

**ESTIMATION DU FACTEUR DE FROTTEMENT ET
DU TRANSPORT SÉDIMENTAIRE PAR LA HOULE
SUR LE LITTORAL NORD-EST DE JERBA**
MÉMOIRE DE MAÎTRISE

Présenté
À L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE,
Université du Québec

Pour l'obtention du grade de
MAÎTRE ÈS SCIENCES (SCIENCES DE LA TERRE)

Par
Caroline Roberge
B.Sc.A. (génie géologique)

Novembre 2005

**ESTIMATION DU FACTEUR DE FROTTEMENT ET
DU TRANSPORT SÉDIMENTAIRE PAR LA HOULE
SUR LE LITTORAL NORD-EST DE JERBA**

MÉMOIRE DE MAÎTRISE

Présenté

À L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE,
Université du Québec

Pour l'obtention du grade de
MAÎTRE ES SCIENCES (GÉOLOGIE)

Par

Caroline Roberge

B.Sc.A. (génie géologique)

Présenté au comité d'évaluation :

- **Dr Michel Leclerc**, *Professeur-chercheur à l'Institut National de la Recherche Scientifique (Eau, Terre et Environnement)* - Président
- **Dr Yvon Ouellet**, *Professeur-chercheur à l'Université Laval - Correcteur externe*
- **Dr Bernard Long**, *Professeur-chercheur à l'Institut National de la Recherche Scientifique (Eau, Terre et Environnement)* - Directeur de maîtrise

Novembre 2005

Résumé

L'évolution morphologique du littoral représente l'effet observable de l'impact du transport sédimentaire. Le mécanisme de transport sédimentaire tire sa complexité des nombreux facteurs le décrivant et le quantifiant. Ainsi, la connaissance du milieu affecté, du type de transport, des caractéristiques des sédiments ainsi que des conditions hydrodynamiques est essentielle afin de comprendre ce mécanisme.

Le littoral nord-est de Jerba en Tunisie présente une érosion sévère du littoral. La zone de rivage, constituée principalement de sable fin-moyen à grossier, est affectée par des houles dues aux vents *NNE – NE*, par une évolution saisonnière de l'intensité des houles ainsi que par une marée locale de type microtidal. Afin de réhabiliter cette plage, une campagne de mesure a été conduite entre octobre 1999 et juin 2000. Cette campagne incluait une ligne de mesure comprenant quatre (4) stations d'enregistrement situées respectivement à des profondeurs d'eau de 1,9 m (station A), 3,0 m (station B), 4,9 m (station C) et 5,6 m (station D₂). Pendant huit mois consécutifs, d'octobre 1999 à juin 2000, les mesures (courant, marée, profondeur d'eau, hauteur de houles, période, ...) furent enregistrées par les courantomètres de type S4 programmés à 2 Hz, générant des blocs (bursts) de données de 18 minutes à toutes les 2 heures.

Ce projet de maîtrise poursuivait deux objectifs principaux. Le premier objectif était d'évaluer le facteur de frottement au niveau du fond ainsi que les paramètres de profondeur en fonction des modifications hydrodynamiques et de l'influence des houles le long de la ligne de mesure, observées à partir des données enregistrées par les courantomètres InterOcean S4. Le facteur de frottement a été estimé à partir du flux d'énergie de la houle pour différentes périodes tandis que les paramètres de profondeur de la houle tels que la longueur et le coefficient de profondeur de la houle ont été déterminés pour les conditions d'eau peu profonde à partir de la théorie de *Airy (1845)*. L'ensemble de ces résultats contribueront à expliquer l'évolution lors des tempêtes, du flux d'énergie, du frottement et de l'effet de la houle du à la profondeur pour des différentes périodes comprises entre 8,0 s à 10,0 s.

Le second objectif de ce projet était de calculer les transports sédimentaires (journaliers, mensuels et annuel) le long d'un profil de la ligne de mesure. Ainsi, pour chacune des stations, les résultats étaient déterminés pour chaque mesure enregistrée à la demi-seconde par les courantomètres selon le modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)*. Ces résultats ont ensuite été corrélés aux valeurs de concentration de sédiments en suspension mesurées à l'aide d'OBS.

En conclusion, dans le cadre de ce projet, un facteur de frottement en période de tempêtes ainsi qu'un coefficient de profondeur ont d'abord été déterminés. Ainsi, le profil de la ligne de mesure présente un facteur de frottement (« coefficient de modification ») de 0,57. En ce qui a trait à l'atténuation des houles, un coefficient de profondeur constant de 1,79 semble bien répondre à la morphologie du site.

De plus, le transport sédimentaire global le long du profil a été déterminé pour les huit mois de campagne de mesure, s'échelonnant de octobre 1999 à juin 2000. Ce transport est principalement érosif dans les zones près de la ligne de rivage (zone B-A et C-B) et transite essentiellement vers le nord-ouest. Le transport littoral atteint $33\,330\ m^3$ pour la campagne de mesure et $49\,015\ m^3$ pour l'année. En appliquant le facteur de correction du nouveau facteur de frottement global (ou coefficient de modification) tel que proposé, le transport littoral est plutôt de $16\,100\ m^3$ pour la durée de la campagne et de $23\,677\ m^3$ pour l'année.

Remerciements

Au-delà du travail personnel, ce mémoire de maîtrise a été rendu possible grâce au soutien et à la collaboration de plusieurs personnes à qui j'aimerais exprimer ma reconnaissance.

Je tiens d'abord à remercier sincèrement mon directeur de maîtrise, le docteur Bernard Long, pour son appui, sa patience, ses conseils judicieux, l'aide financière, les ressources et la confiance qu'il m'a accordés tout au long de mon projet.

Je désire remercier également les docteurs Yvon Ouellet et Michel Leclerc qui ont accepté de corriger mon mémoire. Leurs commentaires et leurs suggestions permirent la réflexion critique et l'évolution de ce projet.

Mes remerciements particuliers vont à la doctoresse Barbara Karakiewicz et au docteur Yvon Ouellet pour leurs suggestions et conseils judicieux.

Ce projet a été rendu possible grâce au support financier de l'INRS-ETE.

Ce mémoire a pu être mené à terme grâce à la persévérance, l'amitié et à l'amour de plusieurs personnes. Je dis donc merci à mes consœurs et confrères de l'INRS-ETE pour leurs encouragements et leur amitié, qui « faisaient du bien ». Je dis également merci aussi à tous mes amis pour leur patience, leur compréhension et leurs encouragements.

Enfin, je tiens à exprimer mon amour et ma gratitude à mes parents, pour l'amour, la confiance et le soutien qu'ils m'ont accordés et qui m'ont permis d'évoluer sainement, ainsi qu'à mon copain Stéphane et à son fils Tommy, pour leur patience, leur présence et leur amour.

Table des matières

Résumé	I
Remerciements	III
Table des matières	IV
Liste des tableaux	VIII
Liste des figures	IX
Liste des abréviations et des symboles utilisés.....	XIII
<i>Chapitre 1 : Introduction</i>	<i>1</i>
1.1. Situation	1
1.2. Problématique.....	7
1.3. Objectifs	8
1.4. Courantomètres S4	9
1.5. Sonde à rétrodiffusion optique	11
1.6. Posidonies (<i>Posidonia oceanica</i>)	12
1.7. Choix du modèle courantométrique	13
1.8. Conditions hydrodynamiques.....	14
<i>Chapitre 2 : Frottement.....</i>	<i>17</i>
2.1. Instrumentation, données et traitement	17
2.2. Méthodologie	18
2.3. Calcul du flux d'énergie	19
2.4. Calcul des paramètres de houle selon <i>Airy (1845)</i>	22
2.5. Résultats	24

2.5.1.	Flux d'énergie	24
2.5.2.	Facteur de frottement	24
2.5.3.	Paramètres de profondeur selon <i>Airy (1845)</i>	27
Chapitre 3 : Transport sédimentaire.....		29
3.1.	Instrumentation, données et traitement	29
3.2.	Méthodologie	29
3.3.	Transport sédimentaire selon <i>Madsen et Grant (1976)</i>	31
3.4.	Corrélation avec les sondes à rétrodiffusion optique (OBS).....	33
3.5.	Résultats	34
3.5.1.	Transport sédimentaire.....	34
3.5.1.1.	Transport journalier	35
3.5.1.2.	Transport mensuel	37
3.5.1.3.	Transport global.....	38
3.5.1.4.	Rapports comparatifs	42
3.5.2.	Corrélation avec la sonde à rétrodiffusion optique (OBS).....	43
Chapitre 4 : Discussion		47
4.1.	Problèmes liés à l'instrumentation	47
4.2.	Flux d'énergie, frottement et profondeur	48
4.2.1.	Flux d'énergie	49
4.2.2.	Frottement	50
4.2.3.	Effet de profondeur des houles.....	51
4.3.	Transport sédimentaire	52
4.3.1.	Débit sédimentaire.....	52
4.3.2.	Choix du coefficient de frottement.....	53
4.3.3.	Facteur de frottement (« Coefficient de modification »).....	53
4.3.4.	Granulométrie et sédimentologie	54
4.3.5.	Bilan sédimentaire.....	55
4.3.6.	Rapports comparatifs.....	55
Chapitre 5 : Conclusion		57
Bibliographie citée.....		59

Bibliographie complète.....	62
Annexe A : Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrées par chacune des quatre stations pour la campagne de mesure.	68
Annexe B : Graphiques du flux d'énergie en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour les périodes de pointe T_p correspondant à 8,0 s, 8,5 s, 9,0 s, 9,5 s et 10,0 s le long de la ligne de mesure.	84
Annexe C : Graphiques du coefficient de profondeur K_s en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour les périodes de pointe T_p correspondant à 8,0 s, 8,5 s, 9,0 s, 9,5 s et 10,0 s le long de la ligne de mesure.....	88
Annexe D : Débits sédimentaires journaliers le long du littoral QJ_L et le long du profil QJ_P calculés à partir du modèle courantométrique de <i>Madsen and Grant (1976)</i> pour les quatre stations de mesure.	92
Annexe E : Bilans sédimentaires journaliers dans le profil ΔQJ_P pour les quatre stations de mesure.	98
Annexe F : Volumes de sédiments journaliers transportés le long du littoral VJ_L pour les quatre stations de mesure.	106
Annexe G: Débits sédimentaires mensuels le long du littoral QM_L et le long du profil QM_P calculés à partir du modèle courantométrique de <i>Madsen and Grant (1976)</i> pour les quatre stations de mesure.	114
Annexe H : Bilans sédimentaires mensuels dans le profil ΔQM_P pour les quatre stations de mesure.	116
Annexe I : Volumes de sédiments mensuels transportés le long du littoral VM_L pour les quatre stations de mesure.	118

Annexe J : Débits sédimentaires annuels (Q_L et Q_P) et pour la durée de la campagne de mesure (QC_L et QC_P) calculés à partir du modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)* pour les quatre stations de mesure.....120

Annexe K : Bilans sédimentaires annuels le long du profil ΔQ_P et pour la durée de la campagne de mesure ΔQC_P calculés à partir du modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)* pour les quatre stations de mesure.....122

Annexe L : Volumes de sédiments annuels transportés le long du littoral V_L et pour la durée de la campagne de mesure VC_L calculés à partir du modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)* pour les quatre stations de mesure.....124

Annexe M : Analyses granulométriques.126

Liste des tableaux

TAB. 1.1 - POSITIONNEMENT DES S4 SUR LA LIGNE DE MESURE.....	11
TAB. 2.1 – FORMULES EMPIRIQUES DÉCRIVANT LE FACTEUR DE FROTTEMENT F_F AU NIVEAU DU FOND POUR LES HOULES DE PÉRIODES DE POINTE T_p ENTRE 8,0 s ET 10,0 s CORRESPONDANT AUX PÉRIODES DE TEMPÊTES.	27
TAB. 2.2 - PARAMÈTRES DE PROFONDEUR EN PÉRIODE DE TEMPÊTES CALCULÉS POUR LES HOULES DE PÉRIODES DE POINTE T_p COMPRISES ENTRE 8,0 s ET 10,0 s	28
TAB. 2.3 - ÉQUATIONS GÉNÉRALES DÉCRIVANT L'ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE PROFONDEUR K_s EN TEMPÊTES AU NIVEAU DU FOND POUR LES HOULES DE PÉRIODES DE POINTE T_p ENTRE 8,0 s ET 10,0 s	28
TAB. 3.1 - LE TRANSPORT LE LONG DU LITTORAL AINSI QUE LE TRANSPORT ET LE BILAN DANS L'AXE DU PROFIL DÉCRITS PAR LES DÉBITS SEDIMENTAIRES (EN $m^3/m_{linéaire}$) POUR DEUX JOURNÉES DE MER CALME ET DEUX JOURNÉES DE TEMPÊTE.	36
TAB. 3.2 - LE TRANSPORT LE LONG DU LITTORAL AINSI QUE LE TRANSPORT ET LE BILAN DANS LE PROFIL DÉCRITS PAR LES DÉBITS SEDIMENTAIRES (EN $m^3/m_{linéaire}$) POUR LES MOIS DE NOVEMBRE 1999, JANVIER 2000 ET MARS 2000.	38
TAB. 3.3 - LE TRANSPORT LE LONG DU LITTORAL AINSI QUE LE TRANSPORT ET LE BILAN DANS LE PROFIL DÉCRITS PAR LES DÉBITS SEDIMENTAIRES (EN $m^3/m_{linéaire}$) POUR LA CAMPAGNE DE MESURE.	39
TAB. 3.4 – RAPPORTS COMPARATIFS MENSUELS ENTRE LES QUATRE STATIONS POUR LES CAMPAGNES DE MESURE.....	43

Liste des figures

FIG. 1.1 - ÎLE DE JERBA EN TUNISIE (ENCADRÉE).....	2
FIG. 1.2 - LITTORAL NORD-EST DE JERBA PRÉSENTANT UNE PROBLÉMATIQUE IMPORTANTE D'ÉROSION (APAL, 2002)	3
FIG. 1.3 - PROFIL DE PLAGE P15 SITUÉ FACE À L'HÔTEL JERBA BEACH ET ÉTUDIÉ LORS DE LA CAMPAGNE DE MESURE.	3
FIG. 1.4 – A) EXEMPLE DE COURANTOMÈTRE DE TYPE S4. B) EXEMPLE D'INSTALLATION DU COURANTOMÈTRE S4.	9
FIG. 1.5 - LIGNE DE MESURE MONTRANT LES QUATRE STATIONS (APAL, 2002).....	10
FIG. 1.6 - SONDE À RÉTRODIFFUSION OPTIQUE OBS (D&A INSTRUMENTS).	11
FIG. 1.7 - POSIDONIES (PHOTOS DU SERVICE ENVIRONNEMENT DE CAVALAIRE).....	13
FIG. 1.8 – A) HAUTEUR SIGNIFICATIVE H_s ET B) PÉRIODE DE POINTE T_p CORRESPONDANT À DIVERSES PÉRIODES DE RETOUR POUR LE SITE 38 (ADAPTÉ DE HYDROTECNICA PORTUGUESA, 1998).....	15
FIG. 2.1 – EXEMPLE D'ANALYSE DU BLOC #118 ET DE SES VALEURS MOYENNES À GAUCHE DU GRAPHIQUE (WAVE WIN INTEROCEAN).....	17
FIG. 2.2 – EXEMPLE DE SÉLECTION MANUELLE DU BURST #118 ET DE TOUS SES PARAMÈTRES AYANT POUR PÉRIODE DE POINTE $T_p = 9,0 s$ (WAVE WIN INTEROCEAN, 1994).	18
FIG. 2.3 - GRAPHIQUES DU FLUX D'ÉNERGIE P EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LES PERIODES DE POINTE T_p CORRESPONDANT A : A) 8,0 s , B) 8,5 s , C) 9,0 s , D) 9,5 s ET E) 10,0 s LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	26
FIG. 3.1 - TRAITEMENT DES DONNÉES ENREGISTRÉES ET DE TOUS LES PARAMÈTRES PROGRAMMÉS À L'AIDE DU LOGICIEL S4 APPLICATION SOFTWARE INTEROCEAN (1994).	30
FIG. 3.2 – REPRESENTATION DES ZONES D'ÉROSION (ROUGE A MOTIF QUADRILLE) ET DE DEPOT (VERT A MOTIF VAGUE) LE LONG DU PROFIL POUR LA DUREE DE LA CAMPAGNE DE MESURE. ...	40

FIG. 3.3 - REPRESENTATION VECTORIELLE POUR LA CAMPAGNE DE MESURE S'ECHELONNANT D'OCTOBRE 1999 A JUIN 2000, A) DES DEBITS SEDIMENTAIRES QC_L CORRESPONDANT AU TRANSPORT DU A LA DERIVE LITTORALE; B) DES VOLUMES DE SEDIMENTS VC_L TRANSPORTES DU A LA DERIVE LITTORALE.....	41
FIG. 3.4 - A) COURBE DES GRADIENTS DE CONCENTRATION DES SÉDIMENTS OBTENUE PAR LES OBS SITUÉS À RESPECTIVEMENT À 25 cm POUR L'OBS No2 (COURBE A) ET 50 cm POUR L'OBS No1 (COURBE B) DU FOND, À LA STATION B POUR DES SÉDIMENTS DE 200 μm . B) RÉSULTATS DE CALIBRATION DE L'OBS MONTRANT LE VOLTAGE ENREGISTRÉ PAR L'OBS EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DES SÉDIMENT EN SUSPENSION POUR DIFFÉRENTES TAILLES DE PARTICULES.....	45
FIG. 3.5 - A) CORRELATION DU DEBIT SEDIMENTAIRE DES BLOCS EN FONCTION DU VOLTAGE ENREGISTRE PAR L'OBS. B) DIRECTION DES HOULES POUR LA PERIODE DU 21 AU 15 MARS 2000 EN FONCTION DU VOLTAGE ENREGISTRE PAR L'OBS.....	46
FIG. 3.6 - CORRELATION DU DEBIT SEDIMENTAIRE DES BLOCS EN FONCTION DU VOLTAGE ENREGISTRE PAR L'OBS : A) POUR LES HOULES DE DIRECTION 80° N – 120° N ; B) POUR LES HOULES DE DIRECTION 280° N – 320° N	46
FIG. A.1 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION A POUR LA PÉRIODE DU 22 OCTOBRE 1999 10H25 AU 05 DÉCEMBRE 1999 10H25.	69
FIG. A.2 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION A POUR LA PÉRIODE DU 07 DÉCEMBRE 1999 10H00 AU 08 DÉCEMBRE 1999 00H30.	70
FIG. A.3 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION A POUR LA PÉRIODE DU 9 DÉCEMBRE 1999 08H54 AU 25 JANVIER 2000 00H54.	71
FIG. A.4 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION B POUR LA PÉRIODE DU 22 OCTOBRE 1999 10H32 AU 30 NOVEMBRE 1999 08H32.	72
FIG. A.5 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION B POUR LA PÉRIODE DU 09 DÉCEMBRE 1999 08H48 AU 29 JANVIER 2000 10H48.	73
FIG. A.6 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION B POUR LA PÉRIODE DU 31 JANVIER 2000 12H00 AU 25 MARS 2000 14H00.	74

FIG. A.7 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION B POUR LA PÉRIODE DU 01 AVRIL 2000 12H00 AU 01 JUIN 2000 10H00.	75
FIG. A.8 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION C POUR LA PÉRIODE DU 22 OCTOBRE 1999 11H01 AU 09 DÉCEMBRE 1999 13H01.	76
FIG. A.9 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION C POUR LA PÉRIODE DU 09 DÉCEMBRE 1999 22H42 AU 26 JANVIER 2000 12H42.	77
FIG. A.10 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION C POUR LA PÉRIODE DU 30 JANVIER 2000 12H00 AU 06 FÉVRIER 2000 14H00.	78
FIG. A.11 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION C POUR LA PÉRIODE DU 06 FÉVRIER 2000 18H00 AU 25 MARS 2000 20H00.	79
FIG. A.12 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION C POUR LA PÉRIODE DU 01 AVRIL 2000 12H00 AU 04 JUIN 2000 10H00.	80
FIG. A.13 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION D POUR LA PÉRIODE DU 22 OCTOBRE 1999 10H42 AU 19 NOVEMBRE 1999 04H42.	81
FIG. A.14 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION D POUR LA PÉRIODE DU 03 FÉVRIER 2000 12H00 AU 25 MARS 2000 18H00.	82
FIG. A.15 - GRAPHIQUES RÉSUMANT LES PARAMÈTRES DE HOULES ENREGISTRÉS À LA STATION D POUR LA PÉRIODE DU 01 AVRIL 2000 12H00 AU 01 JUIN 2000 14H00.	83
FIG. B.1 - GRAPHIQUES DU FLUX D'ÉNERGIE P EN TEMPÊTES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LA PERIODE DE POINTE $T_p = 8,0 s$ LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	85
FIG. B.2 - GRAPHIQUES DU FLUX D'ÉNERGIE P EN TEMPÊTES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LA PERIODE DE POINTE $T_p = 8,5 s$ LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	85
FIG. B.3 - GRAPHIQUES DU FLUX D'ÉNERGIE P EN TEMPÊTES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LA PERIODE DE POINTE $T_p = 9,0 s$ LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	86
FIG. B.4 - GRAPHIQUES DU FLUX D'ÉNERGIE P EN TEMPÊTES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LA PERIODE DE POINTE $T_p = 9,5 s$ LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	86

FIG. B.5 - GRAPHIQUES DU FLUX D'ÉNERGIE P EN TEMPETES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LA PERIODE DE POINTE $T_p = 10,0$ s LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	87
FIG. C.1 - GRAPHIQUES DU COEFFICIENT DE PROFONDEUR K_s EN TEMPETES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LA PERIODE DE POINTE $T_p = 8,0$ s LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	89
FIG. C.2 - GRAPHIQUES DU COEFFICIENT DE PROFONDEUR K_s EN TEMPETES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LA PERIODE DE POINTE $T_p = 8,0$ s LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	89
FIG. C.3 - GRAPHIQUES DU COEFFICIENT DE PROFONDEUR K_s EN TEMPETES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LA PERIODE DE POINTE $T_p = 9,0$ s LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	90
FIG. C.4 - GRAPHIQUES DU COEFFICIENT DE PROFONDEUR K_s EN TEMPETES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LA PERIODE DE POINTE $T_p = 9,5$ s LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	90
FIG. C.5 - GRAPHIQUES DU COEFFICIENT DE PROFONDEUR K_s EN TEMPETES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA PLAGE d POUR LA PERIODE DE POINTE $T_p = 10,0$ s LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE.	91
FIG. M.1 - GRAPHIQUE DES ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES RÉALISÉES EN BAS ET EN HAUT DE PLAGE PRÈS DE LA LIGNE DE MESURE P15 (D'APRÈS RAPPORT INTERNE APAL, 2000).	127

Liste des abréviations et des symboles utilisés

A	=	Amplitude de la houle (m)
b	=	Largeur de la station (m)
b_1	=	Largeur de la station #1 (m)
b_2	=	Largeur de la station #2 (m)
c	=	Concentration de sédiments (g/l)
C	=	Célérité de la houle (m/s)
C_1	=	Célérité de la houle à la station #1 (m/s)
C_2	=	Célérité de la houle à la station #2 (m/s)
C_g	=	Vitesse du groupe (m/s)
C_{g1}	=	Vitesse du groupe à la station #1 (m/s)
C_{g2}	=	Vitesse du groupe à la station #2 (m/s)
C_s	=	Célérité de la houle en eau peu profonde (m/s)
d	=	Distance de la plage (m)
d_{50}	=	Diamètre médian (m)
DIR	=	Direction de la houle ($^{\circ}$)
E	=	Énergie (J)
E_1	=	Énergie à la station #1 (J)
E_2	=	Énergie à la station #2 (J)
EPS ou eps	=	Spectre d'énergie
ε	=	Réponse de l'OBS en voltage (V)
ε_o	=	Réponse de l'OBS en voltage dans l'eau distillée ($0,1 V$)
f_c	=	Coefficient de frottement instantané dû aux courants
f_{cw}	=	Coefficient de frottement instantané dû aux courants et aux houles
f_w	=	Coefficient de frottement instantané dû aux houles

g	=	Accélération gravitationnelle (m/s^2)
G	=	Coefficient dépendant de la granulométrie ($V/g/l$)
h	=	Profondeur d'eau (m)
h_s	=	Hauteur du senseur par rapport au fond (m)
h_1	=	Profondeur d'eau à la station #1 (m)
h_2	=	Profondeur d'eau à la station #2 (m)
H	=	Hauteur de la houle (m)
H_1	=	Hauteur de la houle à la station #1 (m)
H_2	=	Hauteur de la houle à la station #2 (m)
H_s	=	Hauteur significative de la houle (m)
k	=	Nombre d'ondes
k_1	=	Nombre d'ondes à la station #1
k_2	=	Nombre d'ondes à la station #2
K_f	=	Coefficient de frottement de la houle
K_r	=	Coefficient de réfraction de la houle
K_s	=	Coefficient de profondeur de la houle
L	=	Longueur d'onde de la houle (m)
L_s	=	Longueur d'onde de la houle en eau peu profonde (m)
n	=	Rapport entre la vitesse du groupe et la vitesse de phase
n_1	=	Rapport entre la vitesse du groupe et la vitesse de phase à la station #1
n_2	=	Rapport entre la vitesse du groupe et la vitesse de phase à la station #2
OBS	=	<i>Optical Backscattering Sensor</i>
P	=	Flux d'énergie (m)
P_1	=	Flux d'énergie à la station #1 (m)
P_2	=	Flux d'énergie à la station #2 (m)
$\vec{\phi}(t)$	=	Vecteur de transport instantané de sédiments

$\vec{\psi}(t)$	=	Vecteur de la valeur instantanée du paramètre de Shields
$\vec{q}(t)$	=	Débit sédimentaire instantané ($m^3/m_{linéaire} \cdot s$)
q_x, q_y	=	Composantes en x et y du débit sédimentaire instantané ($m^3/m_{linéaire} \cdot s$)
\bar{Q}	=	Débit sédimentaire ($m^3/m_{linéaire}$)
Q_L	=	Débit sédimentaire annuel calculé le long du littoral ($m^3/m_{linéaire}$)
Q_P	=	Débit sédimentaire annuel le long du profil ($m^3/m_{linéaire}$)
ΔQ_P	=	Bilan sédimentaire annuel le long du profil ($m^3/m_{linéaire}$)
QC_L	=	Débit sédimentaire pour la campagne de mesure le long du littoral ($m^3/m_{linéaire}$)
QC_P	=	Débit sédimentaire pour la campagne de mesure le long du profil ($m^3/m_{linéaire}$)
ΔQC_P	=	Bilan sédimentaire pour la campagne de mesure le long du profil ($m^3/m_{linéaire}$)
QJ_L	=	Débit sédimentaire journalier le long du littoral ($m^3/m_{linéaire}$)
QJ_P	=	Débit sédimentaire journalier le long du profil ($m^3/m_{linéaire}$)
ΔQJ_P	=	Bilan sédimentaire journalier le long profil ($m^3/m_{linéaire}$)
QM_L	=	Débit sédimentaire mensuel le long du littoral ($m^3/m_{linéaire}$)
QM_P	=	Débit sédimentaire mensuel le long du profil ($m^3/m_{linéaire}$)
ΔQM_P	=	Bilan sédimentaire mensuel le long du profil ($m^3/m_{linéaire}$)
ρ	=	Masse volumique (kg/m^3)
s	=	Densité relative des sédiments
S_p	=	Densité spectrale de puissance de la surface d'élévation (m^2/Hz)
t	=	Temps (s)
Δt	=	Intervalle de temps (s)
T	=	Période de temps (s)
T_c	=	Période de crête (s)

T_p	=	Période de pointe (s)
T_s	=	Période significative (s)
T_z	=	Période croisant zéro (s)
τ_0	=	Contrainte de cisaillement instantanée du fond (Pa)
u_w	=	Vitesse associée à la houle (m/s)
u_x, u_y	=	Composantes de la vitesse du courant (m/s)
$u(t)$	=	Composante de la vitesse instantanée suivant x (m/s)
\bar{U}	=	Vitesse moyenne du courant (m/s)
ν	=	Viscosité cinématique de l'eau (m^2/s)
$v(t)$	=	Composante de la vitesse instantanée suivant y (m/s)
\bar{V}	=	Vitesse du courant (m/s)
V_L	=	Volume annuel de sédiments transporté le long du littoral (m^3)
VC_L	=	Volume de sédiments transporté pour la campagne de mesure le long du littoral (m^3)
VJ_L	=	Volume journalier de sédiments transporté le long du littoral (m^3)
VM_L	=	Volume mensuel de sédiments transporté le long du littoral (m^3)
w	=	Vitesse de chute des sédiments (m/s)
$2D$	=	Deux dimensions

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1. Situation

Le littoral nord-est de Jerba (Djerba) en Tunisie présente une érosion significative du littoral. Ce phénomène s'expliquerait par une hydrodynamique dominée principalement par des houles générées par les vents *NNE-NE* ainsi qu'un littoral sableux soumis à une marée locale de type microtidal et à une évolution saisonnière de l'intensité des houles. Le stock sédimentaire est constitué de sable fin-moyen à grossier dont la taille moyenne est proche de $0,25\text{ mm}$. Son origine se résume à quatre sources :

- de la désagrégation des grès calcaires du Tyrrhénien et du Cénozoïque, qui affleurent le long du littoral en mer, à l'est de la zone d'étude et de manière sporadique sur la zone elle-même;
- de la fraction coquillière, qui résulte du transport des thanatocénoses provenant des stocks benthiques actuels;
- de la formation d'oolithes calcaires, qui résulte de la précipitation de carbonates dans des eaux chaudes sursaturées en carbonate dissous en milieu agité. Ce stock sédimentaire est le plus important et il se régénère en continu le long de la frange côtière comprise entre la plage et l'herbier de posidonies;
- de la destruction des anciens cordons dunaires holocènes.

Le littoral tunisien se développe le long de la côte méridionale de la mer Méditerranée orientale entre la côte algérienne et la côte libyenne. La zone d'étude est située entre $33^{\circ}45'$ et $33^{\circ}55'$ Nord et $10^{\circ}50'$ et $11^{\circ}05'$ Est, soit au sud de la Tunisie, sur le littoral nord-est de Jerba (fig. 1.1 et 1.2).

La fig. 1.3 présente le profil transversal de la plage de l'hôtel Jerba Beach, profil principalement étudié durant la campagne de mesure échelonnée sur huit (8) mois, d'octobre 1999 à juin 2000, par l'équipe de recherche du Groupe de dynamique littorale (INRS-Géoressources, maintenant INRS-ETE) dans le cadre d'un mandat de réhabilitation du littoral nord-est de Jerba.



Fig. 1.1 - Île de Jerba en Tunisie (encadrée).

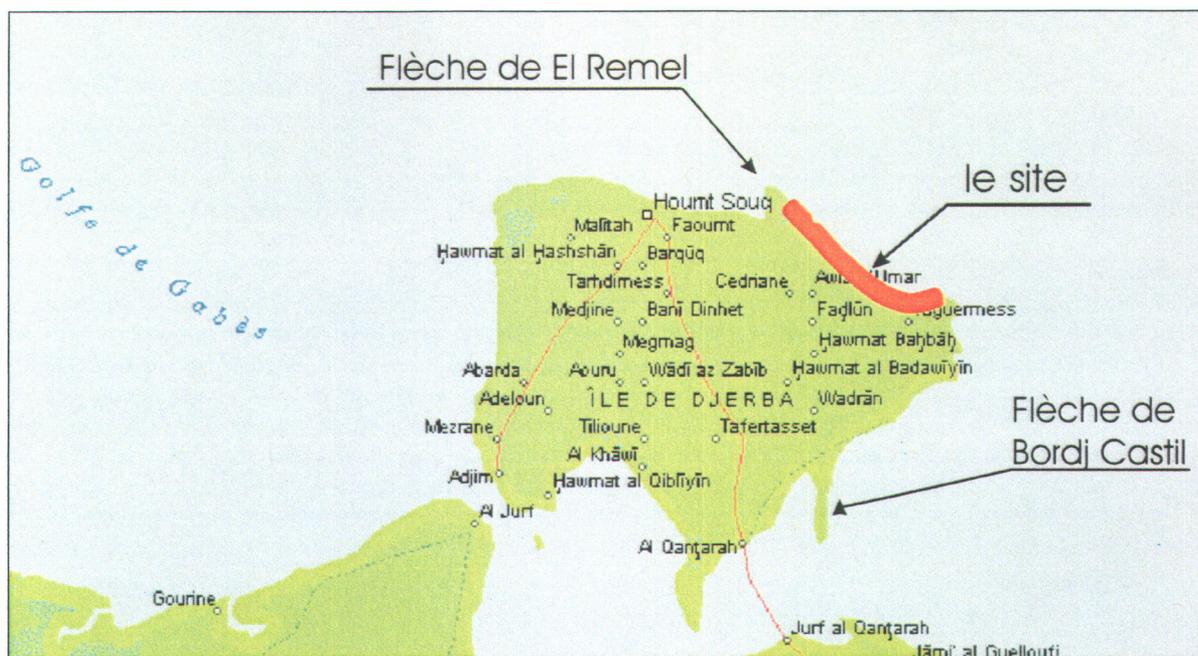


Fig. 1.2 - Littoral nord-est de Jerba présentant une problématique importante d'érosion (APAL, 2002) .

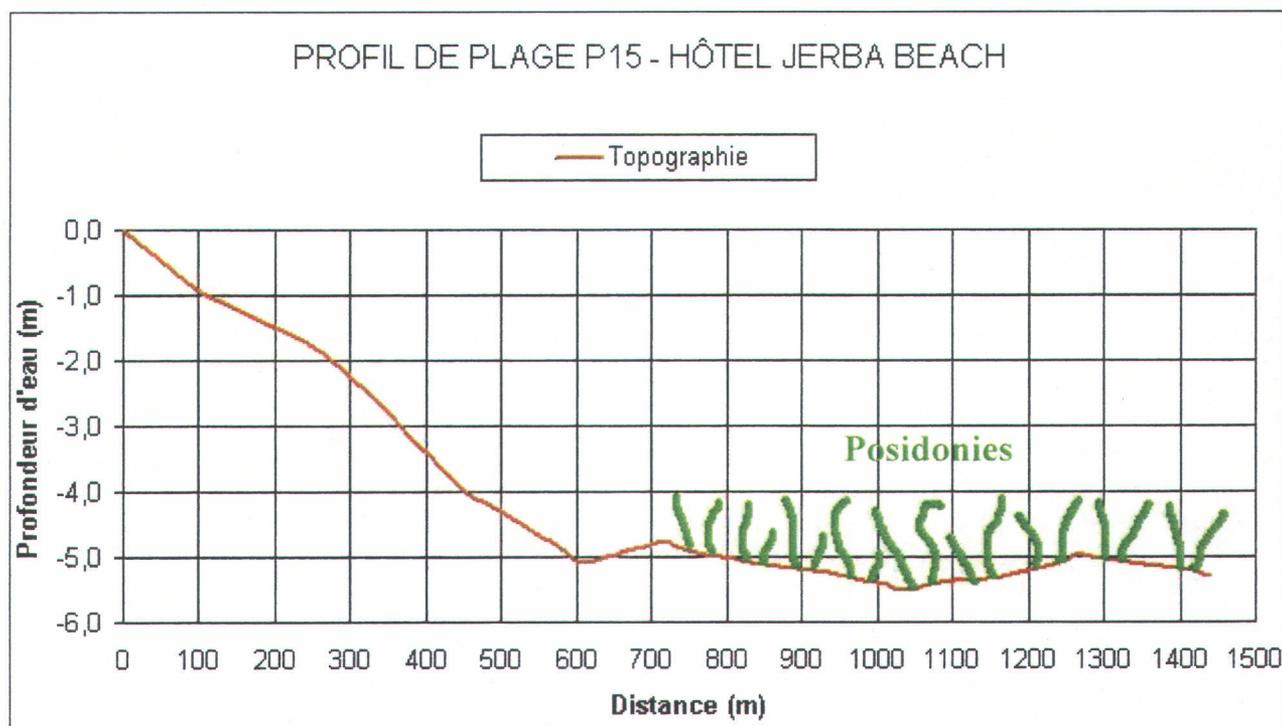


Fig. 1.3 - Profil de plage P15 situé face à l'hôtel Jerba Beach et étudié lors de la campagne de mesure.

Avant la construction des infrastructures balnéaires, le littoral nord-est de Jerba était constitué d'une plage sableuse et d'un cordon dunaire associé (APAL, 2002). L'installation des complexes hôteliers a progressivement fait disparaître cette dernière unité, qui ne persiste qu'à l'état de lambeaux le long du littoral comme celui présent à l'est de l'hôtel Télémaque. En effet, les premiers complexes hôteliers étaient de type « pieds dans l'eau ». Pour cela, ils ont été construits, soit sur la dune, soit à la place de la dune. Les nouveaux établissements sont maintenant construits en retrait et respectent l'environnement dunaire.

Il y a plus de soixante ans, le système subissait déjà une érosion importante, car la flèche de El Remel était déjà très développée lors de l'établissement de la carte bathymétrique de 1939. La partie sous-marine de cette flèche formait un haut-fond qui s'étirait jusqu'au droit du port de Hount Souk à 6 km.

À l'est de Dar Jerba, le littoral est rocheux. Un talus de 1 à 2 m de hauteur, constitué de grès du Tyrrhénien (grès calcaireux contenant un très important ciment calcaire et des grains de la taille des sables fins de quartz), est découpé en une série de petites baies (criques) sablonneuses séparées par des platiers rocheux.

Au large, les rochers sont partiellement colonisés par des algues, mais des couloirs sableux s'étirent d'est en ouest. Ces couloirs sont le siège d'un transport sédimentaire $E - O$, comme en témoigne la présence de champs de rides sableuses dissymétriques orientées en direction de l'ouest. Ces rides sont visibles dès que la surface sableuse est suffisante pour être le siège d'un transport non perturbé par les affleurements rocheux ou les champs de posidonies.

Des herbiers de posidonies apparaissent par des fonds de 5 à 6 m dans les couloirs sableux. Des algues peuvent former des colonies sur les grès du Tyrrhénien, et cela, jusqu'au littoral par des très petits fonds.

L'anse de Dar Jerba est limitée à l'est par un affleurement rocheux qui se prolonge sous l'eau par une série de hauts-fonds. Cette barrière rocheuse limite les transports sédimentaires en direction de l'est. Par contre, l'abrasion de la partie sommitale de cette formation a provoqué une érosion

des stocks sableux qui étaient piégés dans la baie. Cette diminution du stock a entraîné une diminution de l'élévation de la plage en avant du restaurant. Ce changement morphologique est très important, car les houles du *N* et du *NO* arrivent au rivage sur une plage réfléchissante et non absorbante, comme c'était le cas antérieurement. Ceci a pour conséquence d'accentuer l'érosion en avant de l'édifice et de provoquer la formation de barres de réflexion orientées *NS*. Le rechargement éventuel dans le cadre du plan de réaménagement de ce littoral devra tenir compte de ce phénomène.

Toute l'anse subit une profonde érosion et les grès calcaires du Tyrrhénien apparaissent tout le long de l'anse. La plage a perdu une grande partie de son stock sédimentaire. Seule la partie ouest de l'anse possède encore une plage relativement large, car cette dernière prend appui sur une deuxième barre rocheuse qui joue le rôle d'épi ou de frein sédimentaire. Néanmoins, la plage a perdu plus de la moitié de sa largeur originelle.

Des barres existent encore au large, car une partie du stock sédimentaire initial n'a pas été érodée. Il est protégé des houles du *NO* par les affleurements rocheux. Aussi, le stock sédimentaire est encore suffisant pour que la plage sous-marine puisse générer des barres.

Le sable provient en grande partie de l'érosion des grès calcaires du Tyrrhénien et des anciens sables éoliens non grésifiés. Les sables grossiers proviennent de l'érosion des grès calcaires du Tyrrhénien et possèdent encore, lorsqu'ils sont constitués par des petits morceaux de grès, une quantité importante de ciment calcaire. Ceci est surtout vrai au large à des profondeurs supérieures à 5 m. Cette remarque est importante, car ce sable grossier est en cours de transformation. Il subira encore une érosion mécanique importante et une dissolution chimique afin de libérer chaque petite particule sableuse de la taille des sables fins ou moyens. Le sable qui constitue et qui constituait la plage est donc un sable fin.

La plage nord-est entre Dar Jerba et le golfe de Gabès est profondément érodée et la plage repose, comme dans le cas de Dar Jerba, sur le platier rocheux. Les couches de grès du Tyrrhénien sont orientées obliquement (*NE – SO*) au littoral. Elles ont un pendage en direction du *SE*. À cause de cette orientation préférentielle des couches, les affleurements rocheux forment des épis

naturels qui freinent le transport sédimentaire. À terme, ce phénomène ralentit l'érosion de la plage, néanmoins le stock sableux disponible en amont du transit et au niveau de la plage est très réduit et la plage s'érode. Ce phénomène a conduit les hôteliers à construire des digues en tout-venant pour protéger les installations. Ces digues jouent le rôle de dunes de haute plage, mais elles sont situées trop en retrait pour piéger du sable recyclé par l'érosion marine.

À l'ouest de Dar Jerba, un oued se jette dans la mer et, à son embouchure, il crée un petit cône d'épandage d'environ 100 m de diamètre. Ainsi, les oueds contribuent à l'alimentation de la plage de manière substantielle. La dérive littorale peut être observée à partir du remaniement des sédiments du cône deltaïque. En effet, deux petites barres d'embouchure se sont formées à partir de l'érosion du cône sous l'influence des houles. La première, de faible importance, s'étire en direction de l'est, ce qui montre qu'il existe un transport sous les houles de *NO*. La deuxième est beaucoup plus importante et s'étire en direction de l'ouest. Elle est le siège d'un champ de rides sableuses orientées en direction du *SO*, ce qui confirme la direction prépondérante du transport sédimentaire et l'alimentation de la plage à partir du large.

L'ensemble de ce secteur orienté au nord est donc profondément érodé. La quantité de sable provenant de Dar Jerba est inférieure à celle qui s'exporte à l'ouest. Un affleurement rocheux continu existe en mer et la plage est réduite à quelques dizaines de mètres.

Sur la plage à l'ouest du terrain de golf, le littoral s'incurve et est orienté au *ONO*. Il devient par la suite rectiligne. L'érosion est importante, mais ce secteur est encore alimenté par l'érosion des secteurs situés plus à l'est. La plage reste encore assez large même si certains hôtels ont vu leur plage se rétrécir depuis quelques années.

Quelques hôtels avaient été protégés par des enrochements. Ces protections ont aggravé l'érosion en avant du mur, qui devint réfléchissant et accentua l'érosion. Le mur fut enlevé en 1999 et la plage se reconstruit depuis.

Des flèches sableuses prolongent les littoraux sableux de l'île de Jerba. Les deux flèches principales sont celles de El Remel et Bordj Castil. La première prolonge la côte en direction de

l'ONO et la seconde en direction du sud. Ces flèches sont actives, car l'érosion du littoral est plus importante que l'érosion de la flèche. La flèche de El Remel est une flèche en cours de construction. Elle résulte de l'érosion de tout le littoral nord-est de Jerba. Quant à la flèche de Bordj Castil, elle ne représente, en fait, que la partie dégradée d'un ancien cordon dunaire qui s'étendait entre Aghir et le continent.

Le transit littoral est provoqué par l'attaque oblique des houles de NE ou de ENE durant les tempêtes hivernales. Ce transit est à l'origine de la création de la flèche émergée de El Remel, qui se prolonge en mer jusqu'à l'entrée du chenal d'accès du port de Houmt Souk. En arrière de cette flèche, une importante zone intertidale sablo-vaseuse s'est développée au fur et à mesure que la flèche a progradé en direction de l'ouest. La construction de cette flèche en direction de l'ouest est importante, car elle s'est effectuée sur une distance de plusieurs centaines de mètres depuis 30 ans, ce qui correspond à un apport annuel en sédiments qui varie suivant les auteurs de 4 000 à 20 000 m³. Ce dernier volume de transit sera confirmé ou infirmé par la campagne de mesure.

Ce projet de recherche est le résultat d'une réflexion plus poussée sur la dynamique sédimentaire du profil transversal de la plage de l'hôtel Jerba Beach, c'est-à-dire une évaluation quantitative plus précise du transport sédimentaire dans ce secteur et une détermination du facteur de frottement au niveau du fond expliquant le comportement et l'influence des houles dans ce secteur.

1.2. Problématique

L'évolution de la morphologie du littoral est très souvent l'effet observable de l'impact du transport sédimentaire (Komar, 1976). Le mécanisme de transport sédimentaire tire sa complexité des nombreux facteurs le décrivant et le quantifiant. Ainsi, la connaissance du milieu affecté, du type de transport, des caractéristiques des sédiments ainsi que des conditions hydrodynamiques est essentielle afin de comprendre ce mécanisme. Ce mémoire repose sur la problématique liée aux relations empiriques décrivant la dynamique sédimentaire au niveau des plages du secteur

nord-est de Jerba, plus spécifiquement la modélisation du transport sédimentaire et du facteur de frottement au niveau du fond marin ainsi que la détermination des paramètres de la houle. En effet, à partir des mesures prises sur le terrain, une détermination empirique peut être effectuée.

1.3. Objectifs

Dans le cadre de cette étude, l'objectif premier est de quantifier le facteur de frottement au niveau du fond marin ainsi que les paramètres de la houle à partir des données existantes enregistrées à quatre stations de mesure de houle. Ainsi, dans un premier temps, le facteur de frottement sera déterminé à partir du flux d'énergie des houles qui se déplace du large vers la côte, connaissant la hauteur significative H_s de la houle et la profondeur d'eau h . Dans un second temps, le coefficient de profondeur sera déterminé par le modèle de *Airy (1845)*, connaissant la période de pointe T_p et la profondeur d'eau h . L'étude des représentations graphiques du flux d'énergie et du coefficient de profondeur pour différentes périodes de houle T_p variant de 8 à 10 s en fonction de la position des stations permet de déterminer les périodes de houle les plus problématiques en terme d'érosion du littoral et de développer une relation empirique de la variation du frottement sur le fond marin en fonction des différentes périodes de houle T_p lors d'épisodes de tempête.

Le second objectif de ce projet est de quantifier le transport et le bilan sédimentaire pour la campagne de mesure à partir du modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)*. Pour cela, le débit sédimentaire sera déterminée par la sommation des débits sédimentaires instantanés mesurés sur quatre stations possédant des courantomètres S4 InterOcean et, pour deux d'entre-elles, des sondes à rétrodiffusion optique (Optical Backscattering Sensor OBS) placées à 25 et 50 cm du fond. Précisément, il s'agit de calculer vectoriellement (2D orientée) les débits de charriage journaliers, mensuels et annuel considérant chacune des mesures enregistrées à 0,5 s d'intervalle suivant des blocs de 18 minutes toutes les 2 heures.

1.4. Courantomètres S4

Les S4 (fig. 1.4) sont des courantomètres électromagnétiques. Leur mode de fonctionnement se résume à mesurer la différence de potentiel (voltage) générée par le mouvement d'un conducteur (vitesse du courant) circulant dans un champ magnétique ainsi que d'autres valeurs comme la pression et la température. Ainsi, plusieurs paramètres hydrodynamiques, tels que le courant, la marée, la profondeur d'eau, la période, la température et la conductivité peuvent être enregistrés simultanément à une fréquence donnée. De plus, à l'aide des deux logiciels de traitement de données fournis avec l'appareil, il est possible d'obtenir des paramètres hydrodynamiques agrégés, tels que la hauteur significative de la houle, la période de pointe, le spectre d'énergie de la houle, etc.

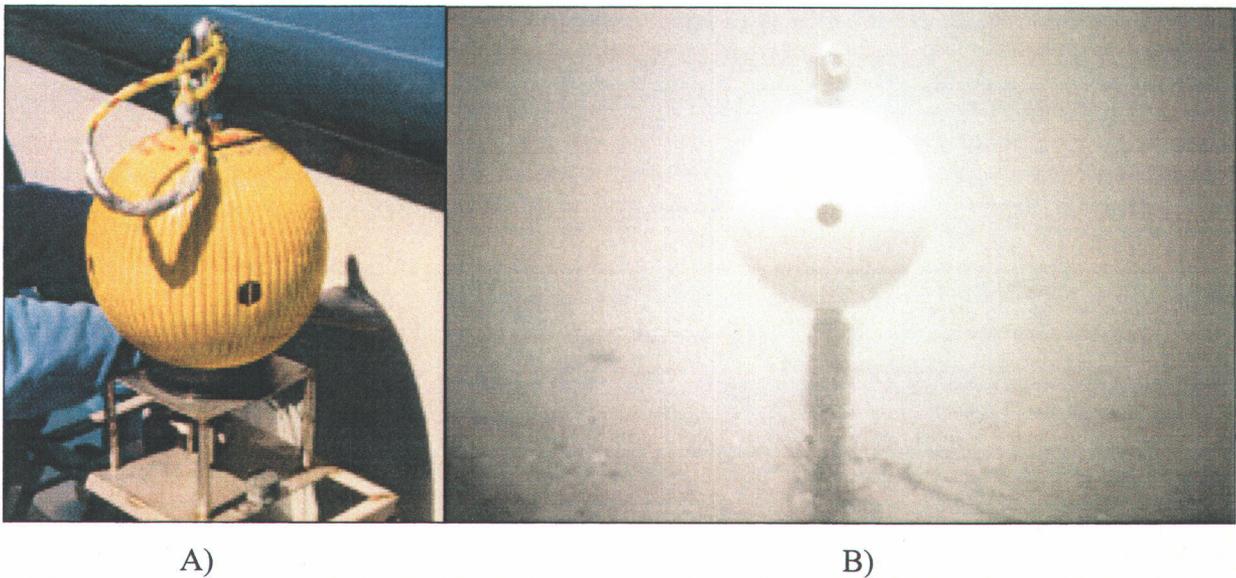


Fig. 1.4 – A) Exemple de courantomètre de type S4. B) Exemple d'installation du courantomètre S4.

Dans le cadre de cette étude, la campagne de mesure incluait une ligne de mesure (fig. 1.5) comprenant quatre stations d'enregistrement munies de courantomètres S4 situés respectivement à des profondeurs d'eau par rapport au niveau moyen de la mer de 1,9 m (station A), 3,0 m (station B), 4,9 m (station C) et 5,6 m (station D₂) et ancrés par des tiges d'acier inoxydable (fig.

1.4 B) afin que les capteurs soient situés à 50 *cm* du fond. Le tableau 1.1 présente le positionnement des quatre S4 sur la ligne de mesure.

Pendant huit mois consécutifs, d'octobre 1999 à juin 2000, les mesures (courant, marée, profondeur d'eau, hauteur de houle, période) furent emmagasinées par les S4 programmés à 2 *Hz* enregistrant des blocs (bursts) de 18 minutes à toutes les 2 heures.

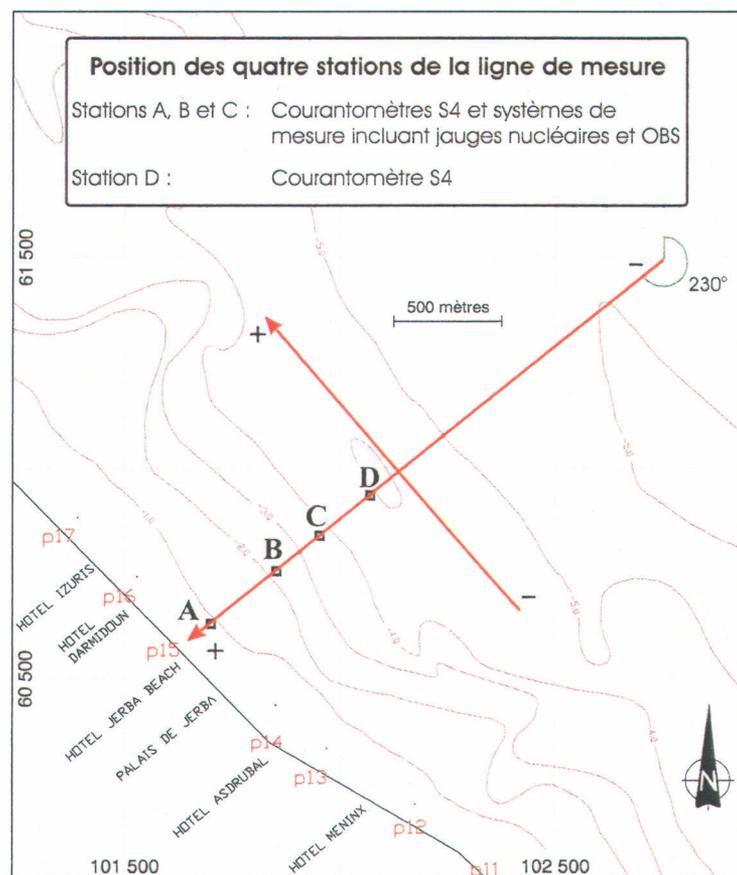


Fig. 1.5 - Ligne de mesure montrant les quatre stations (APAL, 2002).

Tab. 1.1 - Positionnement des S4 sur la ligne de mesure.

Courantomètre Station	Profondeur d'eau (m)	Distance de la ligne de plage (m)
A	-1,9	100
B	-3,0	280
C	-4,9	420
D ₂	-5,6	560
D ₁	?	800

1.5. Sonde à rétrodiffusion optique

La sonde à rétrodiffusion optique (Optical Backscattering Sensor OBS) mesure la turbidité et la concentration de matières en suspension. Elle mesure la différence d'intensité entre le rayon infrarouge émis par l'OBS (diode) et celui réfléchi par les sédiments en suspension dans l'eau, comme le montre la fig. 1.6.

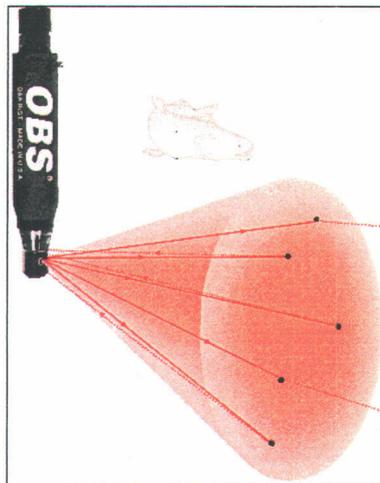


Fig. 1.6 - Sonde à rétrodiffusion optique OBS (D&A Instruments).

Dans le cadre de la campagne de mesure, quatre OBS avaient été installés à 25 et 50 *cm* du fond : deux à la station A et deux autres à la station B. Compte tenu de la faible profondeur d'eau et du déplacement de la barre de plage dans le secteur de la station A, les deux OBS de cette station n'ont pas été en mesure d'enregistrer convenablement les données. Seules les données des OBS de la station B ont été utilisées.

1.6. Posidonies (*Posidonia oceanica*)

Le site à l'étude présente certaines particularités. Parmi celles-ci, la présence d'herbiers de posidonies (*Posidonia oceanica*) près de la station de mesure D₂ (au large) est digne de mention compte tenu de leur importance et de leurs impacts sur le courant et les sédiments. Il est à noter que la station D₁ était située la plus au large (environ à 800 *m* de la plage) dans les posidonies.

Les herbiers de posidonies (fig. 1.7) sont endémiques au littoral méditerranéen (APAL, 2002). L'herbier, grâce à la grande densité de ses feuilles, ralentit les courants, atténue la houle et piège ainsi de grandes quantités de sédiments. Pour contrer l'ensevelissement dû à la sédimentation, les rhizomes croissent verticalement de quelques millimètres à quelques centimètres par an et édifient une matte (édifice constitué de rhizomes, de racines et de sédiments). Les posidonies (feuilles) tombent en sénescence et sont entraînées par les houles et se déposent sur la plage au cours de la fin de l'hiver, puis au printemps. Les posidonies repoussent pour atteindre leur hauteur optimale à l'automne et peuvent parfois dépasser 8 *m* de hauteur. En mode calme, l'herbier se développe jusqu'en surface et forme alors un récif-frangeant, puis un récif-barrière.

En mode battu, le récif est limité par l'action des houles de tempête. Il se forme alors une pénélaine de mattes qui se situe à la limite des déferlements de houles. Au large, l'herbier peut s'étendre jusqu'à des profondeurs de 30 à 40 *m*.

Les herbiers sont présents sur tout le littoral de la Tunisie, mais leur importance augmente du nord au sud du pays. Sur le littoral nord-est de Jerba, ils forment des communautés de mode battu

qui ceignent de manière continue toute la partie exposée de l'île. Ils débutent généralement par des profondeurs supérieures à 5 m et s'étendent au large par des profondeurs supérieures à 12 m .



Fig. 1.7 - Posidonies (Photos du Service Environnement de Cavalaire)

1.7. Choix du modèle courantométrique

Il existe dans la bibliographie plusieurs modèles courantométriques. Ces derniers permettent l'estimation quantitative du débit sédimentaire en fonction du type de transport, du milieu, des conditions hydrodynamiques et des caractéristiques des sédiments. Dans le cadre de cette étude, quelques huit modèles ont été initialement considérés, mais un seul a été retenu. Ci-dessous sont présentés les modèles courantométriques écartés et les raisons qui ont justifié l'élimination de ces derniers.

- *Meyer-Peter Muller (1948)* : ce modèle ne considère que les graviers de rivière.
- *Einstein (1950)* : ce modèle suggère que le transport des sédiments par charriage est lié aux fluctuations du mouvement du fluide.
- *Yalin (1963)* : ce modèle ne considère que le mouvement des sédiments par saltation.
- *Engelund-Hansen (1967)* : ce modèle s'applique plus fréquemment dans le domaine fluvial.
- *Bagnold (1966)* : ce modèle ne considère que la vitesse du courant.
- *Komar (1976)* : ce modèle met l'accent sur la vitesse du courant.

- *Van Rijn (1990)* : ce modèle est constitué de nombreuses étapes de calculs. Il s'agit d'un modèle trop complexe à appliquer à cause du très grand nombre de données qui l'alimentent et de paramètres à régler.

Le choix du modèle courantométrique s'est arrêté sur celui de *Madsen and Grant (1976)*, car il convient mieux à l'ensemble des exigences, à l'état du milieu à l'étude et aux données disponibles :

- Le milieu étudié est de type marin côtier.
- Le littoral nord-est de Jerba est soumis à une érosion très prononcée, ce qui indique un charriage important de sédiments.
- Un nombre de données considérable a été enregistré par les quatre courantomètres de type S4 disposés le long d'un profil de plage pendant huit mois.
- Les enregistrements des courantomètres comprennent des données de courant, de marée, de profondeur d'eau, de hauteur de houles, de période, de température, etc.
- Les courantomètres sont tous positionnés à 50 cm du fond sur une seule ligne de mesure.
- La taille des sédiments de type non cohésif correspond à du sable fin-moyen à grossier (diamètre médian $d_{50} \approx 0,25 \text{ mm}$).
- Parmi les conditions hydrodynamiques à considérer, la présence d'une houle très active, les vents provenant du *NNE-NE* et les effets de courants marins sont très importants dans ce secteur.
- Une approche vectorielle (2D orientée) est nécessaire afin de mieux connaître les principaux mouvements de sédiments.

1.8. Conditions hydrodynamiques

Le littoral sableux est dominé par un régime de houles générées par les vents locaux. L'activité de ces houles est saisonnière. En hiver, les houles les plus hautes viennent du *N* et les houles les plus longues arrivent du *NNE* et du *NE*. En été et en automne, le régime est calme et les seules

tempêtes qui attaquent le littoral proviennent du secteur *NNE – NE*. La hauteur significative H_s et la période de pointe T_p des plus importantes houles (fig. 1.8) sont celles du 77 *NE* et sont respectivement de 3,9 m et 8,9 s pour les quinquennales, 4,6 m et 9,9 s pour les décennales, 6,3 m et 11,5 s pour les cinquantennales ainsi que 6,8 m et 11,9 s pour les centennales (APAL, 2002).

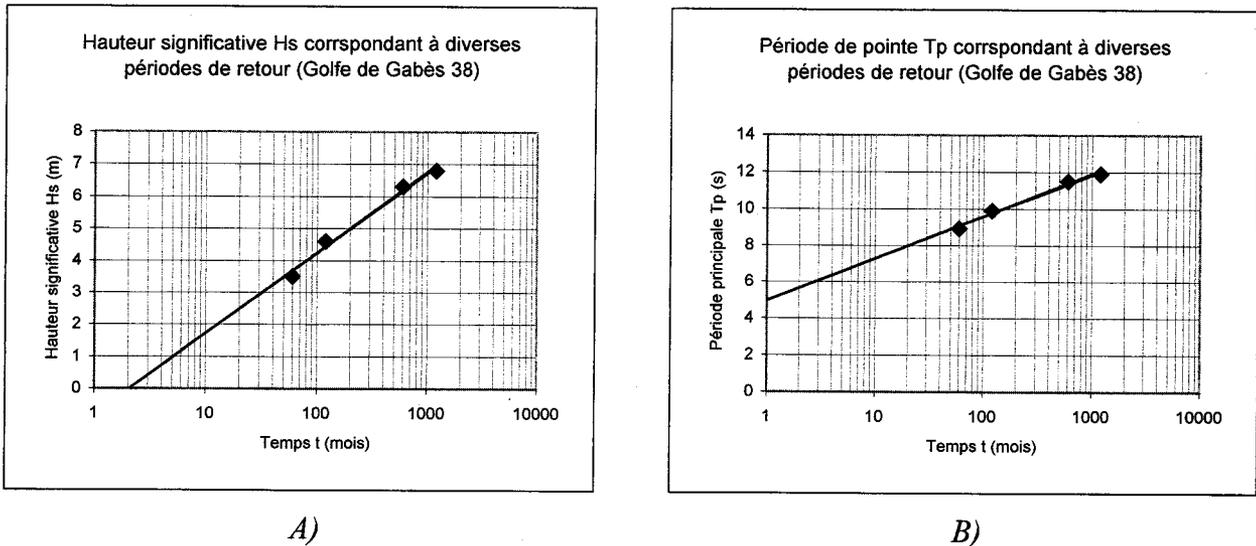


Fig. 1.8 – A) Hauteur significative H_s et B) période de pointe T_p correspondant à diverses périodes de retour pour le site 38 (adapté de Hydrotecnica Portuguesa, 1998).

Les courants de marée répertoriés dans le profil peuvent être importants. En vives-eaux (novembre 1999), ils atteignent 0,35 m/s (station B) et 0,45 m/s (station A) quand ils portent au 135° et 0,40 m/s (stations A et B) quand ils portent au 315°. Ces valeurs ont été obtenues pendant des périodes très courtes. De manière générale, les courants de marée qui portent en direction de la flèche El Remel (portant au 315°) sont plus intenses que ceux dans la direction opposée (portant au 135°). Au large, à la station C, les courants sont faibles, mais ils peuvent néanmoins être supérieurs aux vitesses du seuil de mise en mouvement des grains et contribuent ainsi au transit net de sédiments en direction de la flèche.

Les vents les plus violents soufflent à $17,4 \text{ m/s}$ avec une récurrence de 5 ans et à $18,9 \text{ m/s}$, $22,1 \text{ m/s}$ et $23,5 \text{ m/s}$ pour des récurrences respectives de 10, 50 et 100 ans. Or, les courants engendrés par le vent peuvent atteindre 0,02 à 0,03 fois sa vitesse. Ils ont donc une célérité de 35 à 42 cm/s aux 5 ans et 47 à 70 cm/s aux 100 ans. Ainsi, durant les coups de vent, les courants de dérive seront plus importants que les courants de marée et se superposeront aux courants engendrés par les houles qui sont toutefois beaucoup plus importants, par comparaison.

Durant la campagne de mesure, plusieurs épisodes de tempêtes majeures ont été enregistrés. Au début de décembre 1999, une série continue de tempêtes a été accompagnée par des vents qui dépassaient 100 km/h ($27,7 \text{ m/s}$), soit une vitesse supérieure à la valeur centennale. De manière générale, les tempêtes proviennent de secteurs compris entre l'*ENE* et le *NNE*. Elles peuvent débiter au N et tourner après une journée à l'*ENE*. Les périodes T_p sont de 3,6 à 6,0 s durant les coups de vent et de 7,0 à 9,0 s durant les tempêtes moyennes, mais elles peuvent atteindre jusqu'à 12,5 s et ont dépassé quatre fois 10,0 s durant la campagne de mesure (huit mois). Les hauteurs significatives H_s atteignent 0,5 à 0,8 m durant les coups de vent et 0,8 à 1,2 m durant les tempêtes moyennes et peuvent atteindre 6,1 m durant les tempêtes exceptionnelles.

Les concentrations des sédiments en suspension atteignent $7,4 \text{ g/l}$ durant les tempêtes et $0,1 \text{ g/l}$ en périodes calmes. Ces résultats montrent à l'évidence que l'environnement est dominé par les houles. De plus, durant les tempêtes, le nuage turbide s'élève à plus de 50 cm et il est généralement deux fois plus concentré à 25 cm qu'à 50 cm de hauteur.

CHAPITRE 2 : FROTTEMENT

2.1. Instrumentation, données et traitement

Comme il a été mentionné, une campagne a été menée le long d'une ligne de mesure comprenant quatre stations situées respectivement à des profondeurs de 1,9 m (station A), 3,0 m (station B), 4,9 m (station C) et 5,6 m (station D₂). Pendant huit mois consécutifs, d'octobre 1999 à juin 2000, les mesures furent enregistrées par les courantomètres InterOcean S4 programmés suivant un pas de mesure de 0,5 s, durant 18 minutes (blocs ou « bursts » de 2160 lignes de valeurs représentant différents paramètres), toutes les deux heures pour les mesures de courant (vitesse et direction) et profondeur d'eau. Un deuxième programme d'enregistrement de marée et d'autres conditions hydrodynamiques (température et conductivité) a été établi à partir d'une valeur moyenne calculée sur une minute à toutes les dix minutes. Le traitement des données enregistrées par les S4 a été réalisé à l'aide du logiciel *WaveWin InterOcean* traitant ainsi l'ensemble des 2160 lignes de valeurs afin d'obtenir des valeurs moyennes globales pour le bloc (fig. 2.1).

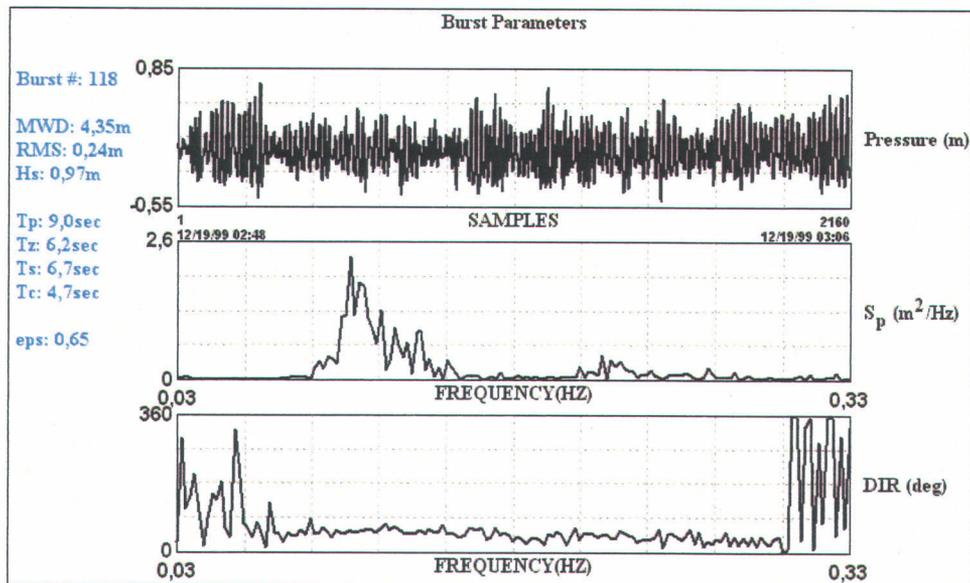


Fig. 2.1 – Exemple d'analyse du bloc #118 et de ses valeurs moyennes à gauche du graphique (WaveWin InterOcean).

2.2. Méthodologie

Le calcul des coefficients empiriques de frottement et de profondeur est réalisé à partir du protocole d'analyse suivant :

- Les données brutes des quatre stations sont traitées à l'aide du logiciel *WaveWin InterOcean* (1994) (annexe A) afin d'obtenir la hauteur significative des houles H_s et le spectre d'énergie eps calculés sur un bloc de données.
- Chaque bloc de données correspondant à une période de pointe T_p donnée de houle a été sélectionné et classé par catégorie de période de pointe T_p (fig. 2.2) afin de déterminer le flux d'énergie P , la célérité de la houle en eau peu profonde C_s , la longueur d'onde L_s et le coefficient de profondeur K_s propres à chacune des catégories.

	Burst #	Date	Time	MWHAS	HAV	HS	HMAX	H_1/10	TP	TZ	TS
1	100	12-17-99	14:48	3,39	0,37	0,59	0,98	0,75	4,21	3,98	4,06
2	101	12-17-99	16:48	3,3	0,59	0,94	1,56	1,19	4,39	4,08	4,14
3	102	12-17-99	18:48	3,36	0,62	0,99	1,64	1,26	5,18	4,37	4,46
4	103	12-17-99	20:48	3,56	0,73	1,16	1,92	1,48	5,29	4,45	4,56
5	104	12-17-99	22:48	3,69	0,79	1,26	2,07	1,6	5,9	4,58	4,73
6	105	12-18-99	00:48	3,69	0,76	1,21	1,98	1,53	6,04	4,69	4,86
7	106	12-18-99	02:48	3,51	0,65	1,03	1,69	1,31	6,11	4,79	4,99
8	107	12-18-99	04:48	3,28	0,54	0,86	1,41	1,1	6,76	4,8	4,99
9	108	12-18-99	06:48	3,19	0,61	0,97	1,59	1,24	5,77	4,83	5,03
10	109	12-18-99	08:48	3,35	0,78	1,24	2,03	1,58	6,34	4,83	5,05
11	110	12-18-99	10:48	3,58	0,9	1,43	2,34	1,82	7,14	4,94	5,22
12	111	12-18-99	12:48	3,62	0,9	1,43	2,33	1,82	7,45	5,15	5,45
13	112	12-18-99	14:48	3,54	0,9	1,44	2,33	1,83	7,04	5,4	5,72
14	113	12-18-99	16:48	3,21	0,83	1,32	2,14	1,68	8,03	5,43	5,8
15	114	12-18-99	18:48	3,07	0,85	1,36	2,19	1,73	8,71	5,52	5,9
16	115	12-18-99	20:48	3,2	0,86	1,37	2,21	1,75	7,79	5,79	6,24
17	116	12-18-99	22:48	3,38	0,86	1,37	2,2	1,74	8,43	5,93	6,38
18	117	12-19-99	00:48	3,45	0,65	1,04	1,66	1,32	9,18	6,38	6,86
19	118	12-19-99	02:48	3,35	0,61	0,97	1,56	1,24	9,02	6,25	6,69
20	119	12-19-99	04:48	3,09	0,44	0,7	1,11	0,89	7,91	6,19	6,58
21	120	12-19-99	06:48	2,98	0,48	0,76	1,21	0,97	7,91	6,38	6,76
22	121	12-19-99	08:48	3,04	0,41	0,66	1,05	0,84	7,91	6,18	6,5
23	122	12-19-99	10:48	3,33	0,43	0,69	1,1	0,88	7,34	6,4	6,67
24	123	12-19-99	12:48	3,47	0,36	0,57	0,91	0,72	7,79	6,38	6,64
25	124	12-19-99	14:48	3,42	0,32	0,51	0,81	0,65	7,79	6,44	6,72
26	125	12-19-99	16:48	3,08	0,27	0,43	0,69	0,55	8,16	6,64	6,88
27	126	12-19-99	18:48	2,79	0,24	0,38	0,6	0,49	8,71	6,77	6,99
28	127	12-19-99	20:48	2,78	0,2	0,32	0,51	0,41	7,91	6,61	6,84

Fig. 2.2 – Exemple de sélection manuelle du burst #118 et de tous ses paramètres ayant pour période de pointe $T_p = 9,0 s$ (WaveWin InterOcean, 1994).

- Afin d'identifier et de quantifier la perte d'énergie de la houle au fur et à mesure de son transit vers la ligne de rivage, le flux d'énergie P est déterminé pour chacun des blocs sélectionnés.

- La variation de flux d'énergie entre les stations permet de déduire la courbe d'évolution du flux énergétique des houles P de période de pointe T_p donnée le long du profil de mesure. L'équation de la pente de la courbe devrait être proportionnelle à la valeur du facteur de frottement au niveau du fond associée au coefficient de profondeur de la houle.
- Finalement, les paramètres de profondeur de la houle (longueur d'onde L_s , coefficient de profondeur K_s , célérité en eau peu profonde C_s) sont calculés pour chacun des blocs sélectionnés et exprimés graphiquement en fonction des catégories de période de pointe T_p et de la distance à la plage d . Cette approche permet d'évaluer l'évolution du coefficient de profondeur empirique.

2.3. Calcul du flux d'énergie

Ce calcul est réalisé pour déterminer la perte d'énergie de la houle au cours de son passage au-dessus des instruments de mesure. Le flux d'énergie P de la houle (W/m) pour une onde sinusoïdale en une station suivant la théorie linéaire s'exprime comme suit :

$$P = EC_g \quad (2.1)$$

où E est l'énergie totale de la houle par unité de surface (J/m^2), qui correspond à :

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (2.2)$$

et C_g est la vitesse du groupe (m/s), qui correspond à la vitesse à laquelle l'énergie de la houle se propage et qui est égale à :

$$C_g = nC \quad (2.3)$$

où C est la célérité de la houle (m/s) et n est le rapport (sans unité) entre la vitesse du groupe et la célérité de la houle, qui correspond à :

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (2.4)$$

où k est le nombre d'onde et h est la profondeur d'eau (m).

Ce développement mathématique suppose la conservation de l'énergie de la houle, donc aucune perte d'énergie, et la conservation du flux d'énergie de la houle entre les stations de mesure. Ainsi, entre deux stations fictives 1 et 2, respectivement de largeurs b_1 et b_2 , il est possible d'affirmer que :

$$P_1 b_1 = P_2 b_2 \quad (2.5)$$

En tenant compte des équations 2.2 et 2.3, cette affirmation devient :

$$E_1 C_{g1} b_1 = E_2 C_{g2} b_2 \quad (2.6)$$

ou

$$\left(\frac{\rho g H_1^2}{8} \right) C_{g1} b_1 = \left(\frac{\rho g H_2^2}{8} \right) C_{g2} b_2 \quad (2.7)$$

En introduisant l'expression pour la vitesse du groupe C_g (2.3) et du rapport n (2.4), le rapport des hauteurs de houles entre les deux stations se développe comme suit :

$$\left(\frac{\rho g H_1^2}{8} \right) n_1 C_1 b_1 = \left(\frac{\rho g H_2^2}{8} \right) n_2 C_2 b_2 \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{\rho g H_1^2}{8} \right) \left(\frac{1}{2} \left[1 + \frac{2k_1 h_1}{\sinh(2k_1 h_1)} \right] \right) C_1 b_1 = \left(\frac{\rho g H_2^2}{8} \right) \left(\frac{1}{2} \left[1 + \frac{2k_2 h_2}{\sinh(2k_2 h_2)} \right] \right) C_2 b_2 \quad (2.9)$$

qui se simplifie en considérant ρ et g comme des valeurs constantes :

$$H_1^2 \left(1 + \frac{2k_1 h_1}{\sinh(2k_1 h_1)} \right) C_1 b_1 = H_2^2 \left(1 + \frac{2k_2 h_2}{\sinh(2k_2 h_2)} \right) C_2 b_2 \quad (2.10)$$

$$\frac{H_2^2}{H_1^2} = \frac{\left(1 + \frac{2k_1 h_1}{\sinh(2k_1 h_1)} \right) C_1 b_1}{\left(1 + \frac{2k_2 h_2}{\sinh(2k_2 h_2)} \right) C_2 b_2} = \frac{\left[\left(1 + \frac{2k_1 h_1}{\sinh(2k_1 h_1)} \right) C_1 \right] \left(\frac{b_1}{b_2} \right)}{\left[\left(1 + \frac{2k_2 h_2}{\sinh(2k_2 h_2)} \right) C_2 \right]} \quad (2.11)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{\left[\left(1 + \frac{2k_1 h_1}{\sinh(2k_1 h_1)} \right) C_1 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\left(1 + \frac{2k_2 h_2}{\sinh(2k_2 h_2)} \right) C_2 \right]^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{b_1}{b_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

ou encore pour simplifier l'expression :

$$\frac{H_2}{H_1} = K_s K_r \quad (2.13)$$

où K_s est le coefficient de profondeur (« shoaling coefficient ») et K_r est le coefficient de réfraction.

En contrepartie, s'il y a du frottement au niveau du fond, comme il est envisagé, un coefficient de frottement K_f peut être ajouté à l'expression de l'équation 2.13 :

$$\frac{H_2}{H_1} = K_s K_r K_f \quad (2.14)$$

où K_f correspond au rapport entre les flux d'énergie de la houle entre les deux stations :

$$K_f = \left(\frac{P_2 b_2}{P_1 b_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

qui serait égal à 1 s'il n'y avait pas de perte d'énergie entre les deux stations.

Ainsi, l'équation 2.12 devient :

$$\frac{H_2}{H_1} = \left[\frac{\left(1 + \frac{2k_1 h_1}{\sinh(2k_1 h_1)} \right) C_1}{\left(1 + \frac{2k_2 h_2}{\sinh(2k_2 h_2)} \right) C_2} \right]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{b_1}{b_2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P_2 b_2}{P_1 b_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

Le coefficient de frottement se définit donc comme suit :

$$K_f = \frac{1}{K_s K_r} \frac{H_2}{H_1} \quad (2.17)$$

En somme, en eau peu profonde, où $n \approx 1$ et $C = \sqrt{gh}$, le flux d'énergie P correspond à :

$$P = EC_g = EnC = \frac{\rho g H^2}{8} \sqrt{gh} \quad (2.18)$$

et, considérant ρ et g comme des constantes propres au milieu, il peut être estimé à une constante près par :

$$P \cong H_2 \sqrt{h} \quad (2.19)$$

2.4. Calcul des paramètres de houle selon *Airy (1845)*

Airy (1845) formula des équations théoriques permettant de déterminer les paramètres de profondeur en supposant des houles sinusoïdales irrotationnelles se déplaçant sur un fond horizontal et une profondeur quelconque. De plus, en posant une viscosité de l'eau négligeable et une énergie des houles constante, le flux d'énergie total du système est constant.

Ainsi, cette théorie linéaire permet d'exprimer :

- la longueur d'onde de la houle L

$$L = \frac{g}{2\pi} T_p^2 \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (2.20)$$

où L est la longueur d'onde de la houle (m), g est l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m/s}^2$), T_p est la période de pointe (s) et h est la profondeur d'eau (m).

- la célérité de la houle C

$$C = \frac{g T_p}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (2.21)$$

où C est la célérité de la houle (m/s)

- le coefficient de profondeur (« shoaling coefficient ») K_s

$$K_s = \left[\left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{L}\right)} \right) \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

où K_s est le coefficient de profondeur

Dans le cadre de cette étude, le milieu est caractérisé par une faible profondeur d'eau (« shallow water ») satisfaisant généralement les conditions que

$$\frac{h}{L} < 0.04 \quad (2.23)$$

et que

$$\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \approx \frac{2\pi h}{L} \quad (2.24)$$

Ainsi, en eau peu profonde, il est possible de simplifier les expressions définies par les équations 2.20, 2.21 et 2.22 :

- de la longueur d'onde de la houle L_s à

$$L_s = T_p \sqrt{gh} \quad (2.25)$$

- de la célérité de la houle C_s à

$$C_s = \sqrt{gh} \quad (2.26)$$

- du coefficient de profondeur de la houle K_s (« shoaling coefficient ») à

$$K_s = \left[\frac{2\pi h}{L} \left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{L}\right)} \right) \right]^{-1/2} \quad (2.27)$$

2.5. Résultats

2.5.1. Flux d'énergie

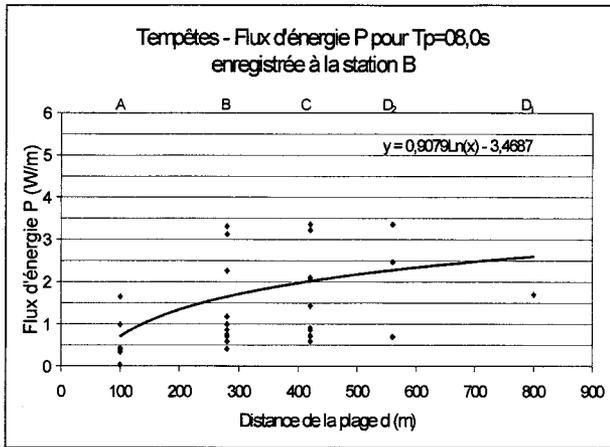
Afin d'entreprendre ce travail, les blocs de même période de pointe T_p ont été regroupés. Par exemple, pour la valeur $T_p = 9,0 s$, l'intervalle $T_p = 8,85$ à $9,15 s$ a été retenu. À partir de ce regroupement, le flux d'énergie P est calculé pour chacun de ces blocs et tous les résultats obtenus par ces calculs sont représentés sous forme graphique montrant la relation entre le flux d'énergie P et la distance à la plage d (fig. 2.3 et annexe B). Considérant les houles les plus actives dans ce secteur de l'île de Jerba, seules les périodes de pointe T_p entre $8,0$ et $10,0 s$ ont été retenues et chaque période considérée montre une diminution du flux d'énergie P vers la côte, ce qui confirme que l'énergie de la houle s'atténue du large vers la ligne de rivage. Pour chacun des graphiques présentés, l'effet du transit de la houle vers la ligne de rivage est établi. De plus, le coefficient de la pente du flux d'énergie de la houle diminue au fur et à mesure de l'augmentation de la période de pointe T_p . Pour la période $T_p = 10,0 s$, le coefficient de la pente du flux d'énergie semble légèrement plus élevé que celui de la période $T_p = 9,5 s$, ce qui paraît paradoxal. Cela peut s'expliquer par la faible quantité de points de mesure qui ne permet pas d'obtenir avec précision la courbe pour $T_p = 10,0 s$.

2.5.2. Facteur de frottement

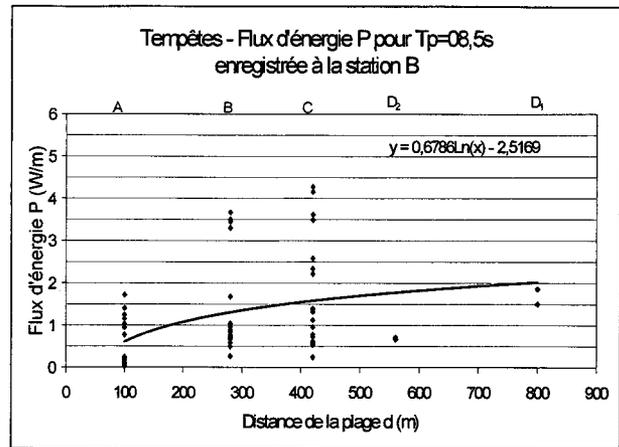
Le facteur de frottement est évalué à partir de la perte d'énergie de la houle entre les stations. Ainsi, cette perte énergétique se traduit par une variation du flux d'énergie P . Pour chacune des périodes de pointe T_p retenues, la meilleure tendance pouvant représenter le facteur de frottement au niveau du fond correspond à une courbe logarithmique empirique (fig. 2.3 et annexe B), compte tenu de la définition mathématique du flux d'énergie P et de son influence non-linéaire le long de la ligne de mesure. L'équation de la courbe de chacun des graphiques de

flux d'énergie P en période de tempête est classée selon la période de pointe T_p correspondante (tab. 2.1 et annexe B). Ce tableau présente également les équations ainsi obtenues.

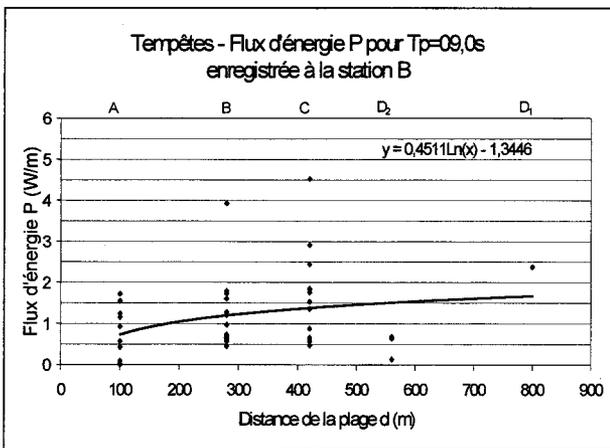
Généralement, de la période $T_p = 8,0 s$ à la période $T_p = 9,5 s$, les deux coefficients des équations diminuent progressivement. Par exemple, le coefficient du premier terme (pente) passe de 0,91 à 0,41 et le second coefficient (valeur à l'origine) de 3,47 à 1,35. Quant à la période $T_p = 10,0 s$, elle présente une augmentation des deux coefficients par rapport à la période $T_p = 9,5 s$. L'interprétation de ces résultats sera présentée dans la chapitre 4 du présent mémoire.



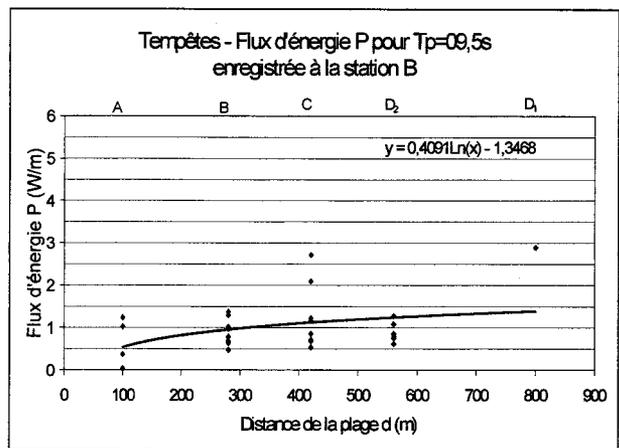
A)



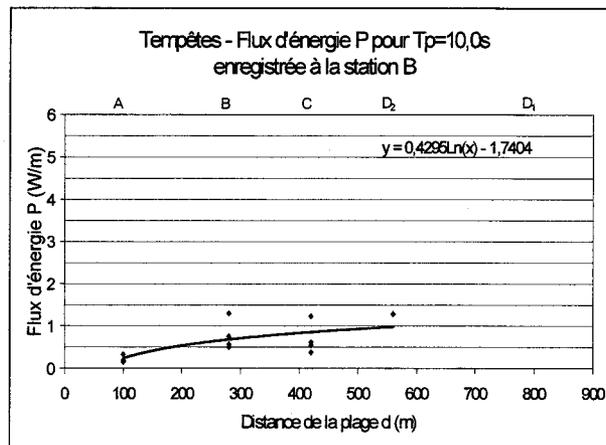
B)



C)



D)



E)

Fig. 2.3 - Graphiques du flux d'énergie P en fonction de la distance à la plage d pour les périodes de pointe T_p correspondant à : A) 8,0 s, B) 8,5 s, C) 9,0 s, D) 9,5 s et E) 10,0 s le long de la ligne de mesure.

Tab. 2.1 – Formules empiriques décrivant le facteur de frottement f_f au niveau du fond pour les houles de périodes de pointe T_p entre 8,0 s et 10,0 s correspondant aux périodes de tempêtes.

Période houle T_p	Équation du facteur de frottement f_f
8,0s	$0,91Ln(d)-3,47$
8,5s	$0,68Ln(d)-2,52$
9,0s	$0,45Ln(d)-1,34$
9,5s	$0,41Ln(d)-1,35$
10,0s	$0,43Ln(d)-1,74$
Moyenne	$0,57Ln(d)-2,08$

2.5.3. Paramètres de profondeur selon Airy (1845)

Les valeurs du coefficient de profondeur K_s , de la longueur d'onde L_s et de la célérité de la houle C_s ont toutes été calculées selon la théorie linéaire des houles de Airy (1845) pour des houles ayant respectivement des périodes de pointe T_p de 8,0 s, 8,5 s, 9,0 s, 9,5 s et 10,0 s à chacune des quatre stations (tab. 2.2 et annexe C). Ces résultats ne mettent pas globalement en évidence de tendance nette dans la variation du coefficient de profondeur au niveau des quatre stations en fonction des périodes de pointe retenues ($T_p = 8,0 s$ à $T_p = 10,0 s$). Ceci se traduit par une similarité des équations de profondeur entre les stations pour chaque période de pointe retenue T_p . Ainsi, de façon générale lors de tempêtes, l'effet du à la profondeur s'exprime par l'équation:

$$K_s = -0,0008d + 1,7886 \quad (2.28)$$

Tab. 2.2 - Paramètres de profondeur en période de tempêtes calculés pour les houles de périodes de pointe T_p comprises entre 8,0 s et 10,0 s.

Stations	$T_p = 08,0$ s			$T_p = 08,5$ s			$T_p = 09,0$ s			
	K_s	L_s	C_s	K_s	L_s	C_s	K_s	L_s	C_s	
Tempêtes	A (100 m)	1,85	34,08	3,98	1,60	30,83	4,28	1,67	34,79	4,41
	B (280 m)	1,53	43,33	5,44	1,62	44,03	5,19	1,67	46,02	5,13
	C (420 m)	1,36	54,50	6,79	1,37	54,98	6,75	1,40	56,74	6,72
	D ₂ (560 m)	1,20	51,33	7,40	1,22	49,46	7,14	1,26	50,53	6,95
	D ₁ (800 m)	1,24	53,23	7,35	1,24	58,14	7,69	1,03	42,65	7,90
Stations	$T_p = 09,5$ s			$T_p = 10,0$ s						
	K_s	L_s	C_s	K_s	L_s	C_s				
Tempêtes	A (100 m)	1,55	30,37	4,44	1,64	27,76	4,01			
	B (280 m)	1,66	51,99	5,48	1,66	56,30	5,66			
	C (420 m)	1,41	58,50	6,74	1,54	66,65	6,64			
	D ₂ (560 m)	1,38	64,23	7,20	1,41	61,81	6,97			
	D ₁ (800 m)	1,07	40,79	7,47						

Tab. 2.3 - Équations générales décrivant l'évolution du coefficient de profondeur K_s en tempêtes au niveau du fond pour les houles de périodes de pointe T_p entre 8,0 s et 10,0 s.

Période houle T_p	Équation du coefficient de profondeur K_s
8,0s	$-0,0012d+1,9080$
8,5s	$-0,0007d+1,7143$
9,0s	$-0,0009d+1,8320$
9,5s	$-0,0007d+1,7610$
10,0s	$-0,0004d+1,7275$
Moyenne	$-0,0008d+1,7886$

CHAPITRE 3 : TRANSPORT SÉDIMENTAIRE

3.1. Instrumentation, données et traitement

Une campagne de caractérisation du transport sédimentaire a été menée le long de la ligne de mesure courantométrique. Elle comprenait quatre stations situées respectivement à des profondeurs et des distances de la plage de 1,9 m et 100 m pour la station A, de 3,0 m et 280 m pour la station B, de 4,9 m et 420 m pour la station C et de 5,6 m et 560 m pour la station D₂ (tab. 1.1). Pendant huit mois consécutifs, d'octobre 1999 à juin 2000, les mesures furent enregistrées par deux types d'instrument, soit des courantomètres S4 InterOcean et des OBS. Les courantomètres étaient programmés suivant une fréquence de 2 Hz, durant 18 minutes (blocs ou « bursts » de 2160 lignes de valeurs représentant trois paramètres), toutes les deux heures pour les mesures de courant (vitesse et direction) et de profondeur d'eau. Un deuxième programme d'enregistrement des marées et d'autres conditions hydrodynamiques (température et conductivité) a été établi à partir d'une valeur moyenne calculée sur une minute chaque dix minutes. De plus, à la station B, un système d'acquisition multi-paramètres échantillonnait, suivant le même pas de mesure que précédemment, deux OBS situés à 25 et 50 cm du fond et une jauge nucléaire.

3.2. Méthodologie

Le calcul du transport sédimentaire est établi à partir du protocole d'analyse suivant :

- les données brutes sont traitées à l'aide du logiciel *S4 Application Software InterOcean (1994)* (fig. 3.1) afin d'obtenir la vitesse V , la direction DIR du courant et la profondeur d'eau h de chacune des lignes des blocs (18 minutes) de données.

- le débit sédimentaire instantané $q(t)$ est calculé pour chacune des lignes (enregistrements à intervalle de 0,5 s) des blocs de données selon le modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)*.

Serial No.	07301550	Version:	5.153	Type:	(2Hz)S4A	Rcprd Avg:	1	Post Avg:	1
Header:	JERBA OCTOBRE	Ref Depth:	0.00	Mag Var:	0.00				
Date/Time	04-28-2003	12:06:38							
Sample #	Date	Time	dec S	Vnorth	Veast	Speed	Dir	none	Hx
	MM/DD/YYYY	hh:mm:ss	.s	cm/sec	cm/sec	cm/sec	deg		
248401		00:32:00	0.0	12.80	-1.60	12.90	352.9		
248402		00:32:00	0.5	8.00	-3.80	8.86	334.6		
248403		00:32:01	0.0	-8.20	-24.40	25.74	251.4		
248404		00:32:01	0.5	-12.20	-37.40	39.34	251.9		
248405		00:32:02	0.0	7.20	-24.40	25.44	286.4		
248406		00:32:02	0.5	16.80	4.00	17.27	13.4		
248407		00:32:03	0.0	21.80	17.20	27.77	38.3		
248408		00:32:03	0.5	21.00	15.00	25.81	35.5		
248409		00:32:04	0.0	17.60	9.20	19.86	27.6		
248410		00:32:04	0.5	10.40	4.80	11.45	24.8		
248411		00:32:05	0.0	1.20	1.40	1.84	49.4		
248412		00:32:05	0.5	0.00	-8.20	8.20	270.0		
248413		00:32:06	0.0	-4.60	-28.40	28.77	260.8		
248414		00:32:06	0.5	-6.40	-32.80	33.42	259.0		
248415		00:32:07	0.0	2.20	-11.00	11.22	281.3		
248416		00:32:07	0.5	12.80	6.60	14.40	27.3		
248417		00:32:08	0.0	11.60	-0.40	11.61	358.0		
248418		00:32:08	0.5	4.80	-7.00	8.49	304.4		
248419		00:32:09	0.0	7.40	4.60	8.71	31.9		
248420		00:32:09	0.5	17.20	13.40	21.80	37.9		
248421		00:32:10	0.0	15.40	2.20	15.56	8.1		
248422		00:32:10	0.5	4.60	-11.80	12.66	291.3		

Fig. 3.1 - Traitement des données enregistrées et de tous les paramètres programmés à l'aide du logiciel S4 Application Software InterOcean (1994).

- les débits sédimentaires journaliers, mensuels et global pour l'ensemble de la campagne de mesure sont déterminés par sommation et intégration selon la période de temps appropriée, soit 12 blocs ou 25920 lignes par jour, etc.
- une corrélation est établie entre les valeurs calculées de débits sédimentaires et les mesures de concentrations sédimentaires en suspension enregistrées à partir des OBS.

3.3. Transport sédimentaire selon *Madsen et Grant (1976)*

L'estimation du débit solide consiste à utiliser les données de profondeur d'eau h , de la résultante de la vitesse de la houle V et de sa direction DIR enregistrées par les courantomètres S4 pour calculer le débit de transport des sédiments par le modèle de *Madsen and Grant (1976)*.

Connaissant la direction et la résultante de la vitesse de la houle, le calcul du débit sédimentaire instantané \bar{q} sur un intervalle de temps $\Delta t = 0,5 s$ s'effectue en utilisant ce modèle courantométrique, qui tient compte de l'action combinée des courants et des houles.

La série temporelle de débit sédimentaire de charriage Q est fonction du temps et de la période d'aggrégation. Il représente la moyenne temporelle (mobile) des débits sédimentaires instantanés \bar{q} durant une période de temps T (jour, mois, année, etc.). Q est obtenu par l'intégration de \bar{q} sur T :

$$Q = \frac{1}{T} \int \bar{q} dt \quad (3.1)$$

De plus, le débit de charriage s'obtient à partir de l'équation de *Madsen and Grant (1976)* sous la forme vectorielle suivante :

$$\bar{\phi}(t) = 40 [\bar{\Psi}(t)]^3 \quad (3.2)$$

où $\bar{\phi}(t)$ est le vecteur de transport instantané de sédiment et $\bar{\Psi}(t)$ est le vecteur de la valeur instantanée du paramètre de Shields.

Dans la relation 3.2, le module du vecteur $\bar{\phi}(t)$ peut être exprimé comme suit :

$$|\bar{\phi}(t)| = \frac{|\bar{q}(t)|}{w d_{50}} \quad (3.3)$$

où $\bar{q}(t)$ est le taux de transport instantané des sédiments, w est la vitesse de chute des sédiments et d_{50} est la taille moyenne des grains de sédiment.

Dans cette même relation 3.2, le module du vecteur $\bar{\Psi}(t)$ s'exprime par la relation :

$$|\bar{\Psi}(t)| = \frac{\bar{\tau}_o(t)}{(s-1)\rho g d_{50}} \quad (3.4)$$

où $\bar{\tau}_o(t)$ est la contrainte de cisaillement instantanée du fond (qui est fonction du coefficient de frottement instantané dû aux courants et aux houles (f_{cw}) et s est la densité relative des sédiments.

La combinaison des équations 3.2, 3.3 et 3.4 permet d'exprimer les composantes en x et y du débit charriage instantané $\bar{q}(t)$:

$$q_x(t) = 40w d_{50} \left[\frac{\frac{1}{2} \rho f_{cw} (u^2(t) + v^2(t))}{(s-1)\rho g d_{50}} \right]^3 \frac{u(t)}{\sqrt{u^2(t) + v^2(t)}} \quad (3.5)$$

$$q_y(t) = 40w d_{50} \left[\frac{\frac{1}{2} \rho f_{cw} (u^2(t) + v^2(t))}{(s-1)\rho g d_{50}} \right]^3 \frac{v(t)}{\sqrt{u^2(t) + v^2(t)}} \quad (3.6)$$

où $u(t)$ et $v(t)$ sont les composantes de la vitesse instantanée suivant les axes x et y .

Il est important de noter que le coefficient de frottement f_{cw} pour l'action combinée du courant et de la houle est donnée par l'équation *Madsen and Grant (1976)* et s'exprime comme suit :

$$f_{cw} = \frac{(U f_c + u_w(t) f_w)}{U + u_w(t)} \quad (3.7)$$

où U est la vitesse moyenne résultante du courant, u_w est la vitesse résultante associée à la houle, f_c est le coefficient de frottement dû au courant et f_w est le coefficient dû à la houle. Tel que proposé par *Komar (1976)* pour un sable dont la granulométrie est fine, un coefficient f_{cw} de 1,18 est considéré dans ce mémoire.

Quant à la vitesse de chute des sédiments w , elle est calculée, selon *Van Rijn (1993)*, par la relation :

$$w = \frac{10\nu}{d_{50}} \left[\left(1 + \frac{0,01(s-1)gd_{50}^3}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (3.8)$$

où ν est la viscosité cinématique de l'eau.

Les équations 3.5 et 3.6 ont été appliquées à chacun des enregistrements, qui sont au nombre de 2160 valeurs par bloc de 18 minutes et de 25920 valeurs par jour (douze blocs de 18 minutes), pour les quatre (4) courantomètres S4 ayant enregistré pendant huit (8) mois. Pour chacun des enregistrements, le débit de charriage instantané a été décomposé en fonction de sa composante le long du profil de plage (On-Off) et le long du littoral (Longshore) en prenant la tangente de la plage sur la ligne de mesure orientée à $230^\circ N$ (fig. 1.5). L'intégration temporelle des débits de charriage instantanés calculés pour chacun des enregistrements du blocs de 18 minutes correspond au débit de charriage pour ce bloc. Cette valeur a été considérée représentative de la période de deux heures correspondante. Enfin, par intégration temporelle similaire, les débits de charriage journaliers, mensuels, global pour la campagne de mesure et annuel ont été calculés. Il est à noter que lorsque, dans le processus de calcul, le résultat calculé pour un enregistrement engendrait une erreur, ce résultat était remplacé par la valeur « 0 ».

3.4. Corrélation avec les sondes à rétrodiffusion optique (OBS)

Afin de vérifier les résultats déduits de l'application de l'équation de *Madsen and Grant (1976)*, les résultats de concentration de sédiments en suspension obtenus par les OBS ont été comparés aux résultats précédents. Afin d'étalonner les OBS, nous avons considéré que la taille des sables était constante, soit $0,25 \text{ mm}$. Cette approximation est proche de la réalité (annexe M), car la majorité des sables sont constitués d'oolithes calcaires qui sont néoformés sur la zone d'étude et dont la taille résulte d'une accréation constante dans la zone de déferlement durant les périodes

chaudes et d'une érosion éolienne et anthropique durant les périodes estivales au niveau de la plage.

La courbe retenue pour la granulométrie des sables de Jerba, comprise entre 200 et 240 μm , est une courbe de régression linéaire (APAL, 2002)

$$\varepsilon = Gc + \varepsilon_0 \quad (3.9)$$

où ε_0 est la réponse en voltage de l'OBS dans l'eau distillée (0,1 volt), ε est le voltage lu, G est le coefficient dépendant de la granulométrie et c est la concentration en g/l.

Pour des particules comprises entre 200 et 240 μm , G est égal à $\frac{1,5}{8}$ soit 0,19

d'où

$$\varepsilon = 0,19c + 0,1 \quad (3.10)$$

donc, connaissant le voltage, la concentration correspond à

$$c = \frac{\varepsilon - 0,1}{0,19} \quad (3.11)$$

3.5. Résultats

3.5.1. Transport sédimentaire

Un calcul du transport sédimentaire, déterminé aux quatre stations de mesure en utilisant le modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)*, a été établi à partir de chacune des lignes des blocs de données (2160 lignes par bloc). Par la suite, les blocs sont regroupés en fichiers journaliers. Les débits sédimentaires instantanés sont calculés vectoriellement (en x et y) à partir des lignes des blocs et la somme des lignes d'un bloc correspond au débit sédimentaire de la durée du bloc, c'est-à-dire 18 minutes. Les courantomètres ayant été programmés pour enregistrer un bloc de données de 18 minutes toutes les deux heures, le débit sédimentaire pour la

période de deux heures est calculé par intégration linéaire du débit sédimentaire du bloc. Les résultats des débits sédimentaires de chacun des courantomètres sont exprimés vectoriellement et le repère cartésien est positionné en fonction de la ligne de mesure orientée $230^\circ N$ (fig. 1.5). Suivant ce référentiel, le débit sédimentaire aura une composante le long du profil (orienté positivement vers la ligne de rivage) et une composante selon la dérive littorale, parallèle à la ligne de rivage (orientée positivement vers l'ouest). Le bilan dans l'axe du profil s'obtient par le calcul de la variation de débit sédimentaire le long du profil entre les stations, ce qui permet de déterminer la dynamique sédimentaire du secteur ainsi que les zones de dépôt et d'érosion. Enfin, l'intégration du débit sédimentaire selon la dérive littorale détermine le mouvement global du volume de sédiments qui se déplacent le long du littoral.

Le profil de mesure a été choisi sur une partie de la plage où la morphologie et la topographie du fond sont uniformes. Aussi, il est possible de considérer que sur ce site la même quantité de sédiments arrive et part (équilibre). La région ne représente ni un puits, ni une source de sédiments pour l'ensemble de la plage.

3.5.1.1. TRANSPORT JOURNALIER

Le débit sédimentaire journalier le long du le profil QJ_p (annexe D) est obtenu par sommation des débits sédimentaires des périodes de deux heures (tab. 3.1). Par exemple, le 30 octobre 1999 ($-0,216 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$ en B) et le 15 mars 2000 ($-0,094 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$ en B) présentent des débits journaliers associés à deux journées calmes. Le 30 novembre 1999 ($-3,192 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$ en B) et le 14 janvier 2000 ($-0,103 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$ en b) présentent les résultats obtenus pour deux jours de tempête. Une valeur négative indique un mouvement des sédiments vers le large.

Le bilan dans l'axe du profil ΔQJ_p (tab. 3.1 et annexe E) montre les zones de dépôt et d'érosion entre les stations situées sur la ligne de mesure. Par exemple, pour le 30 octobre 1999, la zone entre les stations B et C présente une zone de dépôt important ($0,248 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$) comparativement aux deux autres zones B-A ($-0,159 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$) et D-C ($-0,015 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$),

où il y a érosion. Ainsi, globalement, le mois d'octobre montre un transport de la plage vers le large. La zone près des posidonies reste stable et est peu alimentée.

Tab. 3.1 - Le transport le long du littoral ainsi que le transport et le bilan dans l'axe du profil décrits par les débits sédimentaires (en $m^3/m_{linéaire}$) pour deux journées de mer calme et deux journées de tempête.

	Jours calmes		Jours de tempêtes	
	30-oct-99	15-mars-00	30-nov-99	14-janv-00
TRANSPORT PROFIL QJ_P ($m^3/m_{linéaire}$)				
Station				
A	-0,056		-0,251	0,070
B	-0,216	-0,094	-3,192	-0,103
C	0,032	-0,079	-0,007	-0,058
D	0,017	-0,076		
BILAN PROFIL ΔQJ_P ($m^3/m_{linéaire}$)				
B-A	-0,159		-2,941	-0,173
C-B	0,248	0,015	3,185	0,045
D-C	-0,015	0,003		
TRANSPORT LITTORAL QJ_L ($m^3/m_{linéaire}$)				
Station				
A	0,222		0,208	0,238
B	1,066	0,006	0,302	-0,047
C	0,068	-0,013	0,092	-0,018
D	-0,011	-0,021		

De plus, établie à partir de la sommation des volumes journaliers calculés à chacune des stations, il existe une très grande variabilité dans la direction du mouvement journalier des sédiments, la quantité de sédiments déplacés d'une station à l'autre et la quantité journalière de sédiments VJ_L déplacés le long du littoral (annexe F). Ceci se traduit par des mouvements terre-mer et mer-terre qui montrent un rééquilibrage du profil. Par contre, selon le bilan sédimentaire, les houles de tempête transportent plus de sédiments que les houles de journée calme. Par exemple, la quantité

de sédiments transporter le long du profil QJ_p en A est 4,5 fois plus importante le 30 novembre ($-0,251 \text{ m}^3/m_{\text{linéaire}}$) que le 30 octobre ($-0,056 \text{ m}^3/m_{\text{linéaire}}$). En B, elle est respectivement 2,1 fois plus importante pour des dates correspondantes.

3.5.1.2. TRANSPORT MENSUEL

Les débits mensuels le long du littoral QM_L et du profil QM_P (annexe G) est obtenu par sommation des débits journaliers à chacune des stations, pour les mois complets de mesure, comme c'est le cas pour les mois de novembre 1999 et mai 2000 (tab. 3.2). Par contre, pour les mois incomplets, tels que janvier 2000, les débits sédimentaires mensuels par station correspondent à la somme des débits sédimentaires journaliers disponibles dans le mois, extrapolés sur le nombre de jours total (29, 30 ou 31) compris dans ce mois.

Une grande variabilité du sens du mouvement des sédiments et des volumes déplacés existe d'une station à l'autre dans le profil ΔQM_P (annexe H) et le long du littoral QM_L (annexe I). Elle est prise en considération, mais elle reste mineure et modifie peu la tendance générale : les mois présentant plus de tempêtes ont un bilan sédimentaire ΔQM_P supérieur aux mois généralement calmes. Ainsi, pour le mois de novembre, qui représente l'un des mois les plus actifs, le bilan sédimentaire entre les stations est plus important qu'aux mois de janvier et mars. Dans la zone B-A, le bilan sédimentaire de novembre ($-8,74 \text{ m}^3/m_{\text{linéaire}}$) est 1,8 fois plus élevé que celui de janvier ($-4,99 \text{ m}^3/m_{\text{linéaire}}$), ce qui reflète une érosion de la zone. Dans la zone C-B, il était 24 fois supérieur en novembre qu'en janvier et 2 fois plus élevé qu'en mars. Dans ce cas, il correspond à une zone d'accrétion appréciable.

Tab. 3.2 - Le transport le long du littoral ainsi que le transport et le bilan dans le profil décrits par les débits sédimentaires (en $m^3/m_{linéaire}$) pour les mois de novembre 1999, janvier 2000 et mars 2000.

	Novembre 1999	Janvier 2000	Mars 2000
TRANSPORT PROFIL QM_P ($m^3/m_{linéaire}$)			
Station			
A	-2,53	2,14	
B	-11,27	-2,85	3,92
C	-1,35	-3,25	-0,73
D	-0,35		-6,89
BILAN PROFIL ΔQM_P ($m^3/m_{linéaire}$)			
B-A	-8,74	-4,99	
C-B	9,92	-0,40	-4,65
D-C	1,00		-6,16
TRANSPORT LITTORAL QM_L ($m^3/m_{linéaire}$)			
Station			
A	3,24	7,25	
B	-7,97	0,96	-5,34
C	0,90	2,53	1,37
D	0,77		0,16

3.5.1.3. TRANSPORT GLOBAL

Le transport global représente les débits sédimentaires le long du littoral QC_L et du profil QC_P calculés à chaque station (annexe J), pour l'ensemble de la campagne de mesure entre octobre 1999 et juin 2000 (tab. 3.3). Ainsi, le débit sédimentaire global correspond à la sommation de tous les débits journaliers disponibles extrapolé sur la durée totale de la campagne de mesure, soit 225 jours.

Le bilan sédimentaire le long du profil ΔQC_P (annexe K) indique une tendance générale à l'érosion. Deux des quatre stations présentent des vecteurs orientés vers le large. Son bilan est

$4 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$ dans la zone B-A et $-139 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$ dans la zone C-B. Par contre, elle est de $119 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$ dans la zone D-C (zone de sédimentation).

Les débits sédimentaires dû à la dérive littorale QC_L (annexe L) est caractérisé par un mouvement général des sédiments vers le Nord-Ouest (fig. 3.3 A) illustré par les vecteurs de débits sédimentaires aux stations A ($35,9 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$), B ($67,6 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$) et C ($131,0 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$). Le bilan sédimentaire (fig. 3.3 B) dû à la dérive est intégré sur le profil et va dans le même sens que le transport. Calculés à partir de l'intégration trapézoïdale des surfaces, les volumes déplacés vers *NO* et vers *SE* sont respectivement de $33\,331 \text{ m}^3$ et de -1 m^3 , soit un transport total global de $33\,330 \text{ m}^3$ en direction du *NO*, ce qui correspond à une valeur annuelle extrapolée de $49\,015 \text{ m}^3$ en direction du *NO*.

Tab. 3.3 - Le transport le long du littoral ainsi que le transport et le bilan dans le profil décrits par les débits sédimentaires (en $\text{m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$) pour la campagne de mesure.

TRANSPORT PROFIL QC_P ($\text{m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$)	
Station	
A	1,58
B	5,20
C	-133,74
D	-14,56
BILAN PROFIL ΔQC_P ($\text{m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$)	
B-A	3,62
C-B	-138,94
D-C	119,18
TRANSPORT LITTORAL QC_L ($\text{m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}$)	
Station	
A	35,86
B	67,62
C	131,00
D	-0,22

La figure 3.2 présente la dynamique globale le long du profil considérant le transport dans le profil et le transport dû à la dérive littorale. Ainsi, les stations A, B et C sont grandement affectées par l'érosion et la station D présente une zone de légère sédimentation.

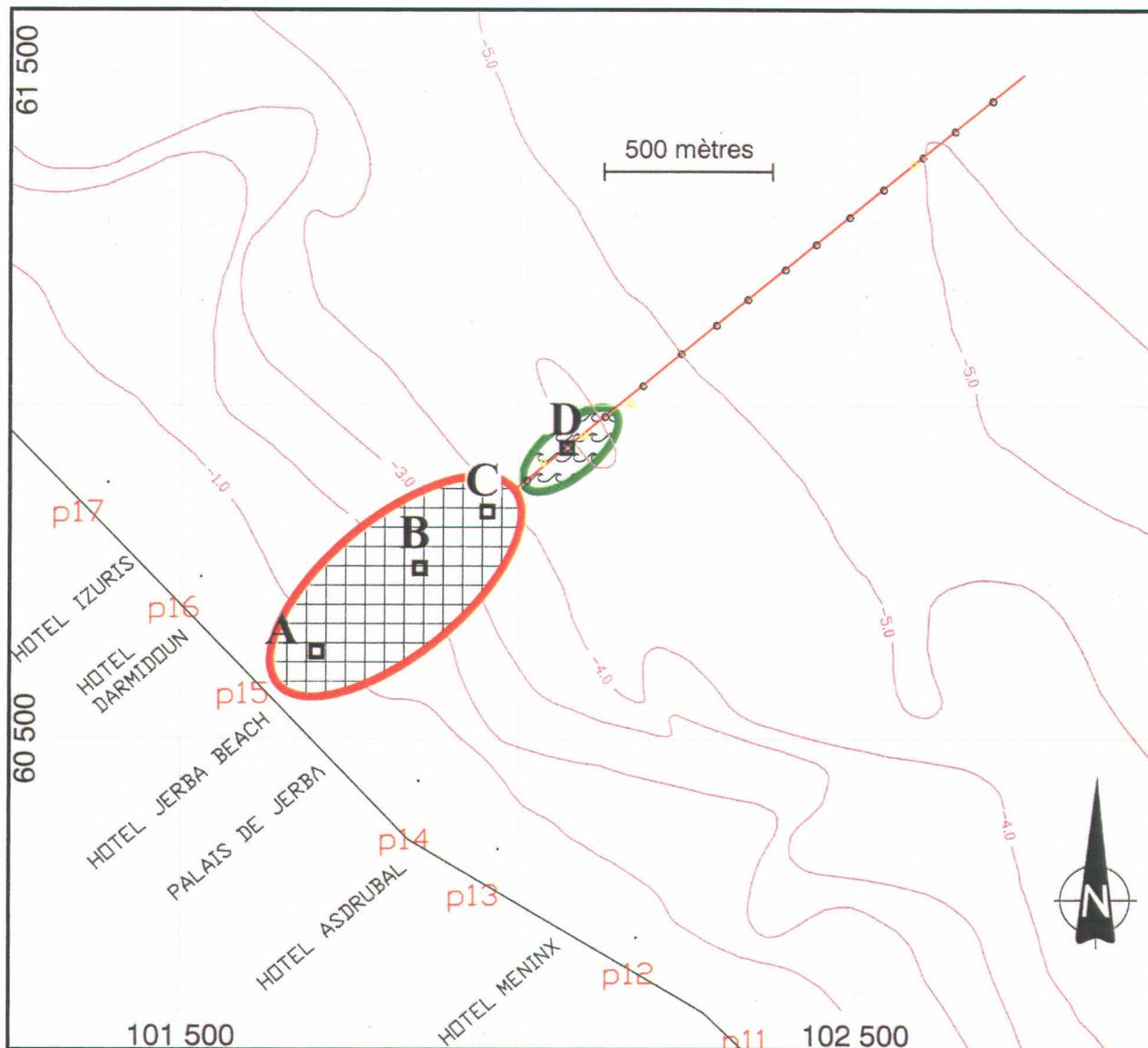
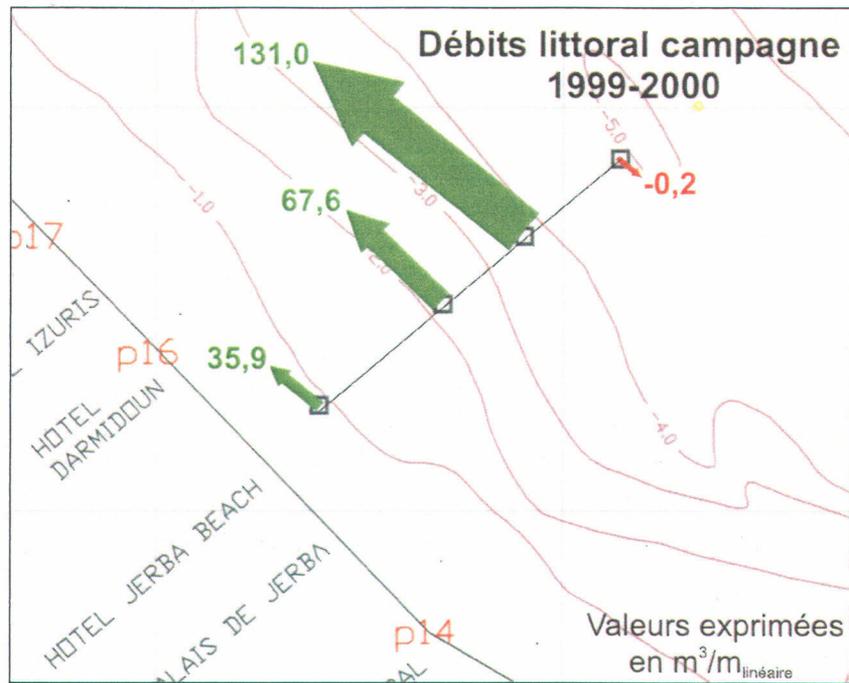
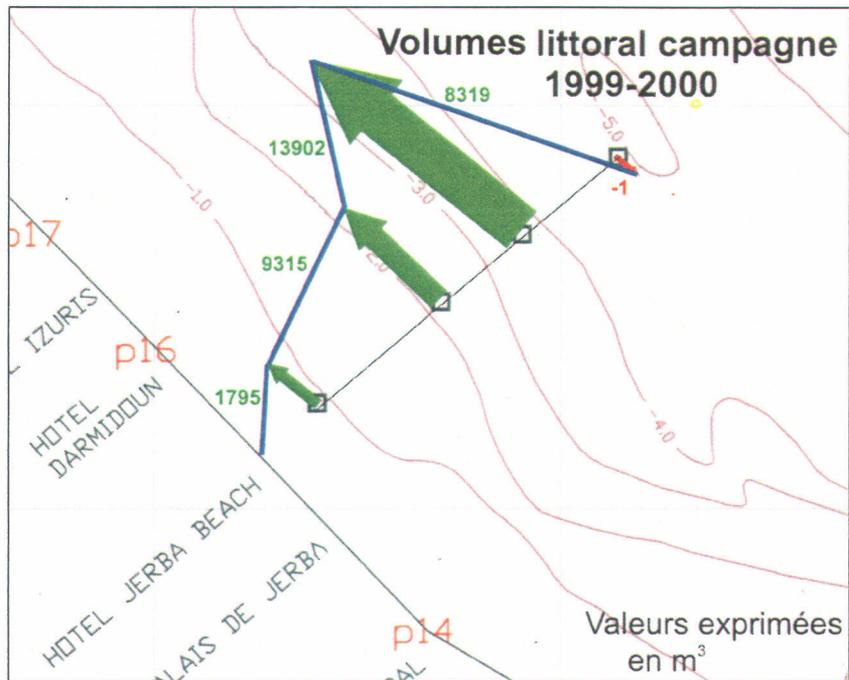


Fig. 3.2 – Représentation des zones d'érosion (rouge à motif quadrillé) et de dépôt (vert à motif vague) le long du profil pour la durée de la campagne de mesure.



A)



B)

Fig. 3.3 - Représentation vectorielle pour la campagne de mesure s'échelonnant d'octobre 1999 à juin 2000, A) des débits sédimentaires Q_{CL} correspondant au transport dû à la dérive littorale; B) des volumes de sédiments V_{CL} transportés dû à la dérive littorale.

3.5.1.4. RAPPORTS COMPARATIFS

Afin de valider les calculs de débits sédimentaires précédents, une étude comparative entre les stations a été réalisée. Les résultats précédents ont été déterminés par sommation selon une durée d'enregistrement (X jours) et rapportées sur une période visée (mois, campagne, année). Les durées d'enregistrement étant variables d'une station à l'autre, il est donc nécessaire de vérifier les résultats avec les rapports comparatifs (tab. 3.4) d'une station à l'autre et déterminer avec ces derniers si les débits sédimentaires mensuels correspondent afin d'avoir une idée des écarts et de l'impact de la méthode de calcul utilisée.

Le mois de novembre 1999 a été spécifiquement choisi parce que le fonctionnement des quatre courantomètres a été optimal. Ainsi, nous pouvons établir les rapports comparatifs entre les quatre stations. Ces rapports comparatifs ont été calculés en établissant le rapport d'écart entre deux résultats d'une durée d'enregistrements commune aux quatre stations. Pour le mois de novembre 1999, cette durée d'enregistrements commune est de 18 jours.

Les débits sédimentaires journaliers de ces 18 jours ont été sommés et comparés par le rapport d'écart :

$$\frac{\text{Débit } B - \text{Débit } A}{\text{Débit } B} \quad (3.12)$$

Les rapports comparatifs ont servi à interpoler les valeurs de débits sédimentaires journaliers pour les jours où aucun paramètre y a été enregistré. Dans le mois de novembre 1999, les stations A , B et C ont enregistré pendant les 30 jours. Par contre, la station D_1 n'a enregistré que pendant les 18 premiers jours. À l'aide des rapports comparatifs $D_1 - C$, les débits journaliers ont été interpolés pour les 12 jours manquants de la façon suivante :

- selon la dérive littorale

$$D_1 = -\frac{C}{0,264} \quad (3.13)$$

- le long du profil

$$D_1 = \frac{C}{5,079} \quad (3.14)$$

Par exemple, pour le mois de novembre 1999, les rapports comparatifs (tab. 3.4) établissent, selon la dérive littorale, un écart plutôt faible entre le débit sédimentaire mensuel calculé initialement ($-0,37 \text{ m}^3/m_{\text{linéaire}}$) et celui obtenu à partir du rapport comparatif D_1-C ($-0,27 \text{ m}^3/m_{\text{linéaire}}$). Par contre, le long du profil, l'écart est beaucoup plus important. Cela se traduit par un débit obtenu à partir du rapport comparatif D_1-C de $-3,80 \text{ m}^3/m_{\text{linéaire}}$ en comparaison à un débit sédimentaire mensuel calculé initialement de $-0,82 \text{ m}^3/m_{\text{linéaire}}$. Cet écart met en évidence les tempêtes du 19 novembre et du 27 au 30 novembre 1999.

Tab. 3.4 – Rapports comparatifs mensuels entre les quatre stations pour les campagnes de mesure.

Mois	Rapport comparatif B-A (B-A)/B		Rapport comparatif C-B (C-B)/C		Rapport comparatif D ₁ -C (D ₁ -C)/D ₁		Rapport comparatif D ₂ -C (D ₂ -C)/D ₂	
	le long du littoral	le long du profil	le long du littoral	le long du profil	le long du littoral	le long du profil	le long du littoral	le long du profil
Octobre 1999	0,558	0,870	-1,460	-3,752	5,884	17,431		
Novembre 1999	1,070	0,721	57,125	-5,174	1,264	-4,079		
Décembre 1999	0,479	1,185	0,882	0,787				
Janvier 2000	-7,478	1,644	2,237	-0,185				
Février 2000	1,000	1,000	-6,212	-2,145			-1,050	0,442
Mars 2000	1,000	1,000	-0,747	1,229			-1,746	0,346
Avril 2000	1,000	1,000	-57,222	25,183			-0,025	-0,372
Mai 2000	1,000	1,000	-29,788	19,636			-4,898	-0,759

Avec la même procédure, nous avons calculé les rapports comparatifs des stations pour les autres mois. Ainsi, il a été possible de déterminer les rapports D₂ –C. En comparaison avec D₁-C, les rapports sont plus élevés. Pour un transport le long du littoral, on note un rapport de 1,264 et, pour un transport le long du profil, un rapport de $-4,079$. Ceci nous permet de conclure que le transport sédimentaire est grandement atténué par la présence des herbier à la station D₁.

3.5.2. Corrélation avec la sonde à rétrodiffusion optique (OBS)

Afin de valider les résultats obtenus par le modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)*, ces derniers ont été comparés aux volumes de sédiments en suspension mesurés par les

OBS. La période d'enregistrement du 21 au 25 mars a été choisie compte tenu de la clarté de ces derniers à la station B. À cette station, deux OBS ont été installés à 25 *cm* (OBS No2) et 50 *cm* (OBS No1) du fond. Pour établir la corrélation, seul l'OBS No1 a été considéré compte tenu qu'une corrélation existe entre les deux résultats provenant des OBS. Les valeurs moyennes de concentration de l'OBS pour les blocs (fig. 3.4 A) ont été calculées à partir des données brutes (voltage) multipliées par 5,71 correspondant au facteur déterminé à partir de la courbe de 0,212 *mm* (212 μm) qui est la plus représentative du site (fig. 3.4 B). En corrélant l'ensemble des données, l'écart est très grand (fig. 3.5). Par contre, la relation entre le débit mesuré par les OBS et le débit calculé, effectuée en fonction de la direction de la houle donne une meilleure corrélation (fig. 3.6).

Pendant les périodes de calme, la charge des sédiments en suspension de 2,7 *g/l* (pour un sédiment de 0,25 *mm* de diamètre) est générée par les courants de marée durant le maximum de flot et de jusant. Les valeurs de concentration de sédiments enregistrées pendant les tempêtes sont dix fois plus élevées que celle des périodes calmes. Mais la distribution des sédiments en suspension dans la colonne d'eau est plus uniforme. Les valeurs de concentration à 0,25 *m* du fond sont quatre fois plus grandes que celles à 0,50 *m*.

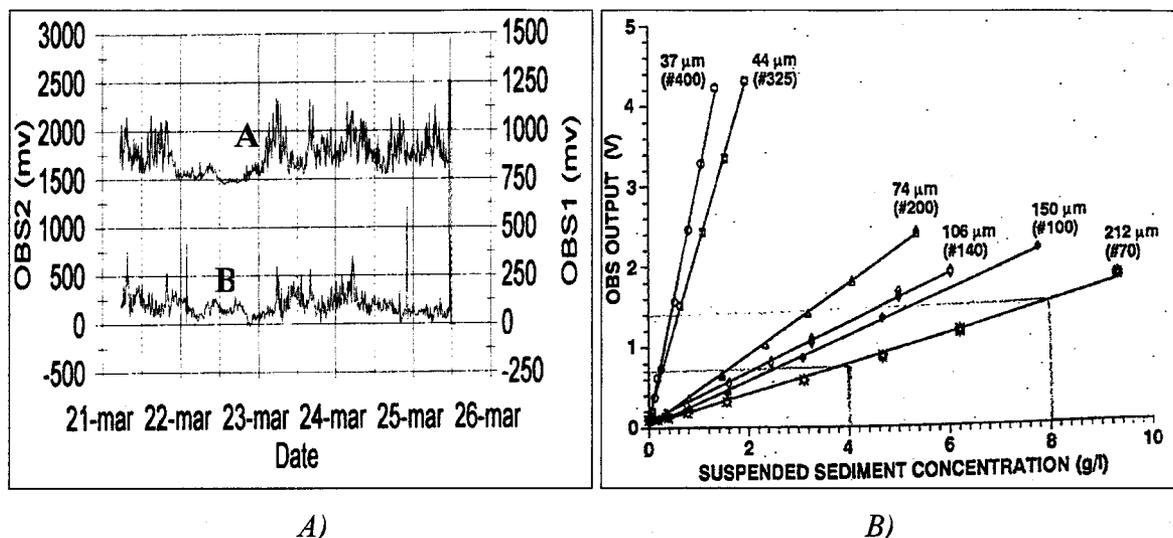


Fig. 3.4 - A) Courbe des gradients de concentration des sédiments obtenue par les OBS situés à respectivement à 25 cm pour l'OBS No2 (courbe A) et 50 cm pour l'OBS No1 (courbe B) du fond, à la station B pour des sédiments de 200 μm . B) Résultats de calibration de l'OBS montrant le voltage enregistré par l'OBS en fonction de la concentration des sédiment en suspension pour différentes tailles de particules.

Note : La courbe A est décalée de 1500 mV pour une meilleure lecture (APAL, 2002). Dans le cas présent, nous prenons la valeur de 0,212 mm (212 μm) qui est la plus représentative du site (D'après Conner et De Visser, 1992). Les concentrations des sédiments en suspension atteignent 7,4 g/l durant les tempêtes et 0,1 g/l en périodes calmes. Ces résultats montrent que l'environnement est dominé par les houles. De plus, durant les tempêtes, le nuage turbide s'étire à plus de 50 cm et il est généralement deux fois plus concentré à 25 cm qu'à 50 cm de hauteur (APAL, 2002).

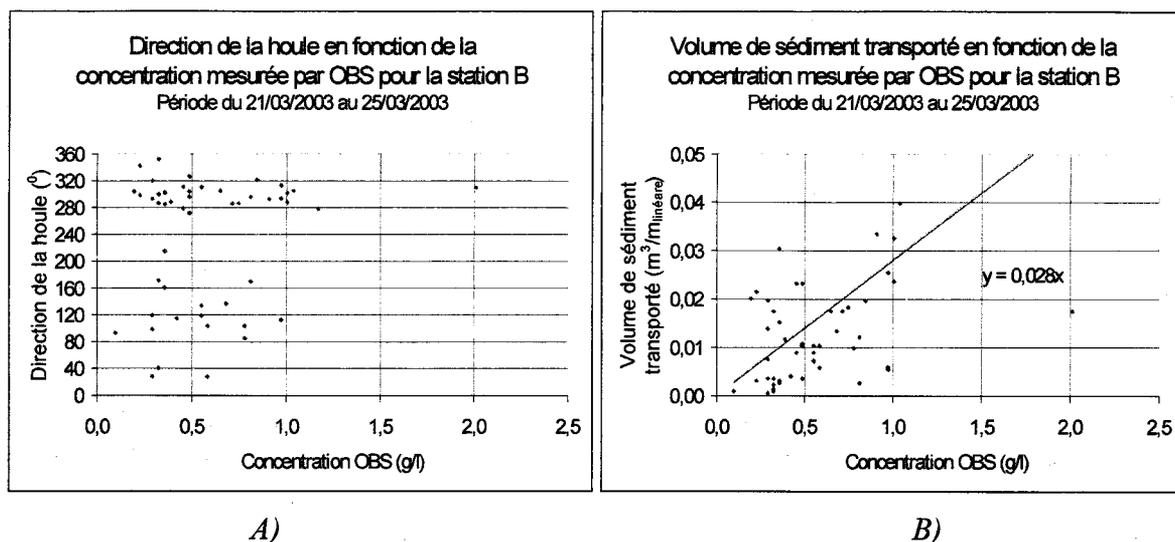


Fig. 3.5 - A) Corrélation du débit sédimentaire des blocs en fonction du voltage enregistré par l'OBS. B) Direction des houles pour la période du 21 au 15 mars 2000 en fonction du voltage enregistré par l'OBS.

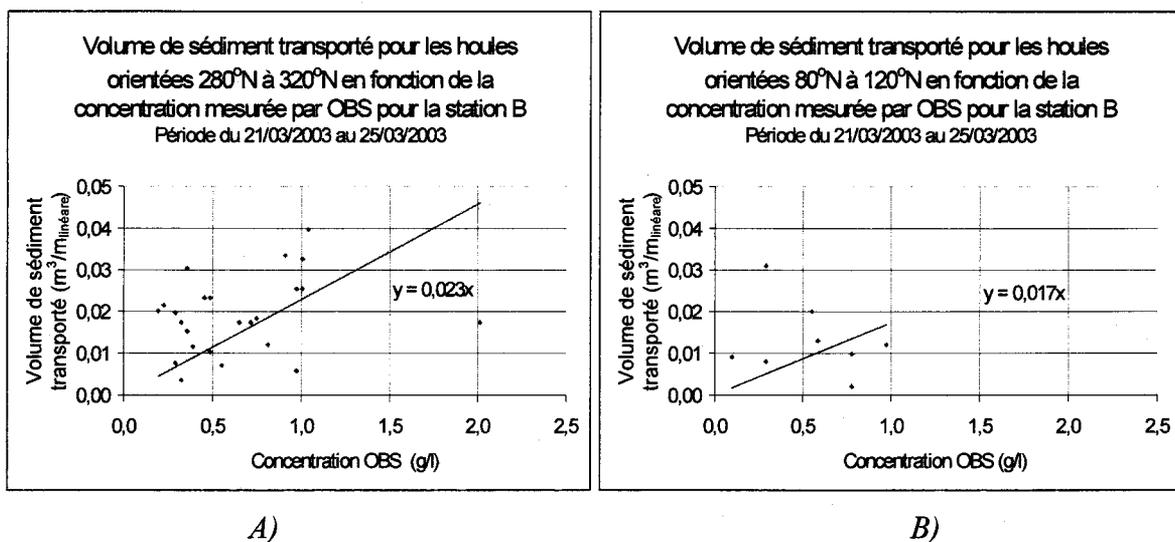


Fig. 3.6 - Corrélation du débit sédimentaire des blocs en fonction du voltage enregistré par l'OBS : A) pour les houles de direction 80° N – 120° N ; B) pour les houles de direction 280° N – 320° N.

CHAPITRE 4 : DISCUSSION

De façon générale, la précision des résultats aurait pu être augmentée en synchronisant mieux les instruments. Cette imprécision se manifeste dans les calculs du flux d'énergie, du facteur de frottement et des paramètres de profondeur de la houle. Néanmoins, ce travail permet de mettre en évidence une relation significative entre le frottement au niveau du fond, la période et les variations bathymétriques. Ceci montre donc que l'imprécision induite reste faible.

4.1. Problèmes liés à l'instrumentation

Avant d'entreprendre les calculs, il aurait été important de filtrer les résultats en fonction des variations morphologiques et bathymétriques du site. Par exemple, à la station A, de très fortes variations morphologiques se sont produites. Ainsi, le mouvement de la barre d'avant-côte a provoqué des variations continues de la distance (de 10 à 50 *cm*) entre les senseurs et la couche mobile du fond. De plus, dû à la faible profondeur de cette station, les senseurs se sont rapprochés de l'interface air-eau durant les marées basses et ont donc été affectés par des turbulences de surface à marée basse. Ceci a eu pour conséquence de générer un bruit variable causé par la présence de bulles d'air sur les senseurs. L'intensité de ce bruit a pu devenir, dans certains cas, supérieure au signal lui-même et ainsi contaminer, voire discréditer, certains blocs de données. De plus, ces variations morphologiques ont influencé les résultats, car l'effet de profondeur de la houle est fonction du rapport h_s/h , où h_s est la hauteur du senseur par rapport au fond et h est la profondeur d'eau. Un ajustement bloc par bloc aurait pu corriger cette variation, qui demeure plutôt faible.

Au départ, positionnée à 800 *m* du rivage (station D₁), une distance jugée par la suite trop proche des mattes de posidonies, la station D a été réinstallée à 560 *m* de la ligne de rivage (station D₂) afin d'atténuer et, si possible, éliminer les effets de l'herbier. Ce changement de position a entraîné un réétalonnage de l'enregistrement des données de cette station. En effet, les mattes de posidonies réduisent considérablement l'intensité des conditions hydrodynamiques et le transport

sédimentaire. Les calculs réalisés pour les stations D_1 et D_2 reflètent tant les variations de l'hydrodynamisme dans ces secteurs (D_1 et D_2) que le degré de croissance de l'herbier. Malheureusement, le suivi de la croissance et de la mortalité des mattes n'a pu être effectué durant cette campagne de mesure. Néanmoins, les calculs ont été effectués à partir des enregistrements des appareils placés entre l'herbier de posidonies et le littoral. Ces enregistrements tiennent donc compte de l'amortissement des houles au-dessus de l'herbier. Ils représentent l'énergie des houles amorties qui affectent réellement la zone d'étude. Au cours de la période de mesure, ils intègrent l'effet de la croissance de l'herbier. Les valeurs obtenues durant la période à laquelle la station D était placée près de l'herbier (D_1) illustrent bien cet effet d'atténuation due à l'herbier. Aussi, cette distance de 800 m peut être considérée comme la limite marine du transport littoral.

Enfin, tel que mentionné précédemment, les quatre appareils n'ont pas été parfaitement synchronisés lors de la campagne de mesure. Aussi, il est possible de comparer les résultats successifs obtenus à une station pendant une période de deux heures, mais il est plus difficile comparer rigoureusement les mêmes blocs d'une station à l'autre et ainsi d'analyser le passage d'une houle singulière sur la ligne de mesure. Ceci a conduit à déterminer les variations d'énergie de bloc à bloc et non sur une houle progressive. Ce dernier résultat aurait été intrinsèquement plus précis, mais il apparaît que le facteur calculé est presque constant et d'une précision supérieure à celle utilisée dans les équations.

4.2. Flux d'énergie, frottement et profondeur

Les périodes de pointe T_p inférieures à 8,0 s et supérieures à 10,0 s n'ont pas été prises en compte. Dans le cas des hautes fréquences ($T_p < 7,0 s$), les résultats obtenus se confondent avec le bruit induit par la superposition d'autres trains de houles de plus petite amplitude. Dans le cas des basses fréquences ($10,5 s < T_p < 13,0 s$), le nombre de blocs sélectionnés est trop faible pour former un échantillon représentatif.

La sélection et le classement des blocs en fonction des périodes de pointe T_p contiennent une certaine subjectivité dans la définition de l'intervalle retenu et appliqué pour chacune des périodes. Par exemple, afin d'obtenir les résultats en fonction de la période de pointe $T_p = 9,0 s$, les blocs retenus avaient des périodes de pointe T_p comprises entre 8,85 et 9,15 s. Cette sélection manuelle a pu laisser de côté certains blocs qui ne figurent donc pas dans les résultats. Il serait donc souhaitable que cette sélection se fasse par ordinateur.

De plus, la fluctuation du résultat est importante. Elle comprend, par exemple pour la période $T_p = 9,0 s$ enregistrée à la station B, une variation du flux d'énergie P entre 0,57 et 3,93 W/m et une variation du coefficient de profondeur K_s entre 1,52 et 1,91.

4.2.1. Flux d'énergie

La diminution générale du flux d'énergie P du large vers la côte, pour une période de pointe T_p donnée, est documentée pour les périodes de pointe T_p entre 8,0 et 10,0 s et illustre la relation mathématique qui existe entre le flux d'énergie P et la distance à la plage d , qui est linéairement liée, dans le profil, à la profondeur d'eau h .

De plus, une diminution générale du flux d'énergie P est également notée en fonction de l'augmentation de la période de pointe T_p . Par contre, dans le cas des houles de période $T_p = 10,0 s$, les résultats divergent légèrement. Le nombre de blocs sélectionnés est plus restreint et pourrait expliquer les résultats obtenus. De plus, parmi les blocs sélectionnés, un doute demeure à savoir si la période $T_p = 10,0 s$ correspond bien à $T_p = 10,0 s$ ou à un multiple d'une fréquence fondamentale. Ces hypothèses pourraient également expliquer les résultats divergents obtenus dans le cadre des équations du facteur de frottement.

4.2.2. Frottement

Le choix du type de courbe représentant le facteur de frottement est établi en fonction du comportement énergétique de la houle lors de son transit vers la plage. Ainsi, la perte d'énergie ne semble pas répondre de façon linéaire, mais plutôt de façon logarithmique. De plus, ce choix tient compte de la définition même du flux d'énergie P (équation 2.18) servant à définir les équations du facteur de frottement, qui montre que le flux d'énergie P est directement proportionnel à la racine carrée de la profondeur d'eau h . Cette valeur dépend tant de la distance sur laquelle la houle se déplace que de la pente du littoral.

Néanmoins, les résultats montrent que le facteur de frottement diminue en fonction de la période de la houle, il passe de 0,91 pour une houle de 8,0 s à 0,41 pour une houle de 9,5 s, soit une augmentation du frottement de plus de 50 %. Ainsi, une valeur moyenne (0,57) est inférieure à celle utilisée couramment (0,78) par les différents auteurs (*Madsen and Grant, 1976*), mais elle est très différente (1,18) de celle proposée par *Komar (1976)*. Ceci s'explique par le fait qu'il ne s'agit pas tout à fait du même coefficient de frottement, d'où la raison de la dénomination « facteur de frottement ». Dans notre étude, nous intégrons l'effet des variations de profondeur d'eau dû à la marée comme le préconise *Madsen and Grant (1976)* et de la réfraction de la houle, alors que *Komar (1976)* considère un niveau marin constant. Ceci montre que l'influence de la marée et de la réfraction est significative pour la détermination du bilan sédimentaire sur le site d'étude.

Ainsi, il serait peut-être plus à propos de renommer le facteur de frottement « coefficient de modification » et de le symboliser par la variable K_{srf} , compte tenu qu'il prend en considération l'effet de profondeur K_s , la réfraction K_r et le frottement K_f . Ce dernier s'exprimerait à partir de l'équation 2.14 et prendrait la forme qui suit :

$$K_{srf} = K_s K_r K_f = \frac{H_2}{H_1} \quad (4.1)$$

Enfin, il est à noter que ce « coefficient de modification » origine du modèle de *Airy (1845)*, donc s'applique aux houles monochromatiques et ne tient pas en compte l'effet de non linéarité des houles et l'effet de la réfraction. Bien que la prise en compte de ces effets n'étaient pas requise dans ce mémoire, il entraîne une certaine marge d'incertitude dans les résultats. Ainsi, dans un ouvrage complémentaire à ce mémoire, il serait bon de tenir compte du coefficient de réfraction, lequel peut avoir une incidence sur l'évaluation du coefficient de frottement K_f . Ce coefficient de réfraction pourrait être évalué à partir des directions de propagation des houles enregistrées par les S4 ou à partir de l'utilisation d'un modèle numérique de réfraction des houles.

4.2.3. Effet de profondeur des houles

Sur l'ensemble des données, le calcul des paramètres de profondeur selon *Airy (1845)* montre qu'il existe une similarité générale entre les équations des coefficients de profondeur K_s pour les périodes retenues T_p (tab. 2.3). Le premier facteur varie très peu et tend vers 0,0008 tandis que le coefficient de profondeur K_s varie entre 1,73 et 1,91. Ainsi, l'équation moyenne du coefficient de profondeur K_s est représentative de la constance de l'effet de la houle due à la profondeur dans le profil peu importe la période retenue.

Donc, en fonction des données disponibles pour la détermination de ce paramètre, il est montré que le coefficient de profondeur K_s du profil (1,79) est constant peu importe la période de houle retenue. Un nombre plus grand de blocs aurait sans doute permis de mieux représenter ce coefficient.

Il est à noter que l'étude et l'analyse du coefficient de profondeur K_s ne sont pas essentielles dans ce mémoire car il a été impossible d'établir, à ce jour, un lien quantitatif direct entre K_s et le facteur de frottement. Dans un ouvrage complémentaire à ce mémoire, l'étude et l'analyse du coefficient de réfraction pourrait révéler des éléments de réponse.

4.3. Transport sédimentaire

Le choix du modèle courantométrique s'est arrêté sur *Madsen and Grant (1976)* et repose principalement sur la prise en compte de l'effet des courants et des houles. Ainsi, le milieu étudié est côtier et son littoral est soumis à une érosion forte, ce qui indique que, pour un stock de sable moyen, le transport se produit principalement par charriage. Les conditions hydrodynamiques sur la zone d'étude sont caractérisées par la présence d'une houle moyenne à forte, de vents variables provenant du *NNE-NE* et de courants de marée faibles. Enfin, la durée de la campagne de mesure a généré un nombre important de données. Pour les traiter, une approche vectorielle cartésienne était nécessaire afin de mieux connaître les principaux mouvements de sédiments.

La présence d'une variabilité dans les résultats de débits sédimentaires journaliers d'une station à l'autre est prévisible car, suivant les périodes de tempête ou post-tempête, les sédiments se déplacent dans le profil et, suivant les directions des houles, le transport littoral varie de *NO* à *SE*.

4.3.1. Débit sédimentaire

En période calme, le transport sédimentaire est principalement le résultat du mouvement des sédiments sous l'effet des courants de marée. Il se produit dans le profil en direction de la côte et Q_{J_P} varie de 0,01 à $0,30 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}/j$. Quant au transport littoral Q_{J_L} , il varie de 0,070 à $5,00 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}/j$.

En période de tempête, le transport dans le profil Q_{J_P} se produit en direction du large et varie de 0,04 à $0,25 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}/j$ sur l'ensemble de la zone. Ce transport Q_{J_P} s'atténue en direction du large et est de 0,04 à $0,05 \text{ m}^3/\text{m}_{\text{linéaire}}/j$ pour la station C et devient négligeable à la station D. Ceci confirme que la limite de l'herbier de posidonies représente la limite du transport dans le profil (« *offshore* ») sous l'effet des houles. Par contre, un transport résiduel Q_{J_P} existe en période calme, il souligne le transport sédimentaire Q_{J_P} sous l'effet des courants de marée. Ce

transport existe durant les périodes de tempête et nous pouvons considérer qu'il représente le transport total QJ_P à la station D. Ainsi, le transport dans le profil ne devrait pas se produire au-delà de la station C.

Durant les tempêtes, le transport littoral QJ_L varie de 0,20 à 5,00 $m^3/m_{linéaire}/j$ en direction du Nord-Ouest et correspond à un volume de sédiments transporté résultant VC_L de 33 330 m^3 sur huit mois ou V_L de 49 015 m^3/an . Cette valeur est en accord avec celle obtenue en mesurant par photographies aériennes, l'accroissement de la flèche de Ras Relmel sur une période de 50 ans.

4.3.2. Choix du coefficient de frottement

Pour réaliser ce travail, nous avons utilisé un coefficient de frottement de 1,18 tel que préconisé par *Komar (1976)*. *Madsen and Grant (1976)* préconisaient 0,78 pour le même type de sédiment. Il apparaît donc que ce coefficient est spécifique au site, ce qui est normal, car il dépend du type de matériaux et, dans le cas présent, il est constitué d'oolithes et de débris de coquilles. Or, ces derniers n'ont pas la même équivalence hydraulique que des quartz pour la même taille granulométrique, ce qui explique les variations de la valeur du coefficient de frottement.

4.3.3. Facteur de frottement (« Coefficient de modification »)

En plus de tenir compte du frottement proprement dit, le « coefficient de modification » calculé dans ce mémoire prend en compte l'effet de profondeur et de réfraction de la houle. Il est donc intéressant de l'appliquer aux volumes de sédiments transportés. Le volume de sédiments transportés est divisé par 1,18 (coefficient de *Komar (1976)* utilisé dans les calculs) et multiplié par le nouveau « coefficient de modification ». Ainsi,

- pour la campagne de mesure échelonnées sur huit (8) mois, le transport total global VC_L passe de 33 330 m^3 à 16 100 m^3 ; et
- pour une année, le transport total global V_L passe de 49 015 m^3 à 23 677 m^3 .

Ces nouvelles valeurs se rapprochent beaucoup plus des estimations réalisées par *APAL (2000)* et répondent mieux aux réalités et conditions hydrodynamiques du milieu à l'étude.

4.3.4. Granulométrie et sédimentologie

Quatre échantillons (annexe M) ont été analysés pour leur contenu en carbonate et pour leur granulométrie (APAL, 2002). Ils provenaient des profils P15 (bas de plage), P17 (haut et bas de plage) et P19 (bas de plage). Ils contenaient respectivement 42,69 %, 42,43 %, 41,87 % et 42,54 % de carbonate et ce, même si le pourcentage en coquilles n'était pas important. Les oolithes représentent plus de 75 % du contenu carbonaté et sont en perpétuelle construction. Ces grains grossissent par déposition de carbonate, qui précipite sous forme de stries de croissances, et sont érodés par l'action abrasive des houles et par l'action anthropique. Ceci explique que la granulométrie ne change pas le long de la plage nord-est de Jerba.

Au niveau granulométrique, les histogrammes des quatre échantillons analysés montrent des modes entre 0,260 et 0,270 *mm* et des moyennes entre 0,280 et 0,285 *mm*, ce qui classe ces sédiments dans les sables moyens, très proche des sables fins. Ces sables sont toujours unimodaux, ils possèdent une très faible dispersion granulométrique avec une faible dispersion vers les sédiments grossiers, ce qui est un critère de sable presque en équilibre en cours de transport. Les fines représentent moins de 5 % du total.

Pour fin de calcul, nous avons choisi une taille arbitraire de 0,250 *mm*. Ce choix est justifié pour le site. En effet, les résultats des analyses granulométriques (annexe M) indiquent que la taille des grains (oolithes) est relativement constante sur l'ensemble du secteur d'étude. Ceci vient du fait que les oolithes subissent une abrasion mécanique durant les tempêtes et une autre abrasion (anthropique) sur la plage découverte, mais simultanément, elles se construisent durant les périodes chaudes et calmes sous l'effet de la précipitation des ions carbonates dissous dans l'eau. Le résultat de ces deux actions contradictoires entraîne une stabilité de la taille des sédiments. Cette stabilité est spécifique au site d'étude et doit être prise en compte pour l'établissement des

bilans sédimentaires et des calculs de quantités de sédiments à recharger sur la plage pour réhabiliter un site en milieu chaud.

4.3.5. Bilan sédimentaire

Pour établir le bilan sédimentaire annuel du site à l'étude, les débits sédimentaires journaliers ont été sommés sur la période de mesure et extrapolés sur une période de 365 jours. Or, aucune mesure n'a été effectuée entre juin et septembre. Durant cette période, les vents proviennent du secteur est, ce qui favorise le transport en direction de l'ouest. L'erreur faite sur le bilan annuel doit être de quelques dizaines de pourcent et non pas d'un ordre de grandeur. De plus, ces résultats sont comparables aux autres études et mettent en évidence la fiabilité de la mesure. Quatre stations sont indispensables pour pouvoir intégrer les fluctuations locales le long du profil et déterminer les zones de sédimentation et d'érosion qu'il faut prendre en compte dans un protocole de réhabilitation. Cette approche est donc recommandée pour les travaux futurs.

4.3.6. Rapports comparatifs

Les rapports comparatifs mettent en évidence les surestimations et les sous-estimations générées lors des calculs initiaux. Le cas du mois de novembre montre bien l'impact des deux tempêtes, soit celles :

- du 19/11/1999 d'une durée de 10 h qui présentait des coups de vent créant une houle de 98 cm de hauteur et de 5,8 s de période ;
- du 27/11/1999 au 03/12/1999 d'une durée de 160 h, formée d'un triple épisode, qui débuta au 80° pour tourner au 60° et revenir au 80°. Durant la période la plus longue, les houles ont atteint une hauteur de 127 cm pour une période de 9 s, puis ont baissé à 80 cm pour une période de 10,4 s et enfin sont remontées à 103 cm pour une période de 5,5 s.

Ainsi, les valeurs de débits mensuels le long du littoral QM_L et du profil QM_P à la station D₁ concordent d'autant avec ces deux événements, particulièrement selon la dérive littorale, où la

perte sédimentaire est plus marquée passant de $-0,82 \text{ m}^3/m_{\text{linéaire}}$ (calcul initial) à $-3,80 \text{ m}^3/m_{\text{linéaire}}$ (rapport comparatif). Quant aux débits sédimentaires le long du profil, ils sont similaires. Les deux tempêtes influencent peu le profil.

Il serait donc préférable de substituer aux valeurs absentes des enregistrements celles obtenues pour des épisodes comparables et d'établir les débits mensuels à partir de ces derniers. Par contre, les calculs initiaux présentent un bon ordre de grandeur et permettent une bonne première approximation.

CHAPITRE 5 : CONCLUSION

Le secteur nord-est de l'île de Jerba est affecté par un processus complexe d'érosion majeure. Ayant un impact considérable sur les installations balnéaires et touristiques de ce secteur, une solution à long terme doit être envisagée. Pour ce faire, une étude préalable des conditions de transport sédimentaire et des propriétés du fond marin des plages devait être effectuée et constitue donc le sujet principal de ce mémoire. Les objectifs principaux de ce dernier se résument à :

- quantifier le facteur de frottement au niveau du fond marin ainsi que les paramètres de profondeur de la houle à partir des données existantes enregistrées à quatre stations de mesure de houle; et
- quantifier le transport et le bilan sédimentaire à partir du modèle courantométrique de *Madsen et Grant (1976)*.

Dans un premier temps, un facteur de frottement en périodes de tempête, un coefficient de profondeur ainsi que le transport sédimentaire global le long du profil ont été déterminés pour la campagne de mesure s'échelonnant de octobre 1999 à juin 2000. Ainsi, le profil de la ligne de mesure offre un facteur de frottement en périodes de tempêtes de 0,57. Cela entraîne donc une correction des débits sédimentaires calculés. En ce qui a trait à l'effet de profondeur des houles, un coefficient de profondeur constant de 1,79 semble bien répondre à la morphologie du site.

Les débits sédimentaires calculés à partir du modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)* montrent une très grande variabilité au niveau journalier. Ceci est essentiellement dû aux conditions hydrodynamiques (temps calmes, temps agités) présentes au moment des mesures. Cette variabilité s'estompe graduellement au fur et à mesure de l'augmentation du focus « temps » (période de lissage), c'est-à-dire du passage des conditions journalières aux conditions mensuelles. Il est aussi plus facile de distinguer les mois ayant subi plusieurs tempêtes (novembre et décembre 1999) des mois plus calmes (mars 2000).

Globalement, le transport sédimentaire transite essentiellement vers le nord-ouest. Il est principalement érosif dans les zones près de la ligne de rivage (zone B-A et C-B). De plus, le transport littoral pour la campagne de mesure atteint $33\,330\ m^3$. Des fluctuations de transport littoral existent, mais le transport résultant porte au $N - O$. Dans le profil, le transport ne dépasse que rarement la station C. Ceci indique que l'herbier de posidonies représente la limite sous-marine du transport vers le large. Le facteur de frottement déterminé dans cette étude (0,57) impose une correction de l'ensemble des débits sédimentaires calculés (journaliers, mensuels, pour la campagne et annuels). Ainsi, pour la campagne de mesure, selon les calculs effectués et la méthode utilisée, il serait plus réaliste d'envisager un transport global d'environ $16\,100\ m^3$. Annuellement, il serait plus prudent d'envisager un transport de l'ordre de $23\,677\ m^3$.

En conclusion, il est possible, à l'aide d'enregistrements de courantomètres disposés le long d'un profil, de déterminer le comportement général du frottement au niveau du fond et de l'effet de profondeur des houles. Malgré quelques ajustements mineurs à envisager dans une prochaine mission, les résultats obtenus permettent une bonne modélisation du transport sédimentaire et des conditions au niveau du fond marin dans le secteur de Jerba en Tunisie.

BIBLIOGRAPHIE CITÉE

- 1) AIRY, G. B., 1845. *Tides and waves*. Encyc.Metrop., 192, pp. 241-396.
- 2) APAL, 2002. *Étude générale pour la protection du littoral tunisien contre l'érosion marine du littoral Nord-est de Jerba*, Rapport APS, 200 p.
- 3) ASSOCIATION INTERNATIONALE PERMANENTE DES CONGRÈS DE NAVIGATION, 1973. *Rapport final de la commission internationale pour l'étude des effets des lames*, Belgique, Vol.II, bulletin n° 15.
- 4) BAGNOLD, R. A., 1966. *An approach to the sediment transport problem for general physics*, Geol. Surv., Washington, D. C., Prof. Pap. 422-I, U.S., pp. 235-297.
- 5) CONNER, C.S. AND DE VISSER, A.M., 1992. *A Laboratory Investigation of Particle Size Effects on an Optical Backscatterance Sensor*. Marine Geology, 108, pp.151-159.
- 6) D&A INSTRUMENTS, Site Web consulté pour la dernière fois le 20 juin 2005 : <http://www.d-a-instruments.com/products.html>.
- 7) EINSTEIN, H. A., 1950. *The bed-load function for sediment transport in open channel flow*. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., Technical Bulletin 1026,
- 8) ENGELUND, F., AND E. HANSEN, A., 1967. *Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*, Danish Tech. Press, Copenhagen.
- 9) GODA, Yoshimi, 1995. *Random Seas and Design of Maritime Structures*. University Of Tokyo Press, Tokyo, Japan.

- 10) GRANT, W. D. AND MADSEN, O. S., 1976. *Quantitative Description of Sediment Transport by Waves*. Proceedings of 15th International Conference of Coastal Engineering, pp. 1093-1112.
- 11) HACHETTE TOURISME, Site Web consulté pour la dernière fois le 20 juin 2005 : http://www.bibliomonde.net/pages/fiche-editeurs.php3?id_editeur=69.
- 12) HYDROTECNICA PORTUGUESA, 1998. *Étude Générale pour la Protection du Littoral Tunisien – 1^{ère} Partie*, Rapport 3, Volume 1.
- 13) INTEROCEAN SYSTEMS INC., 1994. *S4 User's Manual, S4 Current Meter*. Manual Part Number 408182071500, 193 pages.
- 14) INTEROCEAN SYSTEMS INC., 1994. *Wave for Windows Software, Version 2.1, User's Guide*. Manual Part Number 408182022300.
- 15) KOMAR, P. D., 1976. *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 429 p.
- 16) MADSEN, O. S. AND GRANT, W. D., 1976. *Sediment Transport in the Coastal Environment*. Report No. 209, R. M. Parsons Lab., Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, Massachusetts, USA.
- 17) MEYER-PETER, E., and Müller, R., 1948. *Formulas for bedload transport*, Int. Assoc. of Hydraul. Res., Stockholm, Sweden, Proc. 2nd Congress, pp. 39-64.
- 18) VAN RIJN, L. C., 1990. *Handbook of sediment transport by current and waves*, Rep. H 461, Delft Hydraul., Delft, The Netherlands.
- 19) VAN RIJN, L. C., 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal seas*. Delft Hydraul., Delft, The Netherlands, 706 p.

- 20) YALIN, M. S., 1963. *An expression for bed-load transportation*. Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, v.89, pp.221-250.

BIBLIOGRAPHIE COMPLÈTE

- 1) AIRY, G. B., 1845. *Tides and waves*. Encyc.Metrop., 192, pp. 241-396.
- 2) APAL, 2002. *Étude générale pour la protection du littoral tunisien contre l'érosion marine du littoral Nord-est de Jerba*, Rapport APS, 200 p.
- 3) ASSOCIATION INTERNATIONALE PERMANENTE DES CONGRÈS DE NAVIGATION, 1973. *Rapport final de la commission internationale pour l'étude des effets des lames*, Belgique, Vol.II, bulletin n° 15.
- 4) BAGNOLD, R. A., 1966. *An approach to the sediment transport problem for general physics*, Geol. Surv., Washington, D. C., Prof. Pap. 422-I, U.S., pp. 235-297.
- 5) BONNEFILLE, R., 1976. *Cours d'hydraulique maritime*. Masson, Paris, 171 p.
- 6) COLLINS, J. I., 1972. *Prediction of shallow water spectra*. Jour. Geophys. Res., V 77, pp. 2693-2707.
- 7) CONNER, C.S. AND DE VISSER, A.M., 1992. *A Laboratory Investigation of Particle Size Effects on an Optical Backscatterance Sensor*. Marine Geology, 108, pp.151-159.
- 8) D&A INSTRUMENTS, Site Web consulté pour la dernière fois le 20 juin 2005 : <http://www.d-a-instruments.com/products.html>.
- 9) DEAN, R. G., 2002. *Beach nourishment : theory and practice*. Advanced series on ocean engineering, V.18, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, River Edge, New Jersey, 420 p.

- 10) EINSTEIN, H. A., 1950. *The bed-load function for sediment transport in open channel flow*. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., Technical Bulletin 1026,
- 11) ENGELUND, F., AND E. HANSEN, A., 1967. *Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*, Danish Tech. Press, Copenhagen.
- 12) FREDSOE, J. AND DEIGAARD, R., 1992. *Mechanics of coastal sediment transport*. Advanced series on ocean engineering, V.3, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, River Edge, New Jersey, 390 p.
- 13) GODA, Yoshimi, 1995. *Random Seas and Design of Maritime Structures*. University Of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- 14) GRANT, W. D. AND MADSEN, O. S., 1976. *Quantitative Description of Sediment Transport by Waves*. Proceedings of 15th International Conference of Coastal Engineering, pp. 1093-1112.
- 15) GRANT, W. D. AND O. S. MADSEN, 1979. *Combined wave and current interaction with a rough bottom*, Journal of Geophysical Research, 84, pp. 1797-1808.
- 16) HACHETTE TOURISME, Site Web consulté pour la dernière fois le 20 juin 2005 : http://www.bibliomonde.net/pages/fiche-editeurs.php3?id_editeur=69.
- 17) HALLERMEIER, R. J., 1981. *A profile onation for seasonal sand beaches from wave climate*, Coast. Eng., V.4, pp. 253-277.
- 18) HALLERMEIER, R. J., 1981. *Critical Wave Conditions for Sand Motion Initiation*. CETA, No 81-10, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 16 p.
- 19) HALLERMEIER, R. J., 1982. *Oscillatory bedload transport : data review and simple formulation*. Cont. Shelf Res. 1 (2) : pp. 159-190.

- 20) HARDISTY, J., 1990. *Beaches form & process*. Unwin Hyman Ltd, London, 324 p.
- 21) HYDROTECNICA PORTUGUESA, 1998. *Étude Générale pour la Protection du Littoral Tunisien – 1^{ère} Partie*, Rapport 3, Volume 1.
- 22) HUDIER, E., 1986. *Mise au point de la jauge nucléaire: applicabilité à l'étude du transport sédimentaire dans la zone de déferlement*. Mémoire de maîtrise, UQAR, 133p.
- 23) INTEROCEAN SYSTEMS INC., 1994. *S4 User's Manual, S4 Current Meter*. Manual Part Number 408182071500, 193 pages.
- 24) INTEROCEAN SYSTEMS INC., 1990. *Surface Wave Characteristics from Pressure and Particle Kinematics Measurements*. 19 pages.
- 25) INTEROCEAN SYSTEMS INC., 1994. *Wave for Windows Software, Version 2.1, User's Guide*. Manual Part Number 408182022300.
- 26) JONSSON, E. J., 1966. *Wave Boundary Layers and Friction Factors*. Proceeding, Tokyo, Japan, September 1966. Volume I : pp. 127-148.
- 27) KAMPHUIS, J. W., 2000. *Introduction to coastal engineering and management*. Advanced series on ocean engineering, V.16, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, River Edge, New Jersey, 470 p.
- 28) KOMAR, P. D., 1971. *The mechanics of sand transport on beaches*. J. Geophys. Res, V.30, pp. 5914-5927.
- 29) KOMAR, P. D., 1973. *Computer models of delta growth due to sediment input from trivers and longshore transport*. Geol. Soc. Am. Bull., V.84, pp. 2217-2226.

- 30) KOMAR, P. .D., 1975. *Nearshore currents: generation by obliquely incident waves and longshore variations in breaker heights*. Nearshore Sdiment Dynamics and Sdimentation, Wiley, London, pp. 17-45.
- 31) KOMAR, P. D., 1976. *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 429 p.
- 32) KOMAR, P.D. and INMAN, D. L., 1970. *Longshore sand transport on beaches*. J.Geophys. Res., V.76, pp. 713-721.
- 33) KOMAR, P.D. and MILLER, M. C., 1974. *Sediment Treshold under Oscillatory Waves*. Proc. of the 14th Conf. Coastal Eng., Copenhagen, pp. 756-775.
- 34) MADSEN, O. S., 1976. *Wave climate of the continental margin: Elements of its mathematical description*. Marine Sediment Transport and Environmental Management, D. Stanley and D. Swift, Editors, John Wiley & Sons, New York, 602 p.
- 35) MADSEN, O. S. AND GRANT, W. D., 1976. *Sediment Transport in the Coastal Environment*. Report No. 209, R. M. Parsons Lab., Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, Massachusetts, USA.
- 36) MAX J. AND AL., 1987. *Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques*, Tome II. Masson, Paris, pp.3 4-43 et 106-129.
- 37) MC CORMICK, M. E., 1981. *Ocean Wave Energy Conversion*. John Wiley & Sons, pp. 1-44.
- 38) MEYER-PETER, E., and Müller, R., 1948. *Formulas for bedload transport*, Int. Assoc. of Hydraul. Res., Stockholm, Sweden, Proc. 2nd Congress, pp. 39-64.
- 39) MIDDLETON, G. V. AND SOUTHARD, J. B., 1978. *Mechanics of sediment movement, S.E.P.M. Short course number 3*. Eastern section S.E.P.M., Binghamton, New York, 264 p.

- 40) NIELSEN, P., 1992. *Coastal bottom boundary layers and sediment transport*. Advanced series on ocean engineering, V.4, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, River Edge, New Jersey, 350 p.
- 41) ROBERGE, C. ET LONG, B. F., 2003. *Estimation des paramètres d'atténuation et du coefficient de frottement générés par la houle sur le littoral Nord-est de Jerba, Tunisie*. Conférence canadienne sur le littoral 2003, 16 p
- 42) ROBERGE, C. ET LONG, B. F., 2003. *Étude du transport sédimentaire sur le littoral Nord-est de Jerba, Tunisie*. Conférence canadienne sur le littoral 2003, 17 p
- 43) SEKA, J., 2000. *Approche expérimentale in situ des mesures su transport par charriage par utilisation de traceur radioactif et de la jauge nucléaire*. Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski, 419 p.
- 44) SHORT, ANDREW D., 1999. *Hanbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 379 p.
- 45) SILVESTER, R. AND HSU, J. R. C., 1997. *Coastal stabilization*. Advanced series on ocean engineering, V.14, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, River Edge, New Jersey, 594 p.
- 46) SLEATH, J.F., 1984. *Sea Bed Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 335 p.
- 47) TESSIER, B., 1987. *Système de barres sableuses sur la moyenne Côte-Nord du Saint-Laurent: formation, modification et modélisation*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 333 p.
- 48) U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, 1984. *Shore Protection Manual*. 4th Edition, Department of the Army Corps of Engineers.

- 49) VAN RIJN, L. C., 1984a. *Sediment transport, part I*, Bedload transport, J. Hydraul. Eng., 110, pp. 1431–1456.
- 50) VAN RIJN, L. C., 1984b. *Sediment transport, part II*, Suspended load transport, J. Hydraul. Eng., 110, pp. 1613–1641.
- 51) VAN RIJN, L. C., 1984c. *Sediment transport, part III*, Bed forms and alluvial roughness, J. Hydraul. Eng., 110, pp. 1733–1754.
- 52) VAN RIJN, L. C., 1990. *Handbook of sediment transport by current and waves*, Rep. H 461, Delft Hydraul., Delft, The Netherlands.
- 53) VAN RIJN, L. C., 1994. *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas, and oceans*. Delft Hydraul., Delft, The Netherlands, 426 p.
- 54) VAN RIJN, L. C., 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal seas*. Delft Hydraul., Delft, The Netherlands, 706 p.
- 55) VAN RIJN, L. C., 1998. *Principles of coastal morphology*. Delft Hydraul., Delft, The Netherlands, 750 p.
- 56) YALIN, M. S., 1963. *An expression for bed-load transportation*. Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, v.89, pp.221-250.

Annexe A : Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrées par chacune des quatre stations pour la campagne de mesure.

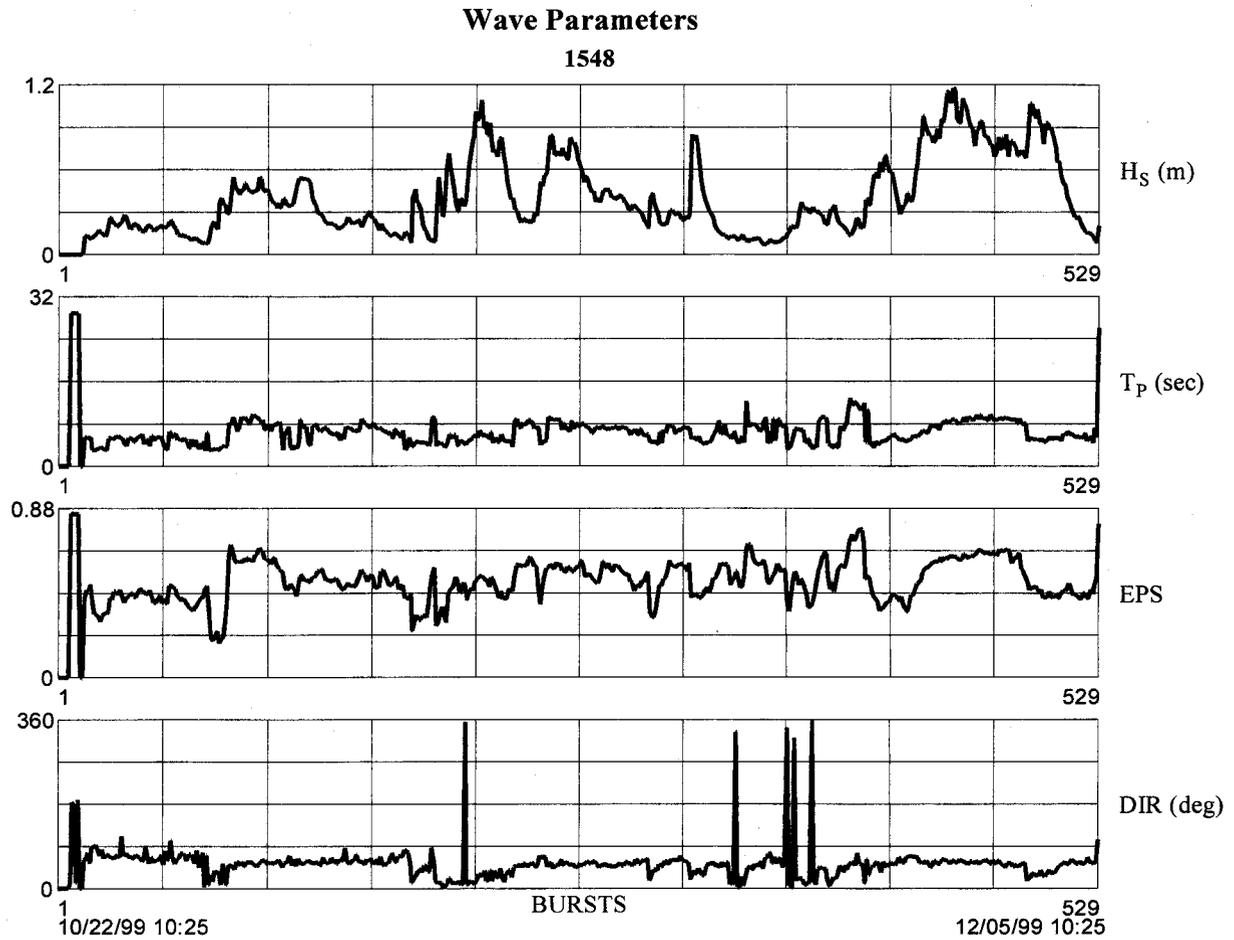


Fig. A.1 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station A pour la période du 22 octobre 1999 10h25 au 05 décembre 1999 10h25.

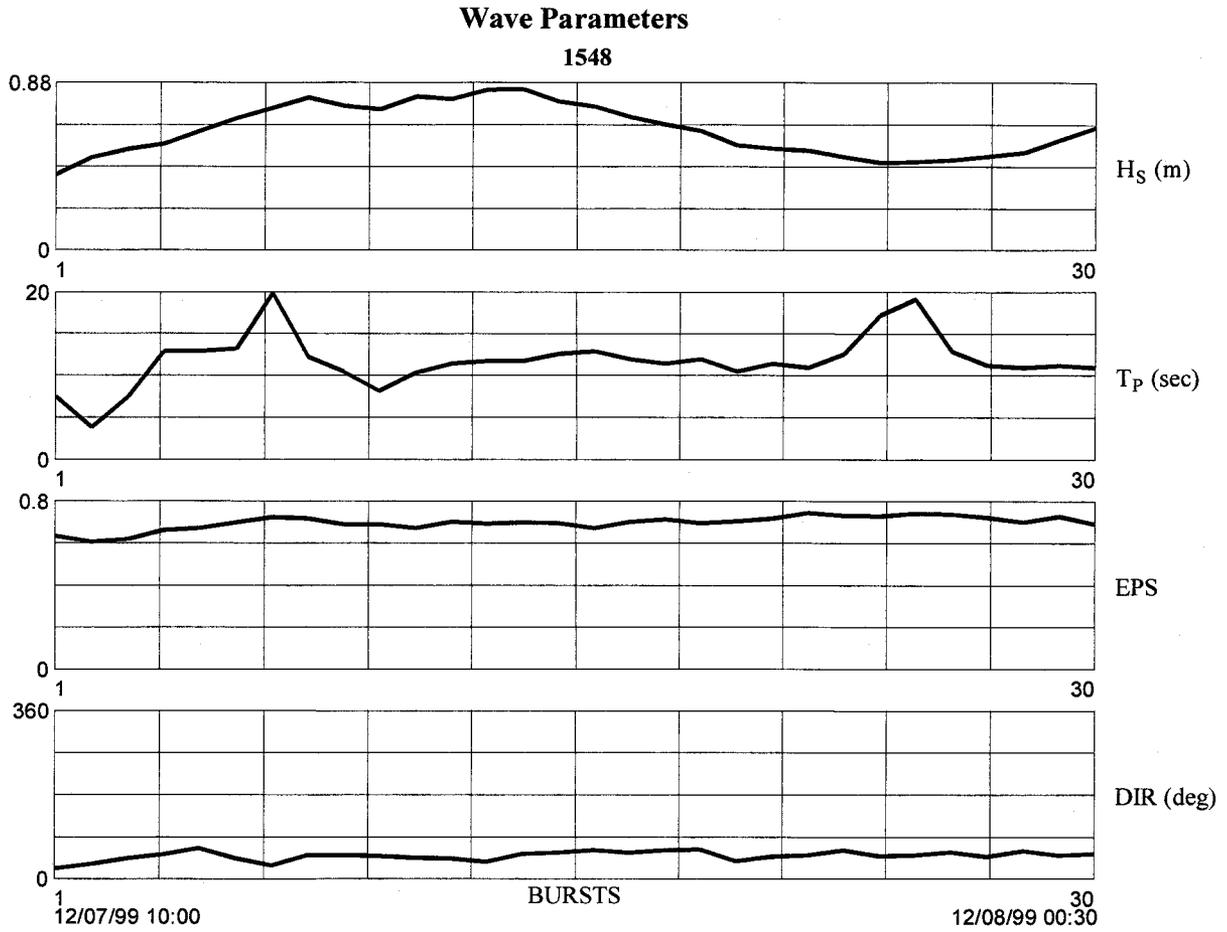


Fig. A.2 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station A pour la période du 07 décembre 1999 10h00 au 08 décembre 1999 00h30.

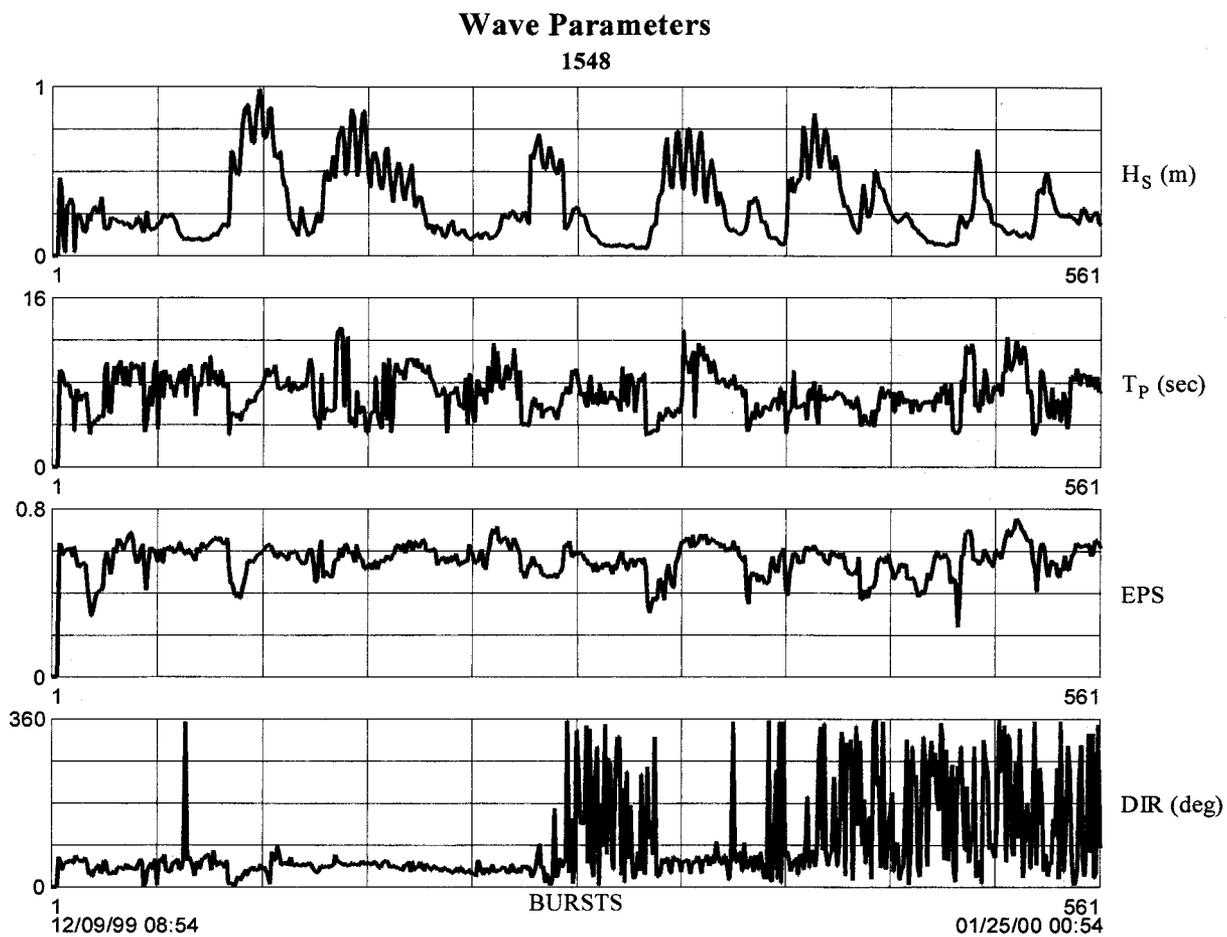


Fig. A.3 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station A pour la période du 9 décembre 1999 08h54 au 25 janvier 2000 00h54.

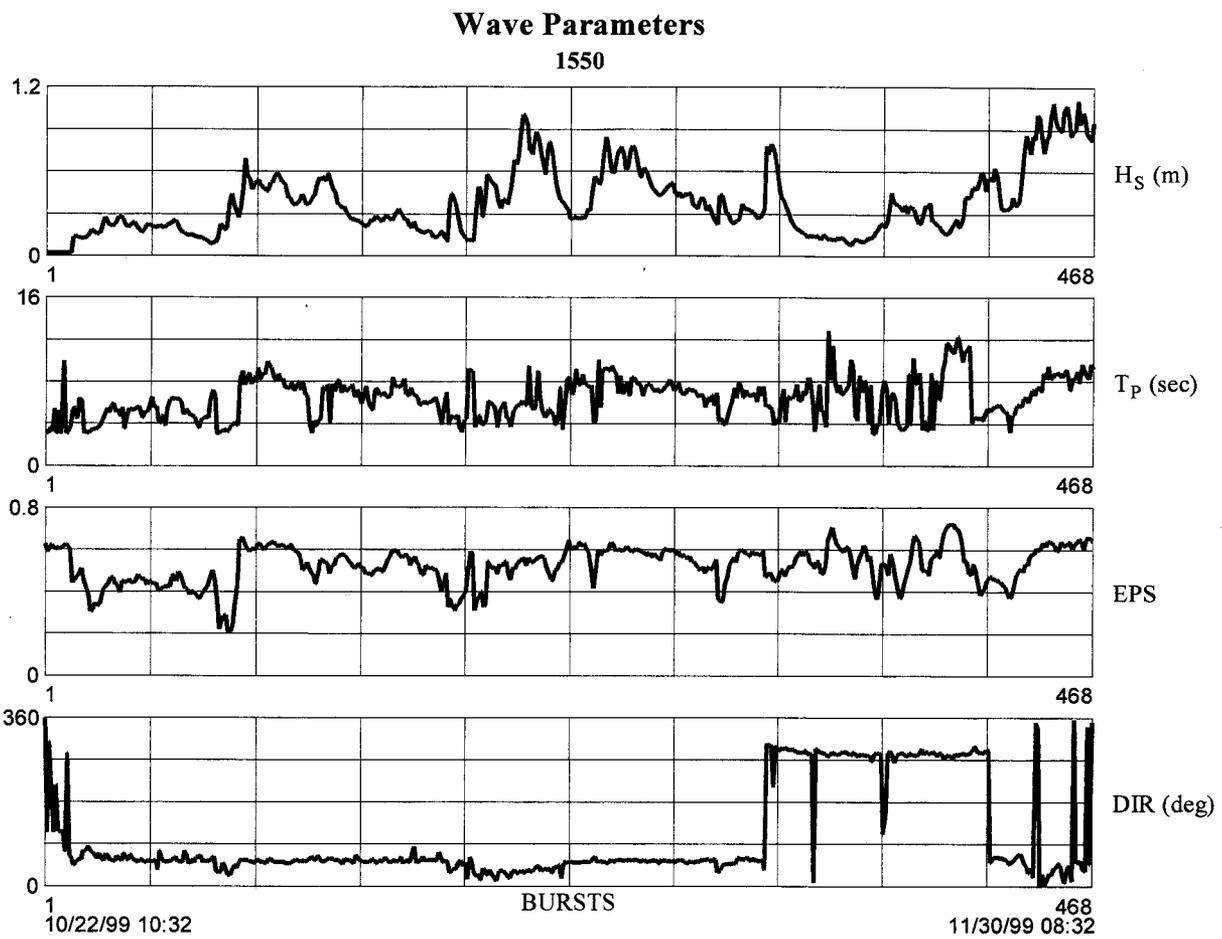


Fig. A.4 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station B pour la période du 22 octobre 1999 10h32 au 30 novembre 1999 08h32.

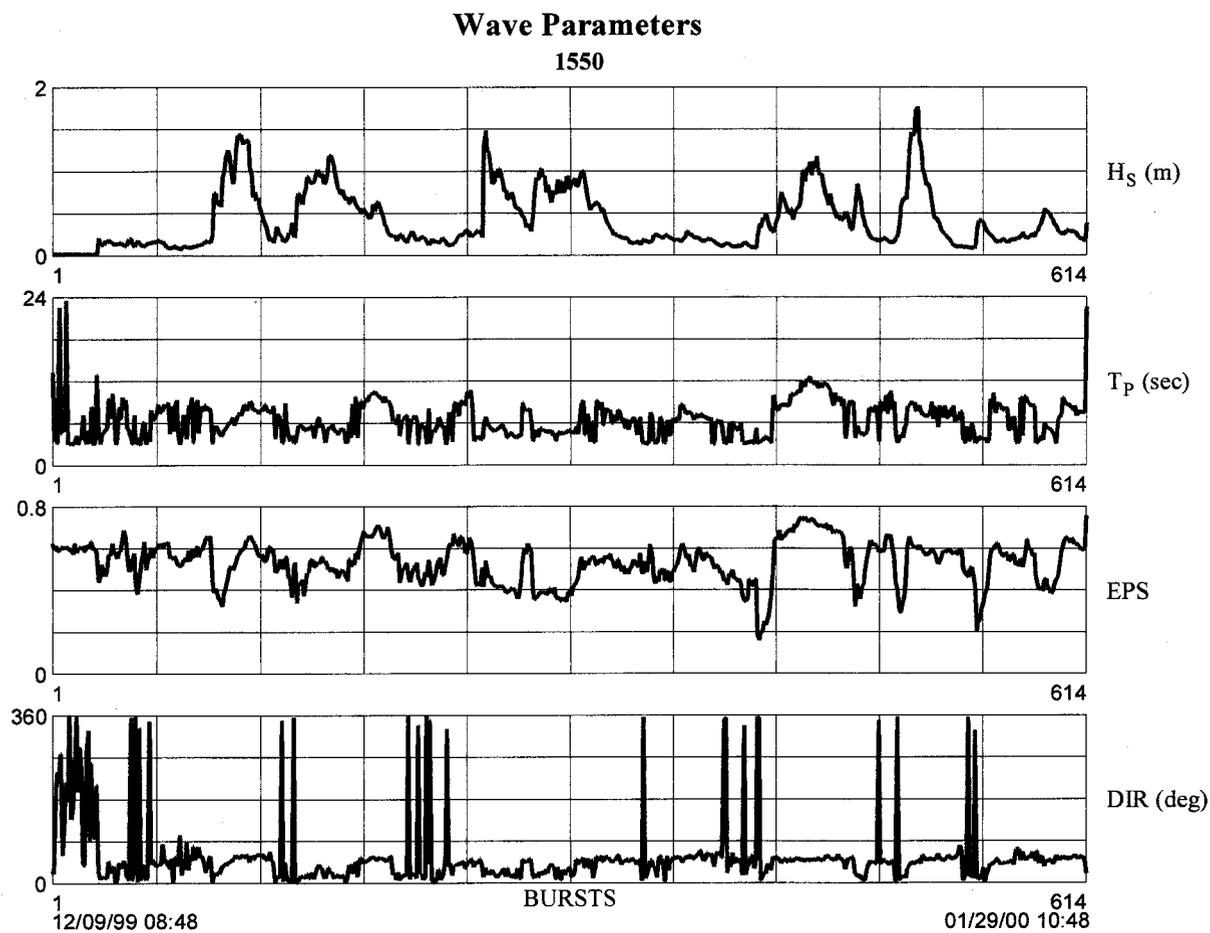


Fig. A.5 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station B pour la période du 09 décembre 1999 08h48 au 29 janvier 2000 10h48.

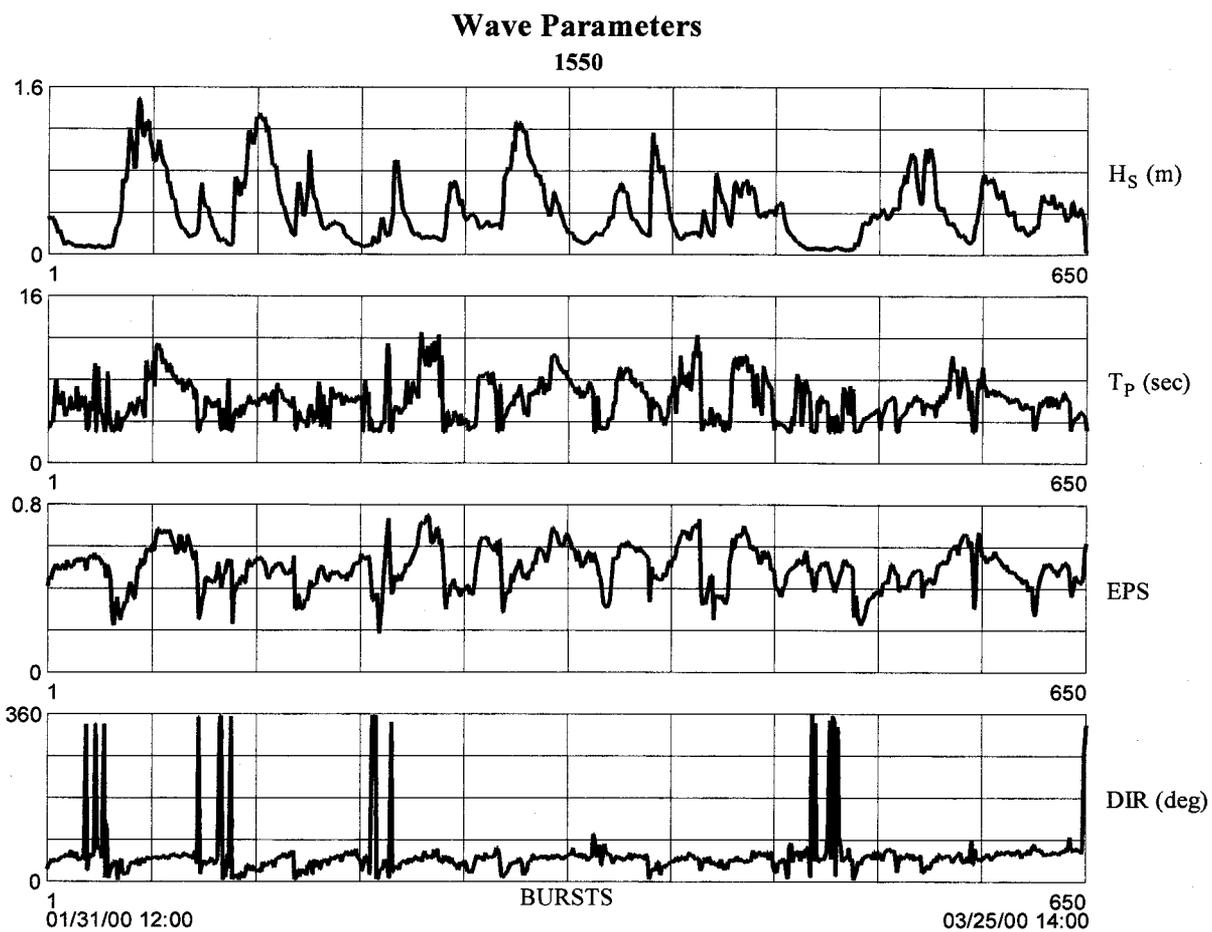


Fig. A.6 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station B pour la période du 31 janvier 2000 12h00 au 25 mars 2000 14h00.

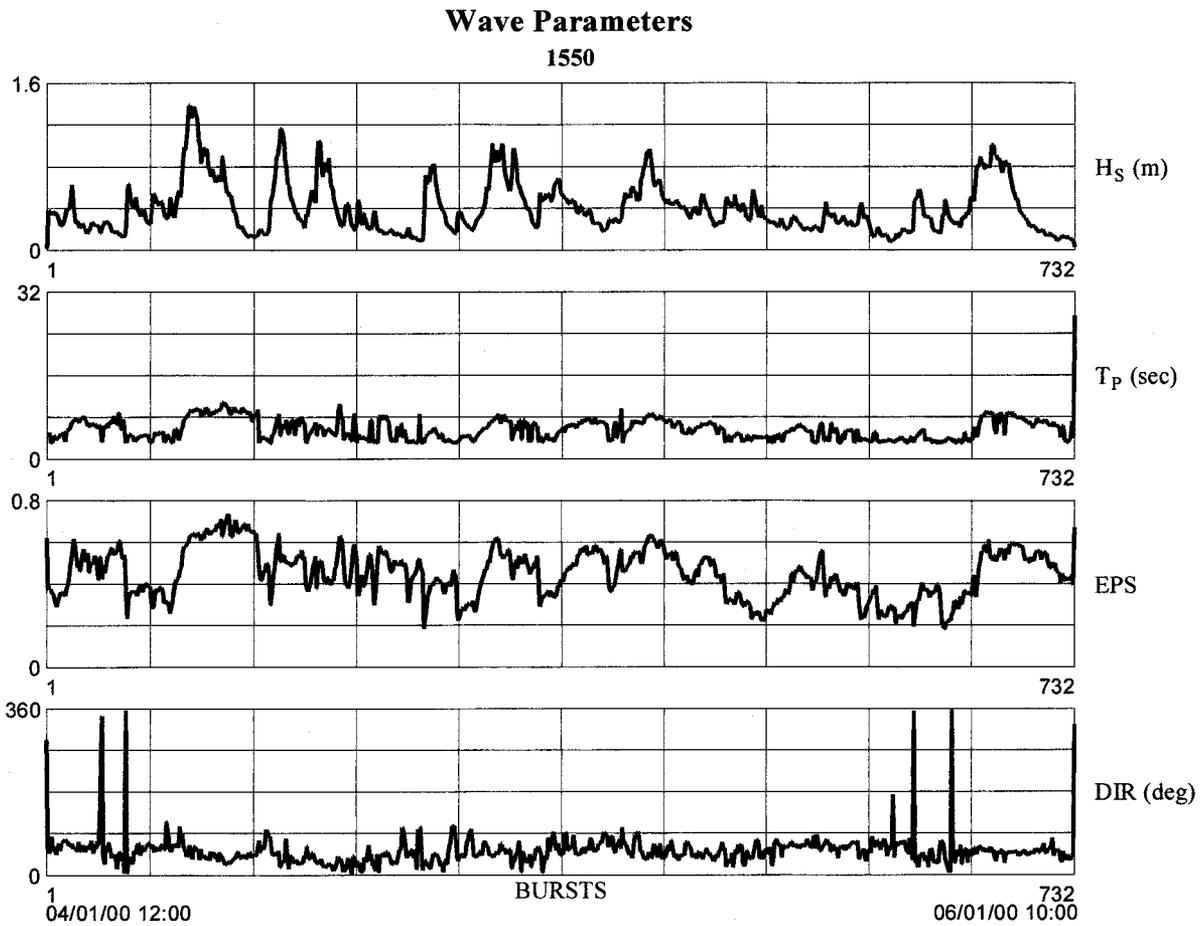


Fig. A.7 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station B pour la période du 01 avril 2000 12h00 au 01 juin 2000 10h00.

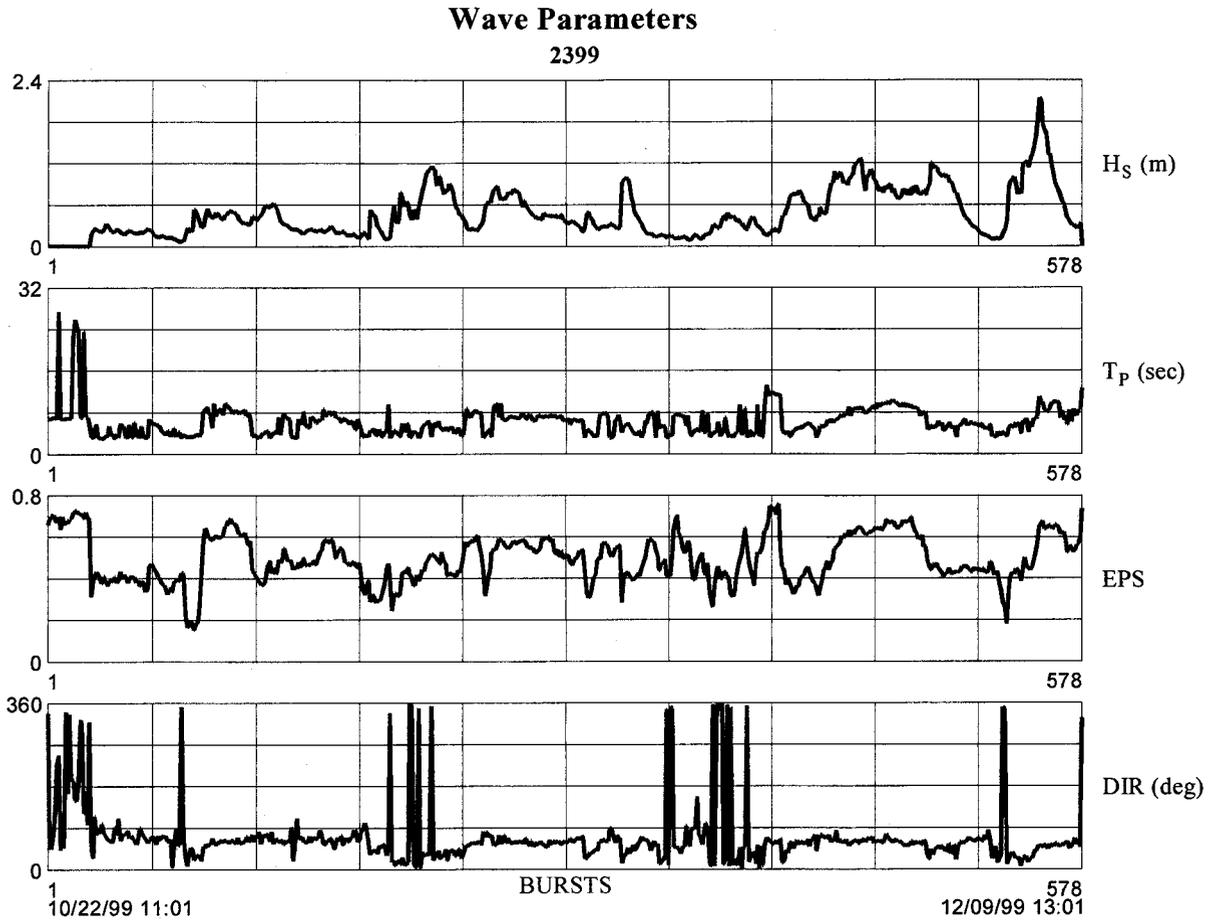


Fig. A.8 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station C pour la période du 22 octobre 1999 11h01 au 09 décembre 1999 13h01.

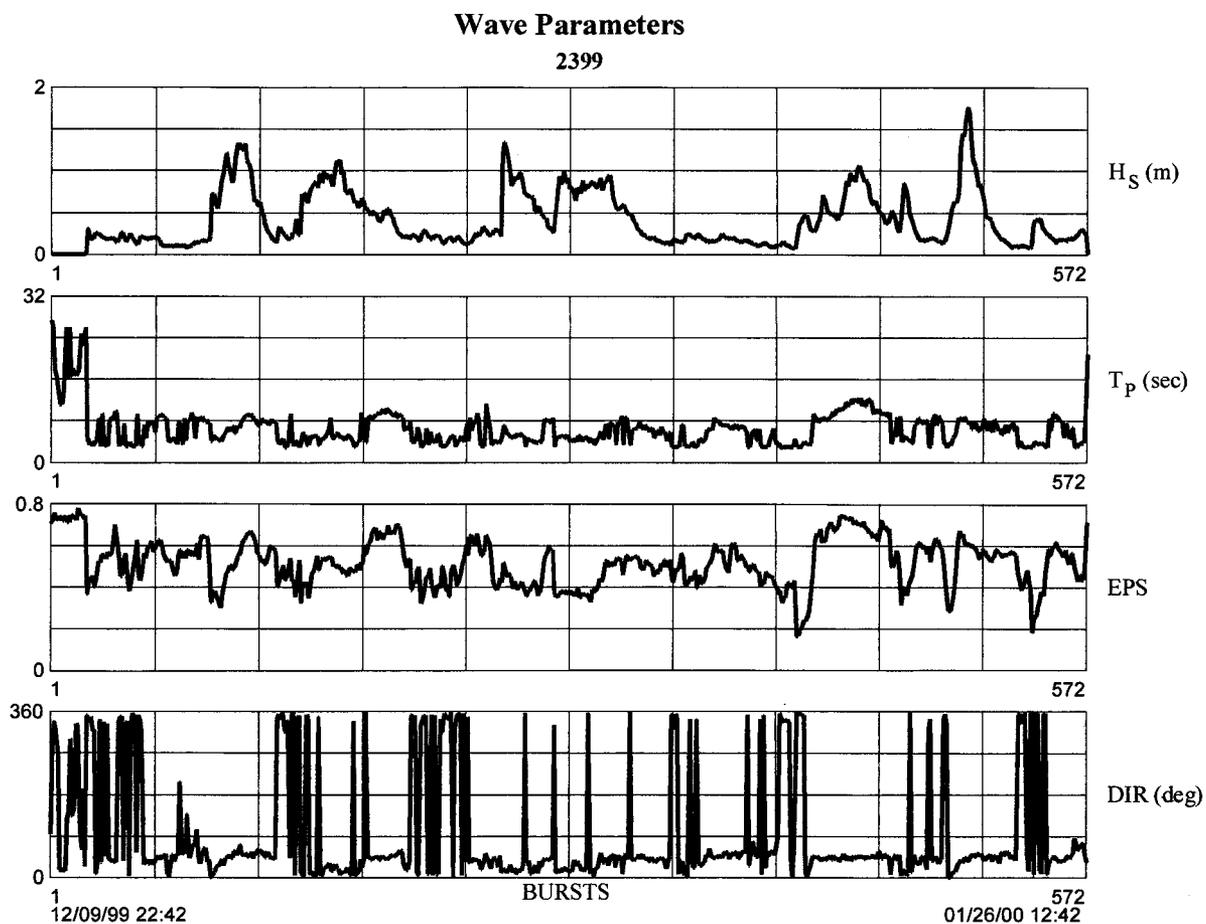


Fig. A.9 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station C pour la période du 09 décembre 1999 22h42 au 26 janvier 2000 12h42.

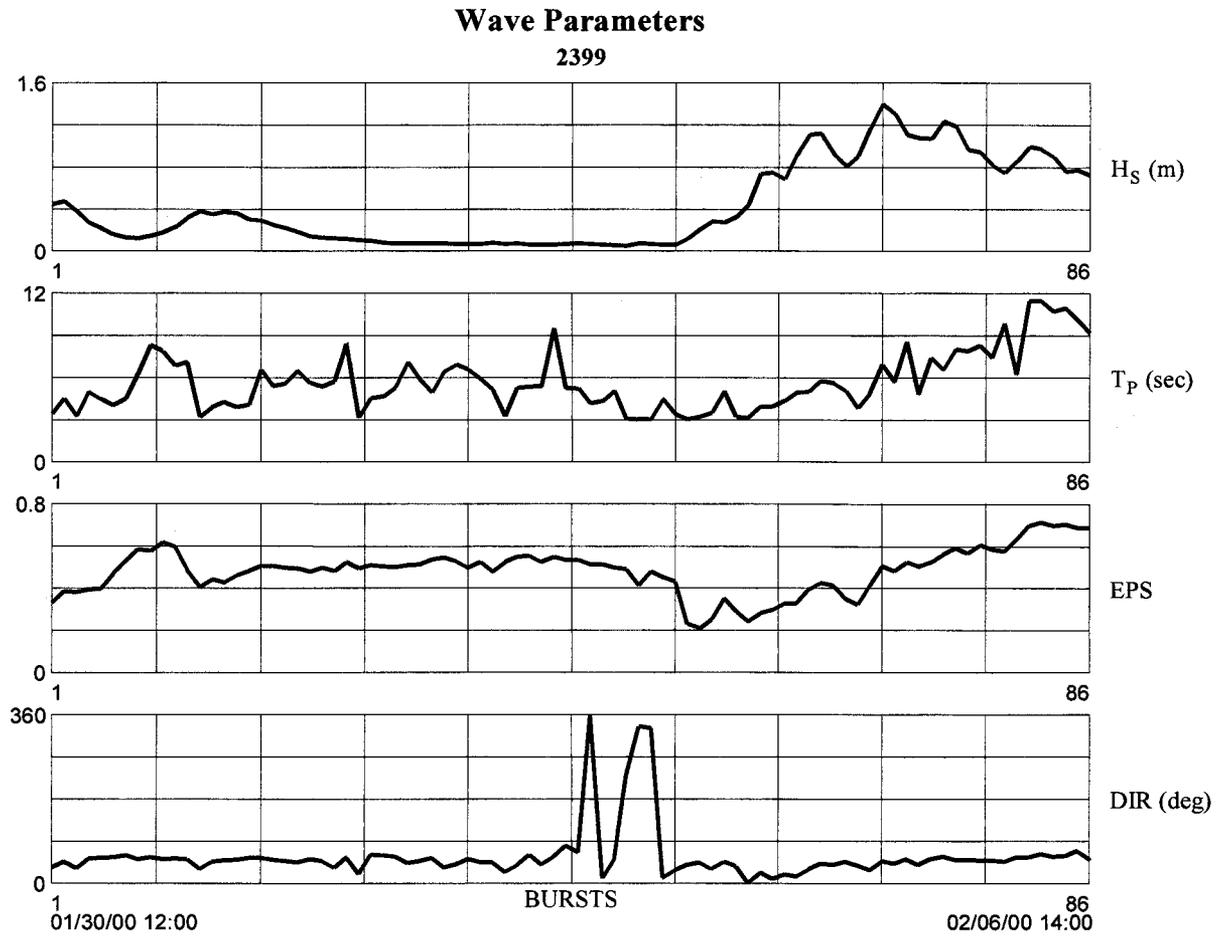


Fig. A.10 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station C pour la période du 30 janvier 2000 12h00 au 06 février 2000 14h00.

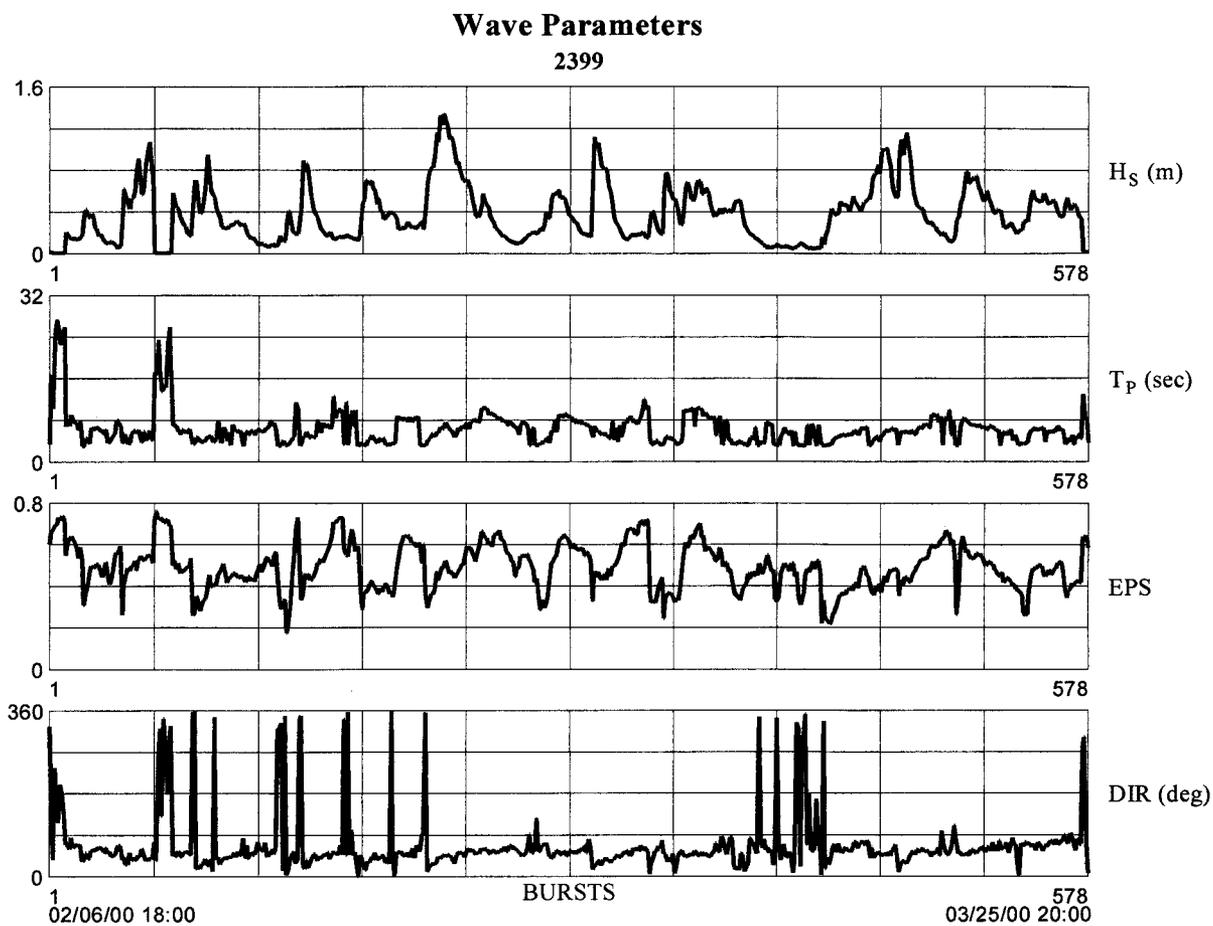


Fig. A.11 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station C pour la période du 06 février 2000 18h00 au 25 mars 2000 20h00.

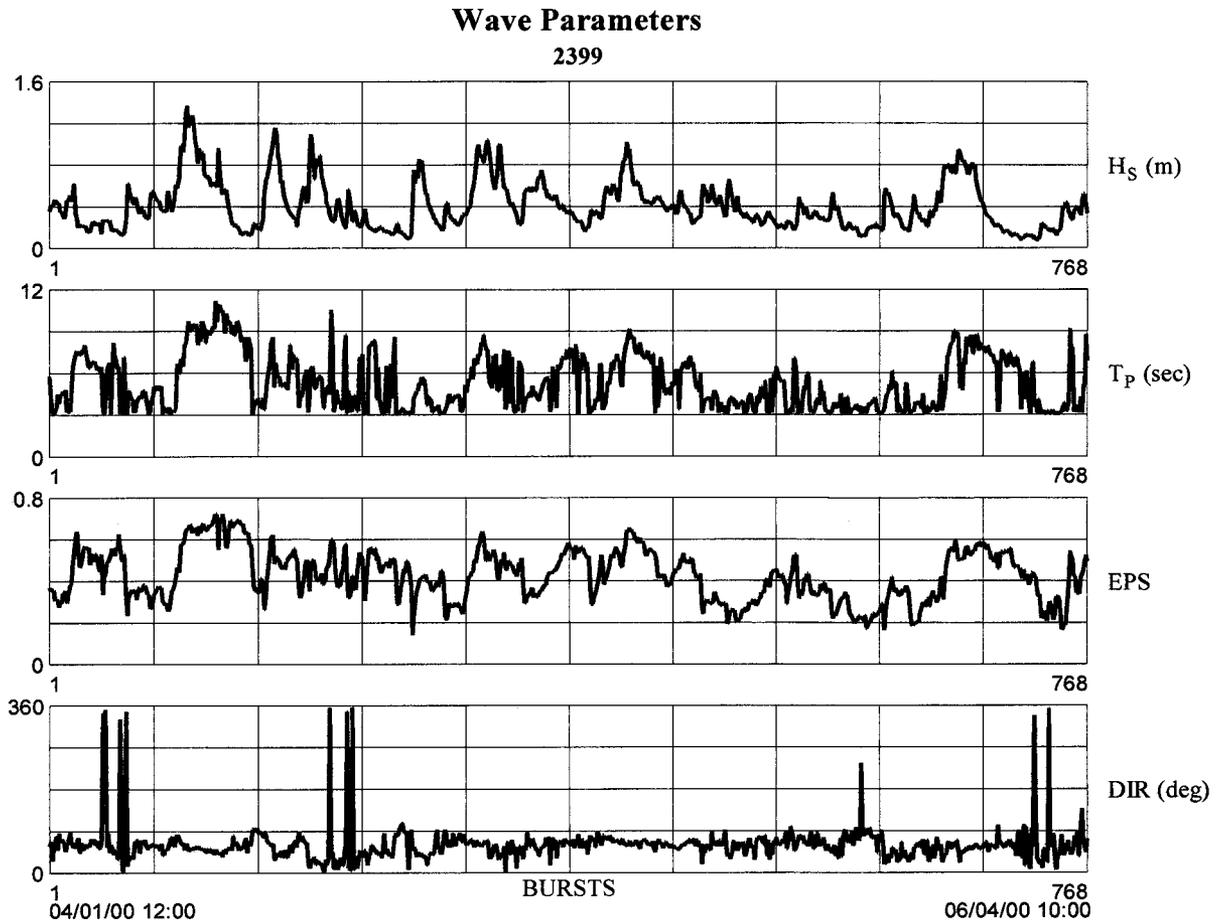


Fig. A.12 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station C pour la période du 01 avril 2000 12h00 au 04 juin 2000 10h00.

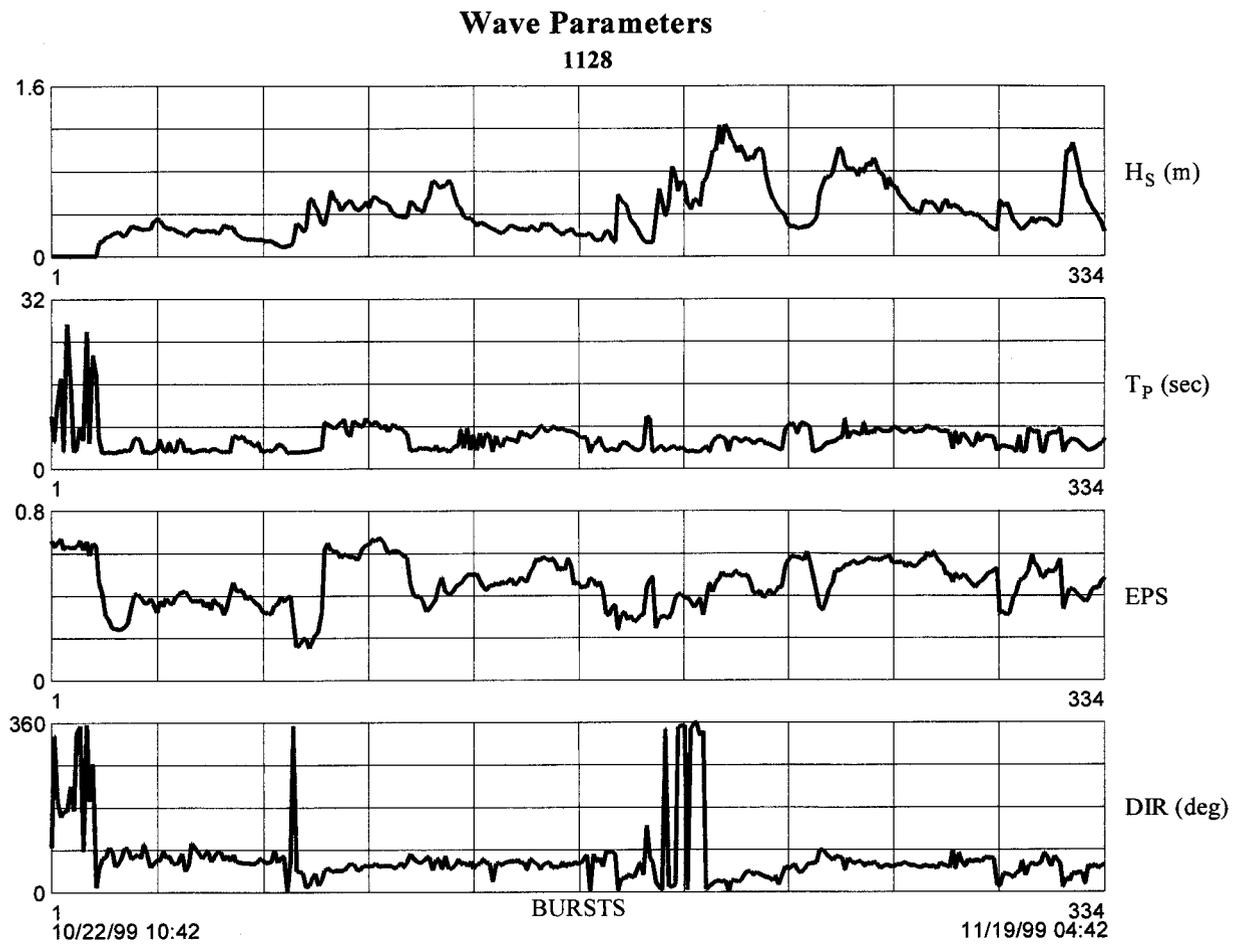


Fig. A.13 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station D pour la période du 22 octobre 1999 10h42 au 19 novembre 1999 04h42.

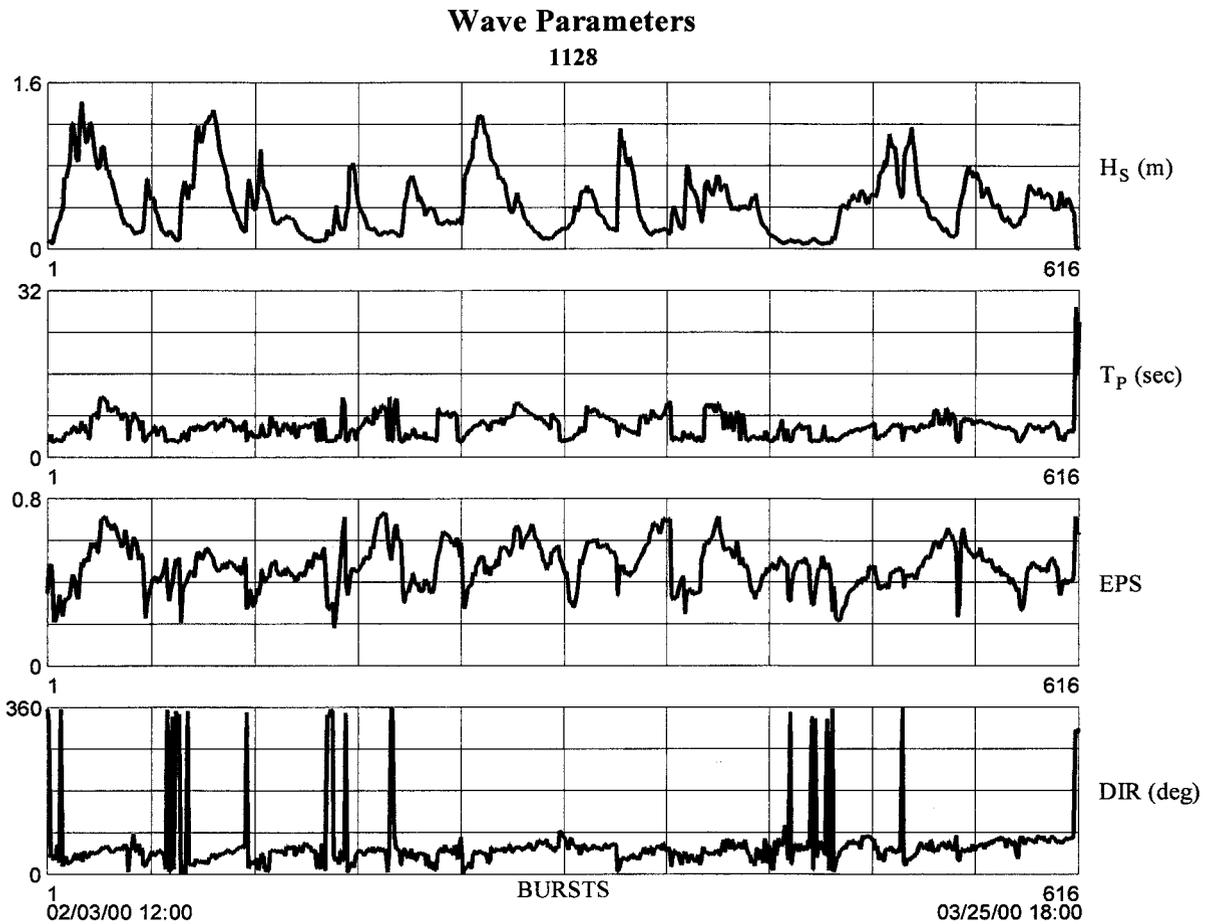


Fig. A.14 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station D pour la période du 03 février 2000 12h00 au 25 mars 2000 18h00.

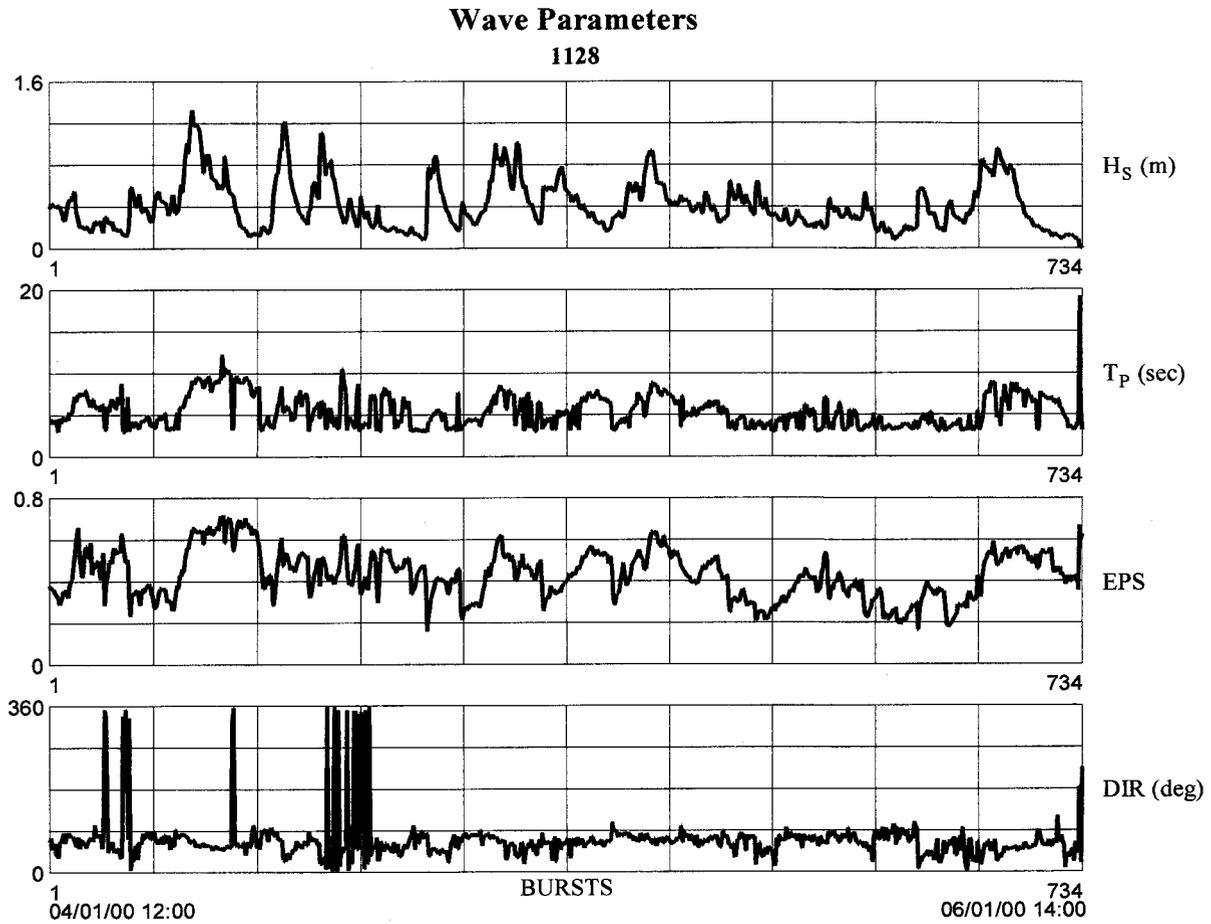


Fig. A.15 - Graphiques résumant les paramètres de houles enregistrés à la station D pour la période du 01 avril 2000 12h00 au 01 juin 2000 14h00.

Annexe B : Graphiques du flux d'énergie en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour les périodes de pointe T_p correspondant à $8,0 s$, $8,5 s$, $9,0 s$, $9,5 s$ et $10,0 s$ le long de la ligne de mesure.

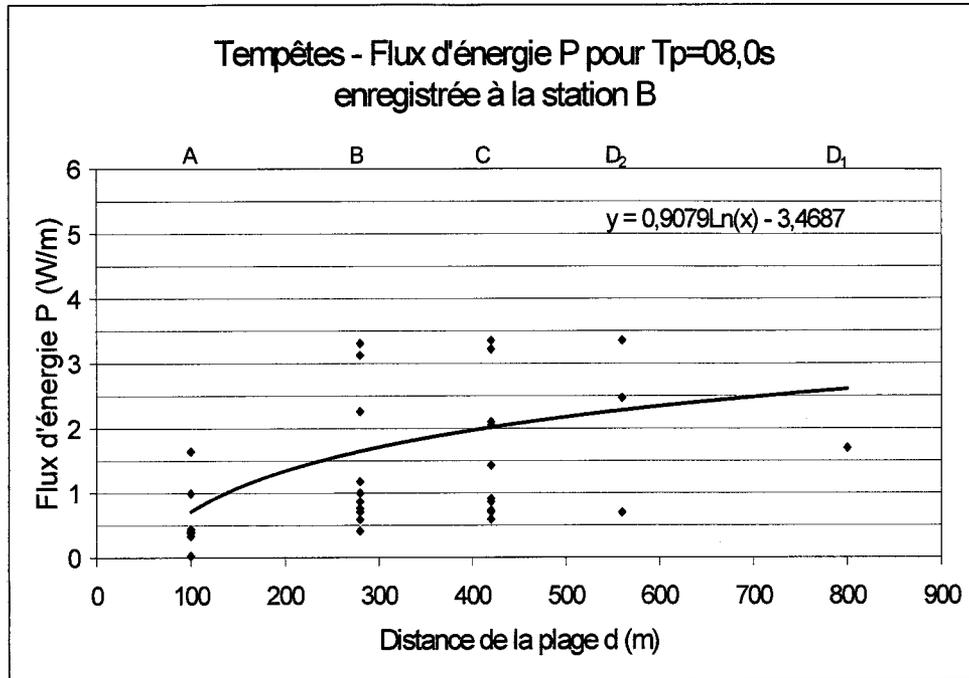


Fig. B.1 - Graphiques du flux d'énergie P en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour la période de pointe $T_p = 8,0 s$ le long de la ligne de mesure.

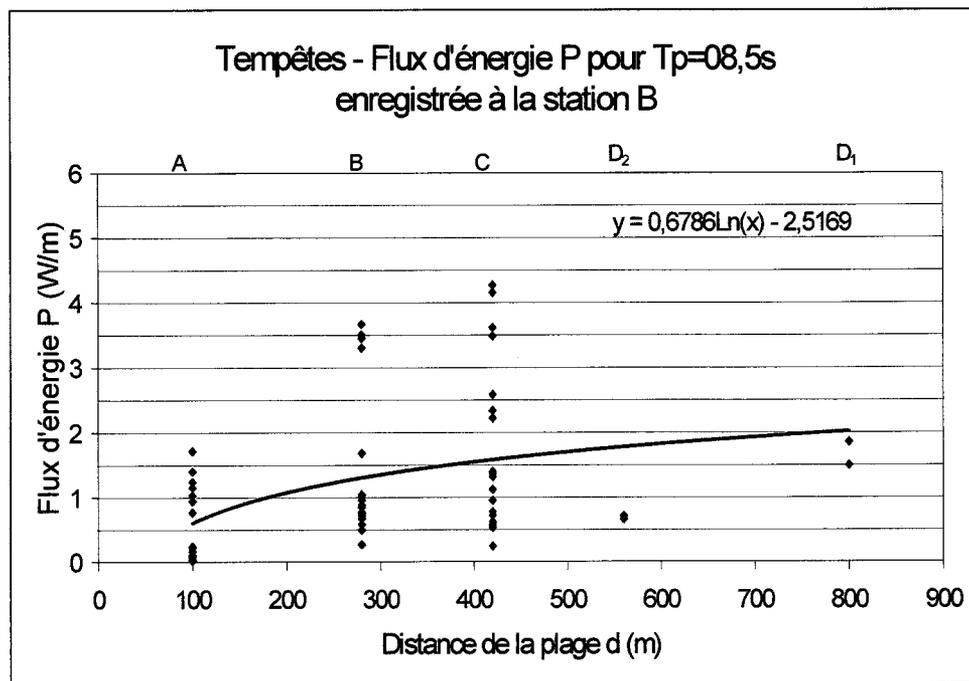


Fig. B.2 - Graphiques du flux d'énergie P en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour la période de pointe $T_p = 8,5 s$ le long de la ligne de mesure.

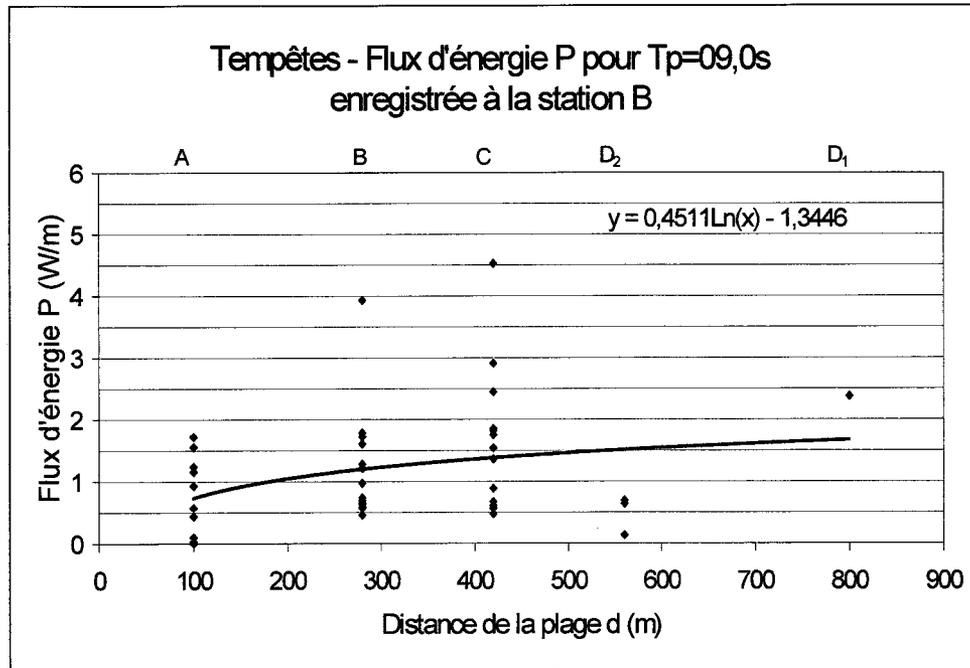


Fig. B.3 - Graphiques du flux d'énergie P en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour la période de pointe $T_p = 9,0 s$ le long de la ligne de mesure.

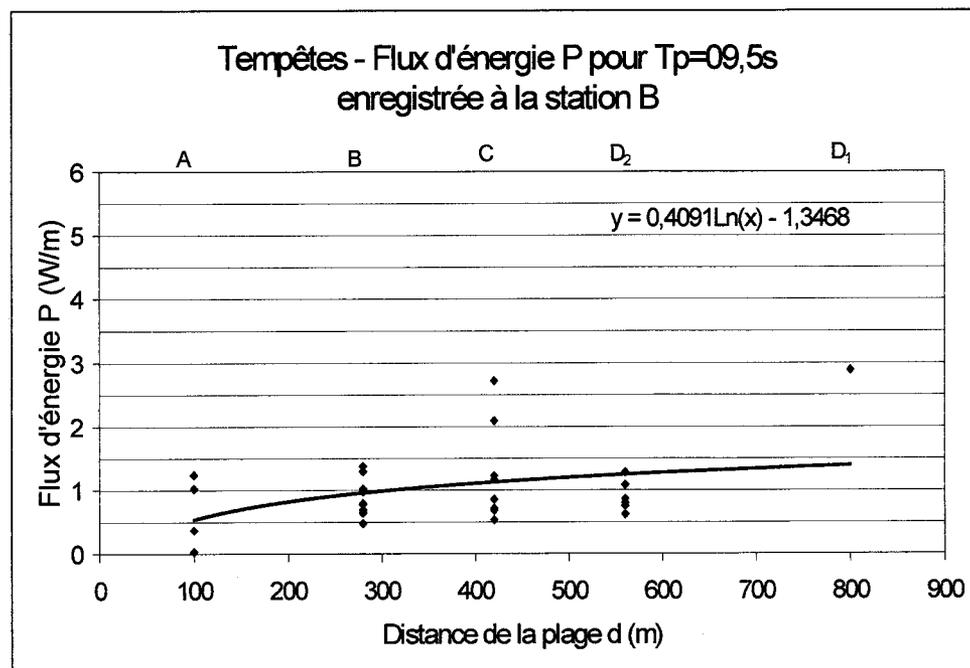


Fig. B.4 - Graphiques du flux d'énergie P en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour la période de pointe $T_p = 9,5 s$ le long de la ligne de mesure.

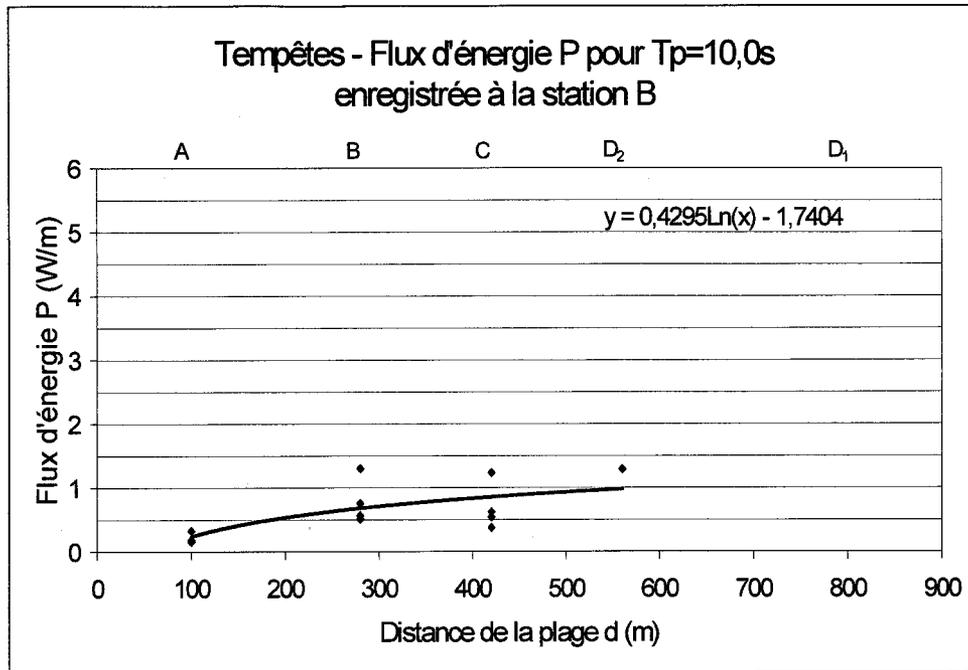


Fig. B.5 - Graphiques du flux d'énergie P en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour la période de pointe $T_p = 10,0 s$ le long de la ligne de mesure.

Annexe C : Graphiques du coefficient de profondeur K_s en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour les périodes de pointe T_p correspondant à 8,0 s, 8,5 s, 9,0 s, 9,5 s et 10,0 s le long de la ligne de mesure.

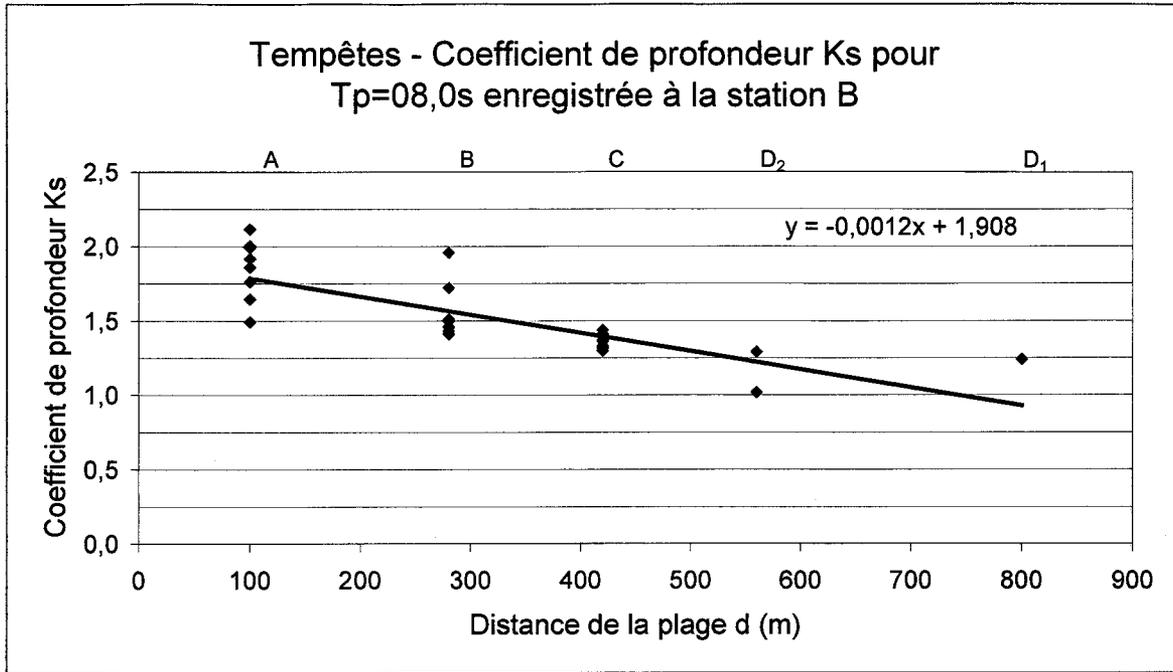


Fig. C.1 - Graphiques du coefficient de profondeur K_s en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour la période de pointe $T_p = 8,0 s$ le long de la ligne de mesure.

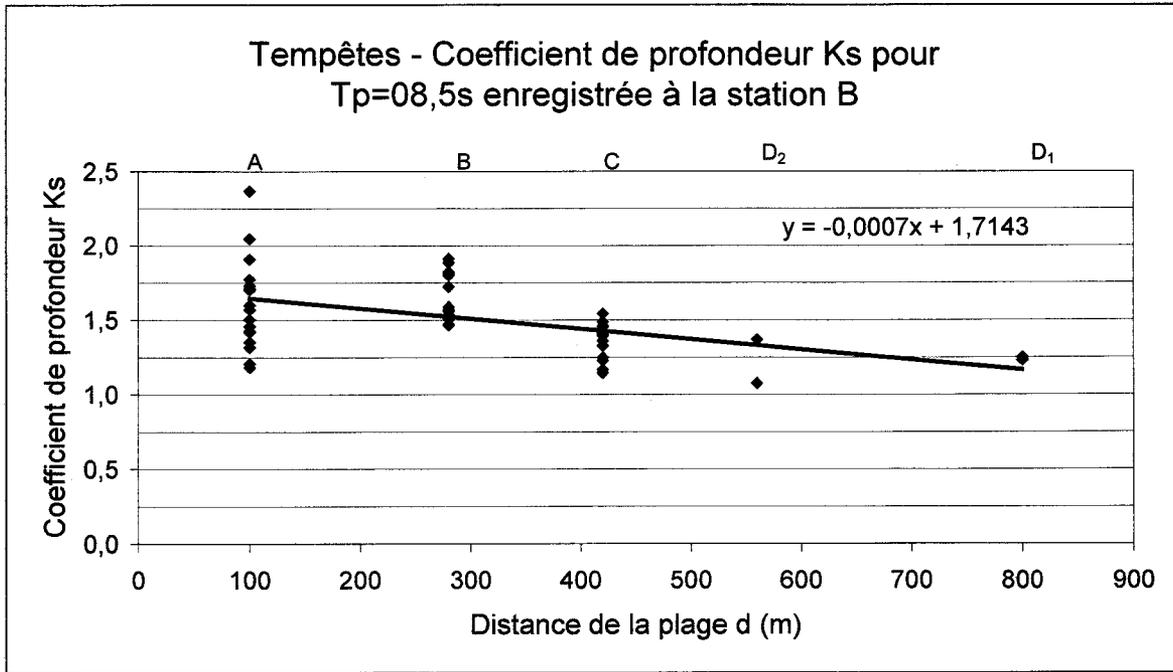


Fig. C.2 - Graphiques du coefficient de profondeur K_s en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour la période de pointe $T_p = 8,0 s$ le long de la ligne de mesure.

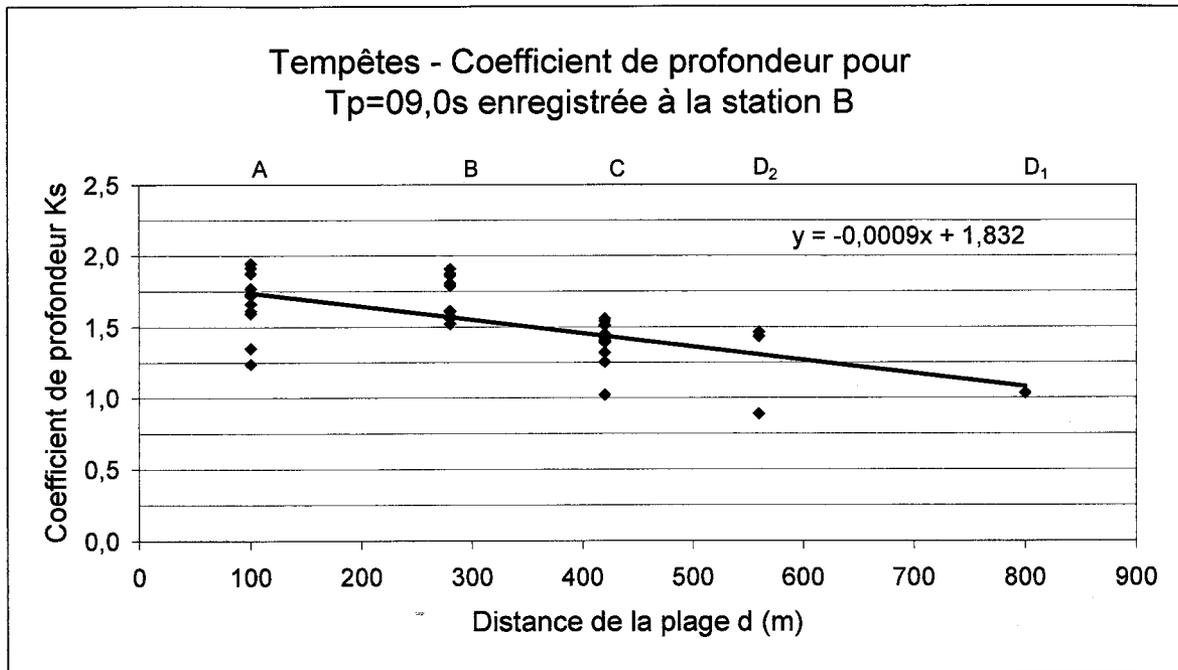


Fig. C.3 - Graphiques du coefficient de profondeur K_s en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour la période de pointe $T_p = 9,0 s$ le long de la ligne de mesure.

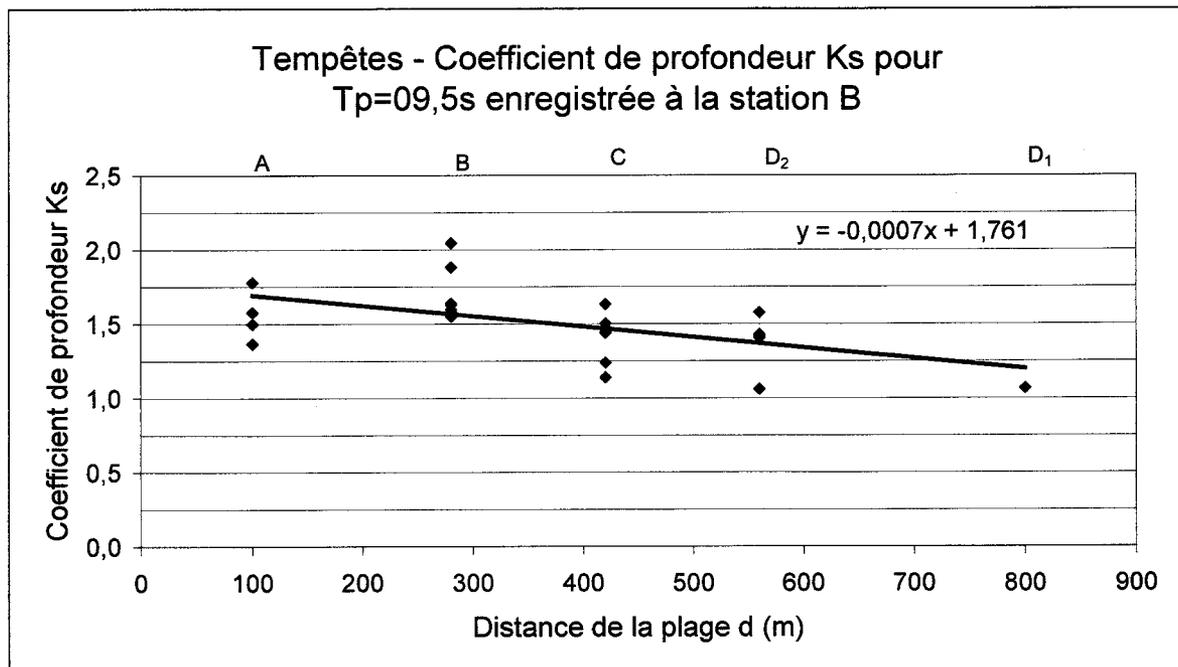


Fig. C.4 - Graphiques du coefficient de profondeur K_s en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour la période de pointe $T_p = 9,5 s$ le long de la ligne de mesure.

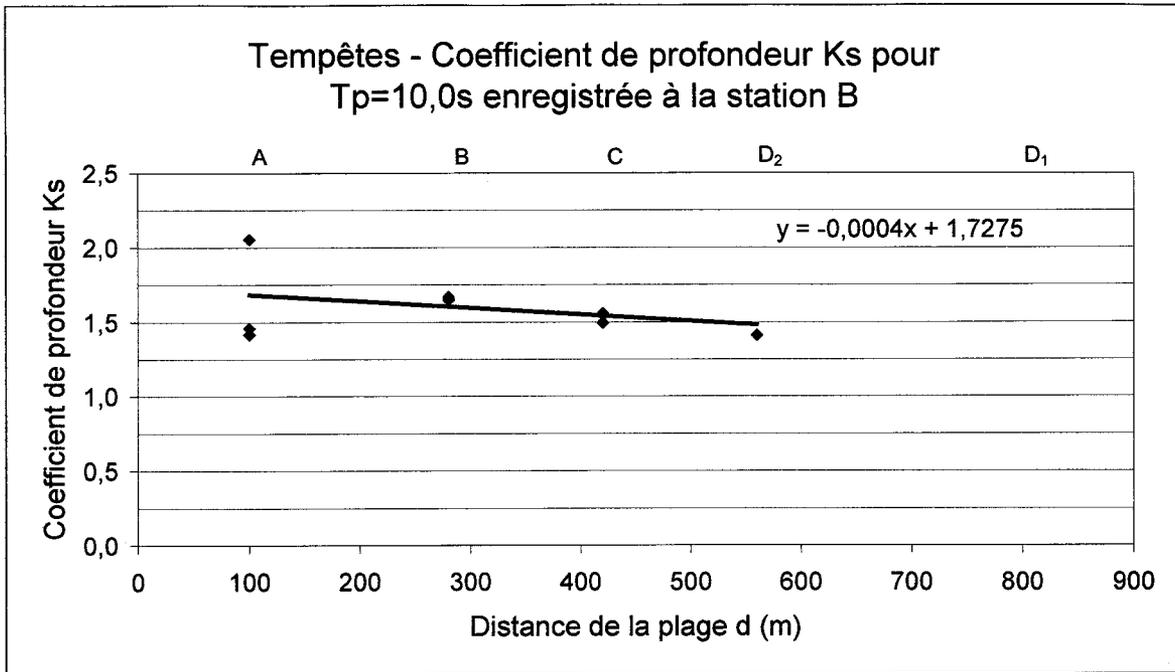


Fig. C.5 - Graphiques du coefficient de profondeur K_s en tempêtes en fonction de la distance à la plage d pour la période de pointe $T_p = 10,0 s$ le long de la ligne de mesure.

Annexe D : Débits sédimentaires journaliers le long du littoral QJ_L et le long du profil QJ_P calculés à partir du modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)* pour les quatre stations de mesure.

Mois	Jour	Station A		Station B		Station C		Station D	
		Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil
		Q_{J_L} m^3/m linéaire	Q_{J_P} m^3/m linéaire						
Octobre 1999	24	0,110	-0,013	0,076	-0,155	0,529	-0,241	-0,025	-0,007
	25	0,134	0,026	0,111	-0,022	0,073	0,003	-0,046	-0,007
	26	0,104	0,009	0,114	-0,033	0,064	0,010	-0,034	-0,005
	27	0,087	0,019	-0,009	-0,046	0,046	-0,011	-0,029	-0,005
	28	0,074	0,004	-0,054	-0,062	0,044	-0,016	-0,023	-0,003
	29	0,143	-0,038	0,363	-0,275	0,074	0,000	-0,023	0,009
	30	0,222	-0,056	1,066	-0,216	0,068	0,032	-0,011	0,017
	31	0,160	-0,077	0,669	-0,172	0,050	0,016	-0,004	0,013
Novembre 1999	1	-0,007	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2	-0,013	0,001	0,916	-0,402	0,103	0,000	-0,007	0,005
	3	-0,021	0,004	0,278	-0,159	0,041	-0,021	-0,013	0,001
	4	-0,029	0,010	0,013	-0,174	0,041	-0,001	-0,021	0,004
	5	-0,022	-0,003	0,030	-0,156	0,035	-0,004	-0,029	0,010
	6	0,105	-0,045	-0,018	-0,116	0,044	0,006	-0,022	-0,003
	7	-0,102	-0,131	-0,344	-0,214	0,054	-0,017	-0,022	0,003
	8	-0,332	-0,312	-1,935	-0,582	-0,029	-0,036	-0,054	0,017
	9	-0,611	-0,972	-2,530	-0,771	-0,161	-0,057	-0,054	-0,050
	10	0,065	-0,330	-5,518	-1,650	-0,239	-0,449	0,038	-0,187
	11	0,177	-0,087	-1,152	-0,725	-0,004	-0,126	0,003	-0,036
	12	0,390	-0,086	0,259	-0,369	0,072	-0,033	-0,016	0,006
	13	0,241	-0,069	1,821	-0,444	0,122	-0,031	-0,071	0,019
	14	0,190	0,039	1,059	-0,138	-0,008	-0,135	-0,086	-0,007
	15	0,129	0,074	0,051	-0,331	0,011	-0,042	-0,040	0,016
	16	0,092	0,044	0,144	-0,252	0,005	-0,031	-0,028	0,012
	17	0,165	0,077	0,035	-0,193	0,020	-0,033	-0,014	0,001
	18	-0,007	-0,184	0,123	-0,161	0,064	-0,027	-0,010	0,007
	19	0,098	0,013	-0,501	-0,145	-0,042	-0,094	-0,046	-0,038
	20	0,105	0,019	-0,011	0,079	0,056	-0,010		
	21	0,108	0,018	-0,009	0,086	0,063	0,000		
	22	0,020	0,001	-0,010	0,083	0,055	-0,003		
	23	0,078	-0,032	0,013	0,122	0,000	-0,002		
	24	0,099	-0,014	0,007	0,042	-0,003	-0,032		
	25	0,119	-0,040	0,001	0,028	0,023	-0,034		
	26	0,257	-0,075	0,004	0,048	0,019	-0,042		
	27	0,313	-0,029	0,000	-0,021	0,081	-0,041		
	28	0,744	0,086	-0,015	-0,067	0,147	-0,015		
	29	0,564	-0,003	-0,062	-1,903	0,289	-0,018		
	30	0,208	-0,251	0,302	-3,192	0,092	-0,007		
Décembre 1999	1	0,097	-0,257			0,055	-0,019		
	2	-0,532	-0,815			-0,062	-0,092		
	3	-0,268	-0,694			-0,057	-0,128		
	4	0,075	-0,099			-0,009	-0,072		
	5	-0,025	-0,054			0,028	-0,020		
	6					-0,289	0,003		
	7					-0,252	-0,416		

Mois	Jour	Station A		Station B		Station C		Station D	
		Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{JL} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{JP} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{JL} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{JP} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{JL} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{JP} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{JL} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{JP} m^3/m linéaire
	8					0,000	-0,094		
	9					2,364	1,792		
	10	0,021	0,035	3,501	-5,491	53,874	-44,677		
	11	-0,061	-0,045	6,192	-10,608	27,670	-37,693		
	12	-0,042	0,068	0,020	-0,049	0,019	-0,005		
	13	-0,015	0,056	0,052	-0,042	0,009	-0,005		
	14	-0,002	0,089	0,044	-0,018	-0,013	0,012		
	15	0,008	0,049	0,047	0,000	-0,004	0,002		
	16	0,010	0,054	0,037	-0,010	-0,004	-0,008		
	17	0,685	-0,226	0,313	-0,280	0,014	-0,095		
	18	5,150	2,532	1,060	0,143	0,355	0,084		
	19	-0,087	-0,536	0,127	0,086	0,024	0,003		
	20	-0,042	0,086	-0,064	0,064	-0,040	0,028		
	21	-0,110	0,265	-0,484	-0,323	-0,207	-0,193		
	22			-0,431	-0,719	-0,154	-0,440		
	23	-0,138	0,402	-0,576	-0,538	-0,241	-0,315		
	24	-0,058	0,109	0,005	-0,352	0,029	-0,270		
	25	-0,035	0,051	0,046	0,052	-0,006	-0,020		
	26	-0,046	0,060	0,009	0,014	0,025	0,002		
	27	-0,056	0,052	0,008	-0,012	0,000	-0,011		
	28	-0,062	0,057	0,004	0,004	-0,016	-0,002		
	29	-0,062	0,060	0,033	-0,022	-0,028	-0,022		
	30	-0,059	0,067	-0,778	-0,399	-0,276	-0,134		
	31			-0,691	-0,634	-0,231	-0,424		
Janvier 2000	1	0,079	0,042	-0,107	-0,182	-0,040	-0,233		
	2	0,101	0,044	-0,686	-0,345	-0,302	-0,199		
	3	0,112	0,047	-0,601	-0,467	-0,234	-0,284		
	4	0,119	0,048	-0,014	-0,545	-0,060	-0,331		
	5	0,126	0,051	-0,058	-0,180	-0,031	-0,190		
	6	0,134	0,049	0,037	-0,027	-0,016	-0,037		
	7	0,156	0,049	0,027	-0,024	-0,030	-0,037		
	8	0,167	0,058	0,042	-0,018	-0,019	-0,034		
	9	0,179	0,061	0,069	0,018	-0,003	-0,007		
	10	0,191	0,062	0,038	-0,004	-0,005	-0,013		
	11	0,203	0,066	0,021	-0,003	-0,005	-0,013		
	12	0,216	0,069	0,027	0,002	-0,016	-0,014		
	13	0,227	0,068	-0,023	-0,025	-0,030	-0,030		
14	0,238	0,070	-0,047	-0,103	-0,018	-0,058			
15	0,251	0,073	0,261	0,098	0,052	0,053			
16	0,266	0,075	0,198	0,233	0,124	0,041			
17	0,284	0,079	-0,025	-0,014	0,007	-0,083			
18	0,303	0,083	-0,323	-0,045	-0,114	-0,069			
19	0,321	0,085	0,006	0,019	0,011	-0,011			
20	0,336	0,087	0,540	-0,500	0,026	-0,359			
21	0,349	0,089	1,159	-0,442	0,155	-0,200			
22	0,370	0,092	0,080	-0,001	0,010	-0,026			
23	0,427	0,106	0,017	0,011	0,008	0,023			

Mois	Jour	Station A		Station B		Station C		Station D	
		Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{J_L} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{J_P} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{J_L} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{J_P} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{J_L} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{J_P} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{J_L} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{J_P} m^3/m linéaire
	24	0,456	0,105	0,023	-0,028	-0,005	-0,061		
	25			0,024	0,009	0,007	-0,012		
	26			0,031	0,004	2,817	-0,756		
	27			0,096	-0,024				
	28			0,053	0,010				
	29								
	30					-0,011	0,000		
	31					0,004	0,007		
<hr/>									
Février	1			0,000	0,006	-0,021	0,004		
2000	2			-0,017	0,001	0,017	0,014		
	3			0,004	0,003	0,029	0,014	0,027	0,002
	4			-0,434	-0,179	-0,130	-0,055	-0,015	-0,059
	5			-0,193	-0,553	-0,024	-0,186	-0,046	-0,249
	6			0,145	-0,069			0,000	-0,123
	7			0,019	0,033			0,004	-0,015
	8			-0,045	-0,044			0,011	-0,056
	9			-0,029	0,021			0,008	-0,005
	10			-0,846	-0,126			-0,118	-0,048
	11			-1,565	-0,772			-0,186	-0,263
	12			-0,082	-0,321			-0,046	-0,150
	13			-0,130	-0,070	-0,045	-0,016	-0,026	-0,054
	14			-0,205	-0,121	-0,052	-0,022	-0,014	-0,064
	15			-0,022	-0,025	-0,015	-0,004	-0,027	-0,060
	16			-0,039	0,005			0,004	-0,003
	17			-0,049	0,002			0,008	-0,011
	18			-0,255	-0,097			0,005	-0,053
	19			0,004	0,022			0,016	-0,009
	20			-0,069	0,009			-0,008	-0,016
	21			0,017	-0,068	0,097	-0,035	0,039	-0,070
	22			0,036	0,002			0,040	-0,037
	23			0,057	0,017			0,044	-0,027
	24			-0,712	-0,491			-0,058	-0,160
	25			-0,552	-0,516			-0,041	-0,226
	26			0,097	-0,018			0,009	-0,072
	27			-0,001	0,000			-0,012	-0,061
	28			0,024	-0,010	0,010	-0,023	-0,003	-0,029
	29			0,075	0,022			0,033	-0,022
<hr/>									
Mars	1			0,053	0,006	0,012	-0,039	-0,001	-0,068
2000	2			-0,196	-0,058			-0,026	-0,046
	3			-0,473	-0,267			-0,058	-0,112
	4			0,024	0,031			0,013	-0,011
	5			0,007	0,004			-0,001	-0,022
	6			-0,052	-0,065			0,019	-0,066
	7			0,168	0,020	0,114	-0,018	0,043	-0,049
	8			0,135	-0,012	0,064	-0,036	0,024	-0,036
	9			0,067	-0,018	0,022	-0,035	0,015	-0,049

Mois	Jour	Station A		Station B		Station C		Station D	
		Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{J_L} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{J_P} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{J_L} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{J_P} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{J_L} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{J_P} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du littoral Q_{J_L} m^3/m linéaire	Débit sédimentaire journalier calculé le long du profil Q_{J_P} m^3/m linéaire
	10			0,028	0,017	0,017	0,005	0,007	-0,010
	11			0,014	0,017			0,002	-0,005
	12			-0,036	0,010	-0,030	-0,003	-0,014	-0,003
	13			0,014	0,002	0,013	-0,007	0,001	-0,012
	14			0,127	0,011	0,103	-0,003	0,049	-0,032
	15			0,006	-0,094	-0,013	-0,079	-0,021	-0,076
	16			0,073	-0,340			-0,050	-0,142
	17			-0,610	-0,305			-0,062	-0,123
	18			0,013	0,018	0,025	-0,018	0,022	-0,033
	19			0,064	0,014	0,063	-0,022	0,031	-0,026
	20			0,216	-0,016	0,046	-0,058	0,031	-0,065
	21			0,104	0,039	0,060	-0,021	0,013	-0,030
	22			0,028	0,017	0,005	-0,016	0,008	-0,017
	23			0,161	0,033	0,134	-0,026	0,029	-0,038
	24			0,090	0,039	0,074	-0,001	0,023	-0,032
	25			-4,330	4,055			0,038	-4,452
	26								
	27								
	28								
	29								
	30								
	31								
Avril 2000	1								
	2			0,183	0,116	0,243	0,077	0,152	0,012
	3			-0,131	0,091			0,021	0,059
	4			-0,054	0,073			0,079	0,055
	5			-0,100	0,016			0,060	0,029
	6			0,077	0,002			0,096	-0,010
	7			0,061	0,036	0,069	-0,026	0,091	-0,017
	8			1,409	0,316			0,115	0,010
	9			3,240	1,507			0,177	0,023
	10			0,751	2,602			-0,106	-0,122
	11			0,838	1,934	-0,007	0,017	-0,043	-0,091
	12			1,272	1,181	-0,078	-0,032	0,032	0,014
	13			1,739	0,746	0,045	-0,010	0,053	0,034
	14			1,941	1,078			0,147	0,088
	15			1,622	0,683			-0,077	-0,044
	16			1,459	1,454			0,052	0,016
	17			1,353	1,075			-0,118	-0,094
	18			1,376	0,698			-0,121	-0,070
	19			1,402	0,644			-0,004	-0,048
	20			1,404	0,886	-0,040	-0,059	-0,024	-0,043
	21			1,479	0,788	-0,002	-0,020	-0,002	-0,014
	22			1,742	0,826	0,026	0,001	0,006	-0,001
	23			2,072	0,785			-0,011	-0,023
	24			1,789	0,887			0,016	-0,077
	25			1,749	1,042	0,051	-0,009	0,023	-0,021

**Annexe E : Bilans sédimentaires journaliers dans le profil ΔQJ_P
pour les quatre stations de mesure.**

Mois	Jour	Zone B-A	Zone C-B	Zone D ₁ -C	Zone D ₂ -C
		sédimentaire journalier calculé le long du profil ΔQJ_P m^3/m linéaire			
Octobre 1999	24	-0,141	-0,087	0,234	
	25	-0,048	0,026	-0,010	
	26	-0,042	0,043	-0,015	
	27	-0,065	0,035	0,006	
	28	-0,065	0,046	0,013	
	29	-0,237	0,275	0,009	
	30	-0,159	0,248	-0,015	
	31	-0,094	0,187	-0,002	
Novembre 1999	1	-0,005	0,000	0,000	
	2	-0,403	0,402	0,005	
	3	-0,162	0,138	0,022	
	4	-0,184	0,173	0,004	
	5	-0,152	0,152	0,014	
	6	-0,071	0,122	-0,009	
	7	-0,083	0,197	0,019	
	8	-0,269	0,546	0,053	
	9	0,200	0,715	0,007	
	10	-1,321	1,201	0,263	
	11	-0,639	0,599	0,090	
	12	-0,282	0,336	0,039	
	13	-0,375	0,413	0,049	
	14	-0,177	0,003	0,128	
	15	-0,405	0,289	0,058	
	16	-0,297	0,222	0,043	
	17	-0,270	0,160	0,034	
	18	0,023	0,134	0,034	
	19	-0,158	0,051	0,056	
	20	0,060	-0,089	0,010	
	21	0,067	-0,085	0,000	
	22	0,081	-0,086	0,003	
	23	0,154	-0,124	0,002	
	24	0,056	-0,074	0,032	
	25	0,068	-0,062	0,034	

Mois	Jour	Zone B-A	Zone C-B	Zone D ₁ -C	Zone D ₂ -C
		sédimentaire journalier calculé le long du profil ΔQJ_P m^3/m linéaire			
	26	0,124	-0,090	0,042	
	27	0,007	-0,019	0,041	
	28	-0,153	0,052	0,015	
	29	-1,900	1,884	0,018	
	30	-2,941	3,185	0,007	
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>					
Décembre	1	0,257	-0,019		0,019
1999	2	0,815	-0,092		0,092
	3	0,694	-0,128		0,128
	4	0,099	-0,072		0,072
	5	0,054	-0,020		0,020
	6	0,000	0,003		-0,003
	7	0,000	-0,416		0,416
	8	0,000	-0,094		0,094
	9	0,000	1,792		-1,792
	10	-5,526	-39,186		44,677
	11	-10,563	-27,085		37,693
	12	-0,117	0,044		0,005
	13	-0,098	0,038		0,005
	14	-0,107	0,031		-0,012
	15	-0,049	0,002		-0,002
	16	-0,064	0,002		0,008
	17	-0,054	0,185		0,095
	18	-2,389	-0,059		-0,084
	19	0,622	-0,083		-0,003
	20	-0,022	-0,036		-0,028
	21	-0,588	0,130		0,193
	22	-0,719	0,278		0,440
	23	-0,940	0,223		0,315
	24	-0,461	0,082		0,270
	25	0,001	-0,072		0,020
	26	-0,046	-0,012		-0,002
	27	-0,064	0,000		0,011
	28	-0,054	-0,006		0,002
	29	-0,082	0,001		0,022

Mois	Jour	Zone B-A	Zone C-B	Zone D ₁ -C	Zone D ₂ -C
		sédimentaire journalier calculé le long du profil ΔQJ_P m^3/m linéaire			
	30	-0,466	0,265		0,134
	31	-0,634	0,209		0,424
Janvier 2000	1	-0,224	-0,050		0,233
	2	-0,389	0,146		0,199
	3	-0,514	0,183		0,284
	4	-0,593	0,214		0,331
	5	-0,231	-0,010		0,190
	6	-0,077	-0,009		0,037
	7	-0,072	-0,013		0,037
	8	-0,076	-0,015		0,034
	9	-0,042	-0,025		0,007
	10	-0,067	-0,009		0,013
	11	-0,069	-0,010		0,013
	12	-0,067	-0,016		0,014
	13	-0,093	-0,006		0,030
	14	-0,173	0,045		0,058
	15	0,025	-0,044		-0,053
	16	0,158	-0,192		-0,041
	17	-0,093	-0,069		0,083
	18	-0,127	-0,024		0,069
	19	-0,067	-0,030		0,011
	20	-0,587	0,141		0,359
	21	-0,531	0,243		0,200
	22	-0,093	-0,026		0,026
	23	-0,095	0,012		-0,023
	24	-0,133	-0,032		0,061
	25	0,009	-0,021		0,012
	26	0,004	-0,760		0,756
	27	-0,024	0,024		0,000
	28	0,010	-0,010		0,000
	29	0,000	0,000		0,000
	30	0,000	0,000		0,000
	31	0,000	0,007		-0,007

Mois	Jour	Zone B-A	Zone C-B	Zone D ₁ -C	Zone D ₂ -C
		sédimentaire journalier calculé le long du profil ΔQJ_P m^3/m linéaire			
Février 2000	1	0,006	-0,002		-0,004
	2	0,001	0,013		-0,014
	3	0,003	0,011		-0,013
	4	-0,179	0,124		-0,005
	5	-0,553	0,367		-0,063
	6	-0,069	0,069		-0,123
	7	0,033	-0,033		-0,015
	8	-0,044	0,044		-0,056
	9	0,021	-0,021		-0,005
	10	-0,126	0,126		-0,048
	11	-0,772	0,772		-0,263
	12	-0,321	0,321		-0,150
	13	-0,070	0,054		-0,038
	14	-0,121	0,099		-0,042
	15	-0,025	0,021		-0,056
	16	0,005	-0,005		-0,003
	17	0,002	-0,002		-0,011
	18	-0,097	0,097		-0,053
	19	0,022	-0,022		-0,009
	20	0,009	-0,009		-0,016
	21	-0,068	0,034		-0,035
	22	0,002	-0,002		-0,037
	23	0,017	-0,017		-0,027
	24	-0,491	0,491		-0,160
	25	-0,516	0,516		-0,226
	26	-0,018	0,018		-0,072
	27	0,000	0,000		-0,061
	28	-0,010	-0,013		-0,006
	29	0,022	-0,022		-0,022
Mars 2000	1	0,006	-0,045		-0,029
	2	-0,058	0,058		-0,046
	3	-0,267	0,267		-0,112
	4	0,031	-0,031		-0,011
	5	0,004	-0,004		-0,022

Mois	Jour	Zone B-A	Zone C-B	Zone D ₁ -C	Zone D ₂ -C
		sédimentaire journalier calculé le long du profil ΔQJ_P m^3/m linéaire			
	6	-0,065	0,065		-0,066
	7	0,020	-0,037		-0,032
	8	-0,012	-0,024		0,000
	9	-0,018	-0,017		-0,014
	10	0,017	-0,012		-0,015
	11	0,017	-0,017		-0,005
	12	0,010	-0,013		0,000
	13	0,002	-0,009		-0,005
	14	0,011	-0,013		-0,030
	15	-0,094	0,015		0,003
	16	-0,340	0,340		-0,142
	17	-0,305	0,305		-0,123
	18	0,018	-0,036		-0,015
	19	0,014	-0,036		-0,004
	20	-0,016	-0,042		-0,007
	21	0,039	-0,060		-0,009
	22	0,017	-0,033		-0,001
	23	0,033	-0,059		-0,011
	24	0,039	-0,040		-0,032
	25	4,055	-4,055		-4,452
	26	0,000	0,000		0,000
	27	0,000	0,000		0,000
	28	0,000	0,000		0,000
	29	0,000	0,000		0,000
	30	0,000	0,000		0,000
	31	0,000	0,000		0,000
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>					
Avril	1	0,000	0,000		0,000
2000	2	0,116	-0,039		-0,065
	3	0,091	-0,091		0,059
	4	0,073	-0,073		0,055
	5	0,016	-0,016		0,029
	6	0,002	-0,002		-0,010
	7	0,036	-0,062		0,010
	8	0,316	-0,316		0,010

Mois	Jour	Zone B-A	Zone C-B	Zone D ₁ -C	Zone D ₂ -C
		sédimentaire journalier calculé le long du profil ΔQJ_P m^3/m linéaire			
	9	1,507	-1,507		0,023
	10	2,602	-2,602		-0,122
	11	1,934	-1,917		-0,108
	12	1,181	-1,214		0,046
	13	0,746	-0,755		0,043
	14	1,078	-1,078		0,088
	15	0,683	-0,683		-0,044
	16	1,454	-1,454		0,016
	17	1,075	-1,075		-0,094
	18	0,698	-0,698		-0,070
	19	0,644	-0,644		-0,048
	20	0,886	-0,945		0,016
	21	0,788	-0,808		0,007
	22	0,826	-0,825		-0,002
	23	0,785	-0,785		-0,023
	24	0,887	-0,887		-0,077
	25	1,042	-1,051		-0,013
	26	1,220	-1,231		-0,006
	27	1,495	-1,496		-0,035
	28	0,098	-0,309		0,093
	29	0,337	-0,531		0,127
	30	1,474	-1,500		0,024
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>					
Mai	1	0,647	-0,742		0,060
2000	2	0,794	-0,875		0,076
	3	0,969	-1,011		0,049
	4	0,598	-0,618		0,013
	5	1,622	-1,632		0,004
	6	1,127	-1,129		-0,043
	7	1,272	-1,359		-0,022
	8	1,135	-1,135		-0,018
	9	1,492	-1,492		-0,004
	10	1,388	-1,388		-0,033
	11	1,365	-1,365		-0,029
	12	1,202	-1,202		-0,015

Mois	Jour	Zone B-A	Zone C-B	Zone D ₁ -C	Zone D ₂ -C
		sédimentaire journalier calculé le long du profil ΔQJ_P m^3/m linéaire			
	13	1,119	-1,142		-0,011
	14	0,008	-0,008		-0,009
	15	0,048	-0,048		0,001
	16	0,042	-0,042		-0,001
	17	0,062	-0,065		0,003
	18	0,037	-0,066		0,021
	19	0,005	-0,054		0,041
	20	0,022	-0,022		0,008
	21	0,019	-0,019		0,005
	22	0,000	0,000		0,000
	23	0,000	0,000		-0,009
	24	0,000	0,000		-0,002
	25	0,000	0,000		0,000
	26	0,000	0,000		-0,058
	27	0,000	-0,230		0,230
	28	0,000	0,000		0,000
	29	0,000	0,000		0,000
	30	0,000	0,000		0,000
	31	0,000	0,000		0,000

Annexe F : Volumes de sédiments journaliers transportés le long du littoral VJ_L pour les quatre stations de mesure.

Mois	Jour	Station A	Station B	Station C	Station D	Global
		Volume journalier calculé transporté le long du littoral VJ_L m^3				
Octobre 1999	24	10,447	6,096	37,055	-0,880	52,718
	25	12,686	8,884	5,128	-1,612	25,086
	26	9,865	9,084	4,470	-1,189	22,230
	27	8,231	-0,730	3,194	-1,023	9,673
	28	7,059	-4,315	3,089	-0,790	5,043
	29	13,557	29,042	5,215	-0,800	47,013
	30	21,064	85,260	4,757	-0,370	110,711
	31	15,239	53,488	3,534	-0,139	72,123
Novembre 1999	1	-0,623	0,000	0,000	0,000	-0,623
	2	-1,238	73,262	7,236	-0,229	79,031
	3	-1,974	22,237	2,882	-0,456	22,689
	4	-2,744	1,000	2,875	-0,727	0,404
	5	-2,102	2,387	2,447	-1,011	1,721
	6	9,969	-1,425	3,098	-0,775	10,868
	7	-9,700	-27,517	3,776	-0,765	-34,207
	8	-31,517	-154,793	-2,029	-1,883	-190,222
	9	-58,048	-202,395	-11,259	-1,890	-273,592
	10	6,211	-441,447	-16,744	1,316	-450,664
	11	16,787	-92,177	-0,291	0,090	-75,591
	12	37,027	20,717	5,062	-0,545	62,261
	13	22,924	145,672	8,543	-2,481	174,659
	14	18,003	84,709	-0,588	-2,993	99,130
	15	12,274	4,101	0,768	-1,395	15,748
	16	8,753	11,514	0,380	-0,979	19,668
	17	15,671	2,803	1,408	-0,480	19,403
	18	-0,645	9,855	4,477	-0,343	13,344
	19	9,323	-40,100	-2,973	-1,611	-35,361
	20	9,991	-0,883	3,936		13,044
	21	10,292	-0,697	4,381		13,976
	22	1,859	-0,782	3,882		4,960
	23	7,365	1,003	0,002		8,369
	24	9,440	0,537	-0,194		9,783

Mois	Jour	Station A	Station B	Station C	Station D	Global
		Volume journalier calculé transporté le long du littoral VJ_L m^3				
	25	11,329	0,047	1,640		13,015
	26	24,433	0,298	1,305		26,036
	27	29,764	-0,031	5,674		35,407
	28	70,720	-1,169	10,261		79,812
	29	53,577	-4,982	20,221		68,817
	30	19,728	24,171	6,441		50,340
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>						
Décembre 1999	1	9,207		3,817		13,024
	2	-50,572		-4,361		-54,933
	3	-25,445		-4,018		-29,463
	4	7,131		-0,618		6,513
	5	-2,343		1,960		-0,383
	6			-20,261		-20,261
	7			-17,659		-17,659
	8			-0,008		-0,008
	9			165,446		165,446
	10	2,014	280,068	3771,176		4053,258
	11	-5,765	495,367	1936,909		2426,511
	12	-4,007	1,577	1,338		-1,092
	13	-1,454	4,128	0,605		3,279
	14	-0,175	3,496	-0,918		2,403
	15	0,762	3,734	-0,301		4,194
	16	0,949	2,923	-0,300		3,571
	17	65,117	25,058	1,014		91,188
	18	489,224	84,804	24,876		598,904
	19	-8,222	10,161	1,678		3,617
	20	-3,975	-5,134	-2,822		-11,931
	21	-10,479	-38,691	-14,493		-63,663
	22		-34,458	-10,776		-45,234
	23	-13,140	-46,085	-16,896		-76,121
	24	-5,523	0,427	2,024		-3,072
	25	-3,315	3,710	-0,444		-0,049
	26	-4,387	0,684	1,767		-1,937
	27	-5,356	0,658	-0,022		-4,719

Mois	Jour	Station A	Station B	Station C	Station D	Global
		Volume journalier calculé transporté le long du littoral VJ_L m^3				
	28	-5,925	0,333	-1,115		-6,707
	29	-5,879	2,664	-1,934		-5,149
	30	-5,562	-62,261	-19,286		-87,109
	31		-55,301	-16,170		-71,472
Janvier 2000	1	7,528	-8,567	-2,787		-3,826
	2	9,588	-54,842	-21,147		-66,401
	3	10,625	-48,059	-16,385		-53,818
	4	11,278	-1,136	-4,205		5,937
	5	12,003	-4,644	-2,192		5,168
	6	12,774	2,924	-1,120		14,578
	7	14,819	2,142	-2,111		14,851
	8	15,877	3,382	-1,331		17,928
	9	16,972	5,486	-0,221		22,236
	10	18,164	3,074	-0,377		20,861
	11	19,280	1,702	-0,357		20,625
	12	20,477	2,121	-1,114		21,484
	13	21,543	-1,813	-2,090		17,640
	14	22,616	-3,756	-1,267		17,593
	15	23,851	20,906	3,662		48,419
	16	25,303	15,804	8,708		49,815
	17	26,934	-1,965	0,474		25,444
	18	28,774	-25,816	-7,947		-4,989
	19	30,527	0,498	0,766		31,792
	20	31,964	43,189	1,786		76,939
	21	33,192	92,757	10,869		136,817
22	35,156	6,387	0,677		42,221	
23	40,572	1,338	0,590		42,500	
24	43,297	1,841	-0,329		44,808	
25		1,911	0,491		2,402	
26		2,503	197,176		199,678	
27		7,657			7,657	
28		4,267			4,267	
29						

Mois	Jour	Station A	Station B	Station C	Station D	Global
		Volume journalier calculé transporté le long du littoral VJ_L m^3				
	30			-0,792		-0,792
	31			0,309		0,309
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>						
Février	1		0,007	-1,500		-1,493
2000	2		-1,360	1,194		-0,166
	3		0,287	2,033	0,938	3,258
	4		-34,691	-9,128	-0,517	-44,336
	5		-15,419	-1,692	-1,625	-18,736
	6		11,583		-0,001	11,582
	7		1,512		0,133	1,645
	8		-3,600		0,368	-3,232
	9		-2,322		0,280	-2,042
	10		-67,675		-4,127	-71,803
	11		-125,206		-6,503	-131,709
	12		-6,553		-1,594	-8,148
	13		-10,424	-3,122	-0,901	-14,446
	14		-16,437	-3,629	-0,476	-20,541
	15		-1,761	-1,084	-0,930	-3,775
	16		-3,092		0,143	-2,949
	17		-3,902		0,292	-3,611
	18		-20,370		0,175	-20,195
	19		0,339		0,547	0,886
	20		-5,553		-0,297	-5,850
	21		1,364	6,774	1,376	9,514
	22		2,841		1,390	4,231
	23		4,553		1,528	6,081
	24		-56,997		-2,040	-59,037
	25		-44,145		-1,446	-45,591
	26		7,785		0,312	8,097
	27		-0,069		-0,413	-0,482
	28		1,883	0,725	-0,090	2,518
	29		5,993		1,139	7,131
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>						

Mois	Jour	Station A	Station B	Station C	Station D	Global
		Volume journalier calculé transporté le long du littoral VJ_L m^3				
Mars 2000	1		4,206	0,823	-0,047	4,983
	2		-15,655		-0,898	-16,553
	3		-37,825		-2,035	-39,860
	4		1,905		0,441	2,345
	5		0,563		-0,029	0,534
	6		-4,180		0,673	-3,507
	7		13,412	8,012	1,499	22,923
	8		10,799	4,514	0,839	16,152
	9		5,397	1,511	0,531	7,440
	10		2,262	1,199	0,257	3,718
	11		1,080		0,081	1,162
	12		-2,845	-2,116	-0,491	-5,452
	13		1,123	0,880	0,023	2,025
	14		10,130	7,201	1,708	19,039
	15		0,466	-0,881	-0,737	-1,153
	16		5,825		-1,767	4,058
	17		-48,831		-2,177	-51,008
	18		1,070	1,726	0,765	3,560
	19		5,097	4,422	1,073	10,591
	20		17,249	3,209	1,088	21,546
	21		8,322	4,232	0,449	13,004
	22		2,238	0,330	0,280	2,849
	23		12,869	9,350	1,001	23,220
	24		7,174	5,167	0,789	13,130
	25		-346,383		1,340	-345,043
	26					
	27					
	28					
	29					
	30					
	31					
Avril 2000	1					
	2		14,668	16,997	5,314	36,978

Mois	Jour	Station A	Station B	Station C	Station D	Global
		Volume journalier calculé transporté le long du littoral VJ_L m^3				
	3		-10,501		0,735	-9,765
	4		-4,320		2,750	-1,570
	5		-7,987		2,089	-5,897
	6		6,164		3,349	9,513
	7		4,916	4,834	3,193	12,942
	8		112,697		4,026	116,723
	9		259,206		6,201	265,407
	10		60,093		-3,717	56,376
	11		67,049	-0,461	-1,520	65,068
	12		101,753	-5,437	1,117	97,433
	13		139,107	3,184	1,846	144,138
	14		155,257		5,143	160,399
	15		129,751		-2,709	127,043
	16		116,747		1,821	118,568
	17		108,253		-4,146	104,107
	18		110,066		-4,236	105,830
	19		112,183		-0,153	112,029
	20		112,310	-2,827	-0,831	108,652
	21		118,312	-0,118	-0,087	118,107
	22		139,374	1,797	0,219	141,390
	23		165,747		-0,389	165,358
	24		143,142		0,565	143,708
	25		139,888	3,554	0,799	144,241
	26		150,270	3,409	1,459	155,138
	27		192,299	16,225	5,690	214,213
	28		111,800	-17,690	-3,845	90,265
	29		144,818	-7,666	-3,152	134,000
	30		123,485	7,643	1,236	132,364
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>						
Mai	1		192,558	6,900	-0,293	199,165
2000	2		157,300	2,559	-0,611	159,248
	3		157,284	1,470	0,047	158,801
	4		178,924	4,078	0,027	183,028
	5		206,564	9,620	1,370	217,553

Mois	Jour	Station A	Station B	Station C	Station D	Global
		Volume journalier calculé transporté le long du littoral VJ_L m^3				
	6		204,973	10,165	2,375	217,514
	7		160,546	0,699	1,222	162,466
	8		159,602		2,605	162,207
	9		133,803		2,664	136,468
	10		108,162		-0,154	108,008
	11		107,911		0,725	108,637
	12		133,360		0,548	133,908
	13		106,457	0,410	-0,526	106,341
	14		0,855		-0,652	0,204
	15		5,119		-0,281	4,838
	16		4,409		-0,383	4,026
	17		9,194	2,452	0,395	12,042
	18		4,580	0,992	-0,003	5,568
	19		1,805	-0,119	-0,678	1,009
	20		4,034		-0,286	3,748
	21		1,527		-0,527	0,999
	22					
	23				-1,181	-1,181
	24				-0,219	-0,219
	25					
	26				-1,937	-1,937
	27			-34,736		-34,736
	28					
	29					
	30					
	31					

Annexe G: Débits sédimentaires mensuels le long du littoral QM_L et le long du profil QM_P calculés à partir du modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)* pour les quatre stations de mesure.

Mois	Station A		Station B		Station C		Station D	
	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du littoral	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du profil	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du littoral	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du profil	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du littoral	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du profil	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du littoral	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du profil
	QM_L	QM_P	QM_L	QM_P	QM_L	QM_P	QM_L	QM_P
	m^3/m linéaire	m^3/m linéaire						
Octobre 1999	4,00	-0,50	9,05	-3,80	3,68	-0,80	-0,75	0,05
Novembre 1999	3,24	-2,53	-7,97	-11,27	0,90	-1,35	-0,77	-0,35
Décembre 1999	5,39	1,69	11,94	-26,96	82,54	-83,35		
Janvier 2000	7,25	2,14	0,96	-2,85	2,53	-3,25		
Février 2000			-4,70	-3,34	-0,39	-0,89	-0,38	-2,08
Mars 2000			-5,34	3,92	1,37	-0,73	0,16	-6,89
Avril 2000			39,01	24,92	0,72	-1,08	0,67	-0,60
Mai 2000			37,62	22,10	0,17	-1,74	0,16	-0,54

Annexe H : Bilans sédimentaires mensuels dans le profil ΔQM_P pour les quatre stations de mesure.

Mois	Zone B-A	Zone C-B	Zone D ₁ -C	Zone D ₂ -C
	Bilan	Bilan	Bilan	Bilan
	sédimentaire	sédimentaire	sédimentaire	sédimentaire
	mensuel calculé le long du profil			
	ΔQM_p	ΔQM_p	ΔQM_p	ΔQM_p
	m^3/m linéaire	m^3/m linéaire	m^3/m linéaire	m^3/m linéaire
Octobre 1999	-3,30	3,00	0,85	
Novembre 1999	-8,74	9,92	1,00	
Décembre 1999	-28,65	-56,39		83,35
Janvier 2000	-4,99	-0,40		3,25
Février 2000	-3,34	2,45		-1,19
Mars 2000	3,92	-4,65		-6,16
Avril 2000	24,92	-26,00		0,48
Mai 2000	22,10	-23,84		1,20

Annexe I : Volumes de sédiments mensuels transportés le long du littoral VM_L pour les quatre stations de mesure.

Mois	Station A	Station B	Station C	Station D	Global
	Volume mensuel calculé transporté le long du littoral VM_L m^3				
Octobre 1999	380,32	723,89	257,46	-26,36	1335,31
Novembre 1999	307,92	-637,35	63,20	-27,09	-293,32
Décembre 1999	511,97	955,17	5777,97		1041,99
Janvier 2000	688,61	76,71	176,85		942,17
Février 2000		-375,87	-27,34	-13,25	-416,47
Mars 2000		-427,22	96,06	5,77	525,70
Avril 2000		3120,56	50,24	23,55	3194,36
Mai 2000		3009,90	11,59	5,49	3026,99

Annexe J : Débits sédimentaires annuels (Q_L et Q_P) et pour la durée de la campagne de mesure (QC_L et QC_P) calculés à partir du modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)* pour les quatre stations de mesure.

	Station A		Station B		Station C		Station D	
	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du littoral <i>m³/m linéaire</i>	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du profil <i>m³/m linéaire</i>	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du littoral <i>m³/m linéaire</i>	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du profil <i>m³/m linéaire</i>	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du littoral <i>m³/m linéaire</i>	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du profil <i>m³/m linéaire</i>	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du littoral <i>m³/m linéaire</i>	Débit sédimentaire mensuel calculé le long du profil <i>m³/m linéaire</i>
Campagne	<i>Q_{C_L}</i>	<i>Q_{C_P}</i>	<i>Q_{C_L}</i>	<i>Q_{C_P}</i>	<i>Q_{C_L}</i>	<i>Q_{M_P}</i>	<i>Q_{M_L}</i>	<i>Q_{M_P}</i>
221 jours	35,86	1,58	67,62	5,20	131,00	-133,74	-0,02	-14,56
Annuel	<i>Q_L</i>	<i>Q_P</i>	<i>Q_L</i>	<i>Q_P</i>	<i>Q_L</i>	<i>Q_P</i>	<i>Q_L</i>	<i>Q_P</i>
365 jours	52,73	2,32	99,43	7,65	192,65	-196,67	-0,33	-21,41

Annexe K : Bilans sédimentaires annuels le long du profil ΔQ_P et pour la durée de la campagne de mesure ΔQ_{C_P} calculés à partir du modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)* pour les quatre stations de mesure.

	Zone B-A Bilan sédimentaire le long du profil <i>m³/m linéaire</i>	Zone C-B Bilan sédimentaire le long du profil <i>m³/m linéaire</i>	Zone D-C Bilan sédimentaire le long du profil <i>m³/m linéaire</i>
Campagne	ΔQ_{C_P}	ΔQ_{C_P}	ΔQ_{C_P}
221 jours	3,62	-138,94	119,18
Annuel	ΔQ_P	ΔQ_P	ΔQ_P
365 jours	5,32	-204,32	175,26

Annexe L : Volumes de sédiments annuels transportés le long du littoral V_L et pour la durée de la campagne de mesure VC_L calculés à partir du modèle courantométrique de *Madsen and Grant (1976)* pour les quatre stations de mesure.

	Station A Volume transporté le long du littoral m^3	Station B Volume transporté le long du littoral m^3	Station C Volume transporté le long du littoral m^3	Station D Volume transporté le long du littoral m^3	Global Volume transporté le long du littoral m^3
Campagne 221 jours	VC_L 11110	VC_L 13902	VC_L 8319	VC_L -1	VC_L 33330
Annuel 365 jours	V_L 16338	V_L 20444	V_L 12234	V_L -1	V_L 49015

Annexe M : Analyses granulométriques.

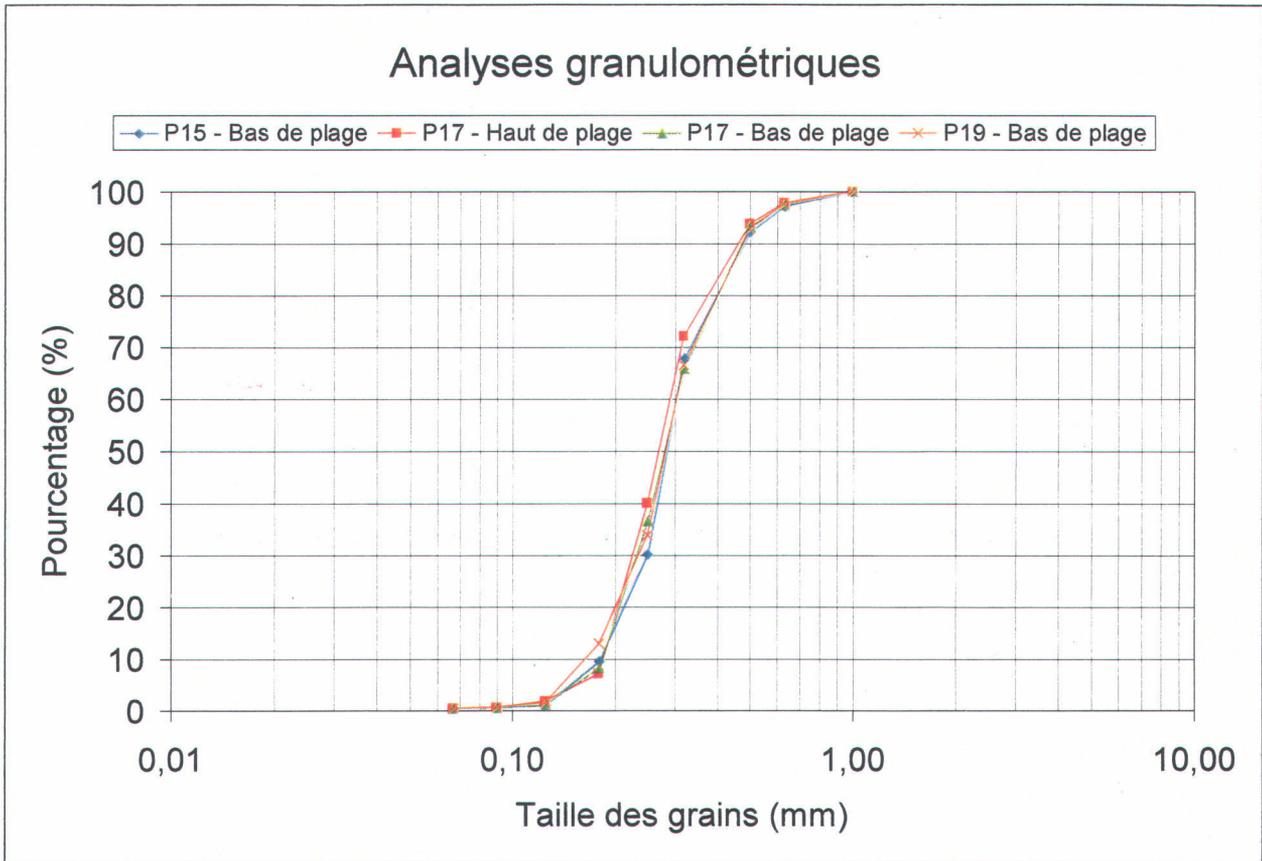


Fig. M.1 - Graphique des analyses granulométriques réalisées en bas et en haut de plage près de la ligne de mesure P15 (d'après Rapport interne APAL, 2000).