

ANALYSE DE L'EFICACITÉ DE LA MÉTHODE DE PROTECTION DU LITTORAL: SYSTÈME D'ÉPIS MALTAIS-SAVARD (SEMS)

Banc d'essai de Pointe-aux-Outardes, péninsule Manicouagan, Québec, Canada

B. BOCZAR-KARAKIEWICZ, Ph.D., océanographe¹

W. ROMANCZYK, Ph.D., océanographe¹

N. ROY, géomorphologue, M.Sc.A. ²

¹ ISMER, Université du Québec à Rimouski

310, Allée des Ursulines
Rimouski, Québec, Canada
G5L 3A1

² Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire

9, Place LaSalle, bureau 101
Baie-Comeau, Québec, Canada
G4Z 1J8



Octobre 2002

© Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire

Imprimé au Canada

ISBN x-xxxxxxx-x Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Québec, 2002

Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Canada, 2002

*Équipe de travail***Équipe de l'Institut des sciences de la mer (Analyse et rédaction)**

Barbara Boczar-Karakiewicz	Professeur, océanographie physique, PhD
Wojciech Romanczyk	Associé de recherche, océanographie physique, PhD
Michel Morissette	Agent technique de recherche, B.Sc.

Équipe du Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire (Suivi topographique, cartographie et rédaction)

Nicolas Roy	Directeur de projet, M.Sc.A., Génie Géologique
Dominic Francoeur	cartographie, B.Sc. géographie physique
Nancy Imbeault	Secrétaire administrative

Concepteurs de la méthode (Construction des ouvrages)

Lucien Maltais	Concepteur
Jean-Pierre Savard	Concepteur

Groupe conseil GENIVAR (Suivi hydrodynamique)

Jean Domingue	Directeur de projet, M.Sc.
Tony St-Pierre	Chargé de projet, ing. f.
Derek Lynck	Technicien
Claude Lapointe	Technicien

Partenaires financiers

Conseil régional de développement de la Côte-Nord

Avant-propos

Les ouvrages du type système d'épis selon Maltais-Savard (SEMS), du nom des concepteurs, s'inscrivent au niveau des méthodes dites "douces" de protection du littoral maritime. Les éléments de ces ouvrages semi-perméables captent une partie des sédiments apportés par les courants générés par les vagues et les marées. Ces sédiments contribuent graduellement à la reconstruction de la plage dans le secteur d'implantation des ouvrages.

Dans l'environnement littoral de la Côte-Nord, la plage constitue un élément essentiel à la protection des talus sablo-argileux. Ces derniers, exposés directement à l'action dynamique des vagues et des courants de marée de vives-eaux, ne peuvent généralement pas résister au processus d'érosion. Les sédiments érodés en provenance des talus sont entraînés par la dérive littorale et s'achèment la plupart du temps en grande partie, vers les zones plus profondes par le biais de grandes rivières telles que celles de la Péninsule Manicouagan (rivières Outardes et Manicouagan). Le budget sédimentaire du littoral à moyen et à long terme ne peut être que négatif.

L'installation de SEMS permet de retenir au niveau de la plage une partie des sédiments érodés. L'autre partie, due à la perméabilité des ouvrages, continue de migrer avec la dérive littorale le long du rivage. Finalement, une fois les SEMS comblés, la dérive littorale n'est que très peu influencée par la présence de ces aménagements. Alors, seules des échanges sédimentaires sporadiques entre les accumulations et les pertes négligeables peuvent continuer d'influencer localement et partiellement le régime sédimentaire. En hiver et tôt au printemps, les SEMS sont relativement sensibles aux glaces dérivantes et aux bris; un entretien annuel doit être planifié même si occasionnellement celui-ci s'avère non nécessaire.

Généralement, il existe une possibilité que le SEMS déclenche une baisse du niveau de la plage aux environs du site d'implantation. L'effet d'accumulation, par l'augmentation du niveau de la plage dans la région de SEMS, serait mis en cause. Il est jugé possible qu'un impact temporaire et de courte durée puisse arriver, mais que celui-ci ne représente pas un danger réel dans la mesure où une quantité suffisante de sable est disponible sur le littoral. Par ailleurs, cela dépend aussi du nombre de SEMS installés dans le même secteur du littoral pour une période donnée. S'il y avait un impact négatif, le rechargement de la zone protégée, suite à l'installation des ouvrages SEMS, permettrait de contourner ce risque. Le Guide de construction (Roy, N. en préparation) indique les limites et les avantages de la méthode afin de définir le niveau de risque local et acceptable de l'impact négatif associé à l'installation de ce type d'ouvrage de protection du littoral.

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIF DE L'ÉTUDE.....	2
3. EXPÉRIMENTATION PRÉLIMINAIRE DES CONCEPTEURS DU SEMS (BAIE SAINT-LUDGER (BSL), 1992-1999).....	2
3.1 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIMENTATION PRÉLIMINAIRE.....	2
3.2 MODÈLE CONCEPTUEL DE FONCTIONNEMENT DU SEMS	6
4. LOCALISATION DU SITE D'EXPÉRIMENTATION.....	10
PROBLÉMATIQUE D'ÉROSION DU SECTEUR DE LA POINTE-AUX-OUTARDES	
.....	11
5.1 MORPHOLOGIE ET DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE	11
5.2 HISTORIQUE GÉOMORPHOLOGIQUE DU SITE D'EXPÉRIMENTATION	11
6. MÉTHODOLOGIE.....	13
6.1 ÉLÉMENTS CLIMATIQUES ET HYDRODYNAMIQUES	13
6.1.1. <i>Prédictions théoriques de la marée.....</i>	<i>13</i>
6.1.2. <i>Directions et vitesses des vents.....</i>	<i>14</i>
6.1.3. <i>Variation des niveaux d'eau</i>	<i>14</i>
6.1.4. <i>Prises de vue vidéo de la zone d'expérimentation pendant les tempêtes.....</i>	<i>16</i>
6.1.5. <i>Action des glaces sur le site expérimental.....</i>	<i>16</i>
6.2 MESURES DES ÉLÉMENTS MORPHOLOGIQUES	16
7. RÉSULTATS.....	18
7.1 ÉLÉMENTS CLIMATIQUES ET HYDRODYNAMIQUES	18
7.1.1. <i>Prédictions théoriques de la marée.....</i>	<i>18</i>
7.1.2. <i>Directions et vitesses des vents.....</i>	<i>21</i>
7.1.3. <i>Variation des niveaux d'eau</i>	<i>21</i>
7.1.4. <i>Prises de vue vidéo des tempêtes.....</i>	<i>35</i>
7.1.5. <i>Action des glaces sur le site expérimental.....</i>	<i>36</i>
7.2 VARIATIONS MORPHOLOGIQUES DE LA PLAGE.....	39
7.2.1. <i>Analyse de la variabilité de la plage en deux dimensions spatiales (2D).....</i>	<i>40</i>
7.2.2. <i>Analyse de la variabilité morphologique de la plage en trois dimensions spatiales (3D)</i>	<i>51</i>
8. DISCUSSION.....	54
8.1 SYNTHÈSE DE LA VARIABILITÉ DE LA TOPOGRAPHIE DE LA PLAGE EN 2001	54
8.2 RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES DE L'EXPÉRIMENTATION EN 2002.....	57

9. CONCLUSIONS.....	60
9.1 MARÉE THÉORIQUE	60
9.2 LES VENTS	60
9.3 VARIATION DES NIVEAUX D'EAU	60
9.4 OBSERVATIONS PROVENANT DES EXTRAITS VIDÉO.....	61
9.5 ACTION DES GLACES SUR LES OUVRAGES.....	61
9.6 VARIATIONS MORPHOLOGIQUES DE LA PLAGE.....	61
10. RECOMMANDATIONS DE RECHERCHE	63
11. RÉFÉRENCES.....	64
A. APPENDICE.....	65
A.1. RÉSULTATS DES ANALYSES DES ÉLÉMENTS HYDRODYNAMIQUES.....	65
A.2. RÉSULTATS DES MESURES MORPHOLOGIQUES	81

Liste des figures

Figure 1: Le système d'épis Maltais-Savard original situé dans la Baie Saint-Ludger - concept de 1999 (Photo : B. Karakiewicz).....	4
Figure 2: Système d'épis Maltais-Savard modifié situé à la Pointe-aux-Outardes - concept de 2001 (Photo : N. Roy).....	5
Figure 3: Concept de fonctionnement de l'épi perméable simple en présence de vagues et de courants - écran poreux et rugueux.....	7
Figure 4 Concept de fonctionnement (photo à l'appui) de l'épi perméable double en présence de vagues et de courants - filtre poreux et rugueux.....	8
Figure 5: Le Système d'épis de Maltais et Savard (SEMS) - projet original de la Baie-Saint-Ludger	9
Figure 6: Carte de localisation du banc d'essai SEMS pour contrer l'effet de bout d'enrochement, Pointe-aux-Outardes, Québec, Canada.....	10
Figure 7: Présentation de la zone expérimentale (photographie aérienne prise le 25 septembre 2002).....	11
Figure 8: Vue aérienne oblique (octobre 2000) du secteur à protéger (effets d'érosion dans la zone de bout d'enrochement du talus).....	12
Figure 9: Appareil de type Dobie qui sert à mesurer la pression hydrostatique engendrée par les vagues et les marées.....	14
Figure 10: Localisation des poteaux de bois servant de repères topographiques sur le site de banc d'essai et la position de l'appareil de mesure de pression hydrostatique « DOBIE »	17
Figure 11: Prédications de la marée (valeurs géoréférencées par rapport au zéro géodésique).....	19
Figure 12: Directions et vitesses du vent sous forme de graphique vectoriel (observations réalisées par le Service métrologique de l'aéroport de Baie-Comeau)	20
Figure 13a: Niveaux d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents).....	22

Figure 13b: Niveaux d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents).....	23
Figure 13c: Niveaux d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents).....	24
Figure 14: Comparaison des niveaux d'eau prédits et mesurés.....	26
Figure 15: Résultat des mesures et l'analyse spectrale pour le 18 octobre 2002 : (a) série temporelle de pression, (b) spectre de fréquences de pression, de vagues et le spectre de la résolution du capteur de la pression.....	27
Figure 16: Résultat des mesures et l'analyse spectrale pour le 17 octobre 2002 : (a) série temporelle de pression, (b) spectre de fréquences de pression, de vagues et le spectre de la résolution du capteur de la pression.....	28
Figure 17: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'août 2001 (extrait des résultats complets).....	30
Figure 18: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de septembre 2001 (extrait des résultats complets)	31
Figure 19: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (extrait des résultats complets).....	32
Figure 20: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de novembre 2001 (extrait des résultats complets).....	33
Figure 21: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses de mesures de terrain pour le mois de décembre 2001 (extrait des résultats complets).....	34
Figure 22: Réfraction des vagues générées par un vent du SO: (a) vagues de période de 2 s, (b) vagues de période de 10 s, d'après Ouellet (Roche Itée, rapport pour MTQ 1997)	35
Figure 23: Photographies de l'état des glaces sur le site expérimental du mois de décembre au mois d'avril 2002.....	38
Figure 24: Carte de localisation des profils des mesures morphologiques.....	39
Figure 25 - Photographie de l'épi rocheux (à l'ouest de la zone du suivi) en présence des cinq poteaux du suivi	41
Figure 26: Résultats des mesures topographiques - profil E3-E5 (ouest)	42

Figure 27: Résultats des mesures topographiques - profil E1-E3 (est).....	43
Figure 28: Résultats des mesures topographiques - profil P 51-55.....	44
Figure 29: Résultats des mesures topographiques - profil P 30-34.....	45
Figure 30: Résultats des mesures topographiques - profil P 12-16.....	46
Figure 31: Résultats des mesures topographiques - profil P 6-10.....	46
Figure 32: Résultats des mesures topographiques - profil P 1-5.....	47
Figure 33: Résultats des mesures topographiques et du niveau d'eau avant la tempête du 17 octobre 2001 - profil P 1-5.....	48
Figure 34: Résultats des mesures topographiques et du niveau d'eau après la tempête du 17 octobre 2001 - profil P 1-5.....	49
Figure 35: Résultats des mesures topographiques - profil P 76-80.....	50
Figure 36: Résultats des mesures topographiques - profil R4-R6.....	51
Figure 37: Topo-bathymétrie de la région expérimentale en coordonnées géographiques transformées - résultats des mesures du 18 octobre 2001	52
Figure 38: Topo-bathymétrie de la région expérimentale en coordonnées cartésiennes après la rotation - résultats des mesures du 18 octobre 2001	53
Figure 39: Topo-bathymétrie de la région expérimentale en 3D - résultats des mesures du 18 octobre 2001	54
Figure 40 - Plantation d'élyme réalisée à la mi-juin entre les SEMS 2 et 3.....	57
Figure 41 - Comparatif photographique du banc d'essai expérimental de l'automne 2000 (novembre) et de l'automne 2002 (fin septembre).....	58
Figure 42 - Profil de plage montrant l'accrétion de la plage à un niveau supérieur par rapport au profil de plage le plus haut enregistré en 2001 (profil P1-5).....	59
Figure A.1a: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'août 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents).....	66
Figure A.1b: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'août 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents).....	67

- Figure A.1c: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'août 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 68
- Figure A.2a: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de septembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 69
- Figure A.2b: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de septembre 2001(compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 70
- Figure A.2c: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de septembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 71
- Figure A.3a: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 72
- Figure A.3b: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 73
- Figure A.3c: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 74
- Figure A.4a: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de novembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 75
- Figure A.4b: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de novembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 76
- Figure A.4c: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de novembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 77
- Figure A.5a: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de décembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)..... 78

Figure A.5b: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de décembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents).....	79
Figure A.5c: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de décembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents).....	80
Figure A.6: Profil E3-E5 (ouest): résultats des mesures de 84 campagnes de terrain (du 26 juin au 28 novembre 2001).....	82
Figure A.7: Profil E1-E3 (est): résultats des mesures de 84 campagnes de terrain (du 26 juin au 28 novembre 2001).....	82
Figure A.8: Profil P 61-64: résultats des mesures de 16 campagnes de terrain (du 25 juin au 23 juillet 2001).....	83
Figure A.9: Profil P 56-60: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001).....	83
Figure A.10: Profil P 51-55: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001).....	84
Figure A.11: Profil P 46-50: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001).....	84
Figure A.12: Profil P 41-45: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001).....	85
Figure A.13: Profil P 36-40: résultats des mesures de 89 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001).....	85
Figure A.14: Profil P 30-34: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001).....	86
Figure A.15: Profil P 24-28: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001).....	86
Figure A.16: Profil P 18-22: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001).....	87
Figure A.17: Profil P 12-16: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001).....	87
Figure A.18: Profil SEMS3 (ouest): résultats des mesures de 91 campagnes de terrain (du 26 juin au 9 décembre 2001).....	88

Figure A.19: Profil SEMS3 (est): résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 28 juin au 9 décembre 2001).....	88
Figure A.20: Profil P 6-10: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)	89
Figure A.21: Profil SEMS2 (ouest): résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 26 juin au 9 décembre 2001)	89
Figure A.22: Profil SEMS2 (est): résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 26 juin au 9 décembre 2001).....	90
Figure A.23: Profil P 1-5: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)	90
Figure A.24: Profil SEMS1 (ouest): résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 26 juin au 9 décembre 2001)	91
Figure A.25: Profil SEMS1 (est): résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 26 juin au 9 décembre 2001).....	91
Figure A.26: Profil P 76-80: résultats des mesures de 87 campagnes de terrain (du 28 juin au 9 décembre 2001).....	92
Figure A.27: Profil R1-R3: résultats des mesures de 88 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)	92
Figure A.28: Profil R4-R6: résultats des mesures de 69 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001).....	93

Liste des tableaux

Tableau 1 - Prise des données réalisée par la jauge à pression en l'an 2001.....	15
Tableau 2 – Sommaire des paramètres sur les prises vidéo.	36

Remerciements

L'équipe de travail (ZIP et ISMER) remercie particulièrement le Fonds d'actions québécois pour le développement durable pour leur contribution majeure à ce projet. Nous remercions aussi le Conseil régional de développement de la Côte-Nord et ses partenaires pour avoir rendu possible la réalisation de ce projet.

1. Introduction

L'équipe de l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER) de l'Université du Québec, en partenariat avec le Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire et le comité d'experts sur l'érosion des berges du Conseil régional de développement de la Côte-Nord (CRD), ont le mandat de réaliser un projet d'étude. Le projet porte sur l'évaluation de l'efficacité d'une technique de restauration des plages. Cette méthode a pour but de contrer l'érosion d'un littoral sablonneux dominé par les vagues et les marées et, plus particulièrement dans le cas présent, de compenser l'effet de bout¹ généré par les enrochements.

Ce projet poursuit les travaux déjà entrepris en l'an 2000 sur une analyse qualitative et quantitative de fonctionnement d'un nouveau type d'ouvrage de protection du littoral, constitué d'un système d'épis, nommé Système d'épis Maltais-Savard (SEMS). Il a été lancé par le Comité ZIP et le concept original de ce système a été inventé par MM Lucien Maltais et Jean-Pierre Savard. Le concept SEMS provient des résultats des essais de terrain d'une durée de huit années (1992-1999) sur une plage localisée dans la Baie Saint-Ludger (BSL), de la municipalité de Pointe-aux-Outardes, Québec, Canada.

Cette première étape d'expérimentation a été suivie par trois volets d'étude. Le premier rapport de ces travaux s'intitule "*L'évolution de la technique de restauration de plages du SEMS et analyse des composantes contrôlant la morphosédimentologie des plages*" (Bernatchez 2000). Le second rapport a pour titre "*Modèle conceptuel de fonctionnement d'un ouvrage de protection du littoral : système d'épis Maltais-Savard*" (Boczar-Karakiewicz et Romanczyk 2000). Suite à la réalisation de ces deux premiers rapports, deux bancs d'essai ont été mis en place par le Comité ZIP. L'analyse des résultats de l'expérimentation a été préparée par une équipe de consultants (Genivar 2002).

Un troisième site expérimental, dont les résultats et l'analyse sont présentés dans ce rapport, est localisé également à Pointe-aux-Outardes (PAO). Ce site se situe sur une plage soumise à une érosion sévère occasionnée par un effet de bout d'enrochement. Selon le comité d'expert du CRD, ce type de problématique est généralisé à l'échelle de la Côte-Nord et des solutions de protection doivent être identifiées.

Les travaux antérieurs de l'ISMER ont énoncé les bases théoriques de même que le concept de fonctionnement qualitatif de l'ouvrage dans le contexte du premier site expérimental (BSL). Les résultats de ces analyses ont permis de proposer un modèle conceptuel de l'ouvrage SEMS qui pourra être généralisé pour des applications futures dans des conditions hydrodynamiques et climatiques différentes (ISMER, 2000).

¹ Effet d'érosion accrue par la présence d'un enrochement dans les deux zones de ses extrémités.

Le présent rapport contient une analyse quantitative de l'efficacité de la méthode SEMS pour contrer les effets négatifs de bout de structures rigides de protection des berges. Cette étude est basée sur les résultats de mesures des éléments météorologiques (vitesse et direction du vent mesurées à l'aéroport de Pointe-Lebel), des données hydrodynamiques (niveaux d'eau mesurés et complétés par les prédictions théoriques des marées), des mesures des vagues et finalement de mesures morphométriques de la plage (variation de la topographie de la plage dans la zone d'expérimentation et dans les deux zones avoisinantes). Les résultats des analyses en deux (2D) et en trois dimensions spatiales (3D) sont accessibles sur le CD-ROM joint à ce rapport. L'analyse des résultats a permis d'évaluer le niveau d'ensablement des ouvrages de restauration de plage pendant la période libre des glaces de l'année 2001. Un disque compact contient aussi des prises vidéo de SEMS filmées durant les événements météorologiques les plus violents de la période de l'expérimentation. Finalement, une analyse qualitative de la prise des glaces et de la dérive de celles-ci, sur les structures au printemps, complète l'étude.

2. Objectif de l'étude

L'objectif de ce projet d'étude est de définir le niveau d'efficacité de la méthode SEMS à contrer l'érosion accrue et générée par les effets de bout d'enrochement installé le long d'un littoral sablonneux tel que retrouvé à plusieurs endroits sur la Côte-Nord. Présentement, la prolongation de l'empierrement à l'effet de bout dans les zones vulnérables, est généralement utilisée pour contrer ce phénomène et cela déplace plus loin le problème d'érosion de la berge pour chaque intervention. Aucune autre méthode contraignant l'effet de bout n'est actuellement connue et le développement de nouveaux outils de stabilisation n'est pas sans difficulté. L'utilisation d'un système d'épis (SEMS) pourrait permettre d'annuler l'effet accru de l'érosion ayant lieu de l'extrémité de l'enrochement vers le milieu naturel avoisinant, et voir même d'arrêter complètement l'érosion. Dans la mesure où cette démonstration serait réalisée, la méthode SEMS pourrait alors devenir un outil supplémentaire à l'arsenal des techniques de protection du littoral utilisé par les autorités responsables de la stabilisation du littoral maritime. Cette technique de protection pourrait annuler certains impacts négatifs des enrochements couramment observés.

3. Expérimentation préliminaire des concepteurs du SEMS (Baie Saint-Ludger (BSL), 1992-1999)

3.1 Résultats de l'expérimentation préliminaire

L'expérimentation de la méthode de protection a commencé en 1992 après plusieurs événements d'érosion menaçant la stabilité du talus, de la falaise et des maisons des riverains de Baie Saint-Ludger (BSL). L'origine du SEMS provient de l'observation du

fonctionnement d'un épi perméable simple formé par une rangée de troncs d'épinettes joints avec de la fascine tressée de ces arbres (méthode appliquée en pêche locale). Les observations montraient que cet épi de fascine provoquait une accumulation de sable sur la plage et augmentait ainsi la stabilité du talus en érosion situé derrière la plage.

Les premiers essais du SEMS en 1992-1993 ont démontré qu'un épi perméable (série de troncs d'épinettes, espacés de 70 à 90 cm et joints avec les têtes tressées des arbres installés perpendiculairement à la plage) amenait une faible accumulation de sable. Par contre, un épi perméable double (double rangée de troncs d'épinettes espacés de 60 cm et remplis de têtes d'épinettes) entraînait l'ensablement désiré du côté de l'attaque de vagues (ouest) mais créait une érosion prononcée du côté opposé (est)². Une atténuation de cette érosion a été obtenue par une implantation d'épis perméables doubles et obliques par rapport à la ligne côtière et pointant vers le sud-ouest (direction prédominante des vents et des vagues).

Des tentatives différentes de protection du littoral appliquées en 1993-1995, (installation d'une clôture à neige posée à la base de la falaise et construction d'un muret de bois constitué de madriers de 2"x4" enfoncés de 1 m dans le sédiment sur une longueur de 20 m), n'ont en partie pas résisté aux vagues des tempêtes ni à l'action des glaces et n'ont pas généré les effets escomptés d'ensablement de la plage. Le muret reconstruit et renforcé par des poches de sable et par des troncs d'épinettes avec quelques épis courts implantés du côté ouest a occasionné une accumulation du côté ouest, par contre, du côté est, la plage a été massivement érodée. Ces concepts différents de la phase d'expérimentation initiale ont été abandonnés.

En 1993-1996, des épis courts (doubles et perméables) partant de la base de la falaise jusqu'à la flexure du profil de la plage ont été de nouveau implantés en pointant cette fois légèrement vers l'est. Ces épis occasionnaient moins d'érosion du côté est, mais l'accumulation de sable était aussi très limitée à cause des courants forts générés par les vagues. Ces courants dirigés le long des épis ont emporté les sédiments de la plage vers le large. Les pertes de sédiment sur la plage ont alors occasionné de l'érosion au talus d'argile situé derrière les épis.

Pendant cette période d'expérimentation (1993-1996), la technologie de construction des ouvrages de protection a été établie (mode d'installation, fondement des ouvrages, hauteur de remplissage par du matériel flexible et perméable, renforcement de l'épi pour diminuer l'arrachement par les vagues, les courants et les glaces).

² À la baie Saint-Ludger, la direction prépondérante du transport des sédiments sur le littoral s'effectue de l'ouest vers l'est.



Figure 1: Le système d'épis Maltais-Savard original situé dans la Baie Saint-Ludger - concept de 1999 (Photo : B. Karakiewicz)

En 1996-1997, après l'implantation de mesures de protection d'enrochement par le Ministère des Transports du Québec (MTQ), le rôle protecteur des épis a été concentré sur la formation et la stabilisation d'une "plage-tampon" pour augmenter la stabilité de l'enrochement localisé au pied de la falaise.

En 1998-1999, des épis perméables courts ont été implantés du côté est d'un épi rocheux construit par le MTQ; ils ont entraîné l'ensablement de la plage visée. Graduellement, pour remplir les espaces séparant les épis, d'autres ouvrages furent installés.

En 1999 l'idée d'un système d'épis Maltais-Savard est bien définie. Ce système comprend un épi central pointant vers le sud-ouest (Figure 1et Figure 2) avec de courts épis latéraux obliques à ce dernier pointant vers l'est-sud-est et accolés à l'épi central du côté est. Dès que le système d'épis est rempli de sable (pendant une saison estivale), un nouveau système est implanté par-dessus l'ancien pour continuer l'augmentation du niveau de la plage. L'efficacité du SEMS dans la Baie Saint-Ludger a été mise à l'épreuve une première fois en présence de l'enrochement qui protège le pied de la falaise. Présentement, ce type de protection (SEMS) légèrement modifié a été appliqué sur les autres sites en érosion de la Côte-Nord du Saint-Laurent. Les observations d'efficacité de ce type d'ouvrage, en présence d'un talus naturel, permettaient de proposer et de justifier certaines modifications de l'ouvrage initial (Figure 2) pour protéger le pied du talus naturel; entre autres, la mise en place d'épis obliques sur les deux côtés a permis de procurer un effet d'accumulation bidirectionnel sur le transport des sédiments du littoral et de plus, l'addition d'épis obliques et inversés, du côté supérieur de la plage ,permettait d'éviter une érosion latérale. Sans ces épis supplémentaires, les courants générés par les vagues pouvaient causer de l'érosion derrière les épis pendant une tempête jumelée à une forte marée de vives-eaux.



Figure 2: Système d'épis Maltais-Savard modifié situé à la Pointe-aux-Outardes - concept de 2001 (Photo : N. Roy)

3.2 Modèle conceptuel de fonctionnement du SEMS

Le développement de l'ouvrage de protection SEMS, fondé sur huit années d'expérimentation sur le terrain, a démontré que son efficacité est déterminée par trois facteurs essentiels : l'orientation du système par rapport à la ligne côtière (ou par rapport aux composantes de la dérive littorale), sa porosité et sa rugosité.

Le SEMS constitue un filtre semi-perméable qui retient une partie des sédiments de la dérive littorale bidirectionnelle. La sélectivité de ce filtre est établie, entre autre, par le choix de l'orientation et de la longueur de l'épi central, et des épis latéraux par rapport à la direction et à l'intensité des composantes majeures de la dérive littorale : l'épi central (orienté légèrement vers la direction principale du transport des sédiments) intercepte la composante prédominante du flux des sédiments. Les observations démontrent que les épis latéraux courts, situés de chaque côté de l'épi central, interceptent une partie du flux des sédiments apportés par les tempêtes majeures.

Due à leur porosité, à leur flexibilité et à leur rugosité, les SEMS filtrent les sédiments emportés par les courants engendrés par les agents hydrodynamiques et dissipent l'énergie des vagues dans la zone d'implantation du système. En conséquence, la réduction des vitesses d'écoulement dans le voisinage du SEMS occasionne une accumulation de sédiment des deux côtés de l'ouvrage. La porosité et la rugosité sont assurées par des épis doubles et perméables. Leur remplissage, par du matériel flexible et rugueux, assure l'efficacité nécessaire pour dissiper l'énergie des vagues et des courants. Plus la densité du matériel de remplissage est élevée, plus la proportion de sable de dérive interceptée risque d'être grande.

Les séries d'essai sur le rôle des différents éléments d'ouvrage ont permis d'optimiser la performance du système et de l'adapter aux conditions dynamiques des différents sites d'expérimentation dans le BSL. L'ensemble des résultats de cette expérimentation constitue un élément valable pour le développement des applications en génie des ouvrages perméables de protection du littoral (Raudkivi 1996, Boczar-Karakiewicz et Romanczyk 2000, Boczar-Karakiewicz et al. 2001).

La synthèse des résultats d'expérimentation de différents types et paramètres d'épis ont permis d'établir un modèle conceptuel de fonctionnement de SEMS.

- L'épi simple, en forme d'un muret de bois, a fonctionné comme un épi conventionnel (Boczar-Karakiewicz et Romanczyk 2000, Boczar-Karakiewicz et al. 2001) à cause de la faible porosité et de la rugosité des éléments de cet ouvrage. Cet épi obstruait totalement la vague incidente et les courants et provoquait une accumulation de sédiment en amont avec une érosion prononcée en aval de l'ouvrage. De plus, la construction étanche et rigide résistait mal à l'action dynamique des vagues, des courants et des glaces.

- L'épi simple, de la forme d'une rangée de troncs d'arbres joints avec des fascines tressées, implanté perpendiculairement à la ligne côtière a fonctionné comme un épi perméable traditionnel (Raudkivi, 1996) et a constitué un écran poreux et rugueux (Figure 3). Il a empêché la propagation de la vague incidente, a dissipé l'énergie des courants engendrés par les agents hydrodynamiques ambiants et a pu éventuellement provoquer une accumulation de sédiment en amont de l'ouvrage. Le gradient de pression des deux côtés de l'épi a généré de la turbulence locale et une érosion le long de l'épi. Ces effets néfastes ainsi que la porosité élevée de l'ouvrage ont expliqué la faible efficacité de cet épi pour l'accumulation de sable sur le site d'expérimentation de BSL.

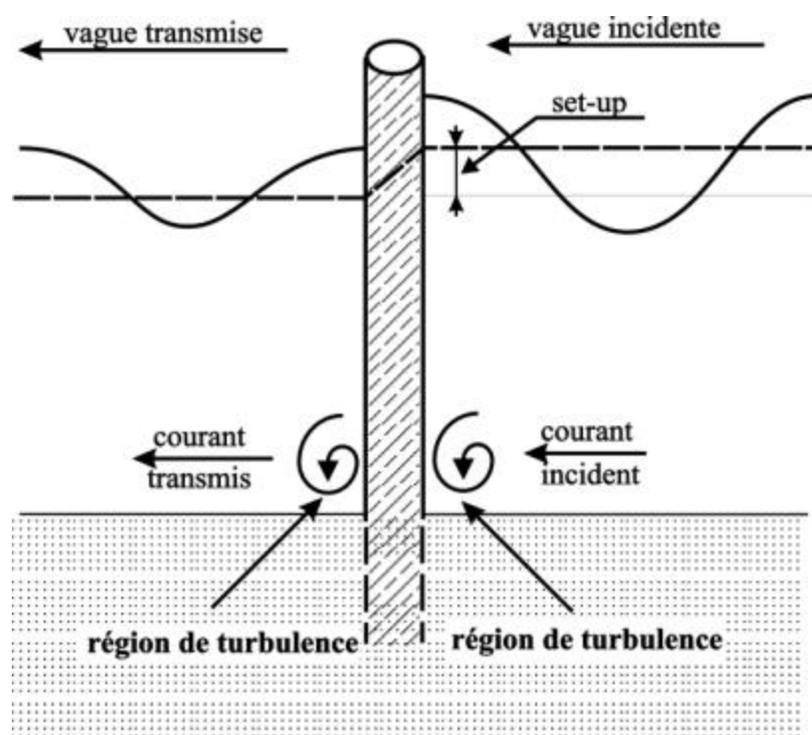


Figure 3: Concept de fonctionnement de l'épi perméable simple en présence de vagues et de courants - écran poreux et rugueux

- L'épi perméable double (Figure 4) contient deux rangées de pieux remplis de matériel flexible et perméable (têtes des épinettes). Il a été implanté perpendiculairement ou obliquement à la ligne côtière et a fonctionné comme un filtre poreux qui empêchait la propagation de la vague incidente. Il a filtré une partie des sédiments en suspension et il a dissipé l'énergie des courants qui avaient pénétré et qui étaient partiellement transmis à travers l'ouvrage.

La dissipation de l'énergie de cet épi double a été plus graduelle et plus efficace que celle occasionnée par un épi simple. En conséquence, cet épi a provoqué une

accumulation satisfaisante de sédiment en amont de l'ouvrage et une érosion latérale plus faible le long de ses parois externes que les épis conventionnels et les épis perméables simples.

L'épi perméable double (Figure 4), constitue l'élément de base des SEMS. Ce système d'épis possède une porosité, une flexibilité et une rugosité efficaces pour stabiliser les sédiments apportés par la dérive littorale et pour construire une plage dans des conditions hydrodynamiques et sédimentologiques spécifiques de la BSL (telle que la faible concentration des sédiments apportés par les courants). Selon l'orientation de l'épi central, les problèmes d'érosion en aval de cet épi double sont parfois encore trop importants et les séries d'expériences ont aussi démontré que les épis longs (env. 20 m) sont efficaces en amont de l'ouvrage, mais peuvent provoquer de l'érosion en aval d'ouvrage.



Figure 4 Concept de fonctionnement (photo à l'appui) de l'épi perméable double en présence de vagues et de courants - filtre poreux et rugueux.

- Finalement, les résultats des expériences préliminaires de terrain dans le BSL (conclut en 1999), ont indiqué que l'ouvrage de protection, comprenant une combinaison d'un épi central long avec des épis latéraux courts accolés d'un côté ou des deux cotés de l'épi central (en 2000 et 2001), est devenu efficace, en termes d'accumulation de sable et de la stabilisation de la plage, sans érosion prononcée localisée en aval de l'ouvrage. À cette étape des travaux, le fonctionnement du filtre flexible (l'épi perméable double) a été complété par l'installation d'un ensemble d'épis latéraux. Ceux-ci ont éliminé les effets néfastes de la réflexion des vagues (génération des effets de Mach, Boczar-Karakiewicz et Romanczyk 2000). En plus, ces épis latéraux ont perturbé les courants engendrés par les

vagues et les marées et ont occasionné des pertes d'énergie et généré une sédimentation plus efficace du sable. Une réduction des effets de Mach a aussi été obtenue par l'orientation de l'épi central long vers la direction la plus importante du transport littoral des sédiments (Figure 5).

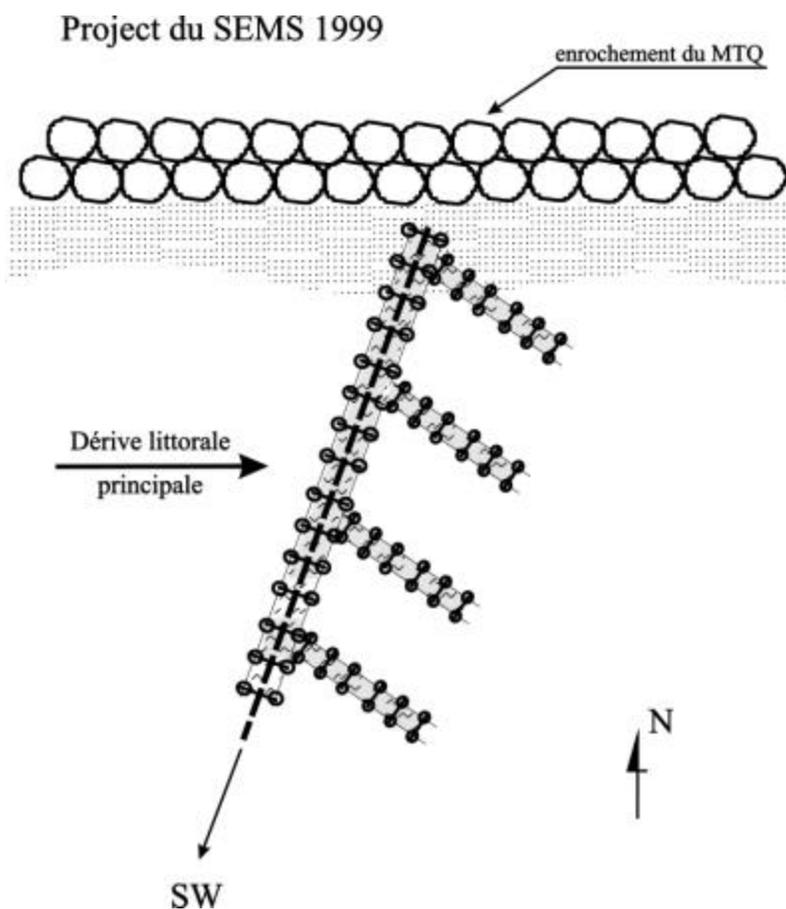


Figure 5: Le Système d'épis de Maltais et Savard (SEMS) - projet original de la Baie-Saint-Ludger

- Les épis latéraux constituent un système de filtres avec l'orientation inversée de l'épi central. L'ouvrage décrit et présenté à la Figure 5 constitue le Système d'épis de Maltais et Savard (SEMS).
- Dans l'ensemble, l'épi central (orienté vers l'ouest) a capté surtout les sédiments en dérive provenant de l'ouest avec des épis latéraux (éléments rugueux) qui ont dissipé les courants latéraux du côté est. Ces épis latéraux devenaient des capteurs actifs surtout lorsque les sédiments étaient apportés par la dérive en provenance de l'est.
- Dans la BSL le système d'épis co-fonctionne avec l'enrochement du pied de la falaise.

4. Localisation du site d'expérimentation

Le banc d'essai est localisé sur la péninsule Manicouagan dans le secteur est de la municipalité de Pointe-aux-Outardes. La carte de la Figure 6 situe le site sur la rue Labrie et un accès permet de descendre le talus de sable d'une hauteur de 9 à 10 m et d'atteindre la plage à une distance située à 350 m à l'ouest du banc d'essai.

La zone expérimentale couvre une longueur de 400 m de littoral. Elle débute avant un épi en enrochement situé à environ 275 m à l'ouest du SEMS no 3 et termine à 50 m à l'est du début de l'enrochement. La photographie aérienne de la Figure 7 présente la zone des essais et la position des trois SEMS.

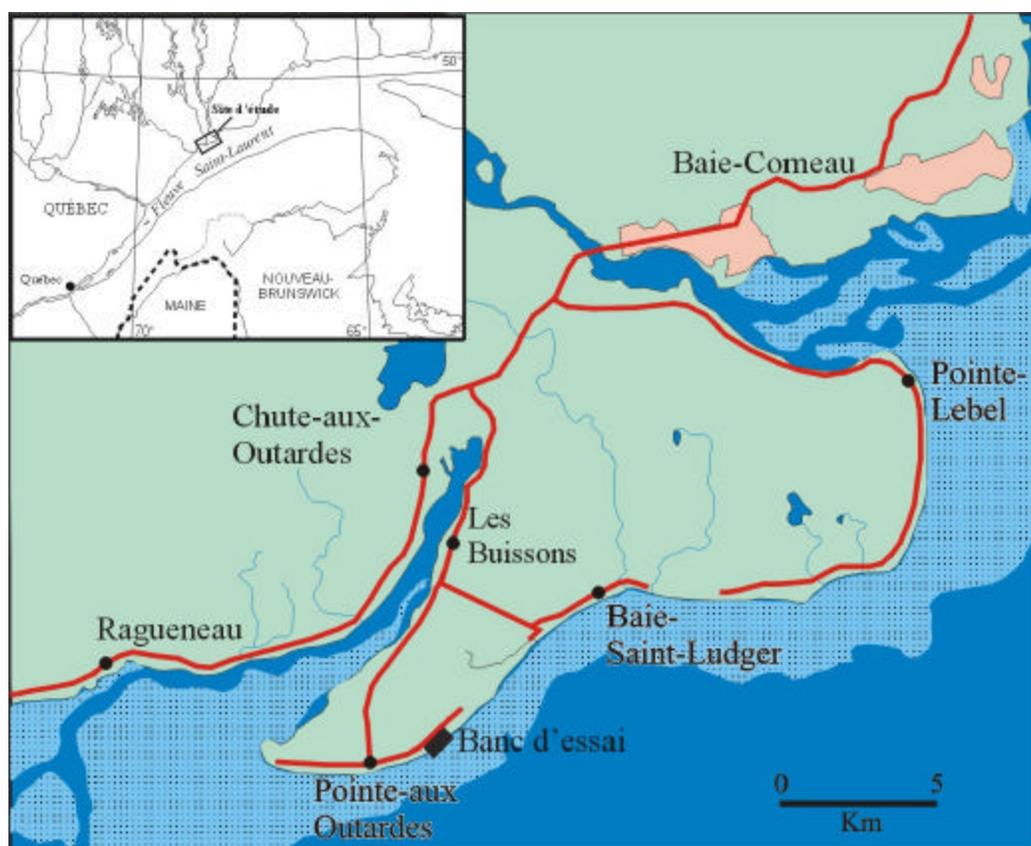


Figure 6: Carte de localisation du banc d'essai SEMS pour contrer l'effet de bout d'enrochement, Pointe-aux-Outardes, Québec, Canada



Figure 7: Présentation de la zone expérimentale (photographie aérienne prise le 25 septembre 2002)

5. Problématique d'érosion du secteur de la Pointe-aux-Outardes

5.1 Morphologie et dynamique sédimentaire

La morphologie du littoral de la région de la Pointe-aux-Outardes, dans le secteur expérimental, est constituée d'une terrasse sablonneuse, d'un talus de sable (avec une pente de 30 à 35° et une hauteur de 9 à 10 m) et d'une plage de largeur variable entre 15 à 40 m, formée de sable moyen à grossier (D_{50} varie entre 0,6 mm à 1.2 mm). La pente de la plage est de l'ordre de 10 % à 15%. Vers le large, une batture s'étend sur plus d'un kilomètre; la pente de la batture fait moins de 1% (Naturam 1996).

Les problèmes d'érosion des berges de la région de la Pointe-aux-Outardes (PAO) résultent de l'attaque des vagues à la base du talus sablonneux et argileux, lors des grandes marées, ce qui provoque des écroulements de berges. La faible largeur de la plage du secteur expérimental (de quelques dizaines de mètres de largeur et encore moins devant l'enrochement), fait en sorte que le sable provenant de l'érosion des talus de PAO est entraîné vers le large par le biais de la dérive littorale et ensuite par les rivières. L'érosion progressive des berges dans la région du site expérimental met en danger une route locale (rue Labrie, qui passe à moins de 100 m du sommet du talus) et plusieurs maisons situées encore plus proche du talus. Certains secteurs du littoral sont actuellement enrochés et l'érosion dans les zones avoisinantes résulte d'une conséquence de l'effet de bout de ces enrochements.

5.2 Historique géomorphologique du site d'expérimentation

Depuis plusieurs dizaines d'années, le secteur d'étude subit un recul du talus avec un taux variant entre 1 et 3 m par année (communication personnelle de Pascal Bernatchez, Comité d'experts sur l'érosion de la Côte-Nord). Dans la zone du banc d'essai, un empierrement conventionnel, situé en bas du talus, a été construit par le Ministère du

transport du Québec (MTQ) vers 1995 pour protéger certaines maisons en danger. En quelques années, depuis l'installation de l'enrochement, le haut du talus a été stabilisé par l'implantation naturelle d'un couvert végétal herbeux et arbustif. Par contre, l'enrochement a occasionné une diminution importante de la largeur de la "plage-tampon" localisée en avant de celui-ci. La zone située à proximité de l'extrémité ouest de l'empierrement a subi une érosion accrue de la plage et du talus de sable par un effet de bout de cet ouvrage (Figure 8).



Figure 8: Vue aérienne oblique (octobre 2000) du secteur à protéger (effets d'érosion dans la zone de bout d'enrochement du talus)

Les effets d'une érosion accrue sont visibles sur un segment d'environ 75 m le long de la ligne côtière où le retrait du talus atteint entre 10 et 15 m. Une érosion moins prononcée a aussi touché les secteurs plus éloignés de l'enrochement. Des observations sur le rivage avant le printemps 2001 (l'année de l'installation de SEMS) ont montré que la superficie affectée par l'érosion accrue s'agrandissait graduellement et que les effets néfastes se propageaient aussi le long de la ligne côtière en direction ouest. La photographie aérienne oblique, prise en novembre 2000, présente le détail du site expérimental avant l'installation des SEMS (Figure 8). Sur cette photo, il faut noter la

forme typiquement circulaire de la zone d'érosion résultant de l'effet de bout d'enrochement .

Dans cette région, la présence d'une "plage-tampon" est nécessaire pour réduire le taux d'érosion du talus qui est attaqué par les vagues et les courants particulièrement pendant les hauts niveaux d'eau (combinaison de marées hautes et de surcotes³). Présentement, la faible largeur et la pente raide de la plage, dans la région de l'extrémité ouest de l'enrochement, démontrent, que la zone littorale se vide de ses sédiments non-cohésifs (sable), ce qui se manifeste par le retrait de la plage et finalement par le recul du talus sablonneux. Ce processus a un caractère progressif et parfois catastrophique et l'érosion, comme celle observée à l'extrémité ouest de l'empierrement, se propage en direction perpendiculaire au talus et le long de la ligne côtière.

La disponibilité des sédiments dans la région de PAO est périodiquement assez élevée car le talus d'une hauteur de plus de 9 m est entièrement composé de sable. L'apport local du sable provenant du talus en érosion est donc important et peut contribuer à la formation de la "plage-tampon". En effet, avant l'installation d'ouvrages de SEMs, ces sédiments ont été entraînés par les vagues et les courants vers le large ou vers les embouchures des rivières, et se sont entièrement éliminés du système côtier local (B. Boczar-Karakiewicz et W. Romanczyk 2000).

6. Méthodologie

6.1 Éléments climatiques et hydrodynamiques

6.1.1. Prédiction théorique de la marée

L'analyse des niveaux de marées est basée sur les prévisions fournies par Pêches et Océans Canada (MPO, 2001). Les données de marée prédite sont présentées sous forme d'une série temporelle avec des valeurs obtenues toutes les 15 minutes pour la période du suivi d'une durée de 6 mois (juin-décembre 2001). La série temporelle des données se rattache au système GMT (Greenwich Mean Time) tandis que le système de référence du niveau d'élévation correspond au zéro de la carte marine (plus bas niveau que peut atteindre la marée). Pour faciliter l'interprétation de la variabilité de l'élévation des niveaux d'eau de la marée prédite, les données ont été transformées en coordonnées géoréférencées par rapport au zéro géodésique (niveau moyen de la mer). Le temps GMT a été recalculé et présenté selon l'heure normale de l'est (voir section 7.1.1).

³ Niveau d'eau accrue occasionné lors de marées de vives-eaux par l'accumulation de masse d'eau poussée par les vents sur la batture et par les systèmes de la basse pression atmosphérique. La surcote dépasse assez rarement 50 cm au secteur d'étude.

6.1.2. Directions et vitesses des vents

Les données de direction et de vitesse des vents ont été fournies par le Service météorologique du Canada (Environnement Canada) sous formes de tableaux. Les valeurs numériques de chaque tableau mensuel (période juin-décembre 2001) ont été transformées en graphique vectoriel pour faciliter la synthèse des informations météorologiques (voir section 7.1.2).

6.1.3. Variation des niveaux d'eau

Les mesures de variations du niveau d'eau ont été réalisées avec une jauge de mesure de la pression de modèle " DOBIE"», fabriquée par la compagnie Niwa. Cet appareil est spécialement conçu pour mesurer les vagues dans la zone intertidale (voir la photo de l'appareil sur la Figure 9). La jauge a été placée à environ 230 m de la ligne côtière sur la batture en face de la région d'implantation des ouvrages de protection SEMS, soit à



Figure 9: Appareil de type Dobie qui sert à mesurer la pression hydrostatique engendrée par les vagues et les marées

une distance suffisamment grande pour ne pas être située dans la zone de déferlement des vagues sur le littoral lors de tempêtes majeures. Elle a été installée 48 cm au-dessus du niveau de la batture, niveau mesuré le jour de l'installation. Elle est protégée par une cage métallique qui repose sur un poteau ancré profondément dans le sol. La jauge a été installée le 7 août 2001. La position (x, y) et l'élévation (z) de la jauge de pression ont été relevées à l'aide d'une station totale Topcon GTS 603-AF. La position exacte de la jauge est située aux coordonnées suivantes (SCOPQ fuseau 6, NAD 83) :

Position en x : 236 741,09 m,

Position en y : 5 434 867,01 m,

Position en z ⁴ : -0,705 m.

Des séries temporelles de la pression d'eau d'une durée de 17 minutes et à une fréquence de 2 Hertz furent enregistrées à presque toutes les 30 minutes à intervalle irrégulier du mois d'août 2001 au mois de décembre 2001. Au total, 2048 valeurs de la pression furent enregistrées à chaque période de mesures. Elles ont été analysées par un logiciel développé à l'ISMER (W. Romanczyk). Le logiciel en question est basé sur la théorie linéaire de la vague. Ce logiciel effectue une analyse spectrale des données enregistrées (avec compensation des erreurs créées par la résolution du capteur de pression) pour fournir les éléments qui caractérisent le régime hydrodynamique local (niveau moyen de l'eau et paramètres de vagues ambiantes).

Le Tableau 1 présente les dates d'enregistrement des données de pression ainsi que le mode de configuration de la jauge à pression. Les données recueillies furent traitées et analysées à l'Institut des sciences de la mer (ISMER).

Date	Mode de configuration	Début des enregistrements	Fin des enregistrements	Intervalle entre Chaque enregistrement en minutes	Durée des enregistrements en minutes
17 août-21 août	Wave gauge	17 août 19h11m16sec	21 août 07h11m00sec	180	17
21 août-24 août	wave gauge	21 août 10h46m54sec	24 août 10h46m00sec	180	17
7 sept-14 sept	Times series	7 sept 5h40m01sec	7 sept 19h55m00sec	45	17
14 sept-17 sept	Times series	14 sept 12h15m00sec	14 sept 19h45m00sec	45	17
19-sept	Times series	Nul	Nul	Nul	Nul
20-sept	Times series	Nul	Nul	Nul	Nul
21 sept-30 sept	Wave gauge	21 sept 23h55m00sev	30 sept 13h55m00sec	30	17
02-oct	Times series	2 oct 09h44m55sec	2 oct 13h14m00sec	Nul	Nul
02 oct-12 oct	Times series	2 oct 21h00m00sec	12 oct 16h00m00sec	30	17
12 oct-20 oct	Times series	12 oct 18h00m00sec	20 oct 10h00m00sec	30	17
20 oct-30 oct	Times series	20 oct 12h00m00sec	30 oct 21h00m00sec	30	17
31 oct-03 nov	Times series	31 oct 07h01m59sec	3 nov 18h31m00sec	30	17
13 nov-16 nov	Times series	13 nov 08h00m01sec	16 nov 07h30m00sec	30	17
16 nov-19 nov	Times series	16 nov 08h14m48sec	19 nov 23h14m00sec	30	17
19 nov-26 nov	Times series	20 nov 00h14m17sec	26 nov 22h44m00sec	30	17
29 nov-7 déc	Times series	29 nov 22h30m00sec	7 déc m09h00m00sec	30	17

Tableau 1 - Prise des données réalisée par la jauge à pression en l'an 2001

⁴ L'élévation (z) fait référence au niveau moyen de la mer de 1929.

6.1.4. Prises de vue vidéo de la zone d'expérimentation pendant les tempêtes

Les séquences vidéo ont pour objectif de permettre la visualisation des effets de l'interaction des vagues avec les systèmes d'épis. Ces prises de vue montrent la zone avec l'ensemble de trois ouvrages ainsi qu'une vue rapprochée de certains épis. Les séquences vidéo ont été filmées généralement une heure avant, pendant, et une heure après les élévations maximales des niveaux d'eau lors de quatre événements de forts vents.

6.1.5. Action des glaces sur le site expérimental

Pendant l'hiver, des sorties sur le terrain ont été réalisées périodiquement pour évaluer l'impact des glaces sur les structures. Des sorties sur le site ont été faites le 30 novembre 2001, le 3 décembre 2001, le 8 février 2002, le 7 mars 2002, le 5 avril 2002 et le 30 avril 2002. À chaque sortie des photographies ont été prises afin d'être comparées pour analyse.

6.2 Mesures des éléments morphologiques

Les mesures topographiques ont été effectuées à l'aide d'un réseau de poteaux de bois (de longueur d'environ 2 m et de 0,15 m de diamètre) implantés dans la zone expérimentale. Le sommet de chaque poteau a été géoréférencé à l'aide d'une station totale avec une précision de mesure de 0,5 mm en élévation et de 1 cm en distance horizontale. Les stations locales permanentes, qui servaient à préciser la localisation des poteaux de bois, ont aussi été reliées, à l'aide d'un niveau électronique précis à un mm près, à une borne géométrique du Ministère des ressources naturelles située en bordure du chemin Labrie.

Les poteaux ont été disposés le long de lignes perpendiculaires à la ligne côtière. Les distances entre ces lignes variaient de 10 et 50 m, selon la précision topographique recherchée. Chaque ligne a été constituée de 5 poteaux de bois espacés de 5 à 10 mètres. Le réseau des poteaux a couvert la zone d'expérimentation et la longueur des lignes variait de 35 à 40 m. Ce réseau de poteaux a permis de documenter les variations topographiques de la plage de largeur variable (de 25 à 40 m). La Figure 10 présente la localisation des poteaux implantés dans le site d'expérimentation (un plan détaillé du talus et des épis est inclus dans le rapport d'arpentage du MTQ 2003). À l'extrémité ouest du site, cinq poteaux ont été installés autour d'un épi en enrochement. Ainsi, la comparaison de la variabilité du niveau de la plage avec celui des SEMS a pu être réalisée.

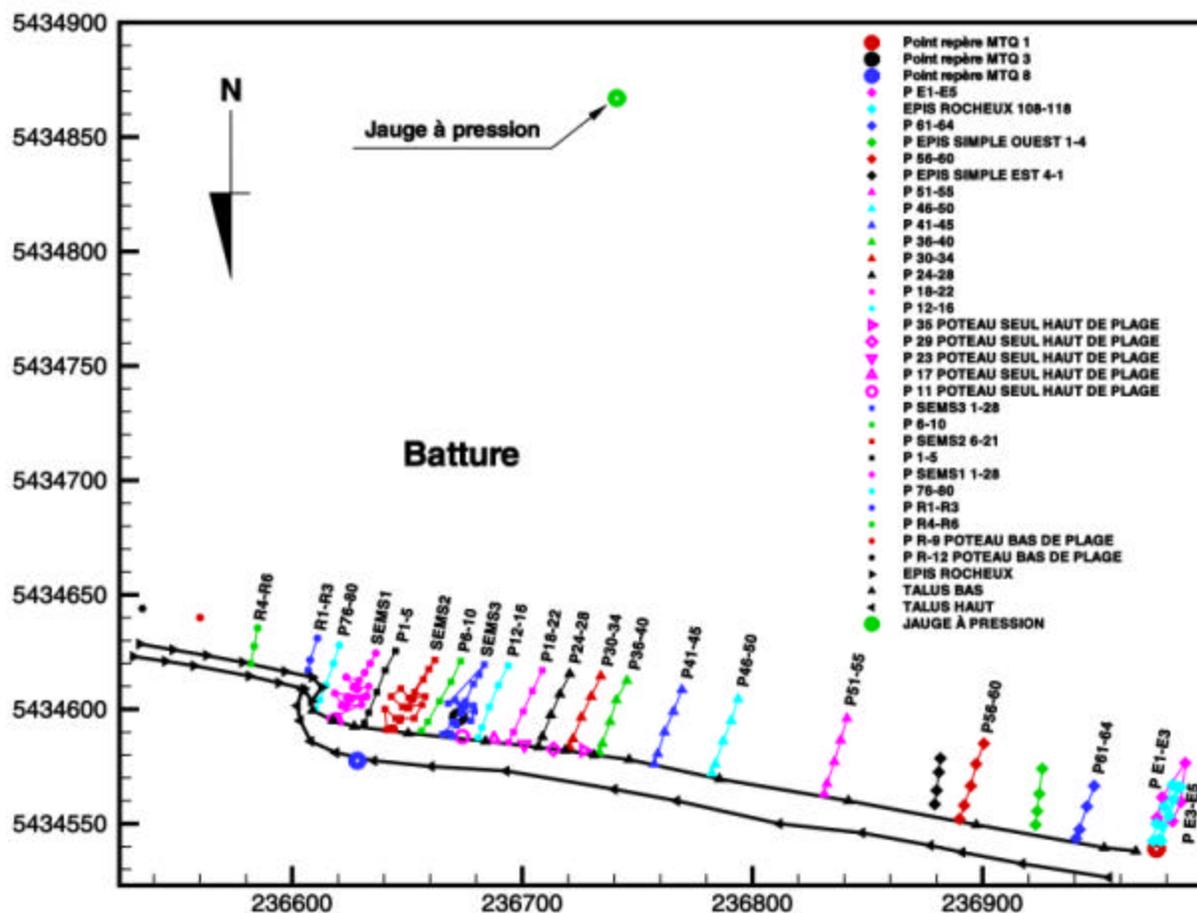


Figure 10: Localisation des poteaux de bois servant de repères topographiques sur le site de banc d'essai et la position de l'appareil de mesure de pression hydrostatique « DOBIE »

Des relevés topographiques de la distance entre le sommet de chaque poteau et celui de la plage ont été réalisés environ tous les deux jours et chaque jour pendant les périodes de marées de vives-eaux. En soustrayant le niveau connu du sommet du poteau par la distance de la surface de la plage mesurée à l'aide d'un ruban gradué, il a été possible d'obtenir le niveau réel de la plage (z) à chaque emplacement de poteau (x, y). Ces résultats ont permis de suivre les variations topographiques de la plage sous l'action des vagues, des marées, des courants et parfois même du vent (en haut de la plage).

Pour valider la stabilité des poteaux de bois, des vérifications régulières d'arpentage ont été réalisées au moyen d'un niveau optique de précision de 5 mm. Si un poteau était déstabilisé par du vandalisme, par des éléments flottants ou par une érosion importante de la plage, il était alors remplacé ; les données topographiques prises depuis la dernière vérification de nivellement pouvaient par conséquent être annulées. Au total, depuis l'implantation des poteaux (printemps 2001), trois sorties de vérification de nivellement ont été réalisées durant l'été et l'automne 2001. Les vérifications ont

démontré une grande stabilité des poteaux dans la mesure où ils n'ont pas été affectés par l'un des facteurs mentionnés auparavant.

Le recul du haut du talus a été réalisé à quelques reprises durant la période d'expérimentation. Une évaluation du taux de recul a été établie entre l'état initial et final en comparant les valeurs mesurées.

7. Résultats

Cette section présente l'analyse des résultats de mesures des éléments hydrodynamiques et morphologiques du site d'expérimentation.

7.1 Éléments climatiques et hydrodynamiques

7.1.1. Prédiction théorique de la marée

La Figure 11 présente les niveaux d'eau prédits pour la période de l'analyse des variations topographique du site. Le marnage moyen de la marée semi-diurne est de 3 m, avec un maximum de 4,30 m. L'analyse de ces résultats a permis de constater une forte variabilité du niveau d'eau. Le maximum prédit de 2,36 m a été atteint le 22 juillet 2001 et le minimum de -2.01 m a été prédit pour le 18 septembre 2001.

La probabilité que le processus d'érosion qui doit atteindre le talus aille en augmentant se réalisera lorsque le niveau maximal de la marée (marée prédite sur la Figure 11) aura lieu pendant une tempête d'automne qui sera accompagnée par une surcote (qui n'est pas inclus dans les prédictions théoriques des niveaux d'eau). Une telle élévation des niveaux moyens de l'eau dans la zone côtière pourra être provoquée par une accumulation des masses d'eau poussées par les vents vers le rivage. Une baisse du niveau d'eau pourra aussi se produire durant une dépression atmosphérique.

Les surcotes ont été détectées par l'analyse des niveaux d'eau mesurés in situ. Les valeurs des surcotes et leur variabilité sont présentées à la section 7.1.3.

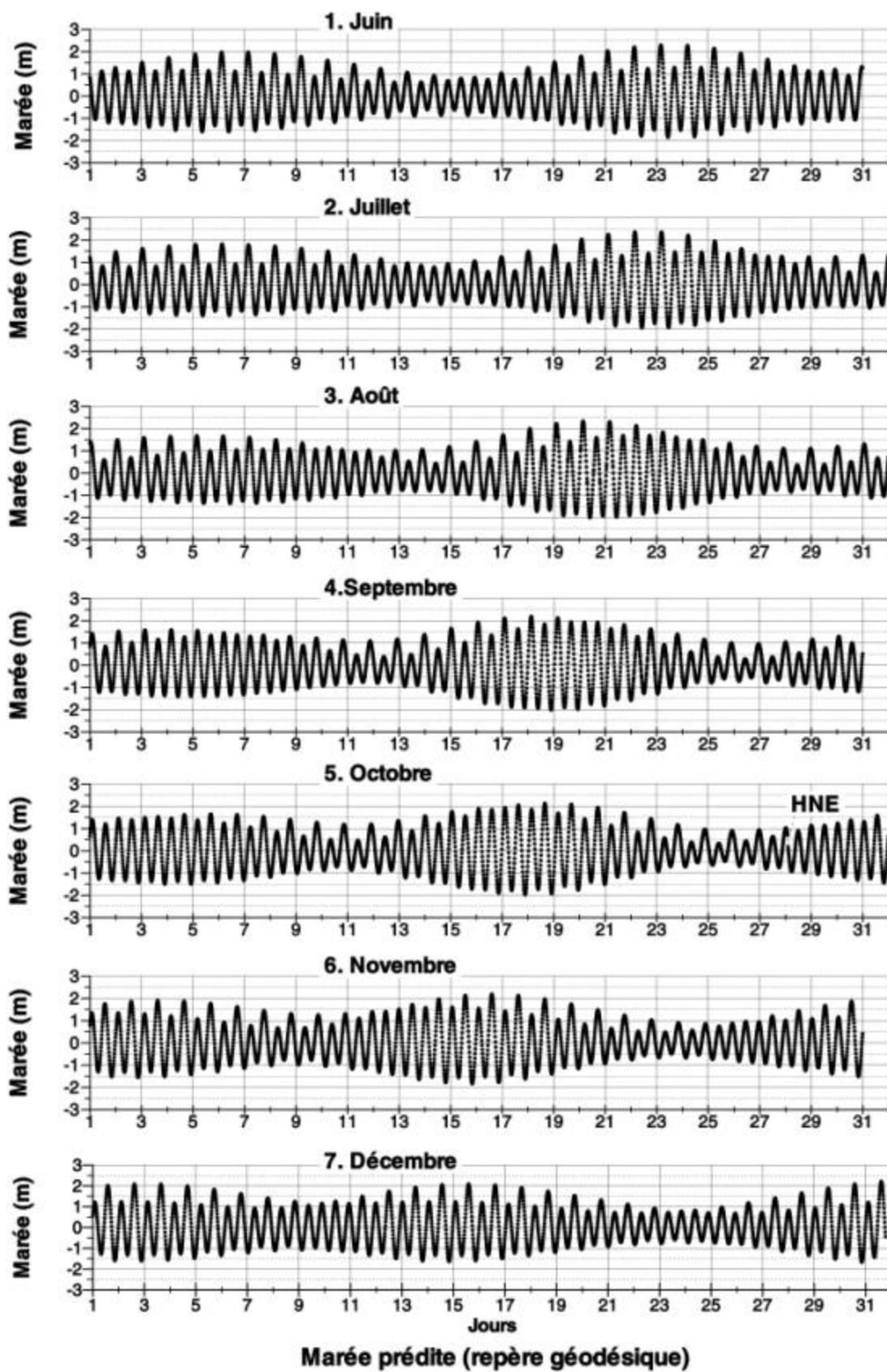


Figure 11: Prédications de la marée (valeurs géoréférencées par rapport au zéro géodésique)

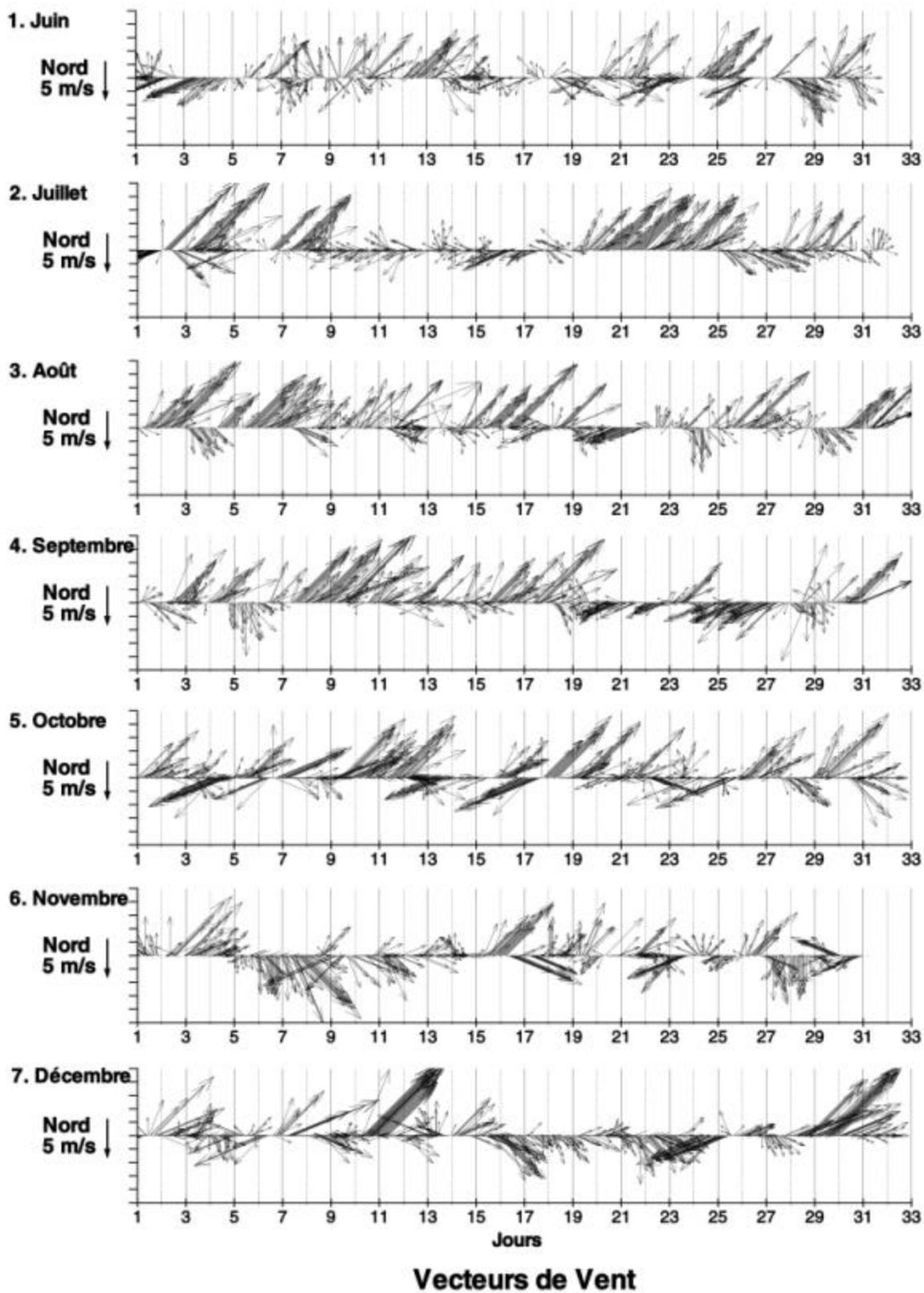


Figure 12: Directions et vitesses du vent sous forme de graphique vectoriel (observations réalisées par le Service météorologique de l'aéroport de Baie-Comeau)

7.1.2. Directions et vitesses des vents

Les mesures des paramètres du vent proviennent des observations collectées à l'aéroport de Baie-Comeau situé sur la Péninsule Manicouagan, à environ 15 km du banc d'essai. Étant donné que les mesures hydrodynamiques ne fournissaient pas la direction des vagues, la direction et la vitesse du vent ont complété au besoin les paramètres des vagues déduits des mesures de pression (section 7.1.3). L'observation des paramètres du vent a donc ajouté des informations sur la variabilité temporelle et sur la direction des vagues. La vitesse et la direction du vent sont présentées sous forme de graphique vectoriel à la Figure 12. Pour chaque jour de la période d'expérimentation sur le terrain, un vecteur y est associé. Le vecteur indique la direction de vent et la longueur du vecteur est proportionnelle à sa vitesse.

L'analyse des résultats indique une dominance des vents en provenance du sud-ouest (en été) et, par ailleurs, une dominance restreinte des vents de provenance du nord-est (en automne). Les résultats illustrent une forte variabilité temporelle de la direction et de la vitesse des vents. Pendant la période de l'expérimentation, peu de journées calmes ont été observées. Par ailleurs, plusieurs valeurs de mesures consécutives avaient des directions identiques et des vitesses assez élevées (plus de 10 m/s) et cela a donné une situation où le vent pouvait générer des vagues de hauteurs importantes. Les résultats d'analyse des mesures du vent ont été incorporés à la section 7.1.3, soit dans les tableaux contenant les données de mesures des vagues et des niveaux d'eaux (voir Figure 13a).

7.1.3. Variation des niveaux d'eau

Marées et surcotes

Les mesures de pression ont débuté au mois d'août 2001 pour se terminer au début du mois de décembre 2001. Les résultats de ces mesures, complétés par l'observation des vents et des résultats de la prédiction des marées pour toute la période des travaux d'expérimentation avec le SEMS, sont présentés à l'Appendice (Section A.1, Figure A.1a-Figure A.5c). Un exemple des paramètres calculés et prédits des éléments hydrodynamiques en format complet, tels que montrés dans l'Appendice, est présenté pour le mois d'octobre 2001 sur la Figure 13a-Figure 13c.

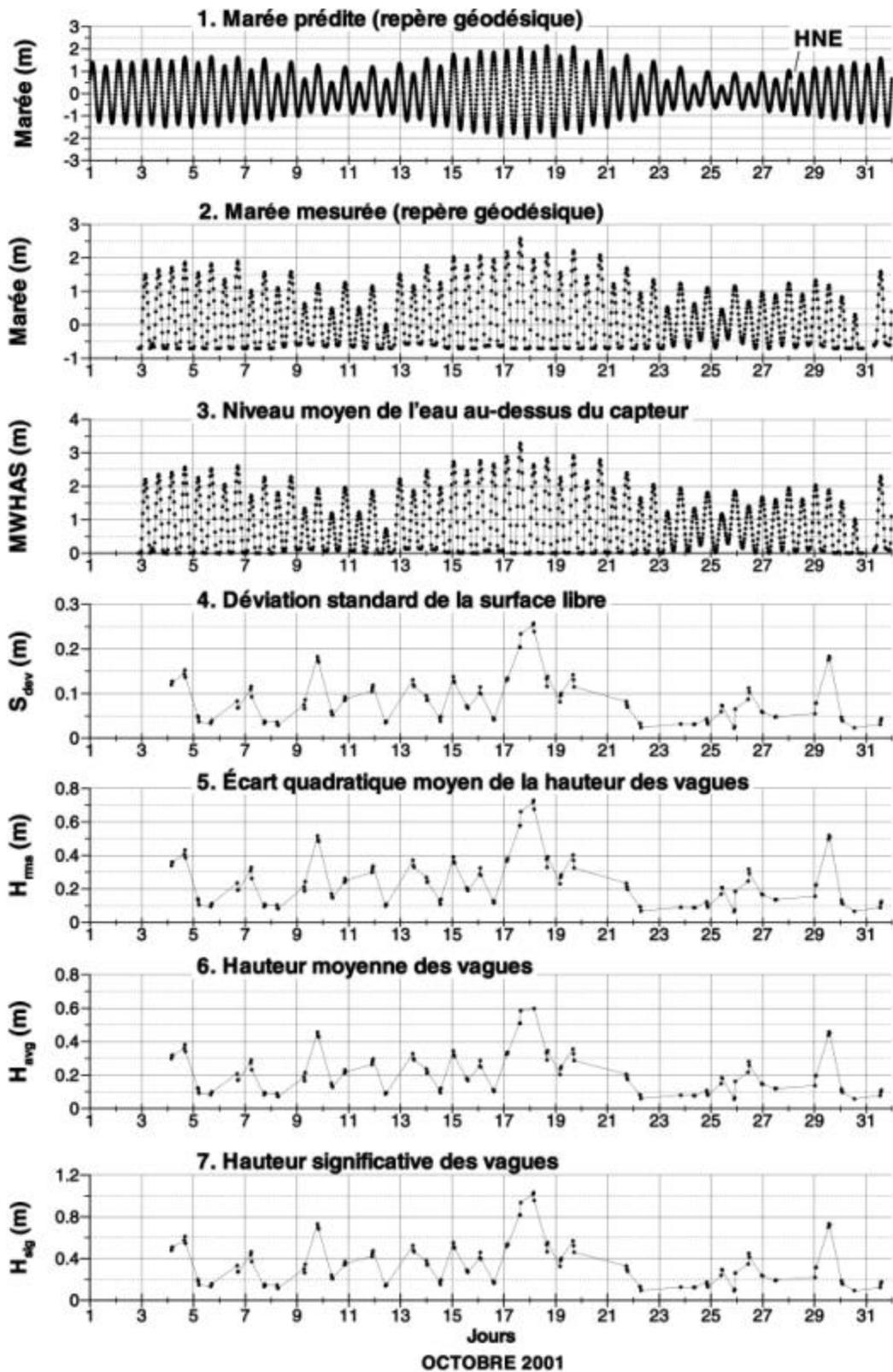


Figure 13a: Niveaux d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

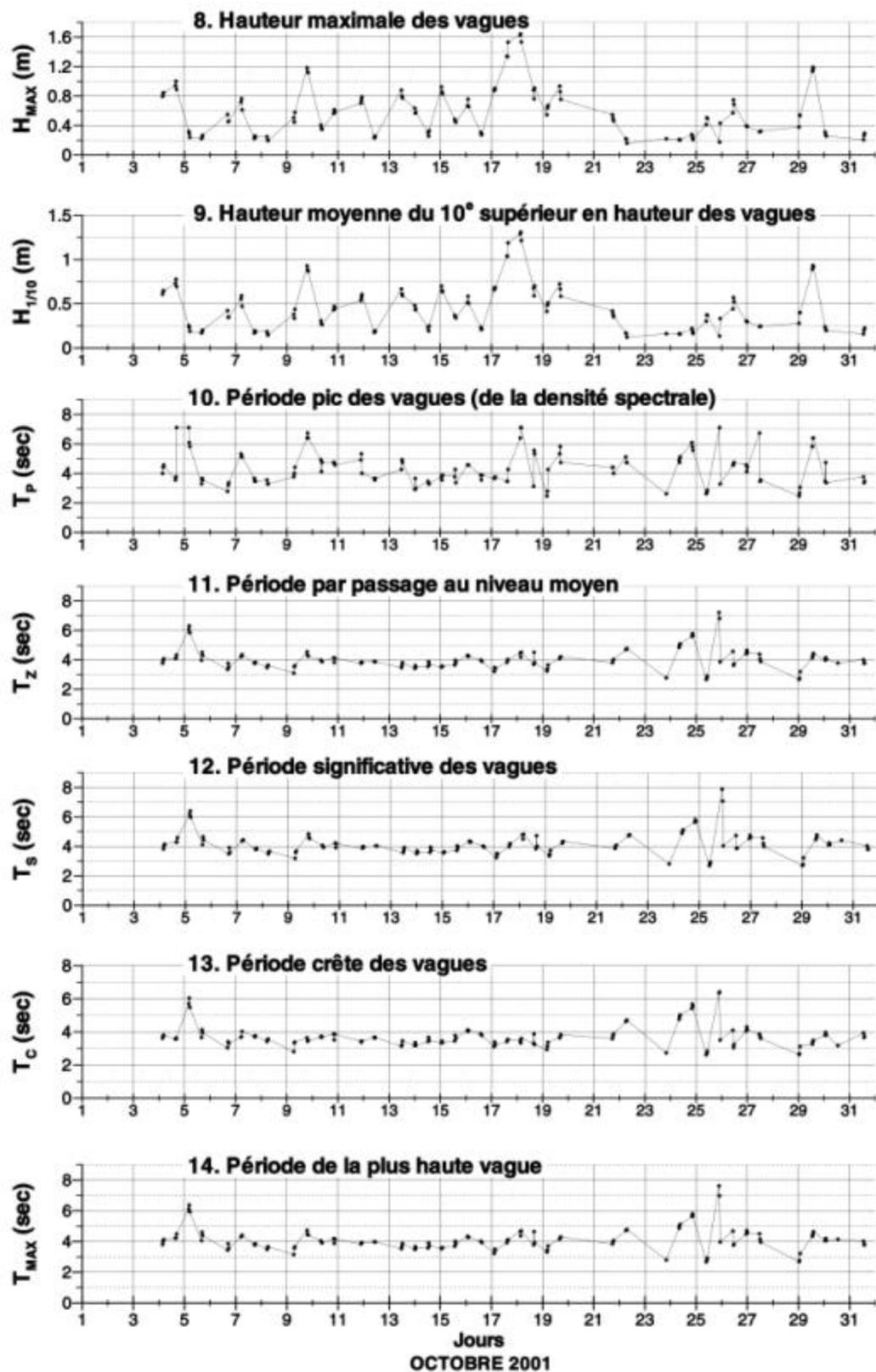


Figure 13b: Niveaux d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

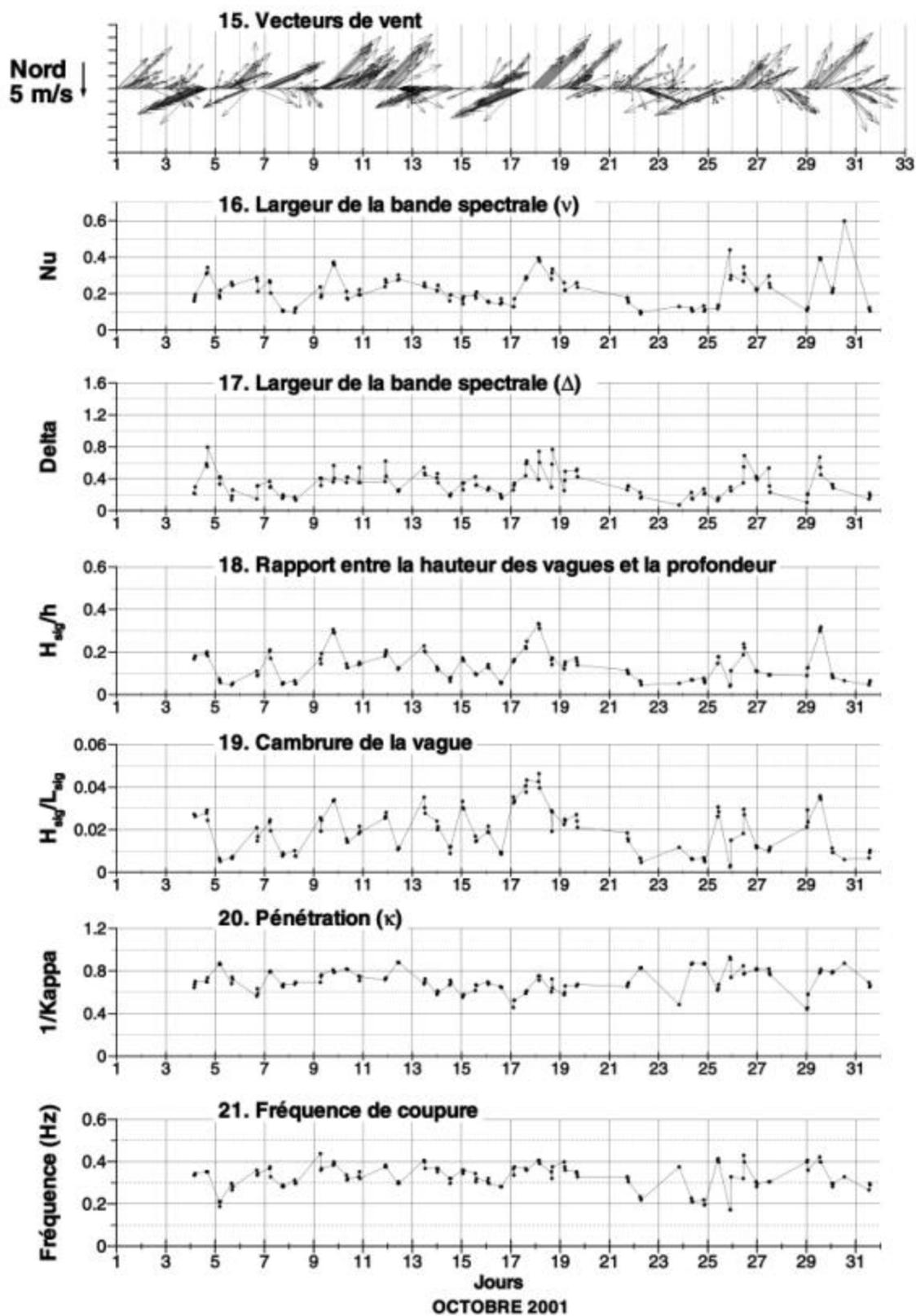


Figure 13c: Niveaux d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

Les deux premiers diagrammes de la Figure 13a donnent des informations sur la variabilité temporelle des niveaux moyens de l'eau (diagramme 1: le niveau de la marée prédite, diagramme 2: le niveau mesuré). Les résultats des enregistrements du mois d'octobre 2001 ont montré que les niveaux moyens de l'eau mesurés pendant les tempêtes importantes ont dépassé les valeurs prédites jusqu'à 0,6 m (tempête du 17 octobre 2001 - Figure 13a). Les surcotes ont été observées plusieurs fois pendant la période de mesures (Figure 14). Cependant, celle du 17 octobre fut la plus forte de cette période. À noter que les surcotes pouvaient parfois être négatives (Figure 14) en réponse à une dépression atmosphérique locale. Pour le littoral de PAO, une surcote positive augmente énormément le danger d'érosion de la plage et du pied de talus durant les marées de vives-eaux (cas du 17 octobre 2001).

Le troisième diagramme de la Figure 13a montre la variabilité de la hauteur de la colonne d'eau au-dessus du capteur de pression. Ces valeurs nous indiquent, entre autre, les périodes où le senseur se trouvait au-dessus du niveau de la surface libre (marée basse). Il n'y a donc pas eu d'enregistrement durant les périodes où la jauge de pression n'était pas recouverte d'eau. Les valeurs mesurées de la profondeur du capteur fournissaient aussi les indications sur la précision de l'analyse des mesures. En effet, l'interprétation correcte des enregistrements du senseur était possible quand la profondeur de l'eau au-dessus du capteur était supérieure à 0,2 m.

Vagues

L'analyse complète des résultats du mois d'octobre est présentée dans cette section (Figure 13a, Figure 13b et Figure 13c). Pour les autres mois de mesures, les résultats complets sont montrés à l'Appendice A.

Les diagrammes 4 à 9 des Figure 13a et Figure 13b présentent les valeurs statistiques qui caractérisent le niveau de la surface libre. Le diagramme 4 représente la déviation moyenne de la surface libre S_{dev} (équivalente à la valeur moyenne de l'amplitude de la vague). Par ailleurs, on donne également les valeurs des écarts quadratiques moyens de la hauteur des vagues H_{rms} (diagramme 5), la hauteur moyenne des vagues H_{avg} (diagramme 6), la hauteur de la vague significative H_{sig} (diagramme 7), la hauteur maximale de la vague H_{MAX} (diagramme 8) et la hauteur moyenne du 1/10 des vagues observées $H_{1/10}$ (diagramme 9). La variabilité morphologique de la plage est analysée en relation avec la variabilité des écarts quadratiques moyens de la hauteur des vagues (H_{rms}).

Sur la série de mesures enregistrées par la jauge, du mois de septembre au mois de décembre 2001, environ 75 marées présentaient des vagues suffisamment importantes pour être détectées. De celles-là, huit marées avaient des vagues qui dépassaient un H_{rms} de 0,5 m et une seule fois un H_{rms} de 0,7 m (17-18oct.). Il faut noter que 65% des mesures de vagues ont été réalisées durant cette période d'automne. En réalité, le

nombre d'événements significatifs est probablement supérieur. Une analyse plus détaillée, prévue dans le cadre de recherches futures, pourra être basée sur l'analyse de la variabilité de plusieurs autres paramètres caractéristiques de la hauteur des vagues décrites par les diagrammes 7-9.

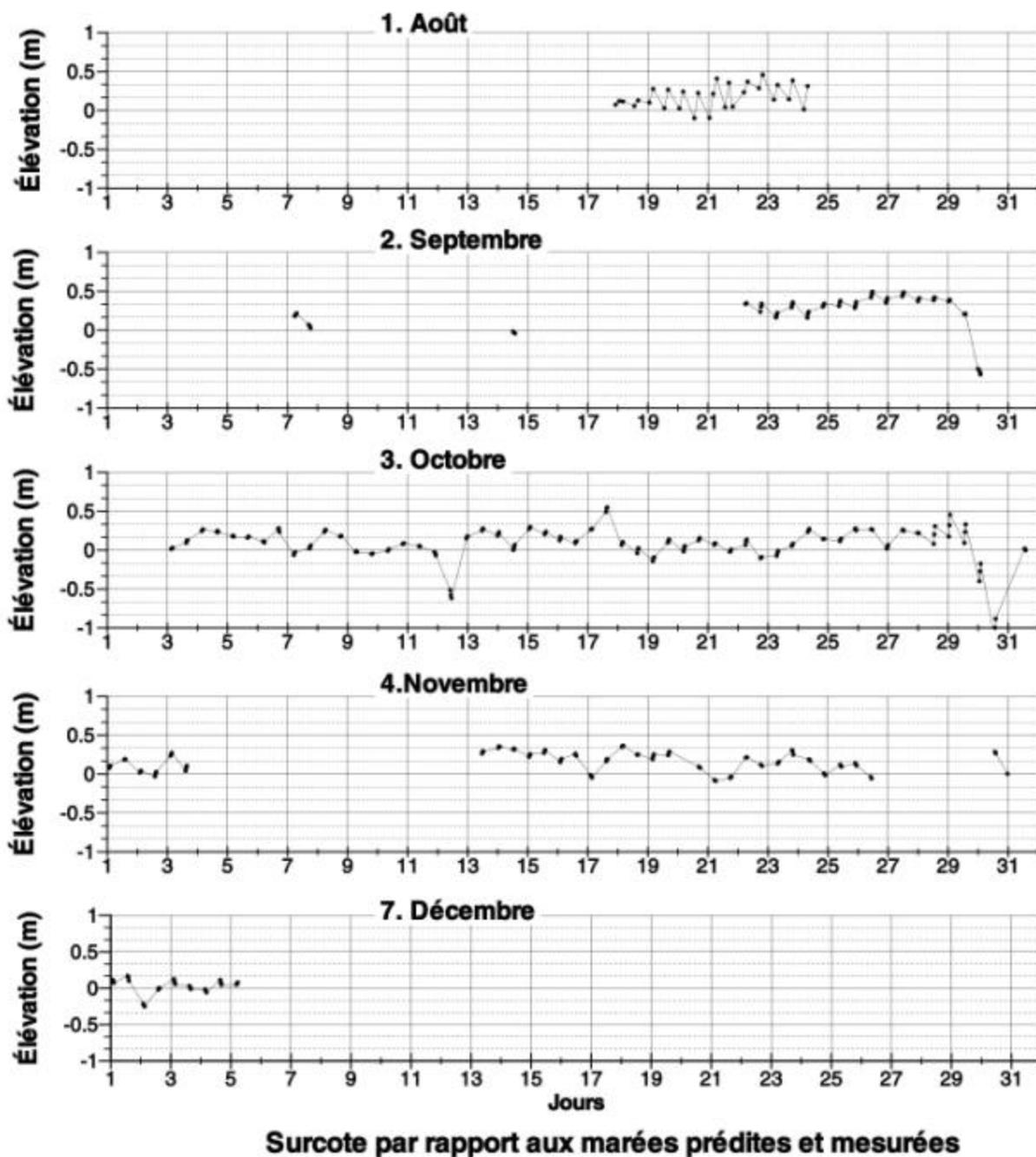


Figure 14: Comparaison des niveaux d'eau prédits et mesurés

Les diagrammes 10 à 14 de la Figure 13b montrent les paramètres qui caractérisent la période de vagues. L'analyse de la variabilité morphologique de la plage prend en considération la période du pic spectral (diagramme 10); elle spécifie la période du train de vagues les plus énergétiques du spectre. Les diagrammes 16-17 de la Figure 13c nous fournissent les paramètres à partir desquels on peut évaluer la largeur du spectre des vagues. Pour les spectres étroits, les valeurs sont plus faibles que pour les spectres larges. Un spectre étroit de fréquences (Figure 15) décrit un régime de vagues aléatoires qui ressemble à une vague régulière (la majorité de l'énergie est alors concentrée dans une bande étroite de fréquences du spectre). Par contre, un spectre large (Figure 16) définit un régime aléatoire qui est constitué d'un mélange de vagues de différentes fréquences, avec des amplitudes du même ordre de grandeur.

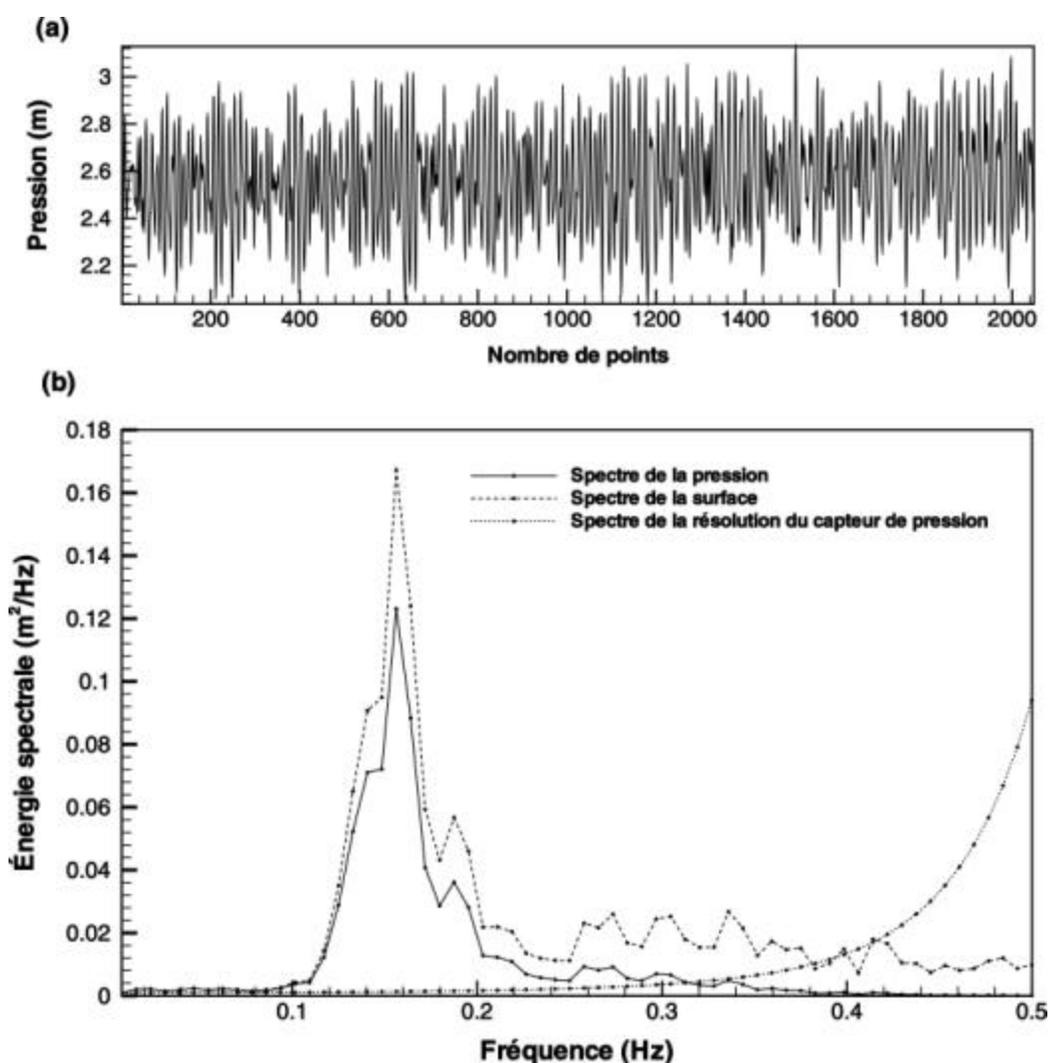


Figure 15: Résultat des mesures et l'analyse spectrale pour le 18 octobre 2002 : (a) série temporelle de pression, (b) spectre de fréquences de pression, de vagues et le spectre de la résolution du capteur de la pression

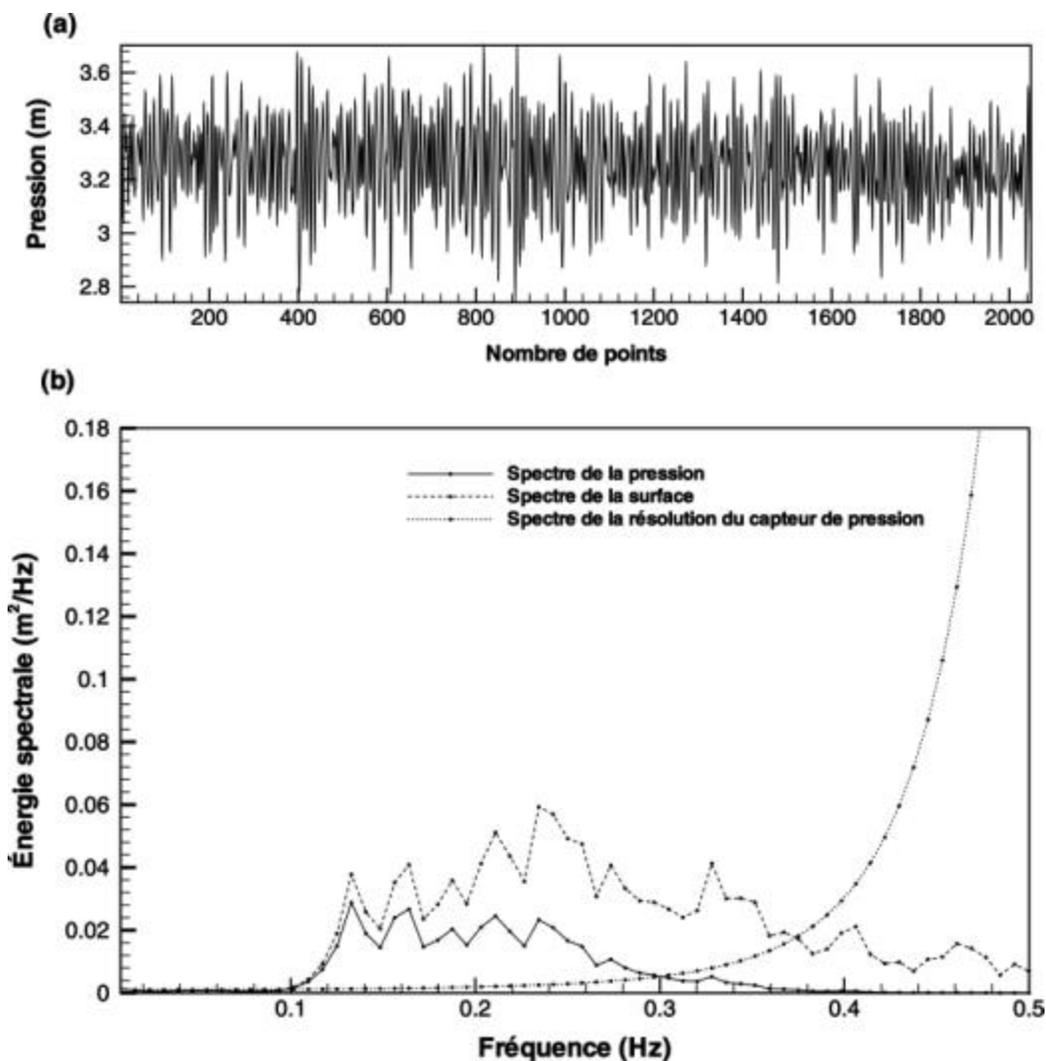


Figure 16: Résultat des mesures et l'analyse spectrale pour le 17 octobre 2002 : (a) série temporelle de pression, (b) spectre de fréquences de pression, de vagues et le spectre de la résolution du capteur de la pression

Les propriétés du régime de vagues, représentées par un spectre étroit ou large, sont très importantes dans le contexte de l'érosion des berges. Généralement, les vagues caractérisées par un spectre étroit sont plus efficaces en terme de dynamique côtière.

Les résultats présentés sur les diagrammes 18-19 de la Figure 13c nous donnent les valeurs des hauteurs relatives de vagues par rapport à la profondeur locale de l'eau et les valeurs de la cambrure de la vague. Le diagramme 20 de la figure Figure 13c nous montre les valeurs de la fréquence de coupure qui sont déterminées par l'erreur de mesures de pression. L'application de la fréquence de coupure est illustrée pour des cas de spectres étroits et larges aux Figure 15 et Figure 16.

L'analyse des variations morphologiques en fonction des éléments hydrodynamiques a été faite à partir d'un nombre de paramètres choisis et présentés pour toute la période

du suivi (du mois d'août 2001 au mois de décembre 2001) aux Figure 17 à Figure 21. Ces paramètres sélectionnés ont été extraits des résultats complets de l'ensemble des paramètres mesurés et présentés à l'Appendice A.

Dans la zone côtière, les vagues incidentes ont été réfractées (réfraction des vagues de période 3-4 s (voir Figure 22, d'après Ouellet (Roche ltée, rapport pour MTQ 1997))). En effet, les vagues mesurées ont été atténuées par ce phénomène. En plus, l'effet de la réfraction des vagues a changé l'angle d'approche des vagues dans le littoral comme montré sur le diagramme de la Figure 22. Les vagues obliques de périodes plus longues se sont approchées du littoral en prenant de plus en plus la direction perpendiculaire à la ligne côtière et ce contrairement aux vagues de périodes courtes. Pour ces dernières, l'angle d'approche près de la berge est demeuré approximativement égal à l'angle d'approche au large (ou de la direction de vent). Les vagues mesurées par la jauge de pression ont démontré correctement le climat énergétique de vagues à proximité du littoral, et la direction d'approche devait être analysée à partir de la direction des vents et reliée avec les périodes énergétiques par le senseur.

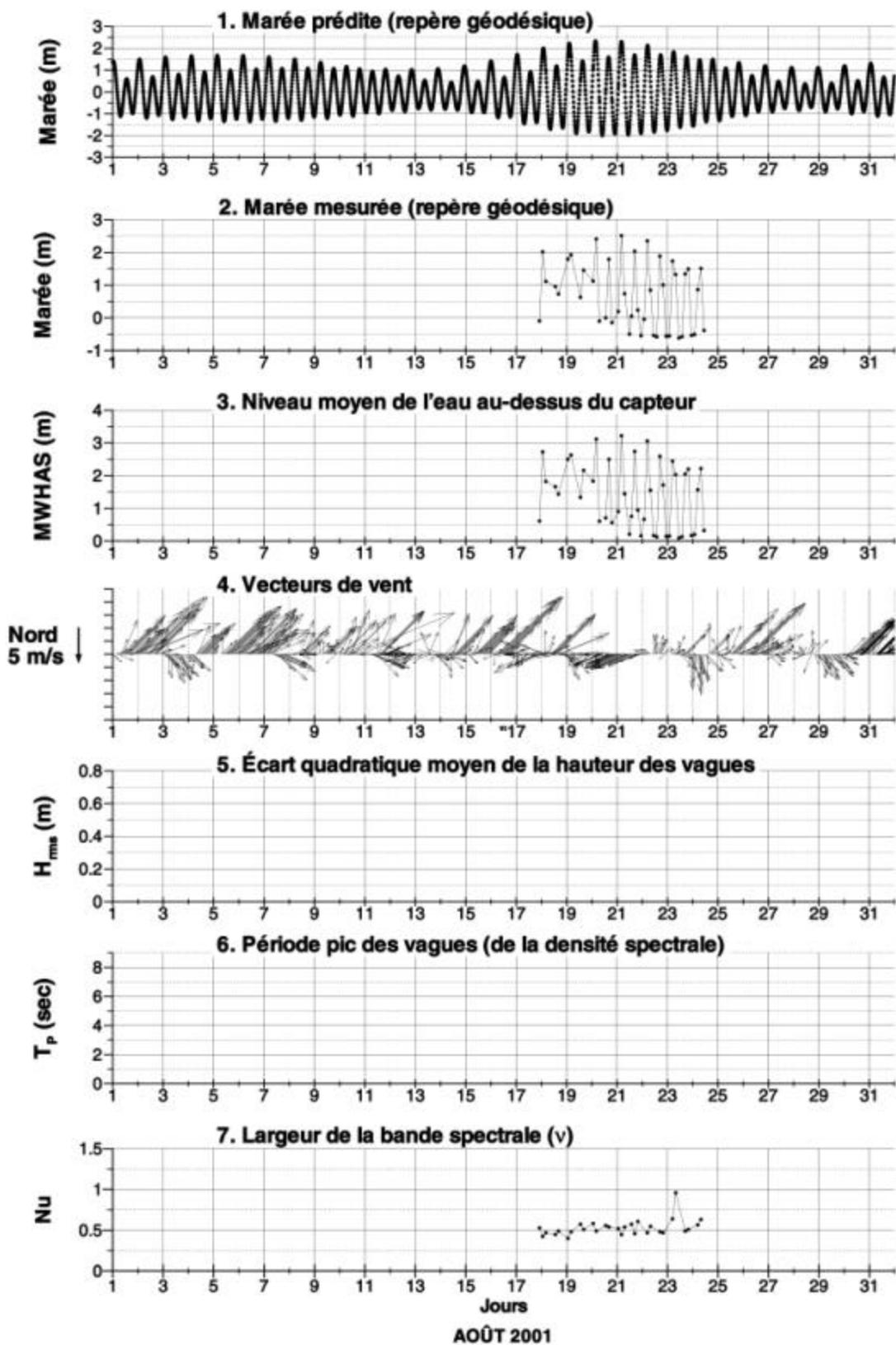


Figure 17: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'août 2001 (extrait des résultats complets)

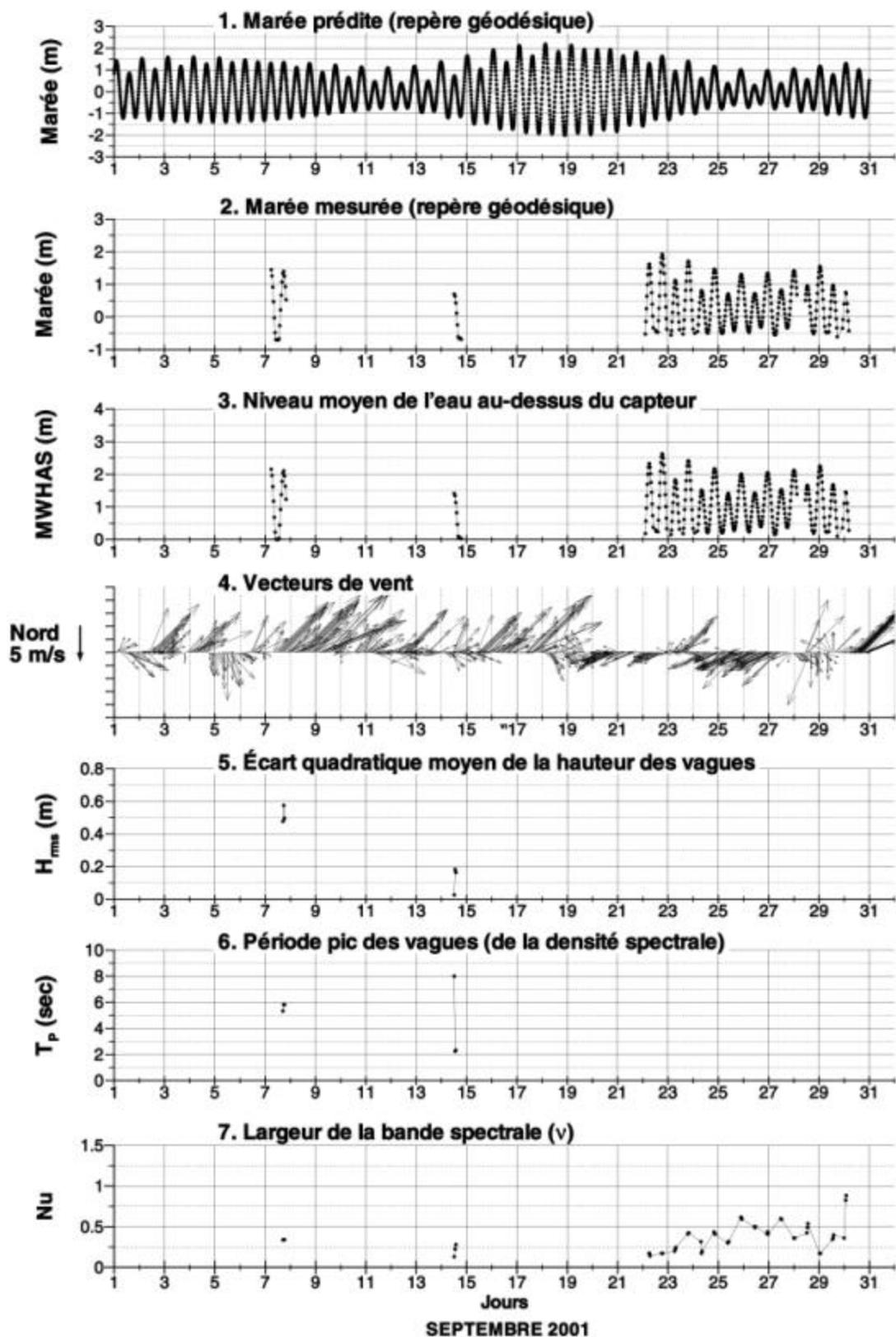


Figure 18: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de septembre 2001 (extrait des résultats complets)

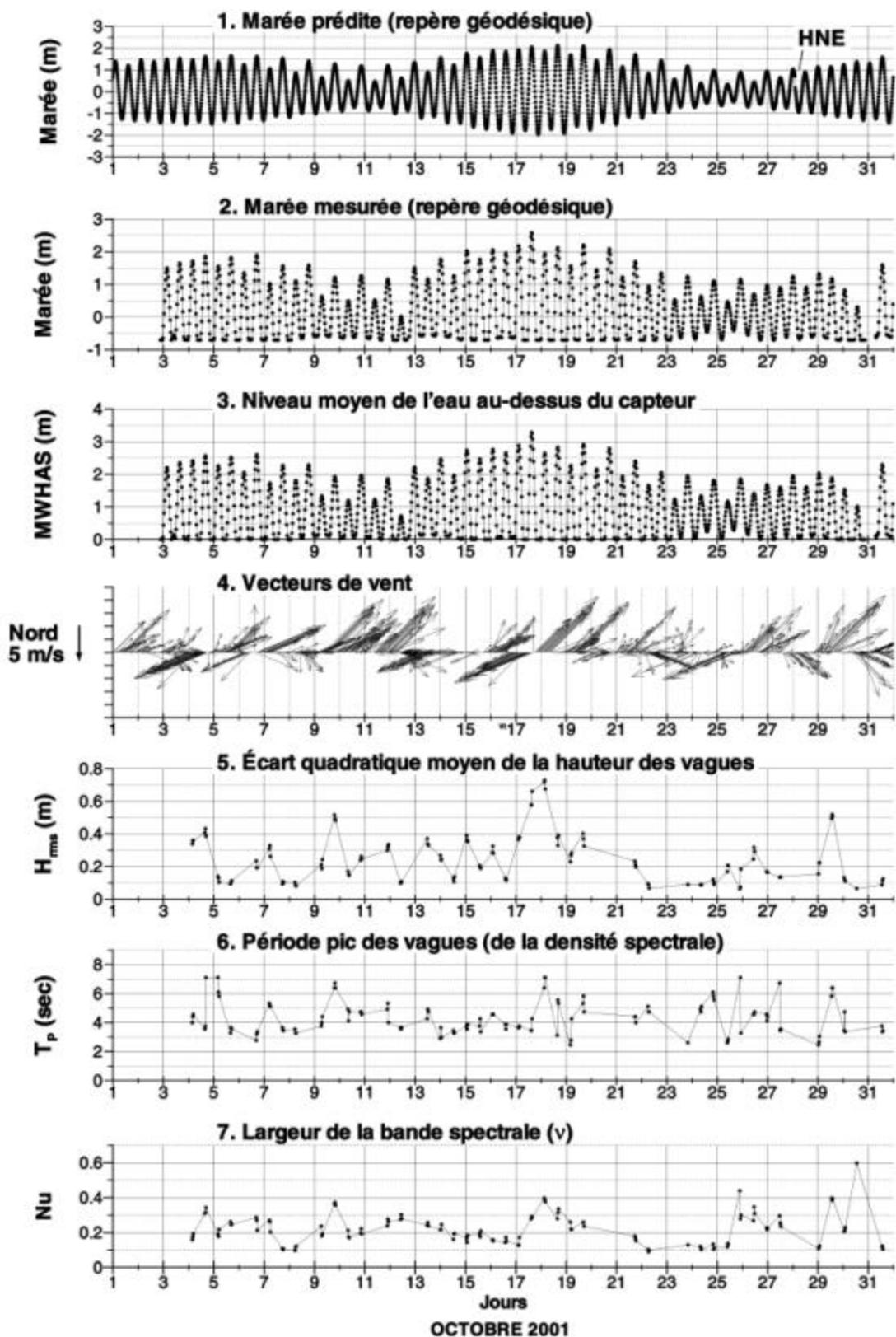


Figure 19: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (extrait des résultats complets)

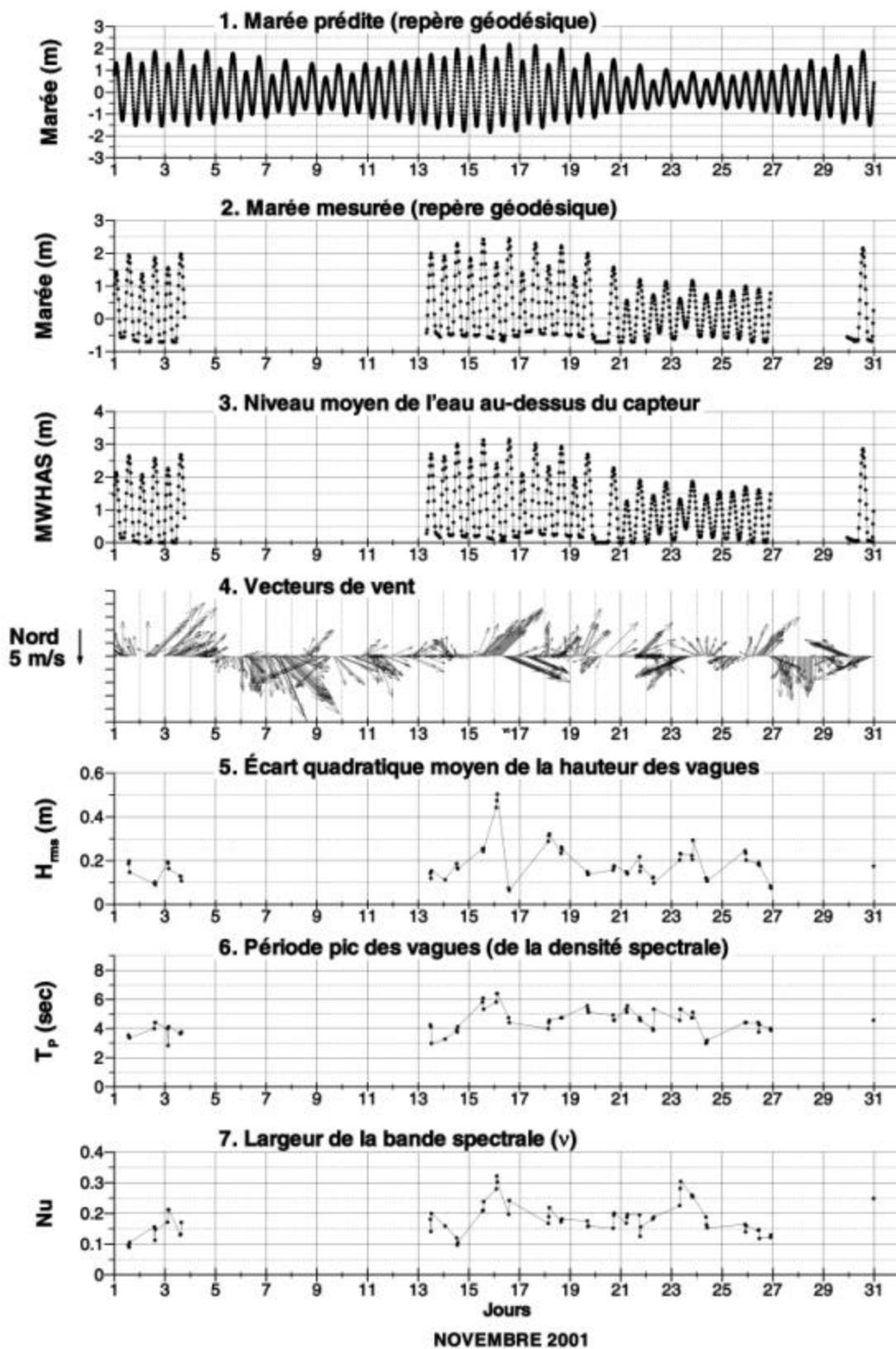


Figure 20: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de novembre 2001 (extrait des résultats complets)

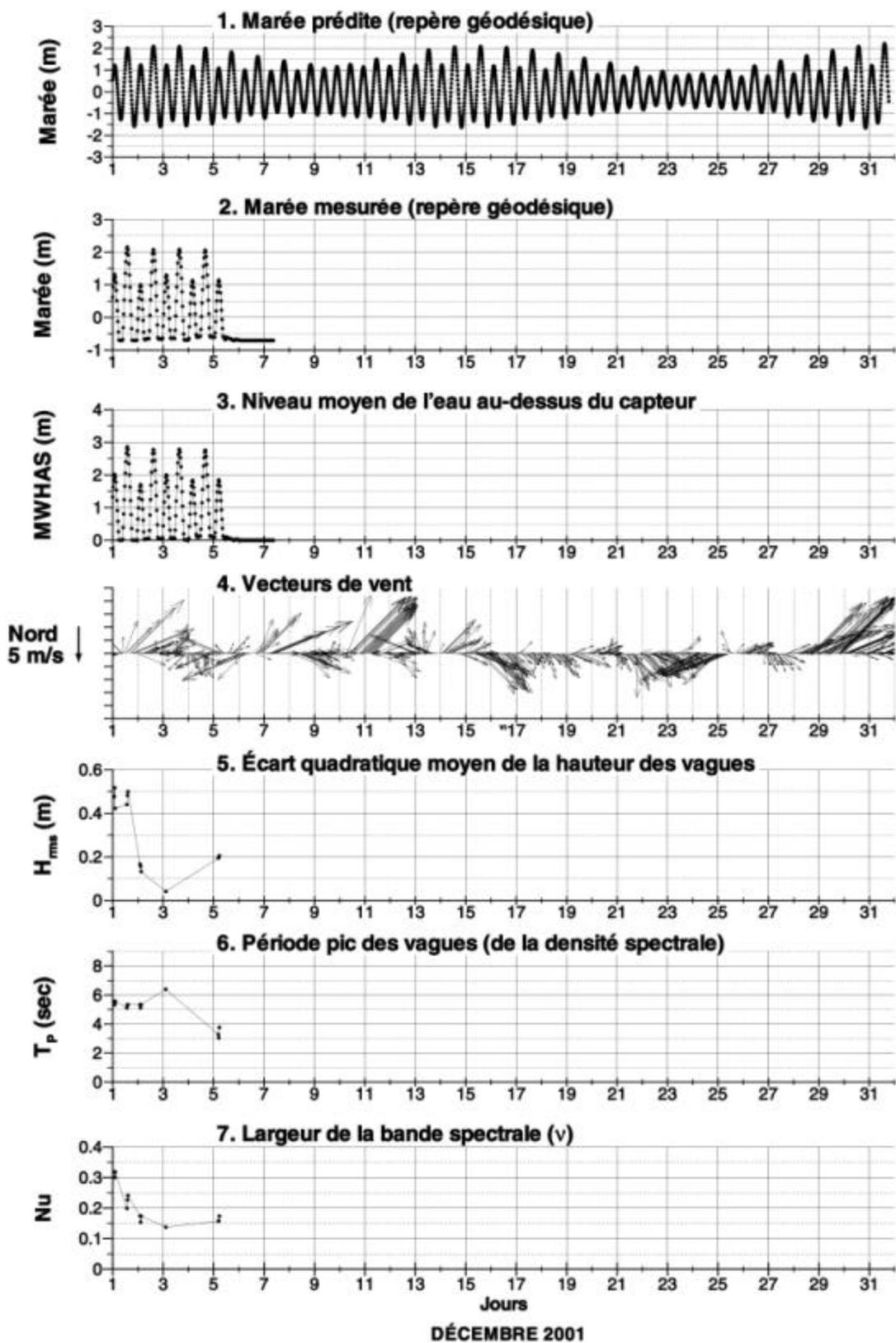


Figure 21: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses de mesures de terrain pour le mois de décembre 2001 (extrait des résultats complets)

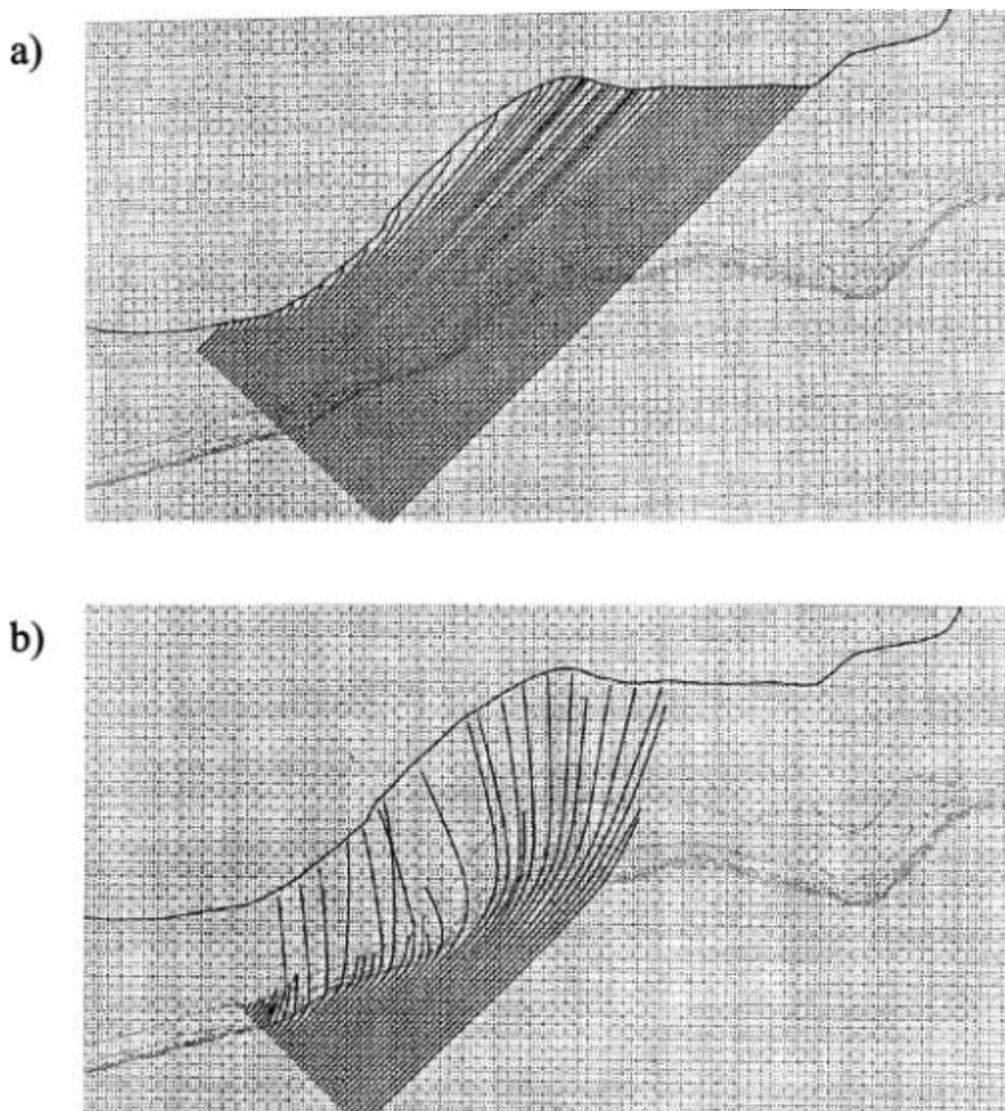


Figure 22: Réfraction des vagues générées par un vent du SO: (a) vagues de période de 2 s, (b) vagues de période de 10 s, d'après Ouellet (Roche Itée, rapport pour MTQ 1997)

7.1.4. Prises de vue vidéo des tempêtes

Le Tableau 2 donne le sommaire des informations sur les séquences vidéo. Le 13 septembre, en présence d'un vent provenant de la terre (ONO), le niveau très bas de la marée haute ne permettait pas à l'eau de se rendre aux SEMS. Le même phénomène s'est produit lors de la dernière visite (7 novembre 2001), malgré une marée plus haute que celle du 13 septembre 2001. Les prises vidéo du 4 octobre 2001, présentées sur le CD, montrent l'interaction entre les vagues de dimension significative ($H_{rms} = 0,35$ à $0,40$ m) et les structures. On y note la dissipation de l'énergie lorsque les vagues traversent les SEMS.

Date de la prise de vue	Vitesse et direction du vent	Heure marée haute	Moment du début de la prise vidéo	Élévation marée prédite et (mesurée) Élévation géodésique ⁵ en mètre
13 septembre 2001	20,0 km\H O\N\O	11h15	11h25	0,48 (aucune)
4 octobre 2001	21,5 km\H E\N\E	16h00	15h15-16h15-7h15	1,62 (1,82)
17 octobre 2001	29,2 km\H E\N\E	15h00	16h15-17h15	2,05 (2,65)
7 novembre 2001	28,8 km\H N\O	18h15	17h20-18h20	1,45 (aucune)

Tableau 2 – Sommaire des paramètres sur les prises vidéo.

Le 17 octobre 2001, des vagues de dimensions importantes (H_{rms} variant de 0,4 à 0,8 m) ont atteint le bas du talus de la zone aménagée avec les SEMS malgré la présence d'un plateau de sable d'une largeur de plus de 5 m dont l'élévation s'élevait sur la côte à 2,5 m. L'élévation de la marée observée a atteint ce jour-là un maximum de 2,65 m en raison de la surcote enregistrée le 17 octobre 2001. L'effet des vagues (*run-up*) qui s'additionnait à la surcote pouvait alors générer de l'érosion dans le talus, ce que montre les prises vidéo du 17 octobre 2001. De ce même extrait vidéo, il faut noter aussi l'effet de réfraction des vagues sur le bout de l'enrochement qui a généré de l'érosion derrière celui-ci. L'érosion générée par cet événement ne s'est toutefois pas fait sentir de façon significative en haut de talus, sauf dans la partie du talus directement adjacente à l'enrochement. Le plateau de sable a cependant été modifié de façon importante (accumulation en amont et perte en aval) ; il a néanmoins agit comme une zone tampon entre le talus et les vagues et sans lui, les dommages sur le talus auraient été très significatifs tels que ceux observés dans d'autres secteurs non protégés ce jour-là.

7.1.5. Action des glaces sur le site expérimental

La période de l'automne (septembre - décembre), pendant laquelle la glace n'est pas encore établie pour protéger la côte, est la plus érosive en raison des tempêtes majeures qui y sévissent et qui sont accompagnées des grandes marées d'équinoxe. Généralement, un amoncellement de glaces riveraines se forme au gré des marées et peut persister de la fin décembre à la mi-avril. Cet amoncellement protège le talus de l'érosion occasionnée autrement par les vagues générées par les tempêtes d'hiver sur le fleuve libre de glace à l'année longue dans l'estuaire.

La débâcle des glaces accumulées sur le littoral commence habituellement en mars et se termine généralement au début d'avril (Bernatchez 2000). Au printemps, l'amoncellement de glace de rivage protège la plage mais les avant-côtes sont exposées au régime des vagues réfléchies et cela occasionne une forte érosion du bas de la plage en face du pied de glace. Graduellement, à mesure que les glaces quittent la plage, la

⁵ Altitude relative au niveau moyen de la mer (NMM1929). L'écart entre le niveau marégraphique et le NMM est de -1,81 m au repère altimétrique 92L4054 (station 2840).

limite de la réflexion se déplace vers le haut de la plage et vers le pied du talus. Une action érosive provient également des changements de niveau d'eau et des courants alternatifs de la marée qui brisent la glace et entraînent vers le large les sédiments ancrés dans les amas de glace. Ces amas sont finalement poussés vers le large par l'action des vents provenant de la terre.

Ces dernières observations sont montrées sur les photographies de la Figure 23 qui présentent l'évolution des glaces durant l'hiver 2002. Dès la fin du mois de novembre, les premières précipitations de neige ont débuté. Elles ont été emportées par l'eau dans la zone de marée (photo 1). C'est plutôt vers la mi-décembre que du frasil a commencé à s'accumuler (photo 2). Ensuite, celui-ci s'est épaissi et des blocs de glaces provenant de la dérive s'accumulaient aussi dans la partie basse de la plage et des précipitations de neige ont recouvert entièrement la zone côtière (photo 3). Au début du mois de mars 2002 (photo 4), les blocs de glaces les plus en aval ont quitté le littoral et ont été emportés par les marées hautes et des vents qui provenaient de la terre. Au début du mois d'avril 2002, les vents et les marées ont emporté l'ensemble des blocs de glaces situés dans la partie basse de la plage (photo 5) et l'ont rendu vulnérable à l'attaque des vagues; ceux qui étaient situés plus en amont sont restés sur la plage car la combinaison du vent et de la marée n'était pas suffisante pour soulever ces derniers. Dans la zone témoin sans protection, la frange de glace côtière était plus mince, reflétant ainsi la présence d'une plage plus basse. Dans ce secteur, suite au départ plus rapide des glaces, le talus est devenu vulnérable à l'érosion. Cependant, dans le secteur protégé par les SEMS, où le haut de la plage était soulevé par leur effet d'ensablement, les grandes marées n'ont pas emporté la glace qui avait fondu sur place (photo 6). L'action combinée des SEMS, par l'augmentation du niveau de la plage et la rétention des glaces, a donc protégé efficacement le talus contre l'érosion durant les mois de mars et d'avril 2002.



Figure 23: Photographies de l'état des glaces sur le site expérimental du mois de décembre au mois d'avril 2002

7.2 Variations morphologiques de la plage

Deux modes d'analyse des résultats sont montrés dans les deux sous-sections suivantes. La première sous-section est une analyse des profils de plage (en deux dimensions spatiales) afin d'identifier les changements morphologiques locaux en fonction des paramètres hydrodynamiques présentés de la Figure 17 à la Figure 21. La deuxième sous-section est une analyse en trois dimensions qui permet une représentation du site expérimental dans son ensemble afin d'étudier les interactions au régime dynamique en fonction des différentes zones du site d'expérimentation. Une animation de ces résultats (disponible sur disque compact) nous fait suivre, en détail, les variations morphologiques de la plage en fonction de la variabilité des conditions météorologiques et hydrodynamiques.

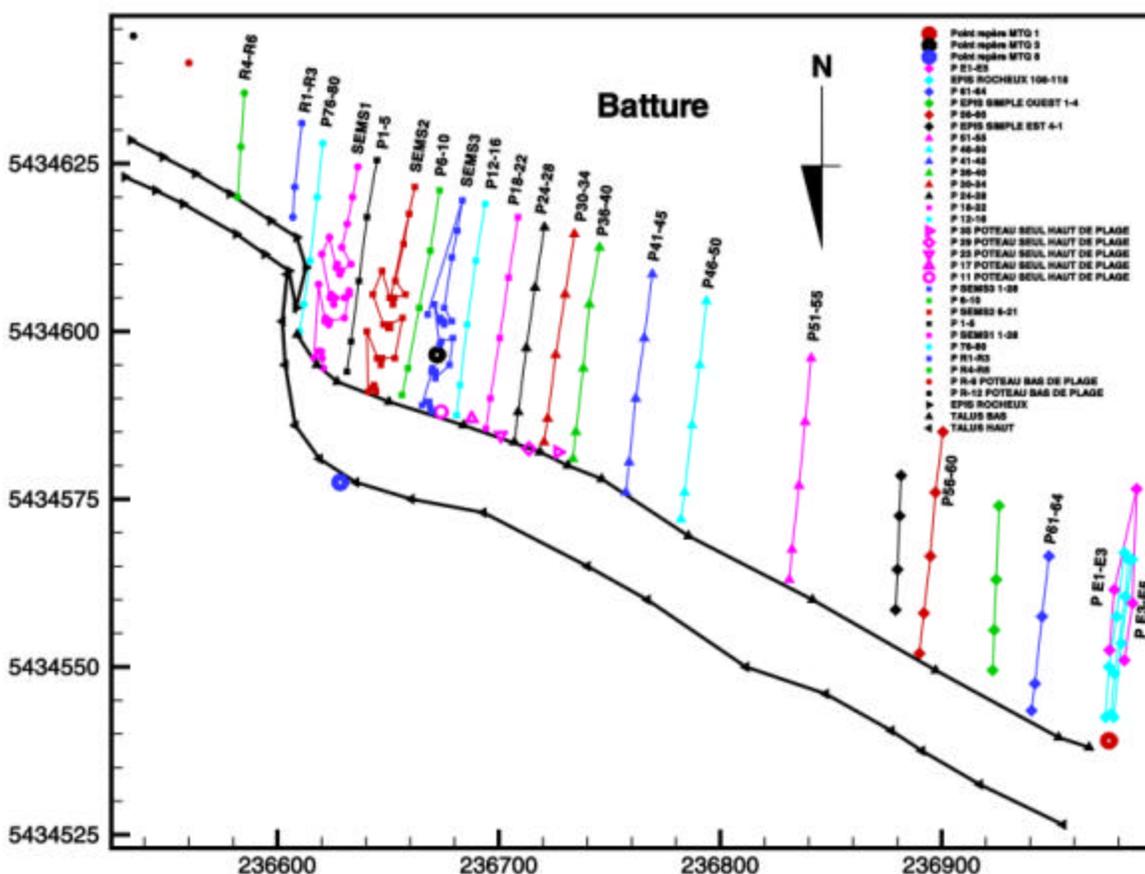


Figure 24: Carte de localisation des profils des mesures morphologiques

Les résultats de l'analyse des mesures de terrain présentent les variations morphologiques du profil de la plage pendant la période d'expérimentation dans le secteur d'installation des SEMS et dans les deux zones avoisinantes à cette région. Le schéma de répartition des profils est montré à la Figure 24 (un plan détaillé du talus et des épis est inclus dans le rapport d'arpentage du MTQ 2003).

7.2.1. Analyse de la variabilité de la plage en deux dimensions spatiales (2D)

Les résultats d'analyse pour tous les profils de plage de la zone d'expérimentation (voir Figure 24), pour la période de juin à décembre 2002, sont présentés sur les Figure A.6-Figure A.28 de la section A.2 de l'Appendice. L'étude globale de ces résultats démontre une variabilité temporelle prononcée de la topographie de la plage.

Une analyse détaillée des variations morphologiques a été effectuée en se basant sur neuf profils choisis parmi les 23 présentés à la Section A.2; pour ces neuf profils de la plage, les résultats de mesures sont discutés en détail. Les profils sélectionnés caractérisent les changements topographiques les plus marqués (par rapport aux profils enregistrés précédemment). Cette procédure de sélection permet d'éliminer de l'analyse certains profils présentés dans l'Appendice (Figure A.6-Figure A.28; Section A.2) où les changements topographiques relatifs sont faibles et ne fournissent pas les informations significatives à l'interprétation des résultats.

L'analyse de la variabilité de la plage est effectuée par rapport aux enregistrements de la première campagne de mesures qui a eu lieu en juin 2001, avant l'installation des ouvrages de protection(Figure 8). Ces profils de départ sont présentés sur les Figure 26-Figure 36 par des traits disposés en gras, les profils de la plage, représentant l'état final de l'évolution temporelle de la topographie pour la période du suivi, sont présentés par un trait gras discontinu, les profils mesurés après la tempête du 17 octobre 2002, la plus forte de la période de mesures (Figure 19), sont montrés par un trait pointillé en gras.

La présentation de l'analyse est fondée sur le comportement sédimentologique de 6 tronçons de plage (zones). Ces tronçons peuvent se comporter de manière différente l'un de l'autre en raison de leurs composantes géomorphologiques typiques différentes. Il faut noter que ces tronçons sont reliés par le transit du transport littoral. Les six zones sont les suivantes :

1. Zone littorale comprenant un épi conventionnel en enrochement (ouest) ;
2. Zone littorale sans aucune protection ;
3. Zone littorale sans aucune protection située à proximité des SEMS ;
4. Zone littorale comprenant le banc d'essai des SEMS ;
5. Zone littorale localisée entre le SEMS no 1 et le début de l'enrochement
6. Zone littorale située devant l'enrochement (est).

La sous-zone, située à proximité des SEMS, est la plus vulnérable pour subir un impact sédimentologique négatif par rapport au banc d'essai, une attention particulière y a été consacrée.

1 - Zone littorale comprenant un épi conventionnel en enrochement

Les mesures des deux premiers profils de plage (Figure 25, Figure 26 et Figure 27) illustrent la variabilité temporelle de la plage située du côté ouest et du côté est d'un épi en enrochement se trouvant à l'extrémité ouest de la zone témoin.



Figure 25 - Photographie de l'épi rocheux (à l'ouest de la zone du suivi) en présence des cinq poteaux du suivi

Les résultats de mesures effectuées des deux côtés de l'épi conventionnel démontrent que son fonctionnement est typique pour ce genre de construction. Les vagues arrivant de l'ouest et du sud-ouest ont provoqué une accumulation de sable du côté situé en amont de l'ouvrage et ont entraîné une érosion de côté en aval. Les effets "érosion-accumulation" ont été inversés pour les vagues générées par les vents soufflant dans la direction inverse. La réponse morphologique de la plage aux tempêtes ambiantes sera d'autant plus forte si les vagues arrivent pendant les périodes de vives-eaux avec une surélévation du niveau moyen de l'eau (surcote). Pendant la période de juin à novembre 2001, le profil de plage s'est soit érodé, ou soit engraisé en fonction des conditions hydrodynamiques ambiantes déterminées par la direction d'approche des vagues (en relation directe avec la direction et la vitesse de vent observées). Les accumulations de sédiment se sont produites du côté est de l'épi. Des effets d'érosion prononcée et occasionnée pendant la tempête du 17 octobre 2001 sont visibles à la Figure 26 (ligne pointillée bleu). De côté ouest (Figure 26), le profil de la plage est revenu en novembre 2001 à son état initial du 26 juin 2001. Du côté est (Figure 27), le profil de la plage a subi une érosion en novembre 2001 par rapport à son état initial du 26 juin 2001. À la fin de l'automne, l'érosion observée a résulté des changements de la pente moyenne de la plage. La pente du profil initial de la plage est plus abrupte (ligne continue en gras sur la Figure 27) que celui du profil final (ligne discontinue en gras sur la Figure 27).

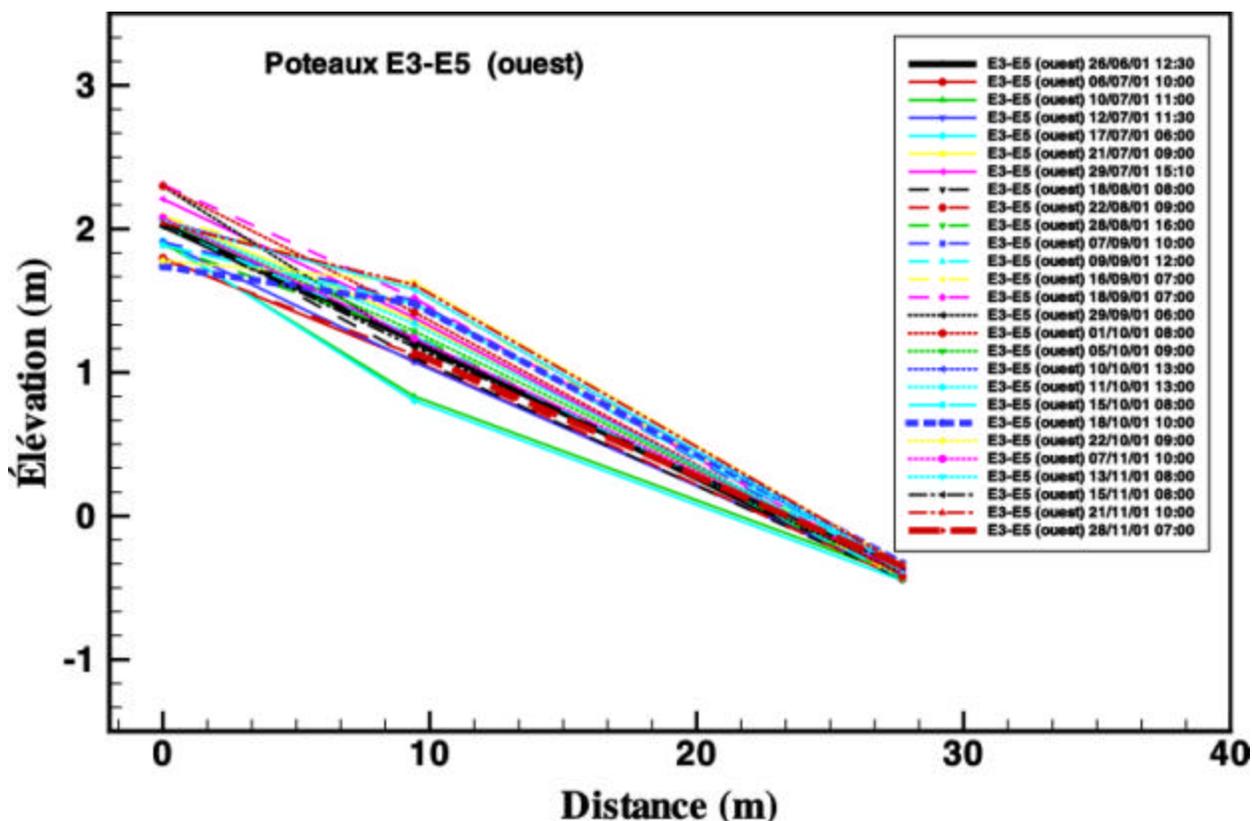


Figure 26: Résultats des mesures topographiques - profil E3-E5 (ouest)

2 - Zone littorale sans protection

Les résultats des mesures des profils (Figure 28) P51-55 représentent les variations morphologiques hors de la zone affectée par l'épi en enrochement et des SEMS. Cette région se situe entre les structures de protection (environ à 150 m de l'épi en enrochement et à 150 m du SEMS le plus rapproché).

Pendant les premières semaines de mesures (de 25 juin au 18 août 2001) le profil P 51-55 était presque stable par rapport à son état initial (Figure 28) avec un bilan sédimentaire légèrement négatif. Après plusieurs tempêtes mineures, ayant eu lieu au cours du 19 août au 16 octobre 2001, un abaissement graduel du profil de la plage s'est propagé vers la base du talus (équivalent à celui observé sur les profils précédents). En effet, une érosion locale de la plage a été observée à la limite supérieure atteinte par le niveau de l'eau (position instantanée de la ligne côtière relative aux conditions hydrodynamiques).

La tempête du 17-18 octobre 2001 a créé un changement important de la plage. Une érosion du bas de talus s'est produite suite à la modification de la pente de la plage (non apparent sur le profil). La pente du profil a été modifiée en augmentant nettement le niveau du bas de la plage. Par ailleurs, ce phénomène a occasionné un élargissement de la plage de plus de 5 mètres. Dues aux accumulations et à la redistribution du sable

érodé du talus, l'environnement côtier est retourné à des conditions plus proche de l'équilibre topographique stable. La plage a une pente plus douce que celle observée en juin 2001. Le redressement du profil de la plage occasionne quand même une vulnérabilité à l'érosion du pied de talus étant donné que le haut de la plage est relativement bas depuis la tempête de 17-18 octobre 2001. Après cette tempête, l'analyse des profils P51-55 montre que plusieurs événements climatiques ont été susceptibles de générer de l'érosion au talus de sable, car le niveau d'eau supérieur de la marée a atteint ou dépassé le niveau supérieur de la plage d'environ dix fois durant la période d'août à octobre 2001. L'événement le plus marqué après cette tempête a été celui du 14-15 novembre 2001. À ce profil, une érosion importante du talus s'y est produite. L'érosion et la retraite du pied ainsi que du sommet du talus ont été quand même des conséquences graves aux processus observés couramment dans la région sans protection.

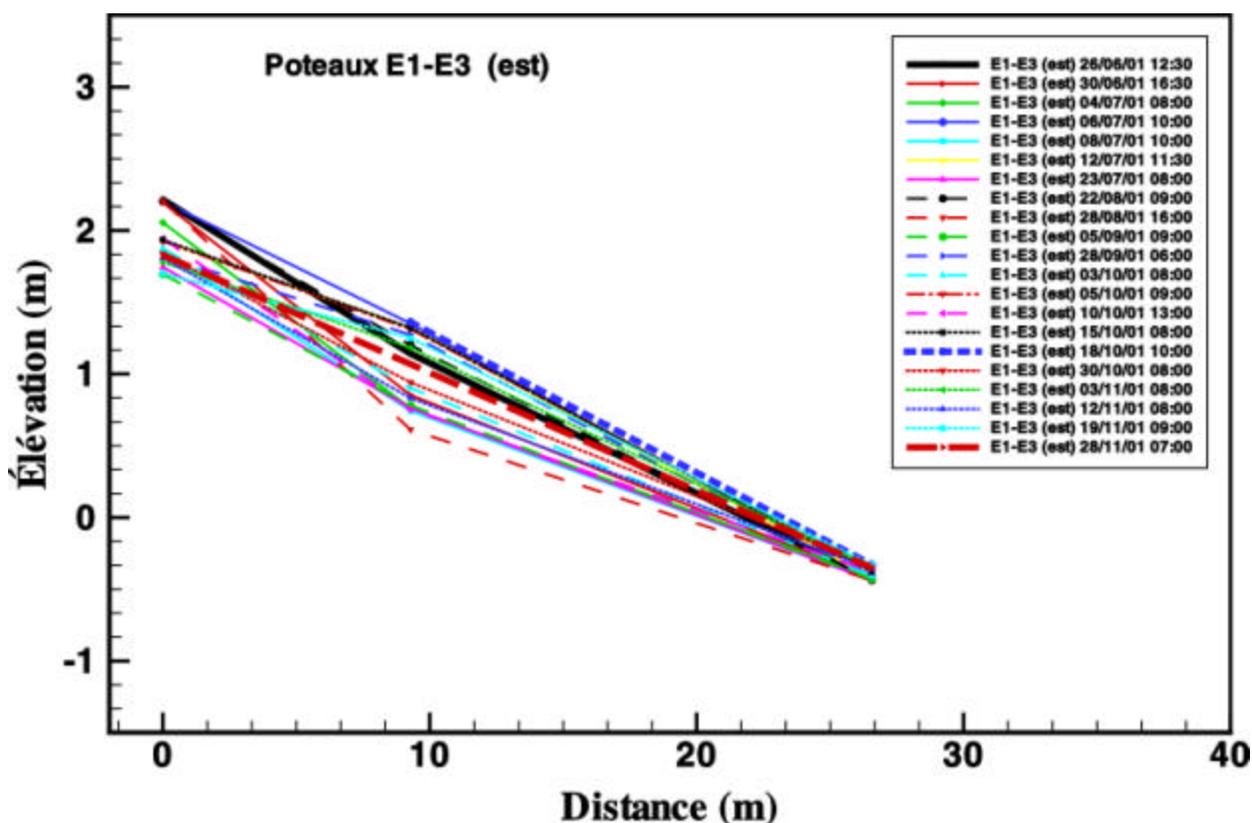


Figure 27: Résultats des mesures topographiques - profil E1-E3 (est)

3 - Zone littorale sans protection située à proximité des SEMS

Le profil P 30-34 (Figure 29) se trouve dans la zone située à côté des ouvrages de protection SEMS. Il se trouve à environ 40 m du SEMS no 3 localisé le plus à l'ouest. Il représente bien le comportement de la plage dans la zone proche du site d'implantation

des SEMS. La topographie du secteur a subi des modifications morphologiques qui ont résulté du redressement de la pente moyenne telle qu'observée dans la zone du profil précédent P 51-55. Cependant, durant la période de suivi, les tempêtes d'automne ont occasionné, dans cette partie de la zone d'expérimentation, une accumulation de sable en quantité plus élevée dans la partie du bas de la plage que celle observée sur les profils localisés plus à l'ouest; l'érosion du haut de la plage a aussi été moins prononcée. Ces changements morphologiques ont aussi été le résultat d'une érosion du haut de la plage et du talus, suite à l'événement hydrodynamique majeur de l'automne (17-18 octobre 2001). Ils ont été compensés par des accumulations de sable observées au mois de novembre (5 novembre 2001) et qui provenaient de l'érosion du talus, suite au réajustement de sa pente par les effets de la gravité (16 au 19 novembre). Cette érosion du talus a rendu disponible une grande quantité de sable au littoral local.

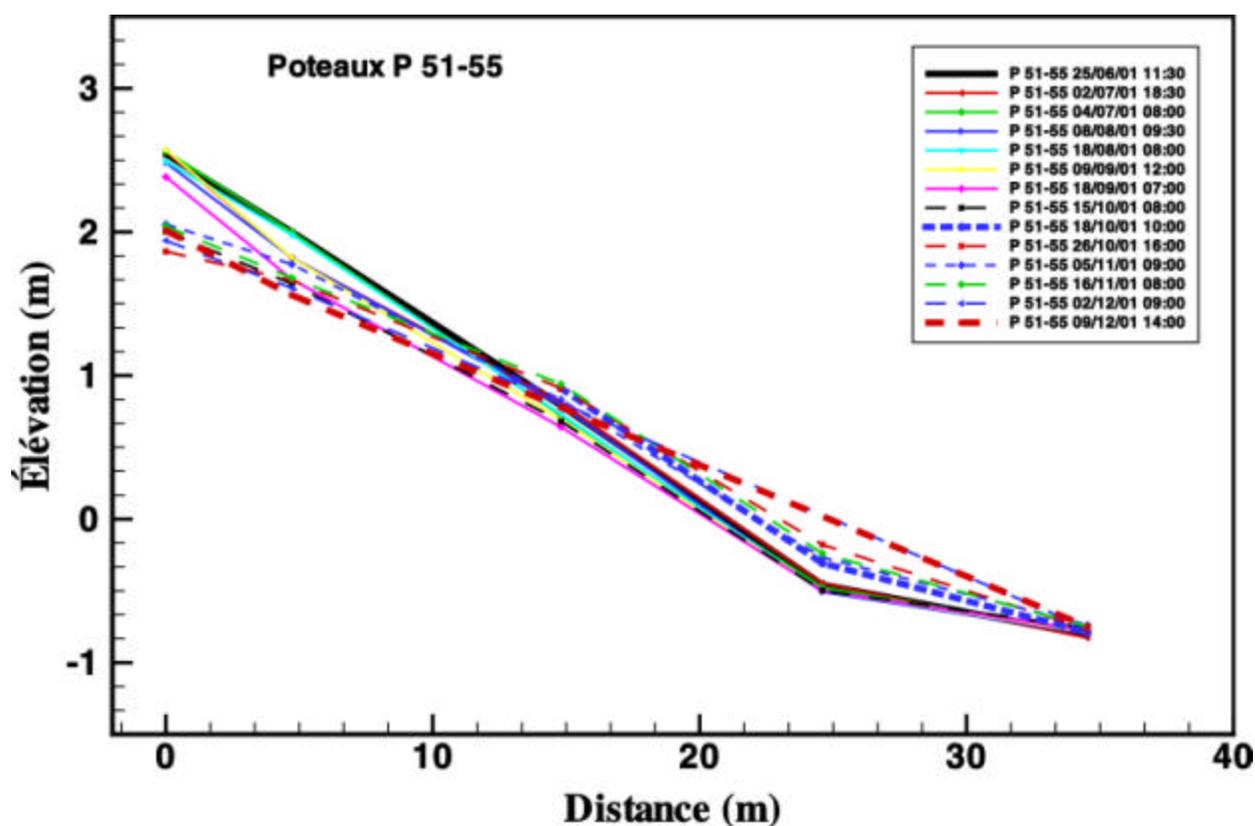


Figure 28: Résultats des mesures topographiques - profil P 51-55

À la fin du suivi (novembre – décembre 2001), des accumulations ont créé une couche de sable d'une épaisseur d'environ 0,5 m au-dessus du profil de départ associée avec une diminution de la pente du profil comparé au profil de départ (juin 2001). Une zone d'érosion de la plage a été finalement localisée seulement sur les 2-3 m les plus proches du talus (par rapport au profil initial du mois de juin 2001).

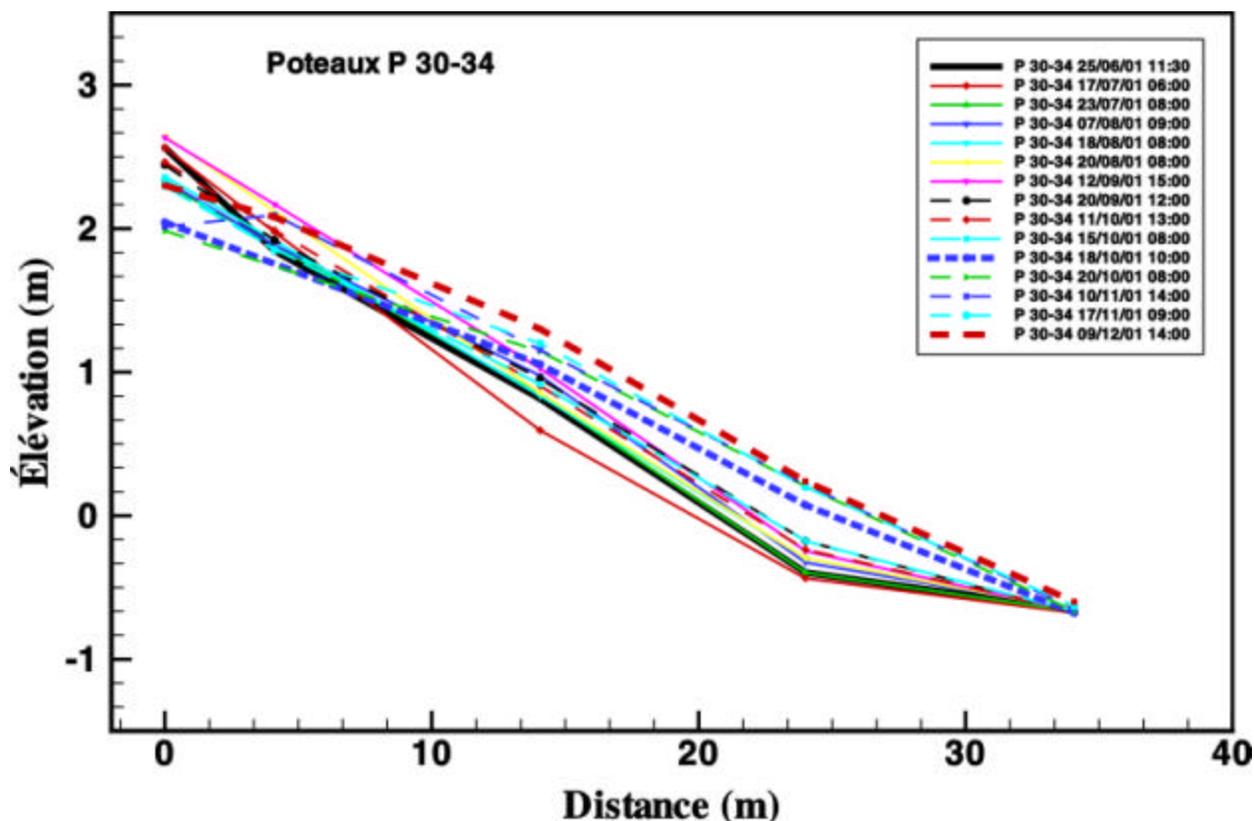


Figure 29: Résultats des mesures topographiques - profil P 30-34

4 - Zone littorale située sur le banc d'essai des SEMS

Les trois profils suivants, le profil P 12-16, le profil P 6-10 et le profil P 1-5 (Figure 30, Figure 31 et Figure 32), se trouvent directement dans la zone de la plage à restaurer. Le premier profil est localisé à l'extrémité ouest de cette zone et les deux autres se trouvent entre les trois ouvrages de protection.

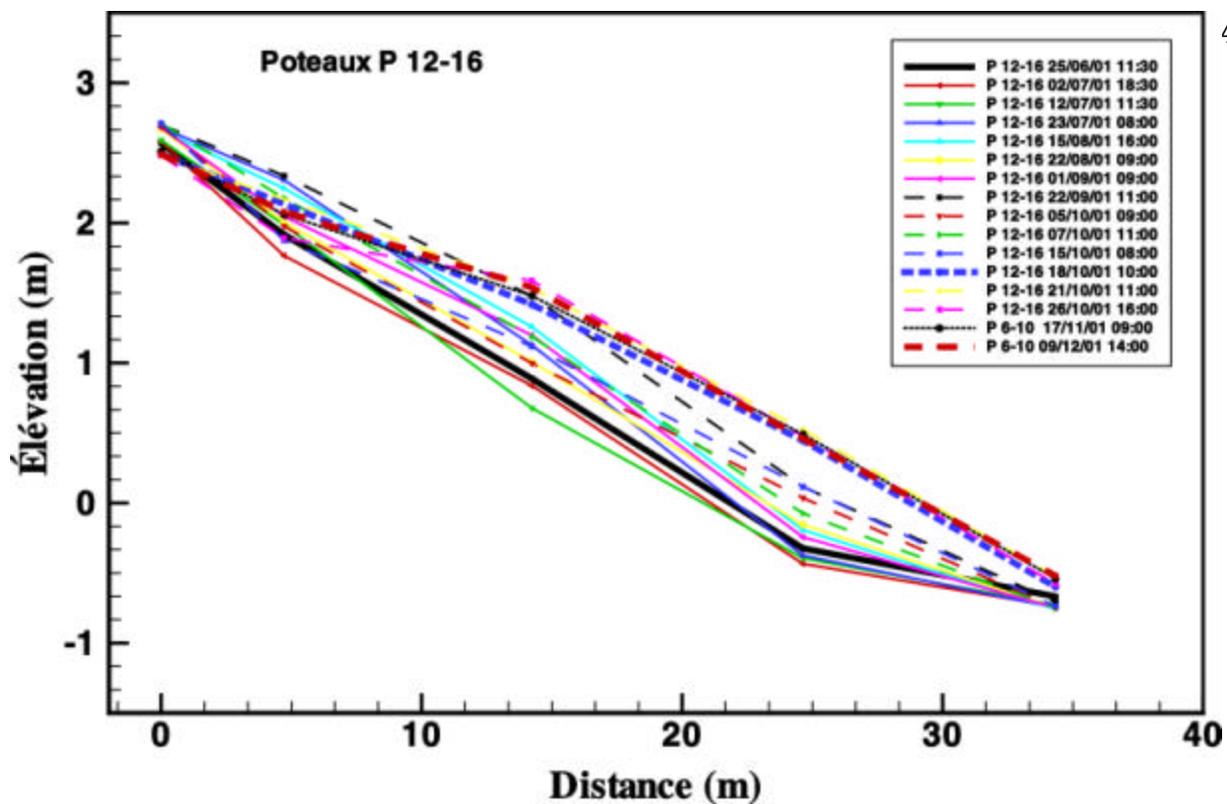


Figure 30: Résultats des mesures topographiques - profil P 12-16

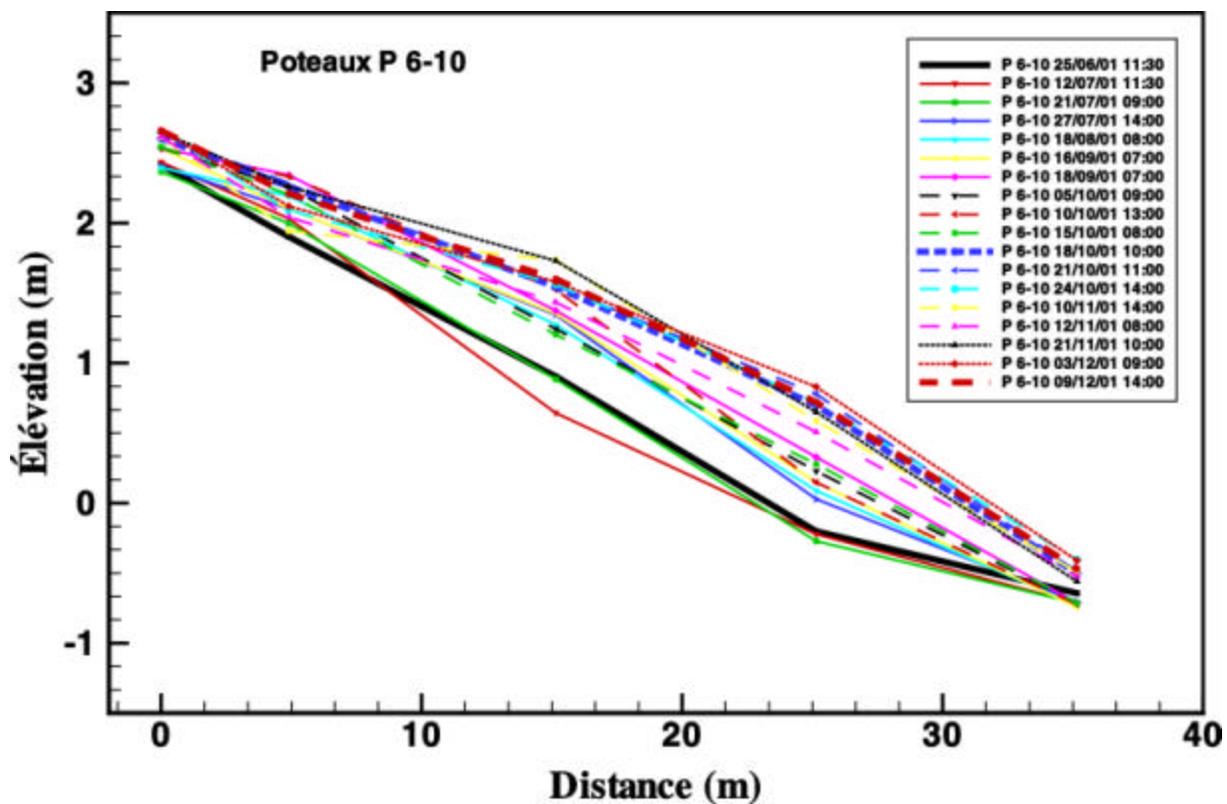


Figure 31: Résultats des mesures topographiques - profil P 6-10

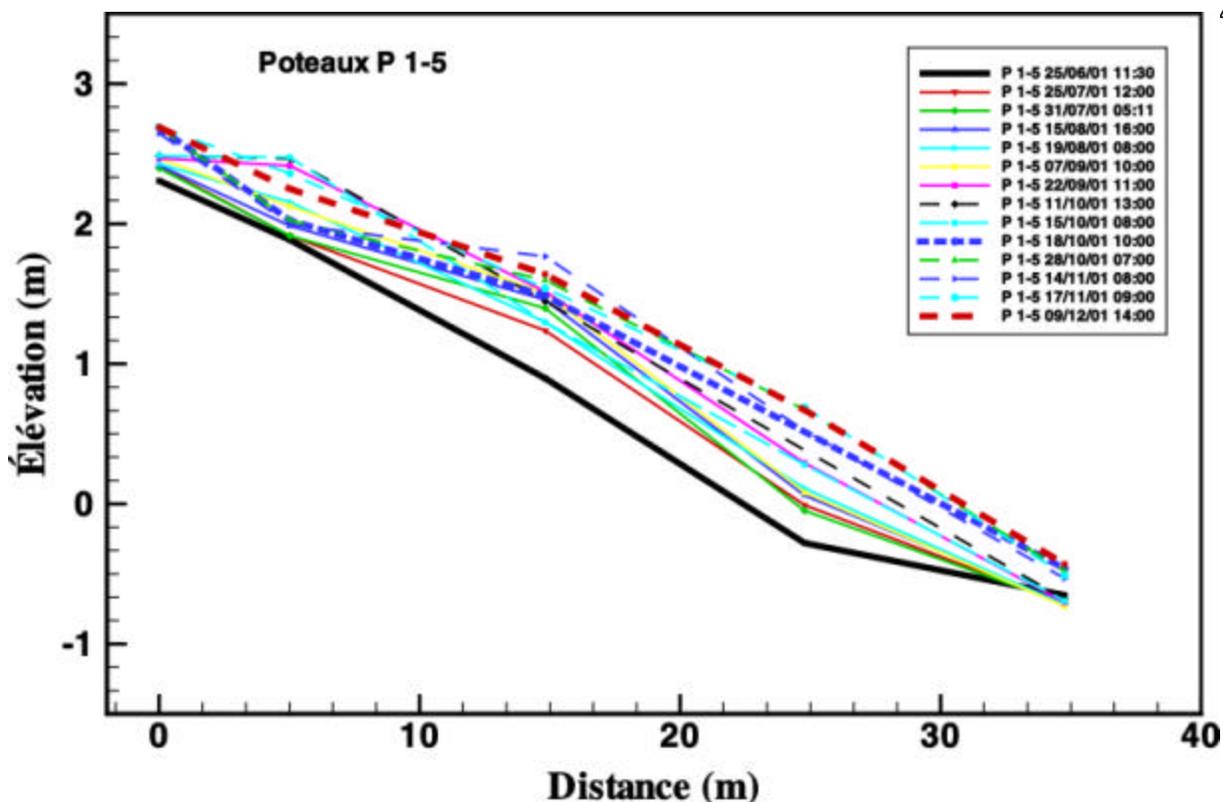


Figure 32: Résultats des mesures topographiques - profil P 1-5

La variabilité temporelle de ces trois profils démontre une tendance à l'accumulation graduelle des sédiments dans la zone aménagée. Le redressement du profil initial jusqu'au profil final varie globalement de $-0,08$ m à $0,95$ m le long du profil avec une épaisseur moyenne d'ensablement égale à $0,4$ m calculée pour la période entre le premier (juin 2001) et le dernier relevé topographique (décembre 2001). Durant la période estivale et jusqu'à la mi-octobre, les accumulations de sable ont été localisées en haut de la plage en formant un plateau sub-horizontale d'une largeur de 5 m (voir P1-5). Durant la même période, la couche de sable accumulée au sommet de la plage dépasse $0,15$ m à $0,2$ m. À l'automne et particulièrement après la tempête du 17 octobre 2001, le sommet de la plage a encore monté et l'épaisseur de la couche de sable accumulé atteint la valeur maximale de $0,42$ m. Cependant, le plateau de sable a été réaménagé et a perdu de son importance sans que le profil n'est retourné à l'état initial du mois de juin 2001. Ces observations contrastent nettement avec les mesures obtenues aux profils précédents (P51-55 et P30-34) où on a observé une érosion graduelle en été et qui s'est accélérée durant les tempêtes d'automne, surtout en haut de la plage.

Pendant la tempête du 17 octobre 2001, une érosion du pied du talus a été enregistrée (voir Figure 33 et Figure 34 et CD-vidéo séquence du 17 octobre) et ce, malgré un niveau de la plage dépassant $2,5$ m par rapport au NMM, i.e. 35 cm supérieur à la marée prédite pour ce jour-là ($2,1$ m). Le 17 octobre 2001 une surcote de plus de 55 cm a été enregistrée et cela a permis à des vagues de hauteur $H_{rms}=0,4-0,8$ m d'atteindre la base

du talus. Cependant, l'érosion a été marginale comparativement au secteur sans protection (P51-55). La plage a continué de s'élargir (2 premiers mètres) à cause des accumulations du sable provenant de l'érosion du talus.

Le bas de la plage a été considérablement ensablé comme il fut observé dans l'ensemble des profils de la zone d'expérimentation. Ce phénomène d'accumulation en bas de la plage a été remarqué à plusieurs endroits le long du littoral de la péninsule Manicouagan, notamment à BSL et au parc Nature de Pointe-aux-Outardes. Selon un calcul basé sur la moyenne des profils mesurés de la zone d'expérimentation, on a estimé qu'environ 3 à 6 m³ de sable par mètre linéaire de plage se sont accumulés en bas de la plage pendant la tempête du 17 octobre 2001. Sur ce fait, on peut supposer que si la région n'avait pas été protégée, elle aurait été massivement érodée à cause de l'effet de bout d'enrochement voisin; le sable de cette région aurait été emporté par les courants et aurait été perdu pour le littoral initial.

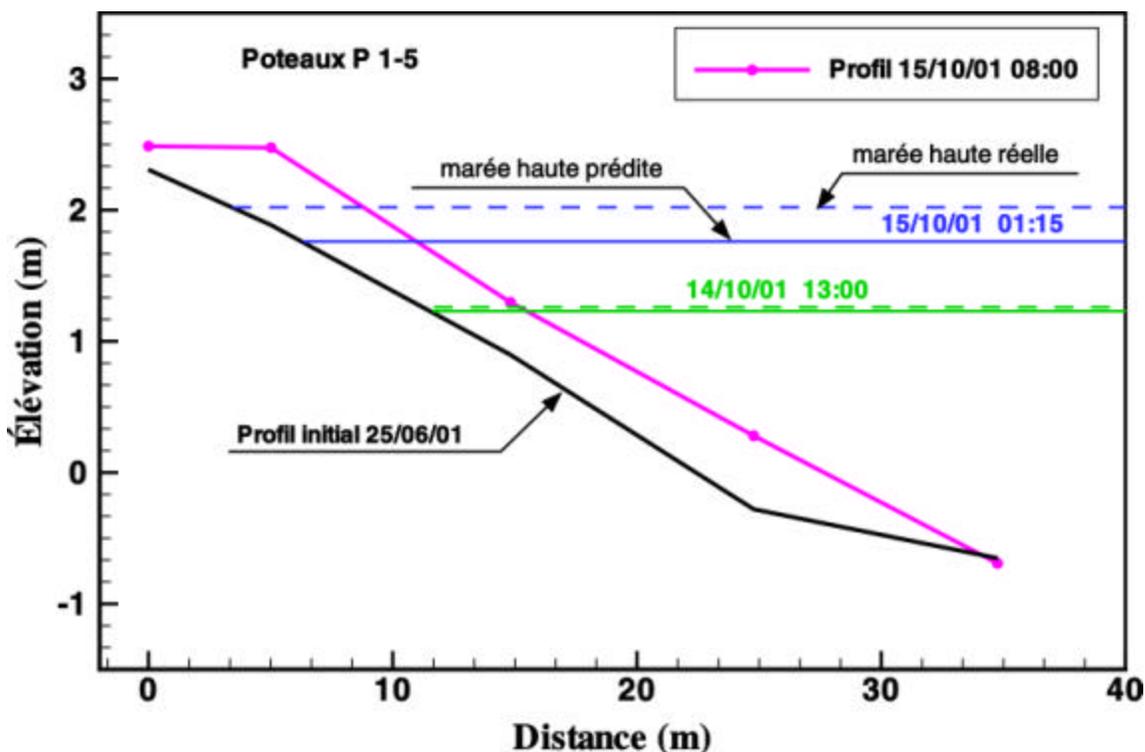


Figure 33: Résultats des mesures topographiques et du niveau d'eau avant la tempête du 17 octobre 2001 - profil P 1-5

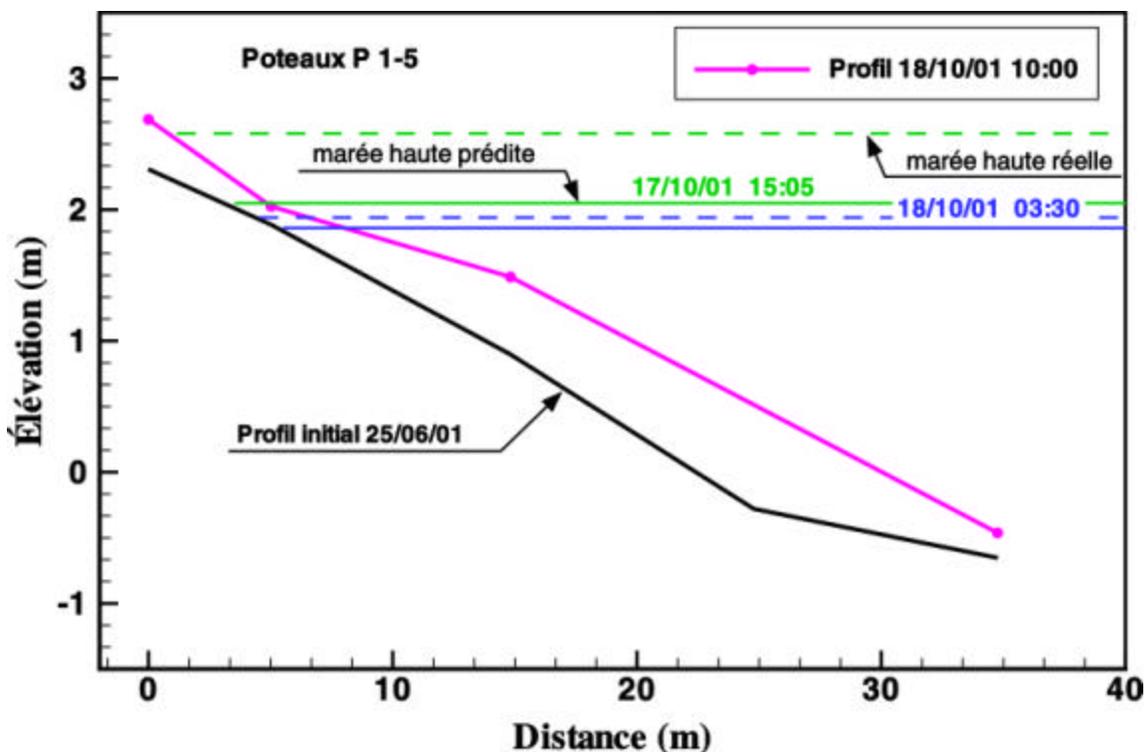


Figure 34: Résultats des mesures topographiques et du niveau d'eau après la tempête du 17 octobre 2001 - profil P 1-5

5 - Zone littorale localisée entre le SEMS no 1 et le début de l'enrochement

Les variations morphologiques représentées par le profil P 76-80 (Figure 35) montrent la variabilité de la plage de l'extrémité est de la zone à protéger. Ce profil se trouve directement entre le SEMS no 1 et l'enrochement, i.e. au cœur de la zone érodée par les effets de bout. L'accumulation des sédiments enregistrée dans ce profil est plus faible que dans les sections précédentes. Cependant, la mesure de ce profil a débuté plus tard (en août 2001 par rapport à juin 2001 pour les autres profils) et l'ensablement de la plage, dû au SEMS installé en juillet, avait déjà commencé plus tôt. Par ailleurs, les effets de courants et de turbulence observés en bordure de l'enrochement pendant la tempête du 17-18 octobre 2001 ont occasionné des pertes de sable importantes malgré la présence d'un SEMS à proximité. La turbulence a été générée par le bout de l'enrochement et par les nombreux débris rocheux qui s'y sont retrouvés (Figure 8). La tempête du 17 octobre 2001 a provoqué une forte érosion en haut de la plage, mais simultanément, comme observé ailleurs, une couche de sable d'épaisseur de 0,5 a été accumulée en bas de la plage. Finalement, au mois de décembre 2001, le dernier profil mesuré s'est placé en moyenne à 0,5 m au-dessus du profil de départ du mois d'août 2001.

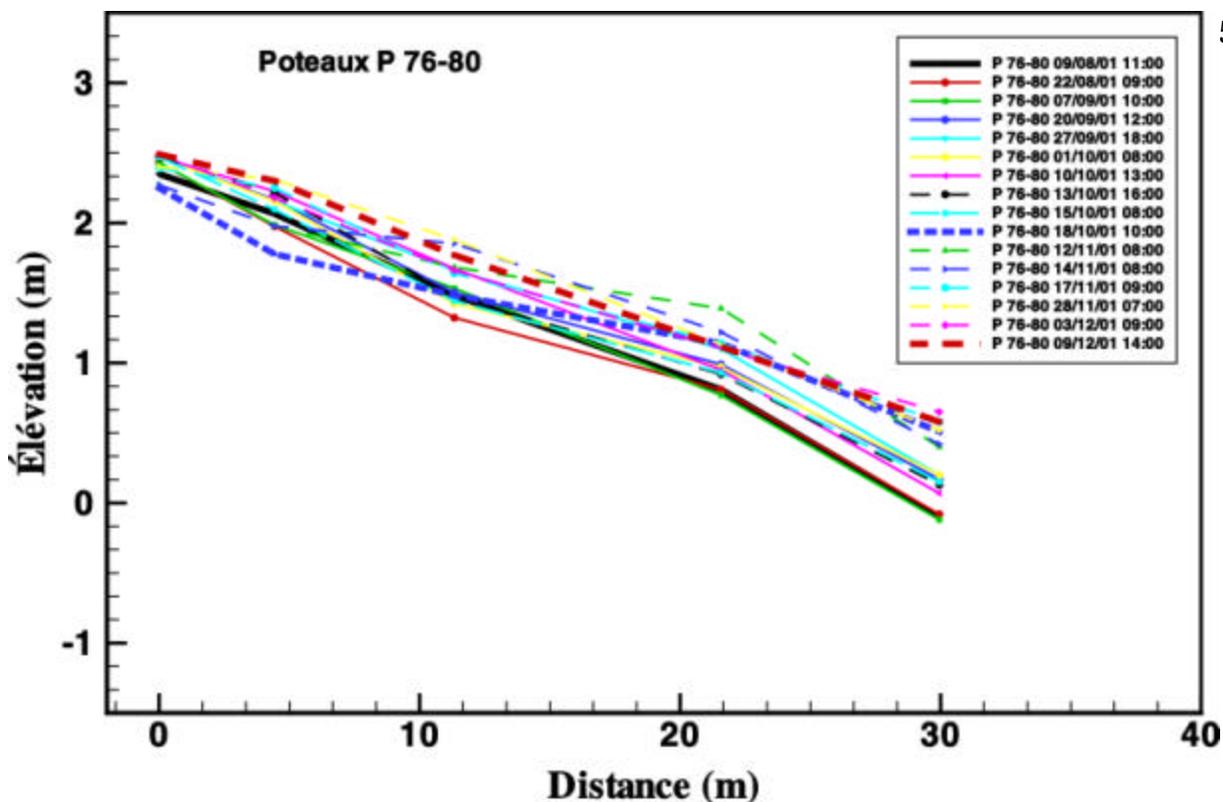


Figure 35: Résultats des mesures topographiques - profil P 76-80

5 - Zone située devant l'enrochement

Le profil R4-R6 (Figure 36) est localisé à 40 m à l'est du premier des ouvrages SEMS, i.e. dans le secteur qui se trouve en avant d'un enrochement linéaire. Selon les observations réalisées, ce profil présente une évolution de la plage qui répond aux conditions hydrodynamiques ambiantes d'une façon uniforme sur toute la longueur de l'enrochement. Contrairement à ce qui a été observé dans les secteurs non protégés par des enrochements, la pente de la plage, devant l'enrochement, n'a pas changé malgré les accumulations de sable.

Quoique relativement stable avant la tempête du 17-18 octobre, le niveau de la plage a subitement augmenté de 0,5 m lors de la tempête du 17-18 octobre 2001. Il s'agit ici d'un débordement de sable provenant des autres zones sans protection, qui, par un effet d'équilibre entre chacune d'elle, a permis des accumulations de sable dans cette zone de plage protégée par un enrochement. Suite à la tempête d'octobre, la plage a eu tendance à revenir à son élévation initiale. Le bas de plage a presque atteint l'état du mois de juin 2001 en l'espace d'un peu plus de deux mois avant d'être à nouveau renfloué par une autre tempête (1^{er} décembre) qui a aussi généré de l'érosion dans les talus avoisinants.

Enfin il faut noter, à partir de la séquence des profils disponible sur CD, que la grande majorité des niveaux supérieurs de la marée a atteint la base minimale de l'enrochement, ce qui a rendu la plage vulnérable à tous les événements climatiques.

Pendant les tempêtes, les effets de réflexion des vagues occasionnés par cette construction rigide pouvaient entraîner le sable de cette zone littorale vers le large.

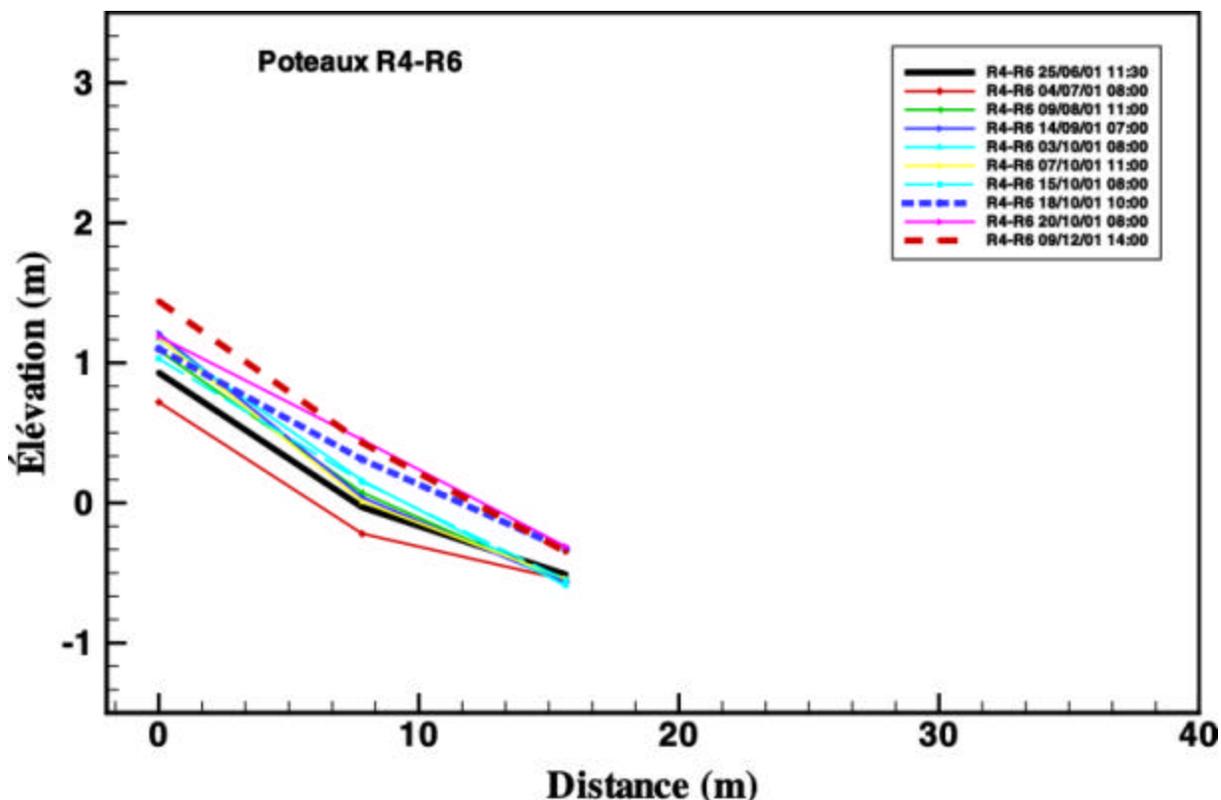


Figure 36: Résultats des mesures topographiques - profil R4-R6

7.2.2. Analyse de la variabilité morphologique de la plage en trois dimensions spatiales (3D)

Les résultats d'analyse des mesures de la région expérimentale ont été reproduits initialement sous la forme de cartes topographiques. Pour diminuer l'erreur créée pendant le processus d'approximation géométrique (les points irréguliers des mesures topographiques doivent être représentés par une grille régulière), les coordonnées géographiques locales ont été présentées par des valeurs numériques avec moins de chiffres significatifs. La transformation a été effectuée par les formules suivantes :

$$x_n = x_{loc} - 236,000 \text{ et}$$

$$y_n = y_{loc} - 5,434,000$$

où x_{loc}, y_{loc} sont les coordonnées géographiques locales et x_n, y_n sont les coordonnées recalculées (voir Figure 37 pour les résultats de mesures du 18 octobre 2001).

Par la suite, les cartes topographiques initiales ont été transposées en coordonnées cartésiennes (voir Figure 38 pour les résultats du 18 octobre 2001) par une rotation des axes initiaux d'un angle de 8.5° .

Pour permettre une visualisation de l'évolution temporelle de la morphologie de la plage, les cartes décrites ci-dessous ont été reproduites avec un nombre de mesures basées sur les mêmes critères que ceux utilisés pour l'analyse en 2D (Section 7.2.1). À partir de cartes topographiques de la plage, pour chaque campagne de mesures (18 campagnes), les résultats ont été présentés sous une forme graphique en 3D (voir Figure 39 pour les résultats du 18 octobre 2001).

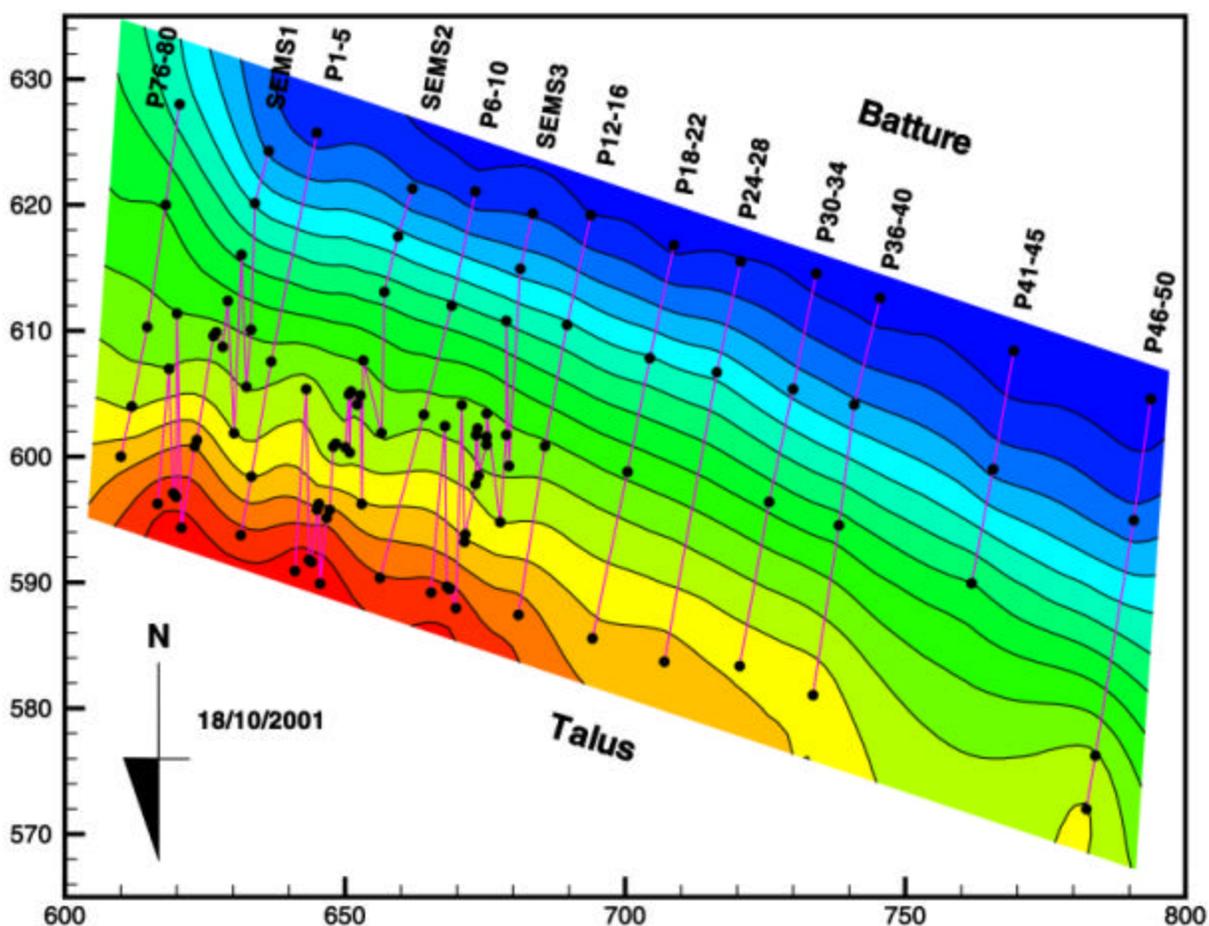


Figure 37: Topo-bathymétrie de la région expérimentale en coordonnées géographiques transformées - résultats des mesures du 18 octobre 2001

L'ensemble des résultats, sous forme d'une animation construite à partir de graphiques en 3D, est joint à ce report sur un CD-ROM. Cette forme de résultats permet de suivre continuellement l'évolution temporelle des changements topographiques dans la région expérimentale décrite à l'aide de l'analyse des profils utilisés à la section 7.2.1.

La variation morphologique la plus marquante a été générée par la tempête du 17-18 octobre 2001. On a observé un ensablement de l'ensemble de la plage dans le secteur est, là où étaient situés les SEMS, de même qu'une érosion importante du haut de la plage du secteur ouest (zone sans SEMS). Une partie du gain important en sable du secteur est, dans sa section de haut de la plage, provenait de l'érosion des sédiments érodés du talus qui étaient restés sur place grâce à la présence des SEMS. Ce n'était pas le cas dans le secteur ouest où le sable érodé du talus a été emporté en bas de la plage ou ailleurs réduisant ainsi l'élévation du haut de la plage tout en rendant ce secteur du talus vulnérable à d'autres tempêtes d'automne.

Un autre événement hydrodynamique important, celui du 1^{er} décembre, a produit une réponse morphologique typique occasionnée par les SEMS. En observant les mouvements de la plage avant et après cette date, l'amont de la plage de la zone est, correspondant au secteur des SEMS, est resté tandis que le sommet de la plage de la zone ouest a baissé à nouveau, démontrant un peu d'érosion du talus.

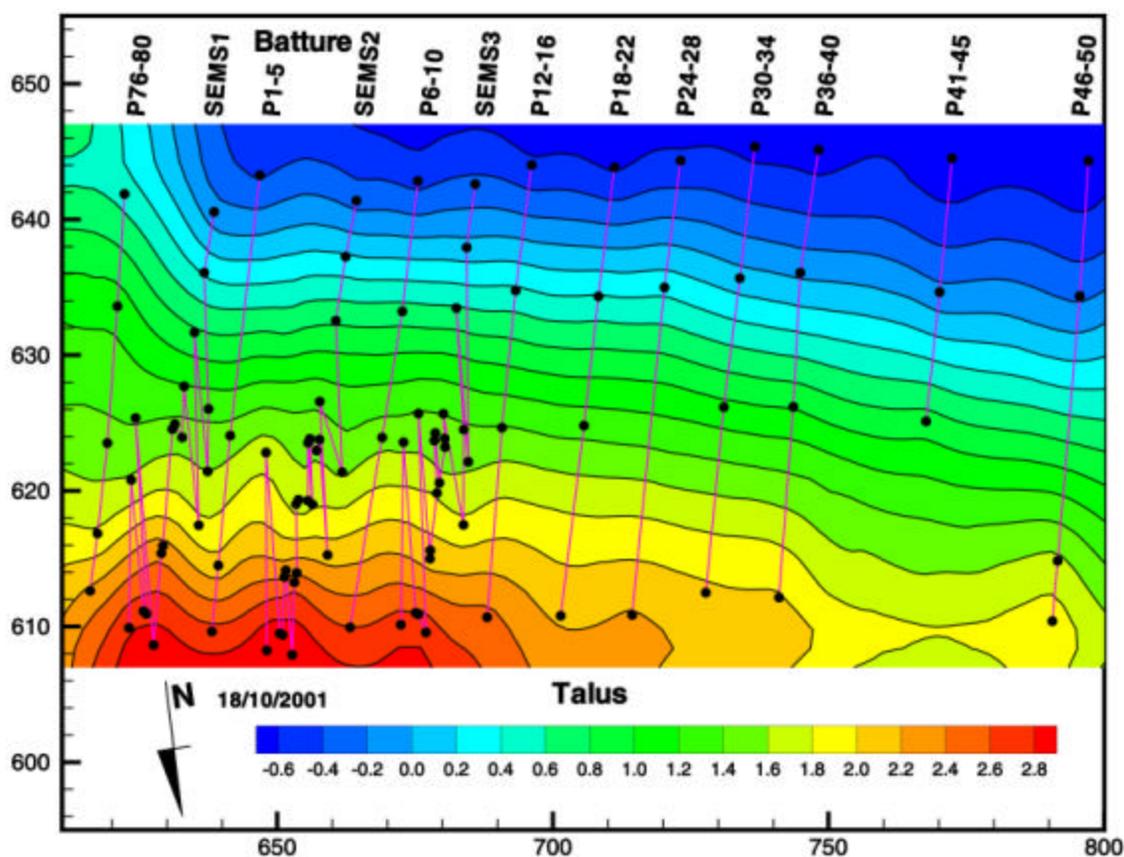


Figure 38: Topo-bathymétrie de la région expérimentale en coordonnées cartésiennes après la rotation - résultats des mesures du 18 octobre 2001

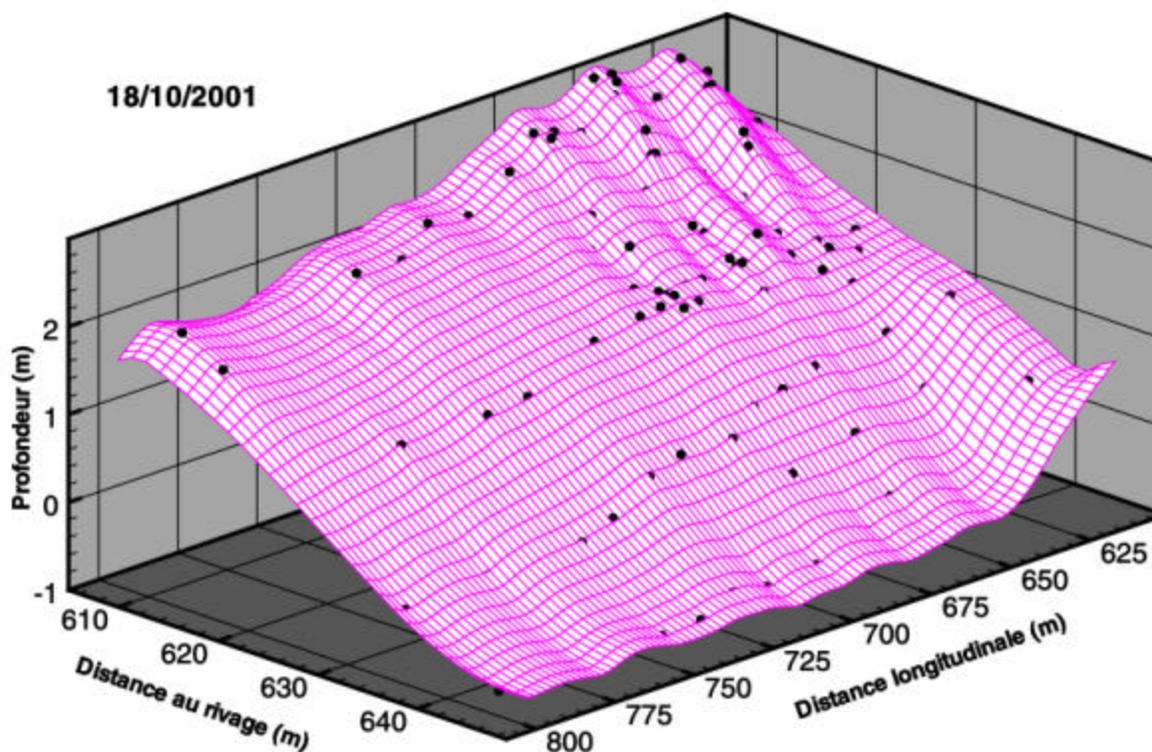


Figure 39: Topo-bathymétrie de la région expérimentale en 3D - résultats des mesures du 18 octobre 2001

8. Discussion

La discussion porte sur les deux aspects suivants: d'une part les résultats d'analyse de l'année 2001 sont présentés et d'autre part, un bref résumé du suivi partiel des travaux effectués en 2002 est amené pour confirmer certaines tendances morphologiques de la plage en présence de SEMs.

8.1 Synthèse de la variabilité de la topographie de la plage en 2001

Durant la période d'expérimentation, les bilans sédimentologiques de la zone protégée par les SEMs et devant l'enrochement ont été positifs. Cependant, dans la partie ouest (zone témoin sans protection), et en s'éloignant des SEMs, le bilan positif a diminué et est devenu graduellement négatif en raison des pertes de sable de plus en plus volumineuses en haut de la plage. Le profil qui a limité les zones de bilans négatifs et positifs était situé approximativement à une distance de 75 à 100 m à l'ouest du SEMs no 3. Dans ce secteur, représenté par le profil (P46-50), et en tenant compte des accumulations de sable en bas de la plage comme en haut de la plage, le bilan était égal à zéro. Il est donc évident qu'aucune perte directe de sable n'a été générée à proximité des SEMs et que le bilan positif fut observé sur une grande partie de la plage sur une

longueur d'environ 100 m. Ces résultats ont démontré que les SEMS ont stabilisé les volumes de sable érodé du talus local et que ce sable aurait été autrement perdu par suite de l'entraînement par la dérive littorale ou par les courants de marée vers le large. En se basant sur cette analyse, les SEMS n'ont pas occasionné d'érosion dans les zones avoisinantes.

L'analyse réalisée à l'aide des profils de mesures a confirmé les conclusions tirées des essais des concepteurs de la méthode (Section 2). Due à la perméabilité de l'ouvrage, le SEMS a retenu seulement une partie des sédiments apportés par la dérive littorale, et a évité une érosion prononcée des zones avoisinantes couramment observée dans les cas d'application d'épis conventionnels.

Dans l'ensemble du secteur des mesures (sauf devant l'enrochement), les résultats ont montré que la tendance des profils était en pente douce. Ces changements se sont produits graduellement à cause des accumulations de sable en quantités prononcées dans la partie basse de la plage et particulièrement suite aux tempêtes majeures d'automne par l'accumulation du sable provenant de l'érosion massive des talus. La diminution de la pente des profils de la plage observée dans la zone d'expérimentation des SEMS et dans la zone à l'ouest a laissé entrevoir un retour temporaire de l'environnement érodé de la plage vers un équilibre dynamique plus stable, caractérisé par les pentes plus douces de la plage reconstruite. Ce sable, localisé en bas de la plage, pouvait par contre se retrouver dans le courant de dérive littorale et transiger vers le large et dans les chenaux des grandes rivières de la péninsule. Les profils mesurés devant l'enrochement, suite à la tempête d'octobre, nous ont laissé croire que le bas de la plage de l'ensemble de cette zone allait graduellement revenir à son état initial d'avant la tempête du 17-18 octobre 2001.

En haut de la plage, la zone protégée par les SEMS a continué à augmenter de volume de sable pendant la période des mesures contrairement à la zone non-protégée localisée à l'ouest. L'impact attendu d'un événement hydrodynamique avec les effets d'érosion dans la zone avoisinante des SEMS ne s'est pas produit. Au contraire, les profils situés à proximité des SEMS, démontrent une accumulation avec un volume qui a diminué graduellement en s'éloignant de la zone des SEMS. En analysant les profils mesurés et en considérant les événements des accumulations au niveau des SEMS, il n'a pas été possible de détecter une érosion prononcée dans le secteur avoisinant. À une distance d'environ 75 m du SEMS no 3, l'effet positif vers le secteur ouest n'était plus apparent, ce qui correspondait alors à la limite d'impact des SEMS.

Dans la zone sans protection du secteur ouest, l'érosion du pied du talus a été compensée par les effets de la gravité, ce qui a provoqué un recul du sommet du talus et une perte nette de terrain des riverains. Dans le secteur protégé par les SEMS, la conservation du sable érodé durant la tempête d'octobre a été observée le long des profils et particulièrement en haut de la plage. Ces accumulations ont protégé par la

suite le pied du talus contre l'érosion et ont assuré une protection à long terme. Comme prévu, une telle tendance a été observée après la tempête du 1^{er} décembre 2001. Les vagues (H_{rms} de 0,4 à 0,5 m) n'ont pas atteint le sommet de la plage dans ce secteur, contrairement à la zone sans protection où l'érosion a été importante. Le talus protégé ayant atteint un équilibre, la végétation a pu alors le coloniser graduellement.

Dans tout le secteur du suivi, une érosion locale (par rapport au profil de la plage qui précède un événement hydrodynamique majeur) a été occasionnée par les courants littoraux générés par les vagues qui arrivaient de l'est. L'érosion provoquée par les courants a pu encore être augmentée par la présence de l'enrochement sur la partie voisine du littoral. Les courants littoraux provenant de l'ouest ont plutôt donné des accumulations de sable. Les niveaux supérieurs de l'eau dus aux marées et aux surcotes ont déterminé la largeur active de la plage et son évolution morphologique, temporelle et spatiale. Lors des tempêtes mesurées, les traces d'érosion les plus marquées sur la plage se trouvaient dans la zone de la limite supérieure atteinte par le niveau de l'eau (voir l'animation des profils mesurés disponible sur le CD-ROM).

8.2 Résultats préliminaires de l'expérimentation en 2002

Un programme réduit des mesures a été poursuivi au cours de la période libre de glace en 2002 pour valider certaines hypothèses suggérées par les résultats des travaux en 2001. On a donc poursuivi la prise de mesures qui pouvaient démontrer le scénario de retour de la partie basse de la plage à son état initial de juin 2001. Cela signifierait un retour vers une pente de la plage plus forte occasionné par l'abaissement de son niveau en sa partie basse.



Figure 40 - Plantation d'élyme réalisée à la mi-juin entre les SEMS 2 et 3

Les résultats des mesures de cette seconde période ont démontré que dans le secteur des SEMS une accrétion encore plus forte a continué à se produire en haut de la plage. Au mois de juin 2002, la section supérieure de la plage était suffisamment haute (plus de 2,8 m sur 5 m de large par rapport au NMM) pour implanter un champ d'élyme des

sables⁶. Une transplantation a donc eu lieu avec différent niveau de densité (0,5 à 1 plant par m²). Les plants ont survécus à la transplantation dans une proportion de 75% et ont commencé à s'étendre sur le plateau de sable. Une quantité significative d'ensablement de type éolien a été également notée depuis leur implantation.



Figure 41 - Comparatif photographique du banc d'essai expérimental de l'automne 2000 (novembre) et de l'automne 2002 (fin septembre)

Vers la fin de l'été 2002, l'élévation du plateau a atteint des cotes allant de 2,4 à 3,1 m. Il faut noter que le niveau théorique des plus grandes marées d'équinoxe n'a dépassé

⁶ Plante ayant la capacité de capter le sable éolien et favorisant ainsi l'ensablement continu du haut de plage. Grâce à son réseau de racines très denses et profondes, elle peut ralentir l'action de l'érosion générée par des vagues lors des tempêtes d'automne.

qu'occasionnellement 2,1 m (voir Figure 17 à Figure 21). C'est donc une élévation allant de 0,3 à 1,0 m de plus que le niveau spécifié de la marée qui a servi de tampon d'absorption à l'effet de la surcote et du 'run up' des vagues pour la protection du talus de sable. Au cours du mois de juillet 2002, un troisième étage de SEMS a été installé dans le secteur supérieur de la plage pour faciliter la confirmation de son ensablement et donc de favoriser la protection du talus lors des tempêtes d'automne. Les photographies de la Figure 41 présentent l'état du site en 2001 avant l'installation des SEMS à l'automne 2000 et jusqu'à la fin du projet. La comparaison des photos a démontré un ensablement massif du haut de la plage et une évolution qui tendait vers une stabilité du talus (présence de végétation). La disparition des plaques de béton visibles sur la photo de l'an 2000 indique les niveaux de l'ensablement significatif du secteur. Ces plaques étaient encore visibles juste avant l'installation de la première génération de SEMS en juin 2001.

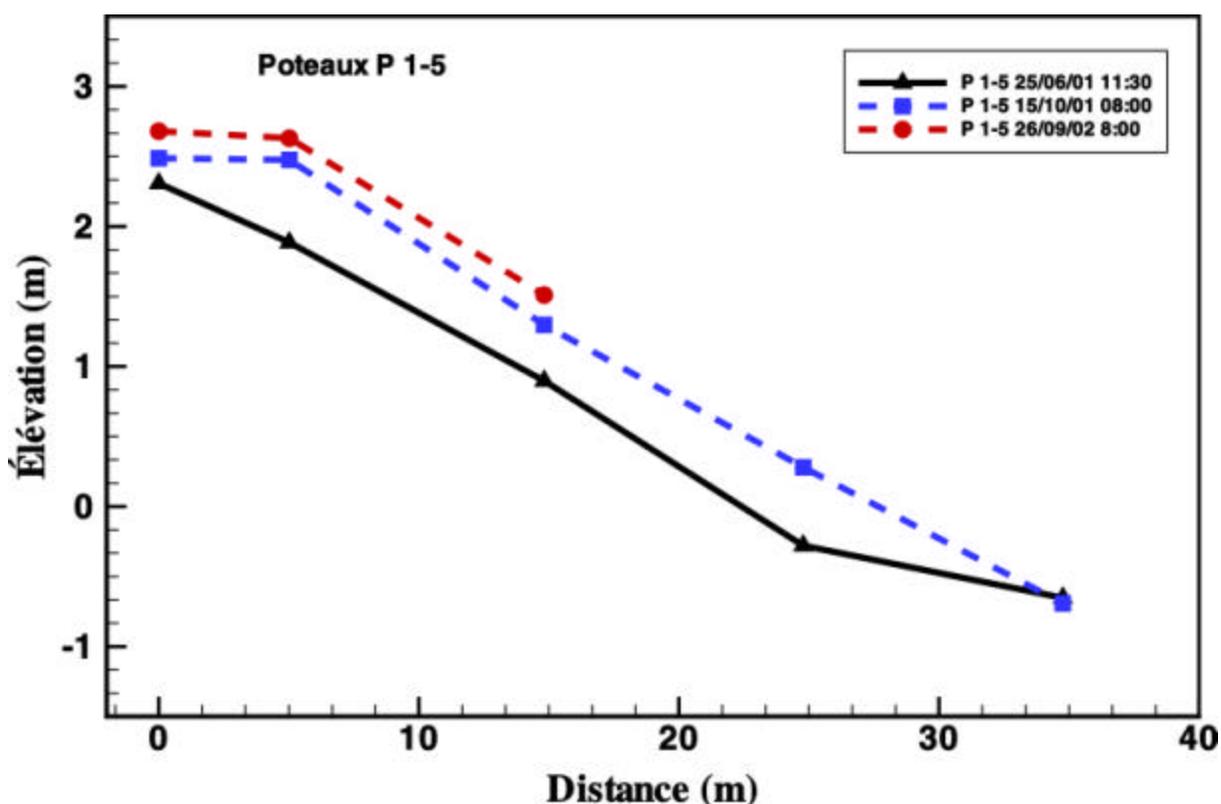


Figure 42 - Profil de plage montrant l'accrétion de la plage à un niveau supérieur par rapport au profil de plage le plus haut enregistré en 2001 (profil P1-5)

À la Figure 42, deux profils sont présentés. Ces profils montrent la différence d'accumulation du sable de l'an 2001 avec celle de l'an 2002 pour le profil P1-5. Ils indiquent une accumulation de sable plus forte lors de la seconde année. En août 2002, la partie haute de la plage a dépassé l'élévation 3,0 m par rapport au niveau moyen de

la mer sur l'ensemble des données recueillies en haut de la plage le long des ouvrages SEMS.

Enfin, depuis l'installation des SEMS au printemps 2001 jusqu'au mois d'octobre 2002, l'érosion du haut du talus a été complètement arrêtée. L'arbre suspendu accroché en bordure du haut de la falaise, vis-à-vis le SEMS no 1, confirme ce résultat. Historiquement, le taux d'érosion du talus observé dans ce secteur était de 1,5 à 3 m par année (communication personnelle de Pascal Bernatchez, géomorphologue, comité d'expert sur l'érosion des berges de la Côte-Nord).

9. Conclusions

L'analyse des résultats montre que la méthode SEMS appliquée dans la région du banc d'essai pour contrer l'effet de bout d'enrochement, a permis d'arrêter l'érosion du talus pendant la période de l'année 2001. Seules quelques traces d'érosion du talus en bordure de l'enrochement ont été observées pendant cette période. Durant l'année 2002, un suivi restreint a permis de confirmer les conclusions des travaux précédents : continuation de la consolidation du talus par l'apparition de végétation et stabilisation de la plage par une accumulation importante de sable par rapport à l'an 2001. D'autres conclusions s'imposent, en voici les principales :

9.1 Marée théorique

L'analyse des niveaux de la marée a permis de constater une forte variabilité du niveau de l'eau. Le maximum prédit de 2,36 m a été atteint le 22 juillet 2001 et le minimum de -2.01 m a été prédit pour le 18 septembre. Les niveaux supérieurs de la plage se situent régulièrement au-dessous du niveau supérieur de la marée, ce qui rend les talus vulnérables à l'érosion.

9.2 Les vents

Les vents dominants de la région proviennent du sud-ouest en été avec une contribution importante des vents en provenance du nord-est en automne. Les résultats des nos analyses démontrent une forte variabilité temporelle de la direction et de la vitesse des vents avec peu de journées calmes observées. Plusieurs mesures horaires consécutives ont des directions identiques et des vitesses assez élevées (plus de 10 m/s), ce qui résulte en une génération de vagues de hauteurs importantes.

9.3 Variation des niveaux d'eau

Les mesures des marées indiquent que la surcote dépasse rarement 50 cm d'élévation. Une seule marée prédite, à l'élévation 2,09 m (NMM) et combinée à une tempête majeure provenant du nord-est, celle du 17 octobre 2001, a généré une surcote de 55 cm

(cote totale de 2,54 m). La marée théorique de 2,09 m est une des 10 plus importantes marées d'automne sur un total d'environ 175 marées hautes.

Les événements climatiques du 1er septembre au 30 novembre 2001, qui ont généré des vagues $H_{rms} > 0,5$ m en direction de la péninsule et dont l'impact sur la plage peut être significatif, ont été mesurés pendant huit cycles de marées. Sept de ces huit événements dépassaient légèrement H_{rms} de 0,5 m et une seule fois le H_{rms} a atteint 0,7 m (le 17-18 octobre). Il faut noter que 65% des mesures de vagues ont été réalisées durant cette période d'automne. En réalité, le nombre d'événements significatifs serait probablement encore plus élevé que ce qui a été observé dans la période du 1er septembre au 30 novembre 2001.

9.4 Observations provenant des extraits vidéo

On y note que l'influence des grandes vagues de tempêtes (vidéo du 17 octobre 2001) aurait pu être néfaste pour les structures de SEMS si elles n'avaient pas été suffisamment enfouies dans le sable. Durant la période estivale, l'accumulation de sable, localisée entre les structures, a bien protégé ces dernières contre les effets des événements hydrodynamiques majeures d'automne.

9.5 Action des glaces sur les ouvrages

Dans le secteur protégé par les SEMS, en haut de la plage où le niveau a été soulevé par un ensablement important, les grandes marées n'ont pas emporté le pied de glace qui a fondu sur place. L'action combinée des SEMS, par l'augmentation du niveau de la plage et la rétention des glaces, a protégé le talus contre l'érosion pendant les mois de mars et avril 2002. Si par contre, l'ensablement des structures de SEMS n'avait pas été suffisant en décembre 2001, il aurait existé un danger d'une destruction partielle des ouvrages par les glaces dérivantes surtout dans la partie basse des ouvrages qui étaient plus exposés à l'action des glaces et des courants.

9.6 Variations morphologiques de la plage

Les ouvrages de protection (SEMS) ont été installés sur un site en érosion de la Pointe-aux-Outardes. Depuis 1996, ce site a subi une érosion sévère du talus et de la plage à cause des effets de bout d'un enrochement linéaire du talus installé en 1995. Les ouvrages de protection (SEMS) ont freiné la dégradation du littoral et ont généré des accumulations significatives de sable dans la zone à protéger.

Les relevés de terrain, qui ont permis d'analyser l'évolution spatiale et temporelle des profils de la plage dans les deux zones témoins situées à l'ouest et à l'est de la zone à protéger (Figure 24), ont montré des accumulations importantes de sable dans la partie

basse de la plage. Ces accumulations ont occasionné un retour de la plage à un équilibre morphologique plus stable caractérisé par des pentes moyennes de la plage qui étaient plus douces. Le sable accumulé provenait de l'érosion massive du talus lors des tempêtes majeures d'automne. Dans la zone protégée par le SEMS, les observations et les mesures ont démontré une accumulation nette du sable sur la totalité de la plage et spécifiquement dans la partie haute de plage.

Les SEMS, dues à leur perméabilité et à leur flexibilité, ont évité la génération des courants secondaires typiques des ouvrages en empierrement. Ces courants entraînaient une érosion de la plage des sites avoisinants, tandis que les propriétés de SEMS ont limité les effets néfastes dans les zones contiguës tel que:

1. Sur une période de 2 ans suivant l'installation des SEMS, aucune érosion du haut de la falaise n'a été observée. La stabilité de la plage a permis d'arrêter l'érosion du haut de la falaise. Seules quelques traces d'érosion ont été notées en bas de falaise sans engendrer des répercussions négatives au sommet.
2. Le redressement du profil de la plage visible vers une pente plus douce a occasionné une érosion du pied du talus dans la zone non protégée localisée à l'ouest et à l'extrémité est de la zone protégée. La zone à l'est a encore souffert des effets néfastes de l'érosion générés par le bout de l'enrochement mais à un degré plus faible qu'auparavant.
3. Le bas niveau du haut de la plage de la zone est a rendu le talus vulnérable même pendant les tempêtes mineures. Au contraire, dans le secteur protégé par les SEMS, seulement une tempête majeure associée avec une forte surcote auraient pu potentiellement créer l'érosion du talus. Les résultats des analyses ont montré que la section protégée par les SEMS n'a pas été affectée par les vagues même à l'automne lors des périodes de marées hautes, tandis que la zone non protégée à l'ouest de SEMS s'est érodée graduellement à cause d'un niveau relativement bas de la partie supérieure de la plage située au pied du talus.
4. Devant l'empierrement, les observations et les mesures ont prouvé que la plage se dégradait à cause de la présence des courants secondaires forts générés pendant les tempêtes majeures, et ces courants ont entraîné les sédiments vers le large du fleuve.
5. Les effets mineurs d'érosion du pied du talus (voir Figure 8) de la zone protégée par les SEMS, auraient pu être complètement éliminés par l'utilisation de moyens additionnels tels que la végétation, le rechargement en sable, etc...
6. Les volumes de sable accumulé par les SEMS provenaient en partie du transport littoral et en partie de l'affaissement mineur de la falaise située derrière les SEMS. Le sable provenant de la falaise et capté par les SEMS a aidé à la formation d'un plateau

de sable dont l'élévation a dépassé 3,0 m (NMM). La végétation, tel que l'élyme des sables, aurait pu être plantée, ce qui aurait augmenté l'efficacité des SEMS.

7. Les SEMS n'ont pas engendré d'impact négatif sur le secteur avoisinant localisé à l'ouest, au contraire ils ont plutôt profité d'un effet cumulatif d'ensablement qui a été perceptible jusqu'à une distance d'environ 50 m du dernier SEMS situé à l'ouest.
8. La variabilité du niveau de l'eau accompagnée par les vagues a constitué la source des courants qui ont été les éléments les plus importants du cycle de l'évolution temporelle de la ligne côtière et de la plage dans la région de PAO.

10.Recommandations de recherche

1. Les effets de redressement du profil de la plage vers un profil d'équilibre morphologique, caractérisé par une pente plus douce que celle au départ de l'expérimentation, sont observés dans les trois zones de mesures. Ces effets occasionnent une érosion du pied du talus qui pourrait être évitée par l'application de mesures additionnelles de protection appliquées dans cette zone (végétation, empierrement, développement de la construction de SEMS).
2. Durant un projet expérimental sur le terrain, les mesures topographiques de la plage devraient être complétées par des relevés bathymétriques. Ces mesures permettraient d'estimer les variations temporelles et spatiales du profil de la zone côtière et les niveaux des accumulations de sable y compris dans sa partie sous-marine. Le profil 'actif' ne s'arrête pas à limite de la marée basse et l'analyse de la variabilité de ce profil plus long sont clairement montrés par les observations et par les mesures.
3. L'installation des ouvrages dans les zones à protéger devrait être précédée par des mesures topographiques de même que bathymétriques et par les enregistrements des éléments hydrodynamiques au moins pendant une saison précédant l'installation des ouvrages de protection. Cela donnerait une base de données comparatives qui permettrait à quantifier les tendances des variations morphologiques de la région avant l'installation des ouvrages de protection.
4. Des recherches sur le choix et l'implantation des matériaux (type de bois, géotextiles, ancrage, etc.) devraient être réalisées pendant la période des travaux sur le terrain pour augmenter la résistance des SEMS aux conditions hydrauliques du milieu côtier.

11. Références

- Bernatchez, P., 2000. L'évolution de la technique de restauration des plages du SEMS et analyse des composantes contrôlant la morphosédimentologie des plages, Rapport soumis au Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire, 36 p.
- Boczar-Karakiewicz, B., W. Romanczyk. 2000. Modèle conceptuel de fonctionnement d'un ouvrage de protection du littoral : système d'épis Maltais-Savard. Rapport soumis au Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire, 35 p.
- Boczar-Karakiewicz B., W. Romanczyk, N. Roy , N. Pelletier, L. Maltais & J.-P. Savard. 2001. Une méthode novatrice de protection des berges adaptée au milieu estuarien du Saint-Laurent, Québec. *Proceedings of the Canadian Coastal Conference*, Quebec, QC, Canada: 201-214.
- GENIVAR. 2002. Suivi de l'évolution de la topographie de deux sites de la péninsule Manicouagan. Rapport soumis à Hydro-Québec. 2 volumes, cartes et photos.
- Ministère des Transports du Québec région Côte-Nord. 2002. Plan d'arpentage de la zone de suivi du banc d'essai pour contrer l'effet de bout d'enrochement. Préparé pour le Comité ZIP de la rive nord de l'Estuaire. 1 Carte.
- NATURAM. 1997. Restauration des berges du Parc régional de Pointe-aux-Outardes ; élaboration d'un projet expérimental. Naturam Environnement inc. Pour Pêches et Océans Canada. 137 p.
- Pêches et Océans Canada. 2001. Tables des marées et courants du Canada – Fleuve Saint-Laurent et rivière Saguenay – Volume 3.
- Raudkivi, A.J., 1996, Permeable pile groins, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 122, No 6, pp. 267-272.
- Roche ltée, 1997. Baie Saint-Ludger: Protection du littoral. Faisabilité technique et environnementale de la mise en place d'épis, Rapport final, Ministère des Transports du Québec.
- Roy, N. 2002. Guide de Construction des systèmes d'épis Maltais-Savard (SEMS). Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire. Projet réalisé avec la contribution de la FAQDD et du CRD Côte-Nord.

A. Appendice

A.1. Résultats des analyses des éléments hydrodynamiques

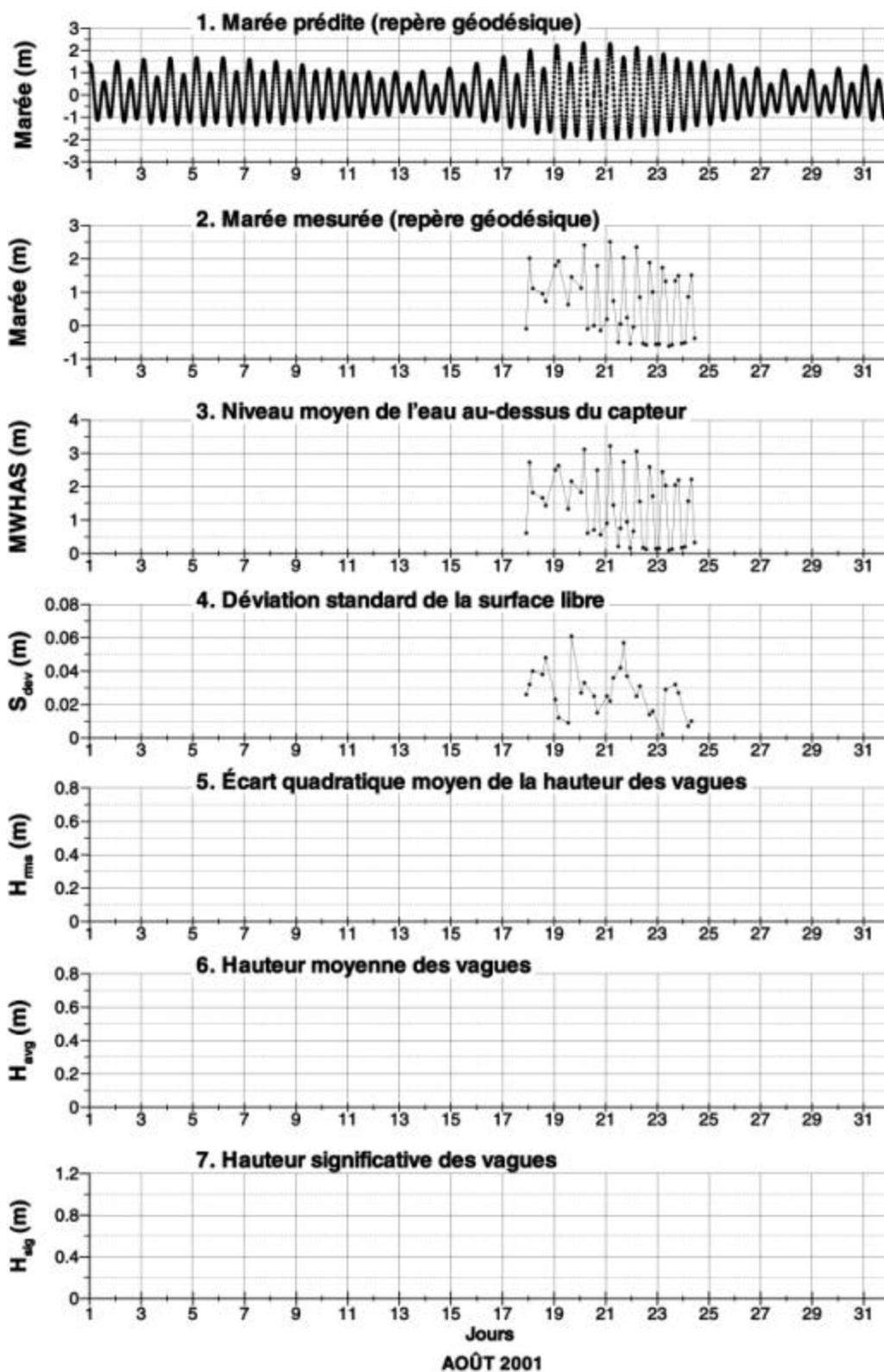


Figure A.1a: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'août 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

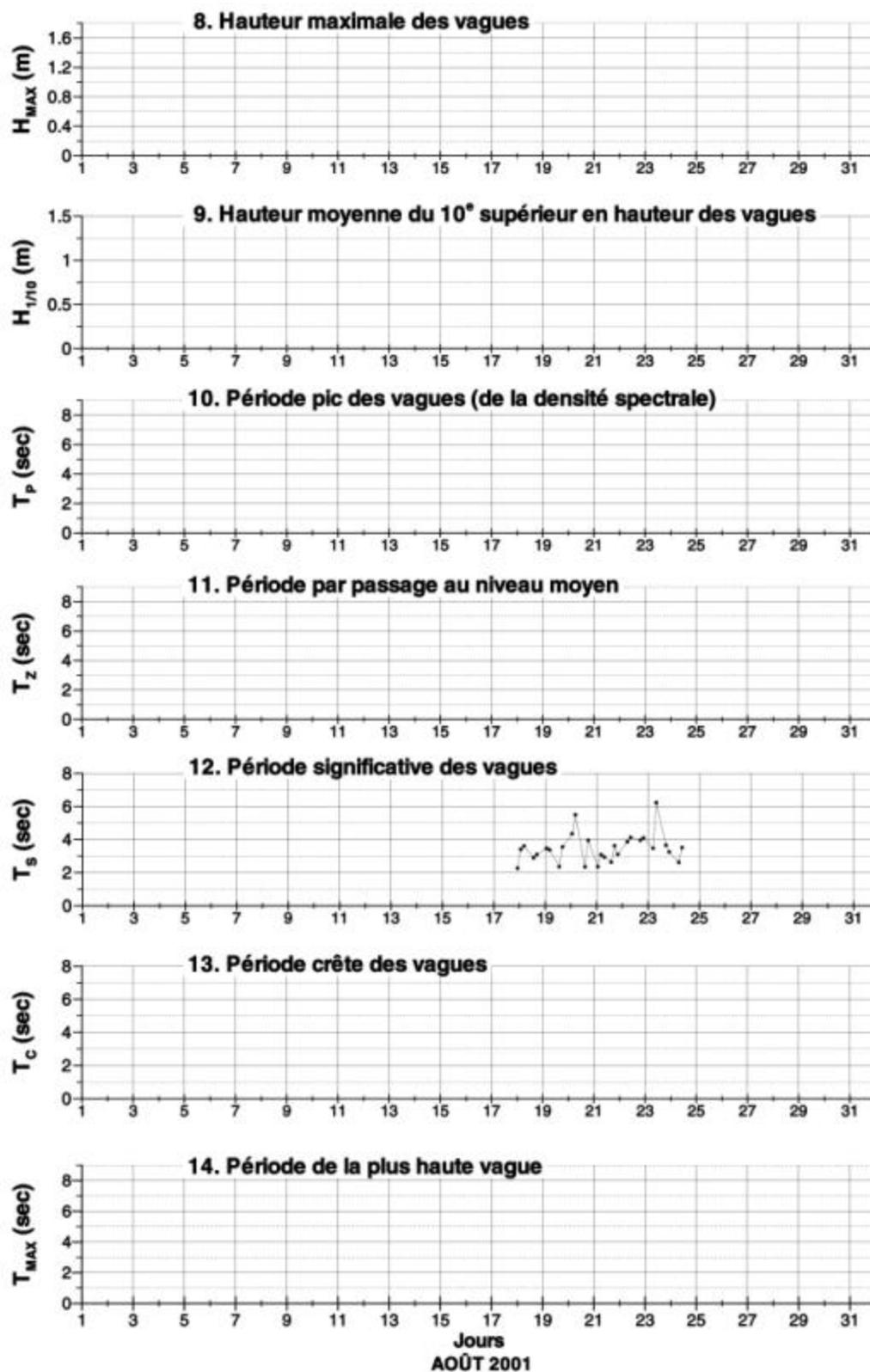


Figure A.1b: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'août 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

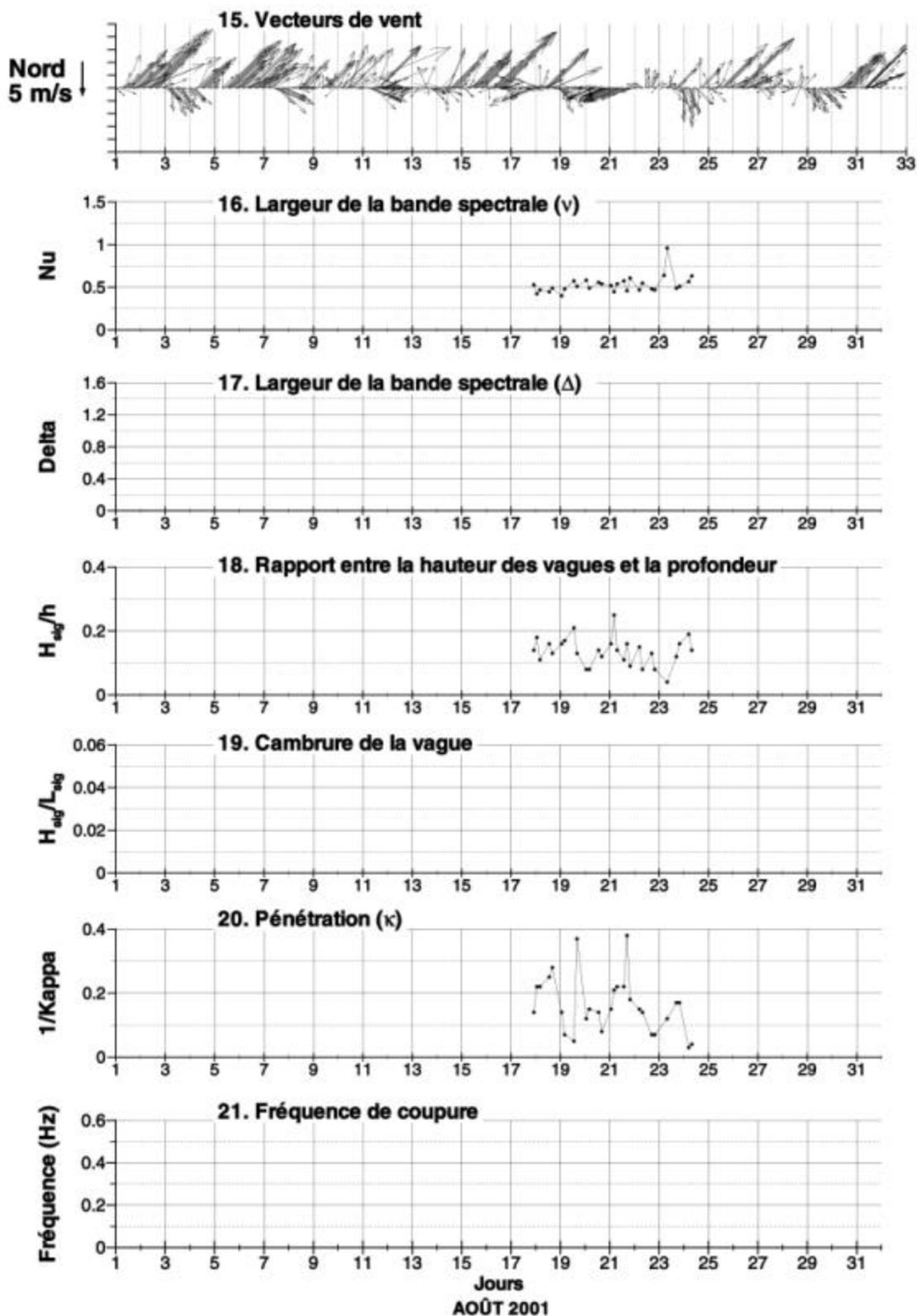


Figure A.1c: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'août 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

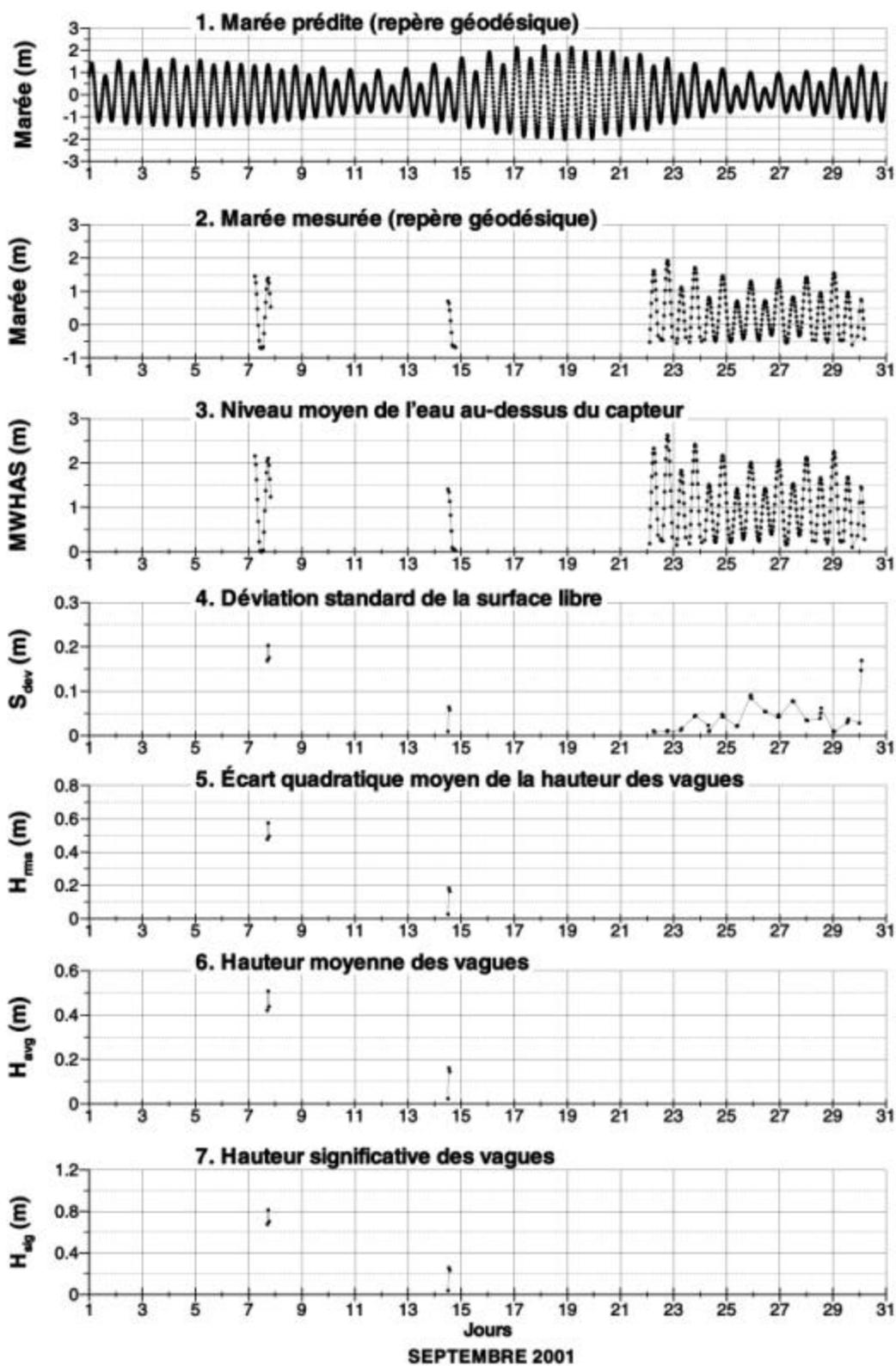


Figure A.2a: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de septembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

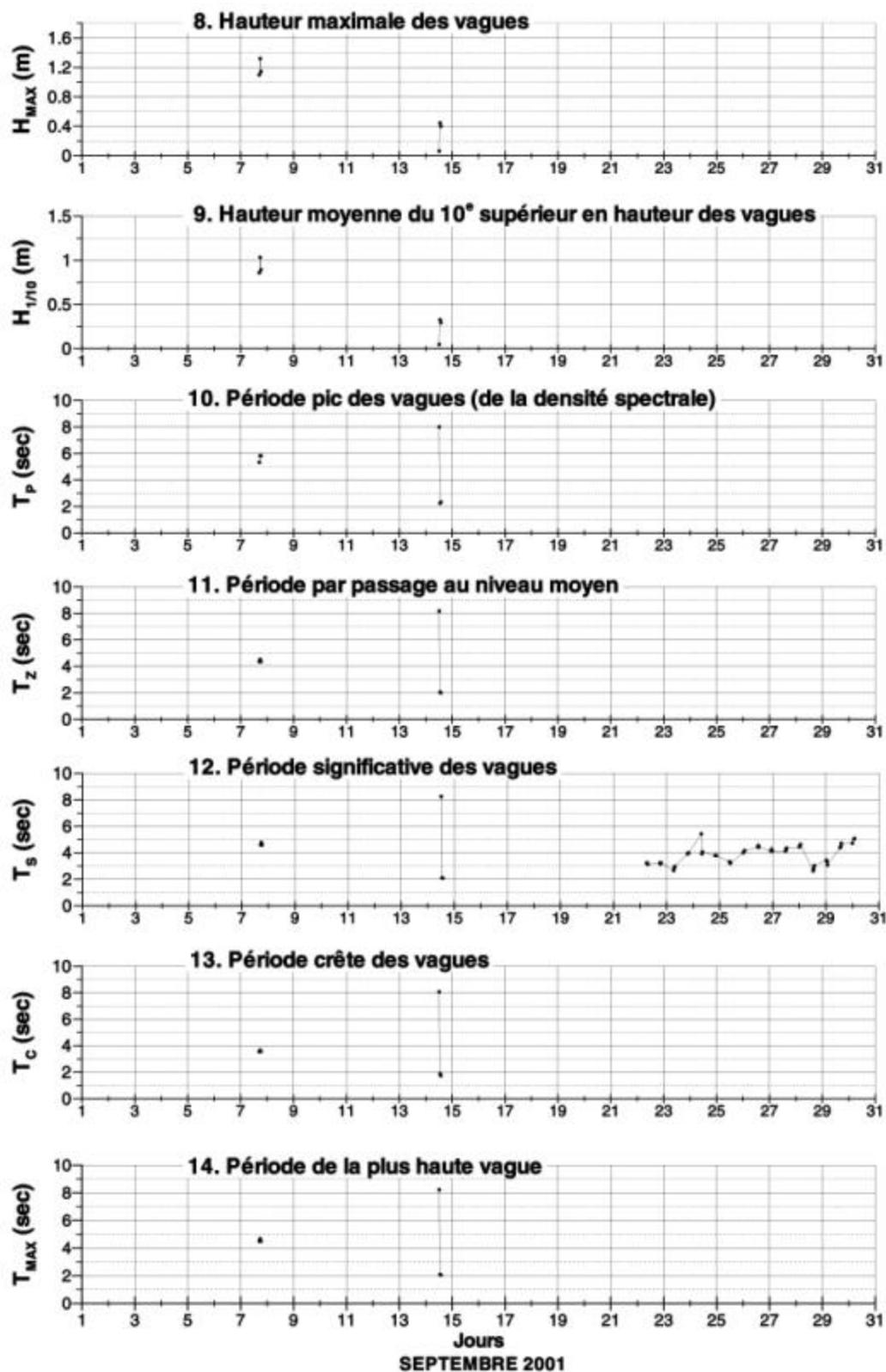


Figure A.2b: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de septembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

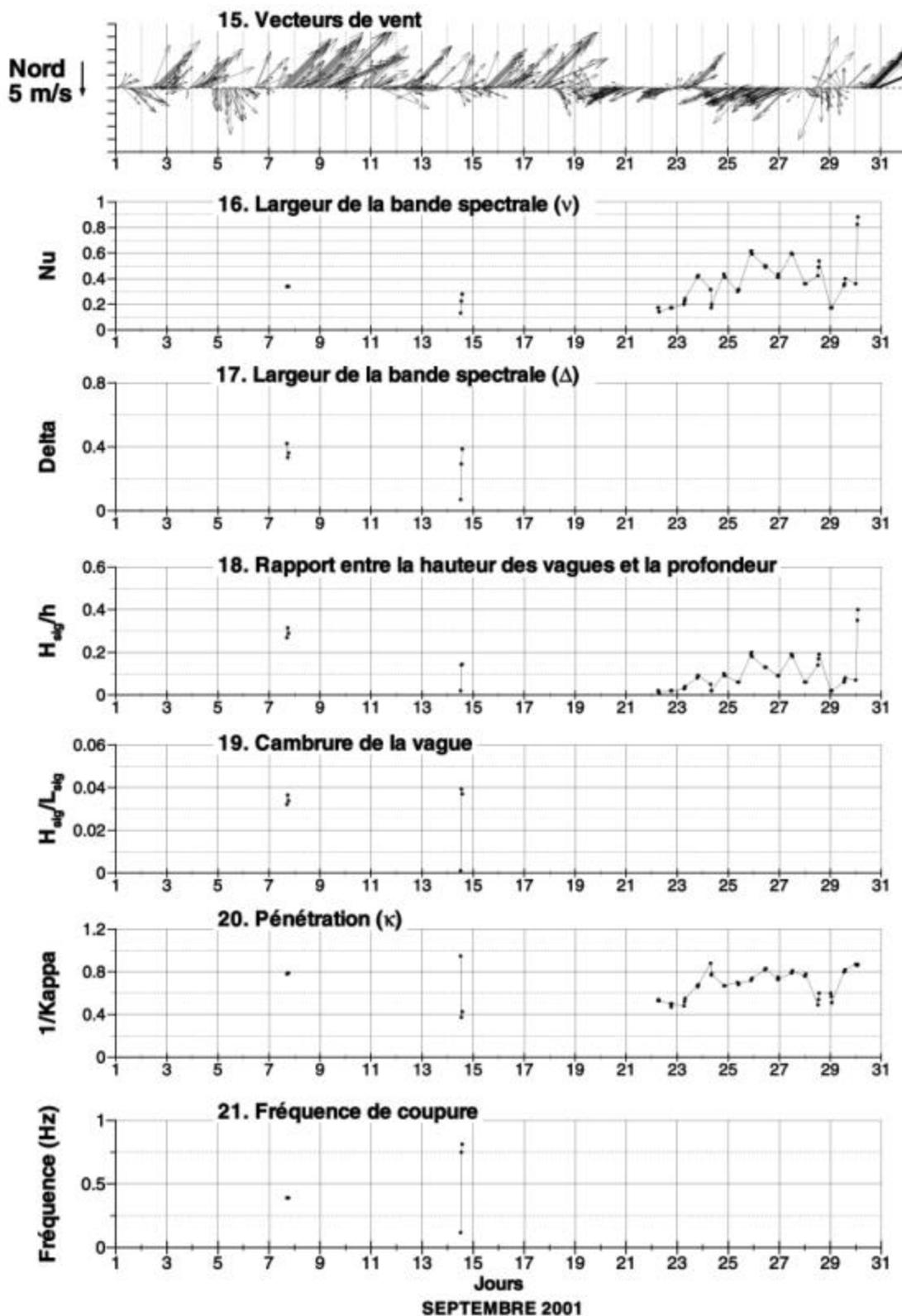


Figure A.2c: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de septembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

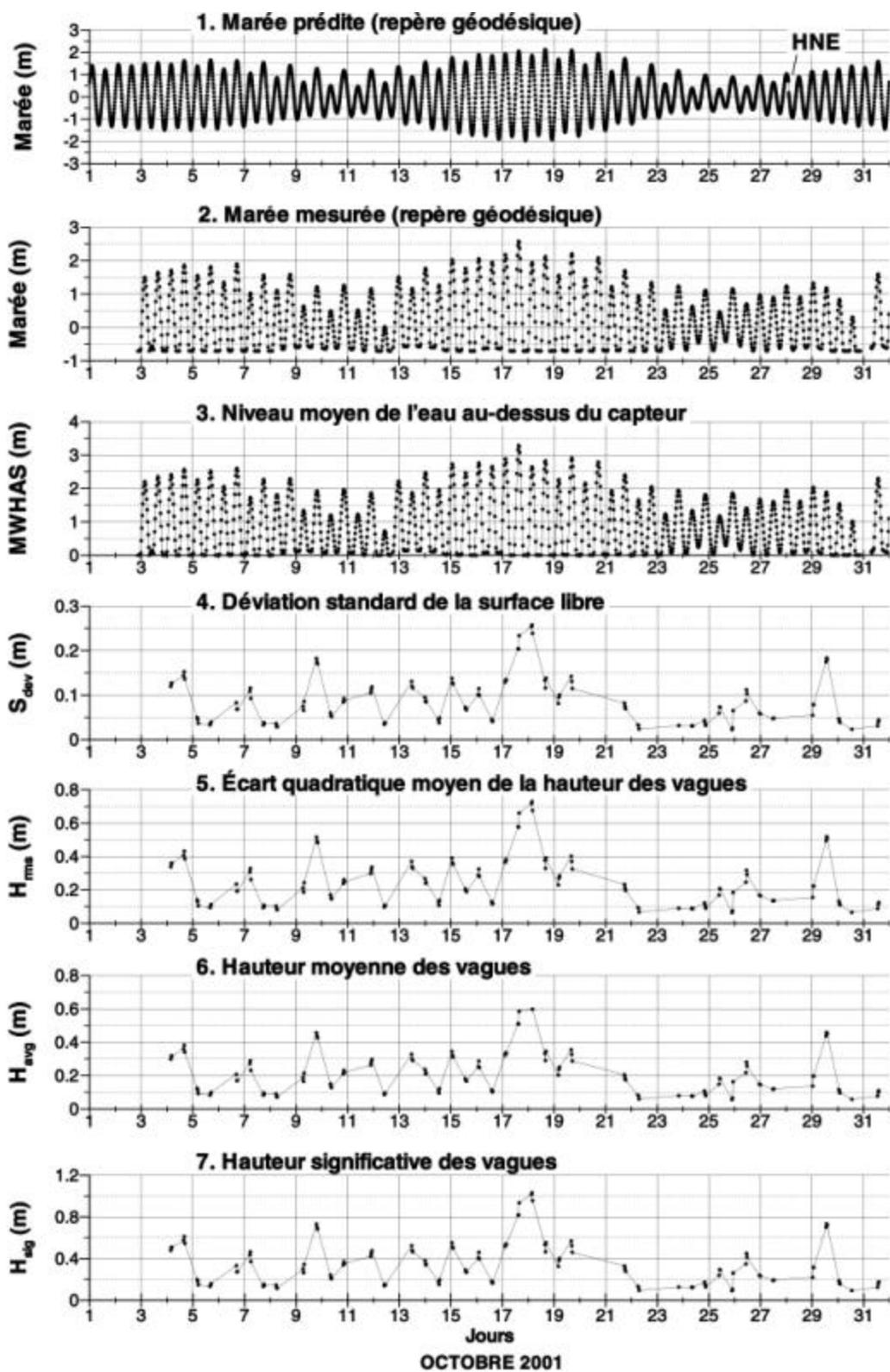


Figure A.3a: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

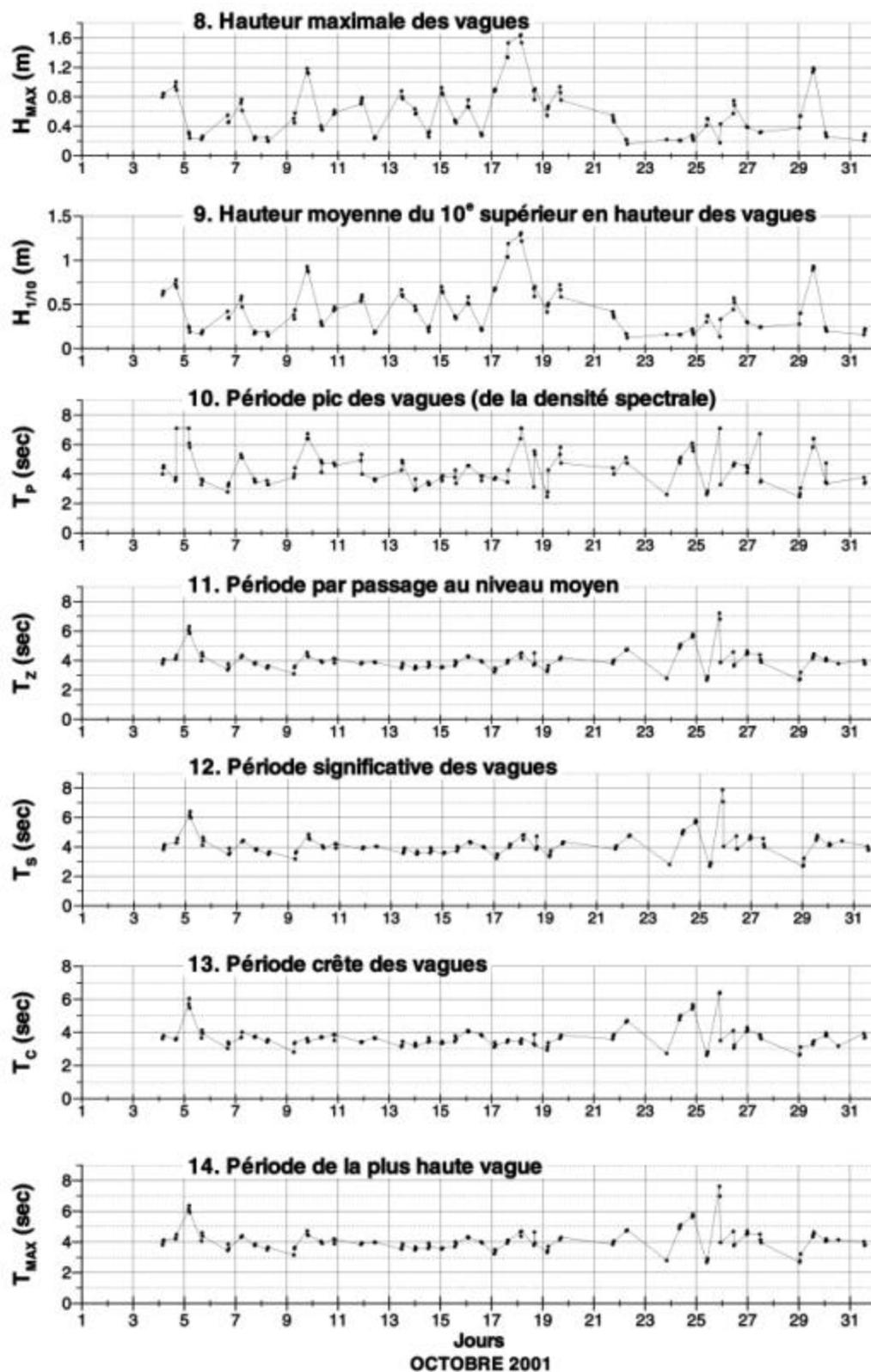


Figure A.3b: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

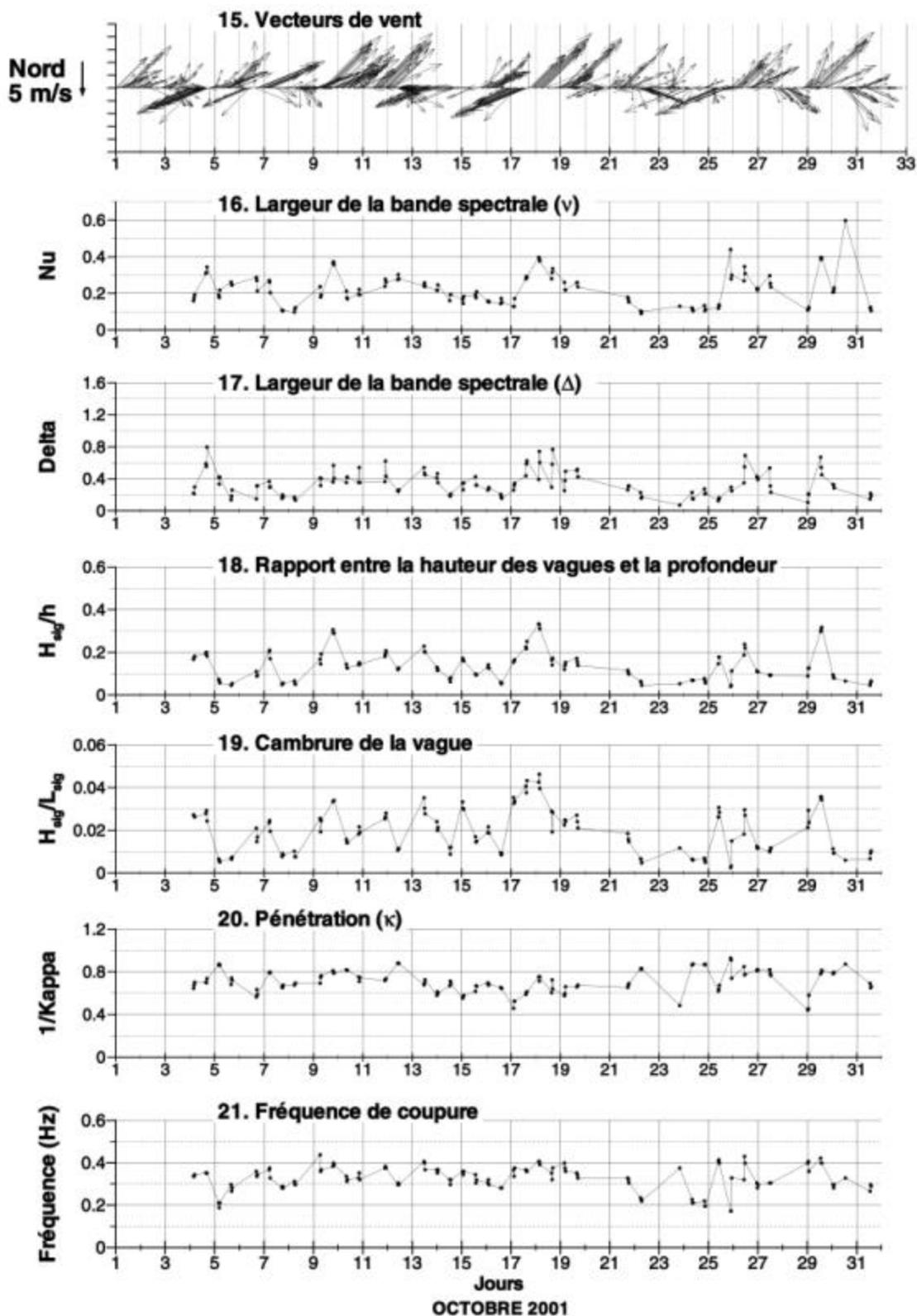


Figure A.3c: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois d'octobre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

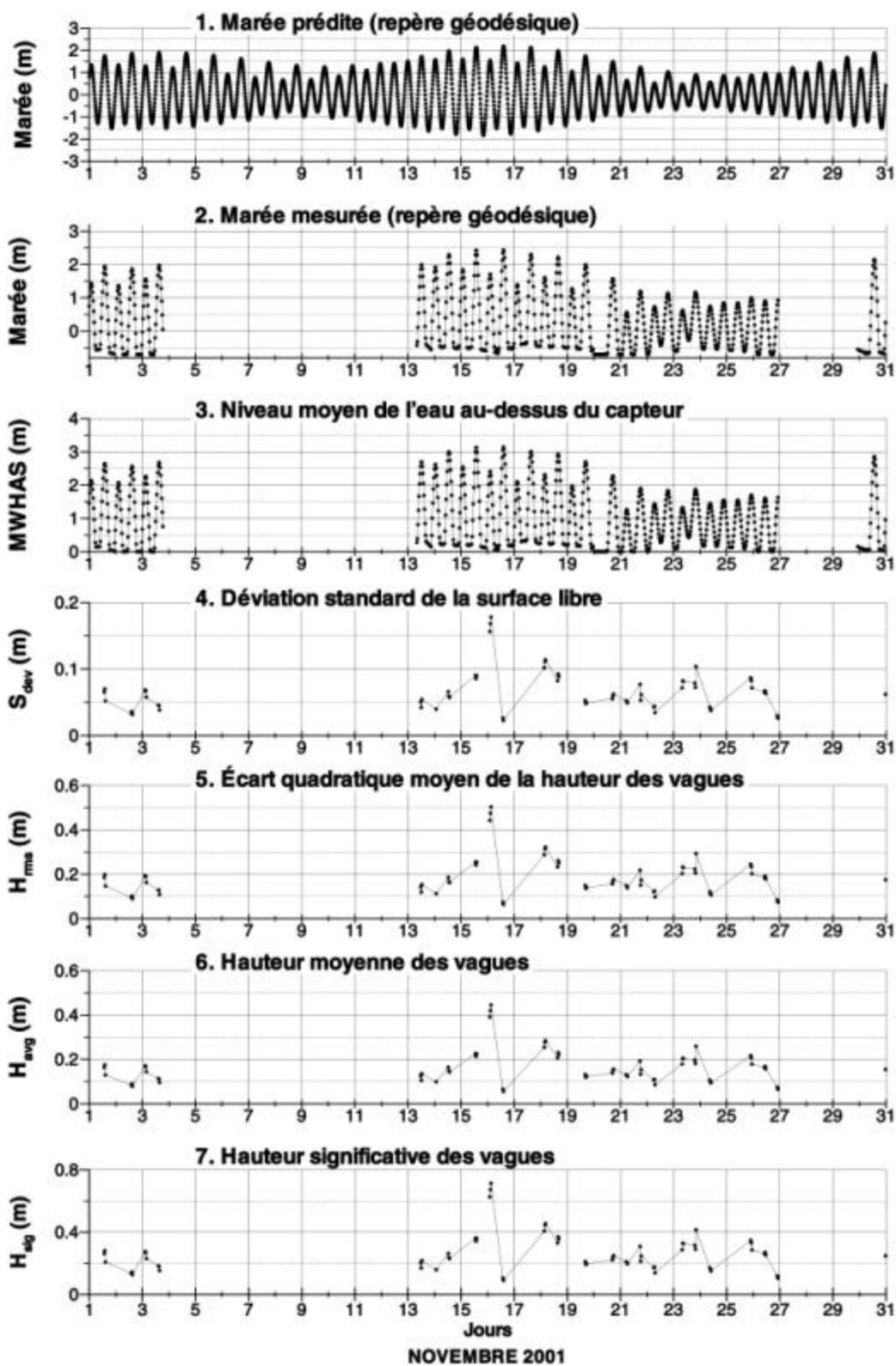


Figure A.4a: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de novembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

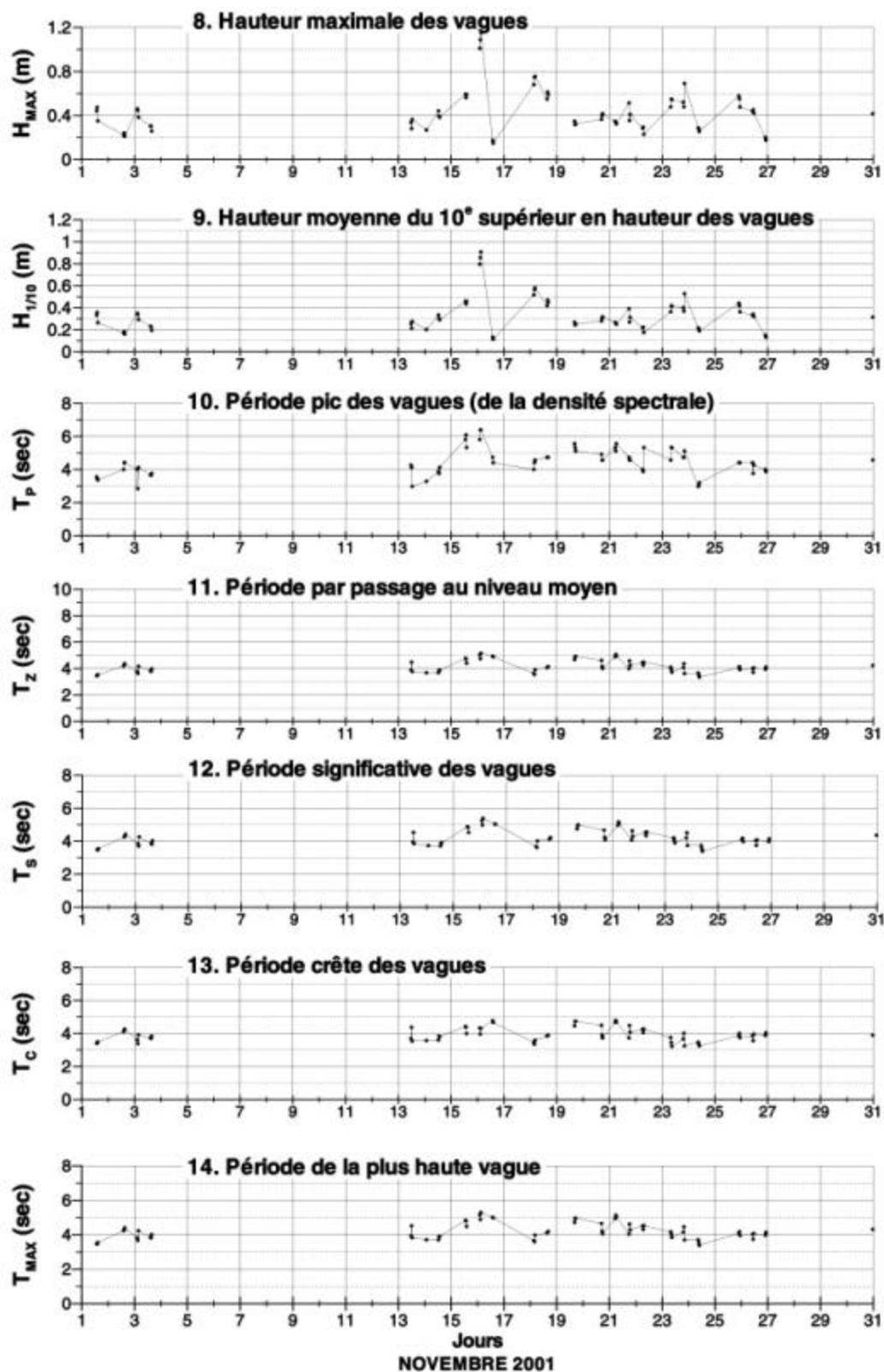


Figure A.4b: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de novembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

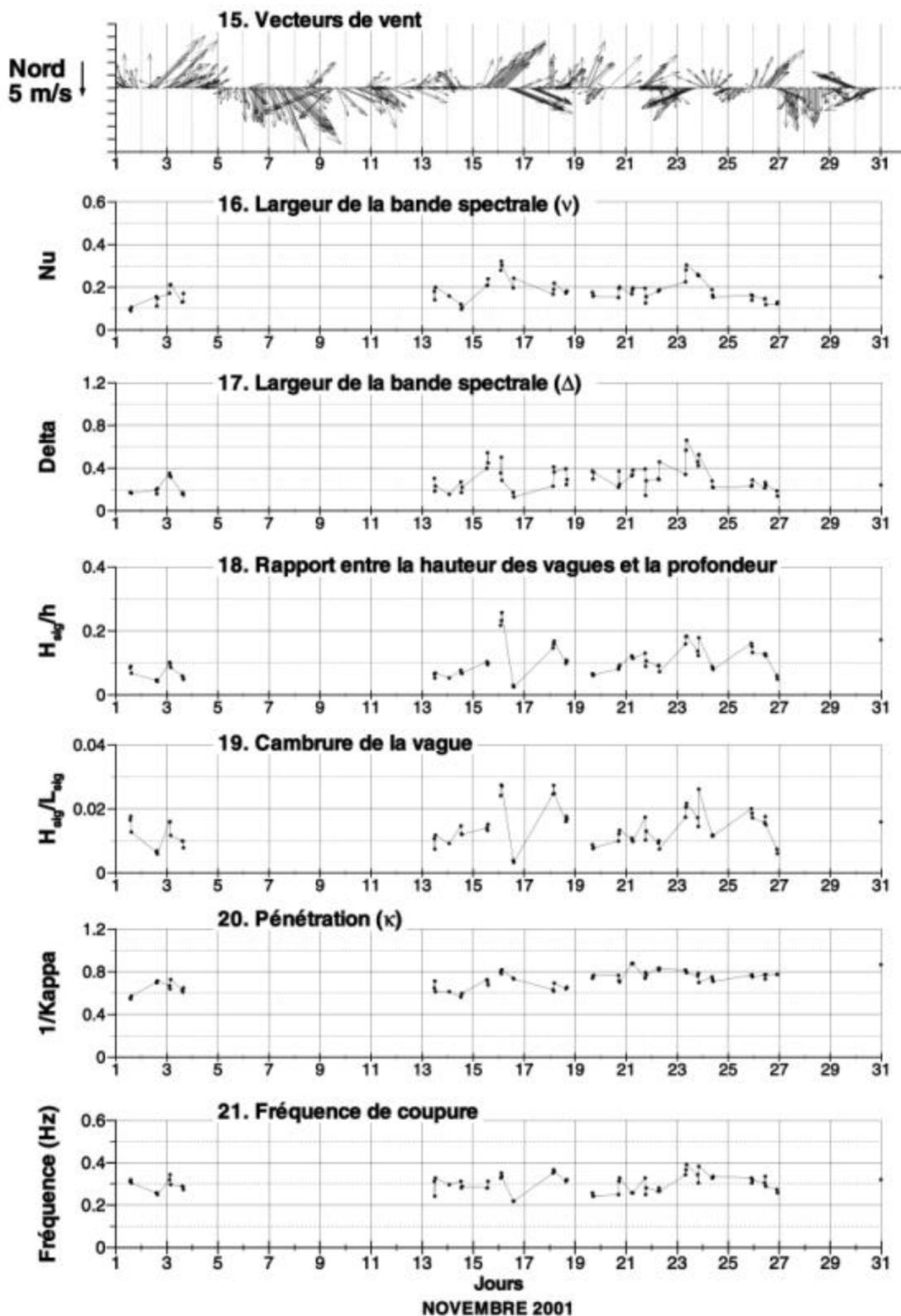


Figure A.4c: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de novembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

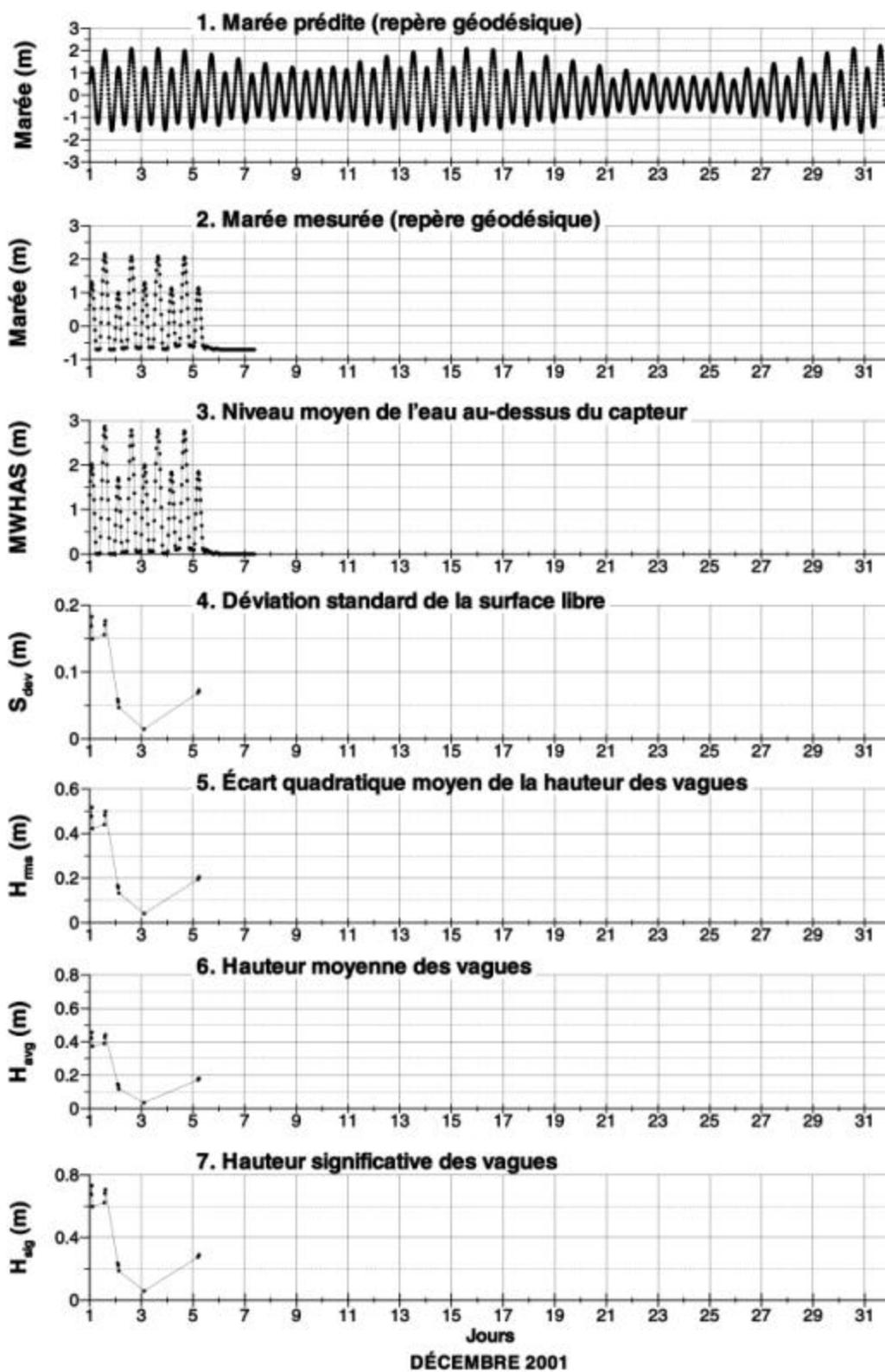


Figure A.5a: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de décembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

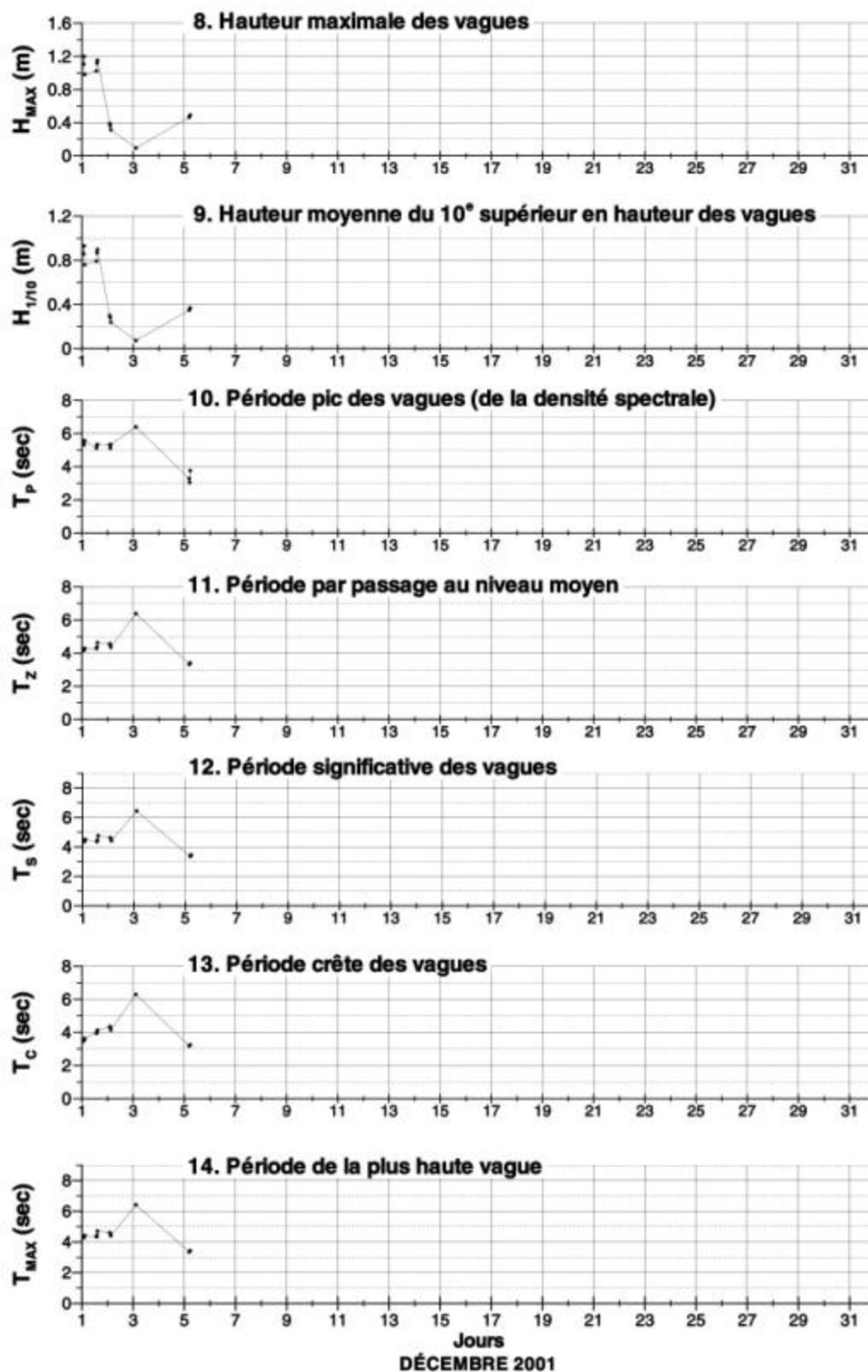


Figure A.5b: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de décembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

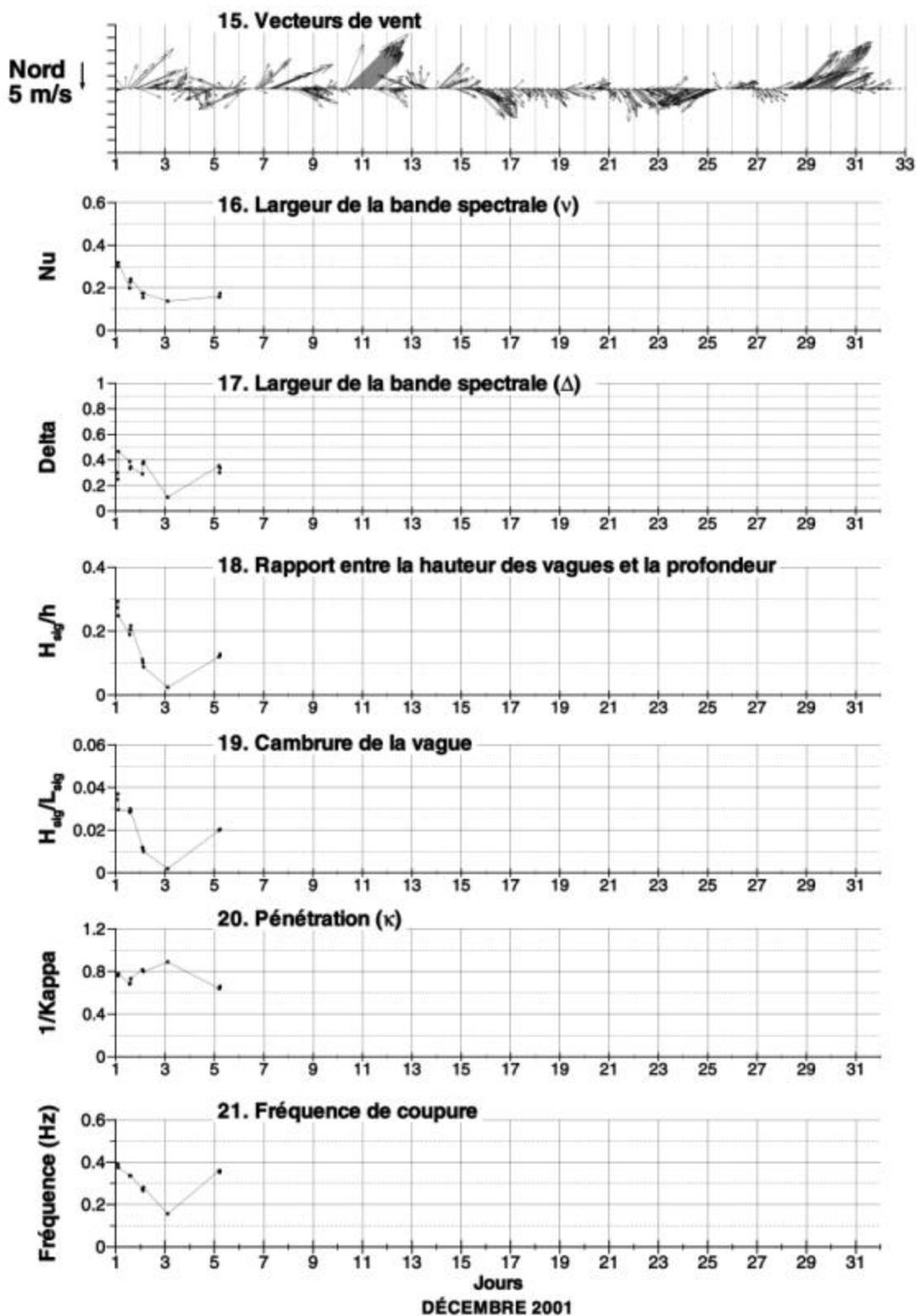


Figure A.5c: Niveau d'eau et paramètres des vagues: résultats d'analyses des mesures de terrain pour le mois de décembre 2001 (compilés avec les prédictions de la marée et les observations de la direction et de la vitesse des vents)

A.2. Résultats des mesures morphologiques

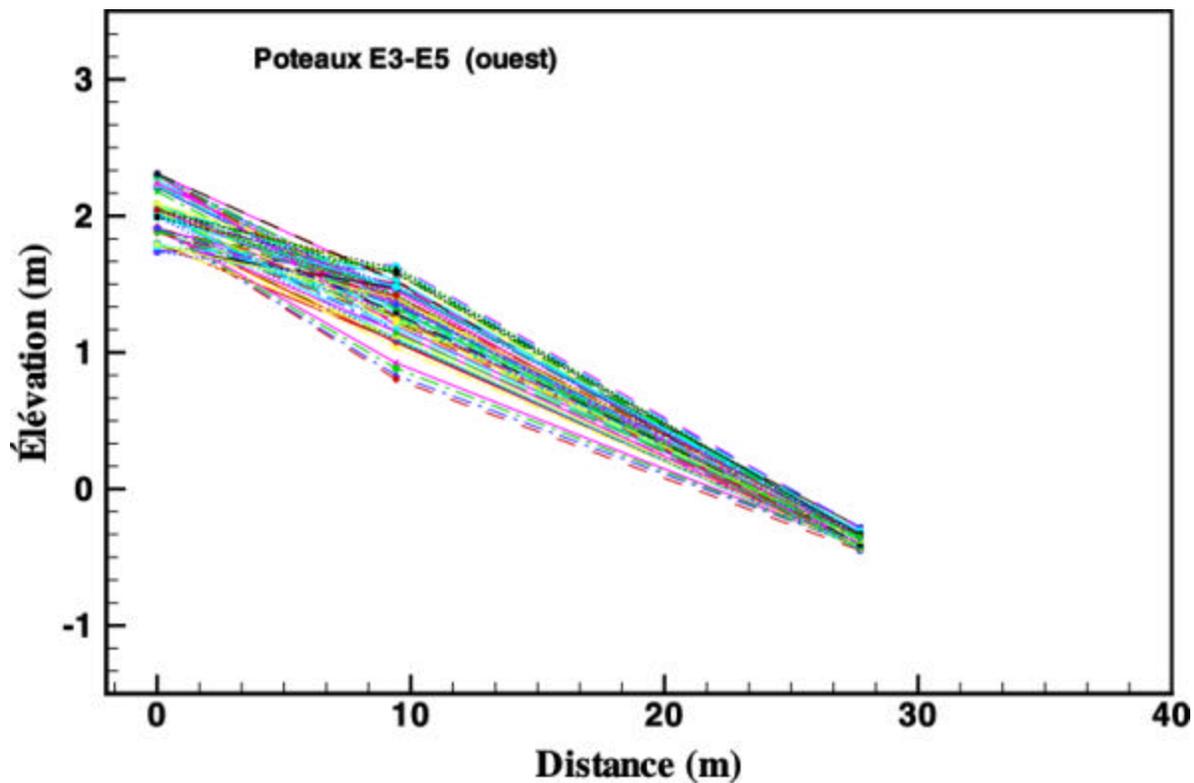


Figure A.6: Profil E3-E5 (ouest): résultats des mesures de 84 campagnes de terrain (du 26 juin au 28 novembre 2001)

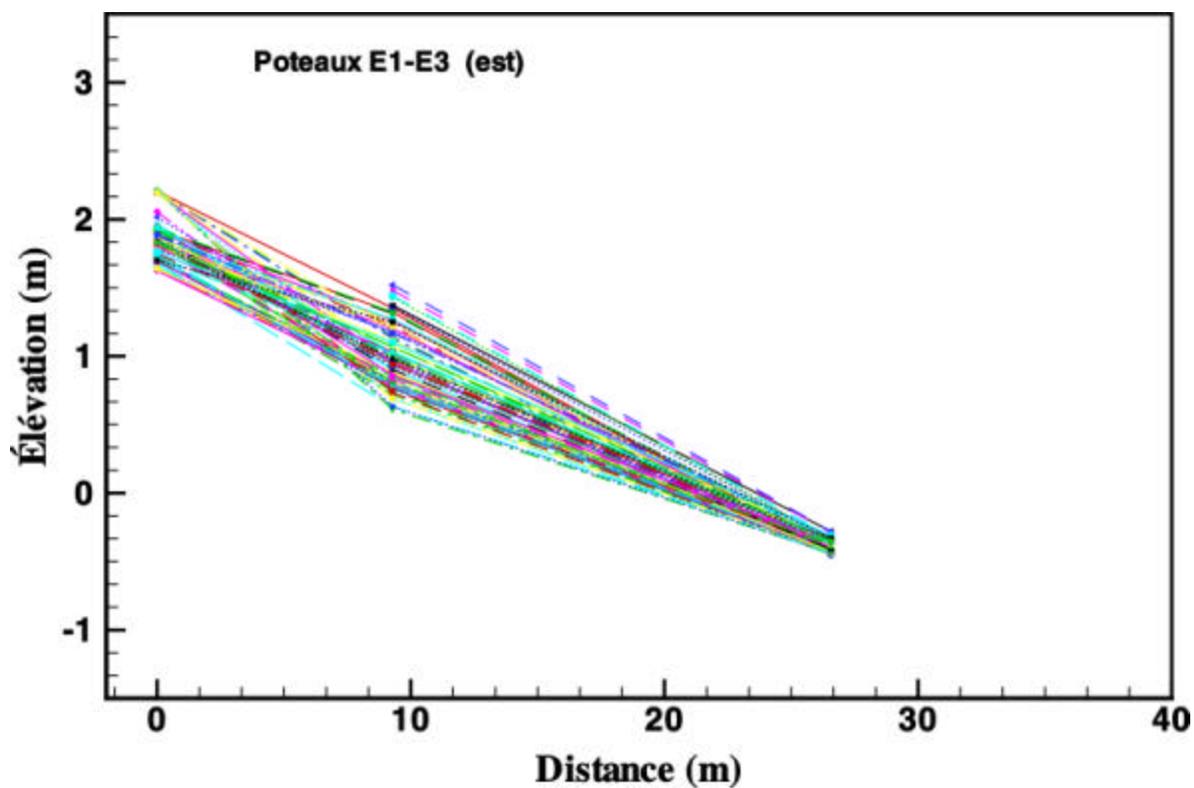


Figure A.7: Profil E1-E3 (est): résultats des mesures de 84 campagnes de terrain (du 26 juin au 28 novembre 2001)

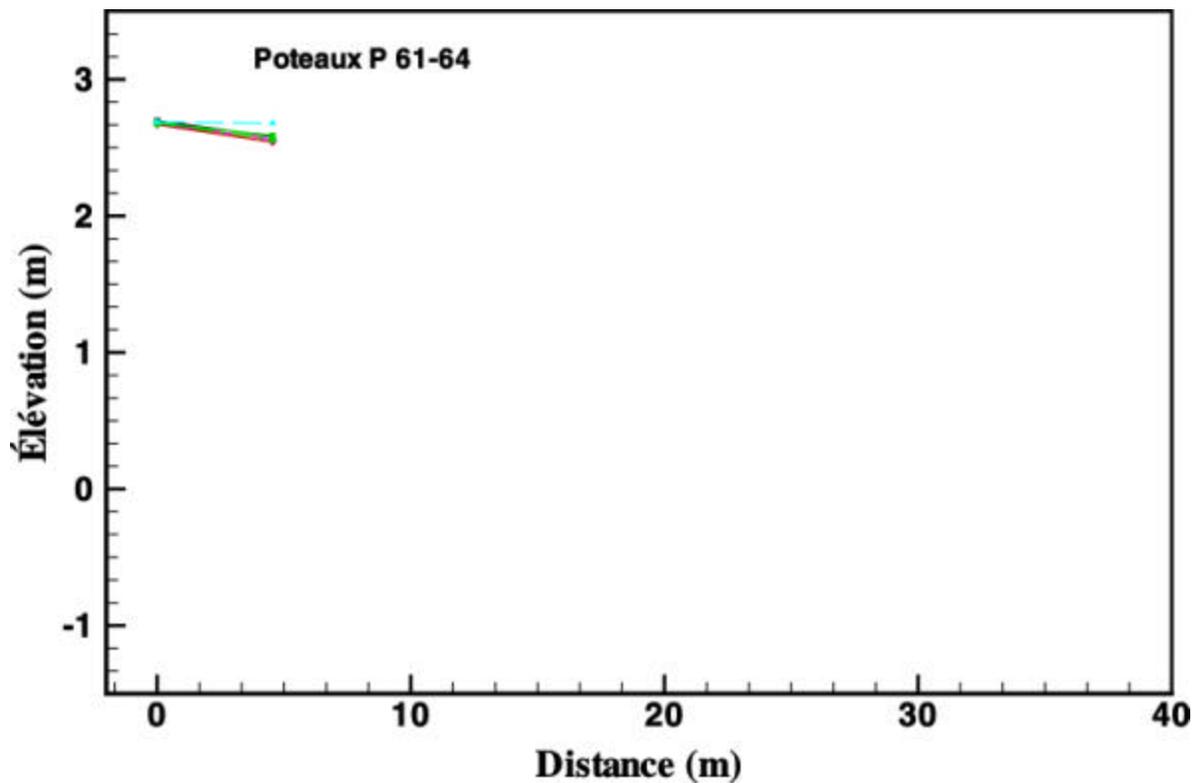


Figure A.8: Profil P 61-64: résultats des mesures de 16 campagnes de terrain (du 25 juin au 23 juillet 2001)

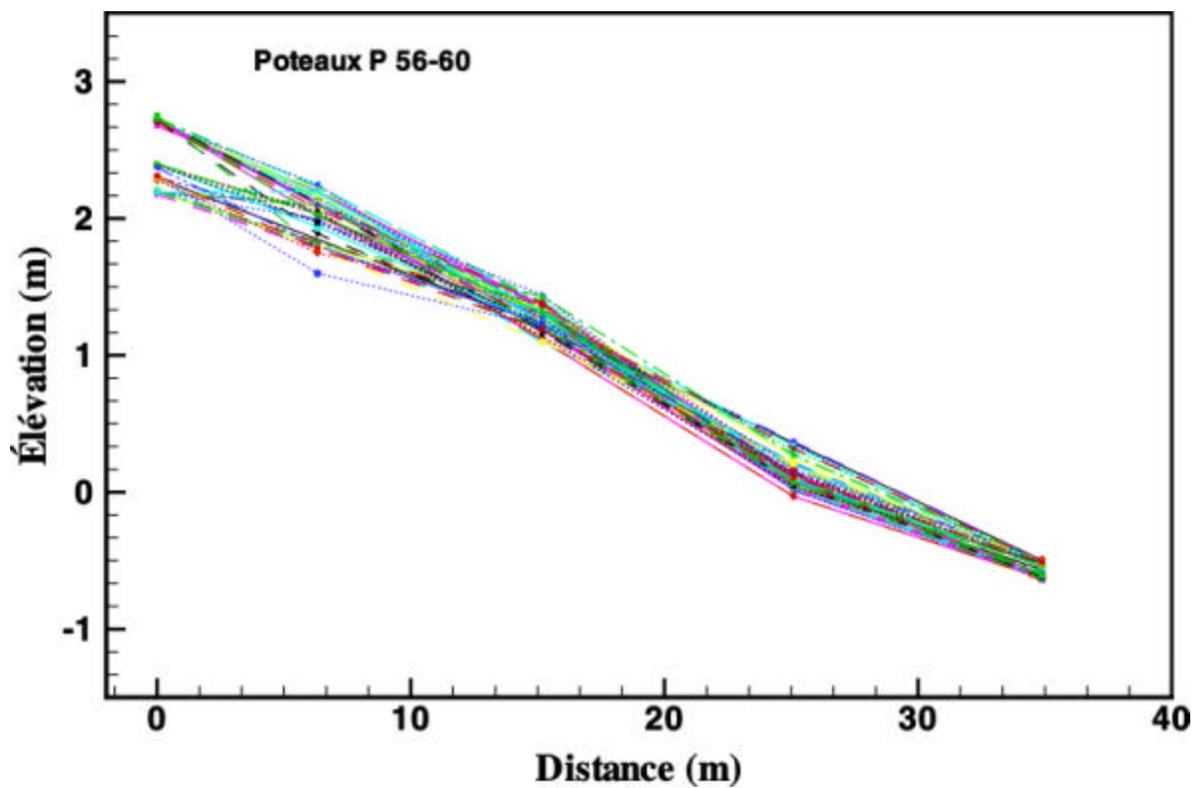


Figure A.9: Profil P 56-60: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

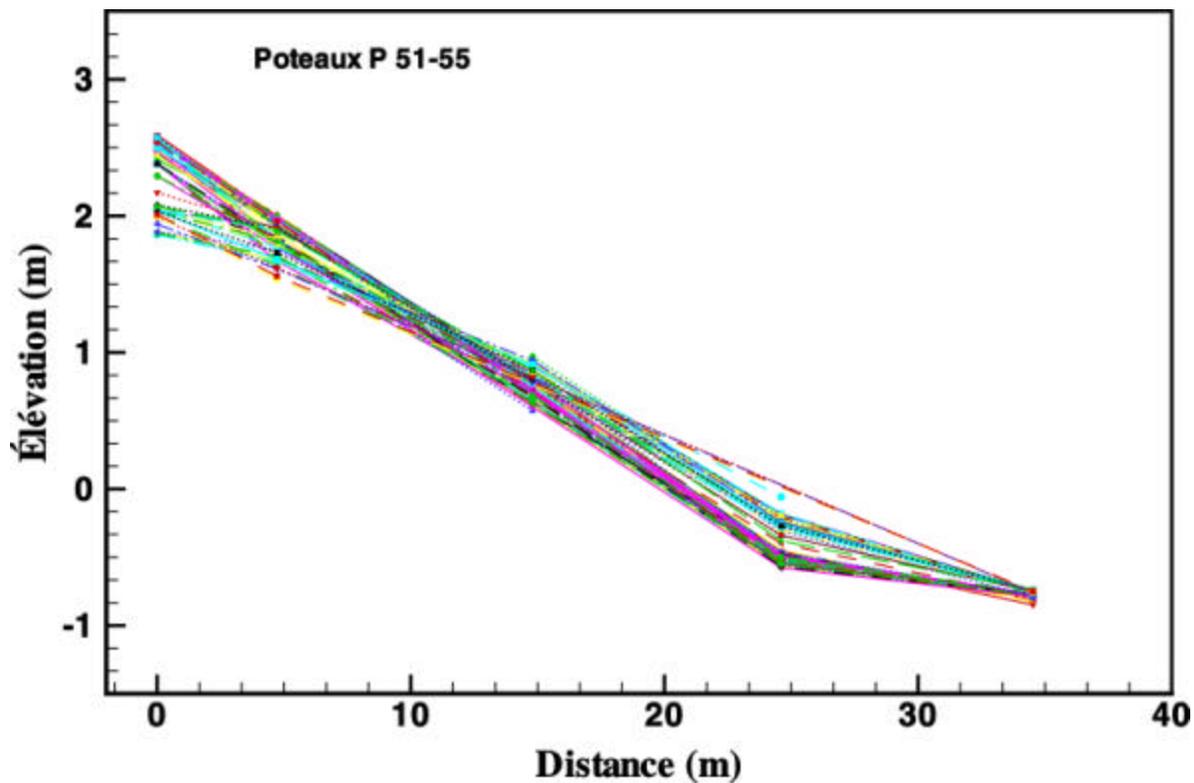


Figure A.10: Profil P 51-55: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

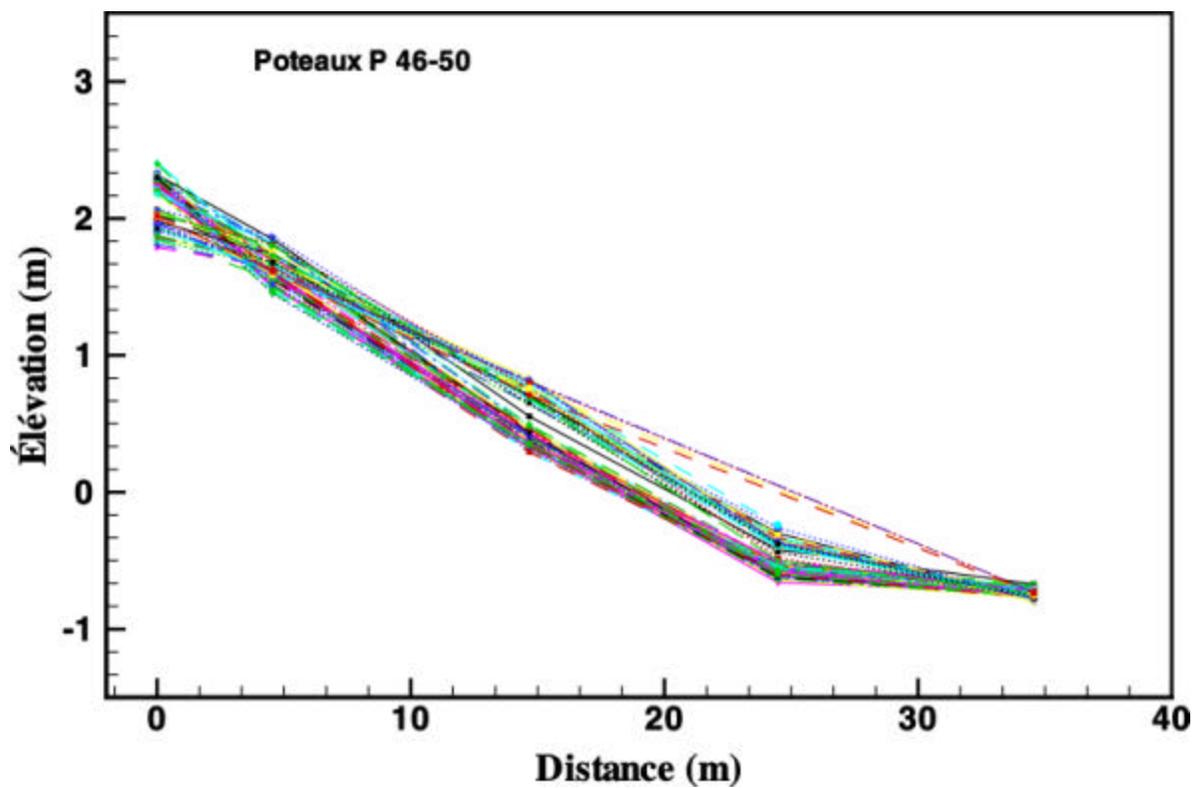


Figure A.11: Profil P 46-50: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

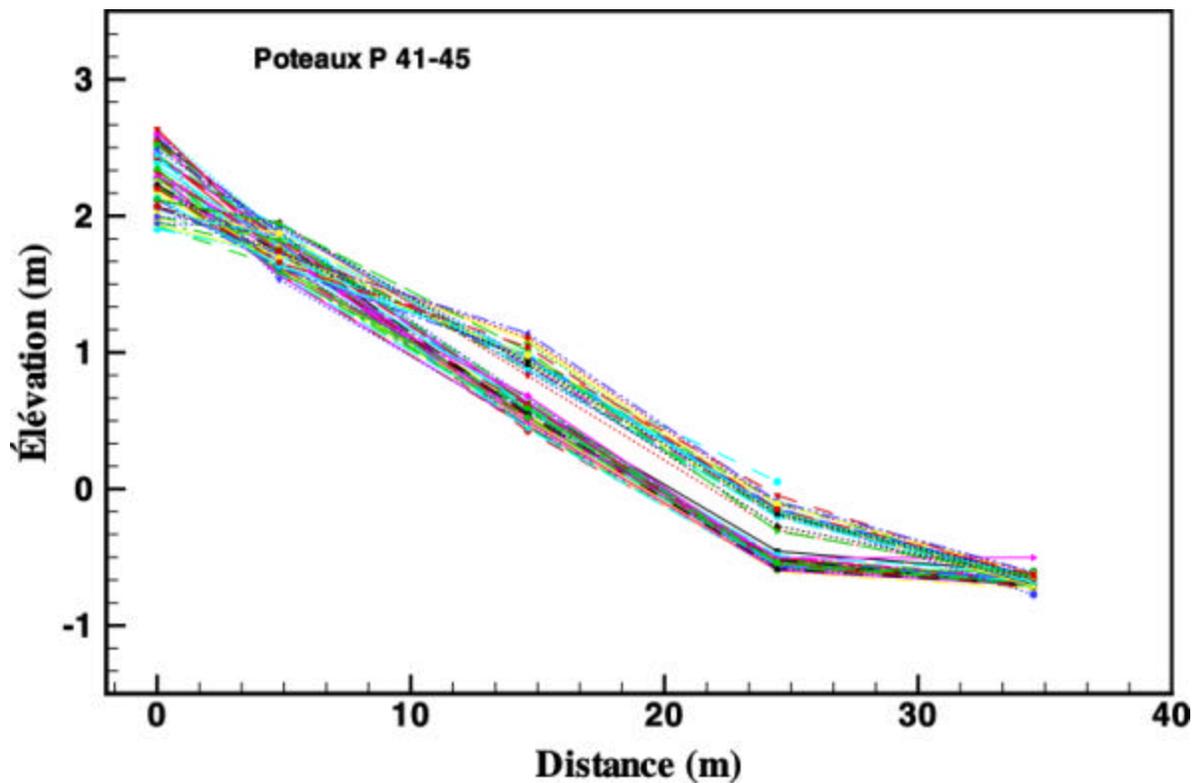


Figure A.12: Profil P 41-45: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

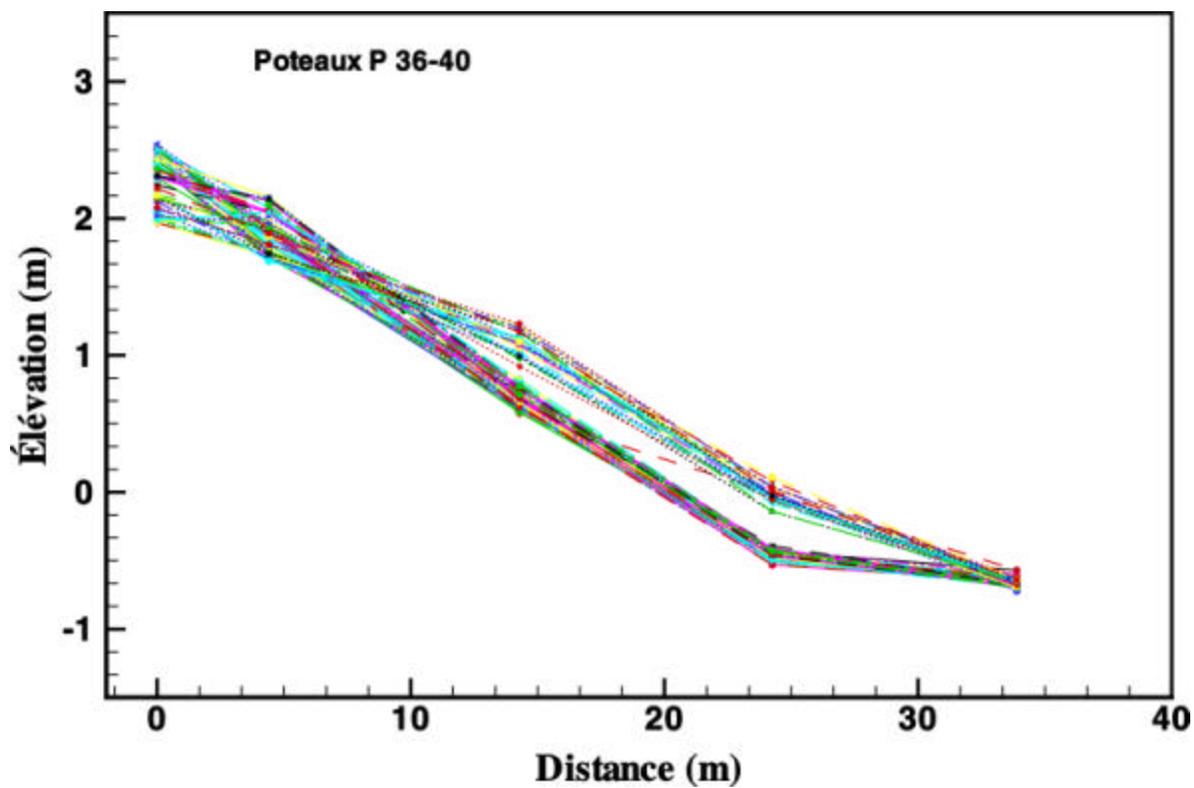


Figure A.13: Profil P 36-40: résultats des mesures de 89 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

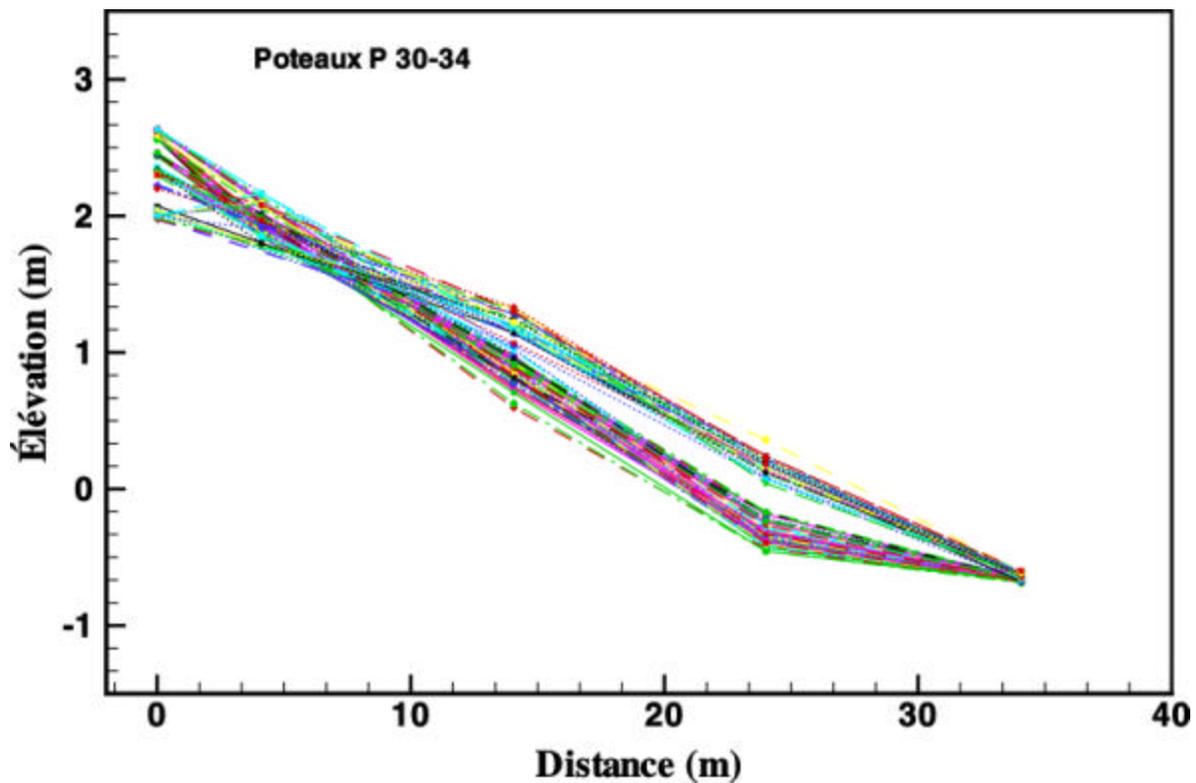


Figure A.14: Profil P 30-34: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

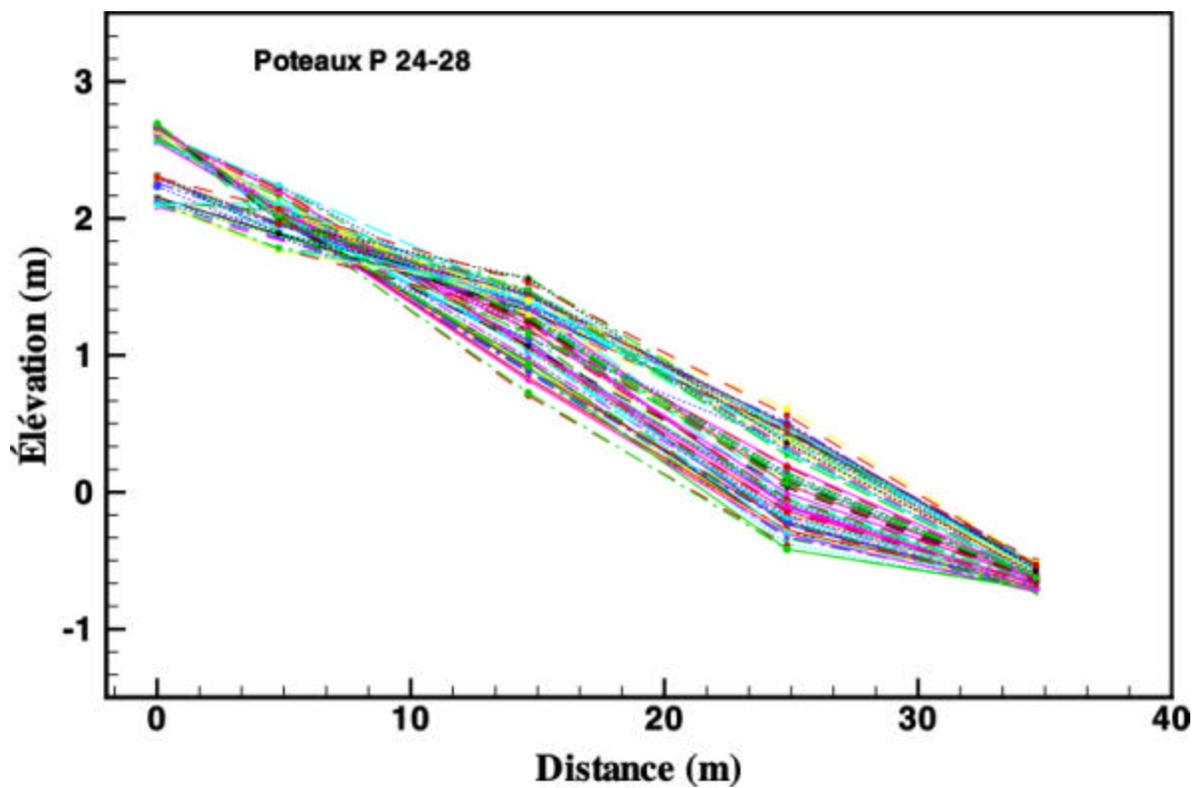


Figure A.15: Profil P 24-28: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

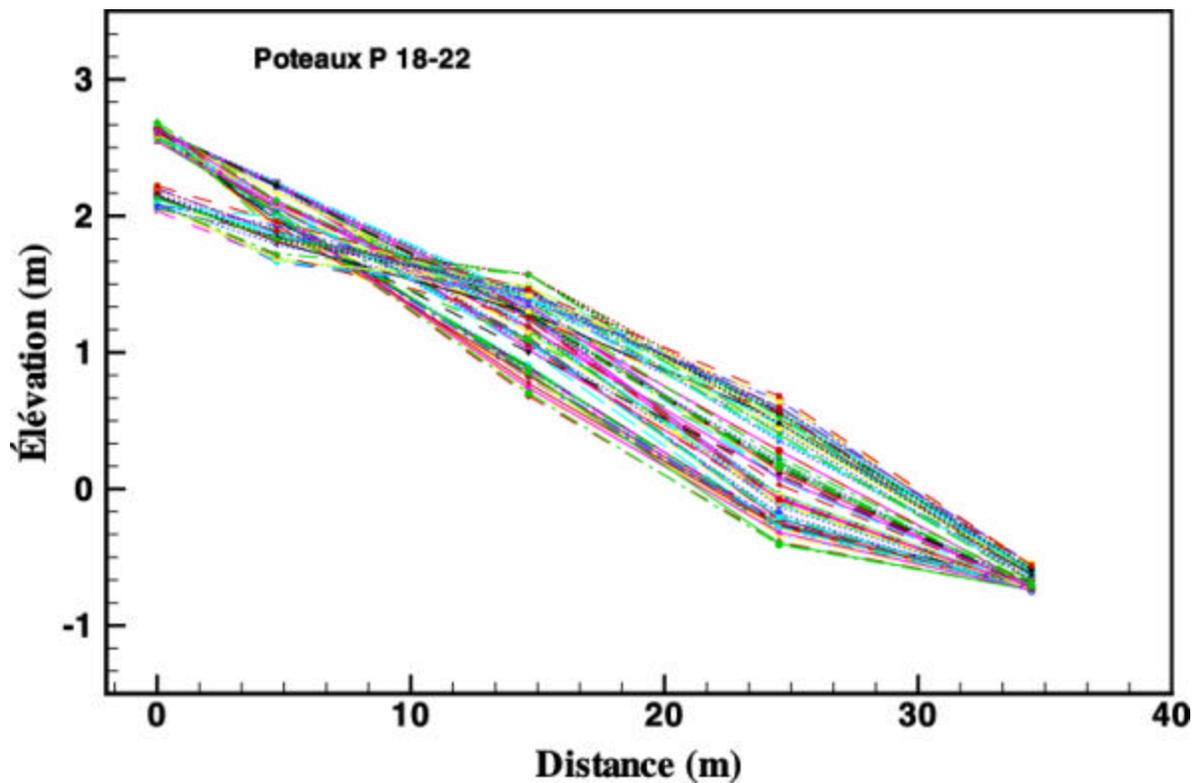


Figure A.16: Profil P 18-22: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

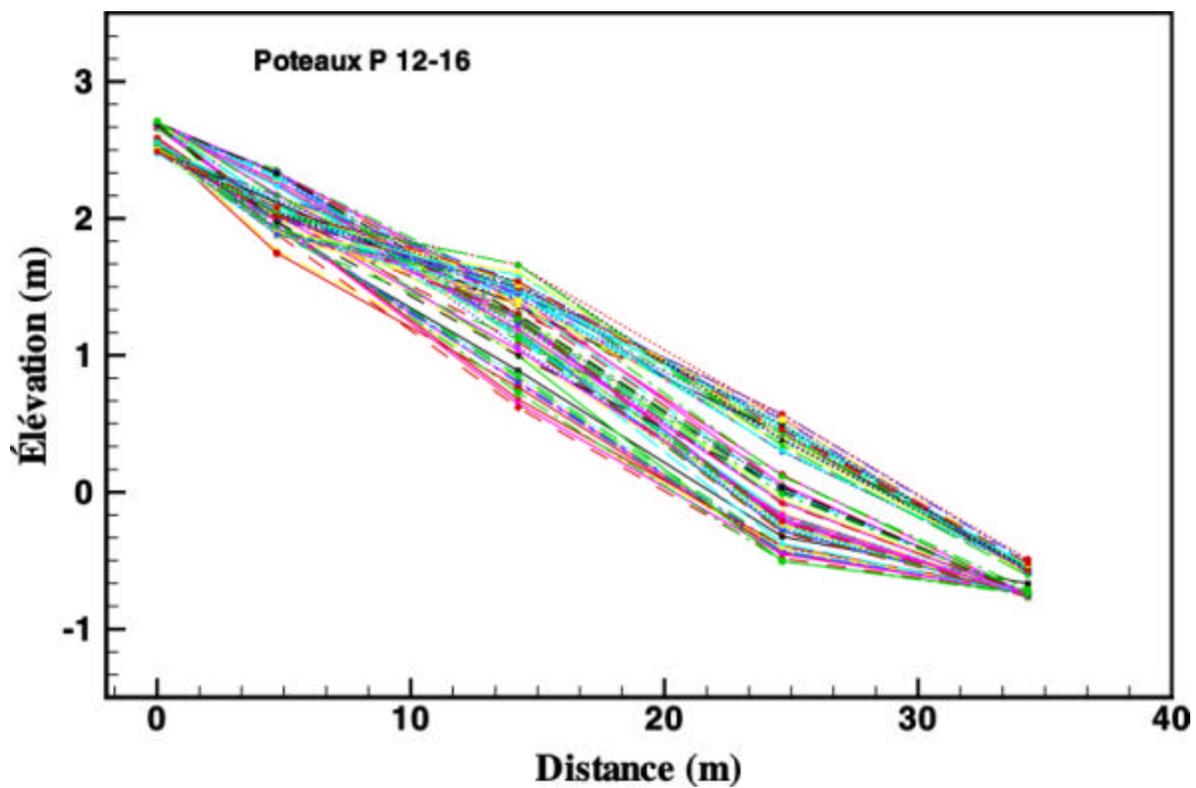


Figure A.17: Profil P 12-16: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

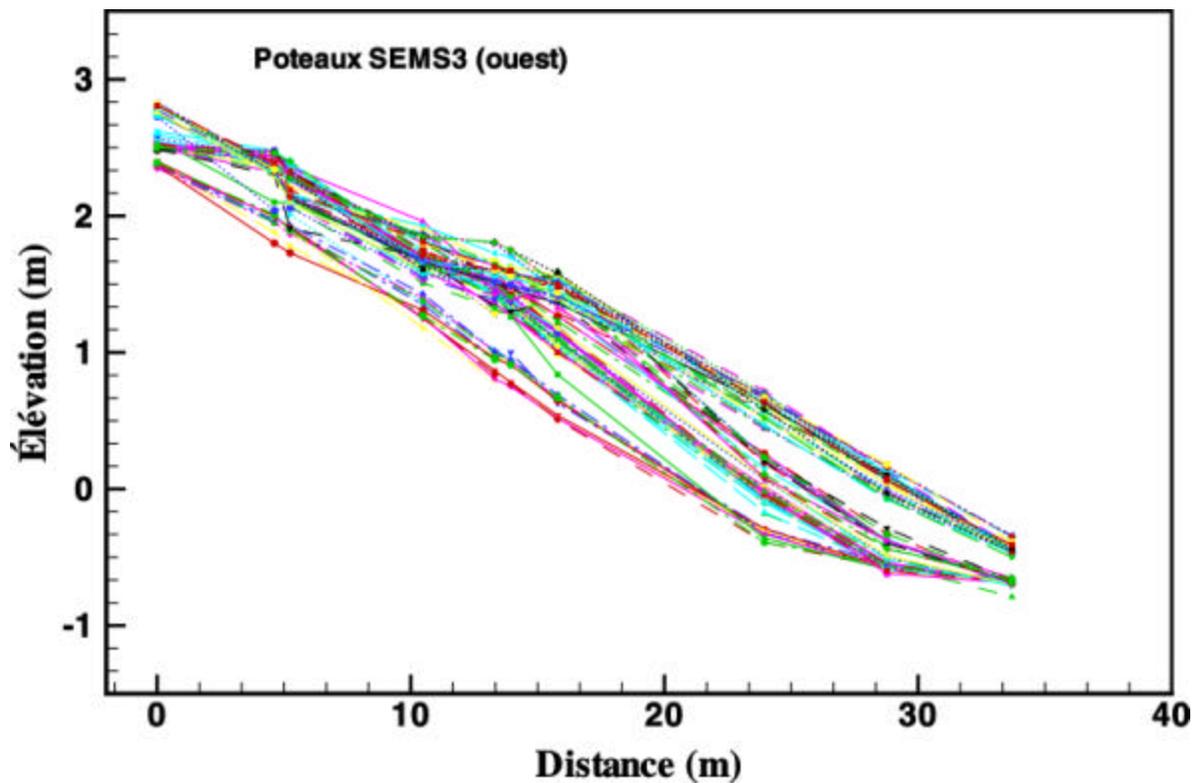


Figure A.18: Profil SEMS3 (ouest): résultats des mesures de 91 campagnes de terrain (du 26 juin au 9 décembre 2001)

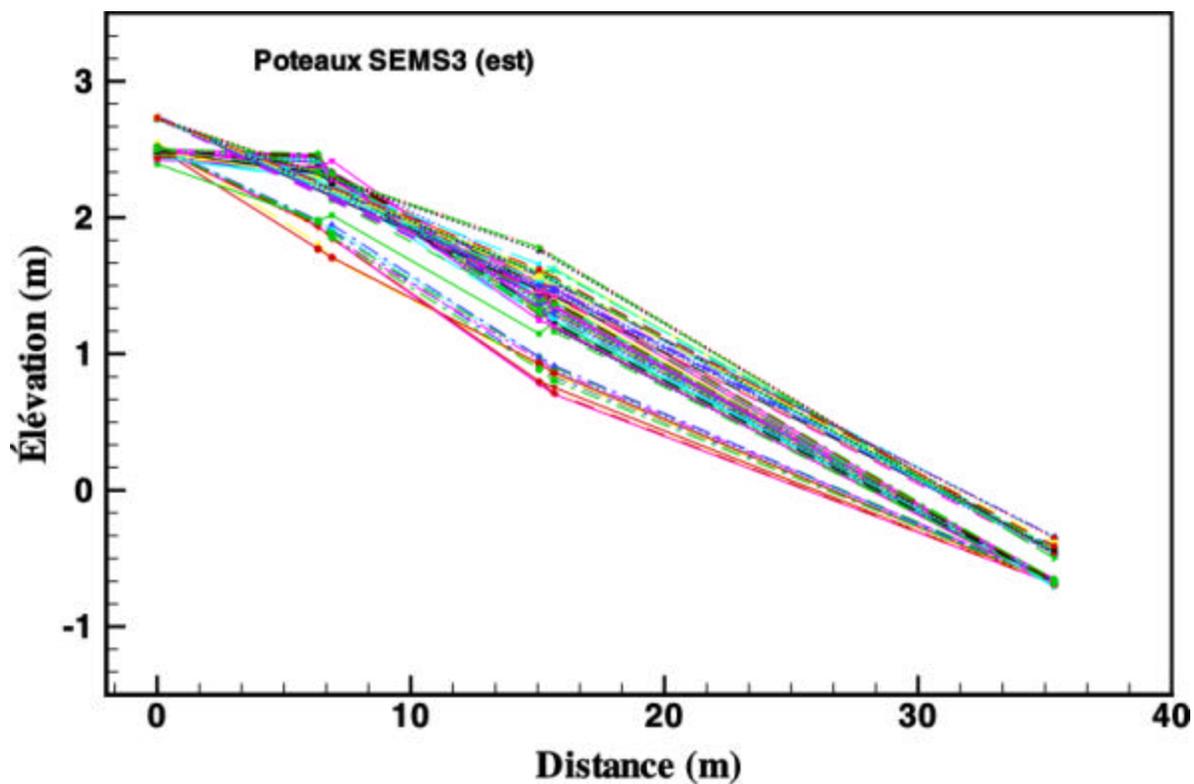


Figure A.19: Profil SEMS3 (est): résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 28 juin au 9 décembre 2001)

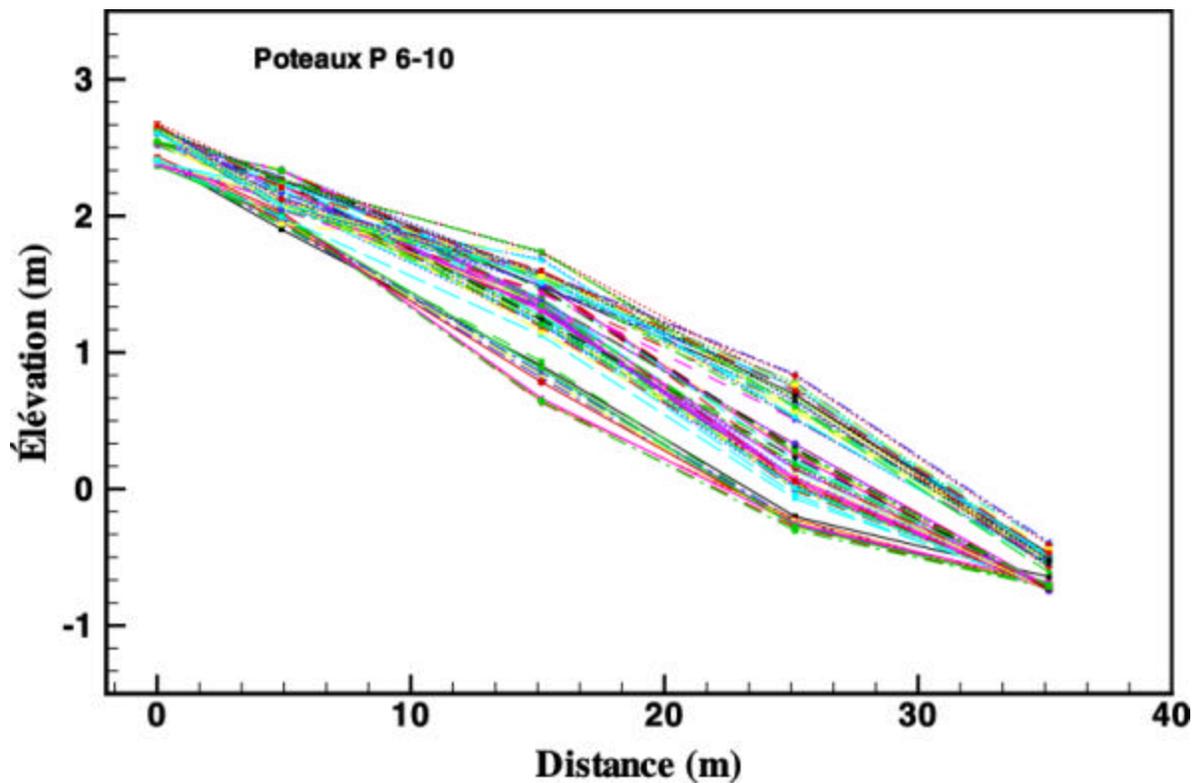


Figure A.20: Profil P 6-10: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

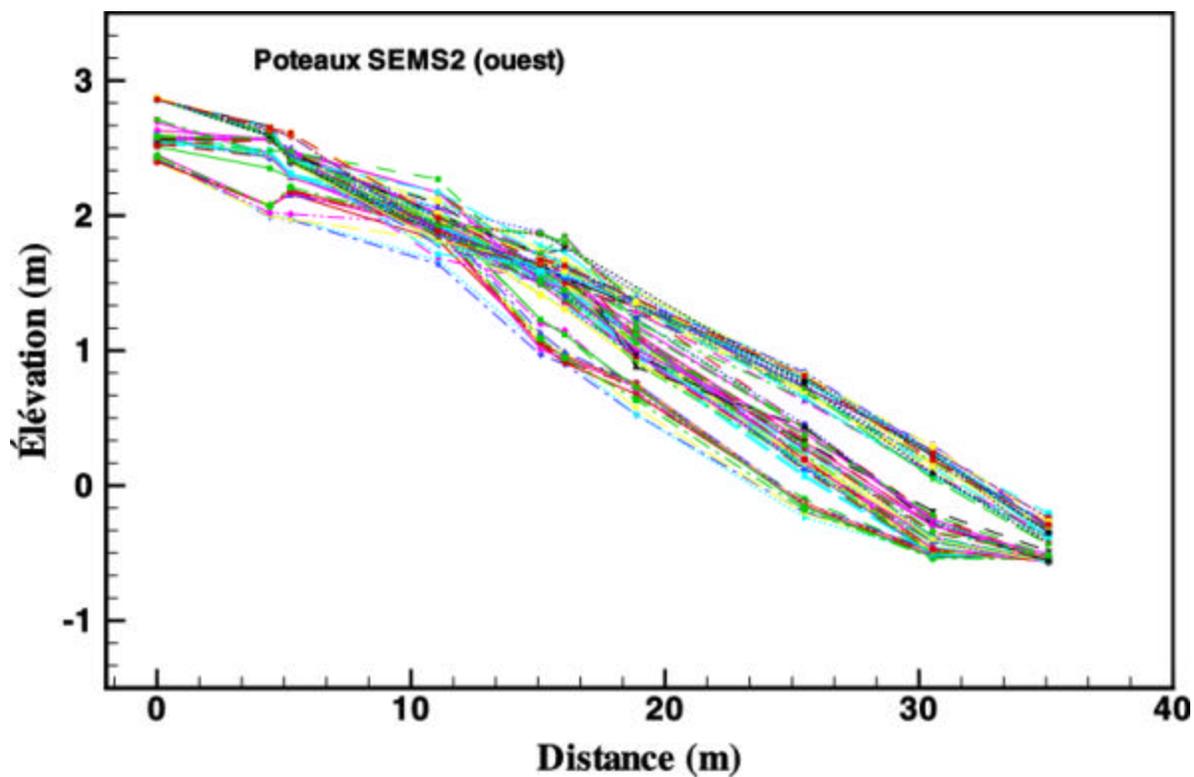


Figure A.21: Profil SEMS2 (ouest): résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 26 juin au 9 décembre 2001)

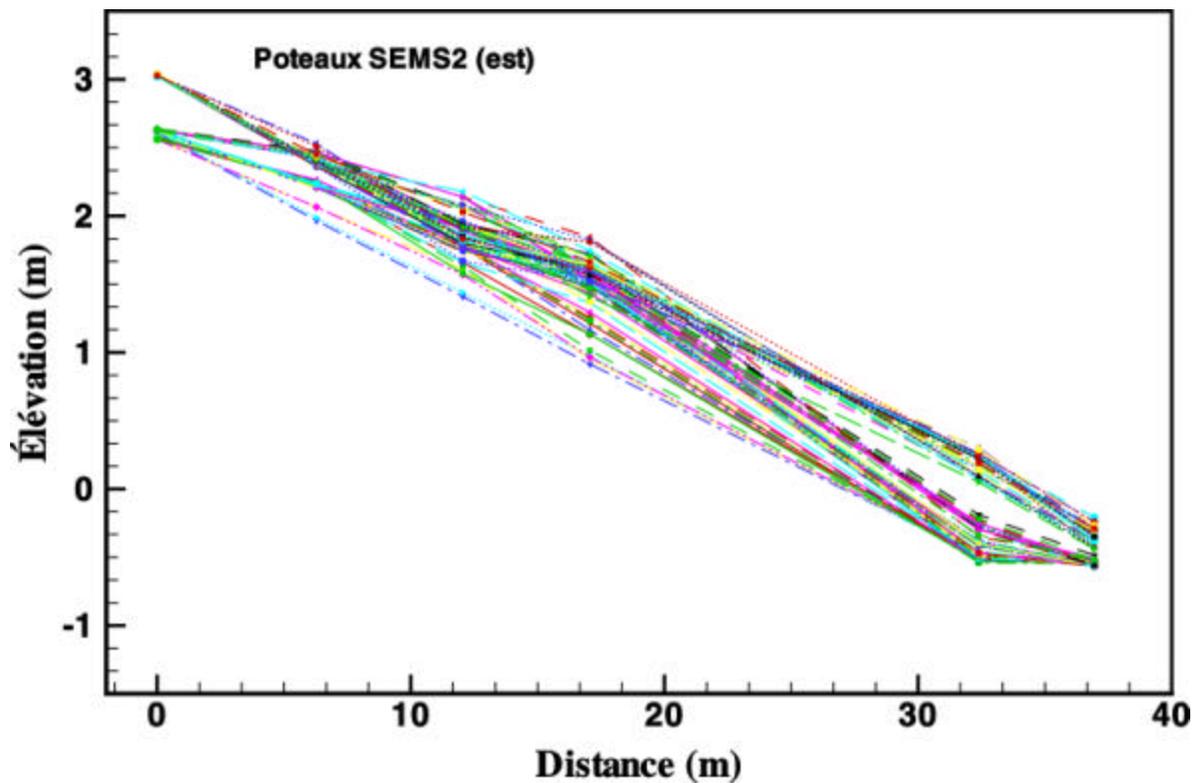


Figure A.22: Profil SEMS2 (est): résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 26 juin au 9 décembre 2001)

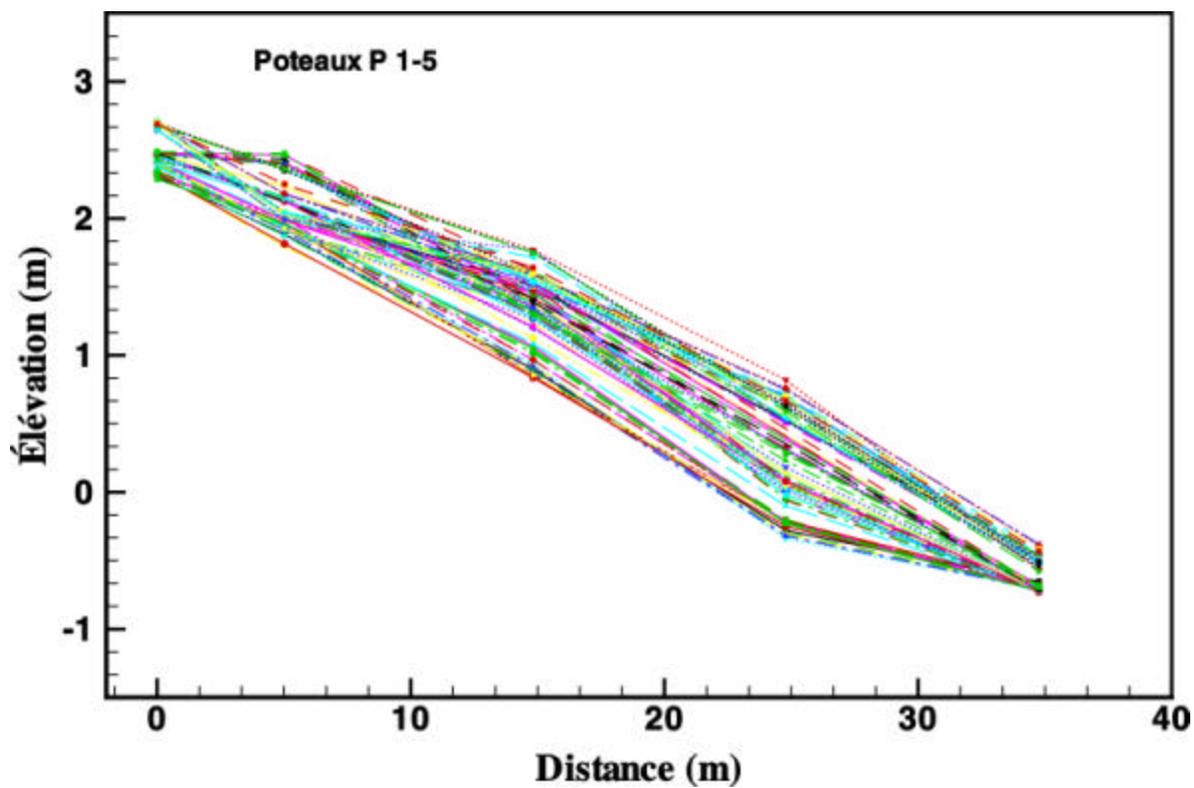


Figure A.23: Profil P 1-5: résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

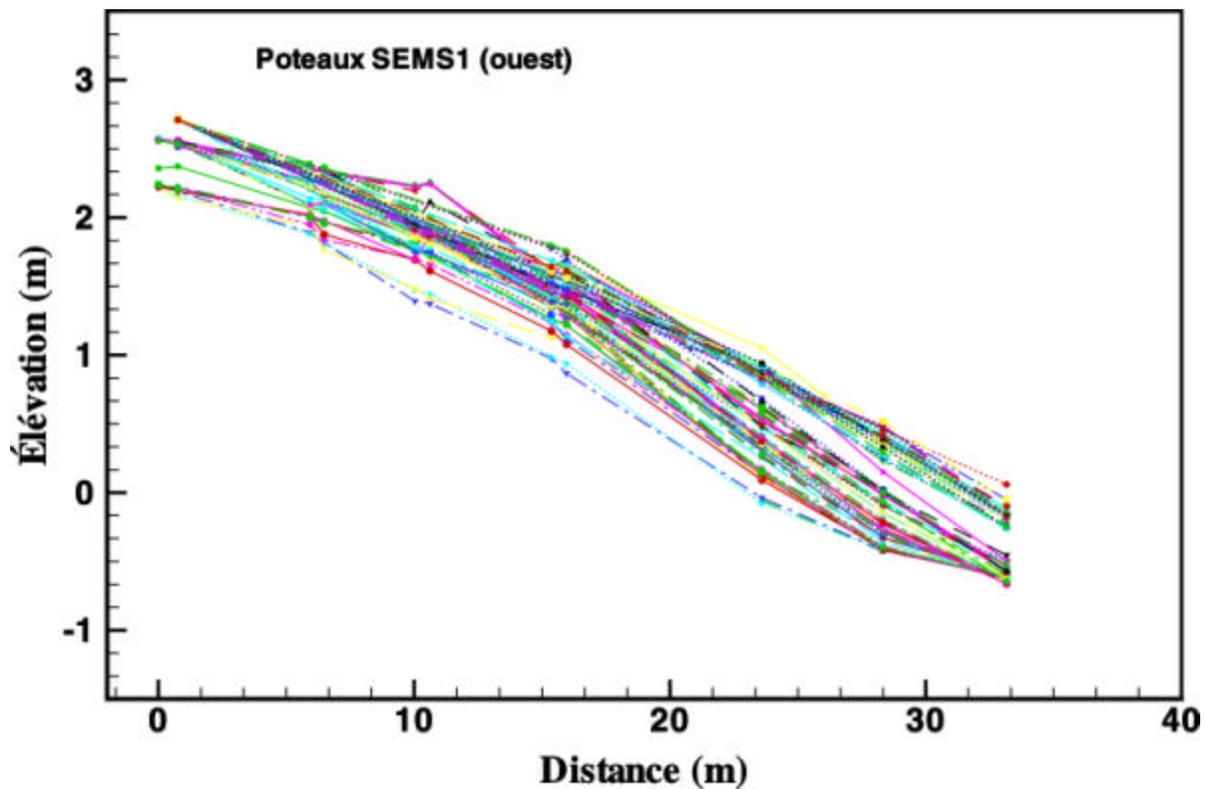


Figure A.24: Profil SEMS1 (ouest): résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 26 juin au 9 décembre 2001)

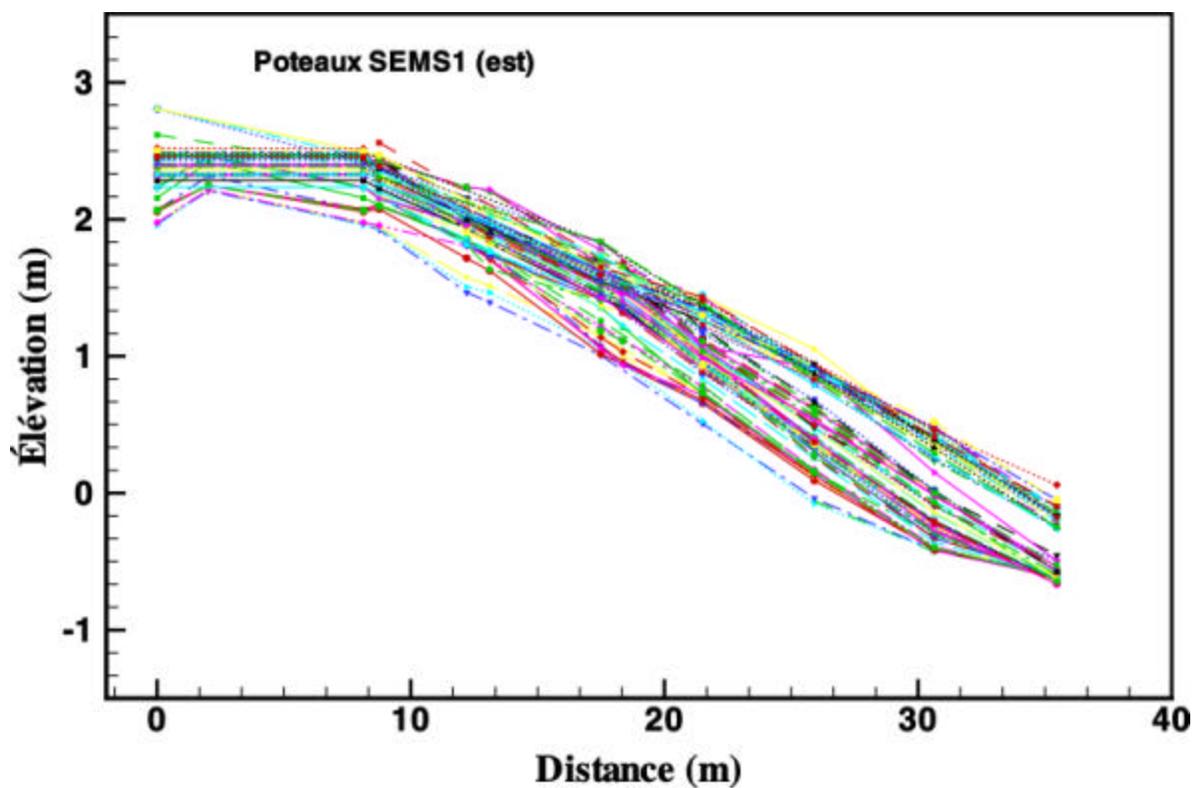


Figure A.25: Profil SEMS1 (est): résultats des mesures de 90 campagnes de terrain (du 26 juin au 9 décembre 2001)

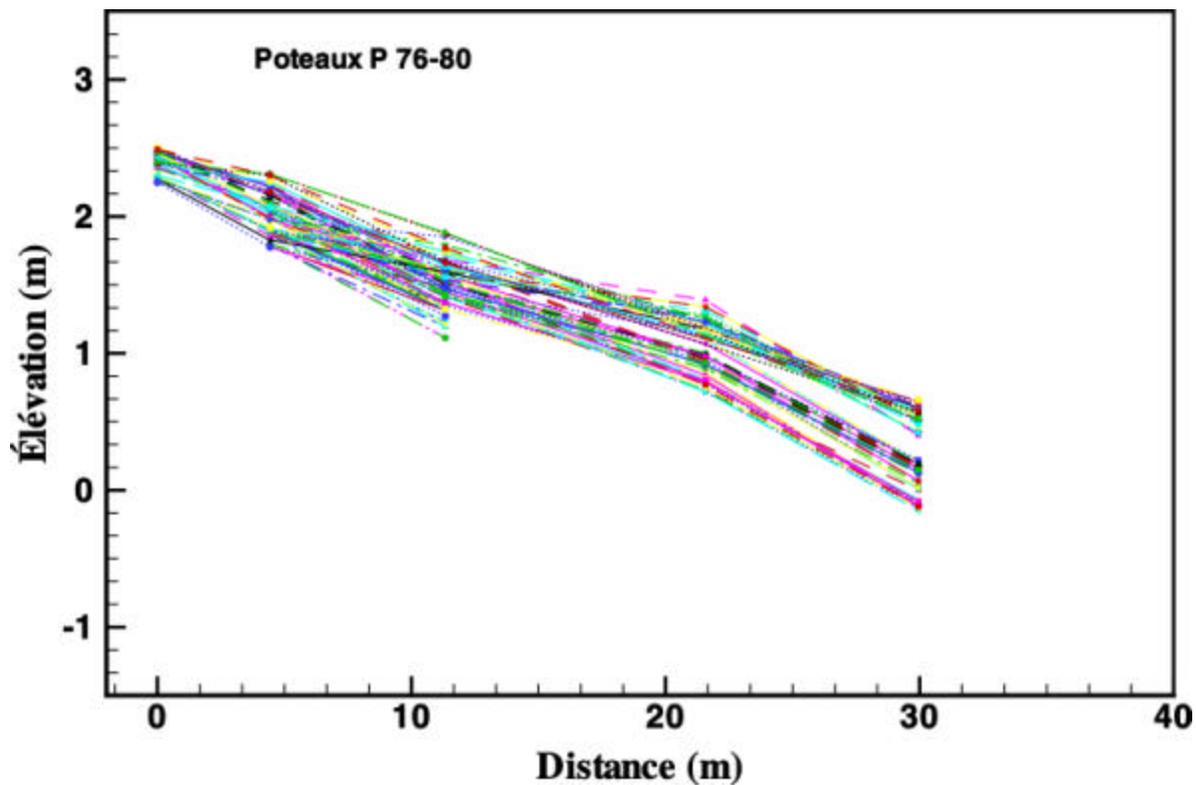


Figure A.26: Profil P 76-80: résultats des mesures de 87 campagnes de terrain (du 28 juin au 9 décembre 2001)

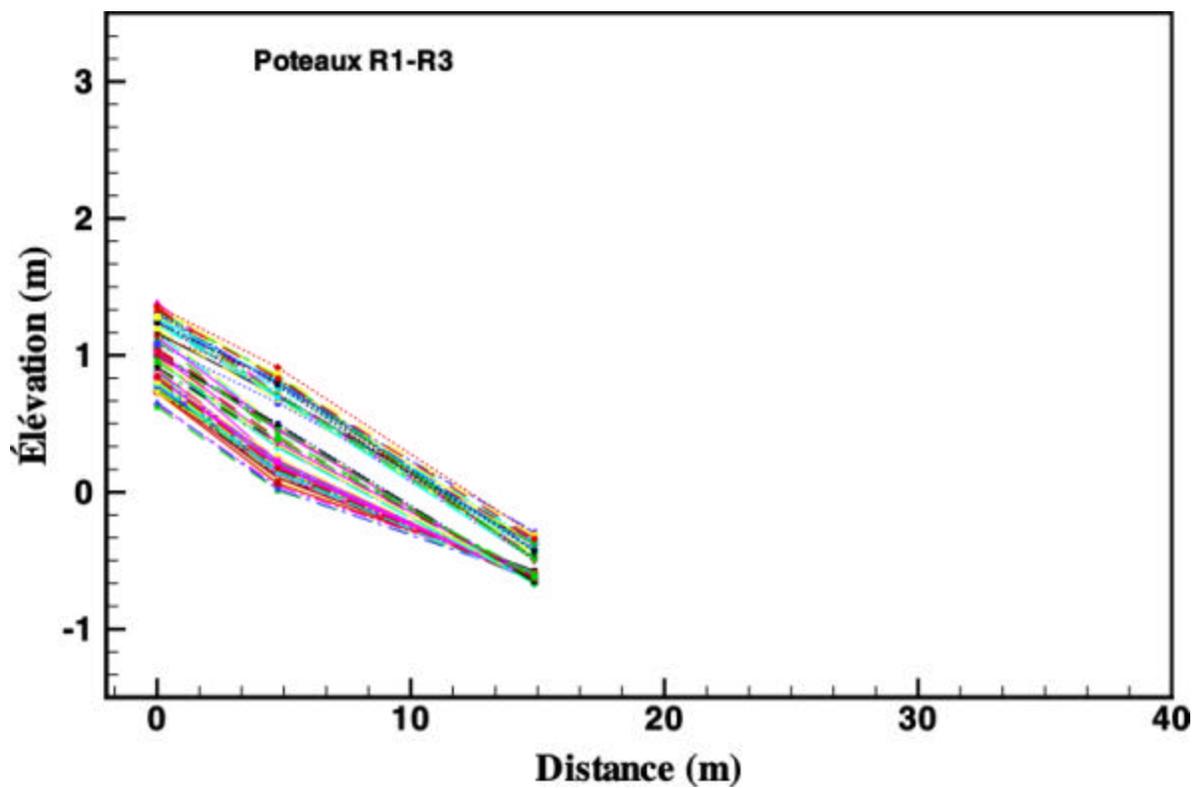


Figure A.27: Profil R1-R3: résultats des mesures de 88 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)

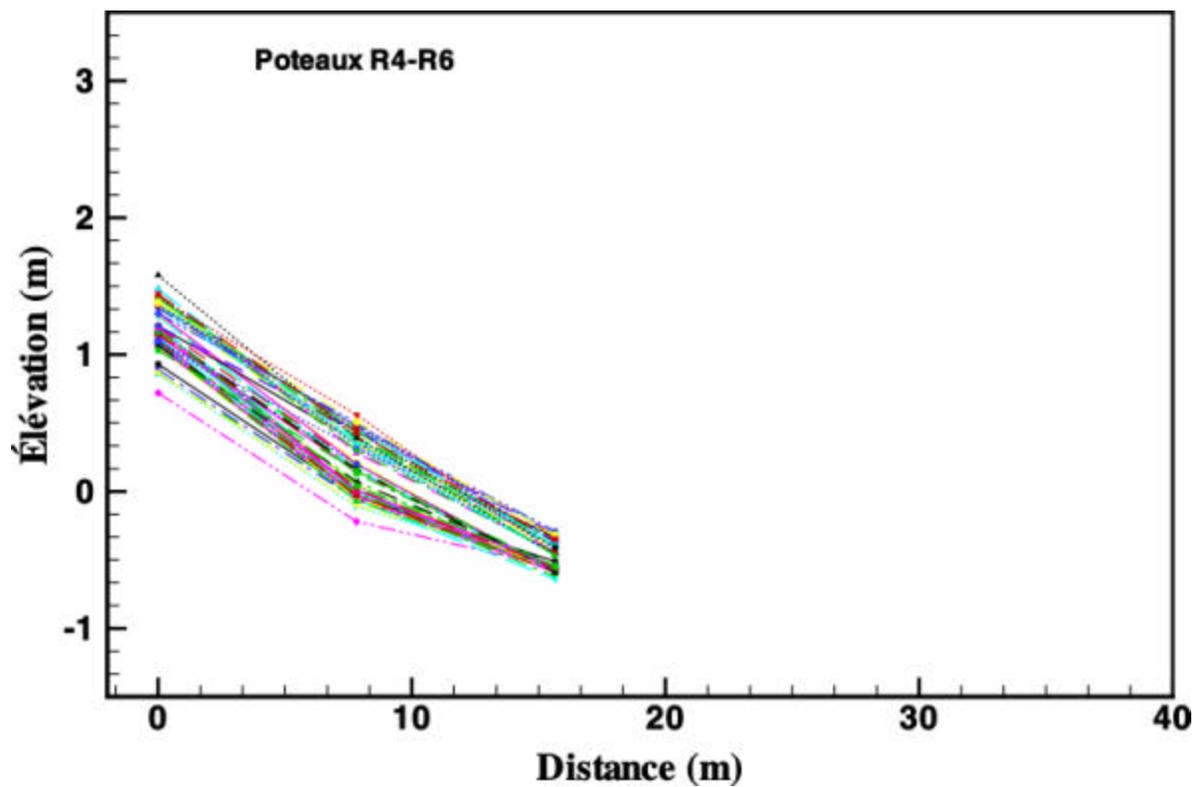


Figure A.28: Profil R4-R6: résultats des mesures de 69 campagnes de terrain (du 25 juin au 9 décembre 2001)