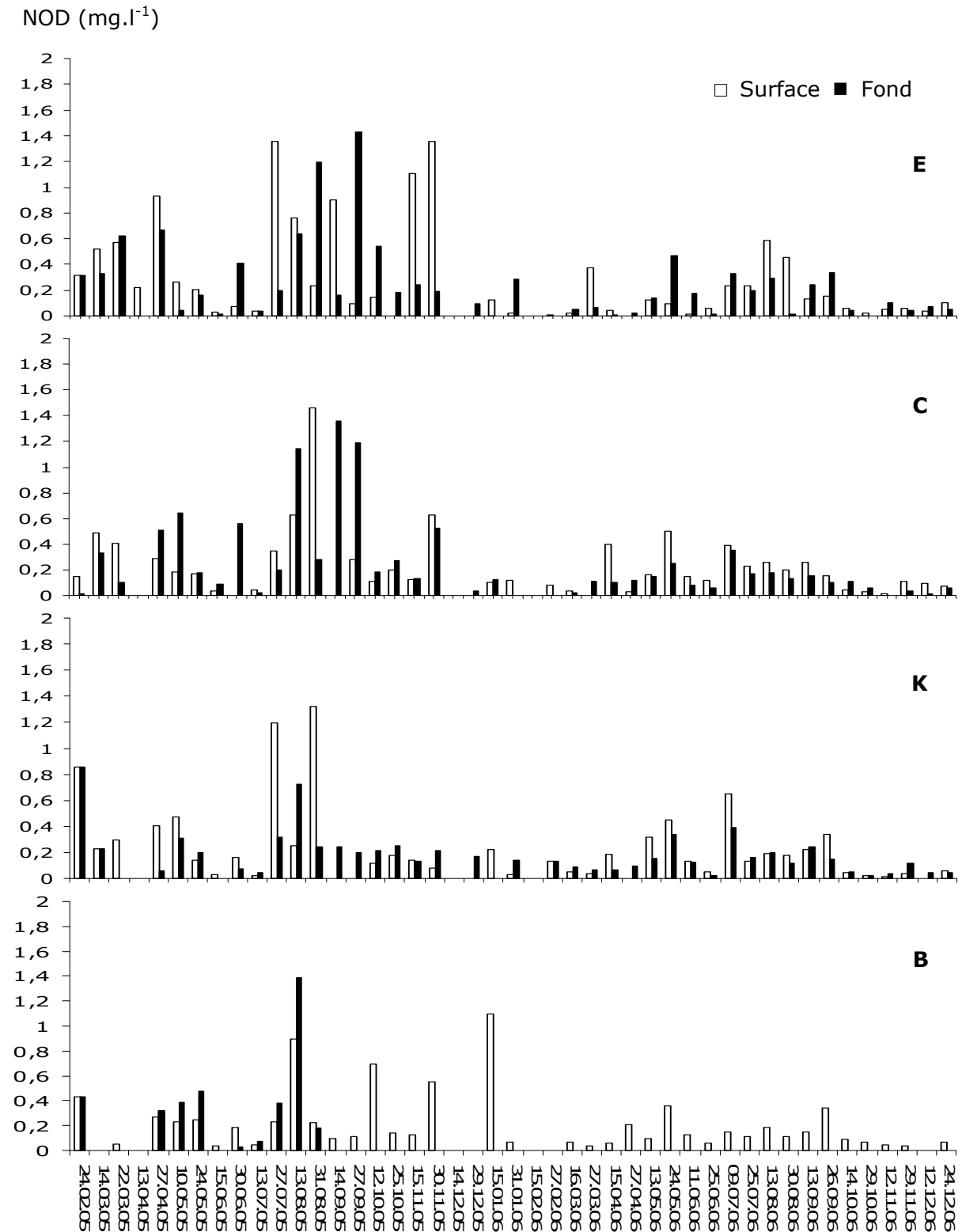


Figure 26. Variations saisonnières des teneurs en azote organique dissous (NOD) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période du 24 février 2005 au 24 décembre 2006.

4.2.2. Chlorophylle *a*

La concentration de la chlorophylle *a* représente un paramètre de base dans le suivi de l'état de trophie des milieux et la compréhension des phénomènes écologiques des écosystèmes aquatiques. Le dosage biochimique de la fraction phytoplanctonique a été effectué seulement durant une année (2006). La biomasse chlorophyllienne (Chl*a*) constitue un stock important tout le long des saisons avec des valeurs moyennes variant selon la station entre 3-24 mg.m⁻³ (fig. 27). La production phytoplanctonique maximale est enregistré en hiver et au printemps. Notons que les plus grandes valeurs peut être relevés en surface comme au fond. C'est en février à l'embouchure et en juin à El-Kébir ou on trouve respectivement des teneurs de 43 et 17 mg.m⁻³. Dans la colonne d'eau, les concentrations en Chl*a* des eaux de fond sont souvent supérieures à celle de surface. Globalement, les résultats de suivi bimensuel des quatre stations ne montrent pas une tendance claire de répartition dans l'espace et le temps.

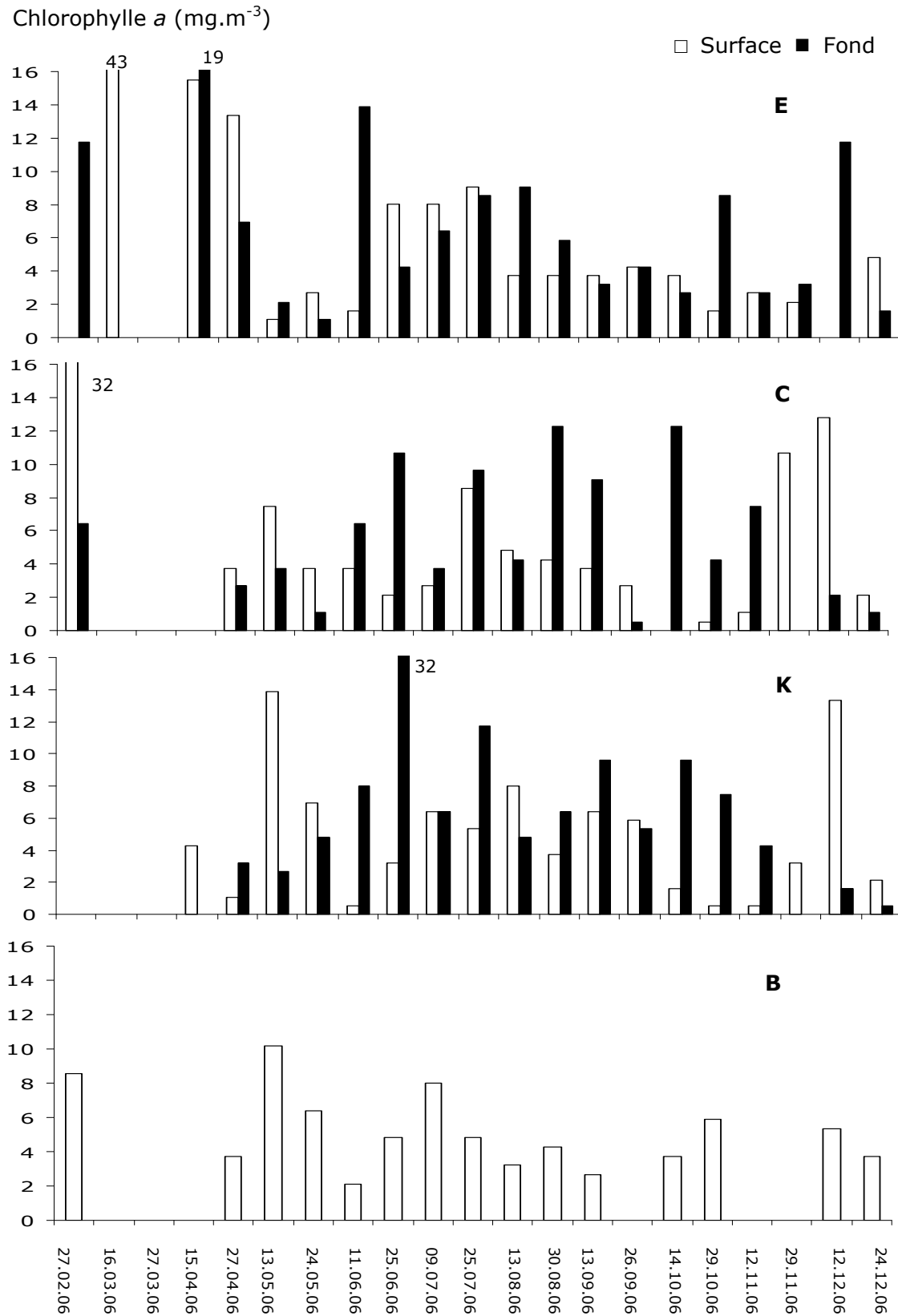


Figure 27. Variations saisonnières des teneurs en chlorophylle a (Chla) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 27 février - 24 décembre 2006.

4.2.3. Matières en suspension & carbone organique particulaire

La fraction particulaire joue un rôle important dans les cycles biologiques et géochimiques. D'une part, les particules réduisent la transparence de l'eau et de ce fait la production primaire photosynthétique. D'autre part elles présentent une surface de contact pour les échanges physico-chimiques.

L'évolution des quantités de matières en suspension (MES) dans l'ensemble des stations montre de grandes variations sans pouvoir mettre en évidence une tendance saisonnière claire (fig. 28). Les valeurs observées ont fluctué entre 1 et 298 mg.l^{-1} . A l'exception de quelques concentrations de surface, sporadiquement élevées, la moyenne de la charge dans les masses profondes est toujours oscille autour de 100 mg.l^{-1} . Il est à souligner que les eaux les plus turbide sont celle de la confluence et de la branche El- kébir, viennent en troisième ordre la station marine et a un degré moins la Bounamoussa. Cette situation semble être expliquée par l'importance de la profondeur d'une part et l'emplacement des stations vis-à-vis de l'influence conjuguées de la marée et la grandeur du module d'écoulement en eau douce d'autre part. Contrairement à la répartition de la chlorophylle et la matière en suspension, le carbone organique particulaire (COP) suivent une tendance spatio-temporelle bien nette (fig. 29). En effet, deux pics paraissent bien distincts, un maximum automnal et un printanier moins accusé, et que les teneurs de fond sont plus importantes que celle de surface. Une telle distribution est en relation avec le faible hydrodynamisme et la forte stratification de la colonne d'eau. Les concentrations varient entre 0,06 et 20,43 mg.l^{-1} avec une moyenne de 6 mg.l^{-1} . Les variations sont aussi bien marquées entre saisons qu'entre stations, et que les valeurs les plus élevées sont observées durant l'automne. L'hiver est la saison où la fraction particulaire se raréfie, cette diminution semble avoir une relation directe avec le régime hydrologique de cette époque de l'année.

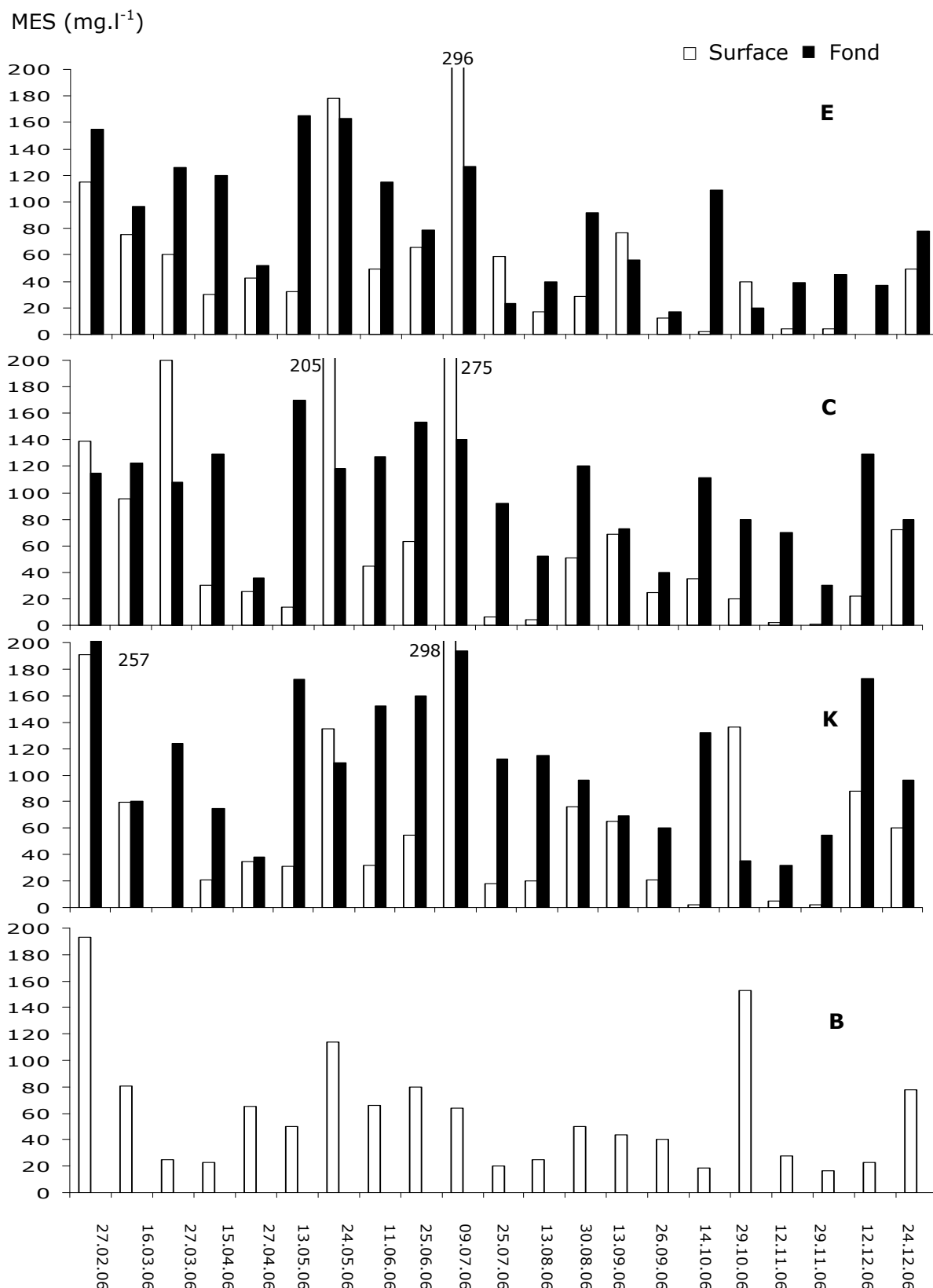


Figure 28. Variations saisonnières de la matière en suspension (MES) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période 27 février - 24 décembre 2006.

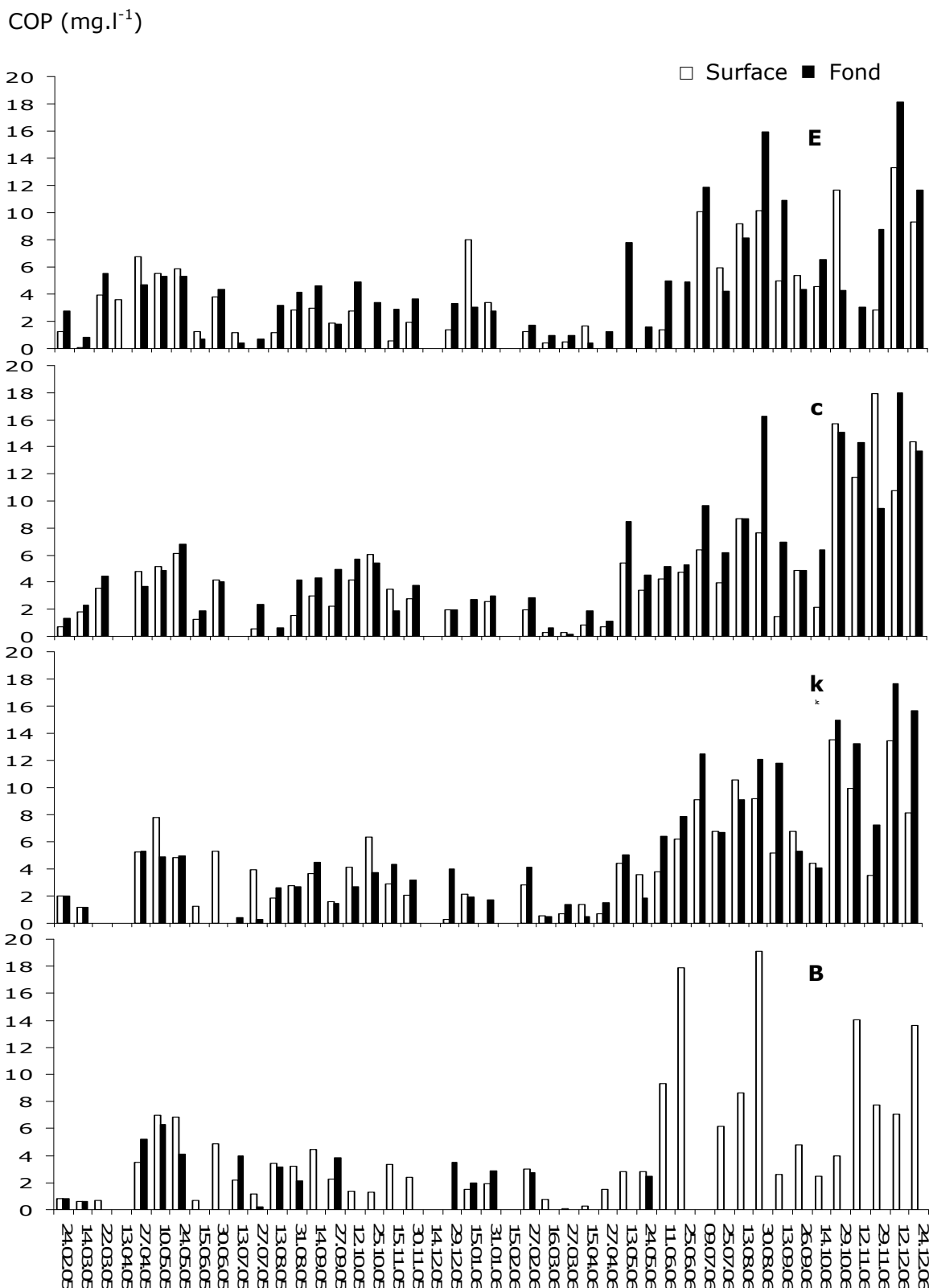


Figure 29. Variations saisonnières des teneurs en carbone organique particulaire (COP) dans les eaux de surface et du fond dans le système estuarien du Mafrag pour la période du 24 février 2005 au 24 décembre 2006.

4.3. Variations spatiales des sels nutritifs

4.3.1. El-Kébir

4.3.1.1. Azote minéral

En période d'ouverture à la mer, les teneurs de l'azote inorganique dissous (NID) sont élevées variant en moyenne entre 30 μM en hiver et 60 μM au printemps (tab. 13 & fig. 30) dans le bras d'El-Kébir. A l'estuaire aval (confluence et embouchure), les teneurs diminuent de 30% en raison des apports de Bounamoussa, moins fertiles.

Si les variations saisonnières de l'azote minéral sont très nettes, la distribution spatiale ne montre pas la tendance classique à la diminution d'amont en aval de l'estuaire, eu égard aux gradient d'enrichissements par les apports continentaux. De plus, bien que les conditions hydrologiques soient sensiblement homogènes dans l'ensemble de l'estuaire en période hivernale, l'azote minéral montre en revanche une distribution différentielle, indépendante de la salinité, ce qui souligne son comportement non conservatif. Il est aussi curieux de pouvoir constater que même en période de forte stratification haline au printemps, les teneurs des différentes formes de l'azote minéral des eaux superficielles restent remarquablement comparables à celles du coin salé. Les teneurs en ammonium des eaux du fond sont cependant quelque peu supérieures à celles de surface. L'ammonium particulièrement abondant en cette époque de l'année, est la forme dominante dans les eaux du fond représentant 70% en hiver et 41% au printemps. Les teneurs en nitrate augmentent au printemps d'un facteur de 6 cependant que celles de l'ammonium restent du même ordre que l'hiver (tab. 13). On constate d'autre part que les ions nitrates se répartissent de façon homogène dans la colonne d'eau. Cette distribution traduit une bonne oxygénation des eaux en cette époque de l'année. Les nitrites, forme minoritaire de l'azote minéral (5-11%), montrent une distribution comparable à celle des ions nitrates. Dans l'estuaire aval (embouchure et confluence), l'azote minéral montre une forte stratification avec des valeurs comparables à celles que l'on trouve dans le bras d'El-Kébir (tab. 13, fig. 31).

Lorsque l'on passe à la période de fermeture de l'estuaire en été, l'environnement physico-chimique change profondément et l'on assiste à une diminution générale de l'azote minéral. N'étant pas entretenu par les apports continentaux, devenus pratiquement nuls, la cinétique du stock en sels azotés ne dépend donc que de la consommation et de régénération biologiques. Il semble

que la régénération l'emporte sur la consommation puisque les teneurs restent assez élevées. L'azote minéral dépend donc de l'activité biologique et suit ainsi un comportement strictement non conservatif. L'azote oxydé disparaît quasi-totalement alors que la forme réduite (l'ammonium) domine avec d'assez fortes teneurs, variant en moyenne entre 6 μM en surface et 12 μM au fond (fig. 30, tab. 13). La prépondérance de l'ammonium implique le comportement fortement réducteur du milieu et suppose l'existence de conditions d'anoxie régnant la masse d'eau. La stagnation des eaux en cette phase lagunaire, encourage l'établissement de telles situations d'anoxie du fond. Dans l'espace, les teneurs varient amplement d'une station à l'autre mais l'on peut remarquer que les valeurs élevées se rencontrent dans les stations plus profondes (C, K2, K4, K5). La reconstitution du stock commence en automne avec de fortes teneurs en nitrates (16-42 μM) parvenant incontestablement d'apports agricoles (fig. 30, tab 13). L'origine terrestre peut être illustrée par la diminution d'amont en aval des teneurs, passant de 42 μM à la station K10 à seulement 16 μM à l'embouchure. Le stock du NID est également haussé par l'introduction de l'azote ammoniacal représentant une fraction de 21% en surface et 44% en profondeur. Il s'agit d'un apport d'activité agricole sous forme de nitrate d'ammonium ($\text{NH}_4\text{-NO}_3$), largement utilisé dans les amendements de terrains, en cette saison d'intense activité agricole. La réserve en NID se trouve également entretenue par les ions nitrites contribuant avec une fraction de 10%. Cette forme transitoire de l'azote inorganique montre une distribution selon un gradient négatif amont-aval, indiquant l'origine terrestre de cet ion. Si la quantité du NID montre une distribution remarquablement homogène dans la masse d'eau (fig. 31, tab 13), on s'aperçoit clairement que l'azote oxydé domine en surface tandis que l'azote réduit prédomine dans les eaux du fond. Cette distribution reflète en revanche la mauvaise oxygénation des eaux du fond, gardant toujours leur caractère réducteur.

Tableau 13. Valeurs moyennes, intervalle de variation et fraction des différentes formes de l'azote inorganique dissous (NID en μM) de l'estuaire El-Kébir en 2006.

Hiver	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	PO₄³⁻	NID	%NH₄	%	%
Surface	19,26	3,01	5,03	4,41	27,31	69,16	11,06	19,77
Fond	26,60	2,05	6,65	8,96	35,30	68,14	7,70	24,15
Moyenne	22,93	2,53	5,84	6,69	31,30	68,65	9,38	21,96
Minimum	5,22	1,40	0,00	1,11	10,41	40,72	2,23	0,00
Maximum	66,80	5,58	14,46	44,84	81,82	83,92	18,26	51,43
Printemps	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	PO₄³⁻	NID	%NH₄	%	%
Surface	23,22	4,33	34,24	1,07	61,79	38,93	8,03	53,05
Fond	27,58	3,85	36,14	2,33	64,93	43,10	5,88	51,02
Moyenne	25,40	4,09	35,19	1,70	63,36	41,01	6,96	52,03
Minimum	8,65	1,33	7,67	0,04	21,75	14,60	3,87	16,83
Maximum	36,91	4,87	59,98	10,50	112,4	73,60	15,03	77,19
Été	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	PO₄³⁻	NID	%NH₄	%	%
Surface	5,78	1,15	0,05	7,15	6,98	77,94	21,30	0,76
Fond	12,02	0,78	0,14	2,73	12,93	90,10	8,84	1,06
Moyenne	8,90	0,97	0,10	4,94	9,96	84,02	15,07	0,91
Minimum	1,42	0,12	0,00	1,01	3,30	43,14	1,02	0,00
Maximum	17,99	2,23	0,49	17,85	18,63	98,25	56,86	7,62
Automne	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	PO₄³⁻	NID	%NH₄	%	%
Surface	6,34	4,17	25,67	12,37	36,18	18,07	12,02	69,91
Fond	13,60	2,88	18,42	7,58	34,89	40,67	8,51	50,83
Moyenne	9,97	3,53	22,04	9,97	35,54	29,37	10,26	60,37
Minimum	4,07	1,54	6,73	0,55	20,85	5,09	5,45	17,75
Maximum	29,13	4,87	42,71	35,04	54,58	76,80	12,40	81,91

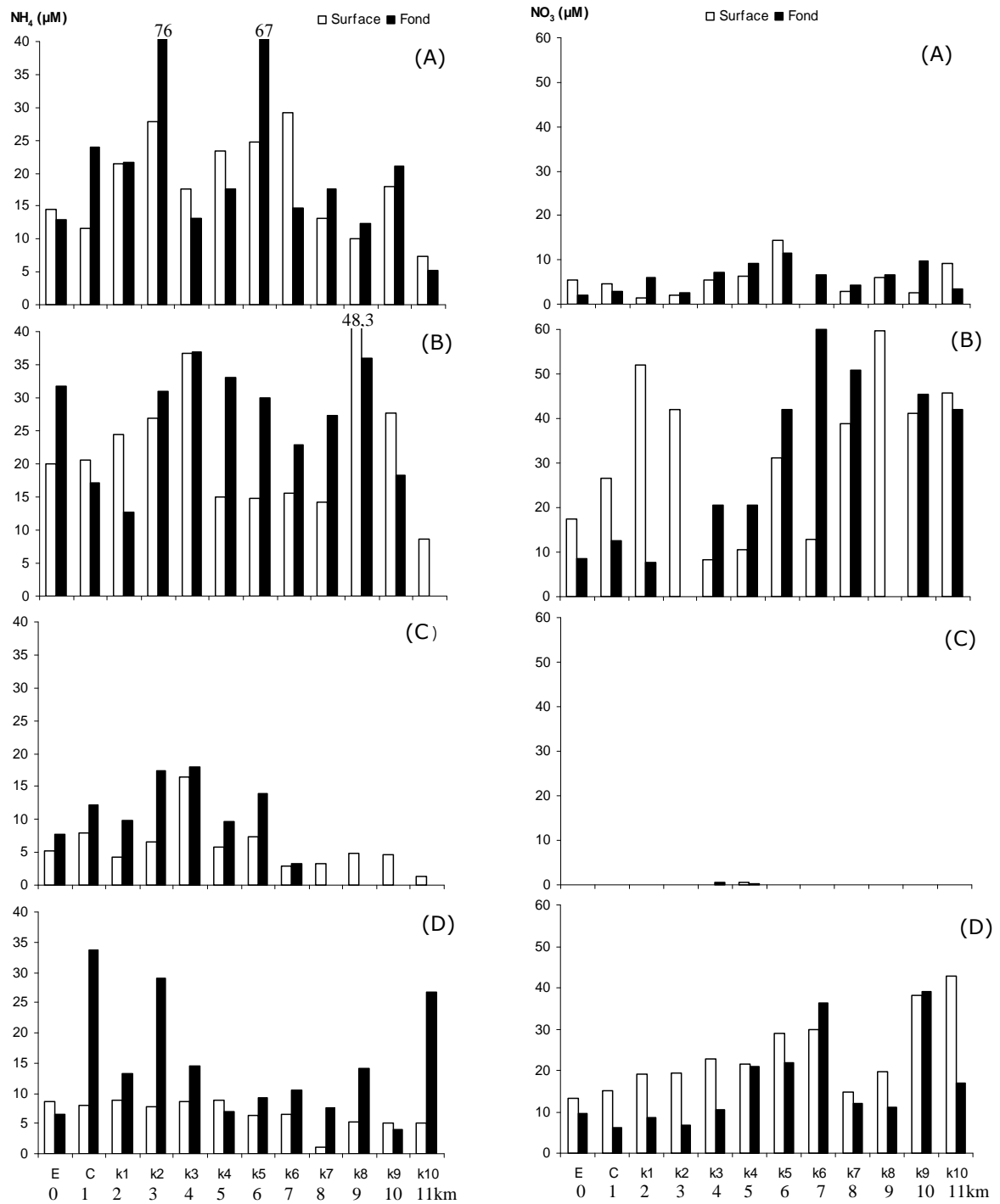


Figure 30 : Variations saisonnières des teneurs de l'azote ammoniacal et des nitrates dans la branche El-Kébir de l'estuaire du Mafrag en 2006. A : hiver, B : printemps, C : été, D : automne.

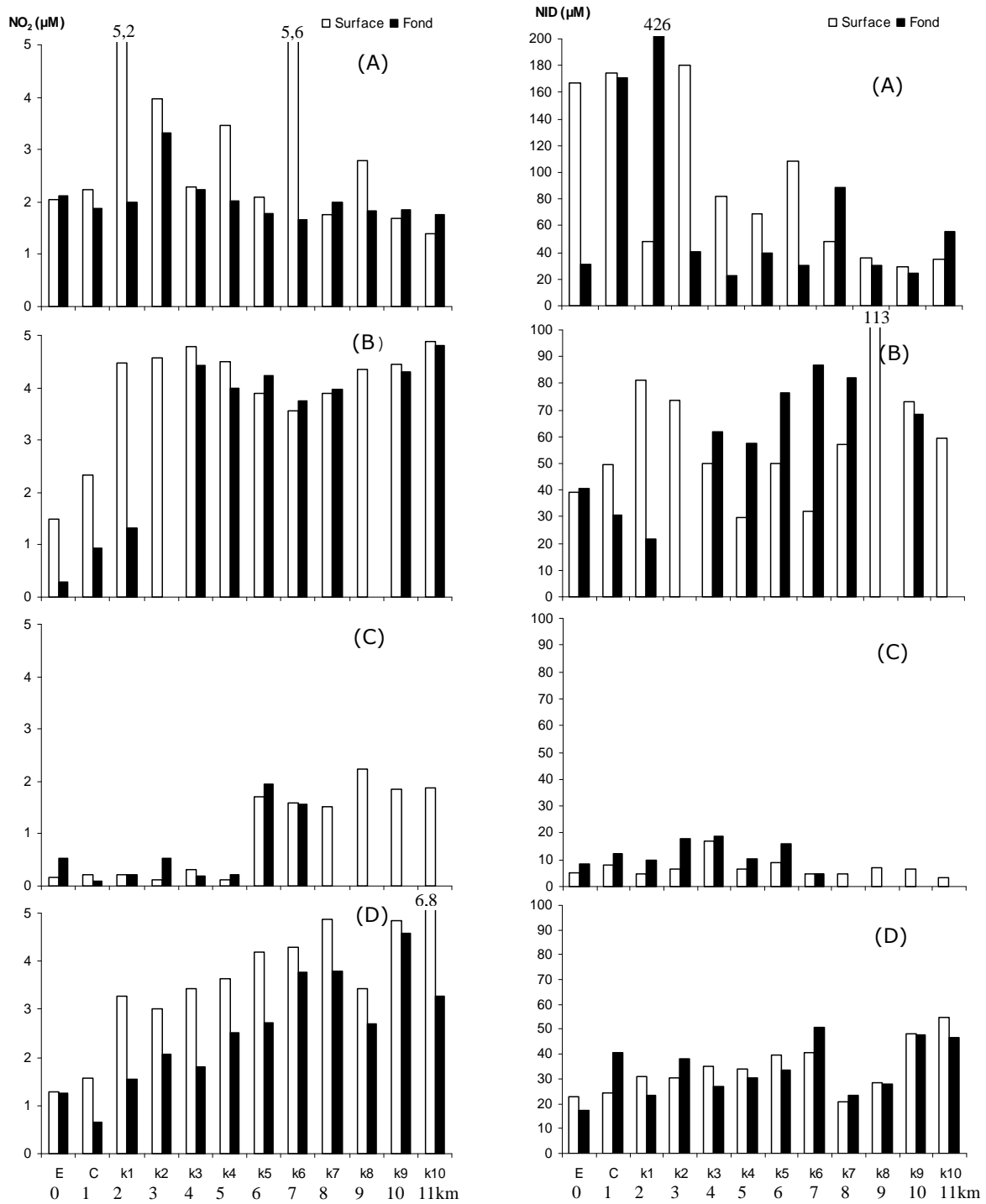


Figure 31 : Variations saisonnières des teneurs des nitrites et de l'azote inorganique dissous dans la branche El-Kébir de l'estuaire du Mafrag en 2006. A : hiver, B : printemps, C : été, D : automne.

4.3.1.2. Phosphore

Le phosphore inorganique est abondant dans l'estuaire d'El-Kébir, particulièrement en hiver et en automne où les teneurs moyennes y sont de l'ordre de 7-10 μM (tab. 14 & fig. 32). Les concentrations les plus élevées se rencontrent dans les stations reculées en amont de l'estuaire (K6-K9) et au niveau de l'estuaire aval. Si l'origine continentale des phosphates est incontestable pour les stations amont, les fortes quantités de l'aval peuvent être mise sur le compte d'un largage à partir des matières en suspension MES. Il est connu en effet que les MES peuvent piéger jusqu'à 80% du phosphore dissous et en libèrent imprévisiblement des quantités variables selon les conditions chimiques, encore peu connues. De plus, les phosphates sont connus pour leurs réactivités avec les argiles et les hydroxydes de fer qui en adsorbent des fractions variables avec la salinité et le pH. Les besoins phytoplanctoniques en azote N et en phosphore P sont satisfaits avec un rapport molaire N/P de l'ordre de 15/1. Dans les écosystèmes aquatiques, lorsque ce rapport s'écarte de 15, on assiste à une limitation du développement des végétaux par l'azote pour les faibles valeurs et par le phosphore pour les fortes valeurs. Si toutefois ces deux éléments sont abondants mais avec une dominance de l'un ou de l'autre, il y aurait une sélection spécifique avantageant les taxons exigeant vis-à-vis de ces nutriments.

Tableau 14. Valeurs moyennes saisonnières, intervalle de variation des teneurs en phosphate (μM) et du rapport N/P dans le Kébir en 2006.1 : surface ; 2 : fond ; 3 : surface+fond ; 4 : minimum ; 5 : maximum.

	Hiver			Printemps			Eté			Automne		
	PO_4	NID	N/P	PO_4^{3-}	NID	N/P	PO_4^{3-}	NID	N/P	PO_4^{3-}	NID	N/P
1	4,4	27,3	6,19	1,07	61,7	57,7	7,15	6,98	0,98	12,3	36,1	2,92
2	8,9	35,3	3,94	2,33	64,9	27,8	2,73	12,9	4,74	7,58	34,8	4,60
3	6,6	31,3	4,68	1,70	63,3	37,2	4,94	9,96	2,02	9,97	35,5	3,56
4	1,1	10,4	9,38	0,04	21,7	10,7	1,01	3,30	3,27	0,55	20,8	37,9
5	45	81,8	1,82	10,5	112	543	17,8	18,6	1,04	35	54,5	1,56

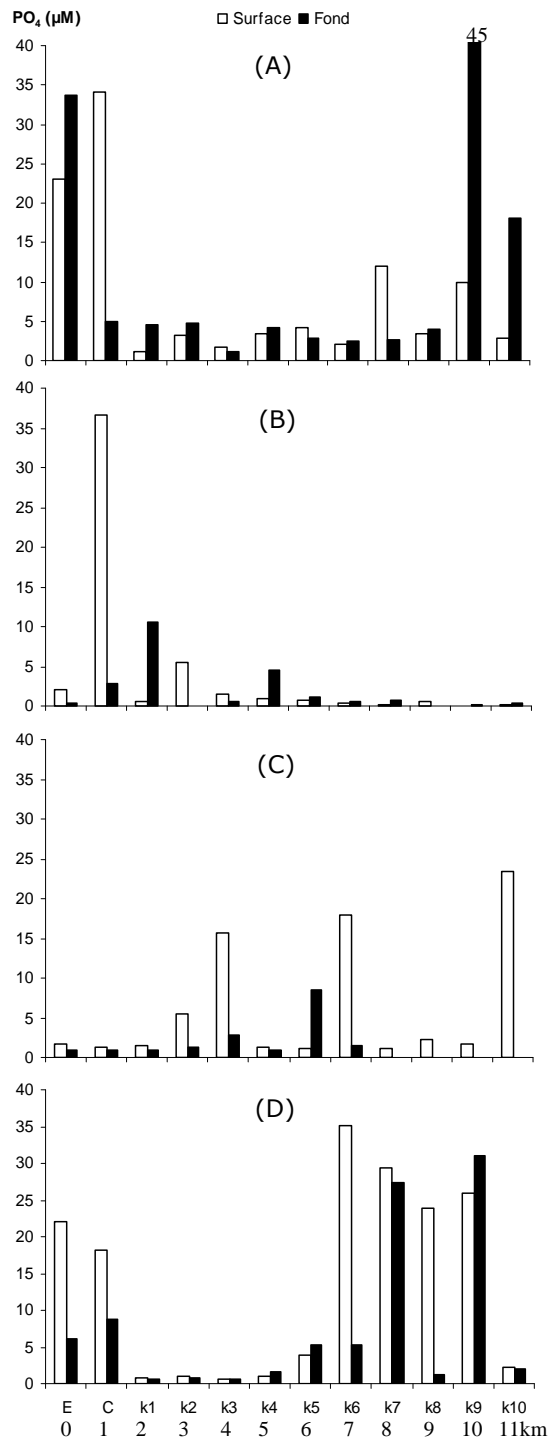


Figure 32 : Variations saisonnières des teneurs en phosphate dans la branche El-Kébir de l'estuaire du Mafrag en 2006. A : hiver, B : printemps, C : été, D : automne.

Dans l'estuaire d'El-Kébir, le rapport N/P est largement déséquilibré avec de faibles valeurs en hiver et en automne et de fortes valeurs au printemps et en été. L'altération dans le cas de faibles valeurs souligne un apport exagéré en phosphates. Il ne s'agirait pas pourtant d'une limitation de la croissance du phytoplancton puisque l'azote étant conjointement disponible à des quantités suffisantes pour subvenir les besoins phytoplanctoniques.

4.3.2. Bounamoussa

4.3.2.1. Azote minéral

Les variations saisonnières de l'azote inorganique sont très marquées avec un maximum en phase rivière et de faibles valeurs en période de fermeture de l'estuaire. Le stock du NID reconstruit en hiver ($39 \mu\text{M}$) à partir d'apports continentaux, diminue de 70% en phase lagune (été et automne). Parallèlement à cette diminution, la fraction d'azote ammoniacal, augmente régulièrement au détriment de la forme oxydée de l'azote minéral et domine franchement à partir du printemps (fig. 34, tab. 15). Les teneurs en nitrates diminuent très rapidement (d'un facteur de 20, Tableau 12) de l'hiver jusqu'en automne. Les eaux du coin salé sont toujours plus riches en ammonium et témoignent ainsi de leur mauvaise oxygénation. Il est clair d'autre part que le stock d'azote réduit existant en phase de fermeture de la branche Bounamoussa, provient d'une régénération interne à partir du sédiment essentiellement.

Le recyclage de l'azote réduit paraît donc plus rapide que sa consommation. La constance du stock d'ammonium dans les eaux du fond, souligne la rapidité de sa régénération sédimentaire. Conjointement, les ions nitrates, forme oxydée, diminue en effet d'un facteur de 10 et laisse à suggérer la prédominance de conditions réductrices à l'interface eau-sédiment.

Sur le plan spatial, on ne décèle pas de tendance à l'augmentation dans le sens aval-amont, comme c'est souvent le cas en milieu estuarien (fig. 34 & 33).

Tableau 15. Valeurs moyennes, intervalle de variation et fraction des différentes formes de l'azote inorganique dissous (NID en μM) dans l'estuaire de Bounamoussa en 2006.

Hiver	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	PO₄³⁻	NID	%	%	%	N/P
Surface	16,99	1,74	20,60	2,52	39,33	43,86	4,70	51,44	16,35
Fond	15,57	1,86	21,22	2,74	38,65	39,81	5,26	54,92	15,08
Moyenne	16,28	1,80	20,91	2,63	38,99	41,84	4,98	53,18	15,71
Minimum	6,72	1,33	10,55	1,67	22,46	23,77	3,28	34,57	8,34
Maximum	21,66	2,61	36,28	3,46	49,54	60,04	9,41	69,05	27,37
Printemps	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	PO₄³⁻	NID	%	%	%	N/P
Surface	8,94	0,38	4,97	0,59	14,30	64,96	2,98	32,06	27,59
Fond	11,52	0,41	7,64	1,42	19,58	60,10	2,64	37,27	40,84
Moyenne	10,23	0,40	6,31	1,01	16,94	62,53	2,81	34,66	34,21
Minimum	6,00	0,12	1,27	0,24	7,91	21,02	0,57	8,48	5,26
Maximum	28,47	0,74	23,63	0,86	31,47	90,46	5,28	77,34	70,15
Été	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	PO₄³⁻	NID	%	%	%	N/P
Surface	9,52	0,17	2,13	0,85	11,83	74,20	2,33	23,46	15,48
Fond	14,68	0,21	2,59	1,78	17,48	81,43	1,38	17,19	61,53
Moyenne	12,10	0,19	2,36	1,31	14,65	77,82	1,86	20,33	38,50
Minimum	2,09	0,05	1,76	0,09	4,21	49,50	0,30	7,30	2,64
Maximum	23,11	0,33	3,55	1,27	25,24	91,57	6,20	44,30	244,7
Automne	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	PO₄³⁻	NID	%	%	%	N/P
Surface	5,10	1,26	0,80	2,02	7,16	72,98	13,31	13,72	3,77
Fond	6,11	0,54	1,41	4,64	8,06	77,15	7,37	15,48	3,26
Moyenne	5,61	0,90	1,11	3,33	7,61	75,06	10,34	14,60	3,51
Minimum	3,41	0,31	*	1,47	4,72	51,98	3,41	*	0,60
Maximum	10,46	5,68	5,26	19,94	14,33	88,41	39,62	44,23	8,07

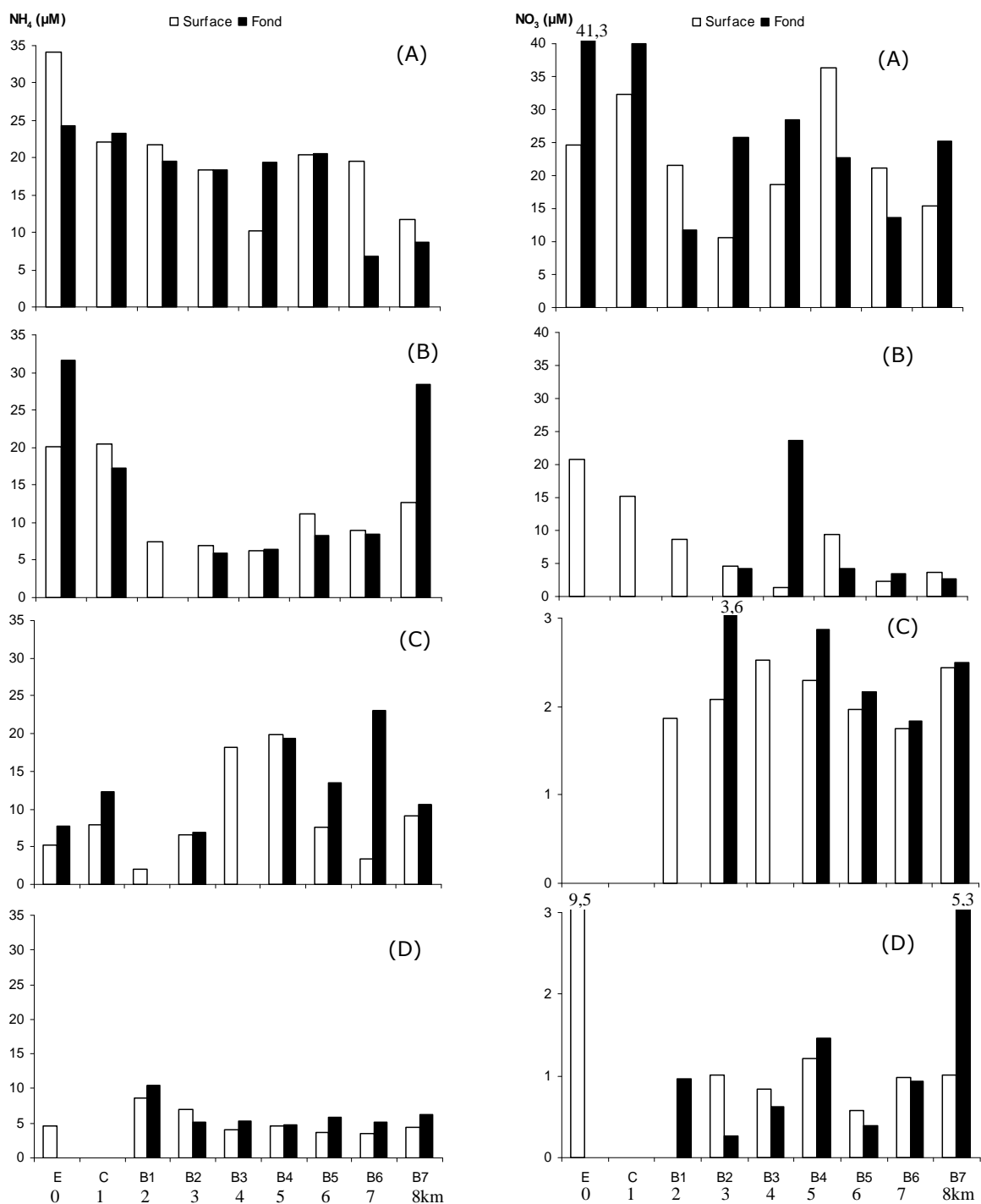


Figure 33 : Variations saisonnières des teneurs de l'azote ammoniacal et des nitrates dans la branche Bounamoussa de l'estuaire du Mafrag en 2006. A : hiver, B : printemps, C : été, D : automne.

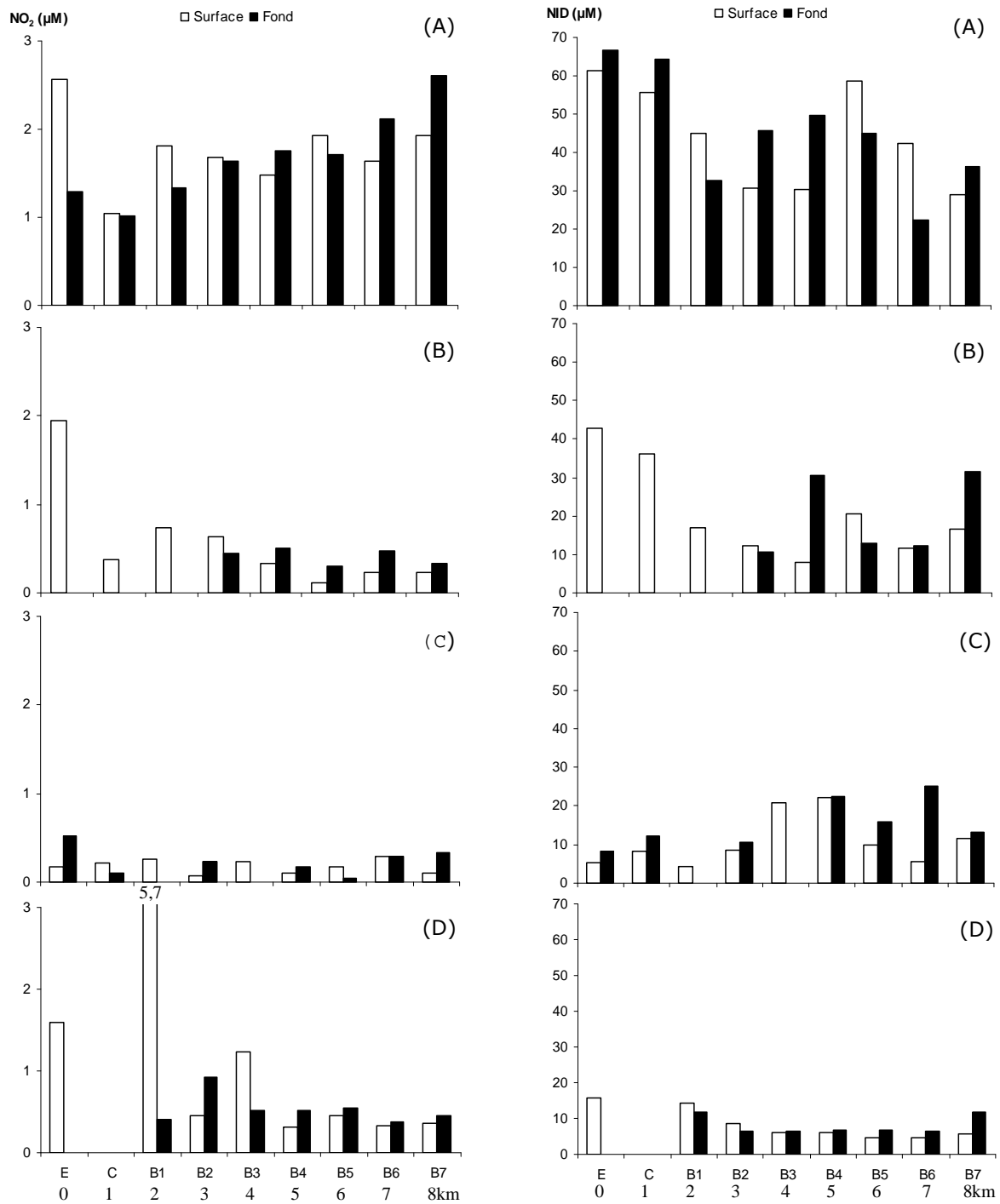


Figure 34 : Variations saisonnières des teneurs des nitrites et de l'azote inorganique dissous (NID) dans la branche Bounamoussa de l'estuaire du Mafrag en 2006. A : hiver, B : printemps, C : été, D : automne.

4.3.2.2. Phosphore

Les teneurs en phosphates sont élevées en toute saison (1-3,3 μM en moyenne) en particulier en hiver et en automne par suite d'introductions continentales (tab. 16 & fig. 35). Les stations les plus reculées en amont (stations 4-7) paraissent plus riches avec parfois des valeurs exceptionnellement élevées. Il semble que ces quantités élevées soient le fait d'un relargage à partir des MES, très abondantes par ailleurs en plus des apports agricoles.

Dans la colonne d'eau, les concentrations du fond sont en moyenne toujours plus élevées que celles des eaux de surface. Le stock du phosphore semble être entretenu donc par les largages sédimentaires issu de la dégradation de la matière organique largement disponible dans ce type d'estuaire à coin salé. Excepté en automne, le rapport N/P est curieusement équilibré avec des valeurs fluctuant en moyenne entre 10 et 24 (tab. 16). En automne les valeurs s'abaissent jusqu'à 1,74 traduisant un fort déséquilibre à l'avantage des phosphates, ce qui signifie que le phytoplancton dispose d'un stock beaucoup plus important en phosphore. Il s'agit incontestablement d'un apport agricole comme le témoigne le gradient de valeurs amont-aval (fig. 35). Dans la région, les amendements de terrains agricoles se font, en effet en saison automnale.

Tableau 16 : Valeurs moyennes saisonnières, intervalle de variation des teneurs en phosphates (μM) et du rapport N/P dans l'estuaire de Bounamoussa en 2006. 1 : surface, 2 : fond, 3 : moyenne S+F, 4 : maximum, 5 : minimum.

	Hiver			Printemps			Eté			Automne		
	PO_4^{3-}	NID	N/P	PO_4^{3-}	NID	N/P	PO_4^{3-}	NID	N/P	PO_4^{3-}	NID	N/P
1	2,52	39,3	15,6	0,59	14,3	24,2	0,85	11,8	13,9	2,02	7,16	3,54
2	2,74	38,6	14,1	1,42	19,5	13,7	1,78	17,5	9,82	4,64	8,06	1,74
3	2,63	38,9	14,8	1,01	16,9	16,7	1,31	14,6	11,1	3,33	7,61	2,29
4	1,67	22,4	13,4	0,24	7,91	32,9	0,09	4,21	46,7	1,47	4,72	3,21
5	3,46	49,5	14,3	0,86	31,4	36,6	1,27	25,2	19,8	19,9	14,3	0,72

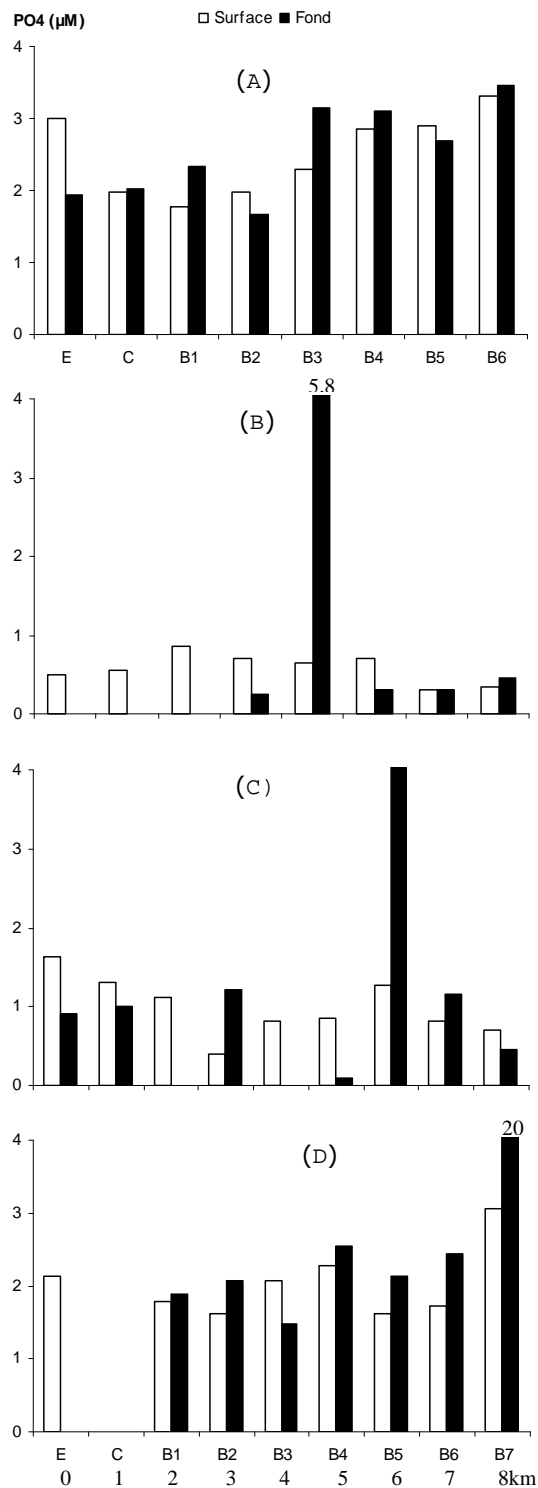


Figure 35 : Variations saisonnières des teneurs en phosphates dans la branche Bounamoussa de l'estuaire du Mafrag en 2006. A : hiver, B : printemps, C : été, D : automne.

4.4. Variations spatiales des matières organiques

4.4.1. El-Kébir

Dans la branche El-Kébir, les MES constituent d'importants stocks en hiver et en été (tab. 17) mais au printemps et en automne ce stock diminue d'un facteur de 4 à 6. Les apports estuariens en MES en plus de la sédimentation des matières organiques locales devraient expliquer l'origine sédimentaire des quantités exagérées en ammonium.

Verticalement, les teneurs des MES paraissent plus élevées en profondeur qu'en surface (sauf en été). Dans l'espace, on ne décèle pas de tendance (tab. 17), l'estuaire ne présente donc pas de bouchon vaseux (endroit où se dépose les MES en étale de basse de mer) caractéristique des estuaires à coin salé. L'estuaire est également fortement chargé en matière organique particulaire sous forme de carbone dont les teneurs moyennes varient entre 1,80 et 13 mg. l⁻¹ (tab. 17 & 18). Il faut noter d'autre part que les eaux du fond sont toujours plus riches que celles de surface quelque soit la saison. Les eaux du coin salé sont donc beaucoup plus productives. Cette production peut être rattachée pour une bonne fraction au zooplancton puisque la biomasse chlorophyllienne se concentre surtout en surface (tab. 17 & 18).

Les concentrations en chlorophylle *a* (Chla) sont toujours élevées et ont fluctué en moyenne entre 8 et 13 mg. l⁻¹. Les valeurs de surface sont remarquablement supérieures à celles du fond sauf en automne. On peut comprendre ainsi que les eaux du coin salé sont moins productives puisqu'en situation d'homogénéité hydrologique en automne, les eaux du fond deviennent en effet plus riches en phytoplancton. Par ailleurs, la distribution spatiale ne montre pas de tendance. La matière organique dissoute sous forme d'azote organique (NOD) est largement abondante (tab. 17 & 18) en particulier en été où la valeur moyenne atteint 5,33 mg. l⁻¹. Il faut souligner qu'à l'opposé des autres éléments chimiques, le NOD se répartit de façon homogène dans la colonne d'eau alors que dans l'espace les teneurs sont très hétérogènes et ne suivent pas une tendance quelconque. En outre, le rapport NOD/NID qui traduit la conversion de la matière minérale en matière organique a passé de 2 en hiver, à 4,5 au printemps et atteint un maximum de 27 en été. En automne ce rapport reste encore élevé (16) témoignant de la forte production biologique de l'estuaire.

Tableau 17. Valeurs moyennes saisonnières, intervalle de variation des différentes formes de matières organiques (Chlorophylle *a* phytoplanctonique : Chla (mg. m⁻³), Carbone Organique Particulaire : COP, azote organique dissous : NOD) et des Matières en Suspension : MES exprimées en mg. l⁻¹ dans l'estuaire El-Kébir en 2006.

Hiver					Printemps				
	MES	COP	Chla	NOD		MES	COP	Chla	NOD
Surface	263,9	3,32	10,5	1,02	Surface	52,8	1,34	10,7	1,15
Fond	270,4	5,61	5,80	1,17	Fond	68,1	2,30	6,14	1,01
Moyenne	267,2	4,46	8,16	1,10	Moyenne	60,4	1,82	8,44	1,08
Minimum	190	1,01	1,07	0,15	Minimum	34,8	0,61	1,07	0,70
Maximum	387	12,44	46,99	5,88	Maximum	100	6,04	14,9	1,83
Eté					Automne				
	MES	COP	Chla	NOD		MES	COP	Chla	NOD
Surface	205	12,87	12,46	5,30	Surface	13,6	4,84	10,8	1,93
Fond	169,2	13,0	6,30	5,36	Fond	98	5,78	15,3	1,45
Moyenne	187,1	12,95	9,38	5,33	Moyenne	55,8	5,31	13	1,69
Minimum	46	9,09	*	3,18	Minimum	4	0,07	1,07	0,05
Maximum	367	32,2	32	9,16	Maximum	230	10	40,5	8,78

Tableau 18. Valeurs des différentes formes de matières organiques (mg. l⁻¹) dans l'estuaire El-Kébir en 2006. Les teneurs en Chla sont exprimées en mg. m⁻³.

		Hiver				Printemps				Eté				Automne			
		MES	COP	NOD	Chla	MES	COP	NOD	Chla	MES	COP	NOD	Chla	MES	COP	NOD	Chla
E	S	115	1,24	2,28	42,4	0,29	13,3	296	10,0	3,39	8,0	15	0,85	2,04	2,14		
	F	155	1,69	0,60	11,7	52	1,23	0,98	6,94	127	11,9	4,79	6,4	34	6,11	2,76	3,20
C	S	139	1,94	5,88	32,0	25,2	0,72	0,74	3,74	275	6,37	5,59	2,7	10	8,77	0,40	1,07
	F	115	2,81	2,42	6,41	36	1,12	2,02	2,67	140	9,63	5,19	3,7	85		1,23	
K1	S	191	2,83	0,44	34,8	0,70	0,31	1,07	298	9,09	9,16	6,4	15	8,44	4,45	40,6	
	F	257	4,10	1,02	38,4	1,55	1,67	3,20	194	12,5	5,65	6,4	34	9,69	0,79		
K2	S	316	3,89	0,15	46,9	43,6	0,83	1,24	11,7	162	10,4	6,04	17	8,51	1,69	6,41	
	F	387	4,00	0,74	2,14					169	11,1	6,37	9,6	87	10,0	2,46	
K3	S	296	3,96	0,36	58,8	0,61	1,87	6,41	295	9,13	5,19	5,3	13	8,79	0,30	1,07	
	F	274	8,63	1,44	5,34	87,2	1,36	0,33	2,14	367	14,4	4,94	8,0	70	5,67	0,86	
K4	S	237	4,00	0,31	8,54	56,8	1,51	1,83	8,54	46	11,6	4,77	12	0,52	0,42	4,27	
	F	316	12,4	0,61	7,48	68,8	1,80	1,46	1,60	88	13,5	5,62	145	8,23	0,60	24,5	
K5	S	329	3,73	1,15	1,07	50,4	1,95	1,67	11,2	236	11,3	3,18	10,7	19	7,92	0,73	10,7
	F	297	5,56	0,37	4,27	100	1,74	1,31	3,20	104	14,5	4,13	7,5	101	8,70	5,13	9,61
K6	S	224	5,28	0,30	3,20	59,6	1,82	1,19	13,9	224	4,84	7,5	9	6,35	0,97	5,34	
	F	256	4,66	0,35	54,4	1,97	0,78			93	12,1	5,47	69	1,88	0,97	2,14	
K7	S	339	1,75	0,19	50,4	1,28	1,08	14,6		32,3	5,45	12,8	36	1,03	1,08	18,1	
	F	244	4,62	0,34	11,7	1,88	0,87	13,3					82	1,03	1,60	14,6	
K8	S	266	1,83	0,71	4,27	78,8	2,27	0,93	15,5	154	11,4	32,0	5	1,69	0,84	3,20	
	F	256	2,91	2,28									130	6,21	1,17		
K9	S	251	4,90	0,60	4,27	61,6	2,41	0,72	14,4	10,0			4	0,52	0,06	10,7	
	F	218	3,58	5,88	6,41	74,8	2,11	0,82					32	6,32	0,15	14,9	
K10	S	190	1,01	2,42	5,34	58,8	0,98	0,70	14,4	225	10,5	3,77	6	4,66	8,78	7,48	
	F	199		0,44	3,20	53,2	6,04	0,89	13,3			3,39	230	0,07	0,72	25,6	

4.4.2. Bounamoussa

Les eaux de Bounamoussa sont énormément chargées en MES notamment en hiver et en été où les valeurs évoluent dans l'ordre de 130-200 mg. l⁻¹. Au printemps et en automne non seulement les MES diminuent d'un facteur de 2-4 mais tendent aussi à se concentrer en profondeur (tab. 19). Spatialement, on ne retrouve aucune tendance (tab. 19 & 20) en raison peut être de la turbulence des eaux en période d'ouverture et de la stagnation des eaux en phase de fermeture de la communication avec la mer.

Pour le COP, on constate une forte stratification au printemps et en automne où les eaux du fond piègent de fortes quantités (tab. 20). Les concentrations maximales se rencontrent en été avec une valeur de 10 mg. l⁻¹ comme pour le bras d'El-Kébir.

La biomasse chlorophyllienne (Chl_a) constitue un stock important tout au long des saisons mais le maximum se situe en hiver et au printemps consécutivement aux fortes fertilisations continentales. L'estuaire y fonctionne en effet comme de véritables bassins de production phytoplanctonique recelant des biomasses moyennes de l'ordre de 10-13 mg. m⁻³. En été et en automne ce stock algal diminue de plus de la moitié (tab. 19 & 20). Dans la colonne d'eau, la biomasse en Chl_a des eaux de surface est souvent assez supérieure à celle du fond.

La matière organique azotée dissoute est également largement abondante sauf en hiver. Les teneurs augmentent rapidement à partir du printemps où l'on note un maximum allant jusqu'à 3,42 mg. l⁻¹ (tab. 19 & 20). On constate par ailleurs que le NOD se répartit de façon homogène dans la colonne d'eau exceptée au printemps où l'on note une supériorité des eaux du fond pour ce paramètre. La forte stratification haline en cette période de coin salé serait responsable de cette ségrégation verticale. Le rapport NOD/NID traduisant le taux de conversion de la matière minérale en matière organique passe de 0,5 en hiver à 1 au printemps pour atteindre un maximum estival de 14. Cette conversion est cependant plus intense en surface.

Tableau 19. Valeurs moyennes saisonnières (mg. l⁻¹), intervalle de variation des différentes formes de matières organiques dans l'estuaire Bounamoussa en 2006. Les teneurs en Chla sont exprimées en mg. m⁻³.

Hiver	MES	COP	Chla	NOD	Printemps	MES	COP	Chla	NOD
Surface	206	3,41	11,21	0,63	Surface	45,3	1,83	12,02	2,8
Fond	200,8	3,12	8,90	0,50	Fond	101	5,14	13,67	4,04
Moyenne	203,8	3,26	10,06	0,57	Moyenne	73,2	3,49	12,84	3,42
Minimum	169	2,24	6,41	0,09	Minimum				
Maximum	235	4,33	12,82	1,10	Maximum				
Eté	MES	COP	Chla	NOD	Automne	MES	COP	Chla	NOD
Surface	135,8	9,22	3,31	1,64	Surface	19,3	2,98	5,13	2,41
Fond	121,3	11,01	4,14	1,31	Fond	32,5	4,46	4,73	2,84
Moyenne	128,5	10,12	3,72	1,47	Moyenne	25,9	3,72	4,93	2,63
Minimum	1,00	7,12	1,60	0,48	Minimum	11	0,00	2,14	0,52
Maximum	325	12,67	8,01	2,15	Maximum	70	16,0	10,68	8,70

Tableau 20. Valeurs des différentes formes de matières organiques (mg. l⁻¹) dans l'estuaire Bounamoussa en 2006. Les teneurs en Chla sont exprimées en mg. m⁻³.

		Hiver				Printemps				Eté				Automne			
		MES	COP	NOD	Chla	MES	COP	NOD	Chla	MES	COP	NOD	Chla	MES	COP	NOD	Chla
E	S	250	6,36	0,01	34,2	143	4,07	1,40	5,87	296	10,0	3,39	8,01	22	0,75	1,79	
	F	253	2,34	1,87	3,20					127	11,9	4,79	6,41				
C	S	292	1,22	0,47	23,5	88	2,35	2,27	5,34	275	6,37	5,59	2,67				
	F	253	4,19	0,44	4,27					140	9,63	5,19	3,74				
B1	S	193	3,00	0,40	10,6	65	1,53	3,17	3,74	64	9,84	2,15	8,01	26		0,54	
	F	174	2,75	0,09	8,54									70	0,68	5,80	2,14
B2	S	195	3,07	0,46	9,61	42	1,32	1,62	9,61	325	9,70	1,82	1,60	32	3,50	0,58	
	F	174			8,54	112	2,16	2,88	8,54	7	9,06	1,94		28		3,85	5,34
B3	S	211	2,53	0,43	8,54	39	3,60	4,74	18,6	164	9,42	1,74		11	3,22	1,26	3,20
	F	169	2,24		7,48	154	14,8	1,94	5,87					16	0,29	0,52	4,27
B4	S	233	4,24	0,91	21,4	28	1,48	0,60	9,61		7,12	1,66	1,07	14	3,71	0,55	3,20
	F	192	4,02	0,32	9,61	80	2,96		26,7	240	11,6	1,03	1,60	30	5,27	3,42	3,20
B5	S	235	3,26		10,7	6	1,53	3,11	10,6		10,2	1,62	4,81	19	1,76	2,02	4,27
	F	222		1,11	6,41	89	3,32	5,86	9,61	196	10,9	1,83	8,01	19		1,23	5,34
B6	S	174	4,33	0,96	6,41	92	1,50	3,57	19,7	1	7,98	1,16	1,07	13	2,84	3,24	4,27
	F	274	3,48	0,01	12,8	70	2,42	5,50	17,6	42	10,7	1,29	1,07	32	16,0	2,25	6,41
B7	S			1,87						125	10,2	1,34		20	2,82	8,70	10,6
	F			0,47				1,39			12,6	0,48	5,87			1,79	6,41

DISCUSSION

Hydrologie

Au cours de la période d'étude, l'estuaire a connu deux phases hydrauliques majeurs (ouverture et fermeture de l'embouchure) qui se sont répercutées sur l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques, chimiques et biogéochimiques. La communication avec la mer est dans une large mesure contrôlée par le débit des tributaires Bounamoussa et El-Kébir qui sont eux-mêmes régulés en amont par les Barrages et par leurs marécages respectifs. L'ouverture se produit en saison humide, en hiver et au printemps, la fermeture se manifeste en saison sèche, en été et en automne comme le montre le diagramme simplifié des masses d'eaux dans la figure 36. La période d'ouverture comprend deux stades très contrastés : le stade rivière et le stade estuaire proprement dit. La période de fermeture correspond au stade lagune. Cette phase peut être réduite à quelques jours lors des années pluvieuses comme c'est le cas de l'année 2006. L'estuaire forme ainsi trois paysages géographiques se succédant tout au long des saisons. En 2003 par exemple, année assez pluvieuse, l'estuaire ne s'est pas entièrement fermé, mais a passé par ces 3 stades avec un allongement du stade estuaire et une réduction de la phase lagune à seulement 3 mois (Khélifi-Touhami *et al.*, 2006). Dans les années peu pluvieuses, l'estuaire peut rester fermé durant toute l'année et fonctionne ainsi comme une véritable lagune. Il s'agit alors d'estuaire temporaire très comparable aux estuaires du climat méditerranéen de l'Afrique du Sud et de l'Australie (Hodgkin & Lenanton, 1981 ; Whitfield, 1992 ; Perissinotto *et al.*, 2000 ; Froneman, 2004). En période de crue coïncidant avec l'hiver, le coin salé est reculé jusqu'à la mer alors que les conditions météorologiques et les décharges continentales dominant le système estuarien. Au printemps, le coin salé avance dans l'estuaire et occupe 70% de la colonne d'eau dans le bras d'El-Kébir et 80% dans le bras de Bounamoussa. Il s'ensuit l'établissement d'une forte halocline qui s'enfonce en moyenne à 0,5-1 m avec une épaisseur de l'ordre de 0,5 m. Cette halocline pointue provoque une certaine stabilité verticale de la colonne d'eau qui se prolonge sur environ neuf mois en 2005 et quatre mois seulement en 2006. De telle distribution haline longitudinale et de telle stabilité de la colonne d'eau sont souvent rencontrées dans la région méditerranéens voire même sous climat tempéré.

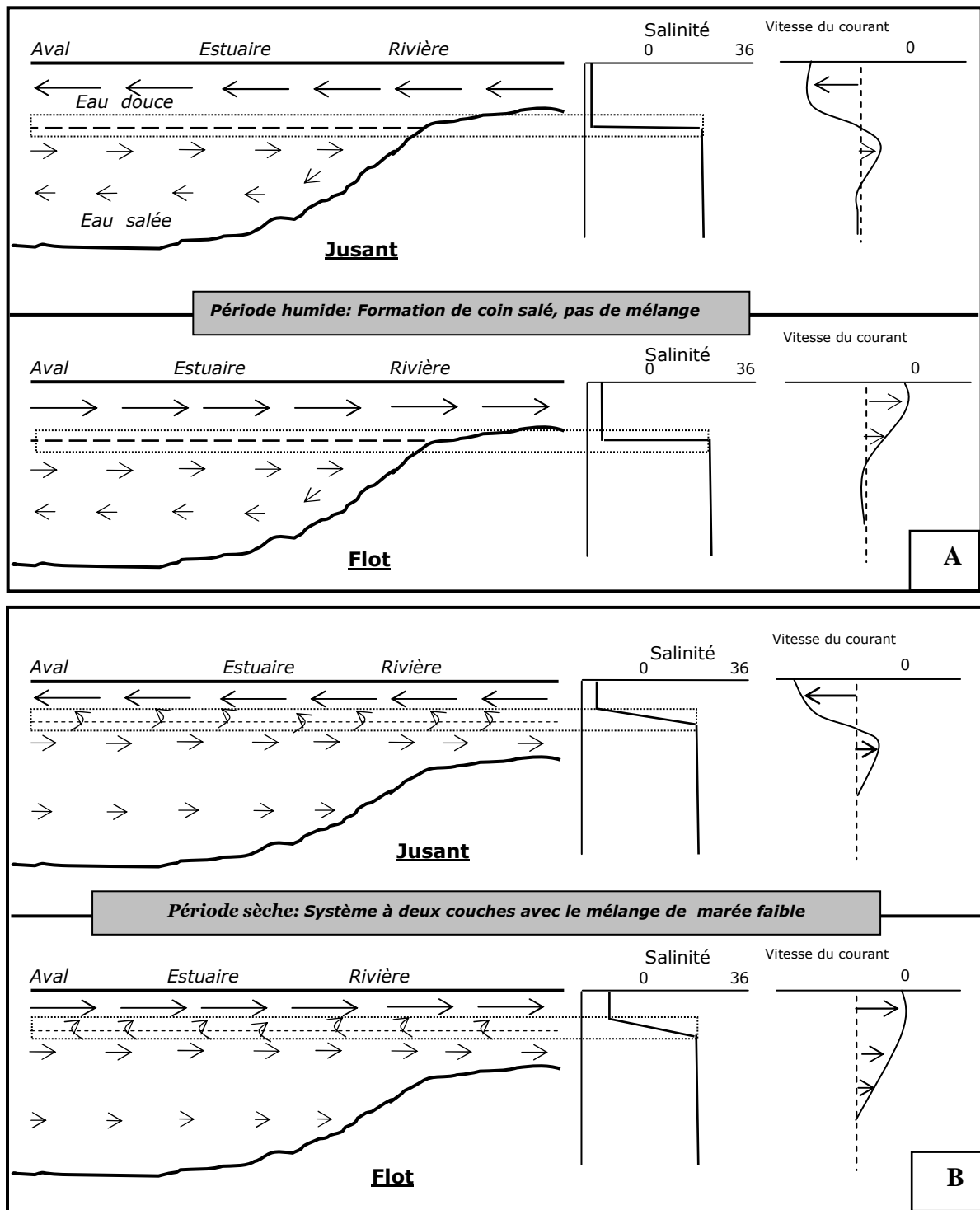


Figure 36. Diagramme simplifié des masses d'eau et de leur dynamique durant la période humide (A) et la période sèche (B) dans l'estuaire en 2005.

On cite à titre d'exemple l'halocline observée dans les estuaires de l'Ebre (Sierra, 2002), et de Bilbao (Gonzalez-Oreja & Saiz-Salinas, 1998), tous les deux en Espagne. Pour ce qui est de la stabilité des masses d'eaux, Hubert (1992) et Leopold *et al.* (1993) rapportent les mêmes constatations dans les estuaires Delaware, Tamise et Westerschelde.

Les estuaires Méditerranéens sont en effet très stratifiés avec deux couches d'eaux bien individualisées (Sempéré & Cauwet, 1995 ; Ibáñez *et al.*, 1997 ; Ibáñez *et al.*, 2000, Ibáñez et Prat, 2003, Pauc, 2003), l'eau douce en surface et l'eau marine occupant le fond.

La prospection spatiale de l'estuaire en avril 2006 montre que l'intrusion marine avance jusqu'à 20 km environ dans la branche d'El-Kébir et 15 km dans la branche Bounamoussa. On constate qu'à la même distance à l'embouchure, les eaux de Bounamoussa sont plus salées que celles d'El-Kébir en raison de leur faible inertie vis-à-vis de ces pénétrations marines. D'ailleurs le front de salinité dans la branche Bounamoussa peut atteindre l'ouvrage seuil construit sur ce tributaire. Les salinités de 3,5 en surface et 8 au fond qui ont été relevées le 14 avril 2006 au niveau de l'ouvrage et le témoin fidèle de cette observation. Cela suppose aussi que les populations marines immigrantes auront plus d'affinité pour Bounamoussa que pour le Kébir. En effet, la capture des espèces marines (loup & Mulet) par les pêcheurs amateurs de la ligne dans la même branche reconforte cette hypothèse (Observations personnelles).

En l'absence d'apports continentaux, la plupart des estuaires méditerranéens se trouvent séparés de la mer par suite de la formation de cordons littoraux, comme se fut le cas du Mafrag. L'ouverture de ces cordons suit la période humide à forte pluviométrie ou sous l'effet de tempêtes occasionnelles pour les estuaires méditerranéens du Sud (Perissinotto *et al.*, 2000 ; Hodgkin et Lenanton, 1981; Whitfield, 1992; Froneman, 2004). Selon les conditions météorologiques et l'importance de la régulation des rivières par les barrages, ces zones de transition peuvent rester isolées de la mer plusieurs jours jusqu'à plusieurs mois.

Fairbridge (1980) décrivent ce type d'estuaire : "*Bar-built estuaries are drowned river valleys, but recent sedimentation has kept pace with their drowning so that they have a characteristic bar across their mouths, for example, Alde, England; Ythan, Scotland. Barnegat Bay, New Jersey, Laguna Madre, Texas, Albufeira, Portugal, and most estuaries of North Carolina-Florida*

coast. In many estuaries in South Africa and Australia the bar may seasonally close the estuary, creating closed or blind estuaries”.

Concernant le degré halin des masses d’eaux dans l’estuaire, on dénote une forte variabilité qui oscille entre 0,1 à 37,6. Se basant sur cette gamme de salinité, la classification de l’estuaire ne correspond à aucune des catégories proposées par le système de Venise (Elliot & McLusky, 2002). En un point donné, l’estuaire aval, peu prendre le caractère de plusieurs catégories dans l’année (fig. 37).

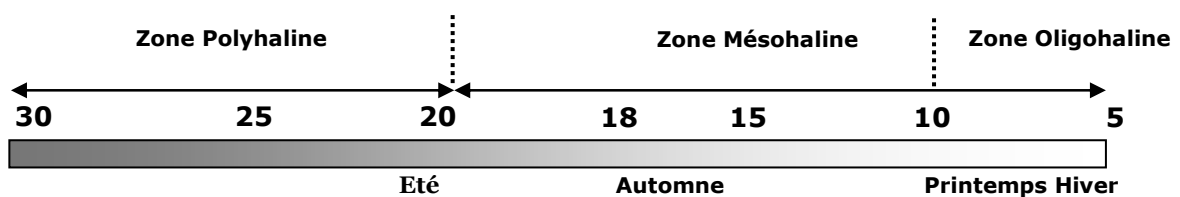


Figure 37. Situation haline saisonnière de la partie aval du complexe estuarien du Mfrag selon la classification de Venise des eaux saumâtres. L’estuaire est méso-polyhalin en été, mésohalin en automne et oligohalin en hiver et au printemps.

Des fluctuations similaires sont également observées dans d’autres estuaires sous climat méditerranéens, comme le cas de l’estuaire de l’Ebre en Espagne (Sierra, 2002), l’estuaire de Sebou au Maroc (El-Blidi & Fekhaoui, 2003), le Merderkill (deWitt et Daiber, 1974), la Baie de San-Francisco (Conomos *et al.*, 1979) et l’estuaire de Patuxent (Boynton & Kemp, 1985) (tab. 21) au sud des USA à climat méditerranéen.

Tableau 21. Comparaison de l’intervalle de variation haline dans différents estuaires dans le monde.

Estuaires	Intervalle de variation haline	Références
Estuaire Sebou (Maroc)	1,5 à 19,5	El-Blidi & Fekhaoui, (2003)
Estuaire de Ebre (Espagne)	10 à 36	Sierra, (2002)
Baie San-Francisco (USA)	0 à 35	Conomos <i>et al.</i> , (1979)
Murderkill (Delaware, USA)	15,7 à 28,2	deWitt & Daiber, (1974)
Patuxent (USA)	6 à 13	Boynton & Kemp, (1985)
Estuaire du Mafrag (Algérie)	0,1 à 37,6	Présente étude

Expressions biogéochimiques

Les estuaires en raison de leur position à l'interface continent-mer sont plus directement sujets à ces contaminations (Barnes, 1994 ; Attril & Rundle, 2002 ; Telesh, 2004). Devant l'importance des services qu'offre ces écosystèmes côtiers particulièrement productifs (pêche, nurseries, aquaculture, navigation, irrigation, tourisme, agriculture, zones humide de nidification d'oiseaux), il était nécessaire d'intervenir pour limiter les effets de tels eutrophisation soit par la législation (DIR 60/2000/EC, JORA, 2002) soit par la contribution scientifique à la connaissance de ces nuisances.

Les conditions chimiques de l'estuaire du Mafrag indiquent un fort enrichissement au cours des saisons aussi bien par les phosphates que par l'azote minéral. Les teneurs moyennes de l'azote inorganique dissous (NID) sont de l'ordre de 26 μM et celles des phosphates de 3,5 μM . La moyenne des teneurs en silicates $\text{Si}(\text{OH})_4$ au niveau des stations aval de l'estuaire et de l'ordre de 47 μM . Très généralement, les concentrations en $\text{Si}(\text{OH})_4$ varient avec le cycle hydrologique de l'estuaire, on y constate de fortes valeurs pendant la période humide (130 μM) et on assiste à une diminution générale des teneurs durant la période sèche (10 μM). Cette chute des valeurs traduit non seulement l'origine continentale du $\text{Si}(\text{OH})_4$ mais aussi la consommation accrue par les diatomées. Les processus d'absorption paraissent donc plus rapides que la régénération interne ou l'apport de la nappe et des eaux de surface. Cette situation peut être en partie expliquée par les courbes de dilution consignées dans la figure 38. Les valeurs en dessous de la courbe traduisent le comportement non conservatif du silicium, autrement dit le contrôle biologique du silicium coïncidant souvent avec les fortes salinités rencontrées en période sèche. Inversement, aux faibles salinités de la saison pluvieuse, se superposent les fortes teneurs en silicium expliquant un comportement conservatif dépendant plutôt du contrôle physique (apports souterrain, continental et atmosphérique).

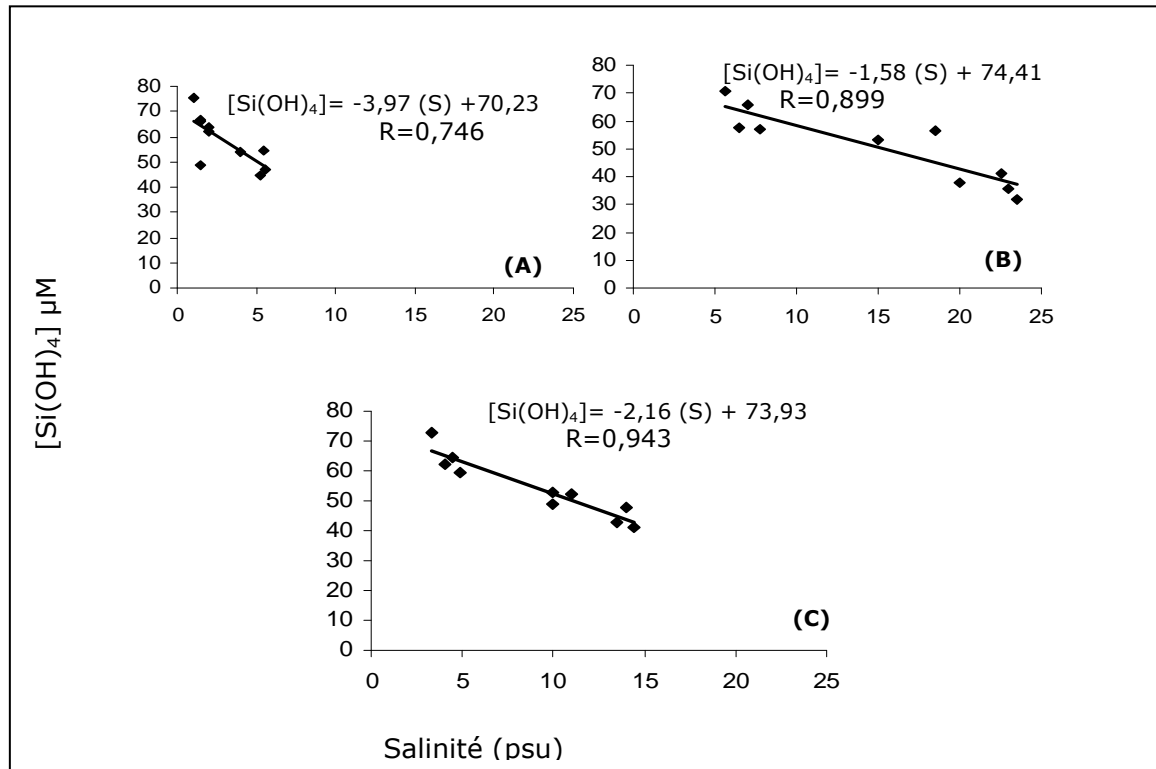


Figure 38. Diagramme $\text{Si}(\text{OH})_4$ –salinité (ou courbes de dilution) pour les eaux étudiées de l'estuaire Mafrag. A: courbe de la moyenne annuelle des valeurs de surface, B: courbe de la moyenne annuelle des valeurs de fond, C: courbe de la moyenne annuelle de surface et de fond (mars 2006-décembre 2006).

Sur le plan spatial, la branche d'El-kébir est plus fertile en sels nutritifs que Bounamoussa au printemps et en automne en raison d'apports agricoles. C'est en automne que l'apport en phosphate est plus important consécutivement aux amendements de terrains par les engrais phosphatés et azotés.

Pour ce qui est de l'azote inorganique, il faut noter que cette fertilité revient pour une bonne partie à la réserve d'ammonium (40-80% du NID) qui entretient la colonne d'eau à partir du sédiment en période de fermeture et à partir du continent en période d'ouverture. L'azote oxydé est pratiquement épuisé en été et seul l'ammonium, fortement concentré dans les eaux du fond, forme la source d'azote pour le phytoplancton. En outre, la dominance de l'azote réduit traduit le comportement fortement réducteur du milieu et suppose l'existence de conditions d'anoxie régnant l'interface eau-sédiment. La stagnation des eaux en phase lagunaire, encourage l'établissement de telles situations

d'anoxie du fond. Cette distribution existe souvent dans les estuaires méditerranéens (Sempéré & Cauwet, 1995; Abdel-Moati, 1999; Seirra *et al.*, 2002). Néanmoins, le comportement des ions azotés et phosphatés ne montrera pas bien une tendance claire de dilution qui se disperse horizontalement dans l'estuaire. De même, on dénote l'absence d'un gradient positif des sels dans le sens aval-amont comme s'est souvent le cas dans les milieux estuariens (O'Donohue *et al.*, 1997 ; Sierra *et al.*, 2002 ; Cook *et al.*, 2004 ; Brion *et al.*, 2008 ; Sûzal, 2008). Il est à souligner que dans les stations aval (Embouchure, Confluence ; K ; B) on s'aperçoit l'existence d'une conservativité des ions azotés qui s'observe surtout en surface sans pourtant être installée le long de l'estuaire (fig. I à VI en annexes). Cette situation peut être dû d'une part à la position des stations aval, quasiment influencé par l'intrusion marine, et d'autre part par la régénération rapide au niveau des masses d'eau profondes comme l'on a déjà évoqué pour la distribution de l'ammonium.

En terme de comparaison avec d'autres estuaires dans le monde, la Mafrag paraît plus enrichi en phosphate qu'en azote inorganique (NID). Il se positionne entre les estuaires fortement anthropisés comme le Shuangtaizihe en chine (Jing-Zhang *et al.*, 1997), l'Ebre en Espagne (Sierra *et al.*, 2002), le Scheldt en Belgique (Meire *et al.*, 2006) et les faiblement anthropisés comparables aux Huon (Featherstone *et al.*, 2004) et Tweed (Eyre *et al.*, 2000), les deux en Australie (tab. 22).

Tableau 22. Teneurs en azote inorganiques dissous et en phosphates dans différents estuaires dans le monde.*Présente étude.

Estuaires	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	NID	PO ₄ ³⁻	Références
Shuangtaizihe (Chine)	181	0,03	2,1	183	-	Jing-Zhang <i>et al.</i> , (1997)
Yalujiang (Chine)	310	0,79	8	318	-	Jing-Zhang <i>et al.</i> , (1997)
Gamtos (Afrique du Sud)	45	1,92	7,57	54,2	0,32	Scharler & Baird, (2005)
Tama (Japan)	11	133	216	360	-	Takashi <i>et al.</i> , (1982)
Pearl (Chine)	-	27	-	410	0,03	Deguan, (2003)
Huon (Australie)	2,6	2	30	3,6	0,31	Featherstone <i>et al.</i> , (2004)
Tweed (Australie)	4,04	-	1,79	-	0,39	Eyre <i>et al.</i> , (2000)
Housatonic (Nord USA)	23,9	-	5,99	-	1,71	Jennifer, (2006)
Scheldt (Belgique)	150	4	20	174	5	Meire, (2006)
Ebre (Espagne)	140	-	-	-	0,5	Sierra <i>et al.</i> , (2002)
Mafrag (Algérie)*	11-16	2,05	10-13	26	2-4	Présente étude

En plus des valeurs de température, de salinité, des teneurs en sels nutritifs, les rapports N/P et Si/N sont des indicateurs très appropriés dans la caractérisation des eaux. Le rapport N/P, dans les eaux marines profondes est de l'ordre de 15/1 ou 16/1 (Redfield, 1963). Dans les eaux fluvial propre N/P est de l'ordre de 11, et dans les eaux usées N/P est ≤ 5 (Helmer, 1977). Dans l'estuaire, ce rapport (N/P) varie avec les saisons mais demeurant assez équilibré en fluctuant en moyenne entre 10 et 24 dans la plupart des cas. Cet intervalle reflète une certaine propreté des eaux de l'estuaire comparée aux rivières et estuaires méditerranéens (tab. 23). Le rapport Si/N comme le montre les données de Vörösmarty *et al.* (1998) est consignées dans le tableau 24 où on distingue les rivières propres des rivières anthropisés (par l'industrialisation et l'urbanisation). En fait, on considère que l'azote est essentiellement d'origine anthropique à la différence du silicium d'origine strictement naturelle. Dans le tableau 24, ce n'est pas la concentration du silicium qui est importante puisque indépendamment de la rivière, les teneurs sont du même ordre, mais plutôt le rapport Si/N qui est à considérer dans la classification des rivières. Il en ressort que la Mafrag est un estuaire proche de ceux considérés comme assez propres avec un rapport moyen aux environ de 2.

Tableau 23. Valeurs moyennes du rapport N/P dans quelques cours d'eau Méditerranéens (repris et modifié de EEA, 1999).* Présente étude.

Rivières	Rapport N/P	Pays
Rhône	33,53	France
Herrault	63,03	France
Ebre	181,46	Espagne
Pô	55,31	Italie
Tever	12,17	Italie
Axios	1,05	Grèce
Akheloos	0,06	Grèce
Seyhen+	7,18	Turquie
Ceyhen+	58,96	Turquie
Moulouya	35,47	Maroc
Mafrag	10-24	Algérie*

Tableau 24. Valeurs moyennes de silicium, de l'azote et de rapport Si/N dans plusieurs rivières propre et anthropisé aux différentes périodes (Vörösmarty *et al.*, 1998).

Qualité	Rivières & estuaire	Période	Si	N	Si/N
Propres	Amazonie	1972	187	3,2	58,4
		Mai-Juin 1976	121	11	12,9
	Mackenzie	1978-1983	143	14	20
	Yokon	1978-1985	275	35	32,9
	Zaire	Novembre 1976	161	7,3	22,1
		Mai 1978	171	5,9	29
Anthropisés	Mississippi	1981-1987	108	114	1
	Pô	1981-1984	120	147	0,7
	Rhine	1976-1978	130	310	0,4
	Seine	1976-1982	120	372	0,3
	Yangtze Changjiang	Juin 1980	100	67	1,6
	Yellow (Hwaughe)	1986	128	64	2
	Mafrag*	2006	50	26	1,92

Les concentrations moyennes de matières en suspension dépassent la charge de 100 mg.l⁻¹ dans les deux tributaires. Cette moyenne reflète déjà le caractère modérément turbide de l'estuaire vis-à-vis des concentrations souvent rencontrées dans la littérature. Sur le plan dynamique, il est bien établi que 70 à 80% de MES se transfèrent durant la montée des crues. En effet les variations saisonnières dans la Mafrag montrent que les MES sont plus importantes en moyenne en hiver (203 mg.l⁻¹) qu'en été (128 mg.l⁻¹) pour l'année 2006.

Les approximations de la masse sédimentaire instantanée calculée sur la base des moyennes dans les deux segments de l'estuaire est de l'ordre de 193 et 117 tonnes respectivement pour El-kébir (11km) et Bounamoussa (8 km). De tel stock sous forme de suspension ne peut être soutenu que par le retentissement sur le chimisme et la biologie de l'estuaire. En effet, le pourcentage de carbone organique particulaire (COP), dans la suspension a beaucoup fluctué (0,53 à 87 %), avec une moyenne maximale de 28% enregistrée en automne. Ce pourcentage coïncident nettement avec le pic automnale mais ne reflète pas bien les valeurs du printemps. Cette remontée sensible des teneurs en COP dans la suspension peut être expliquée par la présence de la fraction vivante (Phytoplancton et zooplancton) dans les eaux marines du fond qualifiées de riches. L'éventuelle interprétation n'est acceptable que dans le cas où la fraction vivante est importante, or malgré l'importance des teneurs trouvés en biomasse phytoplanctonique, le pourcentage de la chlorophylle *a* dans le MES est marginal ne dépassent pas dans les meilleurs des cas 0,10%, et que leurs formes

dégradés (phéopigments) se présente souvent conjointe à une absence totale de la chl_a (données non représentés). Ceci semble être due aux problèmes de turbidité (concentration importante en MES) qui se traduit par un stress biologique affectant les peuplements phytoplanctoniques. De plus, le rapport COP/Chl_a s'avère très élevé, peut atteindre parfois de l'ordre de mille. Ce rapport nous laisse penser à la présence d'une dégradation rapide de la Chl_a où a l'importance de la biomasse zooplanctonique (fraction non traitée).

En définitive, la variation des trois composants de la fraction particulaire (MES .COP. Chl_a) montre la même tendance pour le COP et les MES à l'inverse de la Chl_a. Les concentrations dans la colonne d'eau sont très hétérogènes, avec une importante biomasse chlorophyllienne, sans pour autant la considérer devant la fraction COP, qui reste prédominante et qui compose l'essentiel de la charge particulaire. En comparaison avec d'autres estuaires dans le monde, la Mafrag paraît modérément productive (tab. 25, 26 & 27).

La forme organique dissoute de l'azote constitue une autre réserve nutritive très importante dépassant souvent le stock minéral. Dans l'estuaire le NOD forme un stock considérable notamment en été. La teneur moyenne du NOD est de 0,25 mg.l⁻¹ est aussi plus élevée que les teneurs en NID. La fraction organique joue donc un rôle écologique autant important que les nutriments minéraux. Dans l'estuaire le rapport NOD/NID a fluctué seulement entre 0,5 et 24, traduisant un gaspillage de la matière minérale. L'excédent minéral étant en revanche transféré à la mer lors de la période d'ouverture. On retrouve en outre une relation inverse entre le NID et le NOD ($r = 0,6$, $n = 12$).

L'estuaire se comporte comme un bassin de production de matières organique. Les valeurs de matières organiques dissoutes sont 50 fois plus élevées que les valeurs habituellement rencontrées en mer (Lucea *et al.*, 2003). De ce point de vue l'estuaire joue le rôle d'un filtre chimique puisqu'il transforme la matière minérale en matière organique et fournit ainsi une biomasse organique considérable. Cette production est sujet un transport horizontal vers la mer et un transport vertical vers le sédiment.

Tableau 25. Valeurs moyennes de carbone organique particulaire (COP) dans plusieurs estuaires dans le monde.*Présente étude.

Estuaires	POC mg.l ⁻¹	Références
Westerschelde (Belgique)	9,4	Kromkamp & Peene, (2005)
Casamance (Sénégal)	8,4	Pages & Lemoalle, (1995)
Seine (France)	5-8	Garnier <i>et al.</i> , (2001)
Mississippi (Nord Amérique)	0,48- 7,2	Trefry <i>et al.</i> , (1994)
Ems (Allemagne)	2,6	Cadée, (1987)
Hudson (Canada)	3,74	Findlay <i>et al.</i> , (1996)
Sabine-Neches (Texas)	1,1	Bianchi <i>et al.</i> , (1997)
Krka (Croatie)	0,8	Sempéré & Couwet, (1995)
Ebre (Espagne)	2,10	Gómez-Gutiérrez <i>et al.</i> , (2006)
Mafrag*	3	Présente étude

Tableau 26. Valeurs moyennes de la chlorophylle a (mg. m⁻³) dans plusieurs estuaires dans le monde.*Présente étude

Estuaires	Chla (mg.m ⁻³)	Références
Westerschelde (Belgique)	26 - 33	Underwood & Kromkamp., (1999)
Ems (Allemagne)	13 - 45	Underwood & Kromkamp., (1999)
Estuaires (Danemark)	2-50	Coneley <i>et al.</i> , (2000)
Seine (France)	70- 80	Garnier <i>et al.</i> , (2001)
Hudson (USA)	30- 40	Underwood & Kromkamp, (1999)
Delaware (USA)	40	Underwood & Kromkamp, (1999)
Chesapeake Bay (USA)	15	Underwood & Kromkamp, (1999)
Tomales Bay (USA)	15 - 83	Underwood & Kromkamp, (1999)
Casamance (Sénégal)	50 -300	Pages & Lemoalle, (1995)
Mafrag (Algérie)*	8,82	Présente étude

Tableau 27. Valeurs moyennes de l'azote organique dissous (en mg. l⁻¹) quelques estuaire et Baie en Amérique (in Bianchi, 2007).*Présente étude.

Estuaires	NOD (mg.l ⁻¹)	Références
Shinnecock Bay, New York Surface	0,6-4,3	Berg <i>et al.</i> , (1997)
Waquoit Bay, Massachusetts Surface	40,0	Hopkinson <i>et al.</i> , (1996)
Chesapeake Bay, mesohaline	21,3±16,0	Bronk <i>et al.</i> , (1998)
Chesapeake Bay, mesohaline	22,2±1,6	Bronk & Glibert, (1993)
Chesapeake Bay, mouth Surface	16,3±5,5	Bates & Hansell, (1999)
Apalachicola Bay Surface	14,8±1.0	Mortazavi <i>et al.</i> , (2000)
Delaware Estuary Surface	40,8±29,3	Karl, (1993)
Elba Estuary Surface	65,0±12,2	Kerner and Spitzzy, (2001)
North Inlet, South Carolina Surface	18,0-30,8	Lewitus <i>et al.</i> , (2000)
Tomales Bay Surface	5,8-12,6	Smith <i>et al.</i> , (1991)
Mafrag (Algérie)*	0,25	Présente étude

Eléments d'aménagement hydrologique

Dans la région méditerranéenne en particulier pour les pays du Sud (Afrique du Nord, Afrique du Sud, Australie, Sud des Etats-Unis), les estuaires sont non seulement soumis aux pollutions chimiques mais à de graves perturbations de leurs cycles hydrologiques, à la suite de rétention des eaux en amont dans les barrages (Hodgkin & Lenanton, 1981 ; Pearce & Grivelli, 1994 ; Benblidia *et al.*, 1997 ; Turley, 1997 ; Milliman, 1997 ; EEA, 1999 ; Harris, 2001).

D'un point de vue climatique, notre région est la plus pluvieuse de la rive méditerranéenne sud avec seulement 3-4 mois d'étiage (Miller, 1983), ce qui suppose une richesse en eaux de surface. Une richesse qu'il faut savoir sauvegarder et mieux utiliser. La gestion des eaux de barrage ne tient pas compte de la viabilité des rivières (débit écologique à l'aval du barrage) en n'autorisant qu'un faible débit en période d'étiage (Mébarki, 1999) ce type de régulation répercute directement sur le chimisme du littoral.

En Méditerranée et en mer noire, la construction de barrage sur le Nil et sur le Danube a eu de graves conséquences sur la géochimie des mer et même sur le bilan hydrologique de la Méditerranée (Humborg *et al.*, 1997 ; Johnson, 1997). En plus de ces célèbres travaux, Béthoux, *et al.*, 2002 montrent que la Méditerranée connaît des changements sur plusieurs niveaux hydrologiques, élévation de la température, des teneurs en azote, en phosphore et une diminution du rapport N/P.

Ibáñez et Prat (2003) ont largement discuté dans leurs travaux sur le plan hydrologique de l'Ebre, les conséquences de transfert d'eau de l'Ebre aux barrages (Espagne) (voir encadré III en annexe). C'est un exemple démonstratif pour l'évaluation écologique des estuaires méditerranéens soumis à tels aménagements hydrologiques. La construction et l'usage non coordonnée des barrages ainsi que les objectifs sectoriels limités dans la gestion des plans hydrologiques, engendrent des impacts négatifs non seulement sur les rivières mais aussi sur les estuaires et leurs côtes contiguës (Milliman, 1997; Johnson, 1997; Homburg, 1997; Harris, 2001).

Il est par ailleurs bien établi que l'avancement et le développement du coin salé durant la période d'isolement de l'estuaire, s'accompagnent souvent d'eutrophisation et de conditions d'anoxies. Sur un autre plan hydrologique, la période de fermeture se caractérise par une forte salinisation de l'estuaire empêchant tout usage agricole ($S > 4$). Des lâchers étudiés de barrages peuvent incontestablement remédier à ces contraintes de salinisation des eaux, des sols et peut être même de la nappe libre. Il faut rappeler que ces barrages retiennent annuellement près de 260 Millions m^3 d'eau et sont donc susceptibles d'alimenter l'estuaire pendant les trois mois d'étiage (100 jours) à un débit de $5m^3 s^{-1}$. Ce rythme d'alimentation (ou débit environnemental, Ibáñez & Prat, 2003) puisant seulement 20% du volume des barrages, aura l'avantage de reculer le coin salé, d'assurer la viabilité des sols (irrigation), de l'estuaire (navigation, pêche) et de l'enrichissement du littoral.

Conclusions

En conclusion on retient que l'estuaire du Mafrag est un estuaire de plaine littorale, atypique à coin salé. Le cycle hydrologique est largement contrôlé par les apports continentaux entretenus par les marécages puisque l'effet marée est limité à une période de l'année. En conséquence l'estuaire évolue en trois phases hydrologiques débutant par la phase rivière, transitant par phase estuaire et finissant par la phase lagune lorsque la saison sèche est inhabituellement prolongée.

En dépit de l'usage incoordonné des barrages et du capital en eau on considère que l'estuaire reste propre au regard de l'enrichissement modéré et du faible déséquilibre des rapports N/P et Si/N. Ces conditions chimiques conduisent à une production de matières organiques et minérales qui profitent à la productivité du littoral adjacent. Ces caractéristiques biogéochimiques avantageuses suggèrent un plan hydrologique considérant un flux environnemental qui garanti l'écoulement continu de l'estuaire.

Enfin, ces recherches ont fournis des données fondamentales sur l'hydrologie et la biogéochimie de l'estuaire du Mafrag mais devront se poursuivre pour dresser un plan hydrologique et d'aménagement intégré du système estuarien du Mafrag et du littoral adjacent. Le plan hydrologique aura pour finalité la gestion intégrée des eaux de surface et des eaux littorales, permettant de (1) dresser un calendrier d'irrigation, (2) de déterminer un débit environnemental pour les rivières Bounamoussa et El-Kébir susceptibles d'assurer à la fois la viabilité des rivières, de garantir un volume optimal des barrages (Cheffia, Mexa et Bougous) et de permettre l'ouverture permanente de l'embouchure assurant la fertilisation du littoral par les apports des rivières.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel-Moati M. A. R., 1999.** Iodine speciation in the Nile River estuary. *Marine Chemistry*, **65**: 211-225.
- Aminot A. & Chaussapied M., 1983.** Manuel des analyses chimiques en milieu marin. 395p.
- Attrill M. J. & Rundle S. D., 2002.** Ecotone or Ecocline: Ecological Boundaries in Estuaries. *Estuaries, Coastal and Shelf Science*, **55**: 929-936.
- Barnes R. S. K. 1994.** Critical appraisal of Guelorget and Perthuisot's concept of the paralic ecosystem and confinement to macrotidal Europe. *Estuaries, Coastal and Shelf Science*, **38**:41-48.
- Benblidia M., Margat J. & Vallée V., 1997.** L'eau en région méditerranéenne. Centre d'Activité Régionale/Plan Bleu, Sophia Antipolis: 91p.
- Bianchi T. S., Baskaran M., Delord J. & Ravichandran M. 1997.** Carbon cycling in a shallow turbid estuary of Southeast Texas: use of plant pigment biomarkers and water quality parameters. *Estuaries*, **20**(2): 404-415.
- Béthoux J. P., Morin P. & Rinz-pino D. P., 2002.** Temporal trends in nutrients rations: chemical evidence of Mediterranean Ecosystem changes driven by human activity. *Deep-sea Research*, **II 49**: 2007 - 2016.
- Bianchi T. S., 2007.** Biogeochemistry of estuary. Oxford University Press, Inc, New York: 706p.
- Billen G., Garnier J., Ficht A. & Cun C., 2001.** Modeling the Response of Water Quality in the Seine River. Estuary to Human Activity in its Watershed Over the Last 50 Years. *Estuaries*, **24**(6B): 977-993.
- Boynton W. R., & Kemp W. M., 1985.** Nutrient regeneration and oxygen consumption by sediments along an estuarine salinity gradient. *Mar.Ecol.Prog.Series*, **23**: 45-55.
- Brion N., Andersson M. G. I., Elskens M., Diaconu C., Baeyens W., Dehairs F & Middelburg J., 2008.** Nitrogen cycling, retention and export in a eutrophic temperate macrotidal estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **357**: 87-99.
- Bricker S. B., Clement C. G., Pirhalla D. E., Orlando S. P. & Farrow D. R. G., 1999.** National Estuarine Eutrophication Assessment. Effects of Nutrient Enrichment in the Nation's Estuaries. NOAA, National Ocean Service, Special Projects Office and National Centers for Coastal Ocean Science, Silver Spring.
- Budgen G. L., Hargrave B. T., Sinclair M. M., Tang C. J., Therriault J. C. & Yeats P. A., 1982.** Freshwater runoff effects in the marine environment: the Gulf of St Lawrence example, Canadian Technical Reports on Fisheries and Aquatic Sciences, **1078**: 1-89.
- Cadée G. C., 1987.** Organic carbon in the Ems river and estuary: A comparison of summer and winter conditions. SCOP/UNEP. *Sonderband Heft*, **64**: 359-374.
- Conley D. J., Kaas H., Møhlenberg H., Rasmussen F. B. & Windolf J., 2000.** Characteristics of Danish estuaries. *Estuaries*, **23**: 820-837.

- Conomos T. J., Smith R. E., Peterson D. H., Hager S. W. & Schemel L. E., 1979.** Processes affecting seasonal distributions of water properties in the San Francisco Bay estuarine system. In Conomos Ed. San Francisco: 115-142.
- Cook P. L. M., Revill A. T., Bulter E. C. V. & Eyer B. D., 2004.** Carbon and nitrogen cycling on intertidal mudflats of a temperate Australian estuary. II. Nitrogen cycling. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **280**: 39-54.
- Dalrymple R. W., Zaitlin B. A. & Boyd R., 1992.** Estuarine facies models; conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentology Petrology*, **62**: 1130-1146.
- Daskalov G., 1999.** Relating fish recruitment to stock biomass and physical environment in the Black Sea using generalized additive models, *Fisheries Research*, **41**: 1-23.
- Davidson N. C., 1991.** Nature Conservation and Estuaries in Great Britain. Nature Conservancy Council: 422 p.
- Day J. H., 1980.** Estuarine ecology, with particular reference to southern Africa. Ed Balkema books Ed, Rotterdam: 400p.
- Deegan L. A., Day J. W., Gosselink J. G., Yáñez-Arancibia A., Soberón G. & Sánchez-Gil P., 1986.** Relationships among physical characteristics, vegetation distribution and fisheries yield in Gulf of Mexico estuaries, in: D.A. Wolfe (Ed.) Estuarine Variability (New York, Academic Press).
- De BELAIR G., 1987.** Composition & déterminisme de la végétation d'une plaine côtière marécageuse : LA Mafrag (Annaba, Algérie). *Bull. Ecol*, t., **18** (4): 393-407.
- Deguan W. 2003.** Pearl estuary. College of Environment Science and Engineering, Hohai University, 1 Xikang Road, Nanjing 210098, China: p626-631.
- DeWitt P. & Daiber F. C., 1974.** The Hydrography of the Murderkil Estuary, Delaware. *Chesapeake Science*, **15** (2): 84-95.
- Dionne J. C., 1963.** Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, **7**: 36-44.
- Domingues R. B., Barbosa A. & Galvão H., 2005.** Nutrients, light and phytoplankton succession in a temperate estuary (the Guadiana, southwestern Iberia). *Estuaries, Coastal and Shelf Science*, **64**:249-260.
- Dyer K. R., 1997.** Estuaries: A physical introduction. John Wiley and Sons, London: 195p.
- Dyer K. R., 1990.** The Rich Diversity of Estuaries. *Estuaries*, **13** (4): 504-605.
- Eyer B. D., 2000.** Regional evaluation of nutrient transformation and phytoplankton growth in nine river-dominated sub-tropical east Australian estuaries. *Marine ecology progress series*, **61**: 61-83.
- Elliot M. & McLusky D. S., 2004.** The estuarine ecosystem: ecology, threats and management. Oxford University Press (Ed), 214p.

- Elliot M. & McLusky D. S., 2002.** The need for definition in understanding estuaries. *Estuaries, Coastal and Shelf Science*, **55**: 815-827.
- El-Blidi S & Fekhaoui M., 2003.** Hydrologie et dynamique marégraphique de l'estuaire du Sebou (Gharb, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie*, **25**: 57-65.
- Estrada M., 1996.** Primary production in the north-western Mediterranean, *Scientia Marina*, **60**(2): 55-64.
- European Environment Agency (EEA), 1999.** State and pressures of the marine and coastal Mediterranean environment. Environmental assessment series. Office for Official Publications/EE, L-2985 Luxembourg, **5**: 137p.
- European Union., 2000.** Parliament and Council Directive 2000/60/EC of 23rd October 2000 establishing a Framework for Community Action in the field of water policy. Official Journal PE-CONS 3639/1/00 REV 1, Brussels.
- Fairbridge R., 1980.** The estuary: its definition and geodynamic cycle. In E. Olausson and I. Cato (eds.), *Chemistry and Geochemistry of Estuaries*, John Wiley and Son, New York: 1-35.
- Featherstone A. F., Butler E. C. V. & O'Grady B. V., 2004.** Seasonal Cycling of Arsenic Species in a Stratified, Microtidal Estuary (Huon River, Tasmania). *Estuaries*, **27**(1): 18-35.
- Findlay S., Pace M., Fischer D., 1996.** Spatial and Temporal Variability in the Lower Food Web of the Tidal Freshwater Hudson River. *Estuaries*, **19** (4): 866-873.
- Froneman P. W., 2004.** Zooplankton community structure and biomass in a southern African temporarily open/closed estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **60**: 125-132.
- Garnier J., Servais P., Billen G., Akopian M. & Brion N., 2001.** Lower Seine river and estuary (France) carbon and oxygen budgets during low flow. *Estuaries*, **24**(6B):964-976.
- Giovanardi F. & Tromelleni E., 1992.** Statistical assessment of trophic conditions. Application of the O.E.C.D methodology to the marine environment. In: *marine coastal eutrophication*, Vollenwerder R., R. Marchetti & R. Viviani, Eds. Actes conférence Internationale, Bologna, Italy, 21-24 March 1990. *Journal of science of the Total environment*, Supp: 211- 233.
- Gómez-Gutiérrez A. I., Joyer I., Bodineau L., Albaigés J. & Bayona J. M., 2006.** Organic contaminant loads into Western Mediterranean Sea: Estimate of Ebro river input. *Sous press; Chemosphere*, **65**(2):224-236.
- Gonzañ Lez-Oreja J. A. & Saiz-Salinas J. I., 1998.** Technical note: exploring the relationships between abiotic variables and benthic community structure in a polluted estuarine system. *Wat. Res.*, **32**(12): 3799-3807.
- Hardisty J., 2007.** Assessment of tidal current resources: Case studies of estuarine and coastal sites. *Energy & environment*, **18** (2): 233-249.
- Harris G. P., 2001.** Biogeochemistry of nitrogen and phosphorus in Australian catchments, rivers and estuaries: effects of land use and flow regulation and comparisons with global patterns. *Marine and Freshwater Research*, **52**: 139-149.

- Haridi A., Hadeif H., Bendjedid R., Tazir K., Diaf A., Ziouch O. R., Ounissi M. 2008.** Caractères hydrologiques de l'estuaire du Mafrag: salinité et masses d'eaux. *Sciences, Technologies & Développement*. ANDRU., **3**: 33-40.
- Helmer R., 1977.** Pollution from land-based sources in the Mediterranean. *Ambio*, **6**(6): 312-316.
- Hodgkin E. P. & Lenanton R. C., 1981.** Estuaries and coastal lagoons of south western Australia. In *Estuaries and Nutrients* (Neilson, B. J. & Cronin, L. E., eds). Humana Press, New Jersey: 307-321.
- Homborg C., Itekkot V., Cociasu A. & Bodungen B., 1997.** Effect of Danube river dam on black sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, London, **386**:385-388.
- Howarth R., Andersen D., Cloern J., Hopkinson C.S., Lpoinde B., Malone T., Marcus N., McGlathery K., Sharpley A. & Walker D., 2000.** Nutrient pollution of coastal rivers, boys, and sea. Issues in *Ecology*, n°7:17p.
- Hubert H. G. S. & Pagès J., 1992.** Hypersalinity: a dramatic change in the hydrology of Sahelian Estuaries. *Journal of Hydrology*, **135**: 157-174.
- Ibanez C., Pont N. & Prat N., 1997.** Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: a basis for defining and classifying salt-wedge. *Limnology and Oceanography*, **42**: 89-101.
- Ibáñez C. & Prat N., 2003.** The environmental impact of the Spanish National Hydrological Plan on the lower Ebro river and delta. *Water Resources Development*, **19**(3): 485-500.
- Ibanez C., Curco A., Day J. W. & Prat N., 2000.** Structure and productivity of microtidal Mediterranean coastal marshes, in: M. P. Weinstein & D. A. Kreeger (Eds) *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology* (Dordrecht, Kluwer).
- Jennifer K., 2006.** Nutrient Limitation in the Lower Housatonic River Estuary. *Estuaries and coasts*, **29**(5): 831-840.
- Jing Z., Zhi G. Y., Su M. L., Hui X. & Min G. L., 1997.** Dynamics of Nutrient Elements in Three Estuaries of North China: The Luanhe, Shuangtaizihe, and Yalujiang. *Estuaries*, **20**(1): 110-123.; March 1997
- Johnson R. G., 1997b.** Climate control requires a dam the strait of Gibraltar. OES transaction, American Geophysical Union, **78** : 28-277.
- Journal Officiel de la République Algérienne (JORA)., 2002.** Loi N° 2-2 du 22 Dhou El-Kaada 1422 correspondant au 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral. 12 février 2002, **10**: 5p.
- Khélifi-touhami M., Ounissi M., Saker I., Haridi H., Djorfi S. & Abdenour C., 2006.** hydrology of the Mafrag estuary (Algeria): Transport of inorganic nitrogen and phosphorus to the adjacent coast. *Journal of food, Agriculture & Environement*, **4**(2): 219-239.

- Kinne O., 1971.** Invertebrates. In: *Marine Ecology*. (Kinne, O., ed.). Wiley Interscience, London: 822–995.
- Kjerfve B., 1989.** Estuarine geomorphology and physical oceanography. In Day, Jr W., Hall, C.A.S., Kemp, W.M., Yanez-Arancibia, A. Ed. *Estuarine Ecology*. Wiley, New York: 47–78.
- Kromkamp J. C. & Peene J., 2005.** Changes in phytoplankton biomass and primary production between 1991 and 2001 in the Westerschelde estuary (Belgium/The Netherlands). *Hydrobiologia*, **540**: 117–126.
- Labar S., 2003.** Contribution à l'identification des aires inondables et qualité physico-chimiques des eaux stagnantes temporaires dans la vallée de la Mafrag (Extrême Nord Est Algérien). Thèse magister en Hydrochimie, département de géologie, Université Badji-Mokhtar, Annaba: 111p.
- Leopold L. B., Collins J.N. & Collins L. M., 1993.** Hydrology of some tidal channels in Estuarine marshland near San Francisco. *Catena*, **20**: 469– 493.
- Lisitzin A. P., 1999.** The continental-ocean boundary as a marginal filter in the World Oceans. In: Gray, J.S., Ambrose Jr., W., Szaniawska, A. (Eds.), *Biogeochemical Cycling and Sediment Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 69–103.
- Lucea A., Duarte C. M., Agustí S. & Søndergaard M., 2003.** Nutrient (N, P and Si) and carbon partitioning in the stratified NW Mediterranean. *Journal of Sea Research*, **49**: 157– 170.
- Loup J., 1974.** Les eaux terrestres (hydrologie continentale). Masson et Cie (Ed). Paris : 171pp.
- McLusky D.S., 1993.** Marine and estuarine gradients – an overview. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, **27**: 489–93.
- Mébarki A., 1999.** Les bassins exoréiques de l'Est Algérien et leurs apports d'étiage à la Méditerranée : écoulement, rejets et protection des eaux littorales. Journées d'information et d'études sur la pollution des eaux littorales de l'Est algérien, Constantine, 16-17 novembre, 1999 : 24-39.
- Mébarki A., 2009.** Ressources en eau et aménagement en Algérie. Les bassins hydrographiques de l'Est. Office des publications universitaires (OPU) : 389pp.
- Meire P., 2006.** Long-term change in dissolved inorganic nutrients in the heterotrophic Scheldt estuary. *Limnol. Oceanogr.*, **51**(1-2): 409–423.
- Miller A. R., 1983.** The Mediterranean Sea, A. Physical aspects. In: *Ecosystems of the world. Estuaries and enclosed seas*. B. H. Ketchum (ed.), **26**: 219–239.
- Milliman J. D., 1997.** Blessed dams or damned dams? *Nature*, **386**:325–327.
- O'Donohue M. J. H., 1997.** Phytoplankton Productivity Response to Nutrient Concentrations. Light Availability and Temperature Along an Australian Estuarine Gradient, Moreton Bay. *Estuaries*, **20**(3): 521–533.
- Ounissi M., Haridi A., Ziouch O-R. and Khelifi-Touhami M., 2009.** Water masses and nutrients in a minor Mediterranean estuary under large damming (The Mafrag

- estuary, Algeria). Proceedings of the Global Conference on Global Warming, July 5-9, 2009, Istanbul, Turkey: 324-334.
- Okopian M., Garnier J., & Pourriot R., 2002.** Cinétique du zooplancton dans un continuum aquatique: de la Marne et son réservoir à l'estuaire de la Seine. *C. R. Biologie, Académie des Sciences, Paris*, **325**: 807-818.
- Pagès J. & Lemoalle J., 1995.** Distribution of carbon in a tropical hypersaline estuary, The Casamance (Senegal, West Africa). *Estuaries*, **18**(3): 456-468.
- Parsons T. R., Maita Y. & Lalli C. M., 1989.** A manual of chemical and biological methods for sea water analysis. Pergamon Press, 173 p.
- Pauc H., 1989.** L'intrusion saline et la dynamique des matériaux en suspension au contact fluvio-marin : régime de crue et régime d'étiage dans l'oued Mazafran (ouest algérois). *Marine geology*, **87**: 95-102.
- Pauc H., 2003.** Fonctionnement de l'estuaire microtidal méditerranéen: conséquences sédimentologiques et environnementales. Comm. Congrès de Bastia sur la méditerranée, du 14 au 21 avril 2003.
- Pearce F. & Grivelli A. J., 1994.** *Caractéristiques générales des zones humides méditerranéennes*. Publication Med Wet. Conservation des zones humides méditerranéennes. Tour du Valat: 89p.
- Perissinotto R., Walker D. R., Webb P., Wooldridge T. H. & Bally R., 2000.** Relationships between Zooplankton and Phytoplankton in a Warm-temperate, Semi permanently Closed Estuary, South Africa. *Estuaries, Coastal and Shelf Science*, **51**: 1-11.
- Perillo G. M. E., 1995.** Definition and geomorphologic classifications of estuaries. In "Geomorphology and sedimentology of estuaries" G.M.E. Perillo Ed. *Elsevier Science BV, Amsterdam* : 17-47.
- Postel S. L., Morrison J. I. & Gleick P. H., 1998.** Allocating fresh water to aquatic ecosystems: the case of the Colorado River delta, *Water International*, **23** : 119-125.
- Pritchard D.W., 1967.** What an estuary: a physical view point.3-5 in Lauff,G.H.(ed), *Estuaries*. Publication N° 83, Association for the Advancement of Science, Washington, DC.
- Postel S. L., Morrison J. I. & Gleick P. H., 1998.** Allocating fresh water to aquatic ecosystems: the case of the Colorado River delta, *Water International*, **23**: 119-125.
- Ridgway J. & Shimmiel G., 2002.** Estuaries as Repositories of Historical Contamination and their impact on Shelf Seas Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, **55**: 903-928.
- Redfield A. C., Ketchum B. H. & Richards F. A., 1963.** The influence of organisms on the composition of sea water. In the sea, ed. Hill, Interscience, New York, Lond, 2: 26-77.

- Romao C., 1996.** Interpretation manual of European Union Habitats, Version EUR15. European Commission, DGXI (Environment Nuclear Security and Civil Protection, Brussels: 106 pp.
- Sempéré R. & Cauwet G., 1995.** Occurrence of Organic Colloids in the Stratified Estuary of the Krka River (Croatia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **40**: 105-114.
- Scharler U. M. & Baird D., 2005.** The filtering capacity of selected Eastern Cape estuaries, South Africa. *Water SA*, **31**(4): 483-489.
- Scully M. E., Friedrichs C. & Brubaker J. 2005.** Control of Estuarine Stratification and Mixing by Wind-induced Straining of the Estuarine Density Field. *Estuaries*, **28**(3): 321-326.
- Seirra J. P., Sánchez-Arcilla A., González Del Río J., Flos J., Movellán E., Mösso C., Martínez R., Rodilla M., Falco S., & Romero I., 2002.** Spatial distribution of nutrients in the Ebro estuary and plume. *Continental Shelf Research*, **22**: 361-378.
- Sûzal A. S., 2008.** Dissolved Nutrient Behaviour along the Estuarine Salinity Gradient at the Gediz River Mouth (Aegean Sea, Turkey). *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, **32**: 67-84.
- Takashi N., Isao K. & Akihiko H., 1982.** Estimates of Denitrification and Nitrification in Coastal and Estuarine Sediments. Ocean Research Institute, University of Tokyo, Nakano ku, Tokyo 164, Japan, **45** (2): 444-450.
- Tappin A. D., 2002.** An examination of fluxes of nitrogen and phosphorus in temperate and tropical estuaries: current estimates and uncertainties. *Estuaries, Coastal and Shelf Science*, **55**: 885-901.
- Telesh I. V., 2004.** Plankton of the Baltic estuarine ecosystems with emphasis on Neva Estuary: a review of present knowledge and research perspectives. *Marine Pollution Bulletin*, **49**: 206-219.
- Trefry J. H., Metz S., Nelson T. A., Trocine R. P. & Eadie B. J., 1994.** Transport of particulate organic carbon by the Mississippi river and Its fate in the gulf of Mexico. *Estuaries*, **17**(4): 839-849.
- Tsai C. F., Chen P. Y., Chen C. P., Lee M. A., Shiah G. Y. & Lee K. T., 1997.** Fluctuation in abundance of larval anchovy and environmental conditions in coastal waters off south-western Taiwan as associated with the El Niño southern oscillation. *Fisheries Oceanography*, **6**: 238-249.
- Turley C. M., 1997.** The changing Mediterranean sea. A sensitive ecosystem? *Progress in oceanography*, **44**: 387-400.
- Underwood G. J.C. & Kromkamp J., 1999.** Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries. *Advances in Ecological Research*, **29**: 93-153.
- Venice System., 1958.** Symposium on the classification of brackish waters, Venice April 8-14, 1958. *Archives Oceanography and Limnology* **11**, suppl, 1-248.
- Vörösmarty, B. J., 1998.** Films minces de dioxyde de silicium. Haute qualité, basse température, György [HU/HU]; E-mail: kapuvar@gmail.com; a.vorosmarty@gmail.com Web.

- Wahby S. D. & Bishara N. F., 1981.** The effect of the River Nile on Mediterranean water before and after the construction of the high dam at Aswan, in: *Proceedings of a Review Workshop on River Inputs to Ocean Systems* (New York, United Nations).
- Ward T., Butler E. & Hill B., 1998.** Environmental Indicators for Natural State of Environment Reporting: Estuaries and the Sea. Department of the Environment, Canberra, Australia: 85p.
- Whitfield A. K., 1992.** A characterization of southern African estuarine systems. *Southern African Journal of Aquatic Sciences*, **18**: 89–103.
- Wolanski E., 2007.** Protective functions of coastal forests and trees against natural hazards. In Braatz S., Fortuna S., Broadhead J. and Leslie R (eds): 157 -179.

Tableau I. Recensement de l'activité agricole dans quelques communes (BNEDER, 1995)

Commune	Population totale	% population active	% actifs dans l'agriculture	% population dépendant de l'agriculture
El Kala	21481	2012	348	17
El Tarf	14069	2035	308	15
Aïn Assel	9859	1981	851	43
Souarekh	6076	2047	450	22
El Aïoun	3590	1852	810	44
R. Souk	2931	1965	1560	80

Tableau II. Effectifs de bovins, ovins et caprins*

Effectifs estimés pour la wilaya	
Bovins	40000
Ovins	15000
Caprins	12000

Encadré I*L'agriculture en chiffre*

Dans la wilaya l'agriculture occupe une superficie de 84861 ha soit 28% de la superficie totale. La SAU (superficie agricole utile) est de 72000 hectares qui se répartissent en 32536 hectares (45,20% de la SAU) pour le domaine privé et 39463 hectares (54,80% de la SAU) pour le domaine public (BNEDER, 1995).

Encadré II*L'industrie dans la wilaya c'est une question de vocation**

L'industrie au sens propre du terme est pratiquement inexistante dans le Parc National et par extension dans toute la wilaya. La région a été ainsi préservée par les choix faits dans les années 70 de concentrer l'activité industrielle autour de Annaba. La protection apportée par la création du Parc National au début des années 80 et l'opposition apparue localement contre une industrie de pâte à papier sur les bords du lac Oubeïra ont découragé les promoteurs de ces secteurs d'activité. Ce qui est considéré localement comme industrie se résume à quelques activités qui relèvent de la petite et moyenne entreprise (PME/PMI). Les plus grosses sont une fabrique de menuiserie générale à El-Tarf. A coté de cela il faut compter une briqueterie et deux conserveries de tomate à Bouteldja, une unité de mise en bouteille de gaz butane à El Tarf et une unité de fabrication de matériel sanitaire à El-Kala. Ce secteur employait jusqu'à 1000 personnes avant qu'il ne soit touché par les réformes économiques. Des mesures incitatives pour drainer des investissements et des promoteurs privés sont restées sans succès. Les dossiers qui ont été présentés dans ce cadre vise particulièrement l'agro-alimentaire et le tourisme, activités qui aussi ont l'inconvénient d'être consommatrices d'eau et productrices de rejets polluants.

*LANSCADPE AMENAGEMENT Co-Projet Plan de Gestion PNEK-1998 (Modifié & actualisé)

Tableau III. Bilan d'irrigation 2008-2009 par mode d'irrigation (D'après les données de DSA, 2010)

Localité	Superficie par mode d'irrigation (ha)			Total
	Gravité	Aspersion	Localisé	
El-Taref	380.5	10	//	390.5
Ain-Assel	390	08	1.04	399.04
Zitouna	11	//	//	11
Bougous	//	//	//	//
El-Kala	80	30	//	110
Souarekh	76	10	//	86
Ramel-Souk	18	01	//	19
El-Aioun	03	//	02	05
Ben-Mhidi	//	160	25.43	185.43
Chatt	//	289	50.08	339.08
Berrihane	401	325	//	726
Besbes	280	210	54	544
Zrizer	//	//	//	//
Asfour	12	//	//	12
Drean	90	445	05	540
Chebaita M	//	465	//	465
Chihani	160	168	//	328
Bouhadjar	06	08	//	14
Ain-Kerma	18	//	//	18
Oued-Zitouna	08	//	//	08
Beni-Salah	04	07	//	11
Bouteldja	69	348	//	417
Lac des oiseaux	85	185	//	270
Cheffia	10	50	0.5	60.5
Total (hors périmètre)	2101.5	2719	138.05	4958.55
Dans le périmètre de Bounamoussa				
Ben-Mhidi	//	175	91	266
Chatt	//	554	75.40	629.4
Berrihane	//	//	//	//
Besbes	96	2220	166.72	2482.72
Zerizer	67	80	//	147
Asfour	311	76	//	387
Drean	//	//	//	//
Chebaita	175	310	//	485
Chihani	//	//	//	//
Total (dans le périmètre)	649	3415	333.12	4397.92
Total général de la superficie irriguée				9356.47

Tableau IV. Valeurs d'indices de stratification relevés aux stations aval pour la période 2005-2006. *It* : indice de stratification des eaux selon la température ; *Is* : indice de stratification des eaux selon la salinité.

	Station Embouchure (E)		Station Confluence (C)		Station El- Kébir (K)		Station Bouamoussa (B)	
	<i>It</i> (m ⁻¹)	<i>Is</i> (m ⁻¹)	<i>It</i> (m ⁻¹)	<i>Is</i> (m ⁻¹)	<i>It</i> (m ⁻¹)	<i>Is</i> (m ⁻¹)	<i>It</i> (m ⁻¹)	<i>It</i> (m ⁻¹)
24.02.05	0,03	0	0,03	0	0,02	0,02	0,05	0,02
14.03.05	0,03	0,03	0,00	0	0,04	0,02	0,05	0,02
22.03.05	0,53	10,53	0,33	5,7	0,31	7,67	1	4,25
13.04.05	-	-	-	-	-	-	-	-
27.04.05	1,53	10,87	0,80	5,38	1,36	7,73	2,1	4,78
10.05.05	1,70	10,07	0,88	5,52	1,27	7,2	3,55	4,77
24.05.05	0,90	10,43	0,48	5,48	0,51	7,53	1,6	3,48
15.06.05	0,57	1,27	0,42	3,55	0,82	7,11	0,7	3,68
30.06.05	1,23	7,07	0,42	4,43	0,69	3,22	1,75	-
13.07.05	0,3	7,57	0,22	5,15	0,4	7,33	0,6	4,57
27.07.05	0,2	5,6	0,17	3,23	0,29	5,47	0,55	3,5
13.08.05	0,27	8	0,02	4,13	0,07	6,47	0,05	2,78
31.08.05	0,87	10	0,30	5,23	0,47	7,16	0,75	4,9
14.09.05	0,63	9,63	0,27	4,83	2,42	6,6	0,35	4,05
27.09.05	0,03	6,87	0,02	3,88	0,16	6,78	0,35	3,6
12.10.05	0,60	9,73	0,22	5,35	0,29	6,8	1,35	3,65
25.10.05	0,90	8,8	0,25	4,38	0,31	5,38	0,8	3,92
15.11.05	1,23	7,8	0,63	3,8	0,96	5,44	1,25	3,2
30.11.05	3,10	10,2	1,12	5,75	1,38	7,78	3,15	4,6
14.12.05.	-	-	0,00	0,23	0,82	6,58	1,9	5,73
29.12.05	1,07	8,7	0,58	4,63	0,64	5,8	-	5,53
15.01.06	1,20	10,07	0,57	4,63	0,62	6,09	0,4	0,22
31.01.06	0,83	10,73	0,45	5,12	0,62	6,98	0,8	3,88
15.02.06	-	-	0,05	0,27	0,04	0,02	0,2	0,02
27.02.06	0,07	0,4	0,02	0,07	0,04	0,11	0,1	0
16.03.06	0,07	0	0,02	0	0,02	0	0,6	0
27.03.06	1,03	11,33	0,60	5,43	0,49	6,91	1,8	4,5
15.04.06	1,53	10,97	0,68	5,37	1,09	7,51	1,75	4,53
27.04.06	0,50	7,67	0,38	4,48	0,67	6,64	0,15	2,97
13.05.06	1,70	8,17	1,05	5,1	1,58	7,2	2,35	3,95
24.05.06	0,00	0,07	0,00	0	0,24	0,42	0,15	0,32
11.06.06	0,23	7	0,47	3,87	0,44	5,76	0,3	3,33
25.06.06	0,67	4,67	0,40	2,5	1,07	3,69	0,2	0,13
09.07.06	0,00	2,17	0,00	0,53	0,96	1,13	0	0,02
25.07.06	-	2,6	-	0,45	-	0,33	-	0,28
13.08.06	-	1,27	-	0,72	-	0,98	-	0,55
30.08.06	-	0,4	-	0,2	-	0,49	-	0,15
13.09.06	-	0	-	0,08	-	0,24	-	0
26.09.06	0,40	0,17	0,17	0,02	0,16	0,04	-	0,03
14.10.06	0,10	0,03	0,00	0,07	0,24	2,67	0,15	0,12
29.10.06	0,63	1,23	0,08	0,13	0,09	0,58	0	0,07
12.11.06	-	0,2	-	0	-	1,44	0	0
29.11.06	0,03	0,07	0,45	2	0,47	0,73	0,25	0,53
12.12.06	0,80	1,67	0,32	0,87	0,07	1,36	0,45	1,08
24.12.06	0,03	0,33	0,10	0,05	0,07	1,33	0	0,08

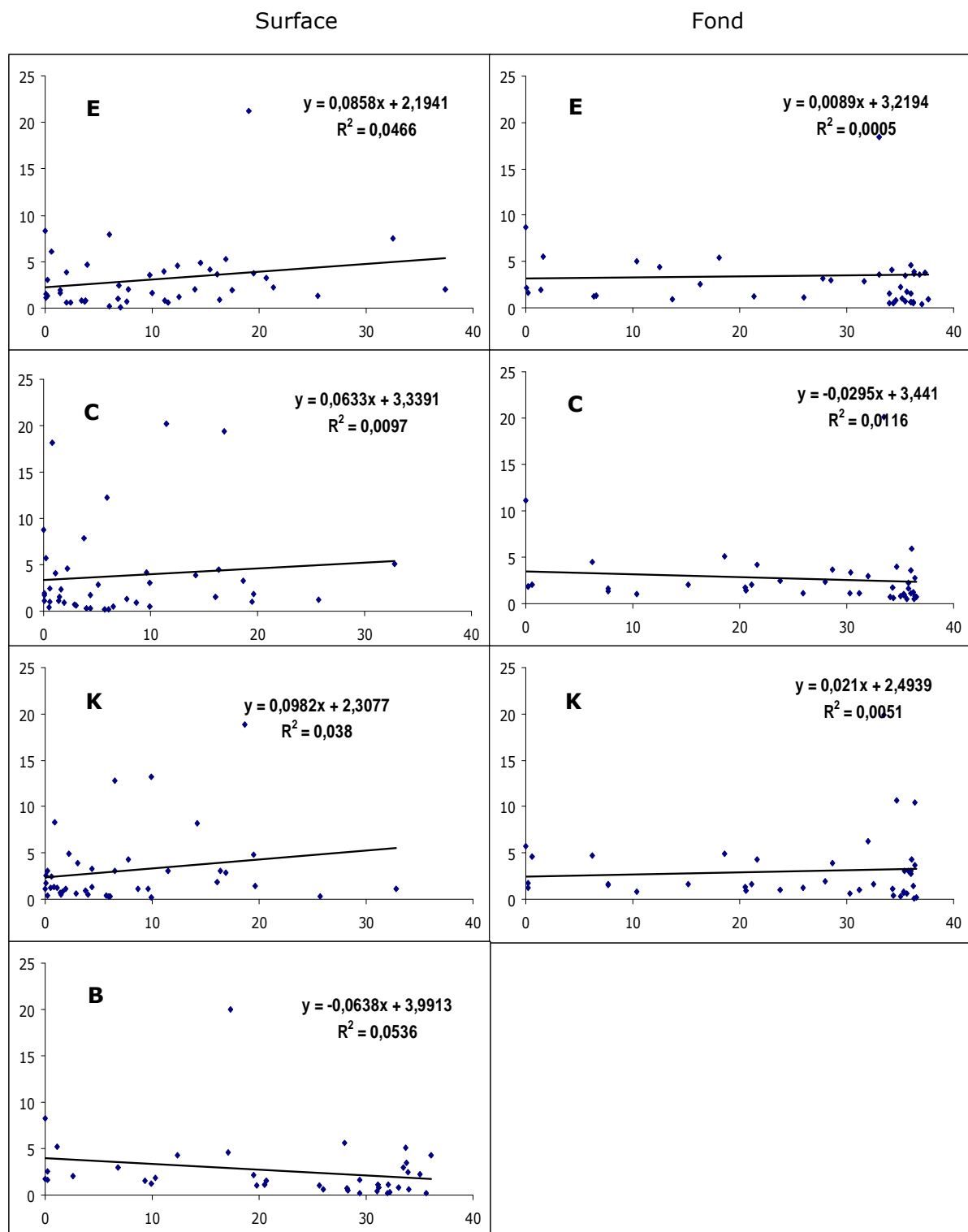


Figure I. Diagramme PO_4^{3-} - salinité (courbes de dilution) pour les eaux de surface et du fond dans les stations aval.

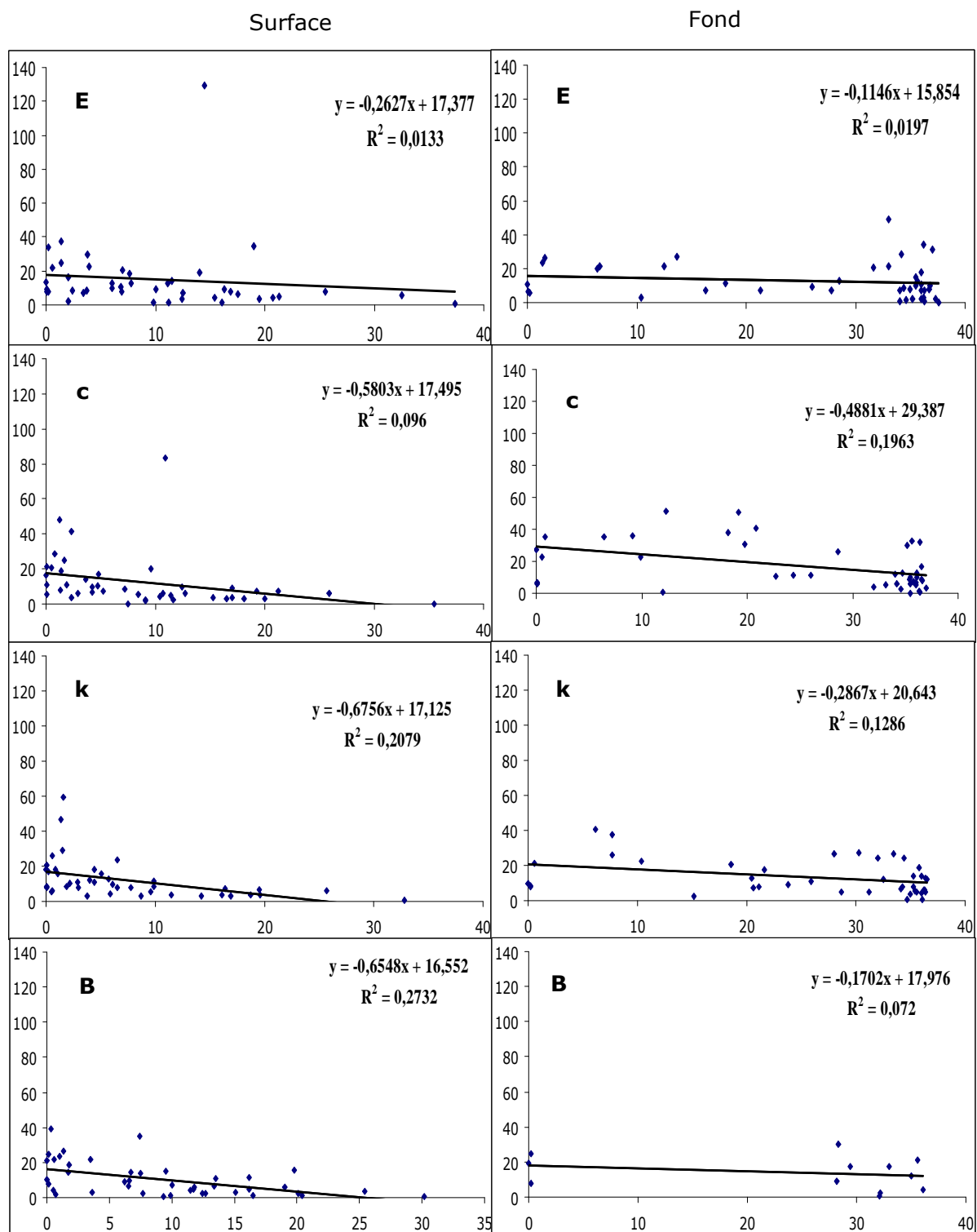


Figure II. Diagramme NH_4^+ - salinité (courbes de dilution) pour les eaux de surface et du fond dans les stations aval.

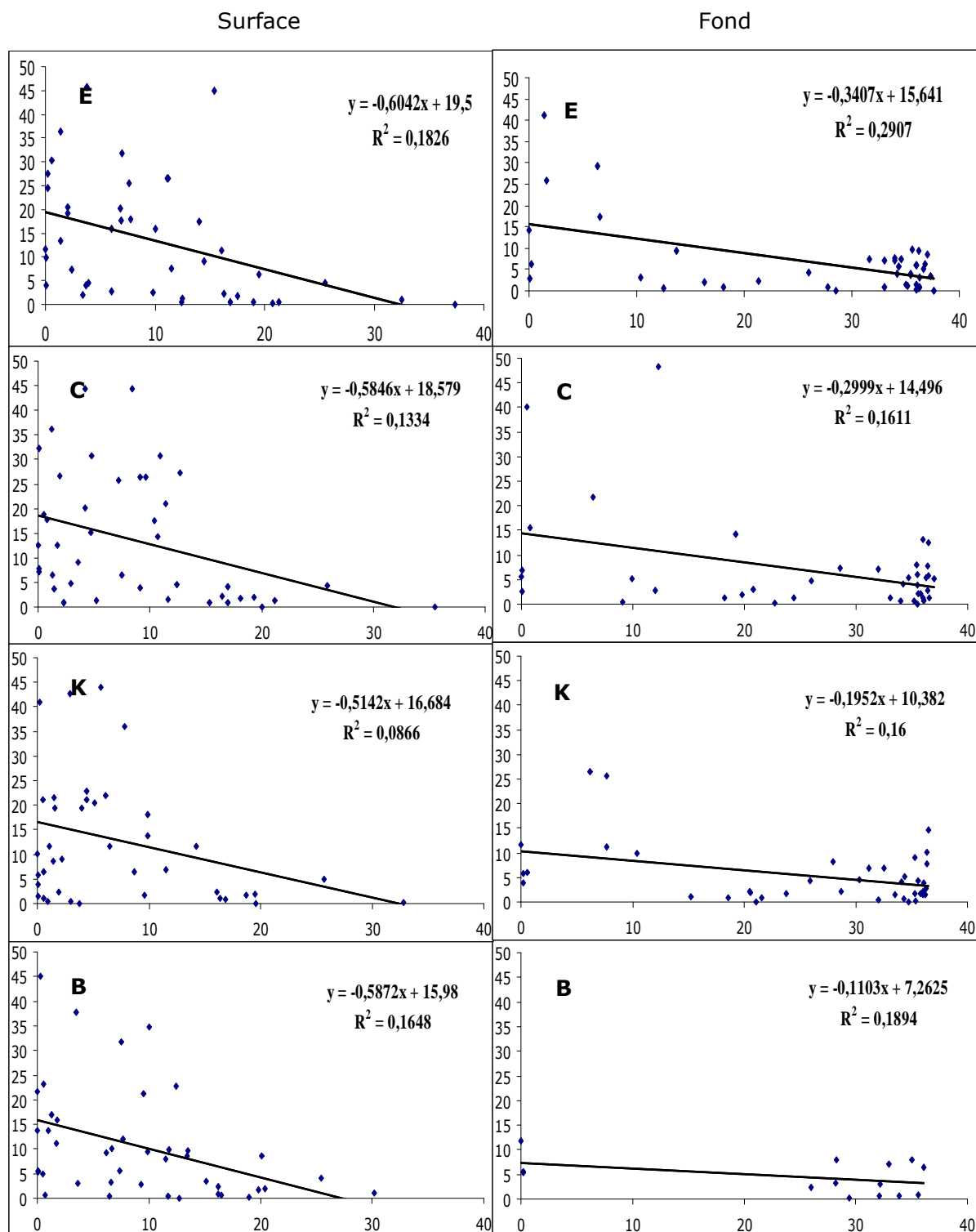


Figure III. Diagramme NO_3^- - salinité (courbes de dilution) pour les eaux de surface et du fond dans les stations aval.

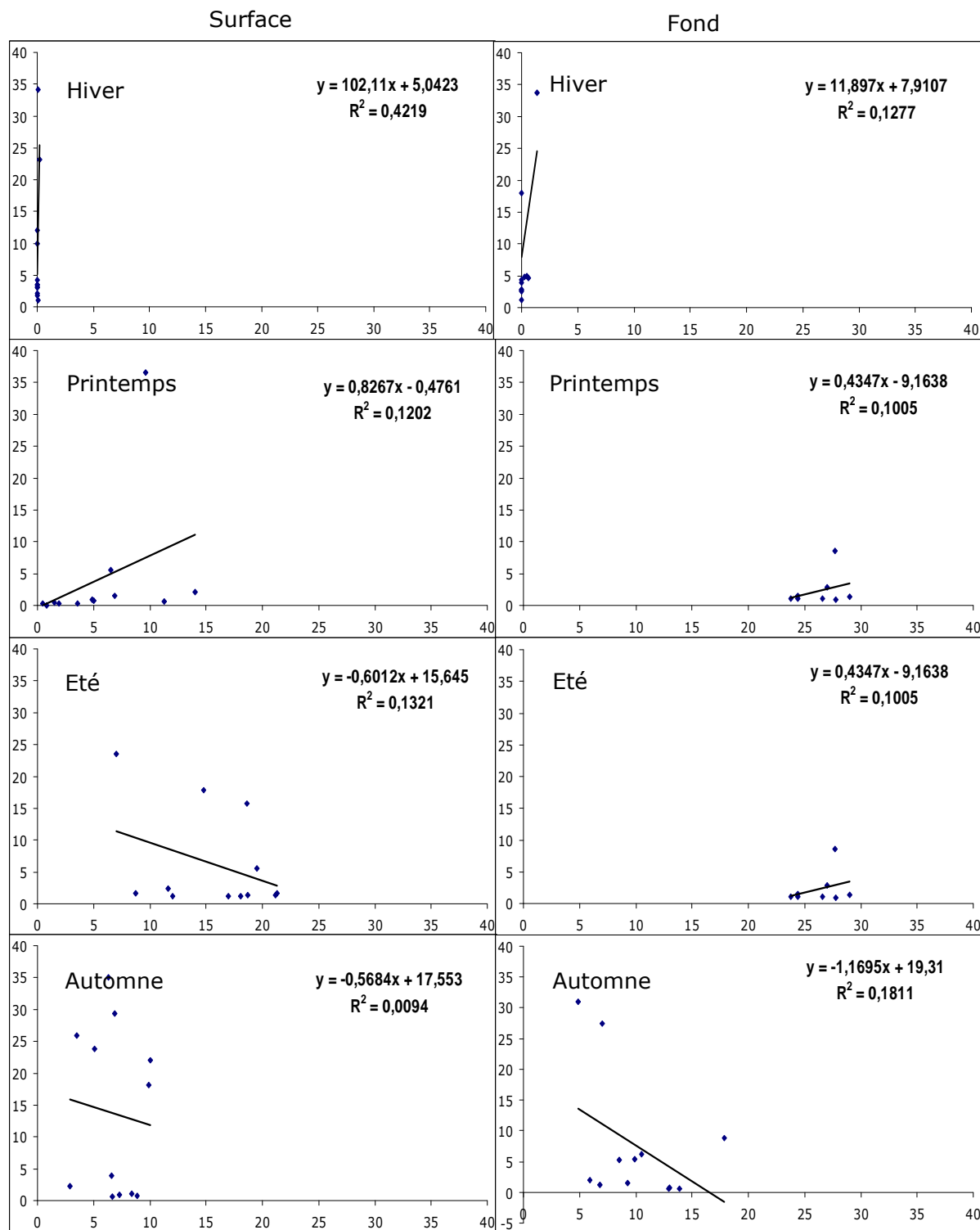


Figure IV. Diagramme PO_4^{3-} - salinité (courbes de dilution spatiale) pour les eaux de surface et du fond durant les quatre campagnes saisonnières dans El-Kébir en 2006.

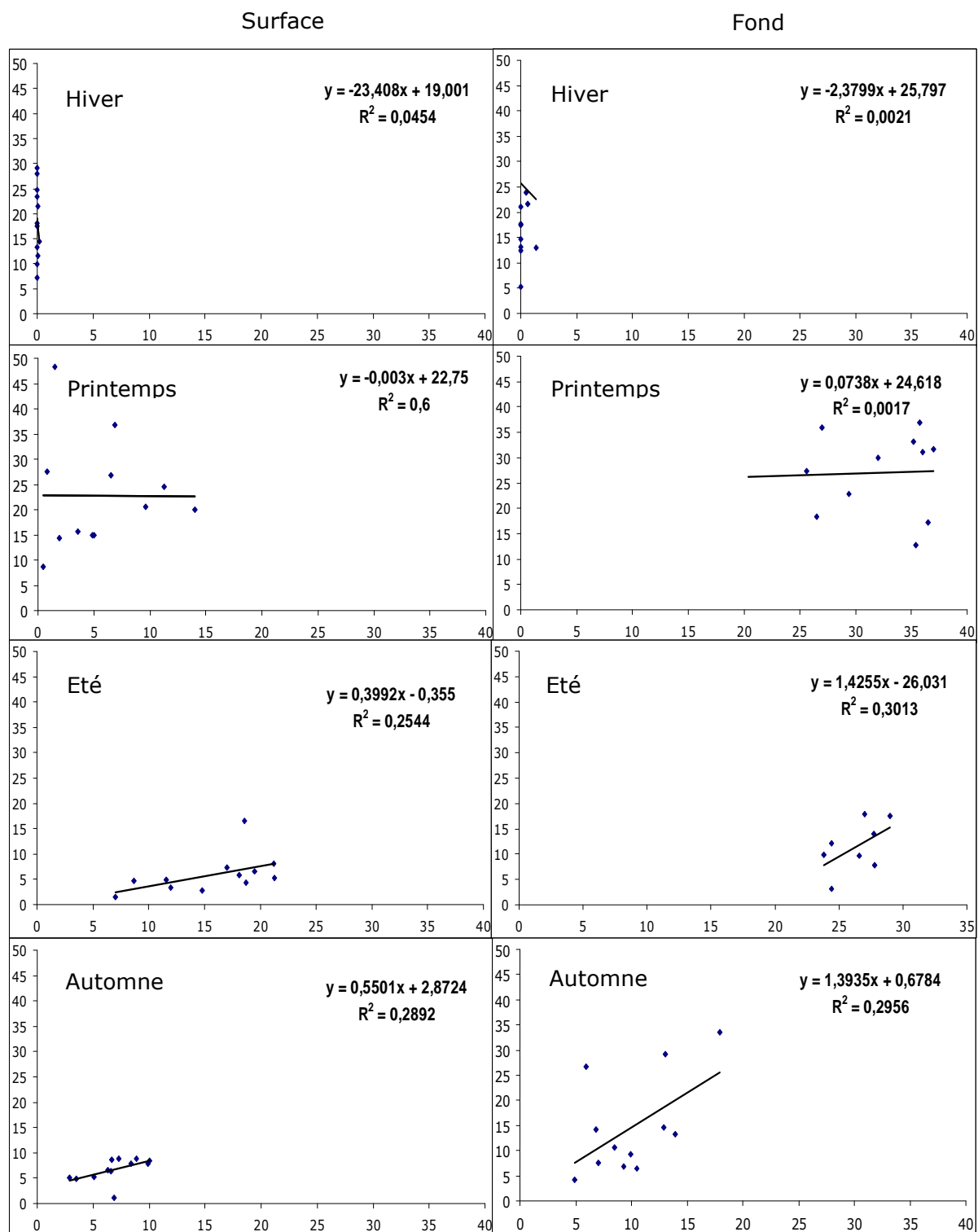


Figure V. Diagramme NH_4^+ - salinité (courbes de dilution spatiale) pour les eaux de surface et du fond durant les quatre campagnes saisonnières dans El-Kébir en 2006.

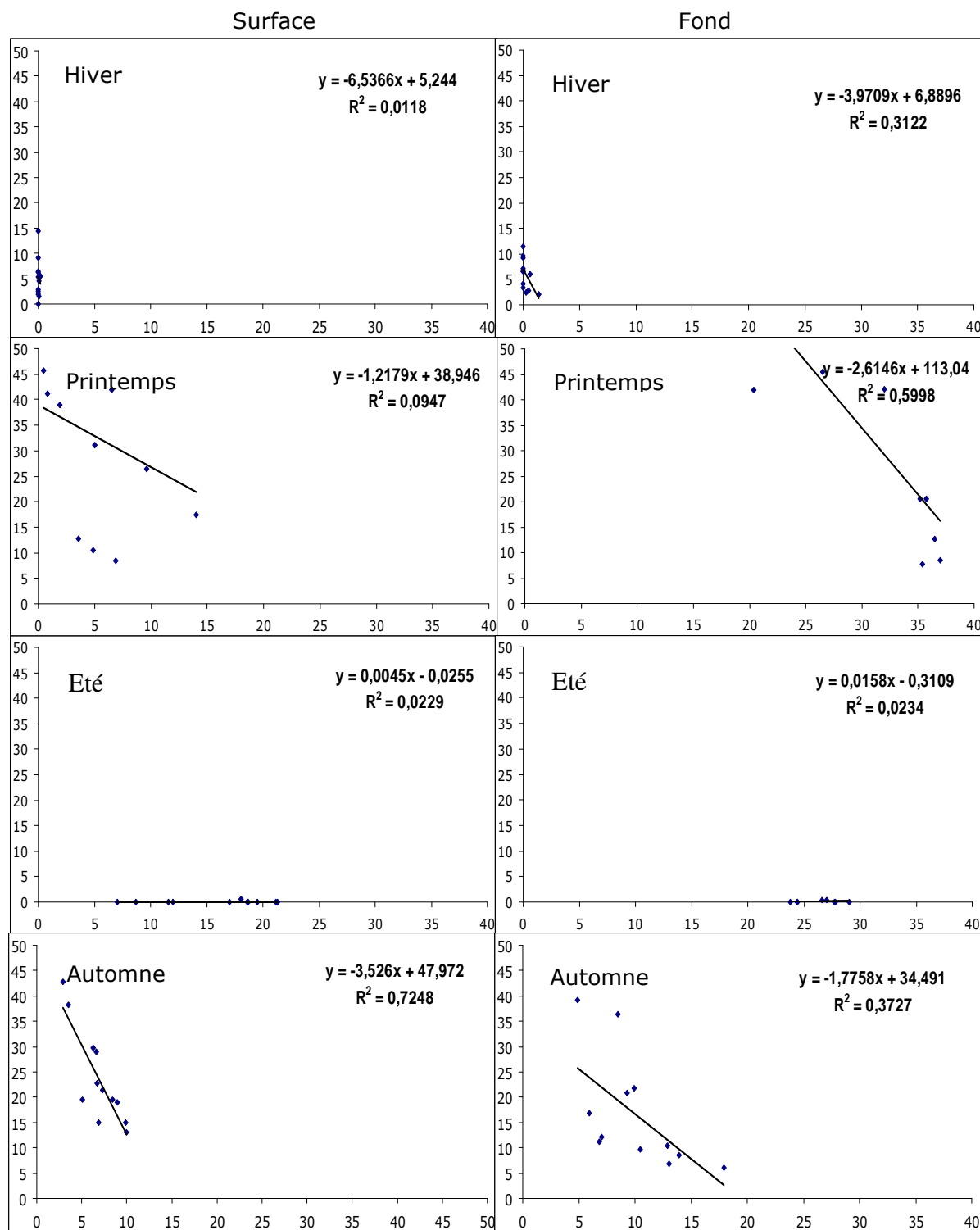


Figure VI. Diagramme NO_3^- - salinité (courbes de dilution spatiale) pour les eaux de surface et du fond durant les quatre campagnes saisonnières dans El-Kébir en 2006.

Encadré III

Le Plan Hydrologique National Espagnol (PHN)

La Loi 10/2001 qui encadre le Plan Hydrologique National Espagnol (PHN) a été votée le 5 juillet 2001. Selon les motifs exposés dans cette loi, le Gouvernement Espagnol décrit l'Espagne comme un pays marqué par de graves déséquilibres hydriques dus à une distribution inéquitable de ses ressources naturelles en eau, un pays qui risque d'atteindre une situation hydrique critique à l'horizon 2025. Les régions de l'arc méditerranéen et l'Andalousie représentent 55% de la population espagnole, cependant elles ne disposent que de 23% de l'eau douce disponible en Espagne. Or ce sont des régions de grande production agricole et de forte croissance urbano-touristique. Pour remédier. Ce problème le Gouvernement propose la planification globale des ressources hydrauliques: le Plan Hydrologique National.

Moyens mis en oeuvre:

Pour résoudre le problème de la sécheresse, et de l'augmentation des besoins en eau des régions du sud-est, le PHN prévoit le réaménagement complet des infrastructures vecteurs de l'eau douce sur l'ensemble du territoire espagnol. Ceci représente au total plus de 800 ouvrages parmi lesquels on compte la construction d'une centaine de nouveaux barrages et de bassins de rétention d'eau, ainsi que la mise en place d'une vingtaine d'usines de dessalement de l'eau de mer. Il faut ajouter la réalisation d'une trentaine de stations d'épuration, l'endiguement, la canalisation et la régulation de nombreux fleuves et rivières, la captation d'eaux souterraines, l'agrandissement du réseau d'approvisionnement en eau, l'automatisation des systèmes d'information hydroélectrique. Le PHN comprend également le transport via des canaux de l'eau du bassin hydrographique de l'Ebre jugé excédentaire vers la région d'Almeria, les bassins Segura et Júcar. Il s'agit des travaux les plus spectaculaires inscrits dans le cadre du PHN. Le gouvernement catalan prévoit par la suite le transfert de l'eau du Rhône, une condition impose par la Catalogne au gouvernement central pour son soutien au PHN.

Détails du transvasement de l'Ebre:

L'article 13 de la Loi 10/2001 définissant le PHN prévoit la construction de 4 canaux permettant le transvasement d'un milliard de m³ d'eau par an vers des régions sèches:

§ Le canal Ebre - Barcelone (179 kilomètres): 190 Millions m³ d'eau / an

§ Le canal Ebre -Júcar (361 kilomètre): 315 Millions m³ d'eau /an

§ Le canal Ebre -Segura (528 km) 450 Millions m³ d'eau /an

§ Le canal Ebre - Almeria (845 km) 95 Millions m³ d'eau / an

Ce projet colossal a pris comme référence le plan hydrologique réalisé en Californie (une région soumise aux mêmes conditions climatiques que l'Espagne).

