

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

MICROCLIMATOLOGIE ET QUANTIFICATION DES PROCESSUS
D'ÉROSION DE FALAISES DELTAÏQUES EN MILIEU TEMPÉRÉ FROID,
PÉNINSULE DE MANICOUAGAN, QUÉBEC

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE
EXTENSIONNÉE DE
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR
MAUDE CORRIVEAU

MARS 2010

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de recherche, Pascal Bernatchez, qui m'a offert de travailler avec lui sur ce projet extraordinaire, qui m'a donné sa confiance et l'autonomie nécessaire pour m'approprier le projet tout en étant un guide présent, à la fois exigeant et compréhensif.

Je souhaite remercier Yvon Jolivet, professionnel de recherche à la Chaire en géoscience côtière, pour son apport majeur au projet depuis l'idée initiale jusqu'aux infimes et complexes détails techniques. J'ai pu apprendre grâce à lui à m'en remettre à des forces supérieures dans le fonctionnement impénétrable de quelques-uns de nos équipements modernes! Sa personnalité unique et ses nombreuses connaissances et questions auront contribué sans l'ombre d'un doute à rendre ce projet d'autant plus fascinant.

Mes remerciements et toute ma gratitude vont tout particulièrement à ma mère, Louise Lafrenière, sans laquelle je n'aurais jamais trouvé les ressources nécessaires pour mener à bien ce projet. Elle fut d'une générosité sans borne m'offrant une denrée rare en ce siècle : du temps. C'est aussi un remerciement senti que j'offre à tous les autres membres de ma famille proche, Raymond Corriveau, Monique Brunelle et Lionel Décarie pour le support moral et les mots d'encouragement qui ont débutés bien avant ce projet de maîtrise.

Un merci tout spécial va à mon garçon, Simon, qui depuis ma bédaine a été mon plus jeune compagnon de terrain. Simon m'a ramenée sur terre et m'a permis de voir les choses d'un nouveau point de vue, y compris ce mémoire. Et encore, un autre merci à Philippe, qui avant même de voir le jour, aura sans doute été mon motivateur le plus important lors des derniers milles à parcourir.

Un merci convivial s'adresse aussi à mes collègues de travail et tout spécialement à ceux du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières qui par leur passion pour la géographie et les côtes sous toutes leurs coutures ont été une équipe extraordinaire au sein de laquelle le travail devient motivant et captivant.

Sur le terrain, j'ai été accompagnée par Étienne Bachand et Raoul Bernatchez et je les remercie pour leur patience et leur bonne compagnie. J'ai été accueillie chaleureusement au cœur de mes campagnes de terrain hivernal par Danielle et Raoul Bernatchez, j'en suis fort reconnaissante.

Enfin, je tiens à souligner le financement de la chaire de recherche en géoscience côtière de même que le support financier reçu grâce aux bourses offertes par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) sans lesquels je n'aurais pu mener ce projet à terme.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTES DES TABLEAUX.....	xv
RÉSUMÉ	xvii

CHAPITRE I

INTRODUCTION	1
1.1. Problématique	1
1.2. Objectifs	4
1.3. Originalité et portée scientifique du projet.....	5
1.4. Présentation du mémoire.....	6

CHAPITRE II

CADRE EXPÉRIMENTAL.....	7
2.1. Instrumentation pour l'acquisition des données climatiques	8
2.1.1. Station météorologique maritime.....	8
2.1.2. Complément à la station météorologique : la mesure des températures de l'air à Ragueneau.....	10
2.1.3. Mesure des régimes thermiques des falaises et suivi de l'érosion côtière	11
2.2. Campagnes de terrain : instrumentation et récolte de données	12
2.3. Traitement et analyse des données.....	13
2.3.1. Identification d'un évènement de recul de la falaise impliquant la sortie d'un <i>iButton</i>	15
2.4. Limites techniques	19

CHAPITRE III

SITE D'ÉTUDE.....	20
3.1. Localisation du site d'étude	20

3.2. Caractéristiques des falaises.....	23
3.3. Taux d'érosion récents	27
3.4. Conditions marégraphiques et climatiques	27
3.4.1. Mise en contexte des anomalies mensuelles des saisons 2005-2006 et 2006-2007 et des projections climatiques	28

CHAPITRE IV

BILAN MENSUEL DES ÉVÈNEMENTS DE REcul DES FALAISES.....	34
4.1. Saison 2005-2006.....	34
4.1.1. Octobre 2005.....	34
4.1.2. Novembre 2005	37
4.1.3. Décembre 2005	40
4.1.4. Janvier 2006	43
4.1.5. Février 2006	47
4.1.6. Mars 2006	49
4.1.7. Avril 2006	53
4.2. Saison 2006-2007.....	57
4.2.1. Octobre 2006.....	57
4.2.2. Novembre 2006	59
4.2.3. Décembre 2006	63
4.2.4. Janvier 2007	69
4.2.5. Février 2007	72
4.2.6. Mars 2007	74
4.2.7. Avril 2007	77
4.3. Limites de la méthode	80
4.3.1. Perte de données.....	81
4.3.2. Problèmes d'identification des évènements de recul de la falaise	82

CHAPITRE V

IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS CLIMATIQUES ET ENVIRONNEMENTALES SUR

L'ÉVOLUTION DES FALAISES.....	88
5.1. Identification et définition des grandes situations climatiques ayant engendré des évènements de reculs dans les falaises	88
5.2. Évolution du silt intertidal.....	93
5.3. Évolution des silts marins	98
5.3.1. Cycles de gel-dégel	101
5.3.2. Redoux hivernaux	105
5.3.3. Dégel printanier.....	107
5.3.4. Tempêtes	110
5.4. Processus d'érosion et modes de recul des falaises	112
5.4.1. Processus cryogéniques.....	113
5.4.2. Tempêtes	121
5.5. Évolution temporelle des falaises.....	129
 CONCLUSION.....	 135
 RÉFÉRENCES.....	 139
 APPENDICE A	
SIGNATURES THERMIQUES DES RECULS DES FALAISES	147

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Capteur de température <i>iButton</i> et abris anti-rayonnement implantés à la station 1 à Ragueneau.....	10
Figure 2.2. <i>iButtons</i> montés en réseau et installés dans une gaine de mousse isolante.	11
Figure 2.3. Acquisition des données à la station 1 (Ragueneau) lors du relevé de novembre 2005.....	13
Figure 2.4. Illustration des principes de microclimatologie sur la période diurne.....	14
Figure 2.5. Principe de la méthode d'analyse des événements de recul à l'aide du régime thermique : exemple de l'évènement de recul du 7 décembre 2006.....	16
Figure 2.6. Exemple d'une figure synthèse mensuelle : novembre 2005.	17
Figure 3.1. Localisation du site d'étude à Ragueneau sur la Côte-Nord.....	21
Figure 3.2. Localisation du site d'étude sur le complexe deltaïque Manicouagan-aux Outardes.	22
Figure 3.3. Localisation des stations de mesures.	22
Figure 3.4. Stratigraphie à la station 1 : 1) silt marin; 2) sable intertidal; 3) silt intertidal.	24
Figure 3.5. Station 2 en septembre 2006.....	25
Figure 3.6. Station 3 en septembre 2005.....	26
Figure 4.1. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois d'octobre 2005 à Ragueneau.	35
Figure 4.2. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de novembre 2005 à Ragueneau.	38
Figure 4.3. État de la falaise et position des <i>iButtons</i> le 20 novembre 2005 dans l'unité de silt marin à la station 2.	39
Figure 4.4. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de décembre 2005 à Ragueneau.....	42

Figure 4.5. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de janvier 2006 à Ragueneau.	45
Figure 4.6. Intégration de la tige de l'unité de silt marin dans le pied de glace (seule la corde de sécurité est visible) à la station 1 le 25 mars 2006.	46
Figure 4.7. Position de la tige en partie prise dans le silt marin sur l'estran à la suite de la dislocation du pied de glace à la station 1 le 30 mars 2006.	46
Figure 4.8. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de février 2006 à Ragueneau.	48
Figure 4.9. Effet du couvert de neige sur les températures des iB3 et iB4 à la station 2 et fusion partielle à la suite des conditions du 25 et 26 février 2006.	49
Figure 4.10. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de mars 2006 à Ragueneau.	51
Figure 4.11. Dislocation du pied de glace les 28 et 29 mars 2006 sur l'estran à la station 1.	52
Figure 4.12. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois d'avril 2006 à Ragueneau.	55
Figure 4.13. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois d'octobre 2006 à Ragueneau.	58
Figure 4.14. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de novembre 2006 à Ragueneau.	60
Figure 4.15. Réimplantation de la tige dans l'unité de silt marin à la station 3, 24 novembre 2006.	62
Figure 4.16. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de décembre 2006 à Ragueneau.	65
Figure 4.17. Températures de l'air enregistrées entre le 4 et 10 décembre 2006 à Ragueneau.	66
Figure 4.18. Rayonnement global et précipitations enregistrés entre le 4 et 10 décembre 2006 à Ragueneau.	66

Figure 4.19. État de la falaise et position des <i>iButtons</i> le 22 décembre 2005 dans l'unité de silt marin à la station 1 (absence de neige et de pied de glace).	67
Figure 4.20. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de janvier 2007 à Ragueneau.	70
Figure 4.21. Réinsertion de la tige dans le silt marin à la station 1 le 6 janvier 2007.	71
Figure 4.22. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de février 2007 à Ragueneau.	73
Figure 4.23. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de mars 2007 à Ragueneau.	76
Figure 4.24. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois d'avril 2007 à Ragueneau.	79
Figure 4.25. Isothermie des températures observées les 15 et 16 octobre 2006 et signature du recul de la falaise du 17 octobre impliquant le iB2 de l'unité de silt marin à la station 3.	83
Figure 4.26. Exemple d'un <i>iButton</i> à la limite externe de la falaise engendrant des difficultés dans l'analyse des signatures thermiques à la station 1.	84
Figure 4.27. Morphologie asymétrique de la surface de la falaise soulevant des difficultés dans l'analyse des signatures thermiques des <i>iButtons</i>	85
Figure.4.28. Schéma du développement d'une pente douce soulevant des difficultés dans l'analyse des signatures thermiques des <i>iButtons</i>	85
Figure.4.29. Schéma du développement d'un plateau à la suite du recul de l'unité supérieure permettant aux conditions climatiques d'influencer les comportements thermiques des <i>iButtons</i> depuis une surface supplémentaire (horizontale).	86
Figure 4.30. Débord organique observé à la station 1 le 22 décembre 2006.	87
Figure 5.1. Identification du début du régime de températures froides de la saison 2005-2006 le 3 décembre 2005 à Ragueneau.	90

Figure 5.2. Identification du début du régime de température froide de la saison 2006-2007 le 1 ^{er} décembre 2006 à Ragueneau.	91
Figure 5.3. Identification de la fin du régime de températures froides et du début du dégel printanier de la saison 2005-2006 le 13 mars 2006 à Ragueneau.	91
Figure 5.4. Identification de la fin du régime de températures froides et du début du dégel printanier de la saison 2006-2007 le 26 mars 2006 à Ragueneau.	92
Figure 5.5. Évolution du profil de la falaise à la station 1	95
Figure 5.6. État de la falaise à la station 1 et position des <i>iButtons</i> dans l'unité de silt intertidal le 25 mars 2006.....	97
Figure 5.7. État de la falaise de la station 1 et position des <i>iButtons</i> dans l'unité de silt intertidal le 26 mars 2006 (<i>iB7</i> à peine visible)	97
Figure 5.8. Part relative des grandes situations climatiques ayant générés des reculs dans les falaises à Ragueneau.	99
Figure 5.9. Part relative du nombre de <i>iButtons</i> impliqués dans les reculs des falaises en fonction des grandes situations climatiques à Ragueneau.	100
Figure 5.10. Cicatrices laissées par la production de gélifractions observées à la station 1 le 23 novembre 2006.....	103
Figure 5.11. Traces d'un glissement à la station 1 le 26 mars 2006	115
Figure 5.12. Coloration du silt en rouille attribuable à la circulation de l'eau dans les fissures et effondrement de dalles de silt marin à la suite de la fusion d'un joint de glace à proximité de la station 1 le 20 novembre 2005	116
Figure 5.13. Lentilles de glace observé le 9 mars 2007 à Ragueneau	118
Figure 5.14. Talus de microclastes d'origine cryogénique observé le 8 mars 2007 à Ragueneau	119
Figure 5.15. Microclastes d'origine cryogénique au pied de la falaise observé le 29 mars 2007 à Ragueneau	120
Figure 5.16. Coulées boueuses en développement et production de microclastes observées le 8 mars 2007 à Ragueneau.....	121
Figure 5.17. Effet de la dessiccation à proximité de la station 3 à l'été 2005.....	122

Figure 5.18. État de la falaise le 21 octobre 2005 à la station 1.....	124
Figure 5.19. Effets de la dessiccation sur l'unité de silt marin à la station 3	125
Figure 5.20. Galets d'argile de la Mer de Champlain sur les rives du Saint-Laurent.	125
Figure 5.21. Galets de silt marin (en gris pâle) délogés et façonnés par les vagues à Ragueneau.....	126
Figure 5.22. Clastes de silt marin délogés et répartis sur l'estran à Ragueneau.	126
Figure 5.23. Érosion différentielle tributaire de l'écoulement d'eau sur la surface de la paroi à proximité de la station 2.	127
Figure 5.24. Évolution mensuelle des falaises de Ragueneau lors de la saison de suivi 2005-2006.	130
Figure 5.25. Évolution mensuelle des falaises de Ragueneau lors de la saison de suivi 2006-2007.	131
Figure 5.26. Quantification des processus responsables de l'érosion des falaises de silt marin à Ragueneau.....	133
Figure A.1. Signature thermique du recul du 16 octobre 2005 impliquant le iB2 de l'unité de silt marin à la station 1	148
Figure A.2. Signature thermique des reculs du 17 et du 20 octobre 2005 impliquant les iB2 et iB3 de l'unité de silt marin à la station 3.	149
Figure A.3. Signature thermique du recul du 19 novembre 2005 impliquant le iB3 de l'unité de silt marin à la station 1.....	150
Figure A.4. État de la falaise et position des <i>iButtons</i> le 20 novembre 2005 dans l'unité de silt marin à la station 1.	151
Figure A.5. Signature thermique des reculs du 21 et du 23 novembre 2005 impliquant le iB44 et le iB5 de l'unité de silt marin à la station 3.....	152
Figure A.6. Signature thermique du recul du 30 novembre 2005 impliquant le iB6 de l'unité de silt marin à la station 3.....	153
Figure A.7. Signature thermique du recul du 2 décembre 2005 impliquant le iB3 de l'unité de silt marin à la station 2.....	154

Figure A.8. Signature thermique du recul du 2 décembre 2005 impliquant les iB7 et iB8 de l'unité de silt marin à la station 3.	154
Figure A.9. Signature thermique de la perturbation du 30 janvier 2006 impliquant toute la tige de l'unité de silt marin à la station 1.	155
Figure A.10. Stabilité des températures enregistrées par les <i>iButtons</i> suite à la perturbation du 30 janvier de l'unité de silt marin à la station 1.....	156
Figure A.11. Signature thermique du recul du 9 mars 2006 impliquant le iB4 de l'unité de silt marin à la station 2.	157
Figure A.12. Signature thermique du recul du 26 mars 2006 impliquant les iB3 à iB7 de l'unité de silt intertidal à la station 1.	158
Figure A.13. Signature thermique des reculs du 27, 28 et du 30 mars 2006 impliquant les iB5 à iB8 de l'unité de silt marin à la station 2.	159
Figure A.14. État de la falaise et position des <i>iButtons</i> le 30 mars 2006 dans l'unité de silt de la station 2.....	160
Figure A.15. Signature thermique des reculs du 25, 26 et 28 mars 2006 impliquant les iB9 à iB12 de l'unité de silt marin à la station 3.	161
Figure A.16. Signature thermique des reculs du 2, 3, 6 et 7 avril 2006 impliquant les iB8 à iB11 de l'unité de silt intertidal de la station 1.....	162
Figure A.17. Signature thermique du recul du 1 ^{er} et du 4 avril 2006 impliquant les iB9 et iB10 de l'unité de silt marin à la station 2.....	163
Figure A.18. Signature thermique du recul du 9 avril 2006 impliquant le iB11 de l'unité de silt marin à la station 2.	163
Figure A.19. Signature thermique du recul du 28 octobre 2006 impliquant le iB2 et le iB3 de l'unité de silt marin à la station 2.	164
Figure A.20. Signature thermique du recul du 29 octobre 2006 (18 h 00) impliquant le iB2 à iB6 de l'unité de silt intertidal à la station 1.....	165
Figure A.21. Signature thermique du recul du 29 octobre 2006 (18 h 00) impliquant les iB2 à iB4 de l'unité de silt marin à la station 1.	166

Figure A.22. Signature thermique du recul du 29 octobre 2006 impliquant le iB2 de l'unité de silt marin à la station 3.....	166
Figure A.23. Signature thermique du recul du 7 novembre 2006 impliquant le iB3 et le iB4 de l'unité de silt marin à la station 3.	167
Figure A.24. Signature thermique du recul du 9 novembre 2006 impliquant le iB7 de l'unité de silt intertidal à la station 1.....	168
Figure A.25. Signature thermique du recul du 24 novembre impliquant le iB5 de l'unité de silt marin à la station 1.....	169
Figure A.26. Signature thermique du recul du 6 décembre (vers 13 h 30) impliquant les iB4 à iB12 de l'unité de silt marin à la station 3.	170
Figure A.27. Signature thermique du recul du 7 décembre 2006 (vers 19 h 30) impliquant les iB6 à iB12 de l'unité de silt marin à la station 1.....	171
Figure A.28. Signature thermique du recul survenu dans la nuit du 7 au 8 janvier 2008 impliquant toute la tige de l'unité de silt marin de la station 1.....	172
Figure A.29. Signature thermique du recul du 8 janvier 2007 impliquant toute la tige de l'unité de silt intertidal à la station 1.....	173
Figure A.30. Signature thermique du recul du 26 février 2007 impliquant le iB4 de l'unité de silt marin à la station 2.....	174
Figure A.31. Signature thermique du recul du 1 ^{er} mars 2007 impliquant le iB5 de l'unité de silt marin à la station 2.....	175
Figure A.32. Signature thermique du recul du 23 mars 2007 impliquant le iB6 de l'unité de silt marin à la station 2.....	176
Figure A.33. Signature thermique du recul du 16 mars 2007 impliquant le iB4 de l'unité de silt marin à la station 3.....	177
Figure A.34. Signature thermique des reculs du 28 et 29 mars 2007 impliquant les iB7 et iB8 de l'unité de silt marin à la station 2.....	178
Figure A.35. Signature thermique du recul du 29 mars 2007 impliquant le iB5 de l'unité de silt marin à la station 3.....	178

Figure A.36. Signature thermique du recul du 6 avril 2007 impliquant le iB9 de l'unité de silt marin à la station 2.....	179
Figure A.37. Signature thermique des reculs du 10, 11 et 12 avril 2007 impliquant les iB10, iB11 et iB12 de l'unité de silt marin à la station 2.....	180

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Instruments, marques et modèles, unités et fréquences d’acquisition de la station météorologique maritime de Pointe-Lebel	9
Tableau 3.1. Normales climatiques à la station météorologique de Baie-Comeau.....	28
Tableau 3.2. Normales climatiques et prévisions pour la sous-région centrale du Québec.....	29
Tableau 3.3. Normales et données de températures et de précipitations observées pour la période d’acquisition de données de 2005-2006 à la station météorologique de Baie-Comeau	31
Tableau 3.4. Normales et données de températures et de précipitations observées pour la période d’acquisition de données de 2006-2007 à la station météorologique de Baie-Comeau	32
Tableau 4.1. Reculs des falaises observés au mois d’octobre 2005 à Ragueneau	36
Tableau 4.2. Reculs des falaises observés au mois de novembre 2005 à Ragueneau	39
Tableau 4.3. Reculs des falaises observés au mois de décembre 2005 à Ragueneau	43
Tableau 4.4. Reculs des falaises observés au mois de janvier 2006 à Ragueneau	44
Tableau 4.5. Reculs des falaises observés au mois de mars 2006 à Ragueneau	53
Tableau 4.6. Reculs des falaises observés au mois de avril 2006 à Ragueneau	56
Tableau 4.7. Reculs des falaises observés au mois d’octobre 2006 à Ragueneau	59
Tableau 4.8. Reculs des falaises observés au mois de novembre 2006 à Ragueneau	62
Tableau 4.9. Reculs des falaises observés au mois de décembre 2006 à Ragueneau	68
Tableau 4.10. Reculs des falaises observés au mois de janvier 2007 à Ragueneau...	71
Tableau 4.11. Reculs des falaises observés au mois de février 2007 à Ragueneau ...	72
Tableau 4.12. Reculs de la falaise observés au mois de mars 2007 à Ragueneau	75
Tableau 4.13. Reculs des falaises observés au mois d’avril 2007 à Ragueneau.....	78
Tableau 5.1. Comparatif des évènements de reculs des unités de silt intertidal et de silt marin enregistrés à la station 1	94

Tableau 5.2. Intensité des reculs des falaises associés aux grandes situations climatiques à Ragueneau.....	100
Tableau 5.3. Effets des cycles de gel-dégel sur l'évolution des unités de silt marin à Ragueneau	102
Tableau 5.4. Effet des redoux sur l'évolution des unités de silt marin à Ragueneau	106
Tableau 5.5. Tendances climatiques historiques observées pour la période 1987-2006 dans l'est du Québec	107
Tableau 5.6. Effet du dégel printanier sur les unités de silt marin à Ragueneau	109
Tableau 5.7. Effets des tempêtes sur l'évolution des unités de silt marin à Ragueneau	111

RÉSUMÉ

Les indices de sensibilité des littoraux et les structures de protection côtière sont généralement conçus en fonction de la hausse du niveau marin relatif, de la fréquence des tempêtes et des processus hydrodynamiques. Cependant, plusieurs paramètres climatiques peuvent aussi influencer la sensibilité d'une côte en activant des processus de météorisation. Il a été démontré, qu'en l'absence d'une quantification des processus d'érosion, certains processus sont sous-estimés, voire ignorés. Il s'agit de lacunes importantes pour la mise en place de plans de gestion efficaces des territoires côtiers dans un climat en pleine transformation. Actuellement, les méthodes de suivis traditionnelles du milieu côtier n'offrent pas une résolution temporelle suffisamment élevée pour corrélérer l'influence des paramètres climatiques sur l'activation de l'érosion si bien, qu'au Québec, très peu d'études ont permis de quantifier l'influence des paramètres climatiques sur l'érosion côtière.

Ce projet vise à quantifier l'influence des paramètres climatiques sur les modes et les vitesses de recul des falaises deltaïques en milieu tempéré froid et ce, en fonction de variables environnementales. Le site d'étude est localisé à Ragueneau, dans l'ensemble physiographique de l'important complexe deltaïque de Manicouagan-aux-Outardes (Côte-Nord, Québec, Canada) et est particulièrement dynamique avec un taux de recul annuel moyen des falaises de 150 cm (période 1998-2003).

Une nouvelle méthode offrant un suivi d'une résolution temporelle de 30 minutes a été développée. Il s'agit de tiges implantées dans les falaises et composées chacune de 12 capteurs de température. Les données acquises permettent d'obtenir des signatures thermiques permettant d'identifier les moments de reculs survenus pour les périodes de septembre à avril des années 2005-2006 et de 2006-2007. Les événements de recul ont été associés à quatre grandes situations climatiques : les cycles de gel-dégel (31 %), les redoux hivernaux (27 %), le dégel printanier (24 %) et les tempêtes (17 %). Nos résultats confirment que les silts sont particulièrement sensibles aux processus cryogéniques. La part relative du nombre de *iButtons* dégagés sous l'effet des processus cryogéniques est de 82 %. Plus spécifiquement, les processus cryogéniques hivernaux comptent pour 48 %, les processus cryogéniques printaniers pour 24 % et les processus cryogéniques automnaux pour 10 %. Par ailleurs, on apprend que le pouvoir érosif des vagues de tempêtes est fonction des processus de météorisation ayant affecté les falaises avant le passage de la tempête. La part relative du nombre de *iButtons* dégagés sous l'effet des processus de météorisation combinés au passage de tempêtes est de 17 %. Dans le contexte des changements climatiques, les prévisions à la hausse des températures de l'air en période hivernale, du nombre de jours de redoux et du nombre de cycles de gel-dégel

sont des conditions propices à l'augmentation des taux d'érosion hivernaux sur les côtes deltaïques.

Mots-clés : Érosion côtière, falaises, météorisation, climat, dépôts meubles, régime thermique, méthode de suivi, quantification des processus d'érosion.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1. Problématique

Dans le contexte actuel des changements climatiques, plusieurs milieux ont déjà montré des signes de transformations importantes (IPCC, 2001). En milieu côtier, ces changements se manifestent entre autres par l'accélération de l'érosion des côtes qui menace ou détruit le cadre bâti et transforme les écosystèmes côtiers (Ouranos, 2004; IPCC, 2001). Les côtes des régions tempérées froides sont particulièrement sensibles aux changements climatiques (IPCC, 2001). Au Québec, on note déjà que les taux de recul côtier s'accélèrent (Bernatchez et Dubois, 2004).

Jusqu'à maintenant, les études sur la dynamique côtière ont porté surtout sur l'impact des agents hydrodynamiques sur les côtes (Cooper *et al.*, 2004; Forbes *et al.*, 2004; Himelstoss *et al.*, 2006; Regnauld *et al.*, 2004). Ainsi, les indices de sensibilité des littoraux et les structures de protection côtière sont élaborés principalement en fonction de la hausse du niveau marin relatif, de la fréquence des tempêtes et des processus hydrodynamiques (Charlier, Chainoux et Morcos, 2005; Gornitz, 1995; Herbich, 2000; Lozano *et al.*, 2004; McCulloch *et al.*, 2002; Parkes, Forbes et Ketch, 2006; Paskoff, 2001; Shaw *et al.*, 1998). Toutefois, quelques études ont démontré que plusieurs paramètres climatiques peuvent aussi influencer la sensibilité d'une côte par

l'activation de processus de météorisation et, qu'en l'absence de quantification, certains processus sont surestimés ou sous-estimés, voire même ignorés (Bernatchez et Dubois, 2008; Hénaff *et al.*, 2002). À notre connaissance, seuls quelques chercheurs se sont penchés sur la contribution des paramètres climatiques qui engendrent le recul des côtes ou des berges de rivières sous l'effet de la cryoclastie (Bernatchez, 2003; Bernatchez et Dubois, 2008; Brodeur, 1987; Couper, 2003; Couper, Maddock et Stott, 2001; Couper, Stott et Maddock, 2002; Dionne et Brodeur, 1988; Ferrick, Gatto et Grant, 2005; Gaskin *et al.*, 2003; Lawler, 1986; Ødegård et Sollid, 1993; Stott, 1997; Trenhaile et Mercan, 1984; Wolman, 1959) et de la dessiccation (Couper, Maddock et Stott, 2001; Couper, Stott et Maddock, 2002; Gaskin *et al.*, 2003). Quelques-uns de ces auteurs ont aussi cherché à corrélérer les paramètres climatiques, tels les jours de gel, les précipitations, les redoux hivernaux, les vents de tempête et les saisons aux taux de recul côtier mesurés (Bernatchez et Dubois, 2008; Bernatchez *et al.*, 2008; Bernatchez, Jolivet et Corriveau, soumis 2010; Couper, Stott et Maddock, 2002; Lawler, 1986; Manson, 2002; Ødegård et Sollid, 1993). Au Québec, les travaux de Bernatchez *et al.* (2008) ont permis de faire ressortir les relations qui existent entre les paramètres climatiques et l'évolution de segments côtiers homogènes. Ils ont pu observer ces relations en comparant, sur des plages de temps identiques, les données météorologiques et les taux de déplacement des lignes de rivages. Leurs résultats indiquent, qu'en l'absence d'une résolution temporelle appropriée, il n'est pas possible de faire des corrélations entre le rythme de recul des côtes et les paramètres climatiques. Somme toute, en raison des connaissances à parfaire et des lacunes identifiées ici, la part relative des paramètres climatiques activant le recul des côtes n'est généralement pas intégrée aux indices de sensibilité des côtes malgré que ces études démontrent que leur influence est fondamentale. Une meilleure connaissance de la part relative du recul activé par différents paramètres climatiques permettrait de mieux comprendre la dynamique côtière, de développer des modèles performants et des indices de sensibilité des systèmes côtiers plus représentatifs de la réalité. Dans un contexte de changements

climatiques, l'impact de l'augmentation des redoux hivernaux, par exemple, ne peut être considéré si on ignore quantitativement l'influence de ceux-ci sur l'évolution côtière. L'absence de quantification de l'influence des paramètres climatiques sur l'évolution des systèmes côtiers est une lacune importante, d'autant plus que le climat connaîtra des transformations importantes au cours des années à venir.

C'est principalement en raison de problèmes d'ordre méthodologique que la corrélation entre les paramètres climatiques et l'érosion demeure incomplète (Lawler, 2005a). À l'heure actuelle, il existe peu de méthodes pour assurer un suivi avec une résolution temporelle suffisamment élevée pour permettre de quantifier l'importance des paramètres climatiques sur l'évolution des côtes. Dans les meilleurs cas des études consultées, la résolution temporelle pour la mesure des taux de recul est mensuelle et, à l'occasion, hebdomadaire (Bernatchez et Dubois, 2008; Manson, 2002), ce qui implique un pas de temps encore trop grand pour mettre en corrélation l'érosion et les paramètres climatiques. Inversement, les séries temporelles des paramètres climatiques agissant sur l'évolution côtière offrent une résolution temporelle dont le pas de temps est généralement horaire. Un suivi au minimum quotidien de l'érosion est indispensable à l'identification exacte des moments de recul des falaises et des processus géomorphologiques qui en sont responsables. Une résolution temporelle fine est donc nécessaire à la quantification de l'intensité du recul, de la fréquence des processus géomorphologiques qui activent l'érosion et à la corrélation entre le rythme de recul et les paramètres climatiques (Lawler, 2005a). Les méthodes traditionnelles (relevés manuels de tiges d'érosion, de bornes ou de profil de plage, de relevés LIDAR, par photogrammétrie, etc.) ne permettent pas de réaliser des relevés quotidiens en raison des coûts en argent et en temps démesurés que cela impliquerait. À notre connaissance, une des seules méthodes pouvant offrir la résolution nécessaire à ce type de suivi sont les tiges de mesure d'érosion basées sur le principe du *thermal consonance timing* et/ou sur les signaux lumineux développées pour le milieu fluvial (Lawler, 2005b). Il est donc nécessaire de

développer et de mettre de l'avant les nouvelles technologies permettant de combler cette lacune temporelle et l'amélioration constante des technologies viendra grandement supporter cette démarche.

Actuellement, très peu d'études au Québec ont permis de quantifier les processus responsables de l'évolution des systèmes côtiers et l'influence des paramètres climatiques sur l'érosion côtière (Bernatchez et Dubois, 2008; Bernatchez *et al.*, 2008; Daigneault, 2001; Dionne, 2001a; Dubois *et al.*, 2005). Le suivi de l'érosion côtière et la compréhension de sa dynamique sont essentiels aux scientifiques côtiers, aux ingénieurs et aux aménagistes. Ces connaissances servent notamment à la conception d'infrastructures côtières, et au développement de politiques et de lois relatives à l'aménagement du territoire et des zones à risques (Bernatchez *et al.* 2008; Dubois *et al.*, 2005). Ainsi, dans un climat en pleine transformation, l'amélioration de la qualité des indices de sensibilité des littoraux grâce à la quantification de l'influence des différents paramètres climatiques sur l'évolution côtière est essentielle à la mise en place de plans de gestion efficaces des territoires côtiers.

1.2. Objectifs

L'objectif général de ce projet vise à quantifier l'influence des paramètres climatiques (précipitations, température de l'air, rayonnement solaire, vent) sur les modes et les vitesses de recul des falaises deltaïques en milieu tempéré froid avec le cas du delta de Manicouagan-aux Outardes (Côte-Nord, Québec) et ce, en fonction de variables environnementales : conditions hydriques, lithostratigraphiques, glacielles et d'enneigement, caractéristiques de l'arrière-côte et orientation des falaises par rapport au rayonnement solaire.

Les objectifs spécifiques sont les suivants : i) reconnaître, sur une base journalière, les événements et les vitesses d'érosion des falaises à l'aide d'une nouvelle méthode de suivi en continu basée sur les principes de microclimatologie; ii) identifier les paramètres climatiques et leur part relative dans l'érosion des falaises; iii) identifier les processus et les modes de recul généré par les paramètres climatiques et iv) évaluer l'influence des variables environnementales sur l'évolution du littoral.

1.3. Originalité et portée scientifique du projet

L'originalité du projet repose, entre autres, sur le suivi de terrain qui, à l'aide du suivi des signatures thermiques de capteurs de température, permet une reconnaissance, à une résolution journalière et au mieux aux 30 minutes, des événements de recul des falaises. Cette résolution temporelle est largement plus importante que celles jusqu'ici utilisées (résolution mensuelle). À l'heure actuelle, seulement deux équipes ont mis de l'avant cette méthodologie (Bernatchez, Jolivet et Corriveau, soumis, 2010; Corriveau, 2005; Lawler, 2005b) et leurs contributions, bien qu'ils y présentent quelques résultats, s'avèrent principalement d'ordre méthodologique. Ce projet de recherche propose sans aucun doute le plus important suivi de terrain et d'acquisition de données de températures jamais produits dans le domaine de la géomorphologie côtière. Il s'agit plus exactement de la première étude à réellement quantifier à l'échelle quotidienne l'effet des paramètres climatiques et des événements météorologiques sur l'érosion des falaises en milieu tempéré froid.

La portée scientifique du projet rejoint la sphère méthodologique avec l'application d'une méthode de suivi et d'acquisition de données jusqu'ici, à toutes

fins pratiques, jamais expérimentée. Le projet rejoint également la sphère des connaissances fondamentales relatives à l'érosion côtière et ce, par l'apport de nouvelles données concernant le rôle des paramètres climatiques sur l'activation des processus de météorisation par opposition à la perception dominante sur l'action des agents hydrodynamiques. Ces connaissances permettront de mieux cerner l'influence relative des agents d'érosion. Ce projet permettra aussi d'alimenter les connaissances sur les processus de météorisation grâce à l'acquisition de données *in situ* qui sont peu nombreuses à alimenter ce champ d'étude trop souvent confiné aux recherches en laboratoire. Les résultats du projet apporteront des connaissances sur la dynamique côtière des falaises de dépôts meubles en milieu tempéré froid, permettant d'ajuster les plans de gestion de ces environnements sensibles aux changements climatiques et de réfléchir aux méthodes d'adaptation les plus justes en fonction de la dynamique de ces milieux. Enfin, les résultats de ce projet contribueront également à l'intégration de nouvelles composantes aux indices planétaires de sensibilité des côtes aux changements environnementaux.

1.4. Présentation du mémoire

Le chapitre 2 expose en détails la démarche méthodologique et le chapitre 3 présente la zone d'étude du projet. Le chapitre 4 présente les résultats obtenus sous forme de bilan mensuel alors que figure, au chapitre 5, l'interprétation de ces résultats de même qu'une discussion les positionnant dans la littérature scientifique. Le document se termine sur une conclusion rappelant l'essentiel des résultats et proposant différentes perspectives pour l'amélioration des connaissances.

CHAPITRE II

CADRE EXPÉRIMENTAL

Le projet repose principalement sur l'acquisition de données acquises *in situ* et sur le suivi en continu de l'évolution du site d'étude pour les périodes de septembre à avril des années 2005-2006 et 2006-2007. La saison d'acquisition 2005-2006 se déroule du 19 septembre au 13 avril et celle de 2006-2007, du 29 septembre au 15 avril. Les campagnes de terrain répétées et l'instrumentation (station météorologique et capteurs de températures) sont mis de l'avant pour obtenir les données nécessaires à l'atteinte des objectifs du projet. Une fois ces données obtenues, le traitement et l'analyse des données permettront de dater et d'identifier les événements de recul des falaises et de déterminer l'influence des paramètres climatiques sur les modes et les vitesses de ces reculs enregistrés dans les falaises deltaïques de Ragueneau et ce, en fonction des différentes variables environnementales. Dans les sous-sections suivantes, nous verrons d'abord les instruments et les méthodes de collecte des données puis, seront présentés le déroulement des campagnes de terrain de même que le traitement des données.

2.1. Instrumentation pour l'acquisition des données climatiques

2.1.1. Station météorologique maritime

La station météorologique maritime est localisée à Pointe-Lebel. La station est munie de différents instruments de mesures de marque *Campbell Scientific* décrit au tableau 2.1.

Compte tenu des ajustements de programmes réalisés en cours de route et des hiatus dans les bases de données qui ont été constatés *a posteriori*, nous utiliserons pour la réalisation des bilans climatiques mensuels les données de la station météorologique d'Environnement Canada de Baie-Comeau localisée à l'aéroport de Pointe-Lebel (49°7'N - 68°12'O). Une distance d'environ 2 km à vol d'oiseau sépare les deux stations météorologiques. Par contre, les données de rayonnement global proviennent de notre station météorologique maritime puisque cette information n'est pas disponible par Environnement Canada. Le suivi du climat est complété par la consultation des suivis provinciaux mensuels publiés en ligne par le Centre de ressources en impacts et adaptation aux changements climatiques (CRIACC, 2005-2009).

Tableau 2.1.

Instruments, marques et modèles, unités et fréquences d'acquisition de la station météorologique maritime de Pointe-Lebel

Instrument	Marque et modèle	Mesure et unité	Fréquence d'acquisition des données	Notes
Anémomètre marin	RM Young modèle 05106-10	Vitesse du vent (m/sec) et direction du vent (°)	Au cinq secondes avec lecture aux minutes	L'anémomètre est localisé à 3,50 mètres au-dessus du sol à Pointe-Lebel
Pyranomètre	Li-cor modèle LIS200S	Rayonnement solaire global (W/m ²)	Au cinq secondes avec lecture aux minutes	
Sonde de température et d'humidité	Vaisala modèle HMP45C212	Température de l'air (°C) et humidité relative (%)	5 minutes	La sonde est localisée à 2 mètres au-dessus du sol à Pointe-Lebel
Pluviomètre à augets basculeurs	Campbell Scientific modèle TB4_L	Précipitations (mm)	15 minutes	
Baromètre	RM Young modèle 61205V	Pression atmosphérique (kPa)	15 minutes	
Sonde ultra sonique	Campbell Scientific modèle SR50-45	Couvert de neige (cm)	60 minutes	

2.1.2. Complément à la station météorologique : la mesure des températures de l'air à Ragueneau

Compte tenu de la distance entre la station météorologique et le secteur d'étude à Ragueneau (près de 2 km à vol d'oiseau), nous avons choisi de prendre les mesures de température de l'air directement sur le site d'étude. La mesure de température de l'air est réalisée à l'aide d'un *iButton* installé dans une coupole anti-rayonnement au sommet du talus de la station 1 (figure 2.1). La prise de données est réalisée à 81 cm au-dessus du sol¹ à une fréquence de 30 minutes. L'acquisition des données de températures de l'air est réalisée de manière synchrone avec celle des capteurs de température *iButtons* des tiges insérées dans les falaises. Ces données de température de l'air sont celles utilisées dans les signatures thermiques des évènements de recul des falaises.



Figure 2.1. Capteur de température *iButton* et abris anti-rayonnement implantés à la station 1 à Ragueneau.

¹ Le capteur est demeuré au-dessus du couvert nival durant l'hiver. Seules les précipitations survenues le 17 mars 2007 ont enfoui momentanément le capteur. Les données de températures de l'air utilisées dans les graphiques de signatures thermiques des reculs des falaises ont été remplacées par celles de la station météorologique d'Environnement Canada pour toute la deuxième moitié du mois de mars 2007.

2.1.3. Mesure des régimes thermiques des falaises et suivi de l'érosion côtière

Les tiges multi-capteurs autonomes insérées dans les falaises sont composées de tuyaux de PVC dans lesquels sont montés en réseau douze capteurs de température. Il s'agit de capteurs de type *temperature logger iButtons DS1922L-F5* (figure 2.2). Ces capteurs, fabriqués par la compagnie DALLAS *semiconductor*, ont une capacité de lecture de température se situant entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ils sont également autonomes et programmables. Ils ont une résolution de $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ (16-Bit) ou de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (8-Bit). Pour ce projet, nous avons jugé qu'une résolution de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ était suffisante tout en permettant de conserver un niveau d'autonomie optimale. Dix centimètres séparent le centre de chacun des *iButtons*, ce qui permet de couvrir un profil de 110 cm. Ceux-ci, installés dans une gaine de mousse isolante pour limiter la circulation de l'air, sont glissés dans un tuyau de PVC d'environ 2 m de longueur, soit un peu plus long que le réseau afin de permettre un certain balan à la tige (figure 2.2). La fréquence de prise de données est de 30 minutes. Chaque tige est composée de 12 *iButtons*, numéroté de 1 à 12 de la surface vers l'intérieur de la falaise. Dans le texte, ils sont identifiés par les lettres iB suivi du numéro correspondant à leur position.

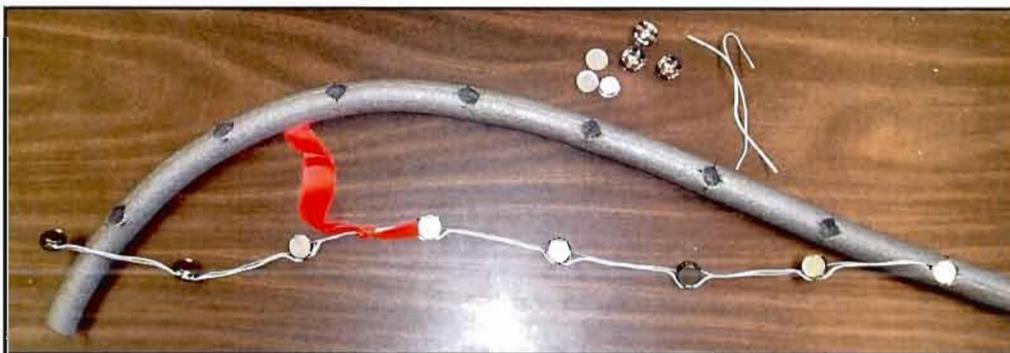


Figure 2.2. *iButtons* montés en réseau et installés dans une gaine de mousse isolante.

2.2. Campagnes de terrain : instrumentation et récolte de données

Les campagnes de terrain ont eu lieu à plusieurs reprises. La mise en place de l'instrumentation, mise à part la station météorologique qui est présente en permanence depuis 2005, a été effectuée à la fin du mois de septembre pour les deux années d'étude. Lors de ces campagnes de terrain, les falaises des sites d'acquisition de données ont été instrumentées. Au total, 4 tiges, réparties sur 3 stations de mesures, ont été insérées dans les falaises du site d'étude. Pour ce faire, des trous d'environ 2 m de profondeur ont été fait dans les falaises à l'aide d'une tarière afin d'y insérer les tiges multi-capteurs autonomes. Pour chacun de ces sites, nous avons mesuré la pente et l'orientation des falaises et nous y avons relevé l'absence ou la présence d'écoulement d'eau en surface. Nous avons également identifié la nature des unités stratigraphiques instrumentées et les caractéristiques de l'arrière-côte.

Les autres visites de terrain ont lieu tous les mois pour assurer le suivi des sites instrumentés et du segment de côte à l'étude. Ces visites sont nécessaires à la récolte des données enregistrées par les *iButtons* et par la station météorologique (figure 2.3). Le recul de la falaise vis-à-vis les tiges multi-capteurs de températures autonomes (*iButtons*) est aussi mesuré. Les processus, les modes de recul et les modifications des variables environnementales sont également notés durant ces visites. Notons qu'au fil des saisons, de nouvelles variables environnementales s'ajouteront à l'observation soit, les conditions de glace et d'enneigement. Au terme de la période d'étude, c'est-à-dire en avril, les tiges sont retirées. Ces visites fréquentes sur le terrain sont essentielles à l'acquisition des connaissances permettant d'identifier les processus en cause dans l'évolution des falaises observée à la suite de l'analyse des signatures thermiques des *iButtons*.

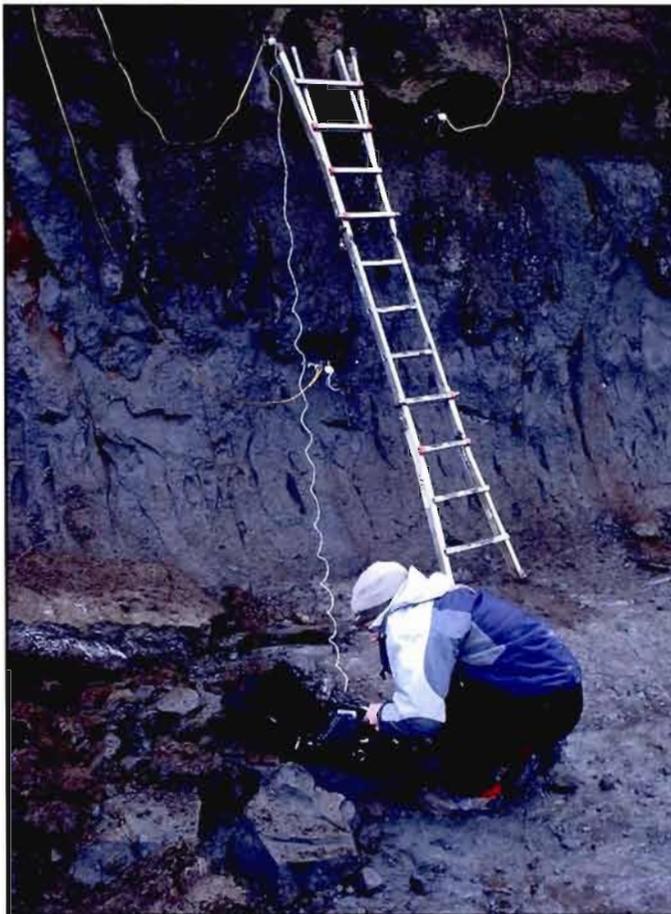


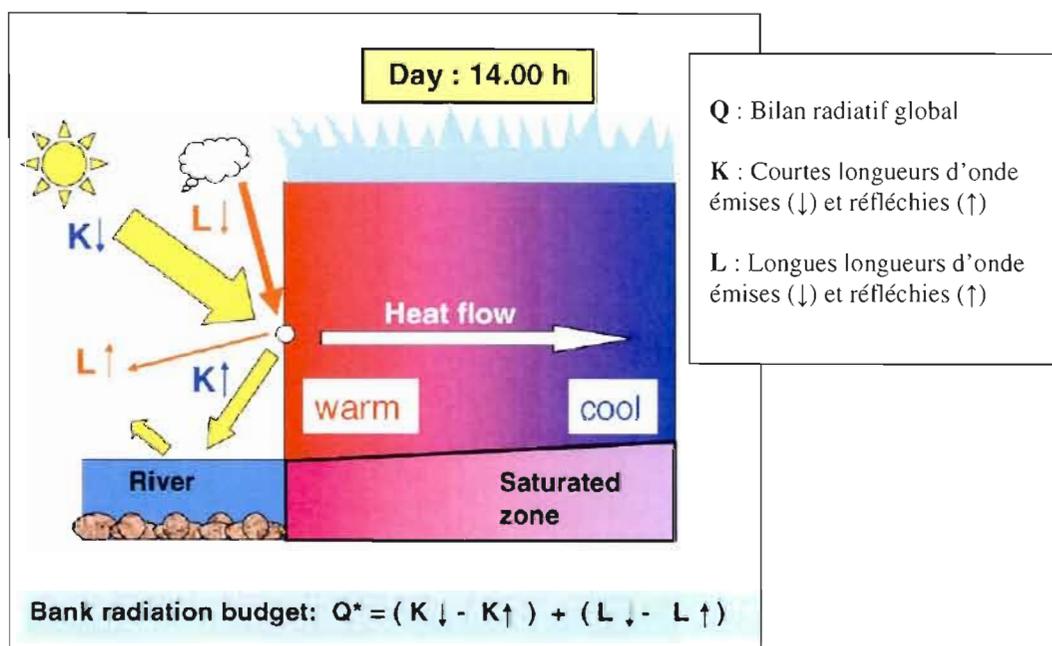
Photo : Pascal Bernatchez, 2005

Figure 2.3. Acquisition des données à la station 1 (Ragueneau) lors du relevé de novembre 2005.

2.3. Traitement et analyse des données

Le suivi de l'évolution des falaises repose sur l'acquisition de mesures de température dans les falaises qui permettent d'identifier les événements de recul selon des principes de bases de microclimatologie (figure 2.4). Les radiations solaires qui atteignent la surface des matériaux sont transformées en énergie thermique. De cette façon, les matériaux exposés durant le jour aux radiations solaires gagnent en énergie et leur température s'élève au-dessus de la température de l'air (Oke, 1987). La

période nocturne quant à elle se caractérise par la chute de la température de surface des matériaux qui réémettent alors l'énergie sous forme de longues longueurs d'ondes (thermiques) et retrouvent une température comparable à celle de l'air. Les différences thermiques observées à l'intérieur et à l'extérieur de la falaise ou, autrement dit, entre la température de l'air, la température des sédiments et la températures du *iButton* de référence, permettent d'identifier, grâce à l'analyse et à l'interprétation des modifications du comportement thermique des séries temporelles de températures de chacun des capteurs de température, le moment auquel le recul de la falaise se produit². Une fois le jour du recul identifié, il est possible de reconnaître les paramètres climatiques en lien avec les évènements de recul des falaises.



Source : Lawler, 2005b

Figure 2.4. Illustration des principes de microclimatologie sur la période diurne

² À quelques occasions, il est possible de connaître l'heure à laquelle se produit le recul de la falaise. Le cas échéant celle-ci sera précisée. Autrement, seule la date (jour) du recul est indiquée.

2.3.1. Identification d'un évènement de recul de la falaise impliquant la sortie d'un *iButton*

Nous présentons ici un exemple illustrant un évènement de recul de la falaise dans le but d'illustrer la méthode d'analyse des séries temporelles de température des *iButtons*. La figure 2.5 présente les données de températures enregistrées sur les 12 *iButtons* ainsi que les données de température de l'air pour la période du 3 au 10 décembre 2006. On observe, avant le recul du 7 décembre 2006, que les *iB1* à *iB5* sont à l'extérieur de la falaise (figure 2.5). En effet, les températures de tous ces *iButtons* subissent les mêmes fluctuations et amplitudes thermiques que le *iButton* de référence, le *iB1*. Le *iB6* est localisé à l'intérieur de la falaise mais très près de la surface et enregistre tout de même, dans une moindre mesure, les variations des conditions thermiques extérieures. En effet, ce dernier subit une augmentation de température diurne similaire à celles des *iButtons* localisés à l'extérieur de la falaise en raison du réchauffement de la partie superficielle de la falaise. Cependant, l'énergie emmagasinée dans le silt réduit la chute de température nocturne d'environ 2 °C si bien que sa valeur de température est plus élevée que celles des *iButtons* 1 à 5. Les températures enregistrées par les *iButtons* à l'extérieur de la falaise suivent généralement l'évolution des températures de l'air. Cependant, le rayonnement solaire fait régulièrement grimper la température de ces *iButtons* au-dessus de la température de l'air en chauffant le PVC de la tige. Les températures observées le 5 et le 8 décembre font figure d'exemple. Le *iB7* est, avant le recul, localisé dans la falaise à un peu plus de 10 cm sous la surface. Ici, les fluctuations quotidiennes de la température se font encore ressentir mais selon une amplitude largement inférieure que celle observée pour les *iButtons* à l'extérieur de la falaise (*iB1* à *iB5*). La température des autres *iButtons* (*iB8* à *iB12*) ne montre que très peu de variations, ce qui traduit sans contredit leur position interne. À la suite d'un brusque recul de la falaise, le 7 décembre 2006, l'ensemble des *iButtons* se retrouve à l'extérieur. Plus

exactement, les *iButtons* 6 à 12 (N=7) passent, sous l'effet de l'érosion, à l'extérieur de la falaise entre 19 h 00 et 20 h 00. L'ensemble des signatures thermiques des évènements de recul identifiés au cours de l'étude se trouve à l'appendice A.

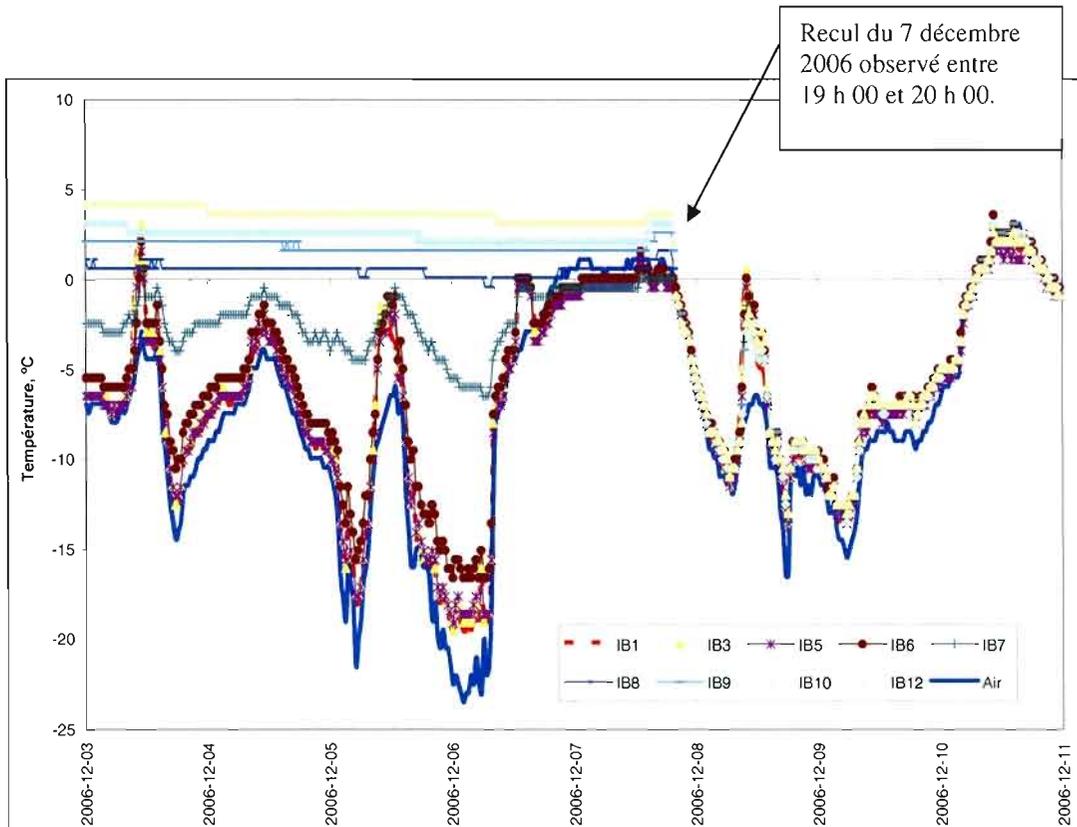


Figure 2.5. Principe de la méthode d'analyse des événements de recul à l'aide du régime thermique : exemple de l'évènement de recul du 7 décembre 2006.

Les résultats obtenus (identification des évènements de recul et des conditions climatiques associées) sont présentés de manière chronologique sous forme de bilan mensuelle au chapitre 4. Pour chacun des mois, une figure synthèse permet d'obtenir une vue d'ensemble sur la période. Nous présentons ici un exemple de figure synthèse mensuelle (figure 2.6).

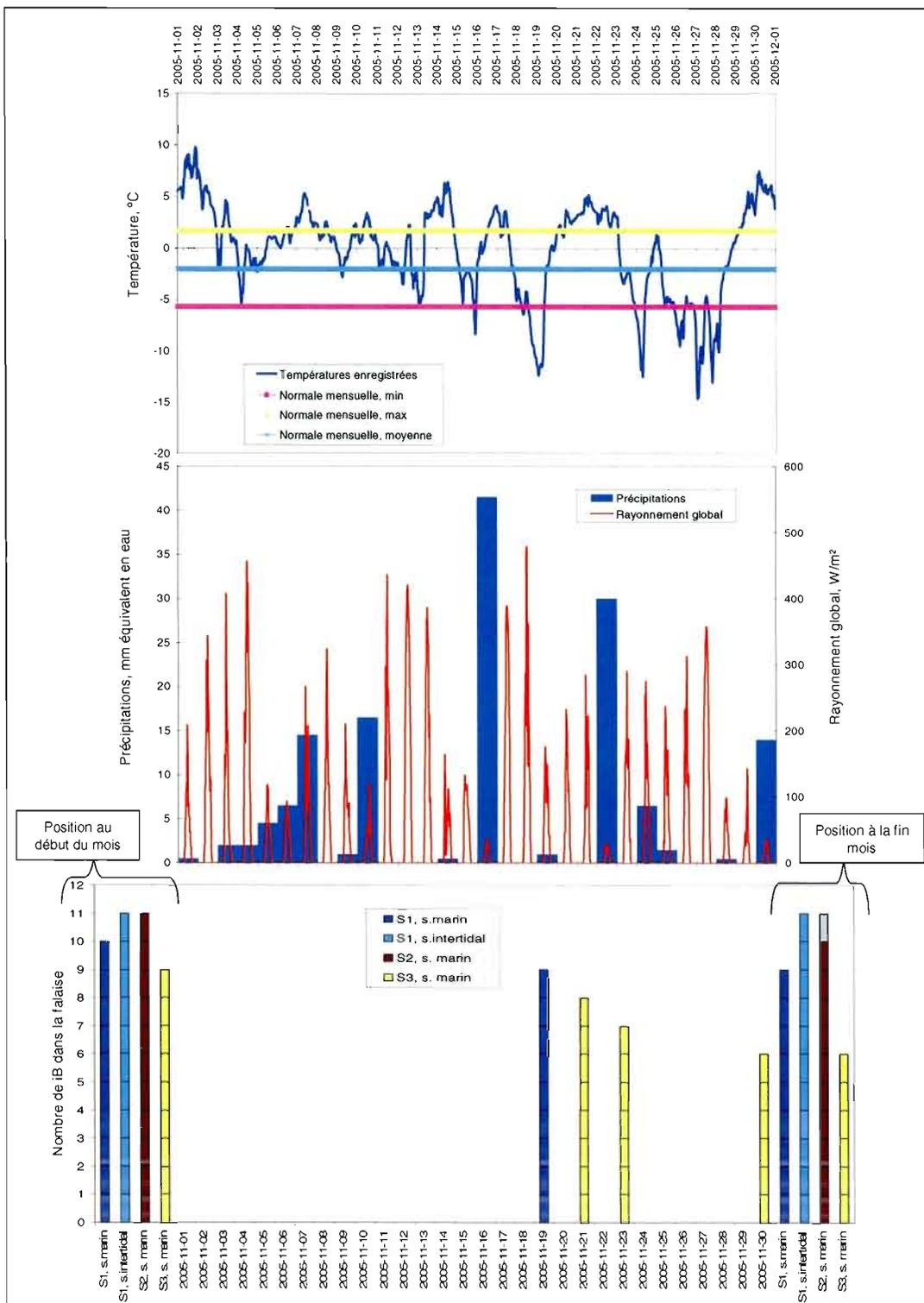


Figure 2.6. Exemple d'une figure synthèse mensuelle : novembre 2005.

Le graphique du haut présente l'évolution des données de température enregistrées durant le mois de même que la normale mensuelle des températures quotidiennes moyenne, minimum et maximum (Environnement Canada, 2005-2009). Le graphique du centre présente, en bleu, les quantités de précipitations enregistrées chaque jour (Environnement Canada, 2005-2009) et l'évolution des valeurs moyennes sur 30 minutes du rayonnement global (données de la station météorologique maritime de Pointe-Lebel). Le graphique du bas présente l'évolution mensuelle des tiges multicateurs autonomes. Les bâtons indiquent le nombre de *iButtons* dans la falaise. Chaque fois, les quatre premiers bâtons indiquent l'état initial des tiges avant le 1^{er} de chaque mois. Ainsi, à la figure 2.6, on observe qu'au début du mois, 10 *iButtons* sont dans l'unité de silt marin de la station 1 (donc iB3 à iB12 dans la falaise et iB1 et iB2 à l'extérieur de la falaise), 11 *iButtons* sont dans l'unité de silt intertidal de la station 1 (donc iB2 à iB12 dans la falaise et iB1 à l'extérieur de la falaise), 11 *iButtons* sont dans l'unité de silt marin de la station 2 (donc iB2 à iB12 dans la falaise et iB1 à l'extérieur de la falaise) et 9 *iButtons* sont dans l'unité de silt marin de la station 3 (donc iB4 à iB12 dans la falaise et iB1, iB2 et iB3 à l'extérieur de la falaise). Le même principe est répété à la fin du mois où les quatre derniers bâtons indiquent l'état des tiges au terme des reculs de la falaise survenus durant le mois. Lorsque le moment exact du recul d'un *iButton* ne peut être identifié, il apparaît en gris. Par exemple, grâce aux visites de terrain on sait que le iB2 de la station 2 (silt marin) est passé à l'extérieur de la falaise au cours du mois de novembre mais il est impossible d'identifier sa date de sortie. Ce dernier apparaît donc en gris sur les bâtons du bilan mensuel. Les autres bâtons indiquent les événements de recul de la falaise qui sont survenus au cours du mois. Par exemple, à la figure 2.6, on constate qu'un recul impliquant la sortie du iB3 de l'unité de silt marin de la station 1 s'est produit le 19 novembre 2005. On observe également des reculs impliquant la sortie des iB4 et iB5 de l'unité de silt marin de la station 3 les 21 et 23 novembre 2005. À l'occasion, des événements qui ont lieu durant le mois sont représentés par des flèches. Ainsi, les perturbations impliquant toute la tige sont

représentées par une flèche pointant vers le bas et les réimplantations de tiges, par une flèche pointant vers le haut. La légende de couleur identifiant la station et l'unité sédimentaire des bâtons est également applicable aux flèches. La superposition de ces trois graphiques permet d'obtenir une vue d'ensemble sur le mois et sur les conditions climatiques qui prévalent lors des reculs.

2.4. Limites techniques

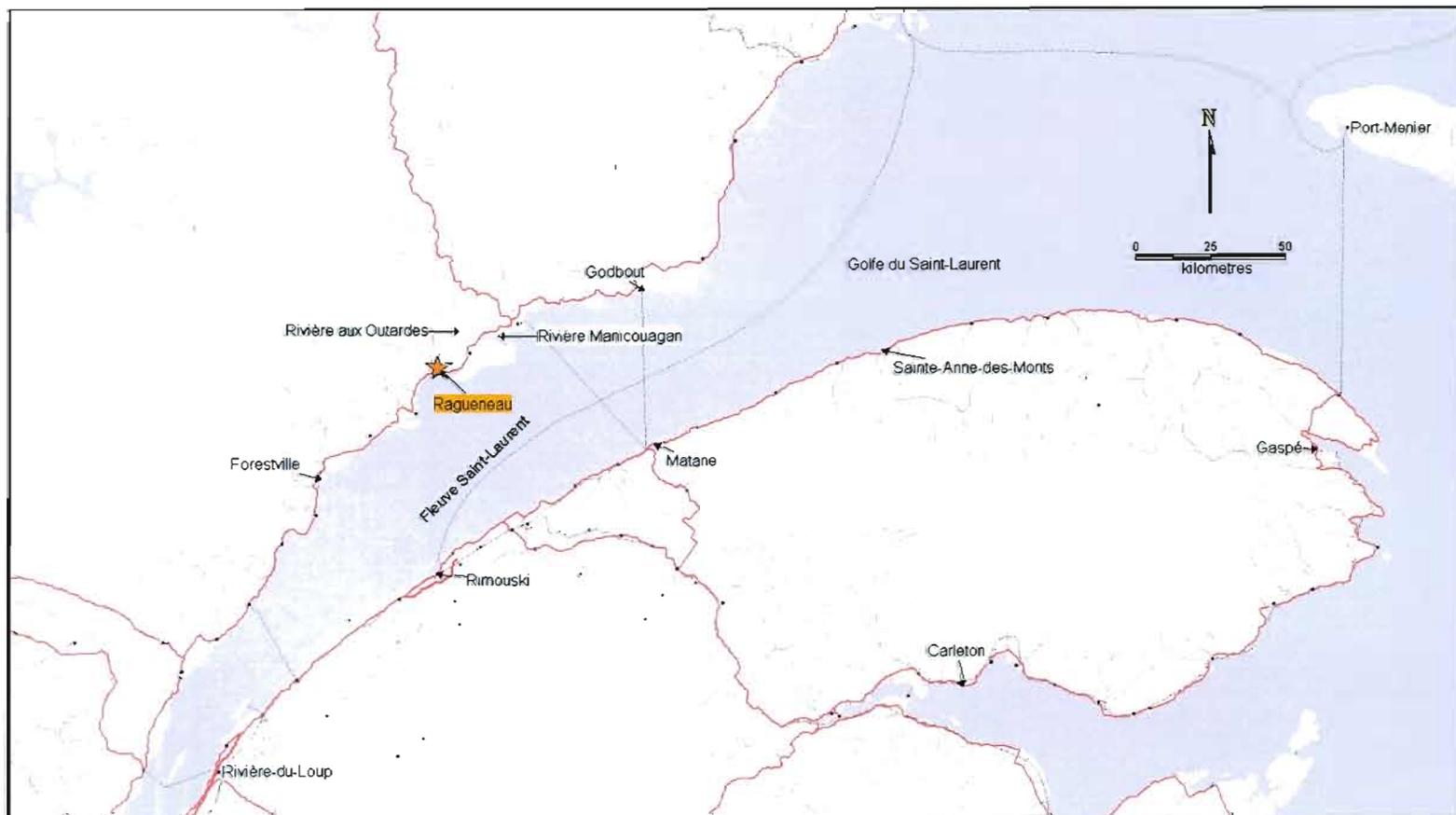
Dans le cadre de la méthodologie décrite ci-haut, on reconnaît certaines limites. D'abord, lorsque nous analyserons le recul des falaises, nous serons limités à une résolution de 10 cm en raison de l'espace qui sépare les *iButtons*. Ainsi, un recul de 2 cm par exemple, s'il n'implique pas la sortie d'un *iButton*, ne peut être identifié. Il s'agit de la seule limite anticipée puisqu'il s'agit d'une nouvelle méthode. Conséquemment, les limites techniques ont été observées au cours des campagnes de terrain et lors de l'analyse des données. Ces limites figurent donc au chapitre 4, à titre de résultats.

CHAPITRE III

SITE D'ÉTUDE

3.1. Localisation du site d'étude

Le site d'étude est localisé à Ragueneau, dans la région physiographique de l'important complexe deltaïque de Manicouagan-aux Outardes (Côte-Nord, Québec, Canada) (figures 3.1 et 3.2). Le site d'étude est situé immédiatement à l'ouest de l'estuaire de la rivière aux Outardes. Il s'agit d'un secteur littoral d'un peu plus d'un kilomètre de longueur (1 167 m) composé de falaises de dépôts meubles dont la hauteur varie entre 3,2 et 5,2 m (Bernatchez et Dubois, 2008). Sur le site d'étude, on compte 4 points instrumentés et répartis sur 3 stations de mesures (figure 3.3). Des tiges sont implantées dans l'unité de silt intertidal et l'unité de silt marin à la station 1 et dans les unités de silt marin aux stations 2 et 3.



Source : Ministère des ressources naturelles Canada

Figure 3.1. Localisation du site d'étude à Ragueneau sur la Côte-Nord.

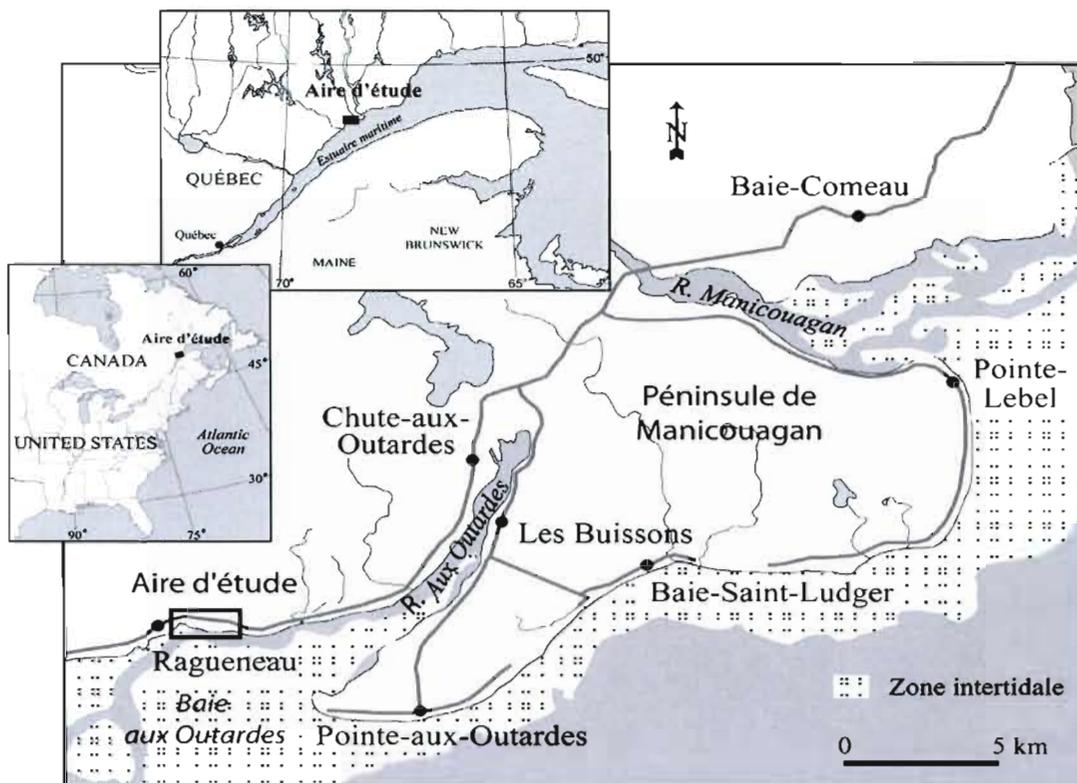
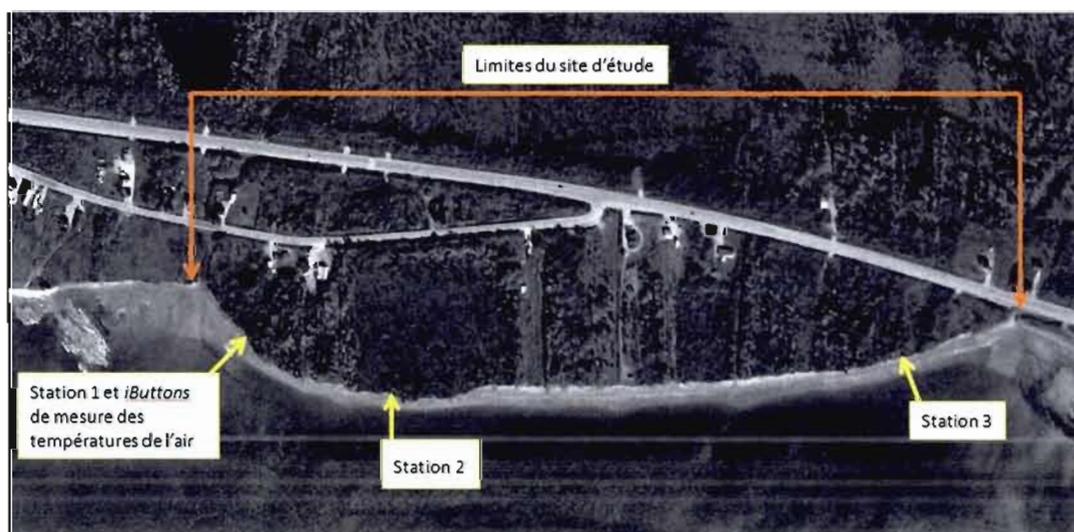


Figure 3.2. Localisation du site d'étude sur le complexe deltaïque Manicouagan-aux Outardes.



Source : Orthophotographie, 2001, Ministère des ressources naturelles et faune du Québec

Figure 3.3. Localisation des stations de mesures.

3.2. Caractéristiques des falaises

Les falaises du secteur à l'étude ont été sélectionnées en fonction de leur diversité de faciès, sédimentaires, lesquels reflètent les principaux événements de variations du niveau marin relatif qui caractérisent les formations meubles des rives du Saint-Laurent (Dionne, 2001b).

À la station 1, des mesures sont effectuées dans une unité de silt marin situé à la base de la falaise (figure 3.4). Il s'agit d'un dépôt de silt marin mis en place dans la Mer de Goldthwait entre 10,2 ka et 8,7 ka avant aujourd'hui (Bernatchez, 2003). Ce dernier est composé à 82 % de silt, 9 % de sable et 9 % d'argile et est aussi très riche en organismes marins fossilisés (Bernatchez, 2003). À la station 1, l'unité de silt intertidal est également instrumentée (figure 3.4). Cette unité, située au-dessus d'une unité de sable intertidal, correspond à un schorre inférieur de marais mis en place entre 2,6 ka à 1,2 ka avant aujourd'hui (Bernatchez, 2003). L'unité est composée à 77 % de silt, 19-20 % d'argile et de 3-4 % de sable fin (Bernatchez, 2003). Elle est aussi très riche en matière organique. L'espèce principalement représentée est *Spartina alterniflora* (Bernatchez, 2003). Aux stations 2 et 3, on observe également cette séquence stratigraphique. Cependant, pour ces stations, seule l'unité de silt marin est instrumentée.

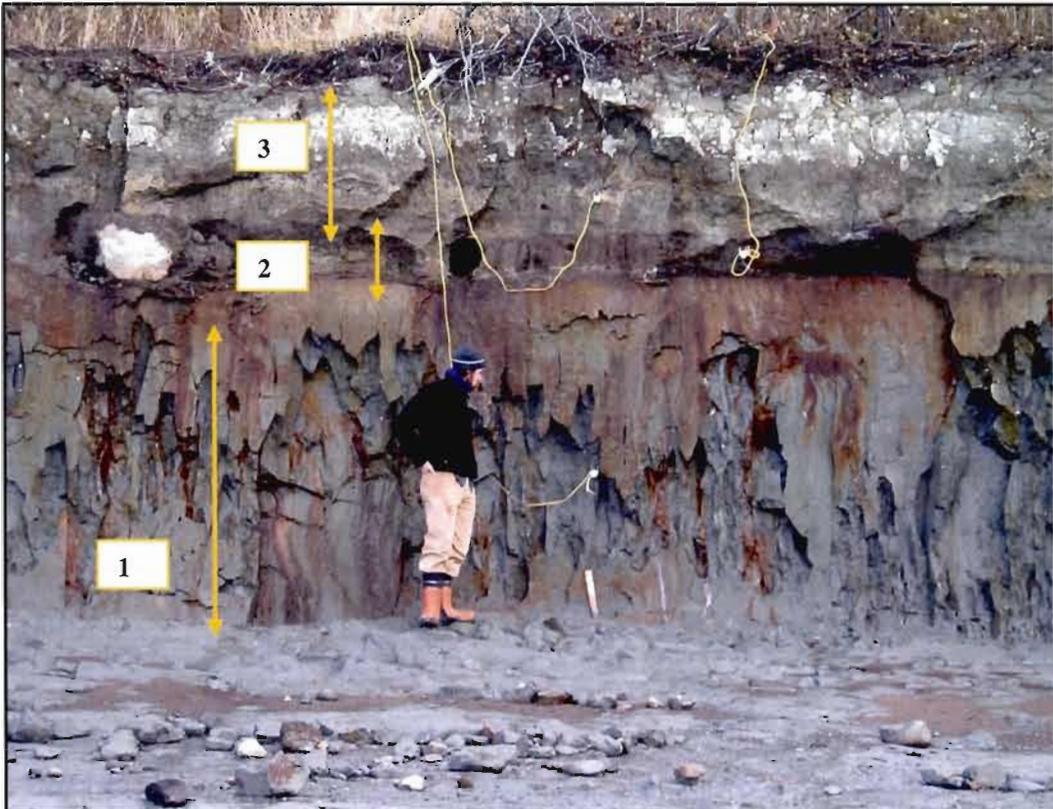


Photo : Antoine Morissette, 2005

Figure 3.4. Stratigraphie à la station 1 : 1) silt marin; 2) sable intertidal; 3) silt intertidal.

À la station 1, la falaise est orientée vers l'ouest à 255° et la pente initiale³ est subverticale avec 76° . Sur ce segment de côte, les processus observés dans le silt marin lors des visites de terrain sont principalement des décollements de dalles de silt d'une épaisseur de 10 à 15 cm délimitées par un réseau de fissures de dessiccation et de décompression exploitées notamment par les processus cryogéniques. On y observe également des glissements en plan et des effondrements de dalles. De plus, compte tenu de la proximité du socle rocheux, la falaise est ici fragilisée par de

³ La pente pouvant évoluer avec le recul de la falaise, la pente initiale est celle mesurée au moment de l'insertion des capteurs de température, c'est-à-dire en septembre 2005.

multiples plans de faiblesse liés à la remontée isostatique post-glaciaire. Un boisé occupe l'arrière-côte et l'écoulement d'eau à la surface de la falaise est pratiquement inexistant.

À la station 2, la falaise fait face au sud-ouest à 210° avec une pente initiale de 48° (figure 3.5). À cet endroit, il y a une résurgence d'eau et le ruissellement en surface apparaît plutôt constant. Cette caractéristique est attribuable à la présence d'une tourbière sur l'arrière-côte. La tige est insérée dans l'unité de silt marin.



Figure 3.5. Station 2 en septembre 2006

À la station 3, la falaise est orientée franc sud (180°), la pente initiale est de 60° , un boisé occupe l'arrière-côte et l'écoulement d'eau à la surface de la falaise est rare (figure 3.6). Ici, nous avons constaté, au moment de l'insertion de la tige, une plus grande production de fragments par dessiccation. La déstructuration du silt marin

par ce processus est lui-même responsable d'une part du recul de la falaise durant la saison estivale. La tige est insérée dans l'unité de silt marin.



Figure 3.6. Station 3 en septembre 2005.

Toutes les stations de mesures sont orientées vers le sud-ouest, ce qui assure un apport en énergie des radiations solaires directes. Compte tenu qu'il s'agit d'un des premiers projets réalisés à l'aide de cette méthode, l'orientation des falaises vers le sud-ouest permet d'obtenir de plus grands écarts entre les températures de l'air et des différents matériaux (Hall, 2004; Lewkowicz, 2001), ce qui facilite l'identification des reculs de la falaise.

3.3. Taux d'érosion récents

Le secteur de Ragueneau fait l'objet d'un suivi de terrain réalisé à l'aide de stations de mesure (bornes) depuis 1998 (Bernatchez et Dubois, 2008). Ainsi, pour 1998-1999, on enregistre un taux de recul moyen annuel de 1,7 m. Par la suite, le taux de recul moyen a été de 1 m en 1999-2000 et de 1,3 m pour l'année 2000-2001. Puis, le taux remonte à 1,7 m pour les années 2001-2002 et 2002-2003. Pour l'ensemble de la période 1998-2003, le taux de recul annuel moyen est de 1,5 m, ce qui est comparable au taux annuel moyen de 1,3 m obtenu par photo-interprétation pour la période de 1931 à 1996 (Bernatchez et Dubois, 2008).

3.4. Conditions marégraphiques et climatiques

Dans la zone d'étude, les marées sont de type semi-diurne mixte (Service hydrographique du Canada, 2005-2009). Le marnage des marées moyennes est de 3 m et celui des grandes marées est de 4,3 m. Les niveaux d'eau extrêmes mesurés sont de -0,9 m et de 4,9 m.

D'après la classification de Köppen, le climat du site d'étude est tempéré humide avec des hivers modérément sévères (Bernatchez et Dubois, 2008). Le maximum quotidien moyen est enregistré au mois de juillet avec 21 °C et le minimum quotidien, au mois de janvier avec -19,6 °C (Environnement Canada, 2005-2009). Les précipitations sont réparties tout au long de l'année mais sont plus faibles durant les mois de février et de mars, et plus abondantes durant les mois de septembre et d'octobre (tableau 3.1). Les vents dominants lors de la saison inter-glaciale soufflent du SO, de l'est et de l'ouest alors que les vents de tempêtes hivernales proviennent de l'ENE (Bernatchez et Dubois, 2008). La période glaciale, qui couvre une période de

4 mois, s'amorce avec la formation du pied de glace dans la deuxième partie du mois de décembre et se termine avec le démantèlement du pied de glace lors de la hausse de température au-dessus du point de congélation à la fin du mois de mars et au début du mois d'avril (Bernatchez et Dubois, 2008). Bref, le type de climat du site d'étude se traduit par une grande variabilité de conditions climatiques, ce qui implique une grande variété de processus générant l'érosion.

Tableau 3.1.
Normales climatiques à la station météorologique de Baie-Comeau

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	Moyenne annuelle
Températures moyennes quotidiennes (°C)	-14,4	-12,7	-6,5	0,5	6,9	12,6	15,6	14,5	9,7	4,1	-2	-10,2	1,5
Précipitations (mm)	84,1	65,5	77,5	83,8	87,6	83,6	89,4	81,7	92,3	93,7	86	89,3	1014,4

Source : Environnement Canada, 2005-2009

3.4.1. Mise en contexte des anomalies mensuelles des saisons 2005-2006 et 2006-2007 et des projections climatiques

Les tableaux 3.2 à 3.4 nous permettent de situer sur le plan météorologique les périodes d'acquisition de données des saisons 2005-2006 et 2006-2007 par rapport aux normales climatiques. Ces anomalies sont présentées en fonction des situations prévues dans le contexte des changements climatiques pour la région à laquelle appartient le site d'étude (tableau 3.2). Les normales climatiques mensuelles et les

données des périodes d'acquisition proviennent de la station météorologique d'Environnement Canada de Baie-Comeau.

Tableau 3.2.

Normales climatiques et prévisions pour la sous-région centrale du Québec

Saison		Climat de la décennie 1980 (Normales)	Changement d'ici 2020	Changement d'ici 2050	Changement d'ici 2080
Hiver	Température	-11 à -21 °C	+1,5 à +3 °C	+3 à +5,5 °C	+4,5 à 9,5 °C
	Précipitations	130 à 325 mm	+1 à +18 %	+4 à +32 %	+6 à +47 %
Printemps	Température	3 à -7 °C	+0,5 à +2 °C	+1,5 à +4,5 °C	+2,5 à +8,5 °C
	Précipitations	125 à 300 mm	+1 à +19 %	+6 à +25 %	+8 à +45 %
Été	Température	10 à 17 °C	+1 à +2 °C	+2 à +3,5 °C	+2,5 à +5,5 °C
	Précipitations	230 à 310 mm	0 à +8 %	-2 à +13 %	0 à +13 %
Automne	Température	-1 à 6 °C	+1 à +2 °C	+1,5 à +4 °C	+2,5 à +5,5 °C
	Précipitations	215 à 300 mm	0 à +13 %	0 à +20 %	+2 à +26 %

Tiré de : Bourque et Simonet, 2008

Note : Hiver (décembre, janvier, février), printemps (mars, avril mai), été (juin, juillet, août) et automne (septembre, octobre, novembre)

3.4.1.1. Saison 2005-2006

Durant la saison 2005-2006, on remarque que tous les mois (septembre à avril) ont connu des températures moyennes quotidiennes plus élevées que la normale (tableau 3.3). Sur l'ensemble du Québec, l'automne 2005 est reconnu pour avoir été un des plus chauds des dernières décennies, et l'hiver et le printemps 2006, pour leurs températures chaudes (CRIACC, 2005-2009). À l'échelle du Québec, plusieurs

records de température ont été battus durant ces saisons (CRIACC, 2005-2009). Le mois de janvier 2006 et le printemps 2006 s'inscrivent même à l'intérieur des prévisions climatiques pour 2050.

Du côté des précipitations, alors que l'on prévoit une augmentations des quantités de précipitations reçues, les anomalies indiquent que d'importants écarts à la baisse ont marqué les mois de septembre 2005, mars 2006 et avril 2006. Quantitativement, cela signifie que Baie-Comeau n'aura reçu que 63 % des précipitations normales en septembre, et 58 % et 42 % des précipitations normales pour les mois de mars et d'avril. Inversement, le mois de novembre fut particulièrement humide, avec 143 mm reçus contre une normale de 86 mm. Par contre, les anomalies positives enregistrées au cours des mois de janvier et février 2006 concordent avec la tendance à la hausse prévue, particulièrement pour la saison froide, dans un contexte de changements climatiques. Selon ces données, retenons que la saison d'étude 2005-2006 s'est avérée plus chaude que la normale et que ces conditions thermiques correspondent aux tendances prévues dans un contexte de changements climatiques (tableau 3.3).

Tableau 3.3.

Normales et données de températures et de précipitations observées pour la période d'acquisition de données de 2005-2006 à la station météorologique de Baie-Comeau

Mois	Température moyenne quotidienne (°C)			Somme des précipitations (mm)		
	Normale	2005-2006	Différence entre la normale et la saison 2005-2006	Normale	2005-2006	Différence entre la normale et la saison 2005-2006
Septembre	9,7	12,1	+2,4	92,5	58,5	-34
Octobre	4,1	6,8	+2,7	93,7	85	-8,7
Novembre	-2,0	-0,7	+1,3	86	143	+57
Décembre	-10,2	-9,1	+1,1	89,3	77,5	-11,8
Janvier	-14,4	-9,2	+5,2	84,1	101,5	+17,4
Février	-12,7	-12,5 ^a	+0,2 ^a	65,5	95 ^b	+29,5 ^b
Mars	-6,5	-2,6	+3,9	77,5	45	-32,5
Avril	0,5	2,7	+2,2	83,8	35,5	-53,8

Source : Environnement Canada, 2005-2009

^a Les données de températures manquent du 22 au 28 février 2006

^b Les données de précipitations manquent pour le 2 février 2006

3.4.1.2. Saison 2006-2007

Durant la saison 2006-2007, les températures moyennes quotidiennes sont près ou supérieures aux normales climatiques (tableau 3.4). Pour l'ensemble du Québec, les températures de l'automne 2006 sont près ou légèrement au-dessus des normales, sauf pour le mois de novembre où les températures s'avèrent particulièrement clémentes, ce qui permet de battre certains records de température (CRIACC, 2005-2009). Avec une anomalie positive de 3,5 °C, les températures de novembre s'inscrivent dans les prévisions de 2050 (tableau 3.3). Les anomalies positives des mois de décembre 2006 et de janvier 2007 s'inscrivent aussi dans la tendance à la hausse des températures alors que février 2007 enregistre une anomalie légèrement négative. Le réchauffement des températures dans le contexte des

changements climatiques est particulièrement marqué pour le printemps et l'hiver si bien, qu'avec des anomalies près ou sous les normales, le printemps 2007 ne s'inscrit pas dans la tendance prévue.

Les précipitations totales enregistrées au cours de cette saison présentent un portrait contrasté avec d'importantes anomalies supérieures et inférieures aux normales climatiques. Ainsi, les mois d'automne 2006 (septembre, octobre et novembre) subissent des précipitations supérieures aux normales alors que les mois de décembre 2006, janvier et février 2007 ont plutôt été marqué par des anomalies négatives. Inversement, dans le contexte des changements, les prévisions climatiques indiquent plutôt des tendances à la hausse pour les précipitations hivernales.

Tableau 3.4.

Normales et données de températures et de précipitations observées pour la période d'acquisition de données de 2006-2007 à la station météorologique de Baie-Comeau

Mois	Température moyenne quotidienne (°C)			Sommes des précipitations (mm)		
	Normale	2006-2007	Différence entre la normale et la saison 2006-2007	Normale	2006-2007	Différence entre la normale et la saison 2006-2007
Septembre	9,7	9,9	+0,2	92,5	136	+43,5
Octobre	4,1	5,2	+1,1	93,7	200 ^a	+106,3
Novembre	-2,0	1,5	+3,5	86	126 ^b	+40
Décembre	-10,2	-7,2	+3,0	89,3	64,5	-24,8
Janvier	-14,4	-12,2	+2,2	84,1	55,5	-28,6
Février	-12,7	-13,0	-0,3	65,5	37,5 ^c	-28
Mars	-6,5	-7,4	-0,9	77,5	74	-3,5
Avril	0,5	0,8	+0,3	83,8	23,5	-60,3

Source : Environnement Canada, 2005-2009

^aLes données de précipitations manquent pour le 27 octobre 2006

^bLes données de précipitation manquent pour le 18 novembre 2006

^cLes données de précipitation manquent pour le 11 février 2007

Bien qu'aucune des saisons d'acquisition de données ne reflète complètement les prévisions anticipées dans le contexte des changements climatiques, cette mise en contexte des anomalies climatiques des saisons 2005-2006 et 2006-2007 permet d'affirmer que la saison 2005-2006 s'apparente davantage à la situation appréhendée dans un contexte de changements climatiques.

CHAPITRE IV

BILAN MENSUEL DES ÉVÈNEMENTS DE REcul DES FALAISES

Ce chapitre présente de manière mensuelle les reculs observés dans les falaises durant les deux saisons d'acquisition de données de même que les conditions climatiques qui prévalaient lors de ces évènements d'érosion. Les signatures thermiques à partir desquelles sont identifiés les reculs figurent à l'appendice A.

4.1. Saison 2005-2006

4.1.1. Octobre 2005

Dans l'ensemble, le mois d'octobre 2005 est caractérisé par des temps doux (figure 4.1.). En effet, les températures minimales quotidiennes passent sous le point de congélation seulement pendant 5 jours et l'anomalie mensuelle est positive avec $+2,7^{\circ}\text{C}$ par rapport à la normale pour la station de Baie-Comeau. Bien que les précipitations soient près des normales mensuelles à la station de Baie-Comeau (anomalie négative $-8,7$ mm), on observe que celles-ci sont concentrées sur quelques jours (figure 4.1.).

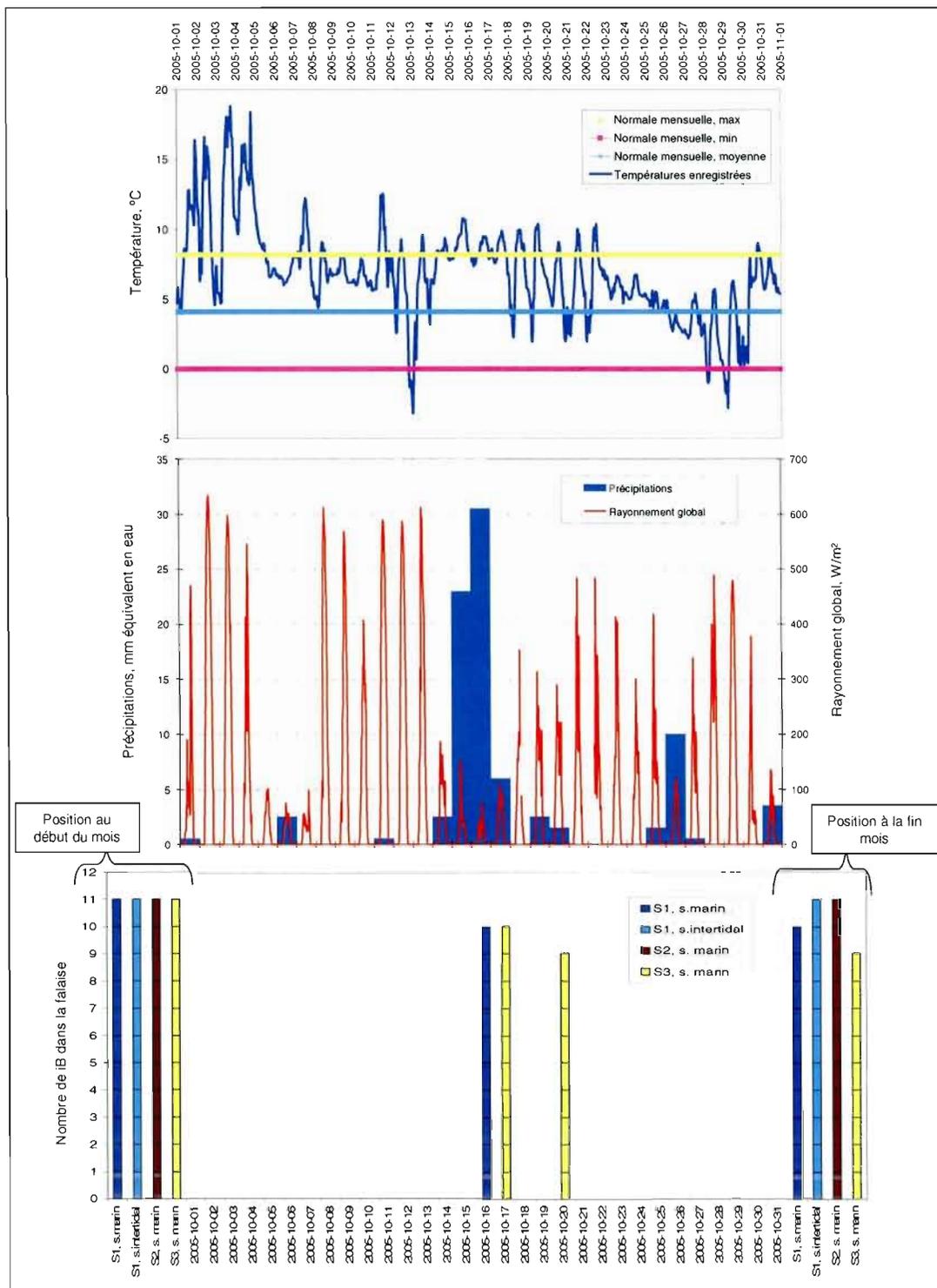


Figure 4.1. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois d'octobre 2005 à Ragueneau.

Les reculs enregistrés au cours de ce mois se produisent les 16, 17 et 20 octobre et sont observés dans les silts marins des stations 1 et 3 (figure 4.1. et tableau 4.1). Les conditions climatiques de tempête qui prévalent lors des reculs du 16 et 17 octobre sont caractérisées par des précipitations qui totalisent 23 mm, 30,5 mm et 6 mm respectivement entre le 15 et le 17 octobre. Ces fortes précipitations, qui sont le fruit de la combinaison entre une perturbation traversant le Québec et une dépression majeure remontant depuis le golfe du Maine, ont provoqué des inondations dans plusieurs régions du Québec (CRIACC, 2005-2009). Le 16 octobre, les vents sont particulièrement violents et l'on observe des vagues impressionnantes dans l'est du Québec (CRIACC, 2005-2009). Les conditions sont telles que les traversiers de Saint-Siméon-Rivière-du-Loup et de la Côte-Nord-Matane doivent rester à quai (CRIACC, 2005-2009). Inversement, le recul du 20 octobre se produit sous des conditions climatiques relativement stables avec des températures positives et de faibles précipitations (pluie, 1,5 mm).

Tableau 4.1.
Reculs des falaises observés au mois d'octobre 2005 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et <i>grande situation climatique associée</i>	No des iB impliqués	No de station
16 octobre 2005	Reculs précédés par : - Températures positives - Rares précipitations - Valeurs de rayonnement global élevées pour la première moitié du mois Reculs enregistrés sous conditions de : - Vents violents - Précipitations (pluie) : 30,5 mm <i>Tempête du 15-17 octobre</i>	iB2	S1 silt marin
17 octobre 2005		iB2	S3 silt marin
20 octobre 2005	Reculs précédés par : - Tempête du 15-17 octobre Recul enregistré sous conditions de : - Températures positives - Précipitations (pluie, 1,5 mm) <i>Ne correspond à aucune grande situation climatique (autre)</i>	iB3	S3 silt marin

4.1.2. Novembre 2005

Le mois de novembre 2005, à la station de Baie-Comeau, est légèrement plus doux que la normale avec une anomalie positive de 1,3 °C et il est plus humide que la normale avec une anomalie positive de 57 mm (figure 4.2).

Au cours de ce mois, on enregistre des reculs les 19, 23 et 30 novembre dans les unités de silt marin des stations 1 et 3 (figure 4.2. et tableau 4.2). Les conditions climatiques qui prévalent lors de ces reculs sont caractérisées par des cycles de gel-dégel automnal. On enregistre également un recul impliquant la sortie du iB2 à la station 2 (silt marin). Par contre, bien que l'on sache que ce recul se produit entre les visites de terrain du 19 septembre et du 20 novembre 2005, il nous est impossible d'en identifier la date de sortie à partir de l'analyse des comportements thermiques des *iButtons*. Les signaux thermiques du recul impliquant le iB2 n'apparaissent pas clairement en raison de la morphologie que prend la falaise là où la tige est insérée. En effet, la falaise subit un recul inégal au-dessus et en dessous de la tige, ce qui confond les caractéristiques de l'évolution des températures entre les environnements interne et externe de la falaise (figure 4.3.).

Les reculs de la falaise observés le 19 novembre dans les silts marin des stations 1 (iB3) et 3 (iB4) se produisent alors que les températures de l'air ont chuté sous -10 °C (-14,5 °C dans la nuit du 18 au 19 novembre) avant de remonter vers des températures supérieures au point de congélation (maximum de 1,6° C). Notons que de faibles précipitations sous forme de neige sont observées dans la soirée du 19 novembre pour un total de 1 mm en équivalent en eau. Ces reculs se produisent alors que les températures de l'air et des silts marins (iB3, station 1 et iB4, station 3) enregistrent aussi un cycle de gel-dégel.

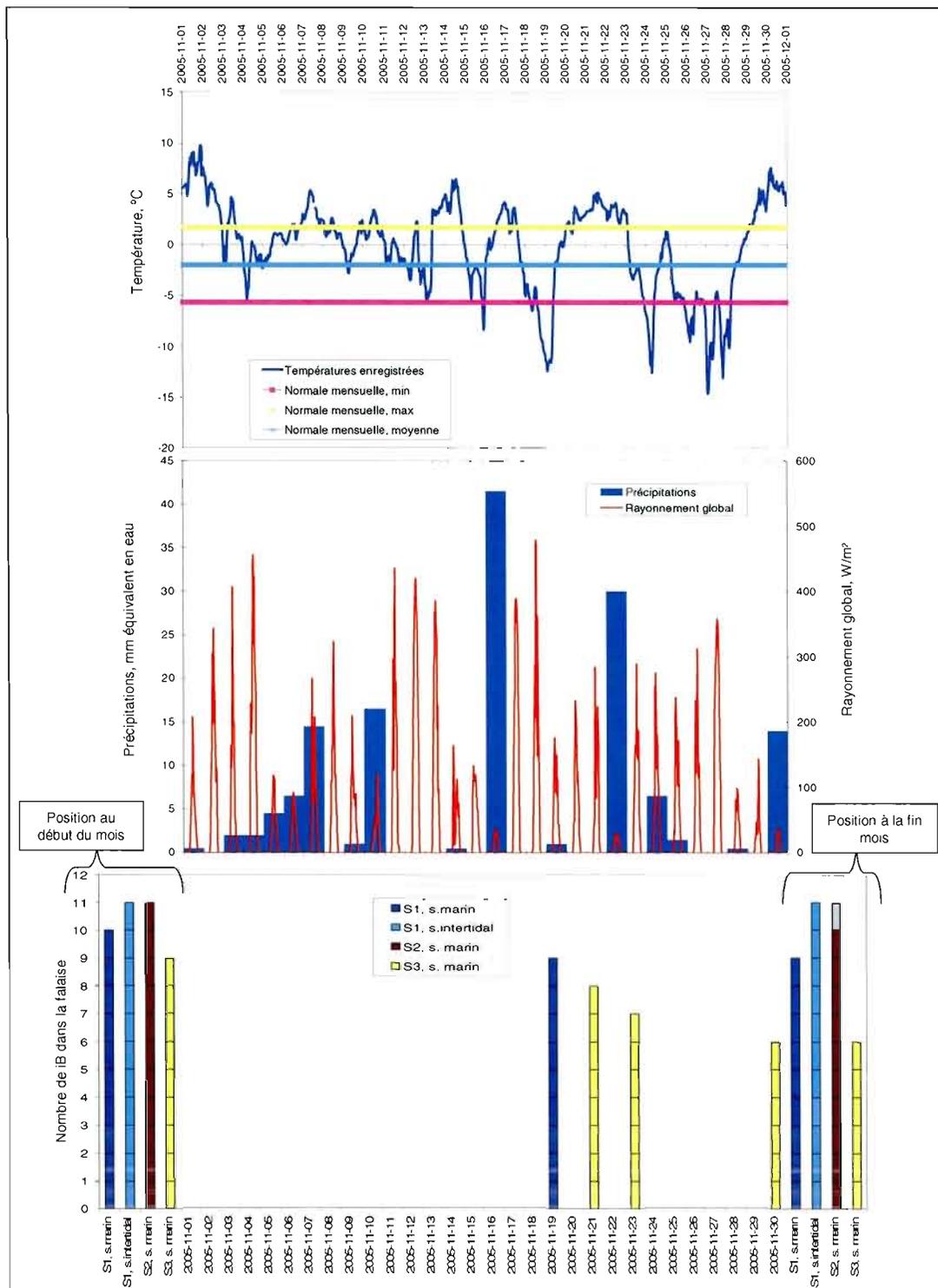


Figure 4.2. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de novembre 2005 à Raguenau.

Tableau 4.2.
Reculs des falaises observés au mois de novembre 2005 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et <i>grande situation climatique associée</i>	No des iB impliqués	No de station
19 novembre 2005	Recul précédé par : - Températures de négatives	iB3	S1 silt marin
	Recul enregistré sous conditions de : - Hausse rapide et importante des températures vers des températures positives <i>Cycle de gel-dégel</i>	iB4	S3 silt marin
23 novembre 2005	Recul précédé par : - Précipitations (22 novembre, 30 mm) - Températures positives Recul enregistré sous conditions de : - Refroidissement rapide et important - Températures négatives <i>Cycle de gel-dégel</i>	iB5	S3 silt marin
30 novembre 2005	Recul précédé par : - 4 jours de températures négatives Recul enregistré sous conditions de : - Températures positives <i>Cycle de gel-dégel</i>	iB6	S3 s. marin



Figure 4.3. État de la falaise et position des *iButtons* le 20 novembre 2005 dans l'unité de silt marin à la station 2.

Le recul du 23 novembre (iB5, station 3) est observé le lendemain d'importantes précipitations (pluie) qui cumulent 30 mm pour la seule journée du 22 novembre 2005. Le rapport mensuel du suivi du climat réalisé par la CRIACC (2005-2009) indique que des vents violents accompagnent cette dépression en provenance du golfe du Maine. Malgré ces précipitations majeures, le recul se produit réellement en date du 23 et serait plutôt attribuable aux tensions provoquées par un cycle de gel-dégel. En effet, le jour du recul, la température de l'air chute de 3,1 °C à -7,2 °C. Par contre, les températures enregistrées par le iB5 sont toujours positives (minimum de 1,5 °C) et n'enregistrent pas le cycle de gel-dégel dans le silt. La falaise continue de reculer à un rythme assez important si bien que déjà le 30 novembre (très tôt dans la nuit du 29 au 30 novembre) l'érosion se poursuit et libère le iB6 à la station 3. Ce recul se produit à la suite de quatre jours (du 25 au 29 novembre) où la température est demeurée largement sous le point de congélation (minimum de -15,6 °C, le 27 novembre) avant de remonter à partir du 29 novembre au-delà de 0 °C pour culminer à 7,9 °C, le 30 novembre. Notons que l'on enregistre des précipitations le 30 novembre mais que celles-ci ne débutent qu'une fois le recul déjà enregistré. On associe ce recul aux effets de ce cycle de gel-dégel puisque le *iButton* impliqué enregistre aussi un cycle de gel-dégel.

4.1.3. Décembre 2005

Dans l'ensemble, le mois de décembre 2005 est légèrement plus chaud que la normale avec une anomalie positive de 1,1 °C par rapport à la normale à la station de Baie-Comeau et figure près de la normale pour les précipitations enregistrées avec une anomalie négative de 11,8 mm (figure 4.4).

Le seul évènement de recul enregistré au cours du mois date du 2 décembre et affecte les unités de silt marin des stations 2 et 3 (figure 4.4 et tableau 4.3). Ces reculs se produisent alors qu'une importante tempête frappe la région. Ainsi, le 2 décembre les températures demeurent positives toute la journée et les précipitations (pluie) sont abondantes avec un total de 34 mm en équivalent en eau. La combinaison entre la marée, les forts vents, les précipitations abondantes et les hauts niveaux d'eau observés engendrent des dégâts notamment sur les côtes de la Gaspésie et de la Côte-Nord (CRIACC, 2005-2009; Bernatchez, Fraser et Lefaiivre, 2008). Compte tenu que ces précipitations sont sous forme de pluie, leur impact est d'autant plus important sur les falaises de silt marin de Ragueneau (la neige ayant plutôt des effets de protection avec la mise en place d'un couvert nival). La veille, les données de températures indiquent que la falaise subit déjà un recul qui amène le iB3 (station 2) près de la surface sans toutefois l'exposer à l'extérieur de la falaise. Ce jour-là, le 1^{er} décembre, la plus forte valeur de rayonnement global s'élève à 337 W/m^2 et la température de l'air à $6,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Tout comme à la station 2, il apparaît que les conditions du 1^{er} décembre ont aussi provoqué un recul ramenant plus près de la surface le iB7. Notons également que des températures très froides ont été enregistrées du 23 au 28 novembre avant le retour des températures positives pour la période du 29 novembre au 2 décembre 2005.

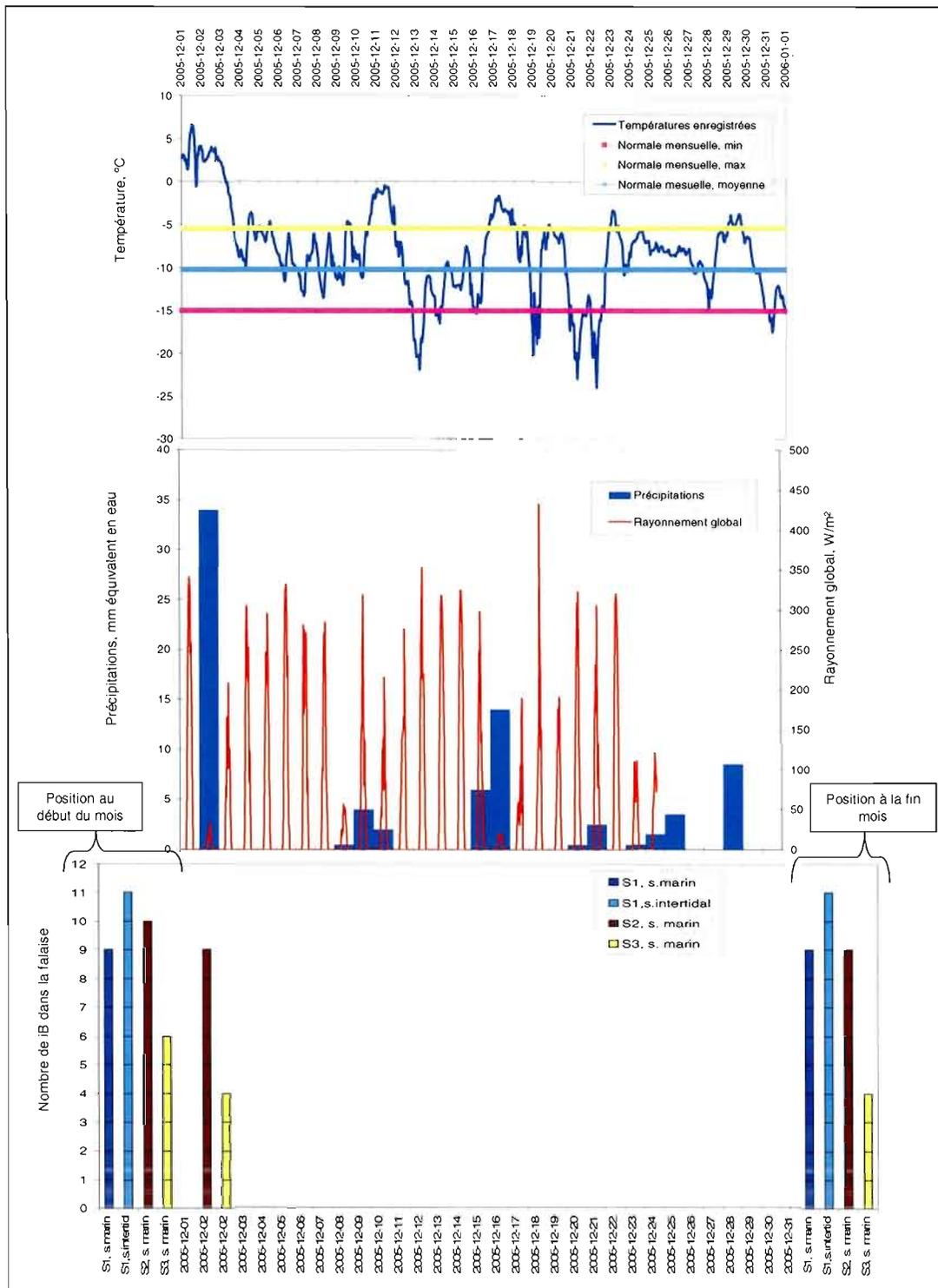


Figure 4.4. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de décembre 2005 à Ragueneau.

Tableau 4.3.
Reculs des falaises observés au mois de décembre 2005 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et grande situation climatique associée	No des iB impliqués	No de station
2 décembre 2005	Recul précédé par : - 4 jours de températures positives - Cycles de gel-dégel - Valeurs de rayonnement global élevées Recul enregistré sous conditions de : - Vents violents - Précipitations abondantes (pluie, 34 mm) - Vagues importantes <i>Tempête</i>	iB3	S2 silt marin
		iB7 iB8	S3 silt marin

4.1.4. Janvier 2006

D'après les données enregistrées à la station de Baie-Comeau, le mois de janvier 2006 fut franchement plus chaud que la normale avec une anomalie positive de 5,2 °C et légèrement plus humide que la normale avec une anomalie positive de 17,4 mm (figure 4.5.).

Au cours du mois de janvier, on n'observe aucun recul impliquant la sortie de *iButtons* avant le 30 et ce, malgré les différentes dépressions qui frappent la région⁴. Les deux épisodes de redoux du 13 au 15 et du 19-20 janvier n'ont pas non plus permis l'activation des falaises aux stations de mesures (figure 4.5). La mise en place

⁴ La première chute de neige majeure date du 14 janvier avec des précipitations de 27,5 mm en équivalent en eau et est accompagnée de vents du NO (rafales de 39 km/h) et les températures oscillaient entre -1,1 °C et 3,3 °C (couvert de neige sur cette station). Le 18 janvier, une tempête amène des précipitations de 33 mm en équivalent en eau sous forme de neige, de pluie et de pluie verglaçante. Les températures varient entre -8,7 °C et 4,4 °C et les rafales sont de l'OSO à 78 km/h. Le 19 janvier, les vents atteignent des rafales de 80 km/h en provenance de l'OSO et les températures varient entre -11,6 °C et 2,4 °C.

d'un couvert de neige avec les précipitations du 14 janvier explique qu'il y ait eu peu de recul malgré ces redoux. Le 30 janvier 2006, une perturbation majeure affecte la tige insérée dans le silt marin de la station 1 (figure 4.5 et tableau 4.4). Cette perturbation suit les températures douces du 28 janvier (maximum de 1,9 °C, ce jour-là) et un refroidissement qui amène la température sous la barre des -15 °C (minimum de -16 °C, le 29 et le 30 janvier). La photographie du 25 mars 2006 montre l'état de la falaise et laisse voir que la tige de l'unité de silt marin de la station 1 n'est plus en place et seule la corde de sécurité se dirigeant vers le pied de glace est visible (figure 4.5). Puis, la photographie acquise le 30 mars 2006 montre la tige encore prise dans l'estran à la suite de la dislocation du pied de glace les 28 et 29 mars 2006 (figure 4.6).

Tableau 4.4.

Reculs des falaises observés au mois de janvier 2006 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et grande situation climatique associée	No des iB impliqués	No de station
30 janvier 2006	Recul précédé par : - Températures positives le 28 janvier - Valeurs de rayonnement global maximales de 408 W/m ² le 29 janvier et de 311 W/m ² le 30 janvier Recul enregistré sous conditions de : - Températures négatives <i>Cycle de gel-dégel</i>	Toute la tige (9 <i>iButtons</i>)	S1 silt marin

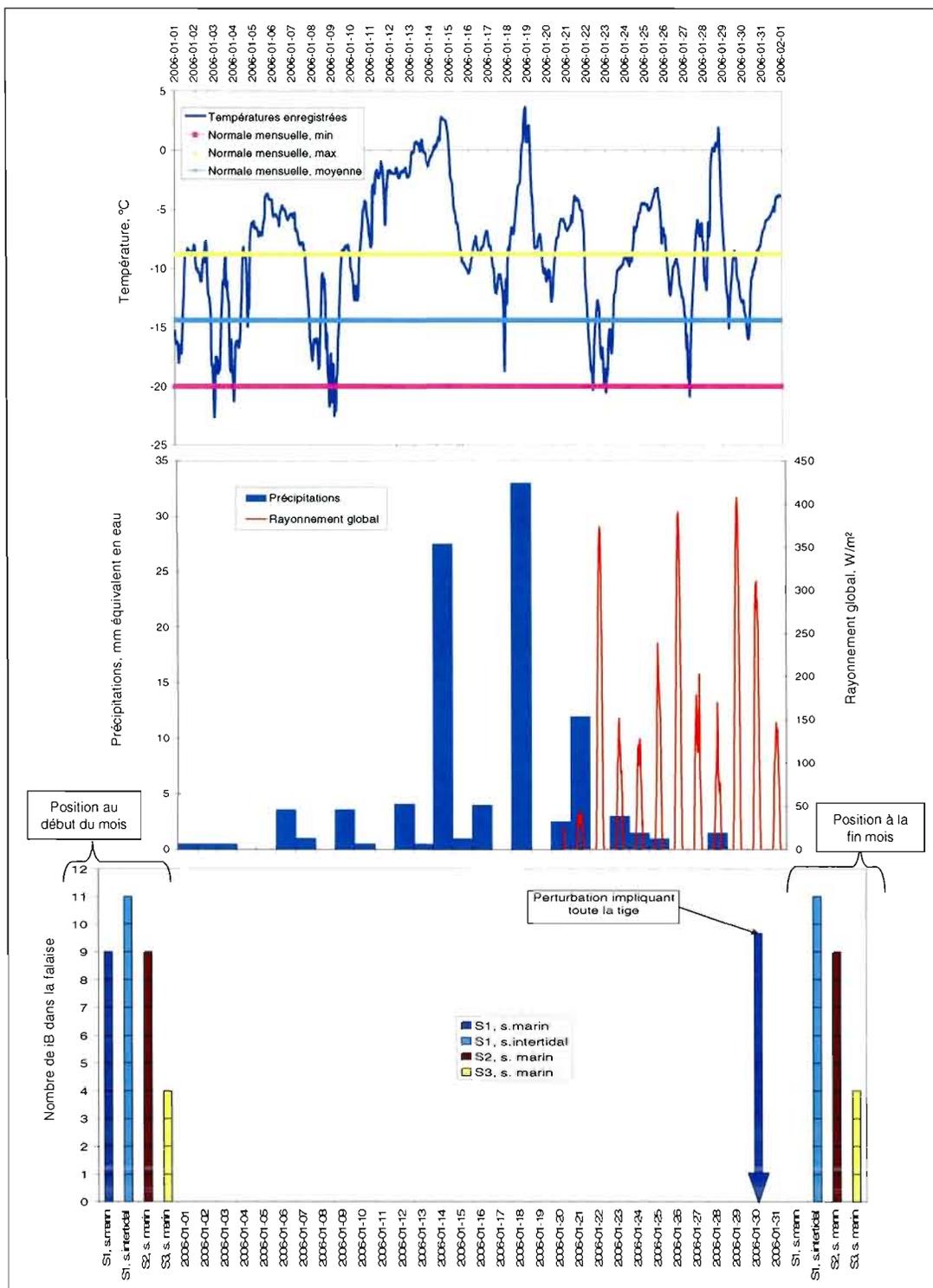


Figure 4.5. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de janvier 2006 à Ragueneau.



Figure 4.6. Intégration de la tige de l'unité de silt marin dans le pied de glace (seule la corde de sécurité est visible) à la station 1 le 25 mars 2006.

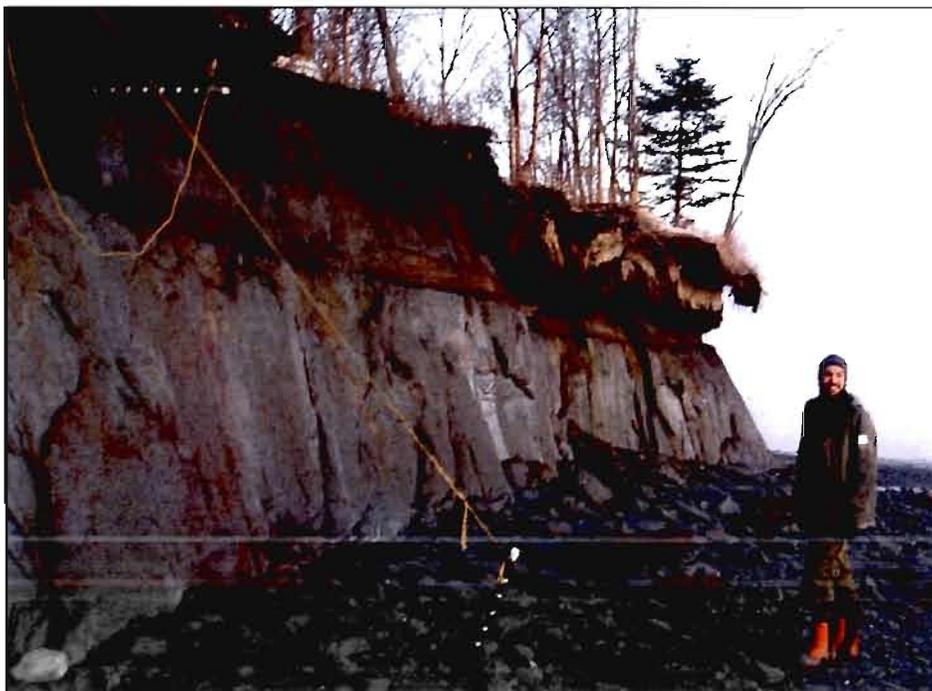


Figure 4.7. Position de la tige en partie prise dans le silt marin sur l'estran à la suite de la dislocation du pied de glace à la station 1 le 30 mars 2006.

4.1.5. Février 2006

Dans l'ensemble, les températures enregistrées au cours du mois de février 2006 figurent dans les normales avec une anomalie positive de 0,2 °C à la station de Baie-Comeau. Des températures tout juste au-dessus du point de congélation sont enregistrées exclusivement le 5 février. On observe une plus grande quantité de précipitations avec une anomalie positive de 29,5 mm⁵. Aucun recul de la falaise n'est observé au cours du mois de février 2005 et ce malgré deux périodes de conditions climatiques difficiles⁶. Le couvert nival, ayant sans doute contribué à la stabilité des falaises, entre en fusion les 25 et 26 février en raison des fortes valeurs de rayonnements global (plus de 550W/m²) (figure 4.9).

⁵ Les données de précipitations pour le 2 février ne sont pas disponibles à la station météorologique d'Environnement Canada à Baie-Comeau.

⁶ Du 3 au 6 février, une dépression en provenance du sud-est américain puis une seconde en provenance du sud des Grands Lacs amènent 53 mm de précipitations sous forme de neige et d'un peu de pluie verglaçante et des vents forts (rafales maximales quotidiennes entre 35 km/h et 78 km/h). Les 17 et 18 février, une dépression en provenance du Midwest américain combinée à une poussée d'air arctique font chuter les températures jusqu'à -21,6 °C et amènent des précipitations (neige) de 25,5 mm en équivalent en eau. Les vents soufflent en rafales jusqu'à 74 km/h. Ces deux épisodes climatiques ont engendré des dommages matériels, des pannes d'électricité et la fermeture de routes (CRIACC, 2005-2009).

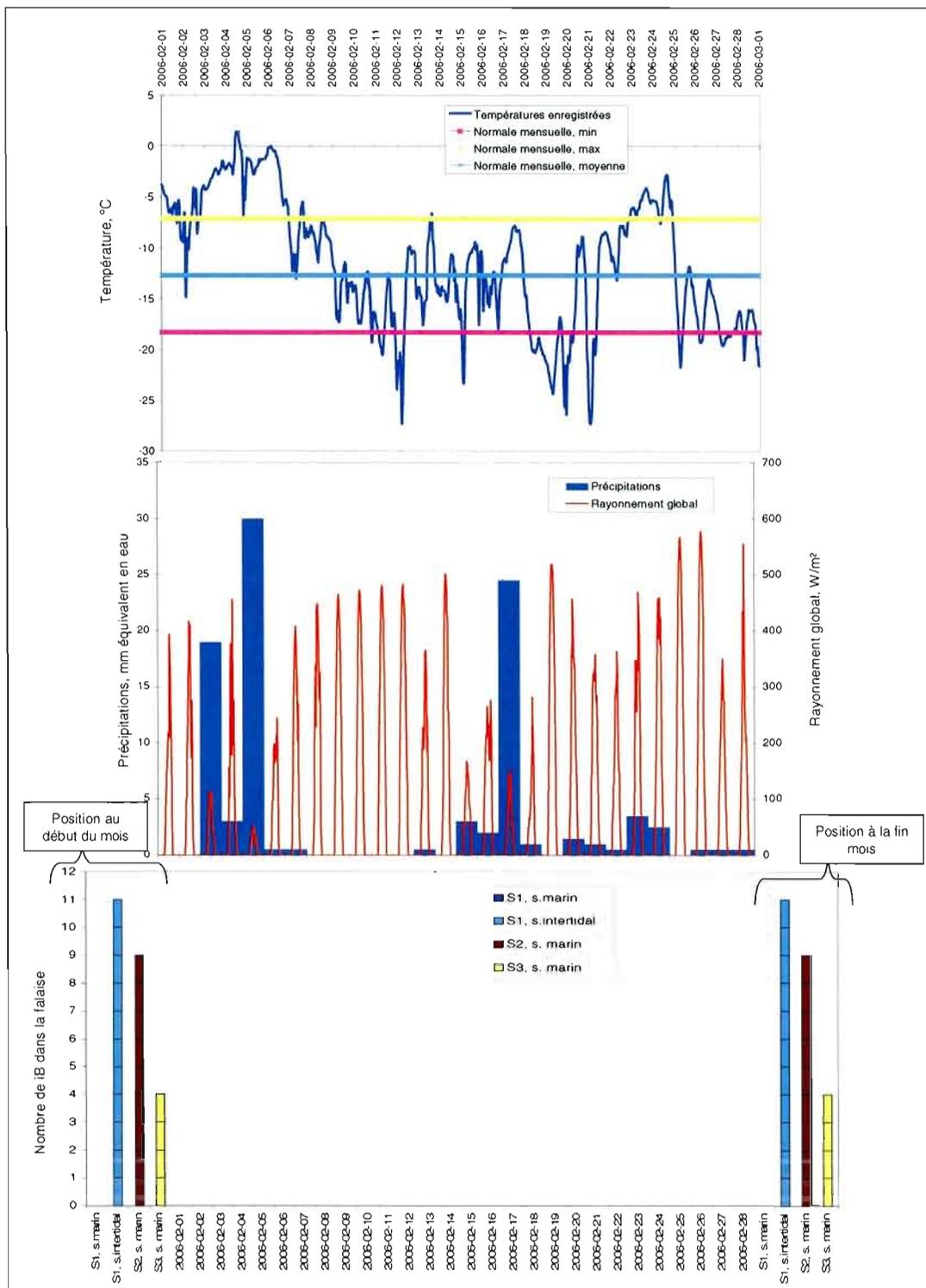


Figure 4.8. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de février 2006 à Ragueneau.

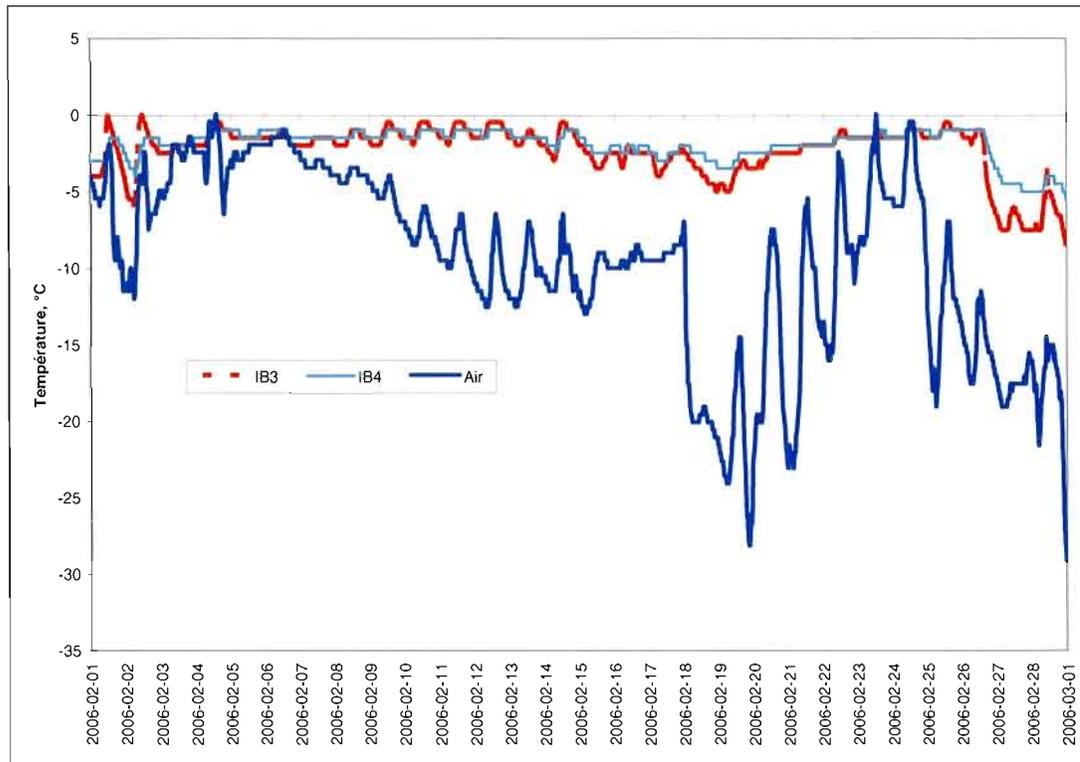


Figure 4.9. Effet du couvert de neige sur les températures des iB3 et iB4 à la station 2 et fusion partielle à la suite des conditions du 25 et 26 février 2006.

4.1.6. Mars 2006

Pour le mois de mars 2006, on enregistre une anomalie positive de 3,9 °C par rapport à la normale à la station météorologique de Baie-Comeau. D'ailleurs, les températures quotidiennes maximales sont positives presque tous les jours du mois. On ne compte que 8 jours où elle fut inférieure au point de congélation (figure 4.10). Le mois de mars 2006 fut aussi plus sec avec une anomalie négative de 32,5 mm par rapport à la normale à la station de Baie-Comeau. À cette époque de l'année, le rayonnement solaire contribue à l'érosion des falaises avec des valeurs maximales atteignant régulièrement plus de 500 W/m². Grâce aux données enregistrées par les *iButtons* de la tige délogée et intégrée dans l'estran et le pied de glace à la station 1

(silt marin) le 30 janvier 2006, on sait que la dislocation du pied de glace se produit les 28 et 29 mars 2006 (figure 4.11).

Au cours du mois de mars 2006, on observe un premier recul de la falaise qui affecte l'unité de silt marin de la station 2 et implique la sortie du iB4 le 9 mars (figure 4.10 et tableau 4.5). Ce recul se manifeste sous des conditions climatiques caractérisées par des températures négatives combinées à des valeurs de rayonnement global importantes. Le 8 mars, la valeur moyenne de rayonnement global est de 597 W/m^2 et de 576 W/m^2 le 9 mars. Nos résultats indiquent que l'émergence du iB4 se produit de manière progressive puisque celui-ci répond de plus en plus aux variations de températures les jours précédant sa sortie. Les températures enregistrées par le iB4 montrent des cycles de gel-dégel.

Puis, avec l'amorce du dégel printanier dans la seconde moitié du mois, on observe une période d'érosion importante avec une série de 8 évènements concentrés entre le 25 et le 30 mars qui affectent toutes les stations⁷ et qui impliquent au total la sortie de 14 *iButtons* (figure 4.10 et tableau 4.5). Ces reculs enregistrés de manière concentrée à la fin du mois se produisent alors que l'on n'enregistre aucune précipitation et des valeurs de rayonnement global importantes⁸. La température de l'air enregistre alors des cycles de gel-dégel selon un rythme diurne-nocturne associés au dégel printanier (le dégel printanier est défini à la section 5.1).

⁷ Rappel : la station de mesures de l'unité de silt marin de la station 1 n'est plus en place depuis le 30 janvier 2006.

⁸ Les valeurs de rayonnement global ne sont pas disponibles puisqu'elles ont été écrasées à la suite du dépassement de la limite de stockage de données de la station météorologique portable. Des modifications aux programmes de la station météorologique portable de Pointe-Lebel ont réduit à la baisse le temps d'autonomie de la station. Ce constat a été réalisé seulement suite à la perte de données.

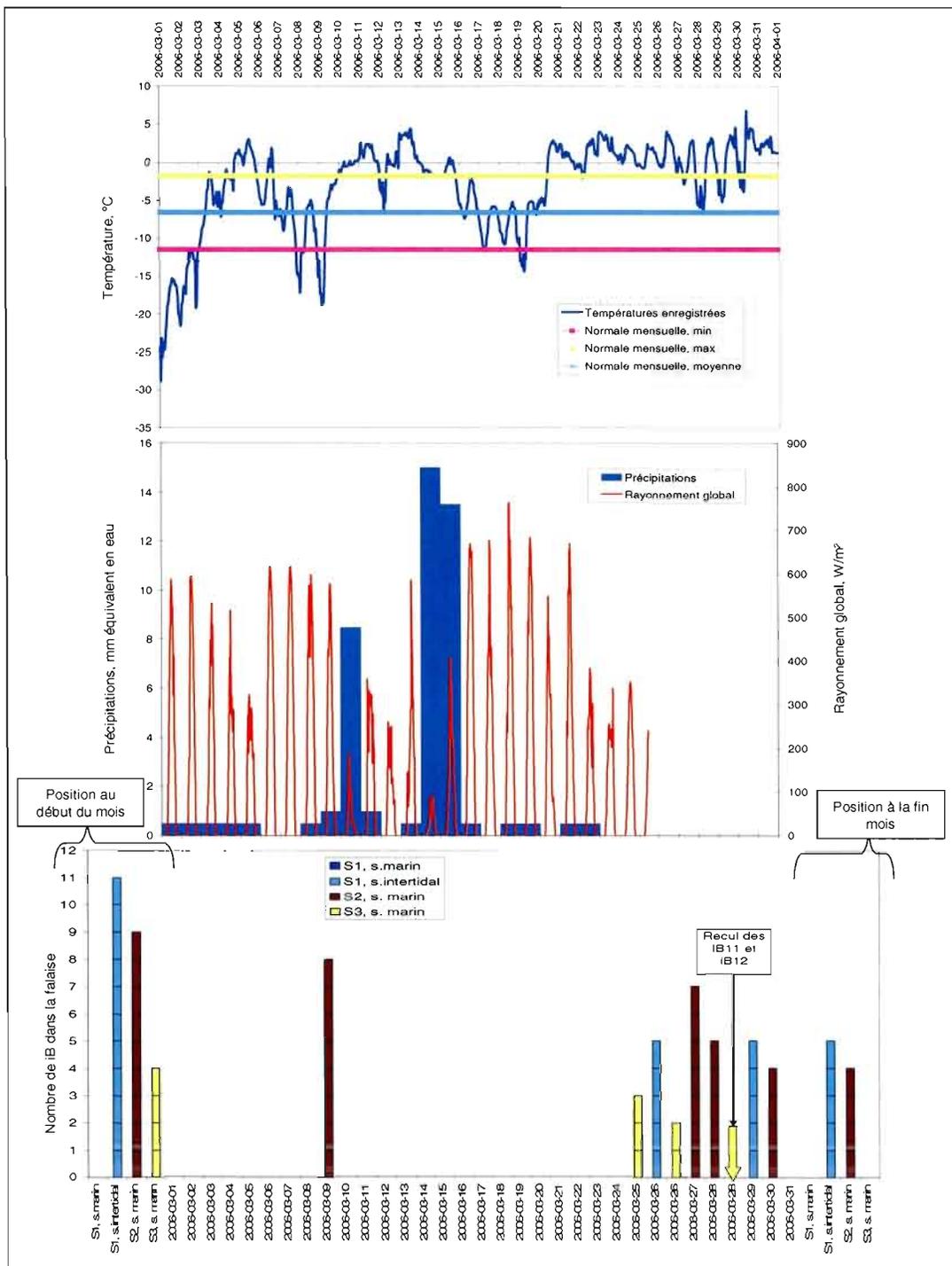


Figure 4.10. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de mars 2006 à Ragueneau.

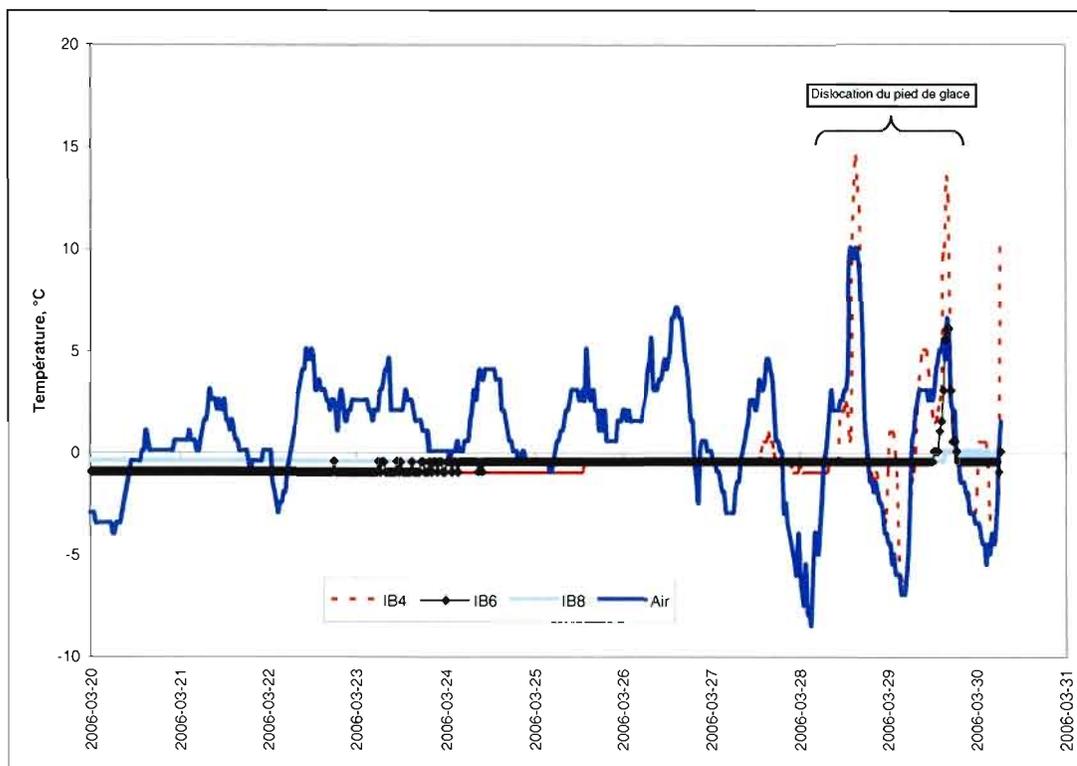


Figure 4.11. Dislocation du pied de glace les 28 et 29 mars 2006 sur l'estran à la station 1.

Tableau 4.5.
Reculs des falaises observés au mois de mars 2006 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et grande situation climatique associée	No des iB impliqués	No de station
9 mars 2006	Températures négatives Valeurs de rayonnement global élevées <i>Cycle de gel-dégel</i>	iB4	S2, silt marin
25 mars 2006	Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimé) <i>Dégel printanier</i>	iB9	S3 silt marin
26 mars 2006	Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimé) <i>Dégel printanier</i>	iB2 à iB7	S1, silt intertidal
26 mars 2006	Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimé) <i>Dégel printanier</i>	iB10	S3, silt marin
27 mars 2006	Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimé) <i>Dégel printanier</i>	iB5	S2, silt marin
28 mars 2006	Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimé) <i>Dégel printanier</i>	iB6 et iB7	S2, silt marin
		iB11 et iB12 ^a	S3, silt marin
30 mars 2006	Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimé) <i>Dégel printanier</i>	iB8	S2, silt marin

^aCompte tenu que les 12 capteurs *iButtons* de la station 3 sont désormais à l'extérieur, la tige insérée dans l'unité de silt marin est retirée. Le suivi de cette station prend fin avec le recul de la falaise le 28 mars 2006.

4.1.7. Avril 2006

Dans l'ensemble, on note que le mois d'avril a été plus doux et plus sec que la normale avec une anomalie positive de 2,2 °C et une anomalie négative de 53,8 mm à

la station de Baie-Comeau. Les conditions de dégel printanier se poursuivent au cours du mois d'avril (figure 4.12).

Les reculs enregistrés aux deux stations restantes (station 1, silt intertidal et station 2, silt marin) se concentrent entre le 1^{er} et le 9 avril, et constituent la suite de la série de reculs observés à la toute fin du mois de mars (figure 4.12 et tableau 4.6). Le 13 avril marque le retrait des tiges et la fin de la saison d'acquisition de données 2005-2006. Au moment du retrait des tiges de la station 1 dans le silt intertidal et de la station 2 dans le silt marin, les iB12 sont encore à l'intérieur de la falaise.

Les conditions climatiques du 1^{er} au 9 avril sont caractérisées par des températures généralement positives mais ponctuées de cycles de gel-dégel dans la journée du 3, 8 et 9 avril 2006. Le 1^{er} et le 2 avril sont caractérisés par des précipitations de l'ordre de 5 mm (pluie) et 1,5 mm (pluie et neige) respectivement et sont le fruit d'une dépression en provenance des Grands Lacs (CRIACC, 2005-2009). Ces précipitations sont accompagnées par des rafales de 35 km/h de l'ENE puis de 67 km/h du N. Les 5, 6 et 7 avril sont caractérisés par des précipitations de l'ordre de 1 mm (neige), 1 mm (neige) et 3,5 mm (pluie) en équivalent en eau respectivement. Ces précipitations sont accompagnées par des rafales de 63 km/h en provenance de l'ENE le 5 avril et de 46 km/h du SO le 7 avril. Ces conditions climatiques sont associées au système dépressionnaire qui affecte particulièrement l'ouest, le sud et le centre du Québec. Les précipitations se poursuivent sous forme de pluie et de neige le 8 avril avec un total de 3 mm en équivalent en eau. L'ensemble de ces reculs est associé aux conditions de dégel printanier.

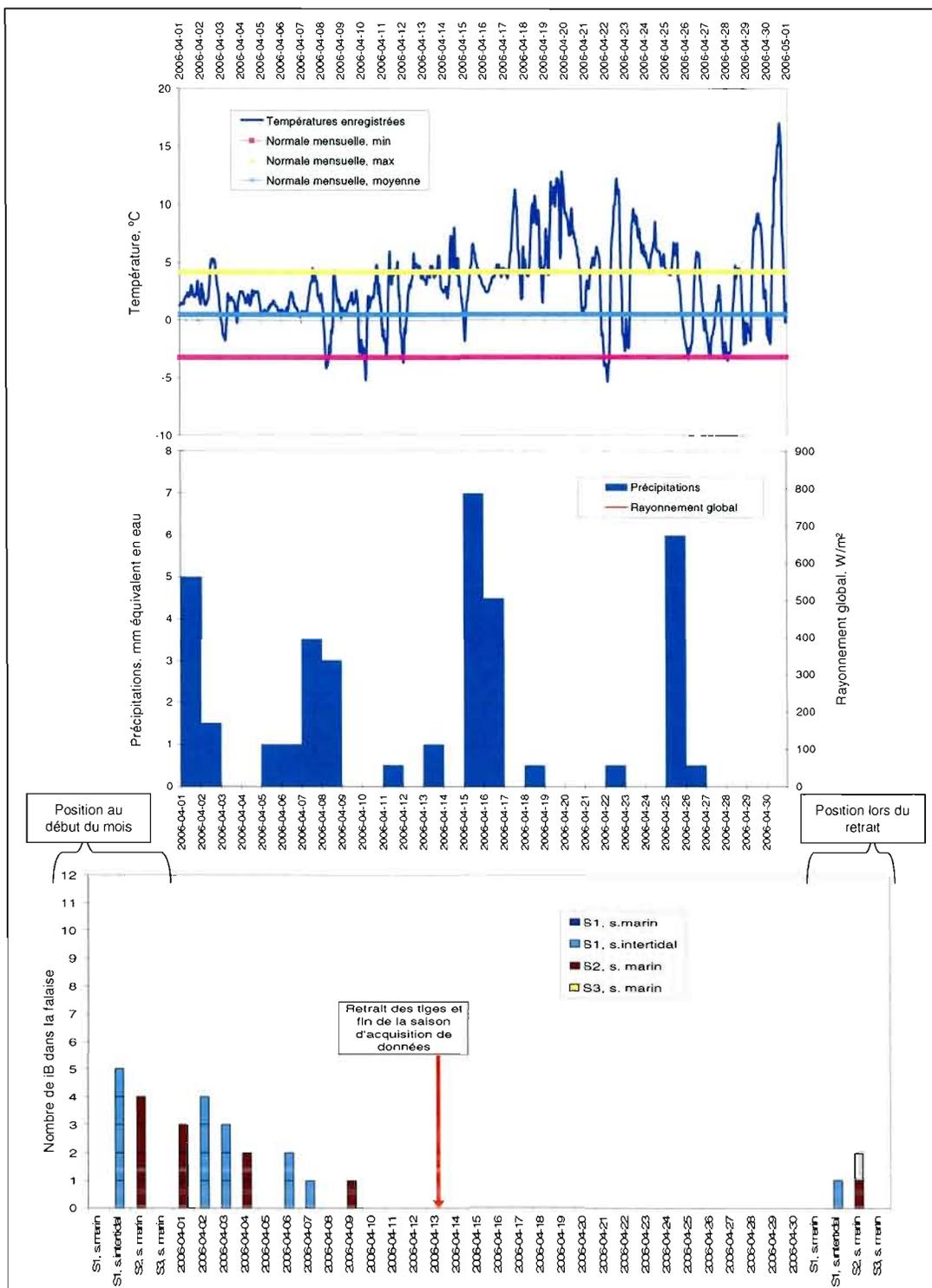


Figure 4.12. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois d'avril 2006 à Ragueneau.

Tableau 4.6.
Reculs des falaises observés au mois de avril 2006 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et grande situation climatique associée	No des iB impliqués	No de station
1 ^{er} avril 2006	Températures positives Faibles précipitations (1,5 mm, pluie) <i>Dégel printanier</i>	iB9	S2, silt marin
2 avril 2006	Températures positives Faibles précipitations (5 mm, pluie et neige) Vents violents (67 km/h rafales) <i>Tempête</i>	iB8	S1, silt intertidal
3 avril 2006	Cycle de gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimées) <i>Dégel printanier</i>	iB9	S1, silt intertidal
4 avril 2006	Températures positives Valeurs de rayonnement global élevées (estimées) <i>Dégel printanier</i>	iB10	S2, silt marin
6 avril 2006	Températures positives Faibles précipitations (neige, 1 mm) <i>Dégel printanier</i>	iB10	S1, silt intertidal
7 avril 2006	Températures positives Faibles précipitations (pluie, 3,5 mm) Rafales de 46 km/h <i>Dégel printanier</i>	iB11	S1, silt intertidal
9 avril 2006	Cycle de gel-dégel Valeurs de rayonnement global élevées (estimées) <i>Dégel printanier</i>	iB11	S2, silt marin

4.2. Saison 2006-2007

4.2.1. Octobre 2006

Les températures du mois d'octobre 2006 figurent près des normales climatiques à la station de Baie-Comeau avec une anomalie positive de 1,1 °C alors que les précipitations⁹ s'avèrent beaucoup plus abondantes avec une anomalie positive de 106,3 mm (figure 4.13).

Au cours de ce mois, le seul évènement de recul de la falaise se produit lors de la tempête automnale du 28 et 29 octobre 2006 (18 h 00) et affecte au total 14 *iButtons* répartis sur les 3 stations de mesures (figure 4.13 et tableau 4.7). Cette tempête, qui frappe d'ouest en est tout le sud du Québec, est caractérisée par des précipitations importantes et des rafales de vents violents qui occasionnent des dommages matériels et des pannes d'électricité (CRIACC, 2005-2009). À la station météorologique de Baie-Comeau, on enregistre des rafales du NO de 93 km/h le 28 octobre et de 85 km/h le 29 octobre. Les précipitations (pluie) cumulent 30 mm le 28 octobre et 11 mm le jour suivant. Notons que ces conditions climatiques violentes sont accompagnées, le 28 octobre, par des variations de températures impliquant un cycle de gel-dégel (-6,6 °C à 5,1 °C). Le lendemain, le 29 octobre, les températures demeurent positives et varient entre 2,9 °C et 6,6 °C. La marée culmine à 3,1 m à 17 h 44 le 28 octobre et à 3 m à 18 h 48 le 29 octobre à la station de Baie-Comeau. Le recul du 29 octobre se produit donc alors que la marée est à son plus haut niveau.

⁹ Les données de précipitations de la station météorologique d'Environnement Canada à Baie-Comeau manquent pour le 27 octobre 2006.

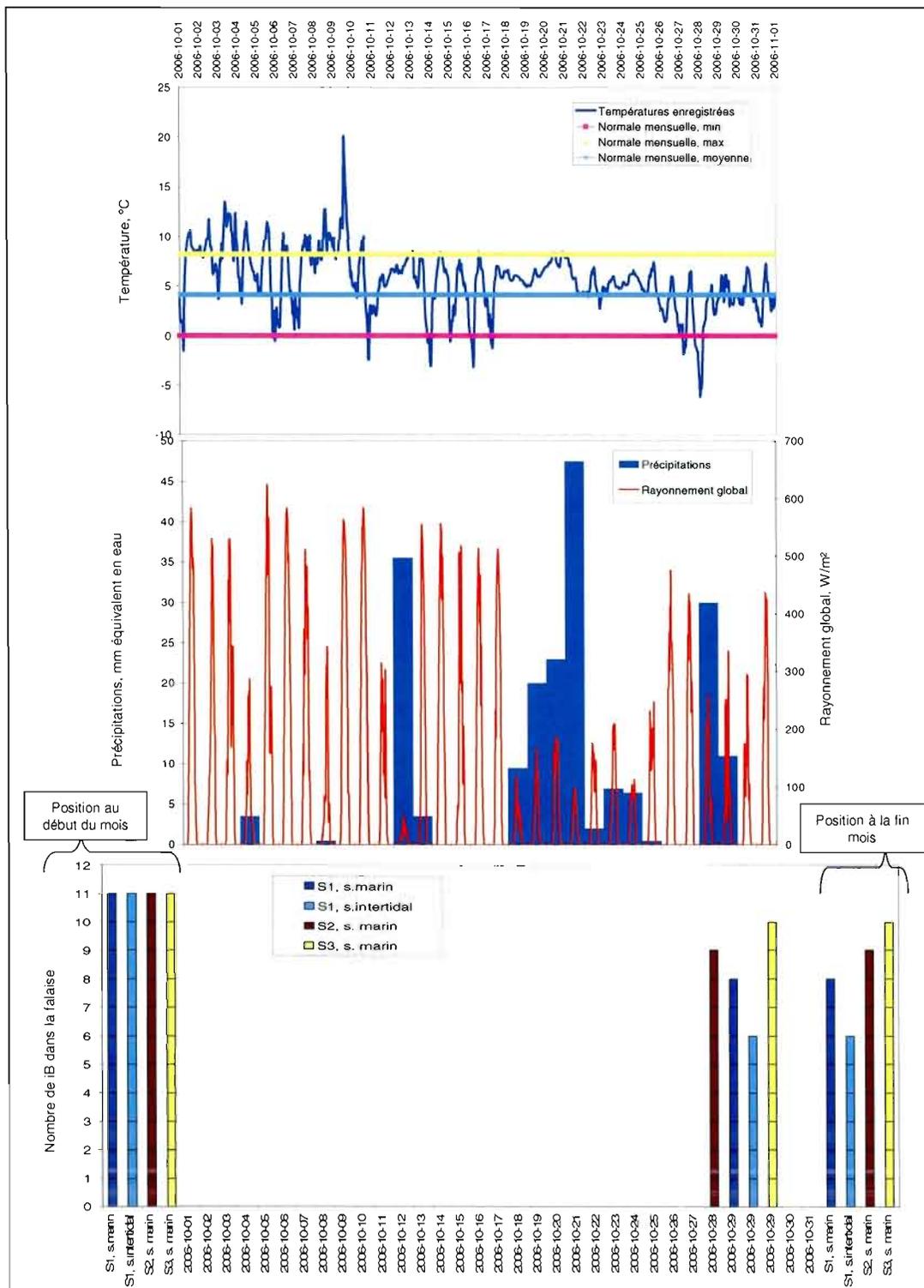


Figure 4.13. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois d'octobre 2006 à Ragueneau.

Tableau 4.7.
Reculs des falaises observés au mois d'octobre 2006 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et grande situation climatique associée	No des iB impliqués	No de station
28 octobre 2006	Recul précédé par : - Plusieurs jours de pluie avant la tempête (159 mm)	iB2 iB3	S2, silt marin
29 octobre 2006 (18 h 00)	Recul enregistré sous conditions de : - Vents violents (rafale max de 93 km/h) - Précipitations abondantes (pluie, 41 mm) - Marée haute <i>Tempête du 28-29 octobre</i>	iB2 iB3 iB4	S1, silt marin
		iB2 iB3 iB4 iB5 iB6	S1, silt intertidal
		iB2	S3, silt marin

4.2.2. Novembre 2006

Le mois de novembre 2006 est plus chaud que la normale à la station de Baie-Comeau avec une anomalie positive de 3,5 °C et aussi plus humide¹⁰ que la normale avec une anomalie positive de 40 mm (figure 4.14).

¹⁰ Les données de précipitations de la station météorologique d'Environnement Canada à Baie-Comeau manquent pour le 18 novembre 2006.

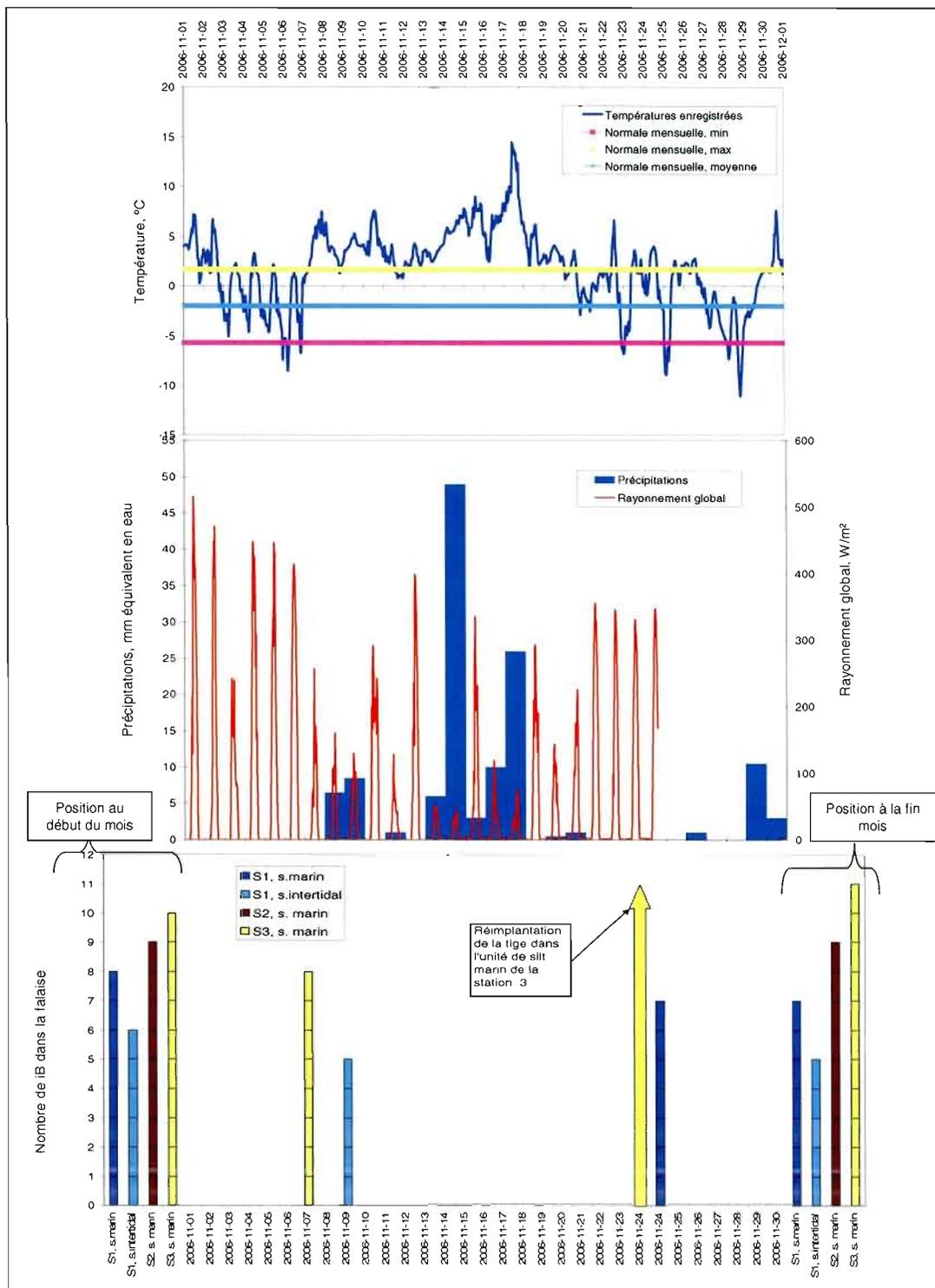


Figure 4.14. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de novembre 2006 à Ragneau.

Les reculs des falaises observés au cours du mois de novembre se produisent les 7, 9 et 24 novembre (figure 4.14 et tableau 4.8). Le 7 novembre, on enregistre un recul impliquant les iB3 et iB4 à la station 3. Puis, l'unité de silt intertidal (iB7) de la station 1 subit un recul le 9 novembre. Les conditions climatiques sont alors caractérisées par des précipitations (pluie) totalisant 6,5 mm le 8 novembre et 8,5 mm le 9 novembre. Les vents sont importants avec des rafales de 57 km/h du SO le 7 novembre et virant à l'ENE le 8 novembre et le 9 novembre avec des rafales de 52 km/h et de 41 km/h respectivement. La température de l'air enregistrée lors du recul est positive mais fait suite à plusieurs journées caractérisées par des cycles de gel-dégel (du 2 au 6 novembre). L'autre recul observé ce mois-ci se produit le 24 novembre en après-midi et touche l'unité de silt marin de la station 1 et implique la sortie d'un seul *iButtons* (iB5). Ce recul se produit sous une série de cycles de gel-dégel qui perdure du 20 au 24 novembre 2006.

C'est également au cours de cette campagne de terrain, plus exactement le 24 novembre, que la tige de l'unité de silt marin de la station 3 est réinsérée correctement¹¹ (figure 4.15).

¹¹ Au cours de la visite précédente, le 26 octobre 2006, nous avons observé que l'eau s'écoulait le long de la tige, créant un évasement du trou dans lequel la tige était insérée, menaçant ainsi la qualité des données et la stabilité de la tige.



Photo : Pascal Bernatchez

Figure 4.15. Réimplantation de la tige dans l'unité de silt marin à la station 3, 24 novembre 2006.

Tableau 4.8.

Reculs des falaises observés au mois de novembre 2006 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et <i>grande situation</i> climatique	No des iB impliqués	No de station
7 novembre 2006	Recul précédé par : - 5 jours consécutifs de cycle de gel-dégel Recul enregistré sous condition de : - Cycle de gel-dégel <i>Cycle de gel-dégel</i>	iB3 iB4	S3, silt marin
9 novembre 2006	Recul précédé par : - 6 jours consécutifs de cycle de gel-dégel Recul enregistré sous condition de : - Températures positives - Précipitations <i>Cycle de gel-dégel</i>	iB7	S1, silt intertidal
24 novembre 2006	Recul précédé par : - 4 jours consécutifs de cycle de gel-dégel Recul enregistré sous condition de : - Cycle de gel-dégel <i>Cycle de gel-dégel</i>	iB5	S1, silt marin

4.2.3. Décembre 2006

Le mois de décembre 2006 est caractérisé par des températures supérieures à la normale à la station météorologique de Baie-Comeau avec une anomalie positive de 3,0 °C et des précipitations moins abondantes avec une anomalie négative de 24,8 mm (figure 4.16).

Au cours du mois de décembre, on enregistre des perturbations majeures qui affectent la totalité des tiges aux stations 1 et 3 dans les silts marins¹² (figure 4.16 et tableau 4.9). Ces perturbations surviennent au début du mois alors que les conditions climatiques sont marquées par un important écart de température (figure 4.17). Ainsi, le 5 décembre, la température de l'air passe de -22 °C à -6 °C. Puis, au cours de la journée du 6 décembre, le minimum mensuel est atteint durant la nuit avec près de -24 °C. Il s'en suit une hausse rapide de la température qui en l'espace de deux heures, entre 6 h 30 et 8 h 30, passe de -22 °C à -8 °C. Le rayonnement solaire n'étant pas très élevé, on associe cette hausse à l'arrivée d'une masse d'air chaud (figure 4.18). La température maximale sera de 0,5 °C en fin de journée, soit à 23 h 30. La température de l'air restera alors positive pour une période de 23 heures. Le jour suivant, c'est-à-dire le 7 décembre, les températures oscillent entre 0 °C et 1,5 °C jusqu'en soirée. À 20 h 00, la température de l'air passe sous 0° C pour terminer la journée à -5,4 °C (23 h 30). Ainsi, lors de ces événements de recul, le comportement de la température de l'air varie grandement d'un refroidissement important à un léger redoux. On enregistre également des précipitations sous forme de neige le 6 et le 7 décembre, pour un total de 5,5 mm en équivalent en eau. Bref, le seul paramètre climatique valable pouvant expliquer le déclenchement de cet événement d'érosion

¹² Les iB1, iB2 et iB3 de la station 3 sont défectueux si bien qu'il est impossible de connaître leurs dates de sortie

sont les 23 heures de température positive enregistrée avant le recul, combinées au froid intense (minimum atteint à -24°C) observé les jours précédents cette température clémente.

À la station 1 dans l'unité de silt marin, on enregistre un recul de la falaise le 7 décembre vers 19 h 30. Ce recul est d'une ampleur particulièrement importante puisque, contrairement aux reculs impliquant généralement un seul *iButton* et, à l'occasion 2 *iButtons*, celui-ci provoque la sortie de 7 *iButtons* (iB6 à iB12). Soulignons aussi, qu'au moment du recul, la marée est basse et descendante, au plus bas à 22 h 02 (0,4 m) à la station de Baie-Comeau, et que les agents hydrodynamiques n'ont alors aucune emprise sur la falaise. Cependant, compte tenu que le pied de glace n'est pas installé (absence de pied de glace lors de la visite du 22 décembre), les agents hydrodynamiques sont en mesure d'évacuer les sédiments érodés si bien que, déjà lors de la visite du 22 décembre, plus aucune trace de ce recul ne subsiste au pied de la falaise (figure 4.19). La tige sera retirée et réinsérée au cours de la visite du 5 et du 6 janvier 2007.

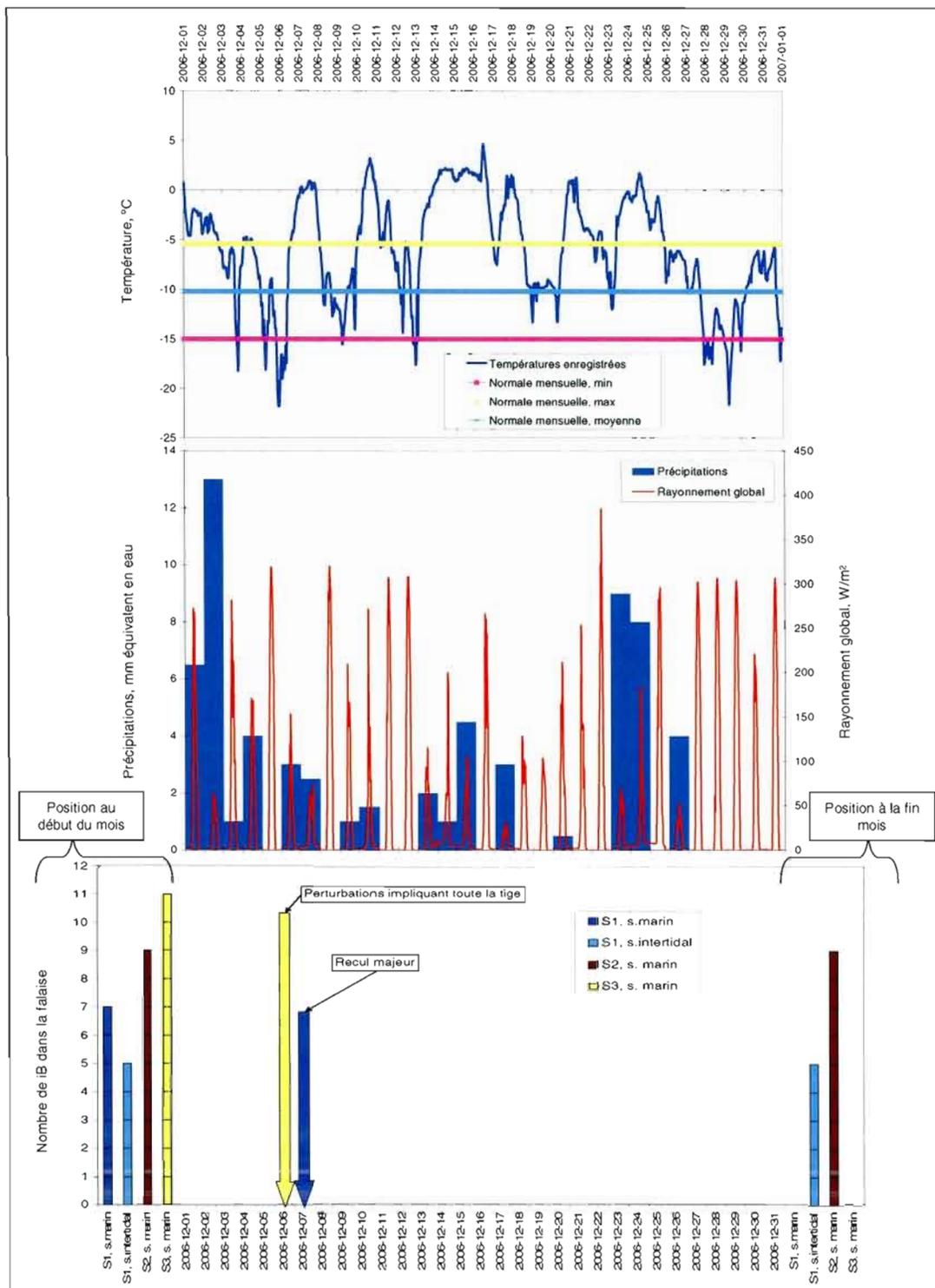


Figure 4.16. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de décembre 2006 à Ragueneau.

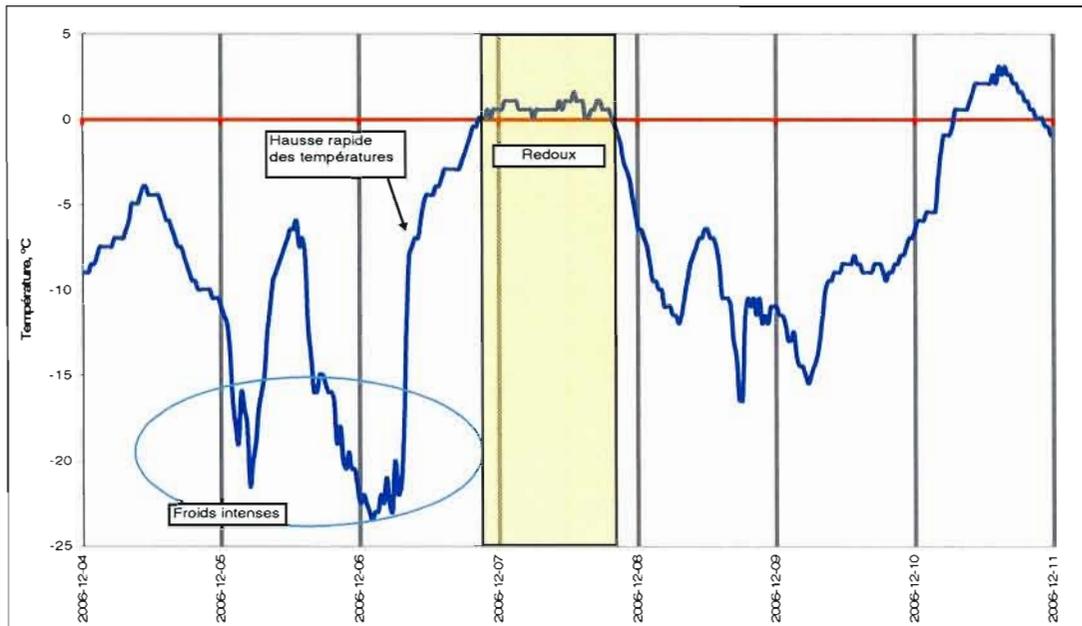


Figure 4.17. Températures de l'air enregistrées entre le 4 et 10 décembre 2006 à Ragueneau.

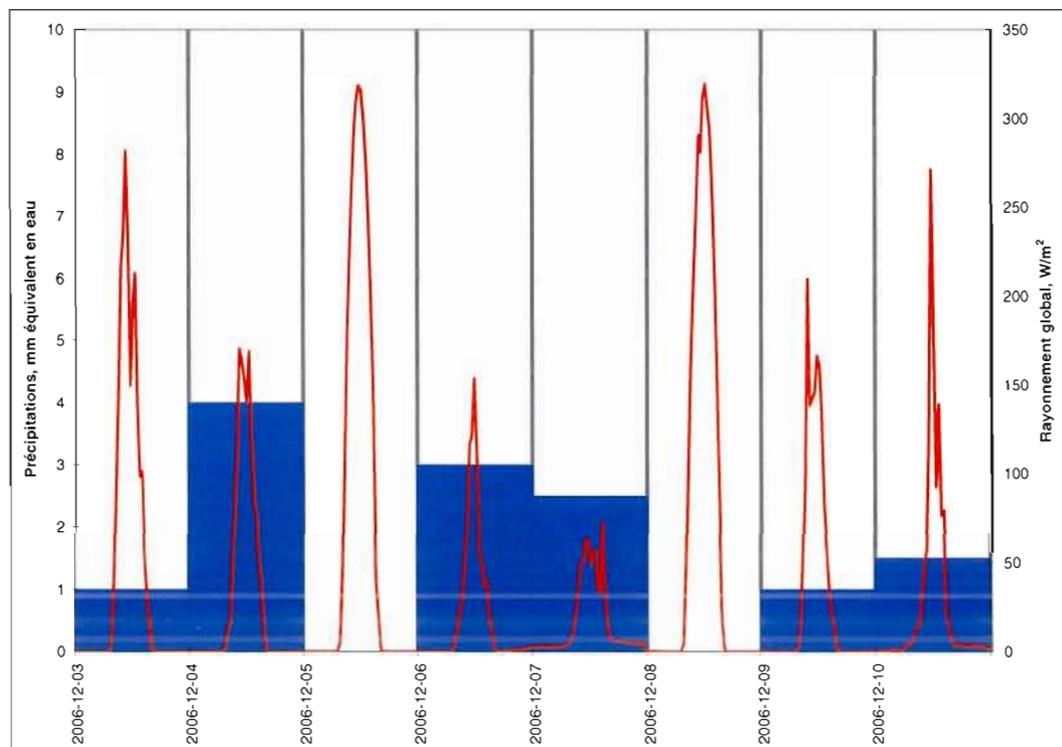


Figure 4.18. Rayonnement global et précipitations enregistrés entre le 4 et 10 décembre 2006 à Ragueneau.



Figure 4.19. État de la falaise et position des *iButtons* le 22 décembre 2005 dans l'unité de silt marin à la station 1 (absence de neige et de pied de glace).

À la station 3 (tige réinsérée le 24 novembre), on enregistre une perturbation importante dans l'après-midi (vers 13 h 30) du 6 décembre. Lors de cet évènement, les iB4 à iB12 sont affectés par l'évènement¹³. Une interrogation concernant cet évènement persiste. D'une part, le trou où était inséré la tige est retrouvé sur la falaise et sa profondeur est mesurée lors de la visite de terrain du 5 et 6 janvier 2007 à 1,2 m (initialement, le trou pour l'insertion de la tige doit faire environ 2 m environ). D'autre part, aucun mouvement de masse tels les glissements en plan n'ont été observés au cours des multiples campagnes de terrain à cette station et il s'agit, à notre connaissance, du seul mode de recul pouvant générer un recul de cette ampleur.

¹³ Les iB1, iB2 et iB3 de la station 3 sont défectueux si bien qu'il est impossible de connaître les dates de sortie des iB2 et iB3.

De plus, la marée du 6 décembre 2006 est haute à 4 m à Baie-Comeau à 14 h 36, soit au moment où l'on enregistre la perturbation. La veille, la signature thermique du *iButton* de référence adopte un comportement qui laisse croire qu'il aurait été submergé. En effet, vers 2 h 00 durant la nuit du 5 au 6 décembre, la température du *iButton* de référence augmente au moment où la marée est haute (1 h 42 à Baie-Comeau). Ces observations nous amènent à croire qu'il n'y a pas eu de véritable recul et que la tige aurait plutôt été délogée. Ainsi, il est possible que la tige ait été délogée sous l'effet de la traction qu'aurait pu exercer les glaces (et non le pied de glace qui n'est pas installé à cette période) et les vagues sur la corde de sécurité. Lors du relevé de terrain du 21 décembre, la tige est retrouvée au sol, le long de la falaise.

Tableau 4.9.

Reculs des falaises observés au mois de décembre 2006 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et grande situation climatique associée	No des iB impliqués	No de station
6 décembre 2006	Recul enregistré sous conditions de : - Marée haute <i>Absence de recul</i>	iB4 à iB12 (toute la tige est délogée)	S3, silt marin
7 décembre 2006	Recul précédé par : - Refroidissement majeur (min de -21,6 °C) - Précipitations (neige, 3 mm) Recul enregistré sous conditions de : - Températures positives - Précipitations (neige, 2,5 mm) <i>Redoux</i>	iB6 à iB12	S1, silt marin

4.2.4. Janvier 2007

Les températures du mois de janvier 2007 se situent au-dessus de la normale mensuelle à la station météorologique de Baie-Comeau avec une anomalie positive de 2,2 °C et les précipitations y sont inférieures avec une anomalie négative de 28,6 mm. Les tiges des unités de silt marin des stations 1 et 3 sont réinsérées au cours de la visite du 5 et 6 janvier 2007¹⁴ (figures 4.20 et 4.21).

Le mois de janvier 2007 est caractérisé par des évènements de recul de la falaise qui entraînent le bris des tiges des unités de silt marin et de silt intertidal de la station 1 le 7 janvier (vers 23 h 00 dans la nuit du 7 au 8 janvier 2007¹⁵) et le 8 janvier 2007, respectivement (figure 4.21 et tableau 4.10). La tige de l'unité de silt intertidal est brisée à la hauteur du iB4, et 9 *iButtons* sont perdus, et 3 *iButtons* sont retrouvés et sont fonctionnels (iB1, iB2 et iB3). La tige de l'unité de silt marin est elle aussi brisée mais les 12 *iButtons* seront récupérés lors de la visite du 9 février 2007. Ces dommages importants marquent la fin de l'acquisition de données pour l'ensemble de la station 1. Au moment de ces perturbations majeures, les conditions climatiques sont caractérisées par le retour de températures négatives faisant suite à un redoux d'une durée d'un peu plus de 3 jours et à des pluies hivernales (6 janvier en fin de journée, 14 mm).

¹⁴ À la station 1 (unité de silt marin), la tige est réinsérée puisque les 12 *iButtons* étaient à l'extérieur de la falaise à la suite du recul du 7 décembre 2006. À la station 3 (silt marin), la tige est réinsérée puisque qu'elle avait été trouvée au pied de la falaise à la suite de la perturbation du 6 décembre 2006.

¹⁵ Au moment du recul du 7 janvier, la marée est à son plus bas à 0,6 m à 23 h 01 à Baie-Comeau, ce qui exclut l'action des agents hydrodynamiques dans l'activation de ce recul.

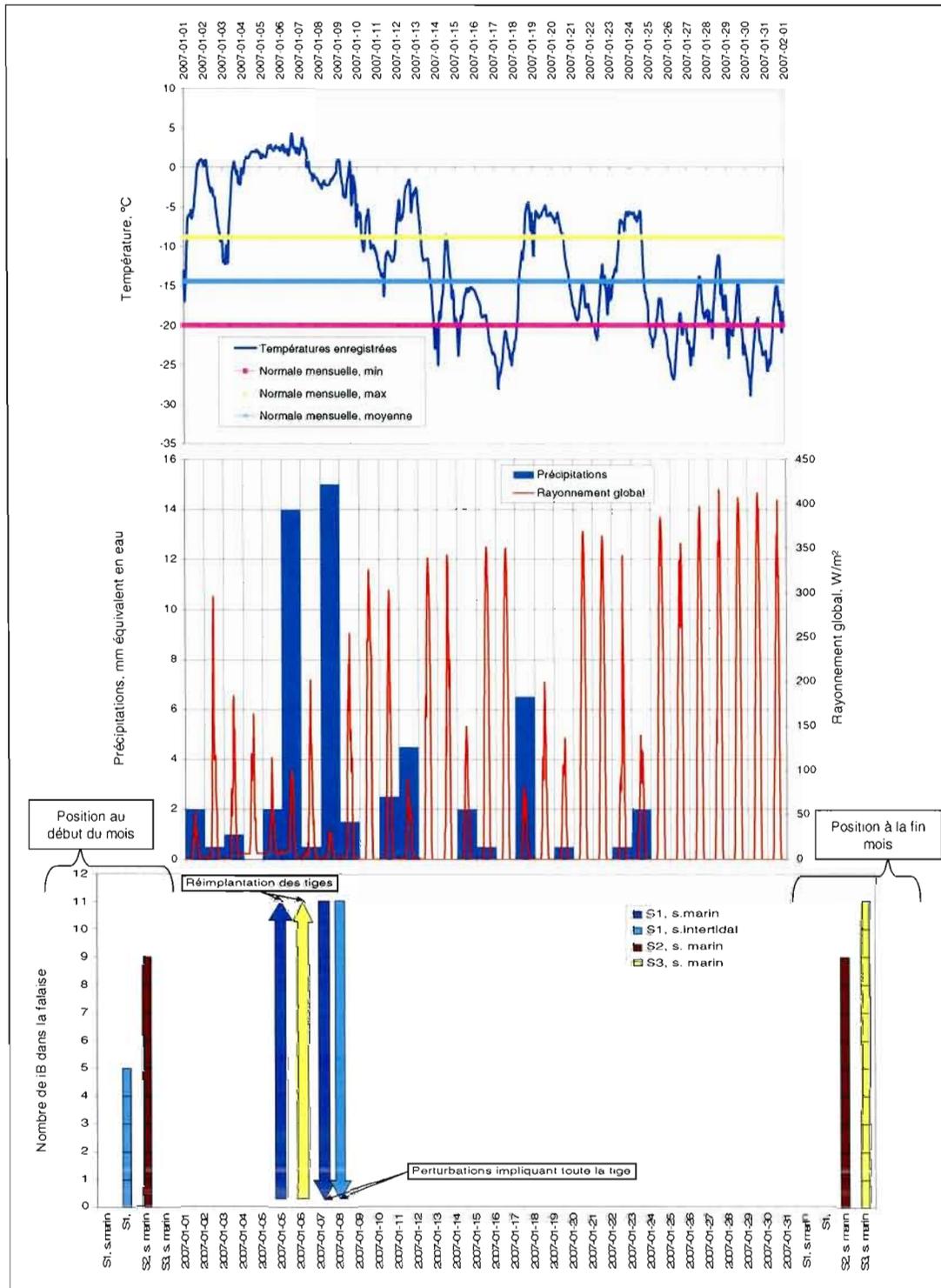


Figure 4.20. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de janvier 2007 à Ragueneau.



Figure 4.21. Réinsertion de la tige dans le silt marin à la station 1 le 6 janvier 2007.

Tableau 4.10.

Reculs des falaises observés au mois de janvier 2007 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et grande situation climatique associés	No des iB impliqués	No de station
7 janvier 2007	<p>Recul précédé par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Températures positives durant 4 jours - Pluies hivernales (14 mm) <p>Recul enregistré sous conditions de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Retour des températures négatives - Précipitation (pluie et neige 0,5 mm) <p><i>Redoux</i></p>	Toute la tige (bris)	S1, silt marin
8 janvier 2007	<p>Recul précédé par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redoux du 4 au 7 janvier - Pluies hivernales du 6 janvier (14 mm) <p>Recul enregistré sous conditions de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Températures négatives <p><i>Redoux</i></p>	Toute la tige (bris)	S1, silt intertidal

4.2.5 Février 2007

Les températures enregistrées au cours du mois de février 2007 figurent près des normales avec une anomalie négative de seulement 0,3 °C et les précipitations se situent sous la normale mensuelle avec une anomalie négative de 28 mm enregistrée à la station météorologique de Baie-Comeau. Au cours du mois de février, les températures sont globalement froides et très froides et ne seront positives qu'au cours de la seule journée du 24 février (maximum de 1,7 °C) (figure 4.22). Aussi, on remarque qu'à partir de la mi-février, on commence à observer des valeurs de rayonnement global qui s'élèvent à plus 500 W/m².

Au cours de ce mois, on enregistre un seul recul de la falaise. L'évènement se produit le 26 février (figure 4.23 et tableau 4.11). Lors de ce recul impliquant le iB4 de la station 2 (silt marin), la température est négative (entre -13 °C et -2 °C) et les valeurs de rayonnement global sont importantes (maximum de 490 W/m²).

Tableau 4.11.
Reculs des falaises observés au mois de février 2007 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et grande situation climatique associée	No des iB impliqués	No de station
26 février 2007	Températures négatives Valeurs de rayonnement global élevées <i>Cycle de gel-dégel (dans la falaise)</i>	iB4	S2, silt marin

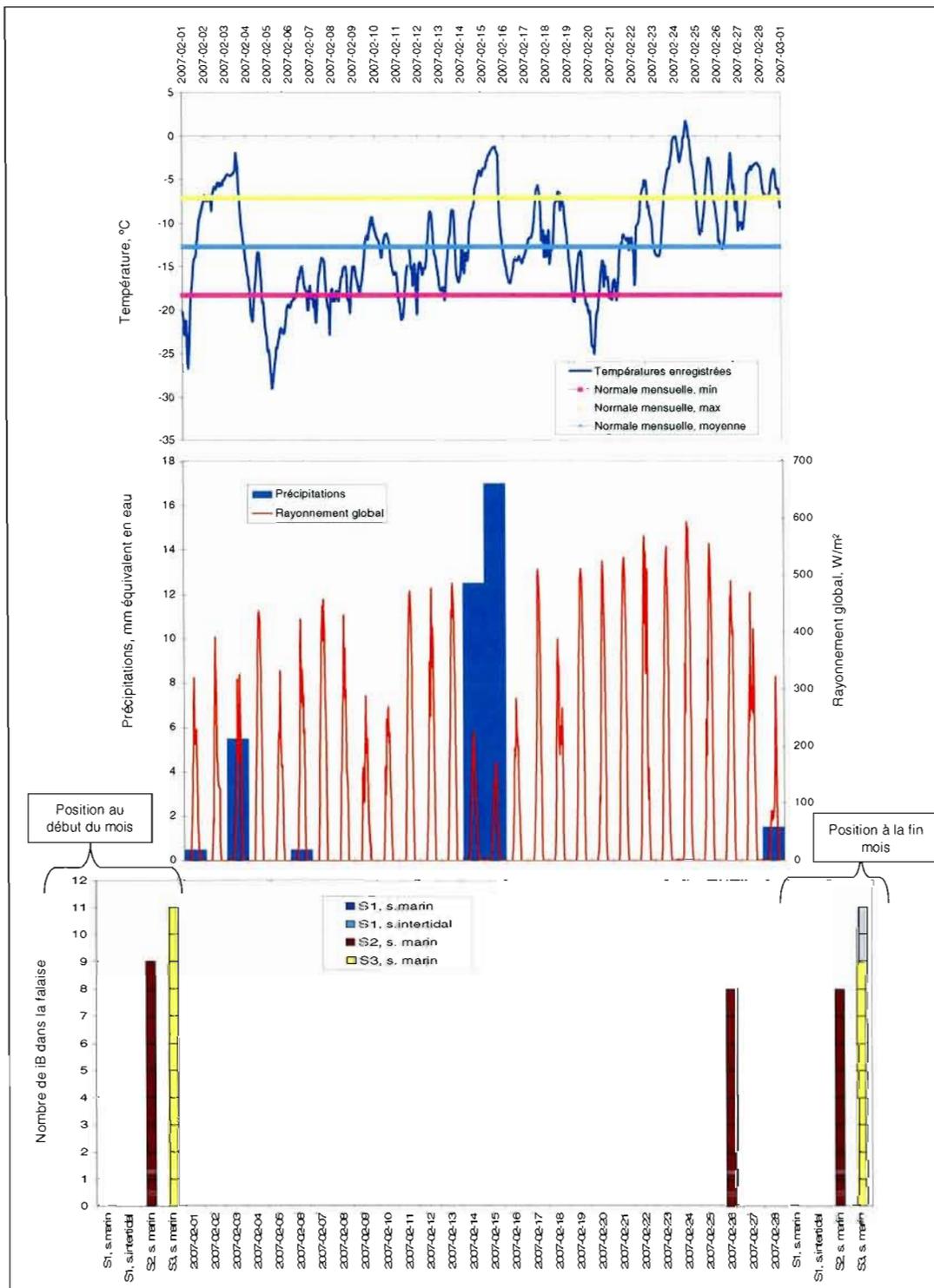


Figure 4.22. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de février 2007 à Ragueneau.

4.2.6. Mars 2007

Les températures du mois de mars 2007 sont sous les normales mensuelles à la station météorologique de Baie-Comeau avec une anomalie négative de 0,9 °C et les précipitations figurent dans les normales avec une anomalie négative de seulement 3,5 mm (figure 4.23).

Au cours du mois, on enregistre la sortie de 6 *iButtons* répartis entre les deux tiges encore en place (figure 4.24 et tableau 4.12). Les reculs de la falaise du 1^{er}, 16 et 23 mars se produisent sous l'effet des cycles de gel-dégel. Le premier évènement de recul observé implique la sortie du iB5 (station 2, silt marin). Ce jour-là, on enregistre des températures froides (entre -6,5 °C et -16,4 °C) et des valeurs de rayonnement global importantes (maximum de 578 W/m²). Malgré que la température de l'air soit négative, on observe un cycle de gel-dégel dans la falaise (iB5). Puis, à la station 3 (silt marin), on observe un recul ayant provoqué la sortie du iB4¹⁶ le 16 mars. La température de l'air est négative (entre -8,2 et -18 °C) mais accompagnée de valeurs de rayonnement global élevées (652 W/m²). Le iB4 enregistre un cycle de gel-dégel dans la falaise. Puis, à la suite de la fonte du couvert nival¹⁷ le 22 mars (pluie), on observe la sortie du iB6 le 23 mars¹⁸. Ce recul se produit alors que la température de l'air enregistre un cycle de gel-dégel et que les valeurs de rayonnement global sont

¹⁶ Notez que les iB2 et iB3 sont défectueux depuis le 24 novembre, si bien qu'il est impossible d'identifier leurs dates de sortie. Cependant, à la lumière des visites de terrain, ce ou ces évènements de recul de la falaise impliquant les iB2 et iB3 se sont produits entre la visite du 9 février (iB1 à l'extérieur de la falaise) et celle du 8 mars (iB1, iB2 et iB3 à l'extérieur de la falaise). La visite de terrain effectuée le 16 mars, nous permet de valider ce recul puisque les quatre premiers *iButtons* sont à l'extérieur de la falaise.

¹⁷ Un couvert nival s'installe le 17 mars.

¹⁸ La visite de terrain du 25 mars confirme la sortie du iB6 et l'on compte désormais 58 cm qui séparent le premier *iButton* de la surface de la falaise.

élevées (692 W/m^2). Enfin, le rythme d'érosion est maintenu avec les reculs du 28 et 29 mars 2007 qui impliquent la sortie des iB7 et iB8 à la station 2 (silt marin) et du iB5 à la station 3 (silt marin). Ces reculs sont associés à des conditions de dégel printanier. Les températures enregistrent alors des cycles de gel-dégel et les valeurs de rayonnement global sont importantes (supérieures à 700 W/m^2).

Tableau 4.12.
Reculs de la falaise observés au mois de mars 2007 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et grande situation climatique associée	No des iB impliqués	No de station
1 ^{er} mars 2007	Températures de l'air négatives Valeurs de rayonnement global élevées (582 W/m^2) <i>Cycle de gel-dégel (dans la falaise)</i>	iB5	S2, silt marin
16 mars 2007	Températures de l'air négatives Valeurs de rayonnement global élevées (652 W/m^2) <i>Cycle de gel-dégel (dans la falaise)</i>	iB4	S3, silt marin
23 mars 2007	Fusion du couvert nival Cycle de gel-dégel Valeurs de rayonnement global élevées (692 W/m^2) <i>Cycle de gel-dégel (dégel de la falaise)</i>	iB6	S2, silt marin
28 mars 2007	Cycle de gel-dégel Valeurs de rayonnement global élevées (760 W/m^2) <i>Dégel printanier</i>	iB7	S2, silt marin
29 mars 2007	Cycle de gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (762 W/m^2) <i>Dégel printanier</i>	iB8	S2, silt marin
		iB5	S3, silt marin

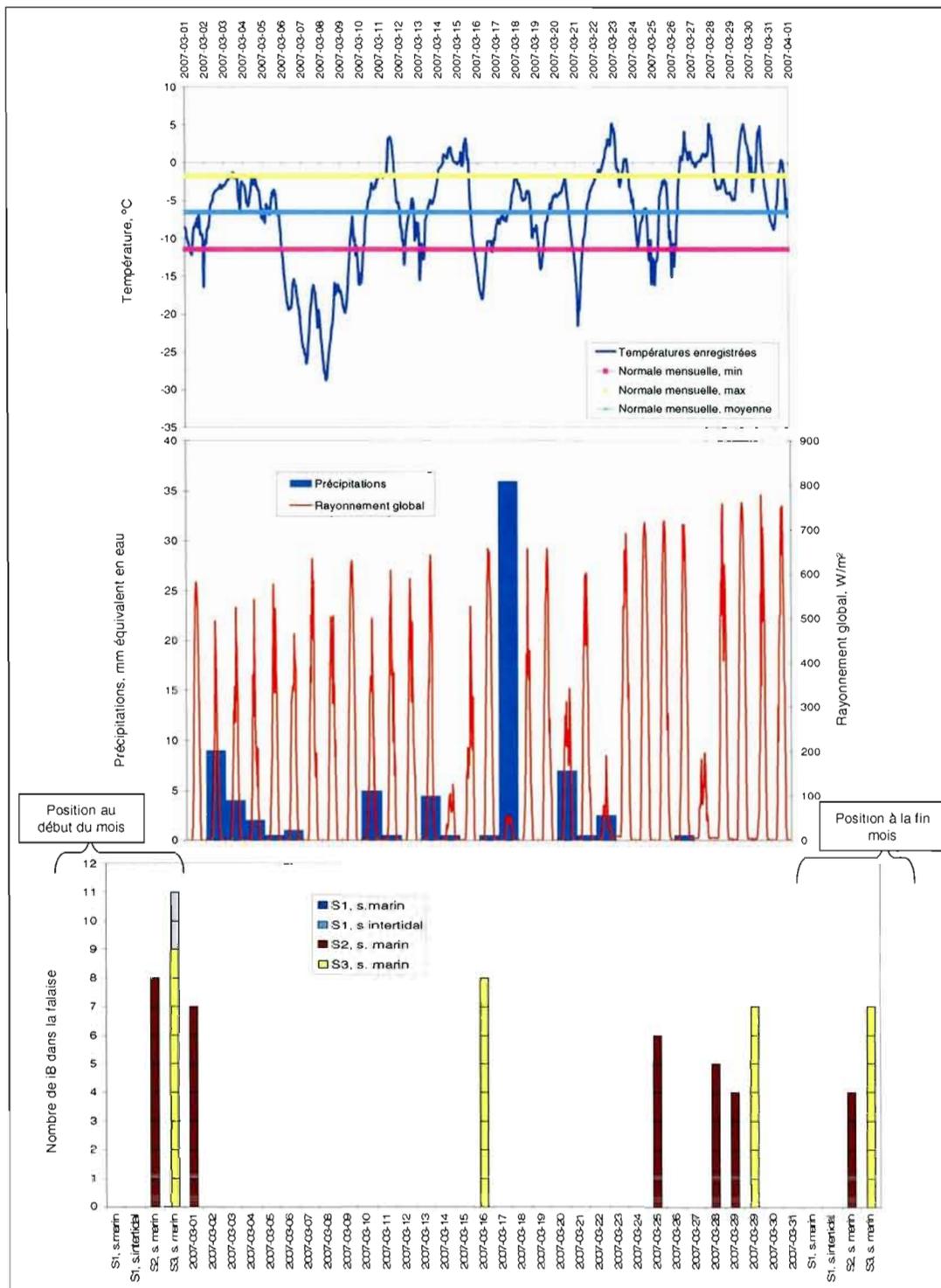


Figure 4.23. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois de mars 2007 à Ragueneau.

4.2.7. Avril 2007

Les températures du mois d'avril 2007 figurent dans les normales à la station météorologique de Baie-Comeau avec une anomalie positive de 0,3 °C et les précipitations sont moins importantes avec une anomalie négative de 60,3 mm (figure 4.24). Le mois d'avril est aussi caractérisé par la période de dégel printanier.

Au cours de ce mois, on observe 4 reculs impliquant la sortie d'un *iButton* chacun et tous observés à la station 2 sous des conditions de dégel printanier (figure 4.25 et tableau 4.13). La période d'acquisition de données pour la saison 2006-2007 prend fin avec le relevé de terrain du 15 avril 2007. Au moment du retrait des deux tiges restantes, les 12 *iButtons* de la station 2 sont à l'extérieur de la falaise. À la station 3, par contre, les iB8 à iB12 sont dans la falaise alors que les iB6 et iB7 sont enfouis dans une couche de sédiments altérés par le gel et affaissés sous l'effet du dégel printanier.

À la station 2, lors de la visite de terrain du 2 avril, on compte 8, presque 9, *iButtons* à l'extérieur pour une distance entre le premier *iButton* et la surface de la falaise de 80 cm. Cela signifie que le 9^e *iButton*, bien qu'il soit partiellement visible, se situe tout juste à la limite de l'unité de silt marin de la station 2. La signature thermique du recul impliquant le iB9 à la station 2 (silt marin) apparaît quelques jours plus tard, soit le 6 avril. Les conditions climatiques qui prévalent le jour précédent le recul et le jour même sont caractérisées par des vents du nord dont les rafales soufflent à 74 km/h et 70 km/h, respectivement, accompagnés de neige dont l'équivalent en eau totalise 6,5 mm et 4,0 mm. Il s'agit d'une tempête printanière qui origine de la combinaison de deux systèmes dépressionnaires en provenance des Grands Lacs et de la Nouvelle-Angleterre (CRIACC, 2005-2009). Les températures varient sur une faible amplitude, mais traversent toutefois le point de congélation en

passant de $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour ces deux journées. Les reculs suivants se produisent les 10, 11 et 12 avril et affectent les iB10, iB11 et iB12. Les conditions climatiques qui prévalent alors sont celles du dégel printanier avec des températures marquées par des cycles de gel-dégel selon un rythme diurne-nocturne et des valeurs de rayonnement global élevées. Pour ces quatre reculs, on enregistre des cycles de gel-dégel dans la falaise.

Tableau 4.13.
Reculs des falaises observés au mois d'avril 2007 à Ragueneau

Date des reculs	Conditions climatiques et grande situation climatique associée	No des iB impliqués	No de station
6 avril 2007	Recul précédé par : - Températures négatives et positives près de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ - Précipitations (neige, 6,5 mm) - Vents violents (rafales de 74 km/h) Recul enregistré sous des conditions de : - Températures négatives et positives près de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ - Précipitations (neige, 4 mm) - Vents violents (rafales de 70 km/h) <i>Tempête</i>	iB9	S2, silt marin
9-10 avril 2007	Cycles de gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées <i>Dégel printanier</i>	iB10	S2, silt marin
11 avril 2007	Cycles de gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées <i>Dégel printanier</i>	iB11	S2, silt marin
12 avril 2007	Cycles de gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées <i>Dégel printanier</i>	iB12	S2, silt marin

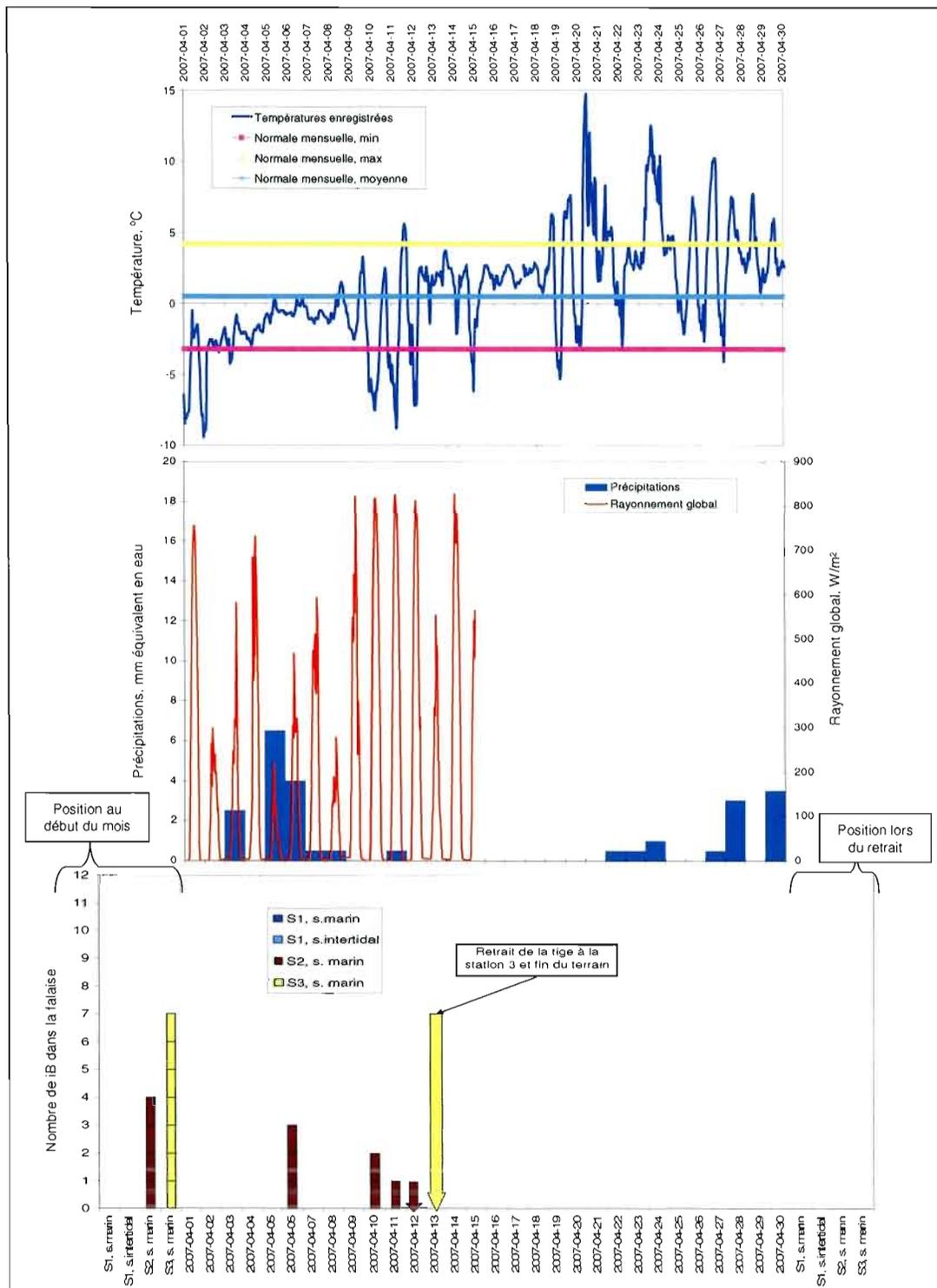


Figure 4.24. Conditions climatiques et reculs des falaises observés au mois d'avril 2007 à Ragueneau.

Ce bilan mensuel nous a permis d'identifier les évènements de recul de la falaise impliquant la sortie de *iButtons* durant les deux saisons d'acquisition de données. Seuls quelques rares reculs n'ont pu être identifiés. Dans la section suivante (4.3), on expose les limites de la méthode et les différentes situations pouvant expliquer l'absence de signatures thermiques permettant d'identifier la date de sortie d'un *iButton*. L'identification des reculs sur une base quotidienne, grâce à l'analyse des signatures thermiques (appendice A), nous a permis d'associer les évènements d'érosion aux conditions climatiques qui prévalent au moment du recul et aux conditions climatiques des jours précédents susceptibles d'influencer ces reculs. En ce sens, les nombreuses visites de terrain se sont avérées essentielles à la compréhension des processus d'érosion qui entraînent l'évolution des falaises, ce qui assure une interprétation cohérente entre l'érosion et le climat. Dans le chapitre suivant (chapitre 5), on propose une interprétation et une discussion des résultats ainsi que de la relation entre l'érosion et les conditions climatiques.

4.3. Limites de la méthode

La nouvelle méthodologie utilisée comporte des limites qui se sont traduites par la perte de données et par des difficultés dans l'analyse des données de température (signatures thermiques) servant à l'identification des reculs de la falaise. Somme toute, la date de sortie de seulement quelques uns des *iButtons* n'a pu être identifiée en raison de ces difficultés et limites.

4.3.1. Perte de données

Sur le terrain, cette méthode de suivi intrusive rencontre des limites ou des risques liés au milieu extrêmement dynamique dans lequel elle s'applique. Les évènements de recul de grande ampleur, tels que les glissements en plan, peuvent engendrer le bris des tiges ou leur délogement et générer des hiatus dans les données. Par exemple, lors des évènements du 7 et du 8 janvier 2007, des tiges ont été brisées et des *iButtons* ont été perdus, ce qui nous a obligé à mettre fin au suivi pour les stations affectées. Pour limiter la perte de données attribuables au délogement des tiges par l'érosion, des cordages de sécurité avaient été attachées aux tiges. Cependant, d'après Bernatchez, Jolivet et Corriveau (soumis, 2010), ces cordages présentent certains désavantages. Ces attaches peuvent être prises dans les glaces et générer des tensions sur les tiges susceptibles de les déloger ou du moins d'en modifier la position et de corrompre les données (ex. station 3, silt marin, 6 décembre 2006). À la suite de ces premières expérimentations, ces derniers ne recommandent pas l'usage d'attaches. Néanmoins, au cours de cette étude, le cordage de sécurité a permis de sauver du matériel et des données (ex. station 1, silt marin, 30 janvier 2006). En raison des taux d'érosion importants sur le site d'étude, il est arrivé que les 12 *iButtons* soient dégagés par l'érosion. Cette situation génère également des hiatus dans le suivi d'une durée allant de la sortie du iB12 jusqu'au moment de la réinsertion de la tige. Au cours des campagnes de terrain, les réinsertions de tiges à la suite de l'érosion complète des 12 *iButtons* (ex. station 1, silt marin, non instrumenté entre le 7 décembre 2006 et réinsertion le 6 janvier 2007) ou à la suite de leur délogement (ex. station 3, silt marin, non instrumenté entre le 6 décembre 2006 et le 6 janvier 2007) se sont produits à plus d'une reprise et constituent un travail supplémentaire sur le terrain.

Des pertes de données sont aussi attribuables au matériel utilisé dans ce projet. Ainsi, l'humidité a provoqué le bris de quelques capteurs de température *iButtons*. Une amélioration de l'étanchéité des tiges devrait permettre de limiter ce genre de bris. Notons aussi que certains *iButtons* ont développé une défectuosité qui semblait lié à leur fabrication en usine et non aux conditions d'utilisation (impossibilité de programmation et d'accès aux données mais accès aux interfaces et communication partielle possible).

4.3.2. Problèmes d'identification des évènements de recul de la falaise

Les évènements de recul impliquant la sortie d'un *iButton* ne sont pas toujours clairement visibles à travers les signatures thermiques pour plusieurs raisons. D'une part, certaines conditions climatiques engendrent l'isothermie des températures de l'air et des *iButtons* et, d'autre part, la morphologie de la falaise peut venir brouiller la lecture des évènements de recul.

4.3.2.1. Isothermie des températures de l'air et des *iButtons*

Lorsque les conditions climatiques favorisent une isothermie entre les températures enregistrées à l'extérieur et à l'intérieur de la falaise, il devient difficile d'identifier le jour exacte du recul. L'isothermie entre les différentes signatures thermiques des *iButtons* ne permet pas de connaître leur position par rapport à la surface de la falaise. Les précipitations, de même que les journées consécutives pour lesquelles on enregistre de très faibles amplitudes thermiques et une nébulosité importante, semblent favoriser ce type de situation. Les résultats de l'étude de Lewkowicz (2001) réalisée sur les températures de surface d'une tor sur l'île

d'Ellesmere (Canada) où l'on voyait disparaître les écarts entre les températures de l'air et celles des matériaux lors de la nuit polaire, se reproduisent ici sur de courtes périodes d'isothermie, lorsque les radiations sont particulièrement faibles. Par exemple, on observe à la figure 4.25, des températures très similaires pour l'ensemble des *iButtons* le 15 et le 16 octobre 2005. Cette situation est attribuable aux précipitations (pluie) qui ont lieu ces jours-là (23 mm et 30,5 mm, respectivement).

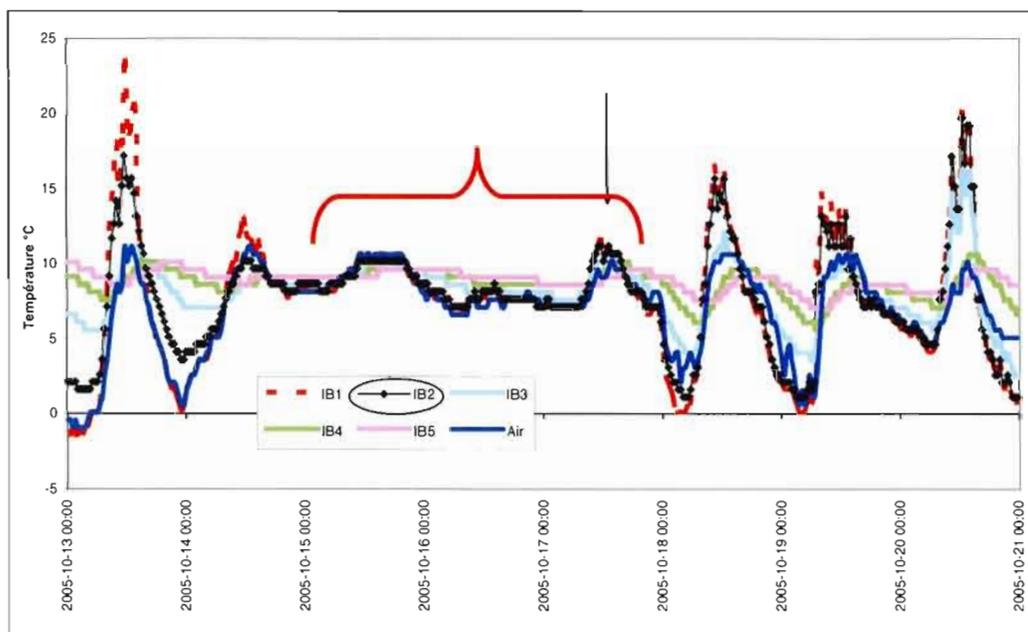


Figure 4.25. Isothermie des températures observées les 15 et 16 octobre 2006 et signature du recul de la falaise du 17 octobre impliquant le iB2 de l'unité de silt marin à la station 3.

4.3.2.2. Position des *iButtons* et morphologie des falaises

La position d'un *iButton* à la limite externe de la surface de la falaise est une des circonstances qui engendrent des problèmes d'interprétation puisqu'il devient difficile de reconnaître clairement la position du *iButton* (figure 4.26). Les conditions thermiques y sont ambiguës puisque le *iButton* demeurent largement influencé par les

propriétés thermiques des matériaux de la falaise. Les suivis de terrain nous ont permis d'observer ce genre de situation et se sont avérés essentiels à une interprétation cohérente des signatures thermiques enregistrées par les *iButtons* dans cette position.



Figure 4.26. Exemple d'un *iButton* à la limite externe de la falaise engendrant des difficultés dans l'analyse des signatures thermiques à la station 1.

Une ambiguïté dans la reconnaissance de la position intérieure ou extérieure des *iButtons* durant le suivi est aussi attribuable à la morphologie des falaises. En effet, bien qu'au moment de l'implantation des tiges celles-ci étaient perpendiculaires à la surface, l'érosion des falaises a permis, à certaines occasions, de développer une asymétrie entre le haut et le bas de la tige. Les *iButtons* peuvent alors être exposés au-dessus de la tige et en contact avec le matériel au-dessous de la tige (figures 4.27 et 4.28). Cette situation provoque de la confusion dans l'interprétation des températures et rend impossible l'identification du recul de la falaise ayant mené au dégagement partiel du *iButton* concerné.



Figure 4.27. Morphologie asymétrique de la surface de la falaise soulevant des difficultés dans l'analyse des signatures thermiques des *iButtons*.

Note : On voit sur l'image de droite que les 2^e et 3^e *iButton* sont dégagés par l'érosion. Par contre, alors qu'ils sont exposés au dessus de la tige, ils demeurent en contact avec le silt marin sous la tige.

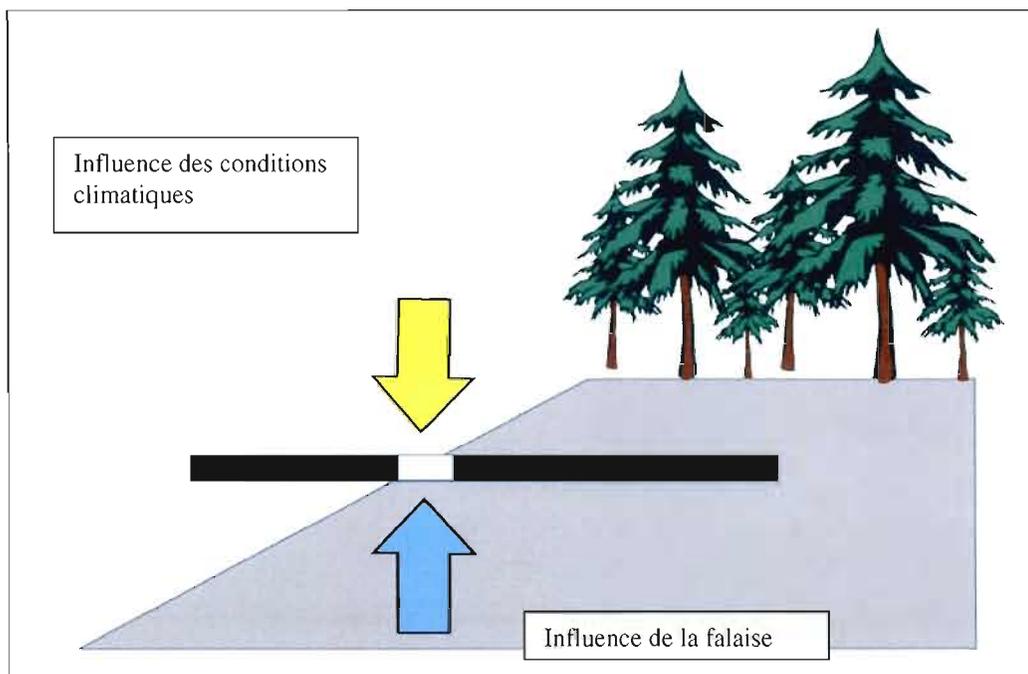


Figure.4.28. Schéma du développement d'une pente douce soulevant des difficultés dans l'analyse des signatures thermiques des *iButtons*.

Lorsque la tige est implantée près de la surface supérieure de l'unité¹⁹ et que les unités sus-jacentes subissent un recul permettant la formation d'un plateau, le rayonnement solaire est en mesure d'affecter les températures des matériaux (et donc des *iButtons* à l'intérieur de la falaise). Cette situation peut compliquer l'interprétation des comportements thermiques des *iButtons* en multipliant les surfaces pouvant être réchauffées par l'énergie solaire (figure 4.29).

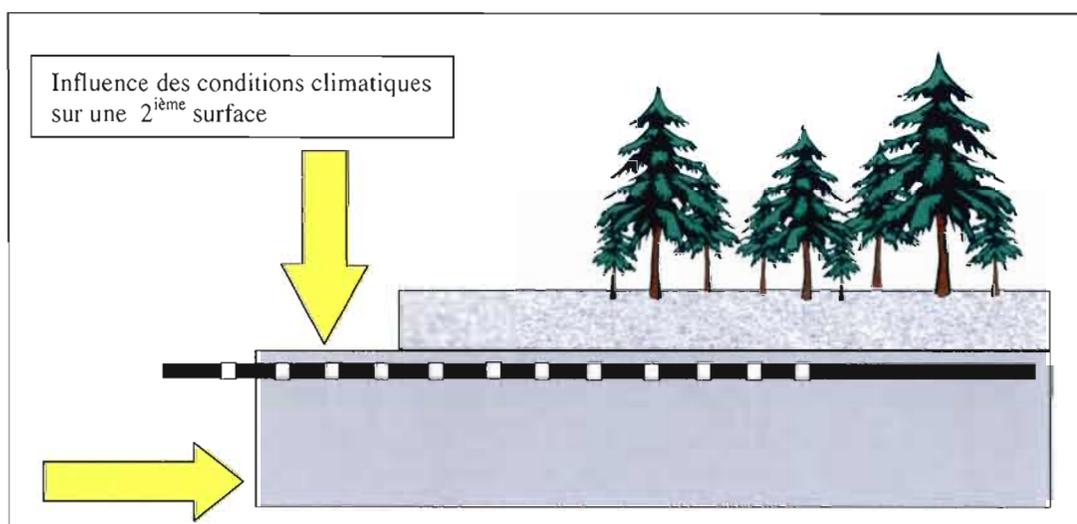


Figure.4.29. Schéma du développement d'un plateau à la suite du recul de l'unité supérieure permettant aux conditions climatiques d'influencer les comportements thermiques des *iButtons* depuis une surface supplémentaire (horizontale).

Nous avons également observé, à la station I, que la présence d'un important débord organique amenait les conditions climatiques près de la falaise vers une situation soulevant la confusion quant à la position interne ou externe du *iButton* (figure 4.30). En effet, ce type d'environnement favorise des écarts de températures

¹⁹ Nous avons dû planter certaines tiges très haut dans l'unité de silt marin pour ne pas qu'elles soient submergées ou intégrées dans le pied de glace. Il est préférable de positionner la tige assez haut pour éviter ces situations en reconnaissant toutefois qu'il est possible que l'évolution des unités supérieures puissent venir à l'occasion influencer légèrement les températures des *iButtons* positionnés à l'intérieur de la falaise.

de plus faibles amplitudes en limitant le réchauffement des surfaces sous l'effet du rayonnement solaire.

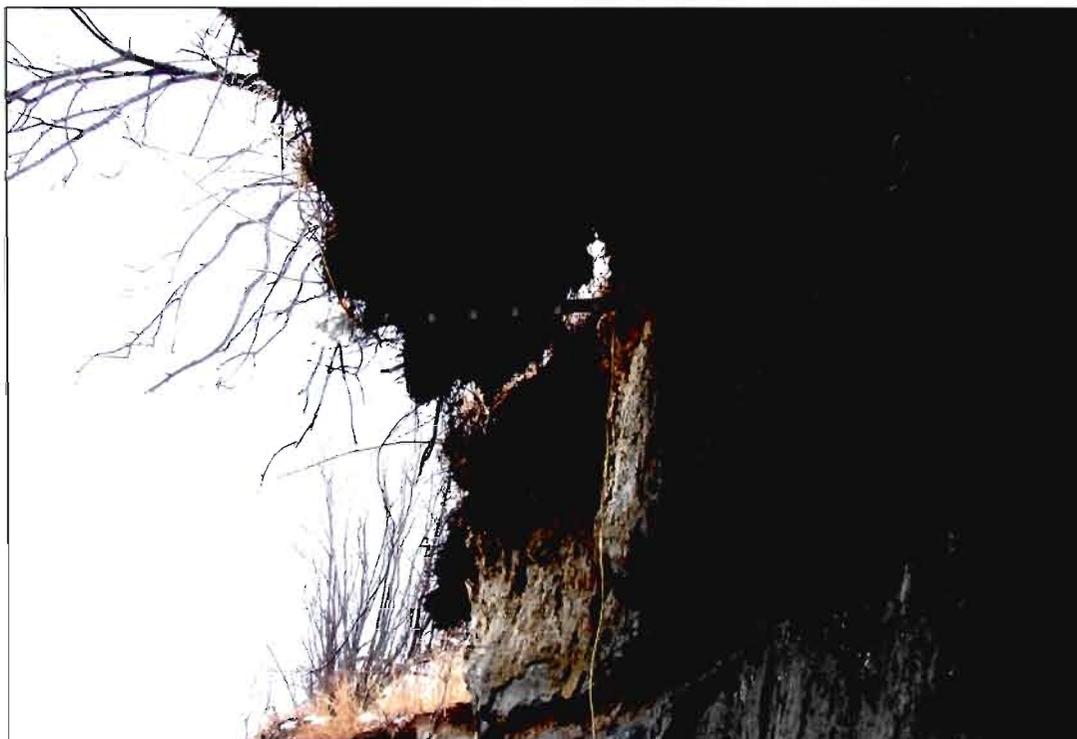


Figure 4.30. Débord organique observé à la station 1 le 22 décembre 2006.

Alors que les suivis ayant la plus haute résolution temporelle connu à ce jour sont mensuels et, à l'occasion, hebdomadaire (Bernatchez et Dubois, 2008; Manson, 2002), cette méthode permet l'identification des reculs de la falaise impliquant la grande majorité des capteurs à l'intérieur d'un délai minimum de 30 minutes. Le délai maximal s'élève à tout au plus 3 jours d'après notre évaluation. Dans ce contexte, cette nouvelle méthode de suivi permet de loin un meilleur couplage entre les événements d'érosion et les paramètres climatique qui les engendrent.

CHAPITRE V

IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS CLIMATIQUES ET ENVIRONNEMENTALES SUR L'ÉVOLUTION DES FALAISES

Dans les sections suivantes, les évènements de recul de la falaise des deux saisons d'acquisition de données sont présentés en fonction de grandes situations climatiques que nous identifierons et définirons dans un premier temps. Pour chacune d'entre elles, leur importance relative dans l'érosion des falaises et l'intensité des reculs générés sont présentés et discutés. Aussi, les modes de recul et les processus associés à ces grandes situations climatiques sont expliqués de même que les différences entre les silts marins des trois stations. Compte tenu des particularités qui lui sont propres, le silt intertidal est présenté dans une section distincte au début du chapitre.

5.1. Identification et définition des grandes situations climatiques ayant engendré des évènements de reculs dans les falaises

À la suite de l'analyse des signatures thermiques et des observations réalisées lors des multiples campagnes de terrain, il a été possible d'identifier les évènements de recul de la falaise aux stations de mesures tout au long des deux saisons

d'acquisition de données. Ces évènements de recul ont été associés à quatre grandes situations climatiques:

- les cycles de gel-dégel;
- les redoux hivernaux;
- le dégel printanier;
- les tempêtes.

L'analyse des données climatiques nous ont permis de d'identifier 4 grandes situations climatiques dont 3 qui impliquent différents types de cycles gel-dégel. Ceux-ci se distinguent en fonction de la période ou de la saison à laquelle ils se produisent.

Le premier type de *cycles de gel-dégel* se produit avant le début du régime de température froide et dans les falaises sous des températures négatives durant le régime de température froide. Le début du régime de températures froides est variable d'une année à l'autre et est déterminé à partir de l'analyse spectrale des températures de l'air. Le régime de température froide débute avec un abaissement des températures de l'air sous 0 °C combiné à un maintien général des températures dans les valeurs négatives. Pour la saison 2005-2006, le début du régime de températures froides est daté du 3 décembre 2005 (figure 5.1). Pour la saison 2006-2007, le début du régime de températures froides est daté du 1^{er} décembre 2005 (figure 5.2).

Le second type de cycles de gel-dégel appartient à la grande situation climatique des *redoux hivernaux*. Les redoux hivernaux sont définis ici comme une période pendant laquelle on enregistre des températures positives à l'intérieur d'un régime de températures froides. Notons que les températures des redoux n'ont pas eu

besoin d'être très élevées pour engendrer l'érosion des falaises (entre 0 °C et 2,5 °C environ avec un maximum de 4,3 °C).

Le troisième type de cycles gel-dégel est associé au *dégel printanier*. Cette grande situation climatique est d'assez courte durée et se produit principalement à partir de la fin mars jusqu'à la mi-avril. Le début du dégel printanier est daté grâce à l'analyse spectrale des températures. Les températures de l'air sont alors marquées par des valeurs positives durant les périodes diurne de même qu'une hausse générale. Pour la saison 2005-2006, le début du dégel est daté du 13 mars et, pour la saison 2006-2007, du 26 mars (figures 5.3 et 5.4). On observe différentes conditions propices à l'érosion des falaises durant la période de dégel printanier, soit les journées où l'on enregistre des températures de l'air positives et les journées où l'on enregistre un cycle de gel-dégel selon le rythme diurne-nocturne et combiné à des valeurs de rayonnement global élevées (supérieures à 500 W/m²).

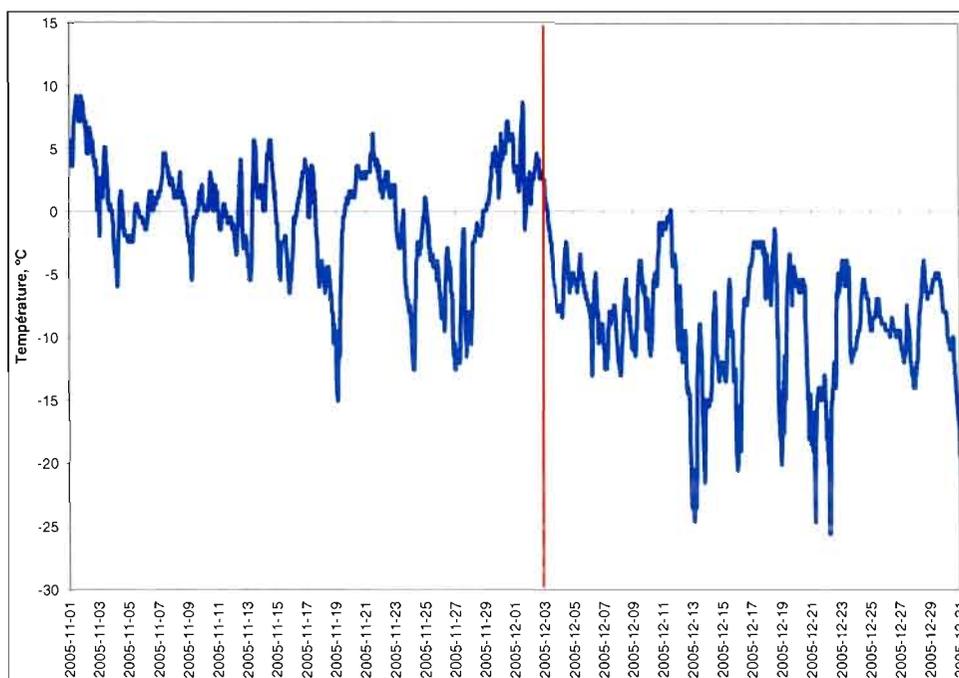


Figure 5.1. Identification du début du régime de températures froides de la saison 2005-2006 le 3 décembre 2005 à Ragueneau.

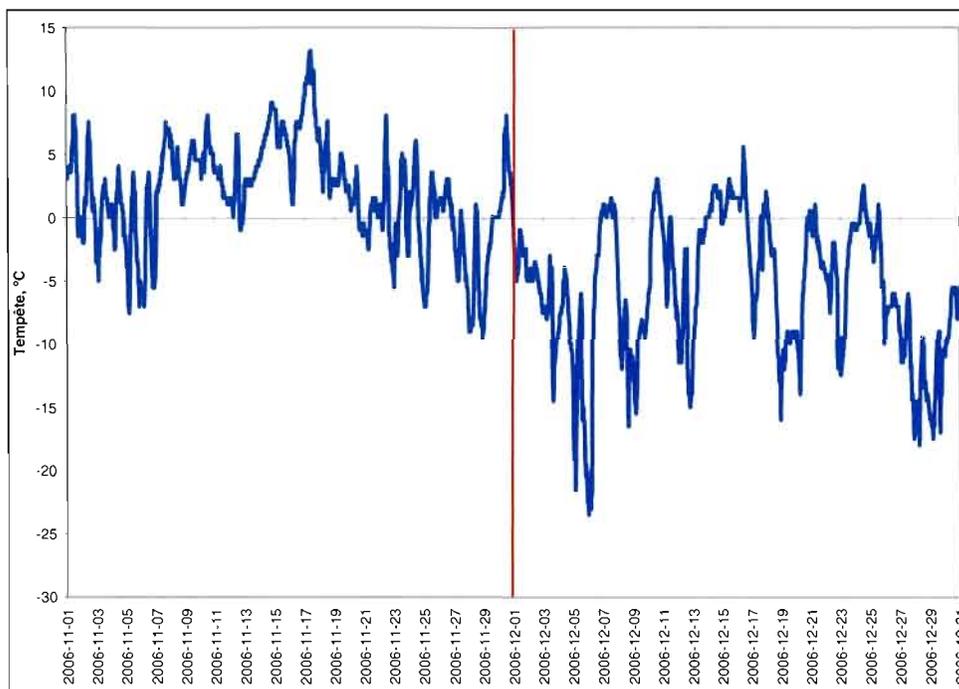


Figure 5.2. Identification du début du régime de température froide de la saison 2006-2007 le 1^{er} décembre 2006 à Ragueneau.

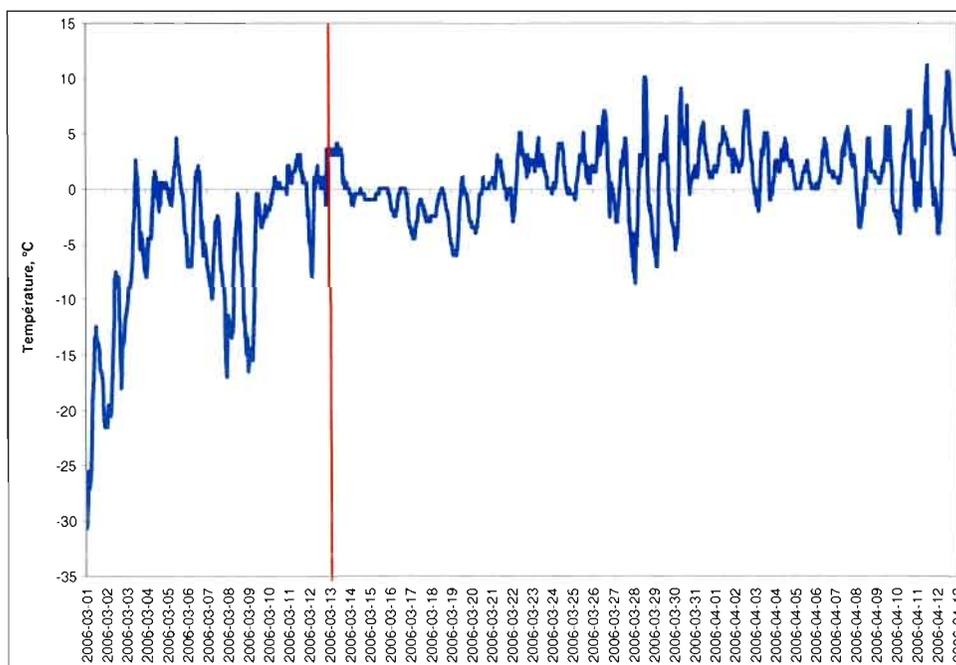


Figure 5.3. Identification de la fin du régime de températures froides et du début du dégel printanier de la saison 2005-2006 le 13 mars 2006 à Ragueneau.

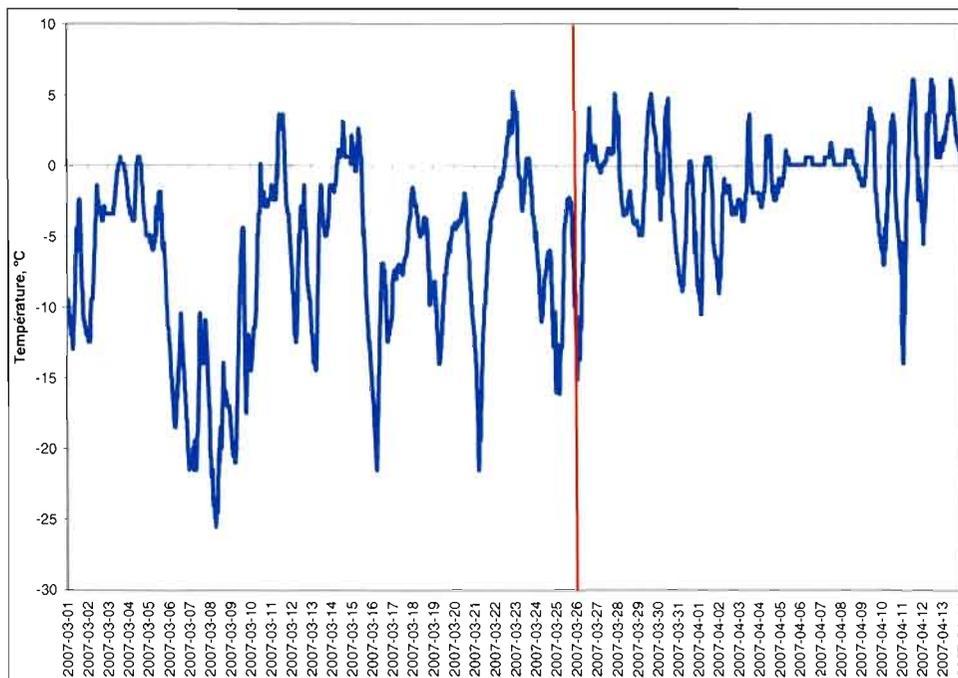


Figure 5.4. Identification de la fin du régime de températures froides et du début du dégel printanier de la saison 2006-2007 le 26 mars 2006 à Raguenu.

Enfin, nous avons classifié sous le terme de *tempête* les épisodes climatiques au cours desquels les rafales de vents maximales étaient supérieures à 65 km/h et accompagnés par des précipitations abondantes ou non. Cette classification est fonction de la recension des évènements mensuels marquants décrits dans les suivis mensuels du CRIACC (2005-2009) et par les évènements de recul des falaises identifiés lors des saisons d'acquisition de données. Les descriptions des évènements marquants par le CRIACC permettent notamment de connaître l'effet de conditions climatiques sur le terrain (dommages matériels, fermeture de route, etc). Nous n'avons retenu aucune des définitions rencontrées dans la littérature ou adoptées par les organismes météorologique, tel que Environnement Canada, puisque les données météorologiques interprétées selon une définition fixe de tempête ne permettaient pas d'identifier les évènements ayant eu un impact sur les falaises du site d'étude.

5.2. Évolution du silt intertidal

Les reculs observés dans l'unité de silt intertidal à la station 1 sont en partie fonction de l'évolution de la base de la falaise (silt marin) (tableau 5.1). Par exemple, le recul enregistré dans l'unité de silt intertidal lors de la tempête du 28-29 octobre est synchrone à celui du silt marin. Une partie du recul de l'unité de silt intertidal se produit sous l'effet de la gravité avec le recul de la base de la falaise. Cependant, l'évolution du profil de la falaise entre, un profil légèrement convexe vers un profil légèrement concave dans les unités supérieures, indique qu'une autre partie de ce recul est imputable à la suffosion dans l'unité de sable située entre le silt marin et le silt intertidal (figure 5.5). Les pluies abondantes²⁰ qui ont eu lieu durant le mois et lors de la tempête ont permis d'alimenter suffisamment l'écoulement souterrain pour activer la suffosion.

²⁰ La tempête (41 mm de pluie) avait été précédée de plusieurs jours de pluie (4, 8, 13, 18, 22, 23, 24 et 25 octobre) et de pluie abondante (12, 19, 20 et 21 octobre) totalisant des précipitations de l'ordre de 159 mm.

Tableau 5.1.
Comparatif des évènements de reculs des unités de silt intertidal et de silt marin
enregistrés à la station 1

Date des reculs	Conditions climatiques et grandes situations climatiques associées au recul	No des iB impliqués, silt intertidal	Processus	Silt marin (station 1)
29 octobre 2006	Recul précédé par : - Plusieurs jours de pluie (159 mm) Recul enregistré sous conditions de : - Vents violents (rafale maximum de 93 km/h) - Précipitations abondantes (pluies, 41 mm) <i>Tempête (28-29 octobre 2006)</i>	iB2 iB3 iB4 iB5 iB6	Gravité et suffosion	Recul des iB2, iB3 et iB4 le 29 octobre
9 novembre 2006	Recul précédé par : - 6 jours consécutifs de cycle de gel-dégel Recul enregistré sous conditions de : - Températures positives - Précipitations (pluie, 1 mm) <i>Cycle de gel-dégel</i>	iB7	Cryoclastie	Aucun recul enregistré
8 janvier 2007	Recul précédé par : - Redoux du 4 au 7 janvier - Pluies hivernales les 6-7 janvier (14,5 mm) Recul enregistré sous conditions de : - Températures négatives <i>Redoux (4-7 janvier 2007)</i>	Toute la tige (12 iButtons) Bris	Gravité	Bris de la tige silt marin nuit du 7 au 8.
26 mars 2006	Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimé) <i>Dégel printanier</i>	iB2 à iB7	Cryoclastie et gravité	ND
2 avril 2006	Vents violents (67 km/h) Précipitations (pluie et neige, 1,5 mm) Température entre 0° C et 5,4° C <i>Tempête</i>	iB8	Cryoclastie et gravité	ND
3 avril 2006	Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimé) <i>Dégel printanier</i>	iB9	Cryoclastie et gravité	ND
6 avril 2006	Températures positives Faibles précipitations (pluie et neige, 1 mm) <i>Dégel printanier</i>	iB10	Cryoclastie et gravité	ND
7 avril 2006	Températures positives Faibles précipitations (pluie, 3,5 mm) <i>Dégel printanier</i>	iB11	Cryoclastie et gravité	ND
8 évènements		28 iButtons		



Figure 5.5. Évolution du profil de la falaise à la station 1
en haut) profil légèrement convexe des unités supérieures le 28 septembre
2006; en bas) profil légèrement concave des unités supérieures le 23
novembre 2006

Puis, lors de la perturbation qui affecte les unités de silt marin et de silt intertidal et qui provoque le bris des tiges les 7-8 janvier, le synchronisme entre l'évolution de ces deux unités indique que le silt intertidal évolue encore une fois par gravité sous l'effet du recul de la base de la falaise. Ces bris surviennent à la suite de températures négatives qui ont suivi les pluies enregistrées en fin de journée du 6 janvier et qui ont sans doute contribué à l'activation de processus cryogéniques, permettant le déclenchement de ce recul. C'est seulement à l'occasion des évènements de recul enregistrés lors du dégel printanier que l'unité de silt intertidal semble évoluer de manière un peu plus indépendante puisque les reculs ne se produisent pas de manière synchrone à ceux observés dans le silt marin. On ne peut corroborer ces observations avec nos résultats puisque, lors du dégel printanier 2006 (mars et avril), il n'y a plus de suivi dans l'unité de silt marin (la tige ayant été délogée et intégrée dans le pied de glace à partir du 30 janvier 2006) et que, lors du dégel printanier 2007, le suivi de la station 1 est interrompu à la suite du bris des tiges survenu les 7 et 8 janvier 2007. Par contre, les observations réalisées sur le terrain indiquent que le silt intertidal gelé permet le développement d'un profil en saillie (figure 5.6). Par exemple, lors de glissements en plan affectant l'unité de silt marin, nous avons observé que l'unité de silt intertidal pouvait rester en place et former un surplomb. L'unité de silt intertidal ayant été déstructurée par le gel est ensuite complètement affaiblie par le dégel qui, combiné à la gravité, finissent par compromettre la stabilité et provoquent son effondrement brusque (jusqu'à 6 *iButtons* ou 60 cm environ) ou progressif (figure 5.7 et tableau 5.1).



Photo : Pascal Bernatchez, 2006

Figure 5.6. État de la falaise à la station 1 et position des *iButtons* dans l'unité de silt intertidal le 25 mars 2006

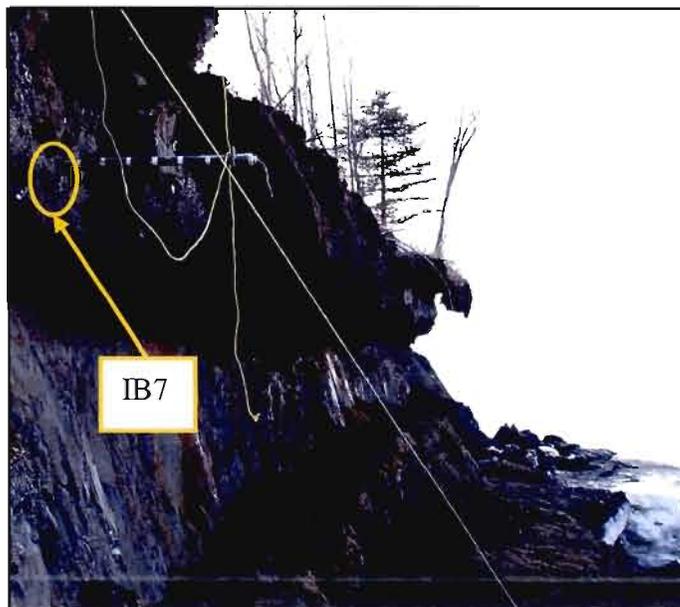


Photo: Pascal Bernatchez, 2006

Figure 5.7. État de la falaise de la station 1 et position des *iButtons* dans l'unité de silt intertidal le 26 mars 2006 (iB7 à peine visible)

Bref, les modes de recul qui affectent l'unité de silt sont principalement associés à la gravité et fonction de l'évolution de la base de la falaise. De plus, la lithostratigraphie de la falaise permet, à l'occasion, le déclenchement de processus hydrogéologiques tel que la suffosion. Enfin, les processus cryogéniques sont aussi responsables du recul de l'unité mais sont indissociables de l'évolution de la base de la falaise. Ainsi, la relation entre les paramètres climatiques et les évènements de recul enregistrés dans le silt intertidal est seulement indirecte. Pour cette raison, nous avons choisi de traiter l'évolution du silt intertidal séparément et de ne pas l'inclure dans la quantification de l'influence des paramètres climatiques sur le déclenchement d'évènements de recul. Nous croyons que cela viendrait induire un biais dans les résultats obtenus. La section suivante présente les résultats obtenus pour les unités de silt marin exclusivement.

5.3. Évolution des silts marins

L'évolution des silts marins est attribuable aux quatre grandes situations climatiques qui sont, en ordre d'importance, les cycles de gel-dégel, les redoux hivernaux, le dégel printanier et les tempêtes. Les figures suivantes, auxquelles nous ferons référence tout au long de cette section, présentent la part relative de chacune des grandes situations climatiques qui ont engendré un recul (N=31) et la part relative du nombre de *iButtons* impliqués dans des reculs en fonction de ces grandes situations climatiques (N=70) (figures 5.8 et 5.9). Par exemple, on comprend à la figure 5.8 que les redoux compte pour 6 % des évènements climatiques qui ont engendré des reculs de la falaise (2 redoux / 31 évènements climatiques) et qu'ils ont dégagé 27 % des *iButtons* touchés par les reculs (19 *iButtons* dégagés par les redoux / 71 *ibuttons* dégagés tout au long des deux périodes de suivis). Le tableau 5.2 présente l'intensité minimum, maximum et moyenne des reculs attribuables à

chacune des grandes situations climatiques. L'intensité moyenne est obtenue en divisant le recul total (en cm) attribuables à une situation climatique par le nombre d'évènement de reculs qu'elle a engendré au cours de la période d'étude. Par exemple, les quatre tempêtes ont engendré un recul totalisant 120 cm en 8 évènements de recul des falaises, ce qui implique que le recul des unités de silt marin attribuable aux tempêtes est d'une intensité moyenne de 15 cm.

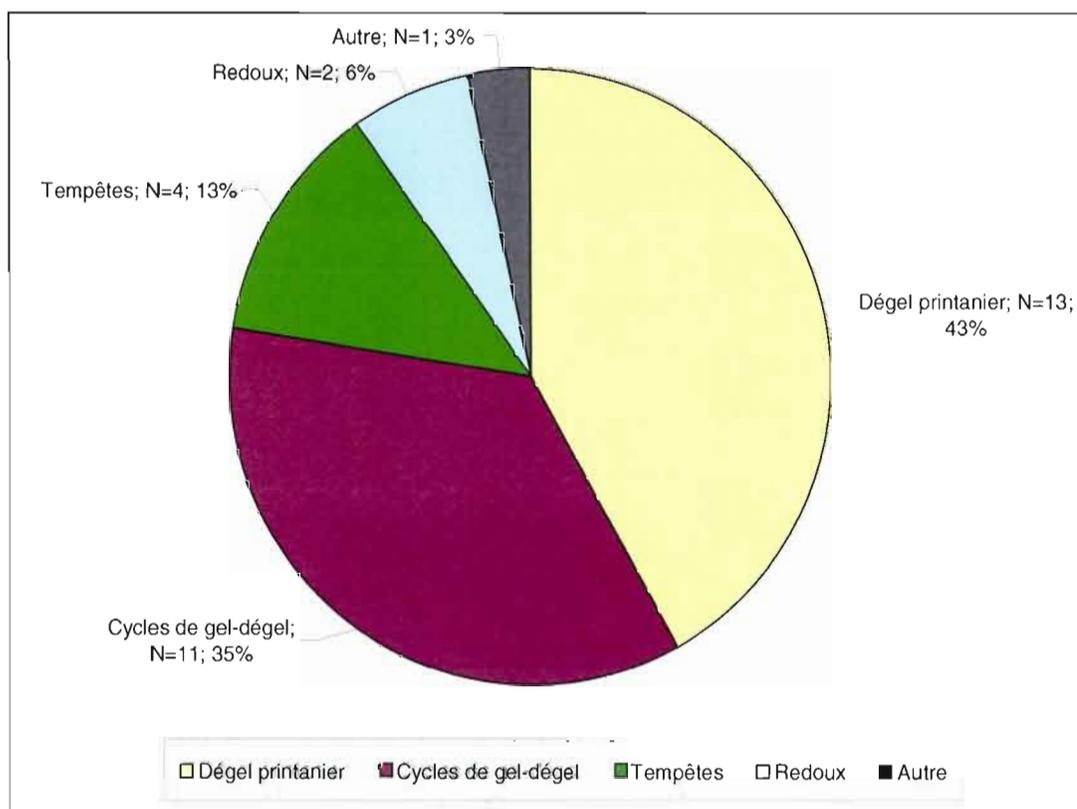


Figure 5.8. Part relative des grandes situations climatiques ayant générés des reculs dans les falaises à Ragueneau.

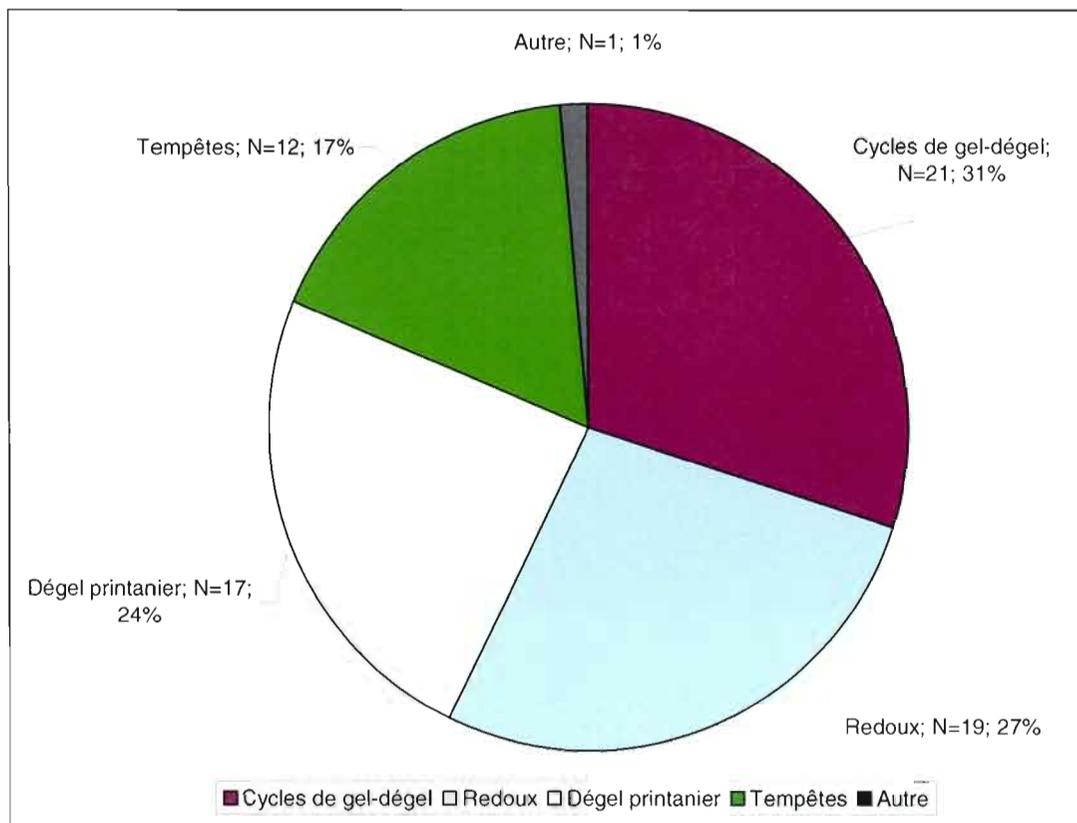


Figure 5.9. Part relative du nombre de *iButtons* impliqués dans les reculs des falaises en fonction des grandes situations climatiques à Ragueneau.

Tableau 5.2.

Intensité des reculs des falaises associés aux grandes situations climatiques à Ragueneau

Grandes situations climatiques	Recul minimum par évènement (cm)	Recul maximum par évènement (cm)	Nombre de iB impliqués (valeurs en cm)	Nombre d'évènements climatiques	Nombre d'évènements de reculs	Intensité moyenne du recul (cm)
Dégel printanier	entre 1 et 10	environ 20	17 (170)	13	15	11
Cycles de gel-dégel	entre 1 et 10	environ 20	21 (210)	11	12	18
Tempêtes	entre 1 et 10	environ 30	12 (120)	4	8	15
Redoux	environ 70	environ 120	19 (190)	2	2	95

5.3.1. Cycles de gel-dégel

Dans cette section, nous traitons des *cycles de gel-dégel* qui ne sont pas associés aux redoux hivernaux ou au dégel printanier. Les cycles de gel-dégel comptent pour 35 % des évènements climatiques ayant engendré des reculs et sont responsables de reculs impliquant 31 % des *iButtons*, ce qui les positionne au premier rang des grandes situations climatiques engendrant le recul des falaises de silt marin (figures 5.8 et 5.9). La sensibilité du silt aux processus cryogéniques est déjà reconnue dans la littérature (Couper, 2003; Ferrick et Gatto, 2005) et l'importance des reculs attribuables aux cycles de gel-dégel sur le site d'étude confirme cette sensibilité.

L'intensité des reculs des falaises engendrés par ce processus est généralement faible, avec des reculs minimaux variant entre 1 et 20 cm (1 ou 2 *iButtons* impliqués), mais peut également être majeure avec des reculs maximaux d'environ 120 cm²¹ (tableau 5.2). L'intensité moyenne des reculs engendrés par les cycles de gel-dégel est de 18 cm.

Les premiers évènements de recul identifiés à l'aide des signatures thermiques et associés aux cycles de gel-dégel se produisent avec l'arrivée progressive des températures négatives durant le mois de novembre (tableau 5.3.). De plus, sur le terrain, nous avons observé les marques des processus cryogéniques à partir du mois de novembre tout comme Bernatchez et Dubois (2008). Par exemple, lors de la campagne de terrain du 23 novembre 2006, nous avons pu observer les marques des processus de cryoclastie à la surface des silts marins soit, une multitude de petites

²¹ Il s'agit de la valeur la plus élevée pouvant être mesurée puisque chaque tige compte 12 *iButtons* distants de 10 cm.

encoches d'un centimètre et moins laissait croire qu'il y avait eu production de gélifractions (figure 5.10).

Tableau 5.3.

Effets des cycles de gel-dégel sur l'évolution des unités de silt marin à Ragueneau

Caractéristiques des cycles de gel-dégel	No de station	No des iB impliqués	Date du recul
Recul précédé par : Hausse rapide et importante des températures négatives	S1	iB3	19 novembre 2005
	S3	iB4	
Recul enregistré sous conditions de : Températures positives	S3	iB5	23 novembre 2005
Recul précédé par : Précipitations (22 novembre, pluie, 30 mm)			
Recul enregistré sous conditions de : Refroidissement rapide et important des températures positives vers négatives	S3	iB6	30 novembre 2005
Recul précédé par : 4 jours de températures négatives			
Recul enregistré sous conditions de : Températures positives	S1	Toute la tige (9 iButtons)	30 janvier 2006
Recul précédé par : Températures positives (28 janvier) Valeurs de rayonnement global maximales de 408 W/m ² (29 janvier)			
Recul enregistré sous conditions de : Températures négatives Valeurs de rayonnement global maximales de 311 W/m ² (30 janvier)	S2	iB4	9 mars 2006
Températures négatives Valeurs de rayonnement global élevées de 577 W/m ²			
Recul précédé par : 6 jours consécutifs de cycles de gel-dégel	S3	iB3 iB4	7 novembre 2006
Recul enregistré sous conditions de : Cycle de gel-dégel			
Recul précédé par : 4 jours consécutifs de cycles de gel-dégel	S1	iB5	24 novembre 2006
Recul enregistré sous conditions de : Cycles de gel-dégel			
Températures de l'air négatives Valeurs de rayonnement global élevées de 490 W/m ²	S2	iB4	26 février 2007
Températures de l'air négatives Valeurs de rayonnement global élevées de 582 W/m ²			
Températures de l'air négatives Valeurs de rayonnement global élevées de 652 W/m ²	S3	iB4	16 mars 2007
Cycle de gel-dégel			
Valeurs de rayonnement global élevées de 692 W/m ²	S2	iB6	23 mars 2007
		21 iButtons en 12 événements de recul	11 événements climatiques



Figure 5.10. Cicatrices laissées par la production de gélifracts observées à la station 1 le 23 novembre 2006.

Les reculs survenus sous l'effet de cycles de gel-dégel indiquent que :

- 3 des 11 évènements climatiques sont des cycles de gel-dégel couvrant une période de plus de 24 heures (19 novembre 2005, 30 novembre 2005 et 30 janvier 2006);
- 4 des 11 évènements climatiques sont des cycles de gel-dégel quotidiens (23 novembre 2005, 7 et 24 novembre 2006 et 23 mars 2007)
- 4 des 11 évènements climatique sont des jours au cours desquels on enregistre des températures de l'air négatives combinées à des valeurs de rayonnement global élevées qui engendrent des cycles de gel-dégel dans les falaises (9 mars 2006, 26 février 2007, 1^{er} mars 2007 et 16 mars 2007).

La quantification du nombre de cycles de gel-dégel à partir des températures de l'air n'aurait pas permis d'identifier ces quatre derniers évènements de recul puisqu'ils se produisent sous des températures de l'air négatives, ce qui représentent près de 36 % des évènements. Cette observation confirme l'importance de mesurer les données de température de l'air et de celles des matériaux lors d'études sur les processus de météorisation. Ce constat fait d'ailleurs l'objet d'un consensus parmi les chercheurs et ce, depuis bon nombre d'années (Miotke, 1982; Thorn, 1982). D'ailleurs, sur le site d'étude, le dégel de la surface des falaises a été observé précédemment sous l'effet des radiations solaires à des températures aussi basses que -23°C (Bernatchez, 2003). Les radiations solaires qui atteignent la surface des matériaux sont transformées en énergie thermique, ce qui explique l'écart entre les températures de l'air (qui ne les absorbe pas) et celles des matériaux. De cette façon, les matériaux exposés durant le jour aux radiations solaires gagnent en énergie pour s'élever au-dessus des températures de l'air (Oke, 1987). Les 4 évènements de recul enregistrés sous des températures de l'air négatives se produisent lors de journées ensoleillées permettant le dégel en surface du silt. Nos résultats indiquent que le dégel se produit généralement sur une profondeur de 10 cm à partir de la façade de la falaise. Les falaises du site d'étude étant orientées vers le sud-ouest sont des environnements particulièrement propices à ce type d'évènement. En effet, plusieurs auteurs ont pu observer ou quantifier l'effet de l'orientation des versants sur la météorisation ou sur les régimes thermiques (Brodeur, 1987; Hall, 2004; Lewkowicz, 2001). Par exemple, Brodeur (1987) observe que les falaises schisteuses du haut-estuaire du Saint-Laurent qui sont orientées S et SE subissent un plus grand nombre de cycles de gel-dégel que les falaises de la rive sud du fleuve, et ce en raison des différences au niveau de l'insolation de ces falaises.

5.3.2. Redoux hivernaux

Bien que les redoux hivernaux comptent pour 6 % des événements climatiques ayant engendré des reculs dans les falaises, ils impliquent la sortie de 27 % des *iButtons* touchés par l'érosion, ce qui les positionne au deuxième rang des grandes situations climatiques engendrant le recul des falaises (figures 5.8 et 5.9).

Compte tenu que les 2 événements de recul (tous deux survenus à la station 1) ont provoqué de l'érosion pour environ 70 cm et 120 cm, l'intensité moyenne des reculs attribuables aux redoux est élevée avec 95 cm (tableau 5.2). Alors que les reculs enregistrés sont généralement de l'ordre de 1 à 20 cm pour les autres processus, ces taux de recul s'avèrent particulièrement élevés. En effet, si l'on considère ces deux reculs en regard au taux de recul moyen annuel soit 150 cm/an pour la période 1998-2003, ceux-ci comptent à eux seuls pour 45 % et 80 %, respectivement, de l'érosion annuellement observée sur le site d'étude.

Le mode de recul des falaises lors des redoux hivernaux dépend des conditions climatiques qui prévalent avant et durant l'évènement. Ainsi, l'érosion de la falaise lors de l'évènement du 7 décembre 2006 est due à la fusion complète ou partielle des lentilles de glace de ségrégation sous l'effet des températures positives. En revanche, l'érosion de la falaise lors de l'évènement du 7 janvier 2007, qui survient sous des températures négatives, est attribuable aux processus hydrogéologiques, c'est-à-dire à la circulation d'eau dans les plans de faiblesse, en raison de l'apport en eau de la fusion partielle du couvert nival et des pluies hivernales survenues avec les températures chaudes du 6 janvier 2007 (tableau 5.4). Ainsi, il apparaît que les redoux, tant ceux accompagnés par des pluies hivernales que ceux qui ne le sont pas, sont susceptibles d'engendrer l'érosion des falaises deltaïques. Il faut aussi mentionner que, même si le recul d'environ 120 cm survenu le 30 janvier 2006 ne s'est pas produit de manière synchrone au redoux du 28 janvier

2006, les températures positives enregistrées ce jour là ont provoqué une fusion du couvert nival et une infiltration de l'eau qui a engendré, lors du regel, cette phase importante d'érosion.

Tableau 5.4.
Effet des redoux sur l'évolution des unités de silt marin à Ragueneau

Date du redoux	Conditions climatiques	No de station	No des iB impliqués	Date du recul
7 décembre 2006	Recul précédé par : - Refroidissement majeur (min de -21,6 °C) - Précipitations (neige, 3 mm) Recul enregistré sous conditions de : - Températures positives (0 °C à 2 °C) - Précipitations (neige, 2,5 mm)	S1	iB6 iB7 iB8 iB9 iB10 iB11 iB12	7 décembre 2006
4 au 7 janvier 2007	Recul précédé par : - Températures positives durant 4 jours (0° C à 4,3° C) - Pluies hivernales (14 mm) Recul enregistré sous conditions de : - Cycle de gel-dégel - Précipitation (pluie et neige, 0,5 mm)	S1	Toute la tige (12 <i>iButtons</i>)	7 janvier 2007
2 évènements climatiques			19 <i>iButtons</i> en 2 évènements de recul	

Dans le contexte des changements climatiques, il importe de s'interroger sur la signification de l'influence majeure des redoux sur l'érosion des falaises, d'autant plus que des températures à peine au-dessus de 0 °C lors des redoux sont suffisantes pour entraîner un recul des falaises (tableau 5.4). Déjà au cours de la période 1950-1998, on observe au Canada une augmentation de la fréquence et de la durée des redoux hivernaux (Shabbra et Bonsal, 2003) et les prévisions de l'IPCC (2001) prévoient le maintien de cette tendance pour le futur. Plus près du site d'étude, l'analyse du nombre de redoux pour trois stations climatiques de l'est du Québec

(Îles-de-la-Madeleine, Sept-Îles et Gaspé) présente aussi une tendance à la hausse des températures hivernales et du nombre de jours de redoux pour la période 1987-2006 (Bernatchez *et al.*, 2008) (tableau 5.5). Les résultats obtenus par cette équipe indiquent aussi que « les falaises qui sont sensibles aux processus cryogéniques et hydrogéologiques ont reculé à une vitesse plus rapide lors des périodes où le climat hivernal était plus chaud et caractérisé par un plus grand nombre d'événements de redoux et de pluie hivernale. » (Bernatchez *et al.*, 2008). Dans le contexte des changements climatiques, les prévisions pour une augmentation particulièrement marquée pour les températures hivernales permettent de croire que les tendances historiques à la hausse des températures hivernales et du nombre de jours de redoux observés pour l'est du Québec se poursuivront dans les années à venir. D'après nos résultats, l'occurrence de redoux durant la saison froide est un facteur activant des processus d'érosion tel que les glissements en plan sur les falaises deltaïques. Ainsi, il est probable que l'augmentation de ces épisodes de redoux engendre par le fait même une augmentation de l'érosion des falaises deltaïques.

Tableau 5.5.

Tendances climatiques historiques observées pour la période 1987-2006 dans l'est du Québec

Station météorologique	Augmentation des températures hivernales	Augmentation du nombre de jours de redoux
Îles-de-la-Madeleine	+3,34 °C	+4,1 jours
Gaspé	+2,71 °C	+4 jours
Sept-Îles	+2,63 °C	+3,4 jours

Source : Bernatchez *et al.*, 2008

5.3.3. Dégel printanier

Le dégel printanier compte pour 43 % des événements climatiques ayant provoqué des reculs dans les falaises et sont responsables de reculs impliquant 24 %

des *iButtons*, ce qui le positionne au troisième rang des grandes situations climatiques engendrant le recul des falaises de silt marin (figure 5.8 et figure 5.9). Nos observations de terrain montrent que le dégel printanier déclenche des modes de recul qui affectent pratiquement toute la côte du site d'étude alors que les cycles de gel-dégel semblent avoir des effets plus ponctuels et sporadiques. Somme toute, compte tenu de l'érosion survenue depuis le début du suivi ou de l'interruption du suivi à la suite des perturbations délogeant complètement des tiges, les périodes de dégel printanier ont été suivies par un moins grand nombre de tiges et de *iButtons*. Des recherches subséquentes devraient être réalisées afin de mieux situer l'importance relative des cycles de gel-dégel et du dégel printanier sur le taux d'érosion annuel.

L'intensité des reculs occasionnés par les conditions de dégel printanier est majoritairement faible avec des reculs variant entre 1 et 20 cm. L'intensité moyenne des reculs attribuables au dégel printanier est de 11 cm (tableau 5.2). Bien que l'intensité des processus liés au dégel printanier soit faible, ceux-ci se produisent de manière presque continue si bien que le rythme de recul imposé par ces conditions climatiques est particulièrement rapide (tableau 5.6). En effet, on observe la sortie de *iButtons* de manière consécutive au fil des jours, ce qui indique, qu'en l'espace d'une journée, les coulées boueuses et les détachements de microclastes peuvent dégager complètement un *iButton* (recul d'environ 10 cm). Les observations réalisées sur le terrain révèlent que le dégel printanier provoque l'érosion des falaises sous l'effet de la production de microclastes d'origine cryogénique (gélifracsts), de coulées boueuses et de glissements en plan.

Tableau 5.6.
Effet du dégel printanier sur les unités de silt marin à Ragueneau

Conditions de dégel printanier	No de station	No des iB impliqués	Date du recul
Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimées) ^a	S3	iB9	25 mars 2006
Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimées)	S3	iB10	26 mars 2006
Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimées)	S2	iB5	27 mars 2006
Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimées)	S2	iB6 et iB7	28 mars 2006
	S3	iB11 et iB12	
Cycle gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (estimées)	S2	iB8	30 mars 2006
Températures positives Faibles précipitations (pluie, 1,5 mm)	S2	iB9	1 ^{er} avril 2006
Températures positives Valeurs de rayonnement global élevées (estimées)	S2	iB10	4 avril 2006
Cycle de gel-dégel Valeurs de rayonnement global élevées (estimées)	S2	iB11	9 avril 2006
Cycle de gel-dégel Valeurs de rayonnement global élevées (760 W/m ²)	S2	iB7	28 mars 2007
Cycle de gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (762 W/m ²)	S2	iB8	29 mars 2007
	S3	iB5	
Cycles de gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (818 W/m ²)	S2	iB10	10 avril 2007
Cycles de gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (826 W/m ²)	S2	iB11	11 avril 2007
Cycles de gel-dégel diurne-nocturne Valeurs de rayonnement global élevées (812 W/m ²)	S2	iB12	12 avril 2007
		17 iButtons en 15 événements de recul	13 événements climatiques

^a Les données de rayonnement global ne sont pas disponibles pour le printemps 2006. Cependant, compte tenu du comportement des températures de l'air et de l'absence de précipitations, il est fort probable que ces journées aient été ensoleillées.

Les résultats de Bernatchez, Jolivet et Corriveau (2008) indiquent que les taux de recul des falaises deltaïques de différents sites d'études sont corrélés avec la profondeur de pénétration de l'onde de gel. En effet, le taux d'érosion printanier correspond à la profondeur de l'onde de gel puisque l'érosion qui se produit lors du dégel affecte toute la portion de la falaise ayant été préalablement déstructurée par le gel. La profondeur du gel est en partie fonction des propriétés thermiques des matériaux meubles, de la présence ou de l'absence de couvert nival et de tous les

reculs hivernaux engendrés par les redoux et les cycles de gel-dégel. En retirant une couche de sédiments, les reculs permettent au gel de poursuivre sa progression. La multiplication anticipée des redoux hivernaux et la hausse des températures hivernales auront pour conséquence d'augmenter le taux de recul hivernaux et donc le taux d'érosion annuel.

5.3.4. Tempêtes

Les tempêtes comptent pour 13 % des événements climatiques ayant engendré des reculs et sont responsables de reculs impliquant 17 % des *iButtons*, ce qui le positionne au dernier rang des grandes situations climatiques provoquant le recul des falaises de silt marin (figures 5.8 et 5.9). Malgré qu'il y ait eu plusieurs événements extrêmes durant les mois d'acquisition de données, seules quatre tempêtes ont provoqué l'érosion des falaises aux stations de mesures. Ainsi, le nombre d'événements de tempête inventorié à l'aide des données de vent des stations météorologiques sur-estiment de manière significative le nombre d'événements climatiques ayant eu des impacts sur le littoral. Friesinger (2009) a obtenu les mêmes conclusions en comparant des données météorologiques et une banque de données d'événements qui ont eu des impacts sur la côte dans le golfe du Saint-Laurent.

Notons, qu'aucune tempête hivernale avec des précipitations sous forme de neige n'a provoqué de recul. C'est seulement au cours de la tempête printanière du 6 avril 2007 que l'on enregistre des précipitations sous forme de neige et celles-ci sont peu abondantes, avec 4 mm en équivalent en eau. Nous avons pu constater précédemment que la mise en place de couvert nival avait plutôt un effet protecteur sur les falaises et l'absence de recul aux stations de mesure lors de tempêtes hivernales vient corroborer cette observation. Les conditions climatiques de chacune des tempêtes sont décrites au tableau 5.7.

Tableau 5.7.

Effets des tempêtes sur l'évolution des unités de silt marin à Ragueneau

Tempêtes	Conditions météorologiques	Processus	No de station	No des iB impliqués	Date des reculs
15-17 octobre 2005	Recul précédé par : - Températures positives - Rares précipitations - Valeurs de rayonnement global élevées durant la première moitié du mois Recul enregistré sous conditions de : - Vents violents (rafales max : ND) ^a - Précipitations abondantes (pluies, 59,5 mm)	Dessiccation	S1	iB2	16 octobre 2005
			S3	iB2	17 octobre 2005
2 décembre 2005	Recul précédé par : - Cycles de gel-dégel - Valeurs de rayonnement global élevées de 337 W/m ² Recul enregistré sous conditions de : - Vents violents (rafales max : ND) - Précipitations abondantes (pluies, 34 mm) - Vagues importantes	Cryoclastie	S2	iB3	2 décembre 2005
			S3	iB7 iB8	2 décembre 2005
28-29 octobre 2006	Recul précédé par : - Plusieurs jours de pluie (total de 159 mm) Recul enregistré sous conditions de : - Vents violents (rafales max 93 km/h) - Pluies abondantes (41 mm)	Processus hydro-géologiques	S2	iB2 iB3	28 octobre 2006
			S1	iB2 iB3 iB4	29 octobre 2006
			S3	iB2	29 octobre 2006
6 avril 2007	Vents violents (rafale max 70 km/h) Précipitations (neige, 4 mm)	Cryo-clastie	S2	iB9	6 avril 2007
4 évènements climatiques					12 iButtons en 8 évènements de recul

^a Les données des vitesses des rafales de vents maximales de la station d'Environnement Canada ne sont pas disponibles pour ces dates. Par contre, les suivis mensuels réalisés par le CRIACC indiquent que des vents violents ont touché l'est du Québec.

L'intensité des reculs attribuables aux passages de tempêtes est relativement faible et varie généralement entre 1 et 10 cm avec un maximum d'environ 30 cm (tableau 5.2). L'intensité moyenne des reculs attribuables aux passages de tempêtes est de 15 cm. Par le passé les agents hydrodynamiques ont été les plus souvent cités pour expliquer le recul des côtes du site d'étude (Allard, 1994; Bernatchez, 1995; Chagnon *et al.*, 1979; Grondin *et al.*, 1990; Lavallée, 1993; Long, 1983; Raynald, 1977). Cependant, les observations plus récentes ont montré que les falaises semblables à celles du site d'étude ne sont pas sensibles à l'action des vagues ni même à l'action des vagues de tempête (Bernatchez, 2003; Bernatchez et Dubois, 2008). Par exemple, ces derniers auteurs avaient mesuré, à la suite de l'importante tempête du 29 octobre 2000 qui frappa tout l'est du Canada (McCulloch *et al.*, 2002; Forbes *et al.*, 2004) et qui avait provoqué le recul de plusieurs systèmes côtiers, que les côtes de Ragueneau (sur le site d'étude) et des systèmes côtiers similaires n'avaient subi qu'un léger recul (0 à 20 cm). Nos résultats corroborent ceux de ces auteurs puisque les reculs observés sont légers ou nuls puisqu'un bon nombre de tempêtes n'auront provoqué aucun recul aux stations de mesures.

Dans cette section, nous avons identifié la part relative des quatre grandes situations climatiques sur l'érosion des falaises de silt marin grâce à l'analyse des conditions climatiques et des connaissances acquises sur le terrain. La section suivante décrit les processus et les modes de reculs qui ont provoqué le recul des falaises.

5.4. Processus d'érosion et modes de recul des falaises

L'analyse des données climatiques et de l'évolution des falaises indiquent que, d'une part, les cycles gel-dégel, les redoux hivernaux et le dégel printanier ont particulièrement été propices au déclenchement de processus cryogéniques selon des

modes de recul variant selon les contextes environnementaux et les caractéristiques intrinsèques des falaises. D'autre part, nos résultats indiquent que l'ensemble des processus de météorisation affectant la partie superficielle des falaises permet d'augmenter la sensibilité du silt marin à l'action des vagues de tempête.

5.4.1. Processus cryogéniques

Une des théories sur le mode de fonctionnement des processus cryogéniques implique le gel de l'eau et l'expansion volumétrique de celle-ci, de l'ordre de 9 % (Bland et Rolls, 1998; McGreevy, 1981; Yatsu, 1988). Dans les fissures, l'expansion de l'eau lors du gel réduit la cohésion des matériaux.

Dans de nombreuses études, on utilise le point de congélation de 0 °C comme seuil de passage entre la phase liquide et la phase solide et pour prévoir l'activation des processus cryogéniques (Hall, 2007). Pourtant, cette valeur n'est pas toujours celle du changement de phase de l'eau entre son état liquide et solide (Hall, 2007). De plus, dans la littérature scientifique, on retrouve des résultats qui indiquent que l'altération des matériaux sous l'effet des processus cryogéniques, normalement associée au gel-dégel et au changement de phase de l'eau, est aussi observée sous des températures négatives. En effet, les résultats de Hallet *et al.* (1991) indiquent que l'impact de la croissance de la glace dans les microfissures se produit entre -3 °C et -6 °C (étude menée en laboratoire sur des grès de Berea). Pour sa part, Matsuoka (2001) révèle que la microgélifraction se produit généralement entre -1 °C et -4 °C en fonction des différentes lithologies (étude menée en laboratoire). Le mécanisme de croissance de glace dans les microfissures des matériaux consolidés s'apparente de près à celui de la croissance des lentilles de glace de ségrégation dans les matériaux meubles (Hallet, Walder et Stubbs, 1991). Sur le terrain, l'effet des processus

cryoclastiques durant la saison froide a aussi été observé par Ødegård et Sollid (1993) qui constatent la production de clastes de roches angulaires produits sous l'action du gel et accumulés sur le pied de glace. Bernatchez et Dubois (2008) notent également la présence de talus de gélifracts de silt marin sur le pied de glace. Par contre, ces dernières observations ne permettent pas de savoir si l'érosion correspond ou non au changement de phase de l'eau ni même si l'érosion s'est produite sous l'effet des cycles de gel-dégel dans les températures de l'air ou sous des températures négatives. À la lumière de ces résultats, les modes de reculs associés ici aux cycles de gel-dégel (effondrement de dalles, délogements de clastes, glissement en plan, production de gélifracts) pourraient aussi survenir sous des températures négatives et en l'absence de cycles de gel-dégel dans les matériaux. Néanmoins, au cours de cette étude, nous avons observé des situations où les reculs se sont produits sous des températures négatives mais pour lesquels les données de températures des matériaux enregistraient des cycles de gel-dégel. De plus, en raison de la liquéfaction visible du silt marin grâce au changement de phase de l'eau, les coulées boueuses sont le seul mode de recul pour lequel il est possible d'affirmer hors de tout doute qu'elles se produisent exclusivement lors de la fusion des lentilles de glace de ségrégation. Des recherches subséquentes pourraient permettre d'identifier les températures des matériaux nécessaires à l'activation des processus cryogéniques et différents modes de recul qu'ils génèrent dans les falaises de silt marin.

En fonction de l'intensité des reculs associés aux processus cryogéniques, nous distinguerons deux catégories de processus, ceux de grande ampleur regroupant les effondrements de dalles et de clastes et les glissements en plan et ceux de faible ampleur regroupant les effondrements de microclastes et les coulées boueuses.

5.4.1.1. Glissements en plan et effondrements de dalles

Les seuls modes de recul dont l'ampleur, sur un laps de temps très court, pouvant engendrer des reculs de plus d'un mètre sont les effondrements importants de dalles ou les glissement en plan (figure 5.11 et figure 5.12). Ces modes de recul ont été observés exclusivement à la station 1. La sensibilité de cette station à ces modes de recul est attribuable aux nombreux plans de faiblesse combinés au caractère subverticale de la falaise. En effet, les discontinuités influencent le comportement d'un matériel en faisant varier sa cohésion de même que la présence et le mouvement de l'eau (Bland et Rolls, 1998). La coloration du silt en rouille tant sur la surface de la falaise que dans les fissures confirme que l'eau circule bel et bien dans les plans de faiblesses du silt, permettant aux changements de phase de l'eau de provoquer des tension et d'augmenter la contrainte de cisaillement (figure 5.12).



Photo : Pascal Bernatchez, 2006

Figure 5.11. Traces d'un glissement à la station 1 le 26 mars 2006



Photo : Pascal Bernatchez, 2005

Figure 5.12. Coloration du silt en rouille attribuable à la circulation de l'eau dans les fissures et effondrement de dalles de silt marin à la suite de la fusion d'un joint de glace à proximité de la station 1 le 20 novembre 2005

Les glissements en plan, tout comme les effondrements de dalles, peuvent se produire selon deux mécanismes, soit par la fonte de la glace de ségrégation ou de la glace contenue dans les fissures du dépôt silteux, soit par l'expansion de la glace lors du regel. Par exemple, à la station 1, l'entrée en fusion d'un joint de glace est probablement responsable du recul observé le 19 novembre 2005 (températures positives suivant des températures froides) (figure 5.12). Lorsque que la fonte des joints de glace ou de la glace de ségrégation est partielle et n'entraîne pas une érosion immédiate, le regel génère une augmentation de la taille du plan de faiblesse et leur fonte sous des températures plus douces ou même seulement l'augmentation de leur température est alors favorable à l'érosion (Davies, Hamza et Harris, 2001). Par exemple, l'analyse des données climatiques liées à la perturbation du 30 janvier 2006

observée dans l'unité de silt marin de la station 1 (impliquant le délogement de toute la tige) permet de croire que les températures positives qui surviennent deux jours avant le recul ont permis la circulation d'eau dans les plans de faiblesse. Avec le retour des températures négatives, le gel de cet apport en eau aurait généré des tensions suffisantes pour déclencher un glissement en plan ou l'effondrement important de dalles de silt.

5.4.1.2. Production de microclastes d'origine cryogénique et coulées boueuses

Alors que l'effondrement de dalles et le délogement de clastes de silt marin ont été observés sur le terrain, particulièrement avant et au début du régime de température froide, soit durant les mois de novembre à janvier, les reculs attribuables à la production de microclastes d'origine cryogénique (gélifracsts) et aux coulées boueuses ont surtout été observés à la fin de la saison froide et lors du dégel printanier. Les visites de terrain réalisées avant le début du dégel printanier et sous des températures négatives nous ont permis d'observer les reculs attribuables aux cycles de gel-dégel enregistrés dans les falaises de silt marin. Sous ce régime, on observe que les silts sont hautement déstructurés par les lentilles de glace de ségrégation développées lors de la pénétration de l'onde de gel au fil de la saison froide (figure 5.13). La déstructuration du silt permet l'érosion des falaises par la production de microclastes d'origine cryogénique (gélifracsts) ou par coulées boueuses (figures 5.14, 5.15 et 5.16). Puisque ces modes de recul se produisent sous des conditions similaires, il est fréquent d'observer les deux modes de recul lors d'une même journée et sur un même site (figure 5.16). C'est justement ce haut niveau de déstructuration qui explique les différences observées entre les modes de recul ayant lieu avant le début du régime de température froide (effondrement et délogements de dalles et de clastes) et ceux ayant cours à la fin de cette période (production de

gélifracés et coulées boueuses). Ainsi, la profondeur à laquelle l'onde de gel pénètre et déstructure le massif interne du dépôt silteux correspond au recul mesuré lors des saisons hivernale et printanière qui est attribuable à ces deux modes de recul (Bernatchez, Jolivet et Corriveau, 2008).

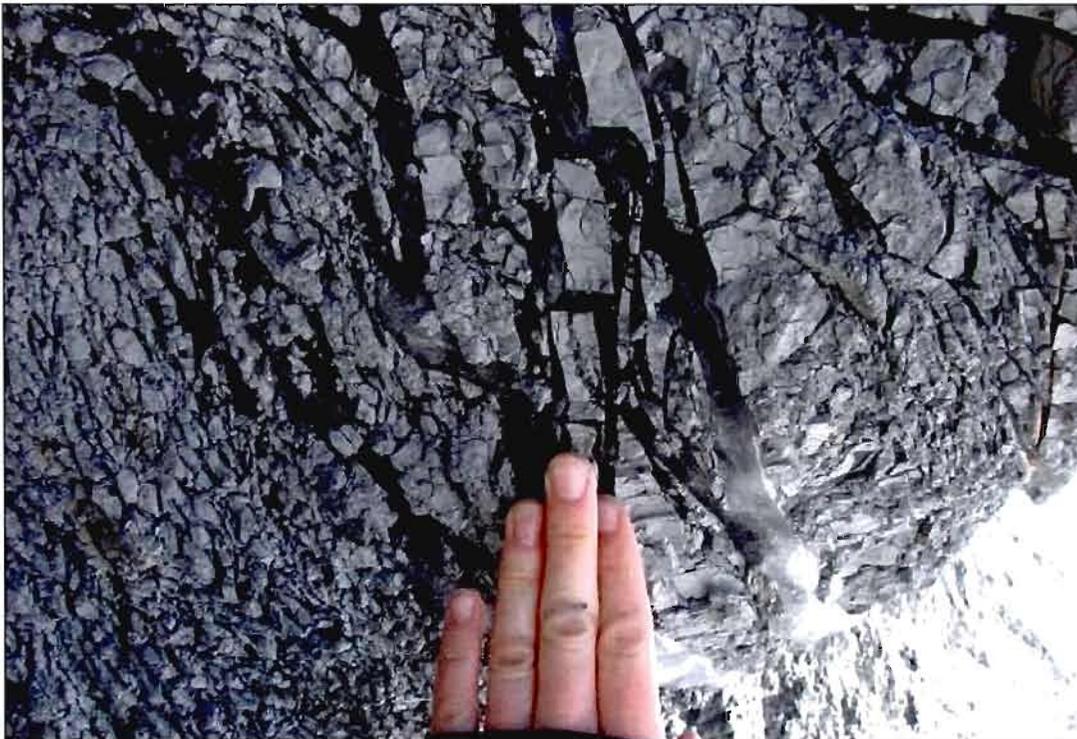


Figure 5.13. Lentilles de glace observé le 9 mars 2007 à Ragueneau



Figure 5.14. Talus de microclastes d'origine cryogénique observé le 8 mars 2007 à Ragueneau



Figure 5.15. Microclastes d'origine cryogénique au pied de la falaise observé le 29 mars 2007 à Ragueneau



Figure 5.16. Coulées boueuses en développement et production de microclastes observées le 8 mars 2007 à Ragueneau

5.4.2. Tempêtes

Les conditions climatiques reconnues lors de l'érosion des falaises argileuses et silteuses, combinées aux connaissances actuelles et acquises lors de ce projet sur la résistance de ce type de côte aux agents hydrodynamiques, nous permettent de minimiser hors de tout doute l'importance de l'influence des processus hydrodynamiques en tant que principal agent d'érosion des falaises du site d'étude. Ainsi, leur pouvoir érosif dépend principalement des processus de météorisation, hydrogéologiques, cryogéniques et de dessiccation, ayant altéré la falaise avant le passage des tempêtes. L'érosion des falaises se produit alors par effondrement de dalles et par délogement de clastes délimités par les plans de faiblesses associés aux processus de météorisation.

5.4.2.1. Dessiccation

La dessiccation est un processus qui affecte les roches et les matériaux meubles qui contiennent de l'argile et du silt (Bland et Rolls, 1998; Couper, 2003). Les propriétés de ces matériaux leur permettent de se gonfler lorsque qu'ils absorbent de l'eau et de se contracter lorsqu'ils se dessèchent. Lorsque l'argile se dessèche, le stress de traction s'exerce le long des plans de faiblesse et fait apparaître des fissures (Yatsu, 1998). Sur le site d'étude, la dessiccation contribuerait pour 20 % de l'érosion totale annuelle (Bernatchez et Dubois, 2008). Elle serait particulièrement active durant les mois de juillet et d'août puisque cette période est plus sèche et caractérisée par des valeurs de rayonnement global élevées (figure 5.17). En effet, la dessiccation est reconnue pour se manifester notamment là où les précipitations annuelles sont inégalement réparties, ce qui implique une certaine saisonnalité dans le développement des fissures de dessiccation (Yatsu, 1988). De cette manière, les plans de faiblesse créés par la dessiccation au cours de la saison estivale affaiblissent la cohésion des falaises de silt marin avant l'arrivée des tempêtes automnales.



Figure 5.17. Effet de la dessiccation à proximité de la station 3 à l'été 2005

Les conditions climatiques qui prévalent avant la tempête du 15 au 17 octobre 2005 sont favorables au développement de plans de faiblesses attribuables à la dessiccation puisque jusqu'ici, seulement 6 mm de pluie (1^{er}, 6, 11 et 14 octobre) sont tombés depuis le début du mois et que le mois de septembre 2005 a été caractérisé par des précipitations en deçà de la normale avec une anomalie négative de 34 mm (58,5 mm de pluie contre une normale de 92,5 mm). Ainsi, la tempête du 15 au 17 octobre 2005 provoque un recul d'environ 10 cm de la falaise de silt marin aux stations 1 et 3 puisque les précipitations et les vents violents accompagnés de vagues importantes ont été propices au délogement de clastes et de dalles délimités par des fissures de dessiccation. À ce sujet, Gaskin *et al.* (2003) observent qu'une hydratation rapide d'une argile dont le contenu en eau est préalablement bas peut provoquer le décollement d'une couche de sédiment, la microfissuration du matériel et la création de plans de faiblesse. Les résultats de la portion de leur étude réalisée en laboratoire indiquent également que l'immersion des échantillons préalablement asséchés provoque l'apparition de nouvelles fissures et microfissures de tension. Ainsi, une berge asséchée qui subit une hydratation rapide subira une érosion significative. Ces auteurs affirment également que la pluie peut être susceptible d'engendrer de l'érosion sur une berge affectée par la dessiccation. Dans le même sens, Bernatchez et Dubois (2008) observent sur le site d'étude que des évènements de précipitations intenses sont des évènements favorables à d'importants taux de recul attribuables à une altération préalable par la dessiccation. L'ensemble des résultats et observations réalisées au cours de cette étude sur l'effet de la dessiccation et sur la relation entre l'érosion des berges de silt et d'argile qui se produit durant les tempêtes (pluies et/ou vagues de tempête) abonde dans le sens des autres concepts soutenus dans la littérature scientifique.

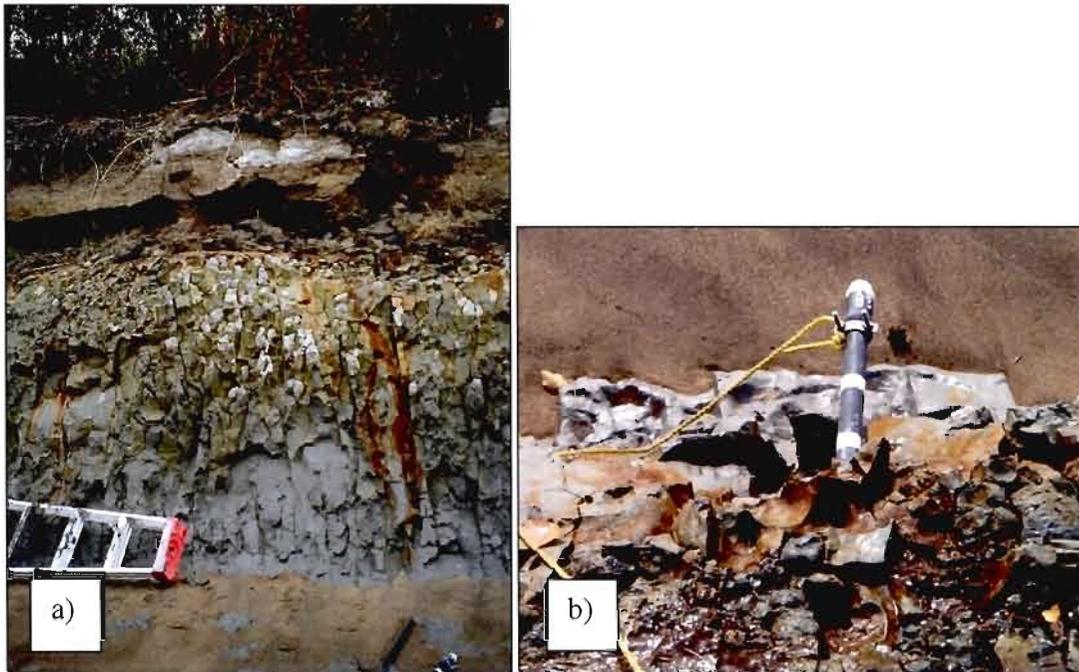
La figure 5.18 présente l'état de la falaise à la station 1 où l'on observe, quelques jours après la tempête, les traces de l'érosion par délogement de dalles. On observe à la figure 5.19, l'effet de la dessiccation sur le silt marin à la station 3 et les

cicatrices laissées par le délogement des clastes. À propos de la taille des clastes, Couper (2003) observe, sous l'action des cycles d'humidification et de dessiccation, une corrélation positive statistiquement significative entre le contenu en silt-argile et la taille des fragments et la quantité de matériel érodé. Cette corrélation se traduit par une augmentation de la taille et de la quantité des clastes suivant l'augmentation du contenu en silt-argile de la berge. Aussi, les observations de Gaskin *et al.* (2003) sur les berges d'argile de la Mer de Champlain, indiquent que les fissures permettent de délimiter des clastes de plusieurs centimètres qui sont délogés par l'action des vagues. Ces derniers soulignent la présence de galets d'argile sur le littoral qui mettent en évidence ce mode de recul tout comme nous l'avons également observé (figures 5.20, 5.21 et 5.22).



Photo : Antoine Morissette, 2005

Figure 5.18. État de la falaise le 21 octobre 2005 à la station 1.



Photos : a) Maude Corriveau, 2005 b) Antoine Morissette, 2005

Figure 5.19. Effets de la dessiccation sur l'unité de silt marin à la station 3

a) Dessiccation et déstructuration de la surface de la falaise le 19 septembre 2005; b) Cicatrices laissées sur la falaise suite au détachement des clastes de dessiccation (vue du haut de la falaise) le 21 octobre 2005.



Tirée de Gaskin *et al.* (2003)

Figure 5.20. Galets d'argile de la Mer de Champlain sur les rives du Saint-Laurent.



Figure 5.21. Galets de silt marin (en gris pâle) délogés et façonnés par les vagues à Ragueneau.

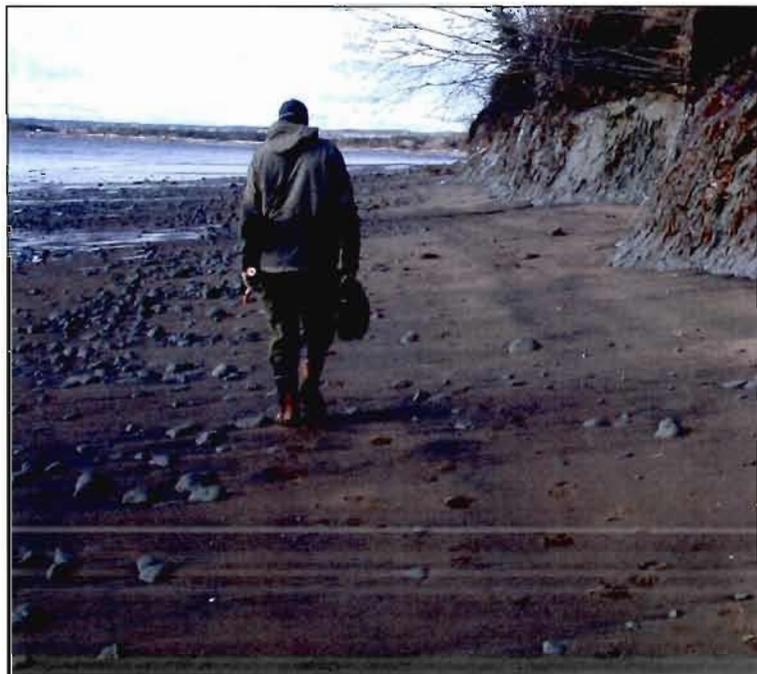


Figure 5.22. Clastes de silt marin délogés et répartis sur l'estran à Ragueneau.

Notons enfin que la tempête du 15 au 17 octobre n'a pas engendré de recul à la station 2. D'après nos observations, ce résultat est attribuable à la présence d'une tourbière sur l'arrière-côte qui fait en sorte qu'il s'écoule généralement un mince film d'eau à la surface du massif qui contribue à protéger le silt contre la dessiccation et à maintenir l'intégrité du massif. Sur le terrain, nous avons pu observer cet effet de protection contre de la dessiccation et par conséquent, contre l'action des pluies abondantes et des vagues de tempête. Au cours d'une visite de terrain, nous avons mesuré une érosion différentielle entre les zones protégées par un apport en eau sur la surface de la paroi et les parois soumises à la dessiccation (figure 5.23.). Les différences de recul entre ces zones variaient entre 1 m et 1,5 m.



Figure 5.23. Érosion différentielle tributaire de l'écoulement d'eau sur la surface de la paroi à proximité de la station 2.

5.4.2.2. Processus hydrogéologiques

La tempête du 28-29 octobre 2006 affecte les trois stations de mesure et provoque des reculs d'environ 10 à 30 cm. Contrairement à la tempête du 15 au 17 octobre 2005, celle-ci a été précédée de plusieurs jours de pluie (4, 8, 13, 18, 22, 23, 24 et 25 octobre) et de pluies abondantes (12, 19, 20 et 21 octobre) totalisant des précipitations de l'ordre de 159 mm. Le recul le plus important se produit à la station 1 (environ 30 cm). Ici, l'écoulement de l'eau dans les plans de faiblesses est sans doute responsable de l'effondrement de dalles de silt ou d'un glissement en plan. L'écoulement de l'eau le long des plans de faiblesse dans l'unité de silt pourrait avoir contribué à la lubrification des surfaces faisant augmenter la force de cisaillement. Rappelons aussi que nous avons observé et mesuré le recul des unités supérieures par des processus de suffosion, ce qui indique que la circulation de l'eau est en cause dans cet événement. Aussi, les vagues violentes percutant l'unité de silt ont probablement généré un stress sur l'unité de silt marin et ont pu contribuer au recul. Bref, les reculs observés à la station 1 lors de cette tempête indiquent que l'érosion est plutôt attribuable aux pluies abondantes et à l'activation de processus hydrogéologique qu'à l'action directe des vagues de tempête.

5.4.2.3. Cryoclastie

Lors des tempêtes d'octobre, le gel n'a pas encore permis, ou alors très peu, de déstructurer la falaise puisqu'à cette période de l'année les températures de l'air n'ont pas passé sous la barre de 0° C ou alors seulement de manière ponctuelle et sur de faibles durées de temps seulement. Cependant, à l'arrivée de tempêtes plus tardives (novembre ou décembre), l'onde de gel a commencé à progresser à l'intérieur de la falaise et les cycles de gel-dégel peuvent avoir commencé à agir à la

surface des falaises de manière à accentuer le développement de fissures de dessiccation et à générer de nouveaux plans de faiblesse associés aux processus cryogéniques. Lors du passage de la tempête du 2 décembre 2005, la falaise a reculé d'environ 1 à 20 cm aux trois stations. Nos résultats indiquent que le pouvoir érosif de cette tempête est attribuable aux effets des cycles gel-dégel. De plus, l'analyse des signatures thermiques a permis de démontrer que les falaises avait déjà subi un recul le 1^{er} décembre 2005 en raison des valeurs de rayonnement global élevées. Bref, l'action des processus cryogéniques a permis de réduire la cohésion de l'argile et d'engendrer le recul des falaises la veille de la tempête de même que sous l'action des vagues de tempête.

5.5. Évolution temporelle des falaises

La quantification de la part relative des grandes situations climatiques et des processus responsables des reculs laisse apparaître un rythme saisonnier. Les figures 5.24 et 5.25 présentent l'évolution des falaises observée de manière mensuelle.

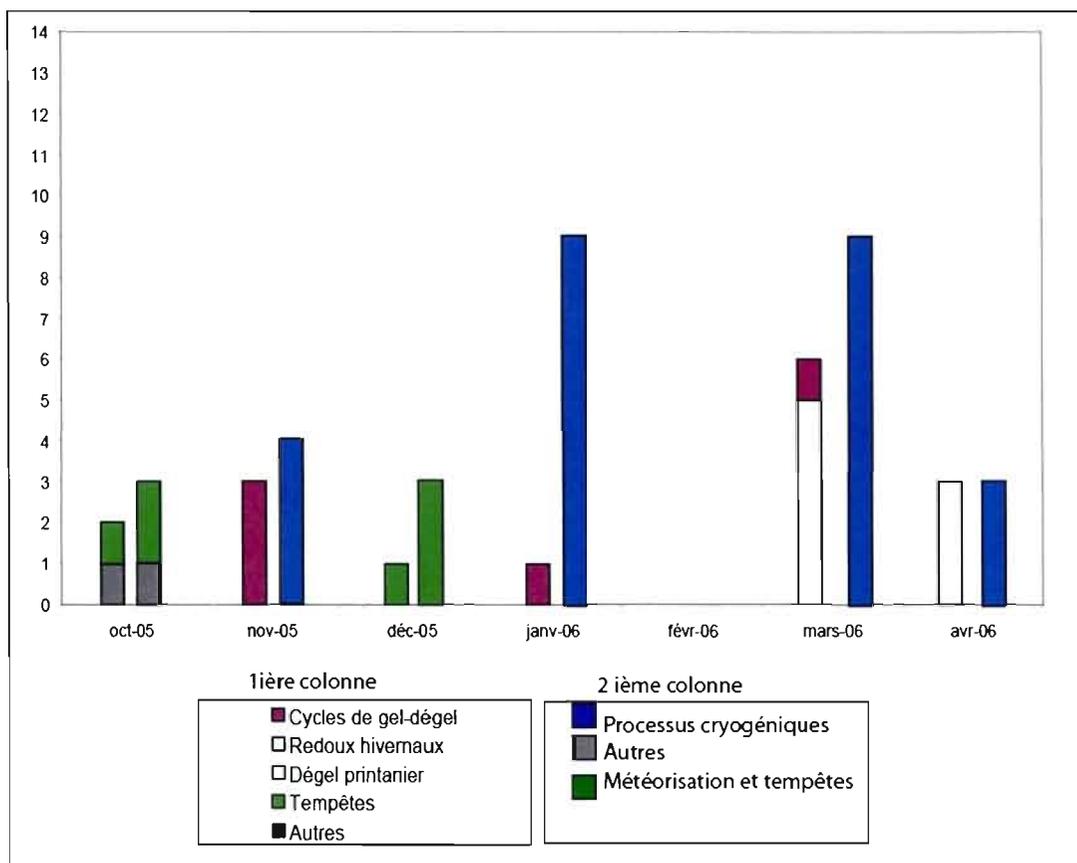


Figure 5.24. Évolution mensuelle des falaises de Ragueneau lors de la saison de suivi 2005-2006.

Note : La première colonne de chaque mois indique le type et le nombre d'événements climatiques et la deuxième, le nombre de *iButtons* impliqués dans les reculs en fonction des processus ayant généré le recul.

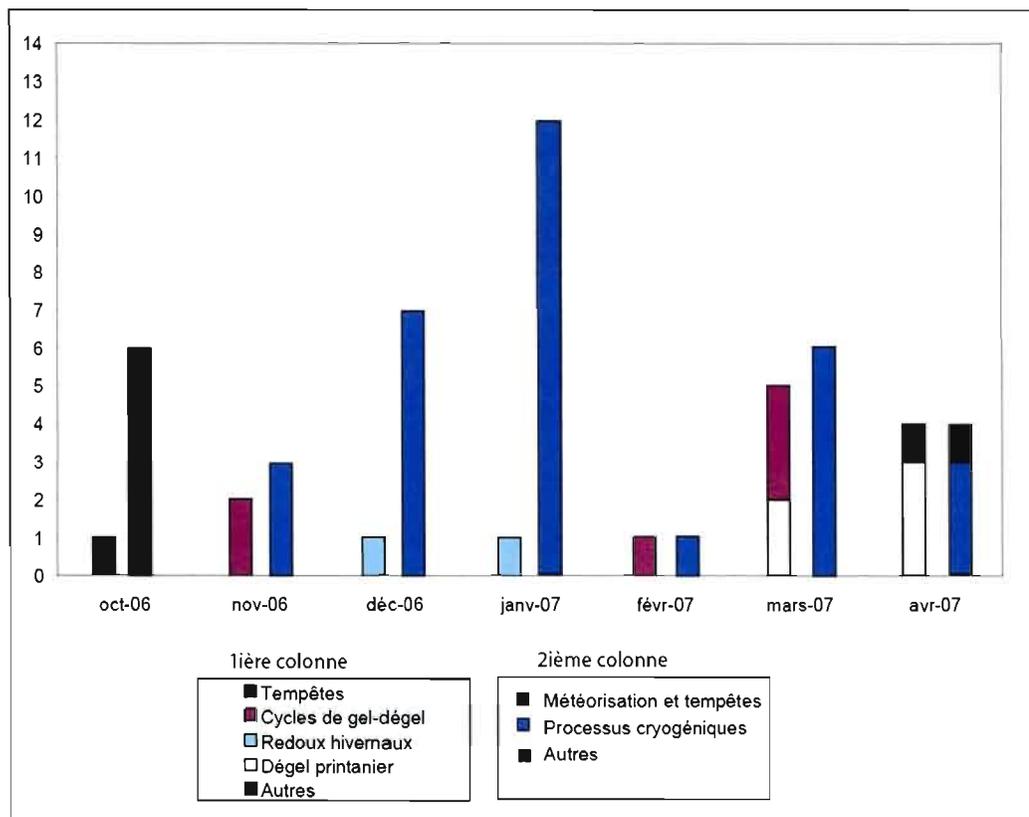


Figure 5.25. Évolution mensuelle des falaises de Ragueneau lors de la saison de suivi 2006-2007.

Note : La première colonne de chaque mois indique le type et le nombre d'événements climatiques et la deuxième, le nombre de *iButtons* impliqués dans les reculs en fonction des processus ayant généré le recul.

L'évolution temporelle des falaises des saisons 2005-2006 et 2006-2007 montre que l'érosion est active tout au long de la période d'octobre à avril. Cependant, on observe une accalmie au cours du mois de février. Cette stabilité des falaises au plus fort de l'hiver est attribuable à la mise en place du couvert nival²² qui est rendu possible suite au développement du pied de glace (deuxième partie du mois de décembre). Il apparaît également possible que des séquences de températures constamment négatives ne soient pas favorables à l'activation de l'érosion. Cependant, les redoux hivernaux qui surviennent avant la mise en place d'un important couvert nival, c'est-à-dire au cours des mois de décembre et de janvier, provoquent des reculs de grande ampleur. La période de suivi des falaises se termine ensuite avec une concentration d'évènements de recul au cours des mois de mars et d'avril que l'on attribue principalement au dégel printanier²³. L'importance de l'érosion qui se produit à l'hiver et au printemps a aussi été observée sur les berges d'une rivière en Angleterre par Couper *et al.* (2001) et est, tout comme c'est le cas dans cette recherche, associé aux processus de météorisation. Dans cette étude, les auteurs ont mesuré des taux de recul annuel particulièrement élevés et faisant contraste avec les taux de recul relevés lors de suivis antérieurs. L'absence de submersion des berges durant l'hiver pour l'année à l'étude (qui normalement sont submergées à cette époque) aurait permis aux aléas du climat et aux processus de gel-dégel de provoquer de l'érosion.

²² La présence d'un couvert nival permet de limiter grandement les fluctuations de températures et l'apport en énergie solaire et donc l'activation des processus qui en découlent.

²³ Compte tenu de la perturbation majeure survenue aux deux tiges de la station I en janvier 2007 et de la possibilité que nos résultats n'aient pas permis de suivre tout le recul attribuable au dégel printanier cette année-là (printemps plus froid), l'érosion du printemps 2006-2007 est sous-représentée par rapport à celle de 2005-2006.

Les processus qui provoquent le recul des falaises sur le site d'étude sont en grande partie d'origine cryogénique avec 82 % des *iButtons* impliqués dans des événements de recul pour les périodes d'octobre à avril des saisons 2005-2006 et 2006-2007 (figure 5.26).

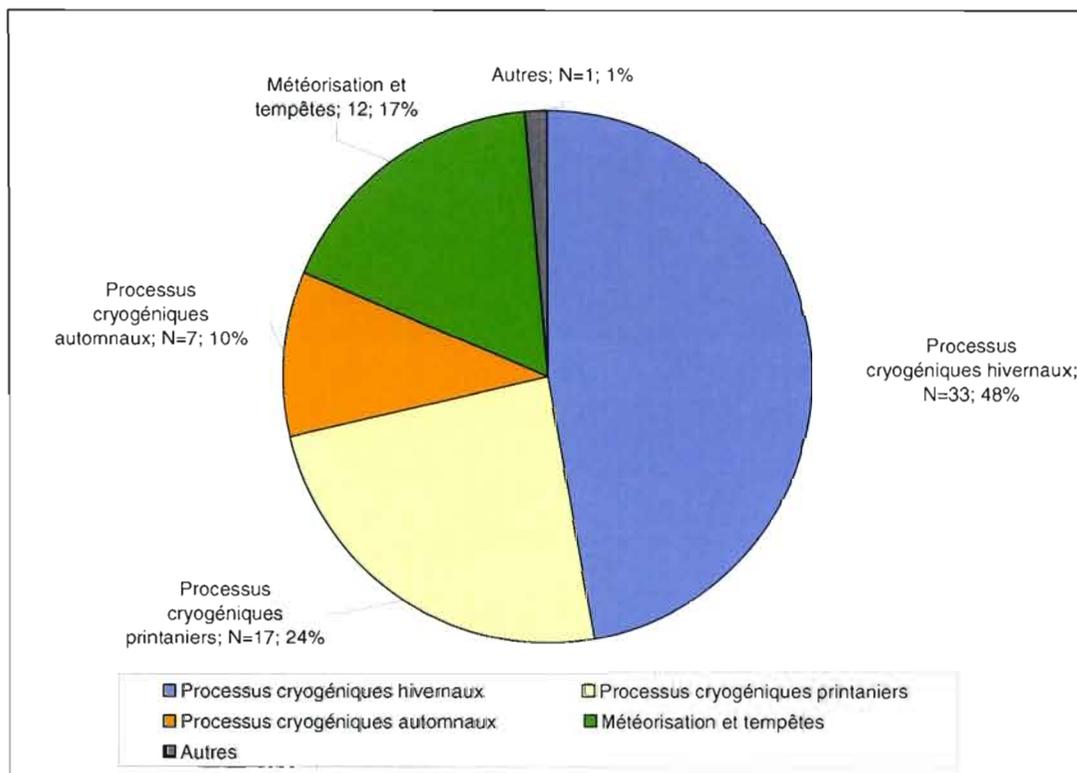


Figure 5.26. Quantification des processus responsables de l'érosion des falaises de silt marin à Ragueneau.

Ces résultats corroborent ceux obtenus sur le même site d'étude par Bernatchez et Dubois (2008). La quantification saisonnière de ces derniers, obtenue à l'aide de relevés mensuels couvrant les 12 mois de l'année, indique que 65 % de l'érosion se produit durant l'hiver (décembre à mars), 21 % durant le printemps-été (avril à juillet) et 14 % durant l'été-automne (août à novembre) pour la période 1998-2002. La saison hivernale étant caractérisée par la présence d'un pied de glace qui protège la falaise de l'action des vagues, ces auteurs sont en mesure d'affirmer

que 65 % de l'érosion des falaises qui se produit sur un cycle annuel est attribuable aux processus cryogéniques. Cette quantification permet de mettre en lumière l'importance des processus cryogéniques dans le recul annuel de ce type de système côtier en milieu tempéré froid. Nos résultats viennent surenchérir l'importance de ces processus puisque nous avons observé qu'ils étaient *actifs et responsables* d'évènements de recul en dehors de la saison hivernale. En effet, la part relative du nombre de *iButtons* impliqués dans des évènements de recul indiquent que les processus cryogéniques sont répartis à la fois durant la période automnale (10%), hivernale (48 %) et printanière (24 %). À partir de cette observation et des résultats de Bernatchez et Dubois (2008), l'érosion des silts marins attribuables aux processus cryogéniques sur un *cycle annuel* est vraisemblablement supérieure à 65 %. Des suivis annuels des falaises à l'aide de tiges multi-capteurs autonomes offrant une résolution quotidienne permettraient de connaître le pourcentage réel d'érosion attribuables aux processus cryogéniques sur le taux de recul annuel des falaises.

Bref, tout comme la quantification des reculs à l'échelle quotidienne, la perspective saisonnière de l'érosion des falaises du site d'étude a permis de montrer l'importance des reculs qui se produisent durant l'hiver et lors du dégel printanier ce qui confirme ainsi le rôle majeur des processus cryogéniques sur l'érosion des falaises du site d'étude. Dans le contexte des changements climatiques, où l'on prévoit des modifications des conditions climatiques particulièrement marquées pour la saison hivernale, ces conclusions s'avèrent importantes dans la prévision de l'évolution de ce type de système côtier.

CONCLUSION

Ce projet réalisé sur les côtes à falaises deltaïques de Ragueneau (Côte-Nord, Québec, Canada) a permis d'identifier et de quantifier l'influence des paramètres climatiques sur l'érosion côtière et de connaître les modes de recul et les processus de météorisation qui leur sont associés. L'absence de méthode permettant un suivi quotidien de l'érosion côtière est une des raisons principales qui explique que, jusqu'ici, très peu d'études avaient permis de corréler les paramètres climatiques avec les évènements de reculs et les processus géomorphologiques. L'utilisation d'une nouvelle méthode basée sur des concepts de microclimatologie a permis d'obtenir une résolution adéquate pour permettre de réaliser ce type d'étude. L'analyse des signatures thermiques acquises par des capteurs de température installés dans les tiges insérées aux stations de mesure entre les mois de septembre et d'avril des années 2005-2006 et 2006-2007 a permis d'identifier, à l'échelle quotidienne, les évènements de reculs des falaises. Cette résolution est, à notre connaissance, une des plus élevées jamais atteintes dans le domaine de la géomorphologie côtière.

Grâce à l'analyse des conditions climatiques, des signatures thermiques et des connaissances acquises sur le terrain, nous avons été en mesure de comprendre comment chacune des grandes situations climatiques provoquaient le recul des silts marins. Nos résultats montrent que les processus cryogéniques et de dessiccation comptent pour une grande part du recul des falaises et que leur évolution s'effectue selon plusieurs modes de recul : les effondrements ou le délogement de clastes et de dalles limités par des plans de faiblesse de dessiccation ou structuraux; les glissements en plan; les coulées bouseuses superficielles et le détachement de

microclastes d'origine cryogénique. Ces modes de recul contribuent à l'érosion de la falaise de manière continue en fonction des saisons, en plus de se superposer et d'interférer. Au terme de ce projet, on constate que l'érosion du silt intertidal est associée à l'évolution du silt marin à la base de la falaise. Son évolution s'effectue principalement en fonction de la gravité, et la relation entre les conditions climatiques et son évolution est seulement indirecte. Inversement, l'érosion des silts marins, impliquant des *iButtons*, est attribuable à quatre grandes situations climatiques qui sont, en ordre d'importance : les cycles de gel-dégel (31 %), les redoux hivernaux (27 %), le dégel printanier (24 %) et les tempêtes (17 %). Ces grandes situations climatiques engendrent des évènements de reculs dont l'intensité moyenne est très variable (entre 11 cm et 95 cm). Premièrement, les cycles de gel-dégel ayant provoqué des reculs ont été enregistrés pour les températures de l'air mais peuvent également se produire exclusivement dans les matériaux (sous des températures de l'air négatives et des valeurs de rayonnement global élevées). Ces résultats soulignent toute l'importance des suivis de température des matériaux et non exclusivement de la température de l'air dans les recherches sur les processus cryogéniques. Deuxièmement, les redoux hivernaux s'avèrent être des conditions climatiques favorables au déclenchement de reculs d'amplitude majeure, que nous avons attribués aux glissements en plan, puisque l'intensité moyenne de ces reculs est de 95 cm. Le fait que ces reculs aient été enregistrés à une seule des stations de mesures souligne également l'importance des caractéristiques physiques (dans ce cas, une falaise subverticale) dans le déclenchement de l'érosion au cours de ces épisodes de redoux. Troisièmement, les reculs enregistrés lors du dégel printanier sont caractérisés par un rythme particulièrement important qui nous permet d'observer des reculs presque continus au fil des jours. Quatrièmement, nos résultats confirment que le pouvoir érosif des vagues de tempête est fonction des processus cryogéniques et de dessiccation ayant affecté les falaises avant le passage des tempêtes. Enfin, l'analyse des résultats sur une perspective temporelle indique que les processus cryogéniques

sont aussi actifs et responsables d'évènements de recul en dehors de la saison hivernale.

L'importance des processus de météorisation et principalement de l'influence majeure des processus cryogéniques est une dimension essentielle à la compréhension de l'évolution de ce type de système côtier dans un contexte de changements climatiques. Les prévisions à la hausse des températures de l'air en période hivernale, du nombre de jours de redoux et du nombre de cycle de gel-dégel sont des conditions propices à l'augmentation des taux d'érosion hivernaux et annuels sur les côtes deltaïques.

Sur le plan méthodologique, soulignons l'adaptabilité des composantes de ce système de suivi (distance entre les capteurs, nombre de capteurs, longueur de tige, temps entre l'acquisition des données de température) qui permet l'usage des tiges multi-capteurs autonomes dans différents environnements (berges de rivières, sols ou versants) où les vitesses de recul et la dynamique des processus sont variables. De plus, sans toute fois substituer les visites de terrain, les études dans les environnements plus difficiles d'accès et qui ne permettent pas un suivi de terrain sur une fréquence élevée sont propices à l'usage des tiges multi-capteurs autonomes. Cependant, le suivi de l'érosion et des processus pourrait être amélioré par le développement d'une technique de suivi des températures de surface. De telles données viendraient compléter le portrait du régime thermique de la falaise, en plus de permettre l'identification des processus cryogéniques qui affectent les premiers centimètres de la surface. Il serait aussi particulièrement intéressant d'augmenter l'efficacité du système de suivi grâce à l'ajout de caméras sur les sites d'étude. Cette bonification permettrait d'obtenir une plus grande précision quand aux modes de recul et aux facteurs environnementaux qui affectent les falaises. Avec l'ajout de caméras, l'augmentation du nombre et de la qualité des repères visuels sur les tiges (lignes blanches) améliorerait la résolution du suivi. Enfin, l'augmentation de la

densité de tiges sur un site d'étude viendrait affiner les connaissances sur la relation entre les processus et les caractéristiques des falaises de même que sur la spatialité des processus.

Malgré l'importance des résultats obtenus, les recherches à réaliser dans le futur sont encore nombreuses puisqu'il s'agit d'une des premières études à permettre un suivi quotidien de l'évolution d'un système côtier. Dans le domaine des recherches sur les processus cryogéniques, nous avons vu que peu d'études de terrain alimentent ce champ d'étude trop souvent confiné aux laboratoires. L'utilisation de cette méthode, qui permet d'acquérir un grand nombre de données de terrain, pourrait contribuer à répondre aux interrogations encore importantes sur la variabilité de la température des matériaux lors des changements de phase de l'eau et sur l'identification des différentes fenêtres de températures sous lesquelles s'activent les processus de météorisation et les différents modes de recul qu'ils activent. Ces mêmes données pourraient également servir à l'analyse des régimes thermiques des falaises. Dans le domaine de la géomorphologie côtière, d'autres études du même genre mériteraient d'être conduites sur d'autres systèmes côtiers afin de pouvoir intégrer ces connaissances dans les modèles prévisionnels de l'évolution côtière et dans les indices de sensibilité des côtes, pour permettre d'ajuster les méthodes d'adaptation et les plans de gestion de ces environnements sensibles aux changements climatiques.

RÉFÉRENCES

- Allard, J. D. 1980. *Étude des berges en bordure de la rivière aux Outardes et du fleuve du Saint-Laurent dans les municipalités de Chutes-aux-Outardes, Ragueneau, Pointe-aux-Outardes et Baie Saint-Ludger*, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la géotechnie, 29 p.
- Bernatchez, P. 1995. *Classification de l'érosion des berges de la péninsule de Manicouagan*, Rapport soumis à la MRC de Manicouagan, Baie-Comeau, 44 p.
- Bernatchez, P. 2003. « Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes : Synthèse, processus, causes et perspectives », Thèse de doctorat, Québec, Université Laval, 460 p.
- Bernatchez, P., Fraser, C. et Lefavre, D. 2008. « Effets des structures rigides de protection sur la dynamique des risques naturels côtiers : érosion et submersion », In *Actes du 4^{ème} conférence canadienne sur les géorisques* (Université Laval, Québec, 20-24 mai 2008), 8 p.
- Bernatchez, P. et Dubois, J.-M.M. 2004. « Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 58, no. 1, p. 45-71.
- _____. 2008. « Seasonal quantification of coastal processes and cliff erosion on the fine sediments shoreline in a cold temperate climate, north shore of the St. Lawrence maritime estuary, Québec », *Journal of Coastal Research*, vol. 24, no. 1A, p. 169-180.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. et Morissette, A. 2008. « *Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques* », Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Consortium Ouranos et au FACC, 256 p.

- Bernatchez, P., Jolivet, Y et Corriveau, M. 2008. « Influence des redoux hivernaux et du couvert nival sur l'érosion des falaises argileuses : Comparaison d'un hiver chaud et d'un hiver froid », In *Changement environnementaux et dynamique des hydrosystèmes anciens et actuels: Congrès de l'Association Québécoise pour l'étude du Quaternaire (AQQUA)*,. (Baie-Comeau, Québec, 19-22 août 2008 .
- Bernatchez, P., Jolivet Y. et Corriveau, M. soumis, 2010. « Development of an automated method for continuous detection and quantification of coastal erosion events for coupling climatic parameters and coastal evolution », *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Bland, W. et Rolls, D. 1998. *Weathering, an introduction to the scientific principles*. New York: Arnold, Oxford University Press, 271 p.
- Bourque, A. and G. Simonet. 2008. « Québec » In *Vivre avec les changements climatiques au Canada*, Édition 2007, sous la dir. de D.S. Lemmen, J. Warren, J. Lacroix et E. Bush, p. 171-226. Ottawa (Ontario): Gouvernement du Canada.
- Brodeur, D. 1987. « Le rôle des processus périglaciaires dans l'érosion des rives du haut-estuaire du Saint-Laurent », In *Comptes rendus de la Conférence canadienne sur le littoral*, (Québec) p. 411-425.
- Chagnon, J.-Y., Laroche, F., Levebvre, G. 1979. *Comportement des berges de l'estuaire de la rivière aux Outardes*, Comité consultatif Hydro-Québec, Rapport final, 49 p.
- Charlier, R. H., Chaineux, M.-C. P. et Morcos, S. 2005. « Panorama of the history of coastal protection », *Journal of Coastal Research*, vol. 21, no. 1, p. 79-111.
- Cooper, J.A.G., Jackson, D.W.T., Navas, F., McKenna, J. et Malvarez, G., 2004. « Identifying storm impacts on an embayed, high-energy coastline: Examples from western Ireland », *Marine Geology*, vol. 210, no. 1-4, p. 261-280.
- Corriveau, M. 2005. « Caractérisation des variables environnementales et des profils de température d'une côte deltaïque: Ragueneau, Côte-Nord, Québec », Mémoire de baccalauréat en géographie, Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 144 p.

- Couper, P. 2003. « Effects of silt-clay content on the susceptibility of river banks to subaerial erosion », *Geomorphology*, vol. 56, p. 95-108.
- Couper, P., Maddock, I. et Stott, T. 2001. « Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the river arrow, Warwickshire, UK », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 26, p. 631-646.
- Couper, P., Stott, T., et Maddock, I. 2002. « Insights into river bank erosion processes derived from analysis of negative erosion-pin recordings: Observations from three recent UK studies », *Earth Surface Processes and Landforms* vol. 27, no. 1, p. 59-79.
- CRIACC, 2005-2009
Centre de ressources en impacts et adaptations au climat et à ses changements
<http://www.criacc.qc.ca/index.html>
- Daigneault, M. 2001. « Processus d'altération/érosion à l'interface océan/continent/atmosphère : Aspects quantitatifs et semi quantitatifs. Exemples des falaises de l'est du Canada (Gaspésie) », Thèse de doctorat, Saint-Étienne (France), École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne et Université Jean Monnet, 391 p.
- Davies, M., Omar Hamza, C.R. et Harris, C. 2001. « The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 12, p. 137-144.
- Dionne, J.-C. 2001a. « Mesures récentes de l'érosion des schorres supérieurs à Montmagny et à Sainte-Anne-de-Beaupré, moyen estuaire du Saint-Laurent », In *Conférence canadienne sur le littoral* (Québec) p. 363-375
- Dionne, J.-C. 2001b. « Relative sea-level changes in the St. Lawrence estuary from deglaciation to present day », In *Deglacial history and relative sea-level change, northern New England and adjacent Canada*, sous la dir de T.K. Weddle et M.J. Rettle, Geological Society of America, Special paper 351, p. 271-284
- Dionne, J.-C. et Brodeur, D. 1988. « Frost weathering and ice action in shore platform development with particular reference to Québec, Canada », *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband*, vol. 71, p. 117-130.

Dubois, J.-M.M., Bernatchez, P., Bouchard, J.-D., Daigneault, B., Cayer, D. et Dugas, S. 2005. « Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période 1996-2003 ». Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, 291 p. + annexes

Environnement Canada, 2005-2009

Archives nationales d'informations et de données climatiques

http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html

Ferrick, M. G. et Gatto, L.W. 2005. « Quantifying the effect of a freeze-thaw cycle on soil erosion: Laboratory experiments », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 30, p. 1597-1615.

Ferrick, M.G., Gatto, L.W. et Grant, S.A. 2005. « Soil freeze-thaw effects on bank erosion and stability : Connecticut river field site, Norwich, Vermont », ed. Engineers Research and Development Center US army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL): Washington, DC.

Forbes, D.L., Parkes, S.G., Manson, G.K. et Ketch, L.A. 2004. « Storms and shoreline retreat in the southern gulf of St. Lawrence », *Marine Geology*, vol. 210, no. 1-4, p.169-204.

Friesinger, S. 2009. « Géorisques côtiers, adaptation et perceptions des communautés côtières dans le golfe du Saint-Laurent ». Mémoire de maîtrise en géographie, Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 221 p.

Gaskin, S. J., Pieterse, J., Al Shafie, A. et Lepage, S. 2003. « Erosion of undisturbed clay samples from the banks of St. Lawrence river », *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 30, p. 585-595.

Gornitz, V. 1995. « Sea-level rise: A review of recent past and near-future trends », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 20, p. 7-20.

Grondin, G., D'Astous, J., Demers, D. et Dorval, P. 1990. « L'érosion des berges de la péninsule de Manicouagan et de la région de Ragueneau, Québec », In *Comptes rendus de la Conférence canadienne sur le littoral*, (Kingston, 8-11 mai 1990), p. 503-520

- Hall, K. 2004. « Evidence for freeze-thaw events and their implications for rock weathering in northern Canada », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29, no. 1, p. 43-57.
- _____. 2007. « Evidence for freeze-thaw events and their implications for rock weathering in northern Canada: II. The temperature at which water freezes in rock », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, no. 2, p. 249-259.
- Hallet, B., Walder, J.S. et Stubbs, C.W. 1991. « Weathering by segregation ice growth in microcracks at sustained sub-zero temperatures: Verification from an experimental study using acoustic emissions », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 2, p. 283-300.
- Hénaff, A., Lageat, Y., Costa, S. et Plessis, E. 2002. « Le recul des falaises crayeuses du pays de Caux: Détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution », *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement* vol. 2, p.107-118.
- Herbich, J.B. 2000. *Handbook of coastal engineering*, New York: Inc McGraw-Hill Companies, 1152 p.
- Himmelstoss, E.A., FitzGerald, D.M., Rosen, P.S. et Allen, J.R. 2006. « Bluff evolution along coastal drumlins : Boston harbor islands, Massachusetts », *Journal of Coastal Research*, vol. 22, no. 6, p. 1230-1240.
- IPCC. 2001. « Climate change 2001 : Impacts, adaptation and vulnerability », Edited by Cambridge University Press. Cambridge, U.K. 1032 p.
- Lavallée, J.-G. 1993. « Suréquipement des centrales de la rivière aux Outardes. Rapport final sur le comportement des berges de l'estuaire de la rivière aux Outardes », Hydro-Québec, Direction aménagement de centrales, Service géologie et structures, 35 p.
- Lawler, D. M. 1986. « River bank erosion and the influence of frost: A statistical examination », *Transactions of the institute of British geographers*, vol. 11, p. 227-242.
- _____. 2005a. « The importance of high resolution monitoring in erosion and deposition dynamics studies: Examples from estuarine and fluvial systems », *Geomorphology*, vol. 64, p. 1-23.

- _____. 2005b. « Defining the moment of erosion: The principle of thermal consonance timing », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 30, no. 13, p. 1597-1615.
- Lewkowicz, A.G. 2001. « Temperature regime of a small sandstone tor, latitude 80 °n, Ellesmere island, Nunavut, Canada », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 12, no. 4, p. 351-366.
- Long, B.F. 1983. « Evolution of the Outardes estuary after the hydraulic power regulation », In *Comptes rendus de la Conférence canadienne sur le littoral*. p. 327-328
- Lozano, I., Devoy, R.J.N., May, W. et Anderson, U. 2004. « Storminess and vulnerability along the atlantic coastlines of Europe: Analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario », *Marine Geology*, vol. 210, p. 205-225.
- Manson, Gavin K. 2002. « Subannual erosion and retreat of cohesive till bluffs, McNab's island, Nova Scotia », *Journal of Coastal Research*, vol. 18, no. 3, p. 421-432.
- Matsuoka, N. 2001. « Microgelivation versus macrogelivation: Towards bridging the gap between laboratory and field frost weathering », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 12, no. 3, p. 299-313.
- McCulloch, M.M., D.L. Forbes, J. Shaw, CCAF (Climate Change Action Fund), and A041 Scientific Team. 2002. « Coastal impacts of climatic change and sea-level rise on Prince Edward Island: Synthesis report & supporting documents », Geological Survey of Canada, Dartmouth. 62 p.
- McGreevy, J.P. 1981. « Some perspectives on frost shattering », *Progress in physical geography*, vol. 5, no. 1, p. 56-75.
- Ministère des ressources naturelles et faune du Québec, cartes numériques et orthophotographie (2001).
- Miotke, F.-D. 1982. « Physical weathering in Taylor valley, Victoria land, Antarctica », *Polar geography and geology*, vol. 6, p. 71-98.
- Nyberg, R. 1993. « Freeze-thaw activity and some of its geomorphic implications in the Abisko mountains, Swedish Lapland », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 4, no. 1, p. 37-47.

- Ødegård, R.S. et Sollid, J.L. 1993. « Coastal cliff temperature related to the potential for cryogenic weathering processes, Western Spitsbergen, Svalbard », *Polar Research*, vol. 12, p. 95-106.
- Oke, T.R. 1987. *Boundary layer climates*, New York: Routledge. 435 p.
- Ouranos, 2004
 S'adapter aux changements climatiques, 91 pages
 Auteurs : DesJarlais, C. *et al.*
http://www.ouranos.ca/fr/pdf/ouranos_sadapterauxcc_fr.pdf
- Parkes, G.S., Forbes, D.L. et Ketch, L.A. 2006. « Élévation du niveau de la mer et subsidence régionale », In *Les impacts du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer sur la zone côtière du sud-est du nouveau-brunswick*, sous la dir de R. Daigle, 646 p. : Environnement Canada.
- Paskoff, R. 2001. « Le changement climatique et les espaces côtiers, l'élévation du niveau de la mer : Risques et réponses », In *Actes du colloque d'Arles* (Paris) 97 p.
- Raynald, M. 1997. « Étude géologique et géotechnique des rives de l'estuaire de la rivière aux Outardes (Comté de Saguenay) », Rapport à Hydro-Québec, Direction projets de centrales, Service géologie et géotechnique, 25 p.
- Regnauld, H., Pirazzoli, P.A., Morvan, G. et Ruz, M. 2004. « Impacts of storms and evolution of the coastline in western France », *Marine Geology*, vol. 210, no. 1-4, p. 325-337.
- Service hydrographique du Canada, 2005-2009
 Pêches et Océans Canada
<http://www.waterlevels.gc.ca/french/Canada.shtml>
- Shabbar, A. et Bonsal, B. 2003. « An assessment of changes in winter cold and warm spells over Canada », *Natural Hazards*, vol. 29, p. 173-188.
- Shaw, J., Taylor, R.B., Solomon, S., Christian, H.A. et Forbes, D.L. 1998. « Potentials impacts of global sea-level rise on canadian coast », *Le géographe canadien*, vol. 42, p. 365-379.
- Stott, T. 1997. « A comparison of stream bank erosion processes on forested and moorland streams in the Balquhider Catchments, central Scotland », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 22, no. 4, p. 383-399.

- Thorn, C.E. 1982. « Bedrock microclimatology and the freeze-thaw cycle : A brief illustration », *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 72, no. 1, p. 131-137.
- Trenhaile, A.S. et Mercan, D.W. 1984. « Frost weathering and the saturation of coastal rocks », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 9, p. 321-331.
- Wolman, M.G. 1959. « Factors influencing erosion of a cohesive river bank », *American Journal of Science*, vol. 257, p. 204-216.
- Yatsu, Eiju. 1988. *The nature of weathering : An introduction*, Tokyo (Japan): Sozosha, 642 p.

APPENDICE A

SIGNATURES THERMIQUES DES RECVLS DES FALAISES

Cet appendice présente, de manière chronologique, les signatures thermiques des reculs observés au cours des saisons 2005-2006 et 2006-2007 d'acquisition de données. Lors de la présentation des résultats, nous faisons allusion au « *iButton* de référence ». Dans la plupart des cas, il s'agit du iB1 qui, dès l'insertion des tiges, se situe à l'extérieur des falaises. Par contre, dans certain cas, le *iButton* de référence diffère notamment dans le cas où le iB1 devient hors d'usage à la suite d'un bris informatique du capteur. Sur les graphiques des signatures thermiques des événements de recul des falaises, la courbe de températures des *iButtons* de référence est illustrée par une ligne en tirets rouge. Le *iButton* impliqué dans l'événement de recul est représenté par des points noirs. Lorsqu'il y a plus d'un *iButton* impliqué dans le recul, ceux-ci sont représentés également par des points mais sont de couleurs lime et lilas. On observe un recul lorsque la température des *iButtons* localisés à l'intérieur de la falaise rejoint la température du *iButton* de référence. Nous vous référons à la section 2.3.1 pour un exemple d'interprétation d'une signature thermique d'un recul.

Saison 2005-2006

16 octobre 2005 : iB2, station 1 (silt marin)

À la station 1, on observe que le comportement thermique du iB2 change pour fluctuer plus rapidement et suivre de plus près les courbes des températures de l'air et du *iButton* de référence (iB1) à partir du 16 octobre 2005 (figure A.1). Avant ce recul, les températures enregistrées par le iB2 fluctuent moins rapidement et présentent un léger décalage dans le temps par rapport aux températures de l'air et du iB1 en plus de varier sur une plus faible amplitude.

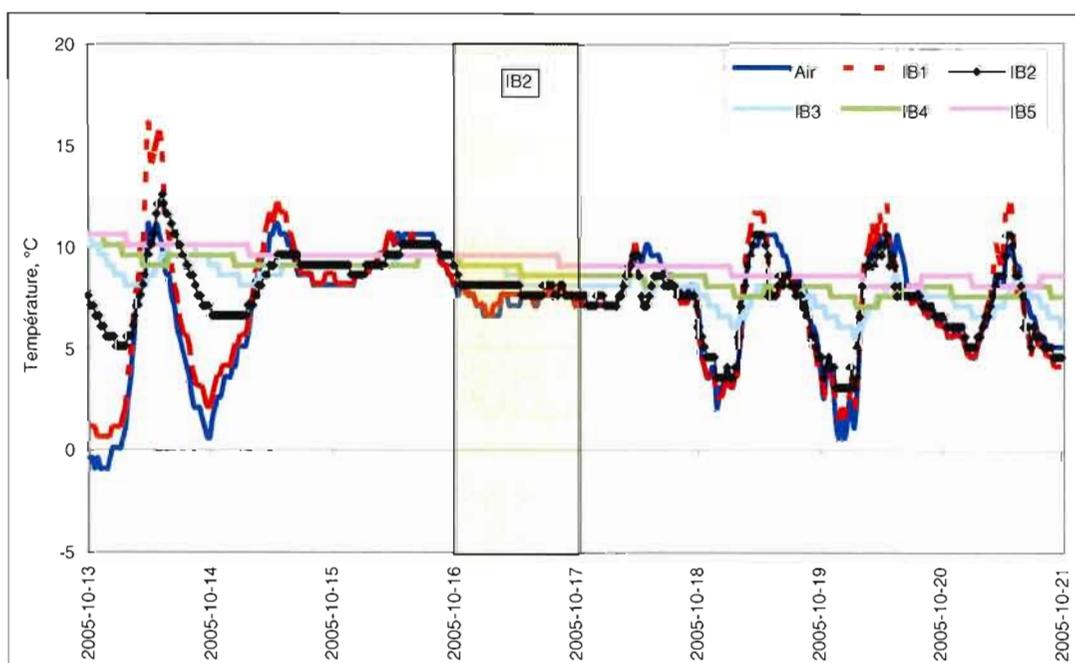


Figure A.1. Signature thermique du recul du 16 octobre 2005 impliquant le iB2 de l'unité de silt marin à la station 1.

17 octobre et 20 octobre 2005 : iB2 et iB3, station 3 (silt marin)

À la station 3, la signature thermique du recul du iB2 s'observe le 17 octobre 2005, jour à partir duquel les températures enregistrées par ce capteur suivent la courbe du *iButton* de référence (iB1) (figure A.2). Un autre événement de recul impliquant la sortie d'un *iButton* a lieu dès les jours suivants et implique l'émergence du iB3 de l'unité de silt marin de la station 3. Ainsi, à partir du 20 octobre la température du iB3 rejoint celle du *iButton* de référence (iB1) (figure A.2.).

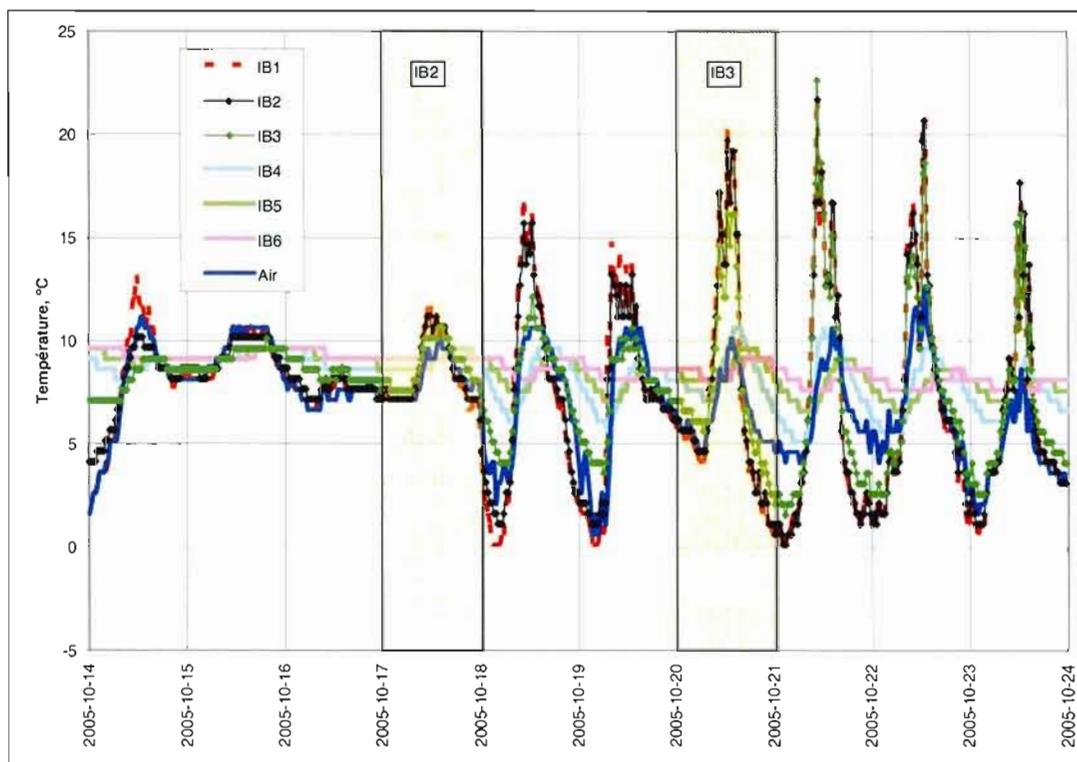


Figure A.2. Signature thermique des reculs du 17 et du 20 octobre 2005 impliquant les iB2 et iB3 de l'unité de silt marin à la station 3.

19 novembre 2005 : iB3, station 1 (silt marin)

À la station 1, on enregistre un recul impliquant le iB3 le 19 novembre 2005. À la figure A.3, on observe que le comportement thermique du iB3 rejoint celui des *iButtons* de référence (iB1 et iB2)²⁴ et celui de l'air à partir du 19 novembre en milieu de journée. Le 20 novembre une visite sur le terrain a permis de capter une image de la falaise qui confirme que le iB3 est à l'extérieur, mais près de la surface, de la falaise (figure A.4).

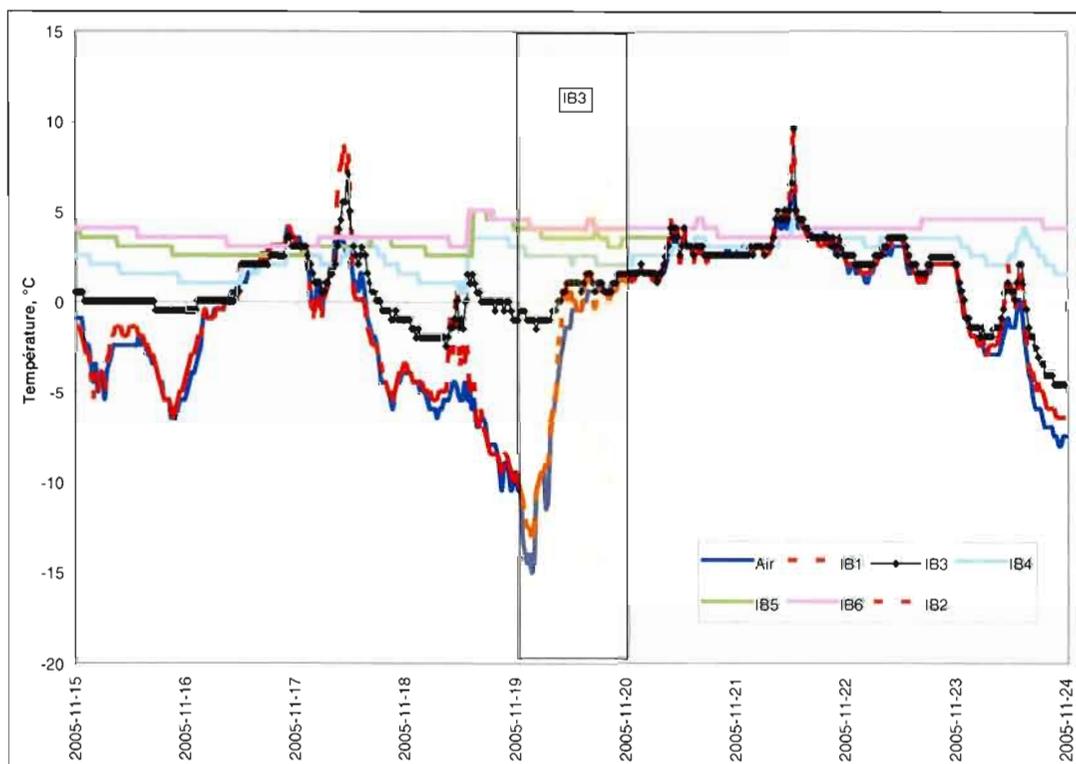


Figure A.3. Signature thermique du recul du 19 novembre 2005 impliquant le iB3 de l'unité de silt marin à la station 1.

²⁴ Après le 20 novembre, le *iButton* de référence iB1 est défectueux et ne répond plus ni n'enregistre de nouvelles données. À partir de cette date, le iB2 sert de capteur de référence.



Photo: Pascal Bernatchez, 2005

Figure A.4. État de la falaise et position des iButtons le 20 novembre 2005 dans l'unité de silt marin à la station 1.

19 novembre et 23 novembre 2005 : iB4, station 3 (silt marin)

À la station 3, on enregistre un recul impliquant l'émergence du iB4 le 19 novembre 2005. À partir de cette date, le comportement thermique du iB4 change et correspond désormais à celui d'un *iButton* localisé à l'extérieur de la falaise (figure A.5). Puis, dès le 23 novembre, un nouveau recul se produit et implique cette fois la sortie du iB5 (figure A.5). On remarque qu'en ce jour, le comportement thermique du iB5 vient à suivre de très près celui du *iButton* de référence.

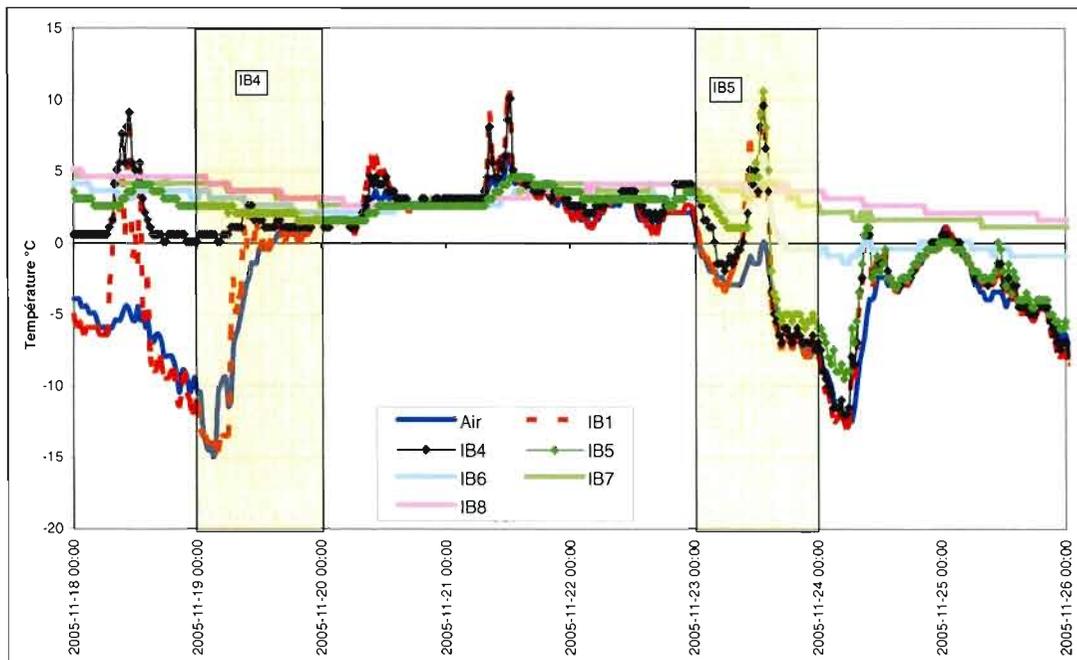


Figure A.5. Signature thermique des reculs du 21 et du 23 novembre 2005 impliquant le iB44 et le iB5 de l'unité de silt marin à la station 3.

30 novembre 2005 : iB6, station 3 (silt marin)

Très tôt dans la nuit du 29 au 30 novembre 2005, le iB6 est impliqué dans le recul de la falaise à la station 3. On observe la modification du comportement thermique de ce dernier alors qu'il rejoint les températures des autres *iButtons* localisés à l'extérieur de la falaise à la figure A.6.

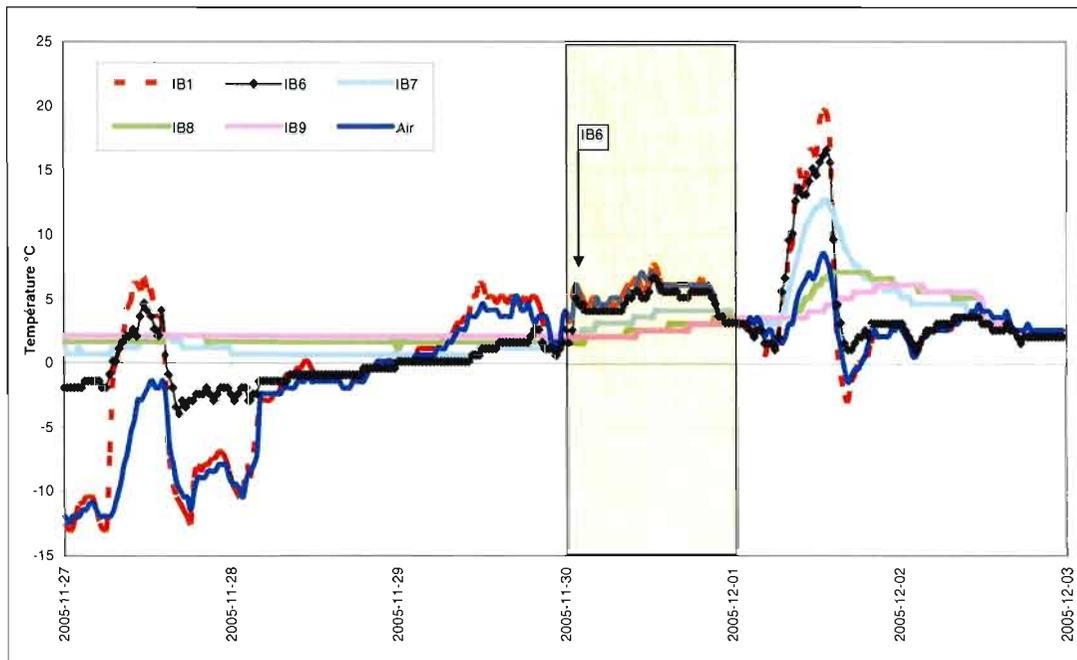


Figure A.6. Signature thermique du recul du 30 novembre 2005 impliquant le iB6 de l'unité de silt marin à la station 3.

2 décembre 2005 : iB3, station 2 (silt marin) et iB6 et iB7, station 3 (silt marin)

Le 2 décembre 2005 l'érosion engendre la sortie du iB3 à la station 2 (figure A.7) et celle du iB7 et le iB8 à la station 3 (figure A.8). Pour ces deux stations, il apparaît sur les signatures thermiques que les conditions du 1^{er} décembre ont aussi provoqué un recul ramenant les *iButtons* concernés plus près de la surface.

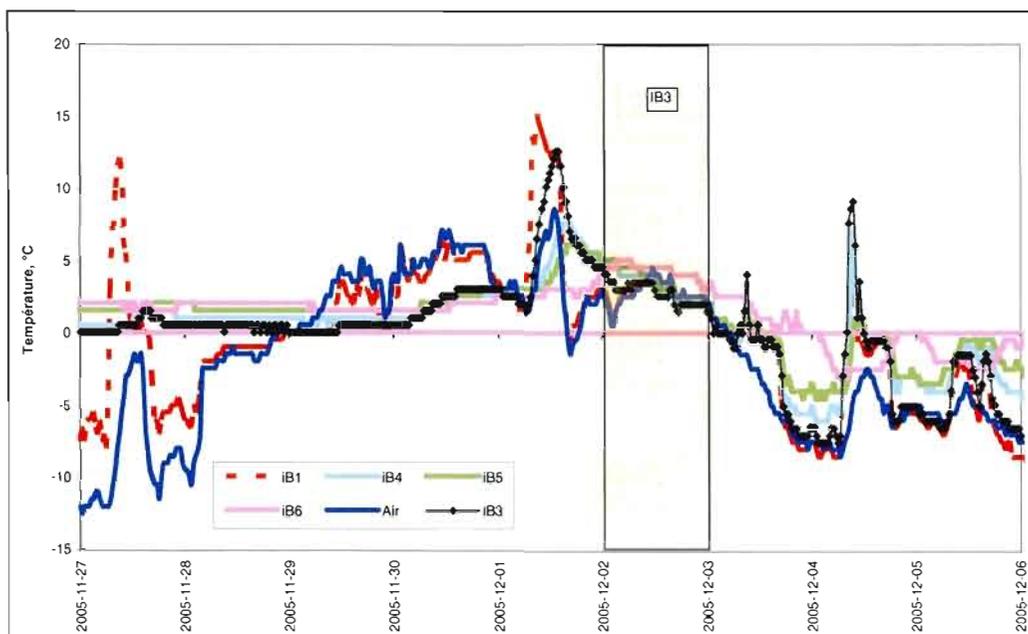


Figure A.7. Signature thermique du recul du 2 décembre 2005 impliquant le iB3 de l'unité de silt marin à la station 2.

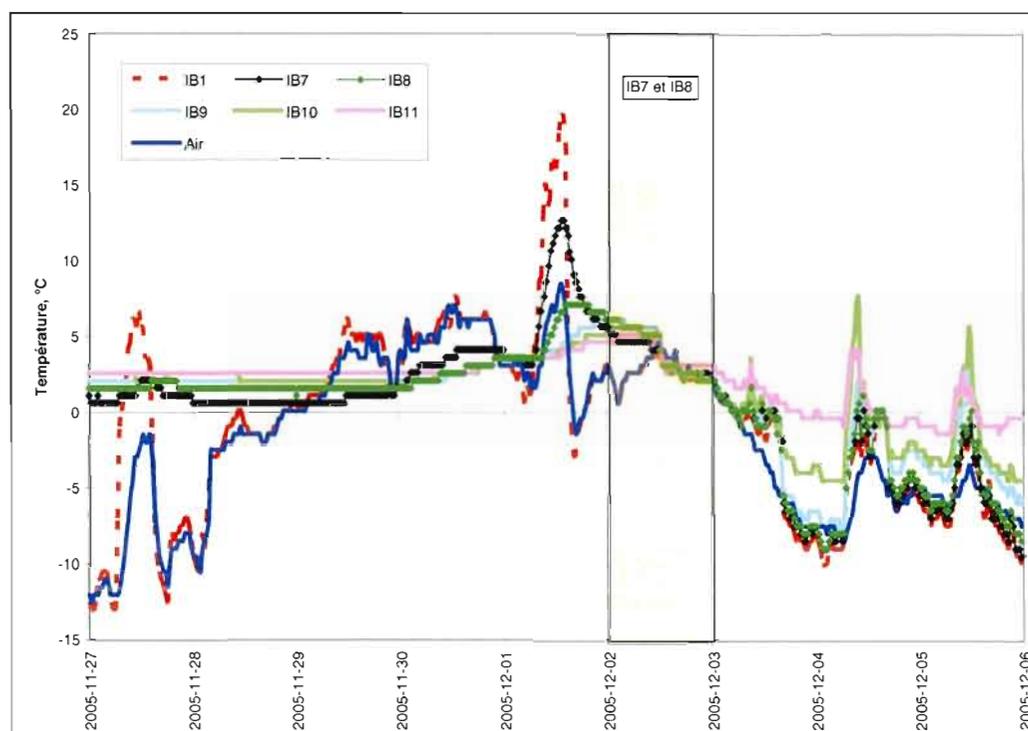


Figure A.8. Signature thermique du recul du 2 décembre 2005 impliquant les iB7 et iB8 de l'unité de silt marin à la station 3.

30 janvier 2006 : perturbation, station 1 (silt marin)

Le 30 janvier 2006, le comportement thermique de tous les *iButtons* de la tige insérée dans le silt marin de la station 1 change et plus aucun, ni même le *iButton* de référence, ne suit la température de l'air (figure A.9 et figure A.10). Notez que le iB1 et le iB5 (station 1, silt marin) sont hors d'usage avant la perturbation et que le iB2 est sous la neige depuis les précipitations du 14 janvier 2006.

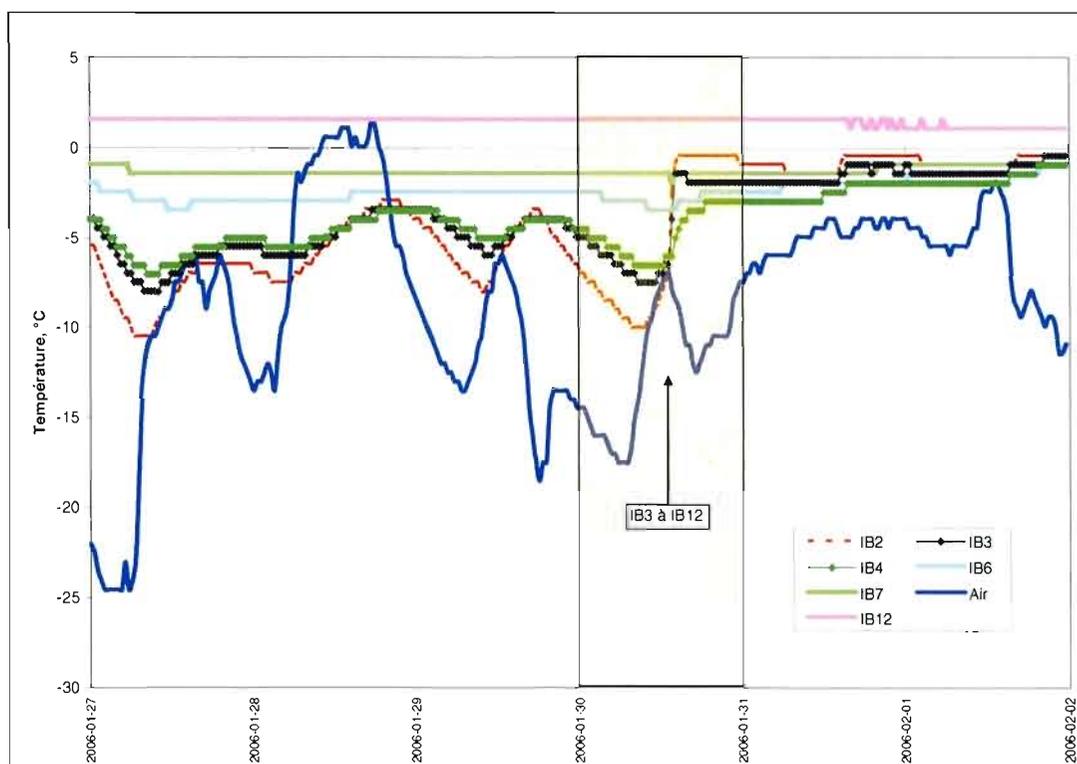


Figure A.9. Signature thermique de la perturbation du 30 janvier 2006 impliquant toute la tige de l'unité de silt marin à la station 1.

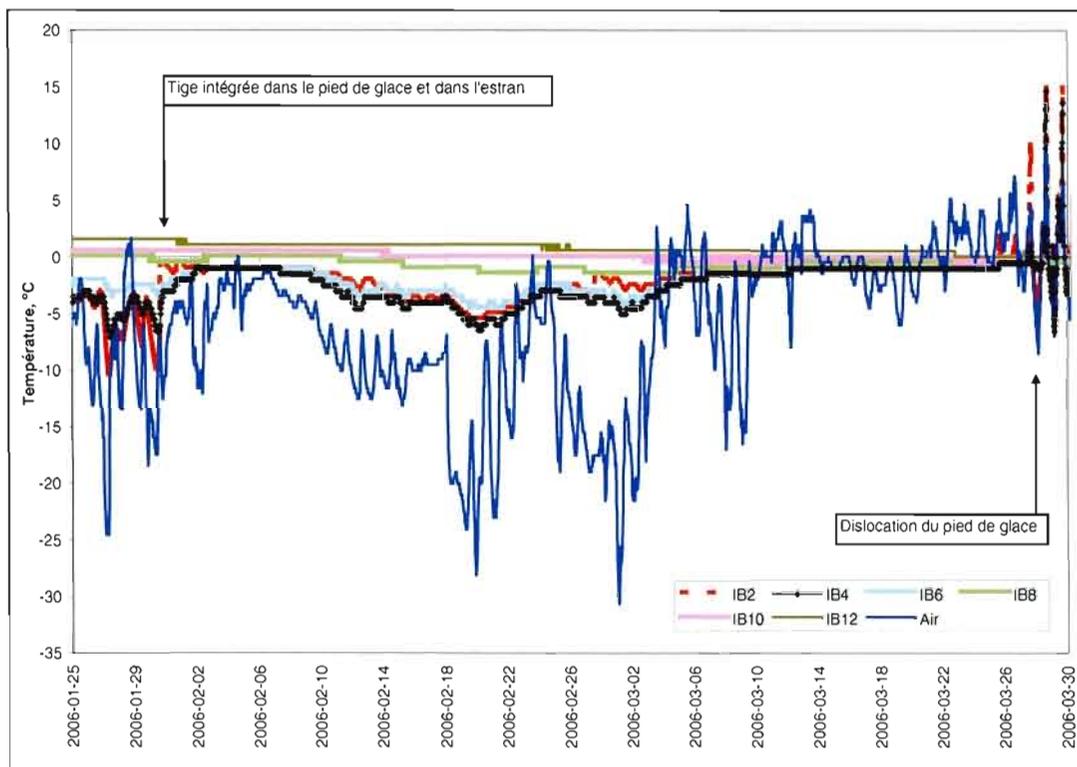


Figure A.10. Stabilité des températures enregistrées par les *iButtons* suite à la perturbation du 30 janvier de l'unité de silt marin à la station 1.

9 mars 2006 : iB4, station 2 (silt marin)

Avec la fonte du couvert de neige (5 mars 2006), la falaise est de nouveau exposée directement aux variations du temps et au rayonnement global, et le 9 mars on enregistre un recul impliquant le iB4 à la station 2 (silt marin). On observe à la figure A.11 que l'émergence du iB4 se fait de manière progressive puisque celui-ci répond de plus en plus aux variations de température au fil des jours.

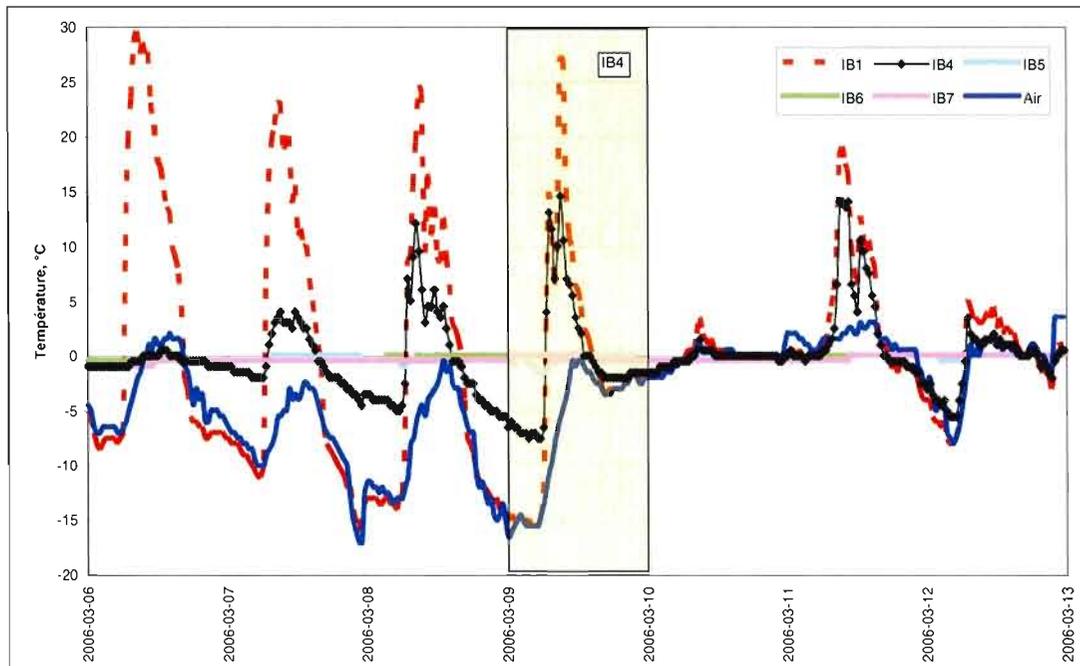


Figure A.11. Signature thermique du recul du 9 mars 2006 impliquant le iB4 de l'unité de silt marin à la station 2.

26 mars 2006 : iB3 à iB7, station 1 (silt intertidal)

Dans l'unité de silt intertidal de la station 1, qui était demeurée stable tout au long de la saison froide, on enregistre un recul majeur le 26 mars 2006 entre 5 h 00 et 5 h 30 du matin. L'érosion occasionne alors l'émergence des iB3, iB4, iB5 et iB6 en plus d'amener le iB7 tout juste à la limite externe de la surface de la falaise²⁵. À la suite de ce recul, on remarque que le comportement thermique du iB7 est caractéristique des températures de surface (grande amplitude thermique) alors que les températures du iB8 sont maintenues près du point de congélation. L'impact de

²⁵ Compte tenu de la défectuosité des iB1, iB2 et iB3 qui se manifeste à partir du 20 novembre 2006, on ignore la date de sortie du iB2 et le iB4 est utilisé comme *iButton* de référence à la place du iB1 à la suite de ce recul.

l'érosion du 26 mars sur la température des *iButtons* est parfaitement visible à la figure A.12.

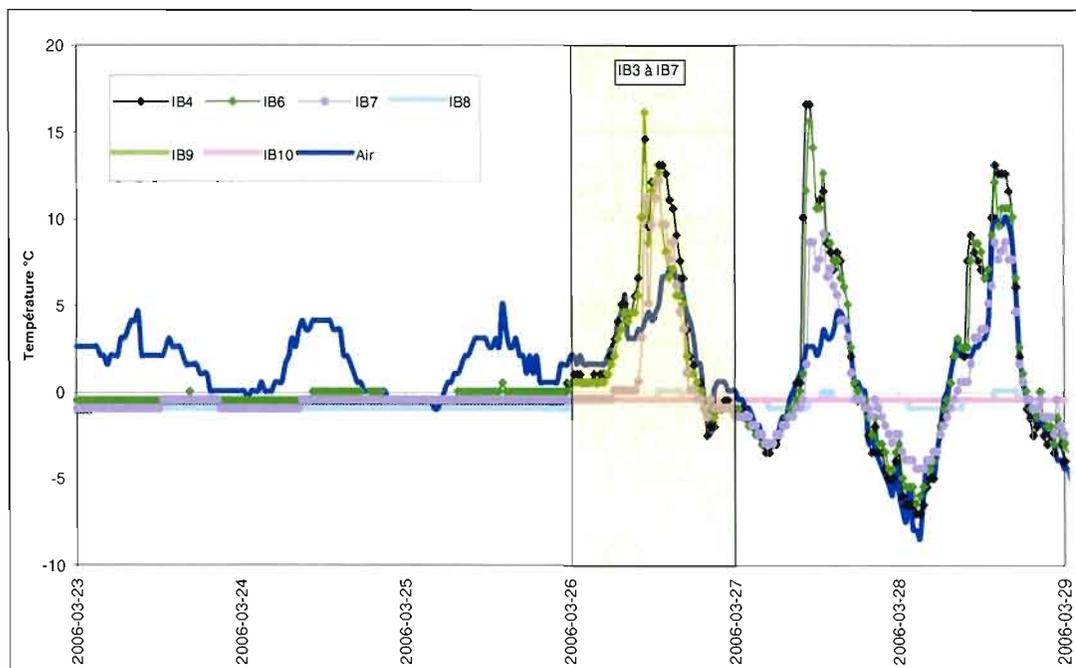


Figure A.12. Signature thermique du recul du 26 mars 2006 impliquant les iB3 à iB7 de l'unité de silt intertidal à la station 1.

27 mars, 28 mars et 30 mars 2006 : iB5 à iB8, la station 2 (silt marin)

Les reculs observés à la fin du mois 2006 date du 27, 28 et 30 mars et impliquent les iB5, iB6 et iB7 et iB8 à la station 2 (silt marin). Les modifications des comportements thermiques caractéristiques de l'émergence des *iButtons* sont observables à la figure A.13. Ainsi, le 27 mars, la température du iB5 rejoint celles des *iButtons* de référence alors que la veille encore on observait une différence importante entre leurs températures. Ce même jour, on observe aussi une modification des températures du iB7 qui jusqu'ici évoluaient de façon plutôt linéaire. Le iB7 commence à subir des variations de températures qui seront de plus

en plus importantes jusqu'à ce que ce dernier se retrouve à l'extérieur de la falaise en date du 28 mars en même temps que le iB6. Enfin, le 30 mars, l'érosion de la falaise dégage le iB8. À la figure A.13, on remarque que les températures du iB8 sont similaires à celles des *iButtons* de référence (surtout pour les températures les plus froides). Cependant, c'est avec la modification des températures du iB9, passant d'un comportement plutôt linéaire le 29 mars à un comportement nettement plus variable le 30 mars, que l'on identifie cet événement de recul. La photo prise en date du 30 mars montre que ce dernier est bel et bien exposé (figure A.14).

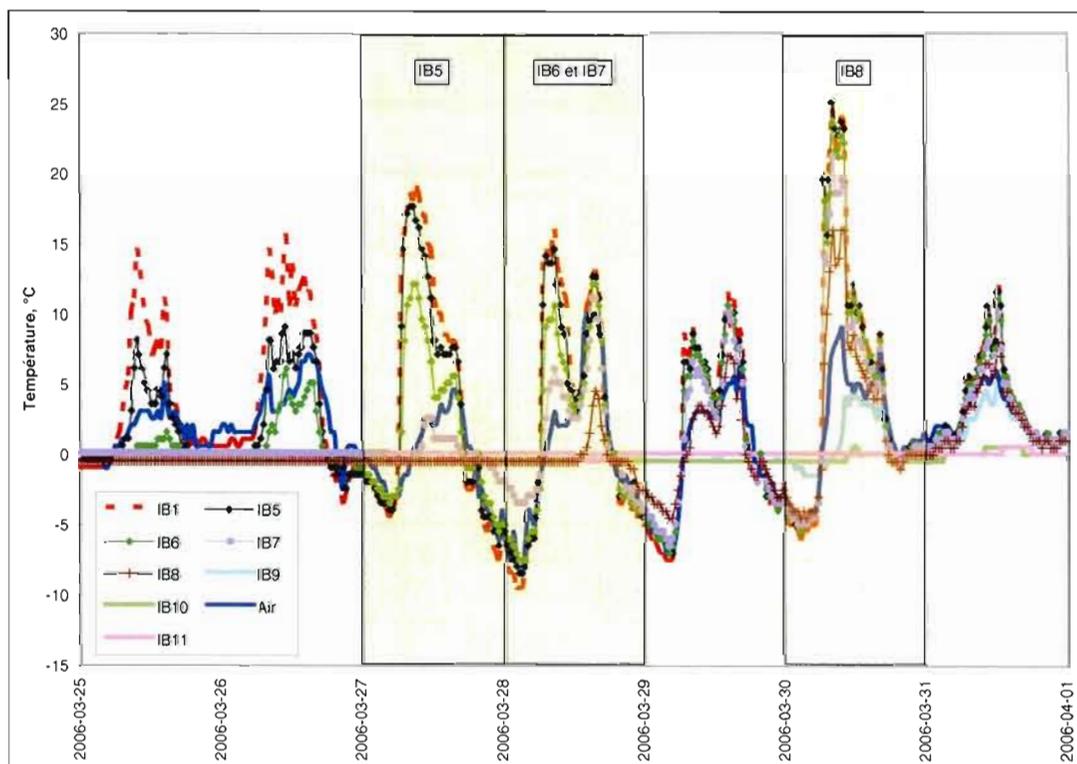


Figure A.13. Signature thermique des reculs du 27, 28 et du 30 mars 2006 impliquant les iB5 à iB8 de l'unité de silt marin à la station 2.

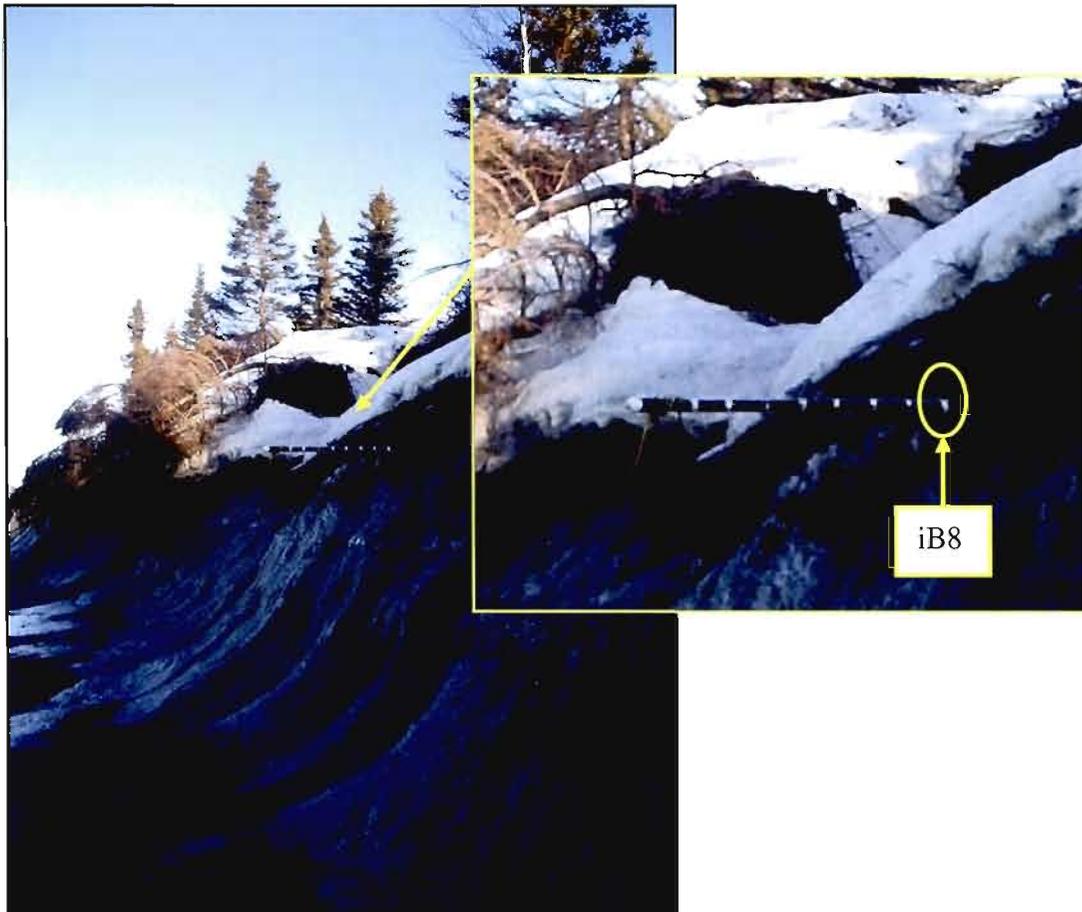


Figure A.14. État de la falaise et position des *iButtons* le 30 mars 2006 dans l'unité de silt de la station 2.

25 mars, 26 mars et 28 mars 2006 : iB9 à iB12, station 3 (silt marin)

L'érosion à la station 3 reprend également avec vigueur à la fin du mois de mars 2006. En effet, les 25 mars (iB9), 26 mars (iB10) et 28 mars (iB11 et iB12) on observe des événements de recul impliquant au total la sortie de quatre *iButtons* (figure A.15). La figure suivante illustre le comportement thermique des iB9, iB10, iB11 et iB12 lors des événements de recul. Le 28 mars, on observe que le iB10

adopte un comportement thermique imprévisible. L'effondrement de matériel sur la tige à la hauteur du *iButton* pourrait en être la cause.

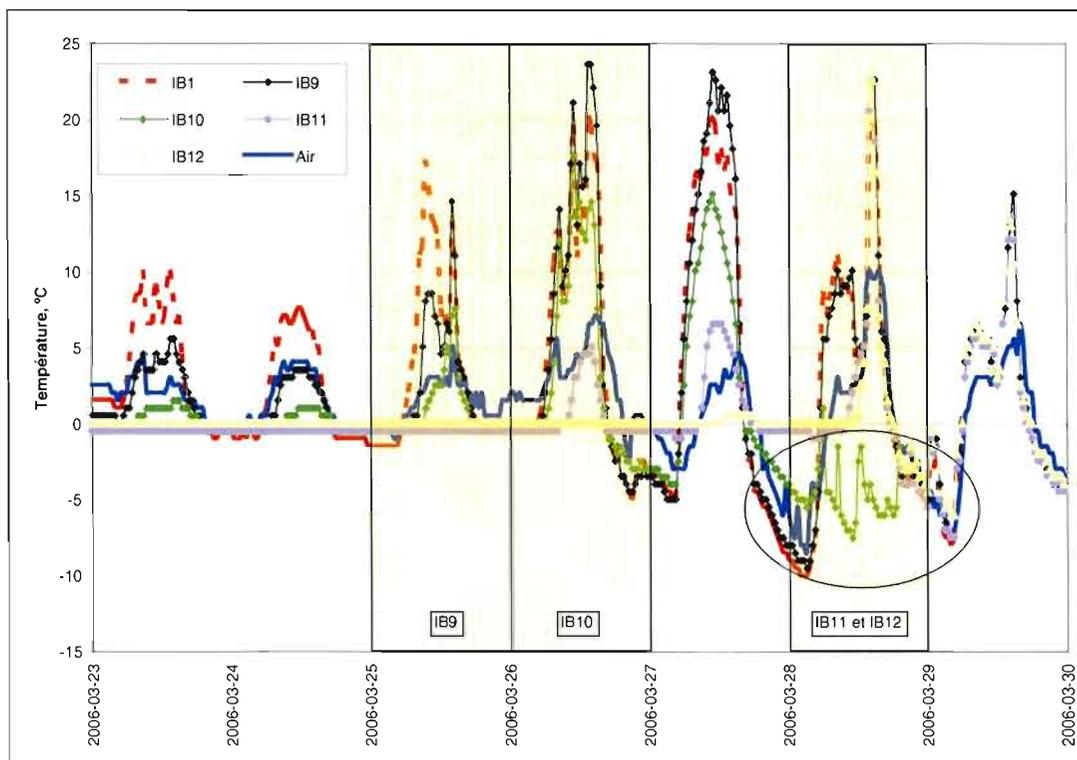


Figure A.15. Signature thermique des reculs du 25, 26 et 28 mars 2006 impliquant les iB9 à iB12 de l'unité de silt marin à la station 3.

2 avril, 3 avril, 6 avril et 7 avril 2006 : iB8 à iB11, station 1 (silt intertidal)

À la station 1, dans l'unité de silt intertidal, on enregistre des reculs les 2 (iB8), 3 (iB9), 6 (iB10) et 7 avril 2006 (iB11). La figure A.16 présente les modifications des comportements des *iButtons* impliqués dans ces événements de recul.

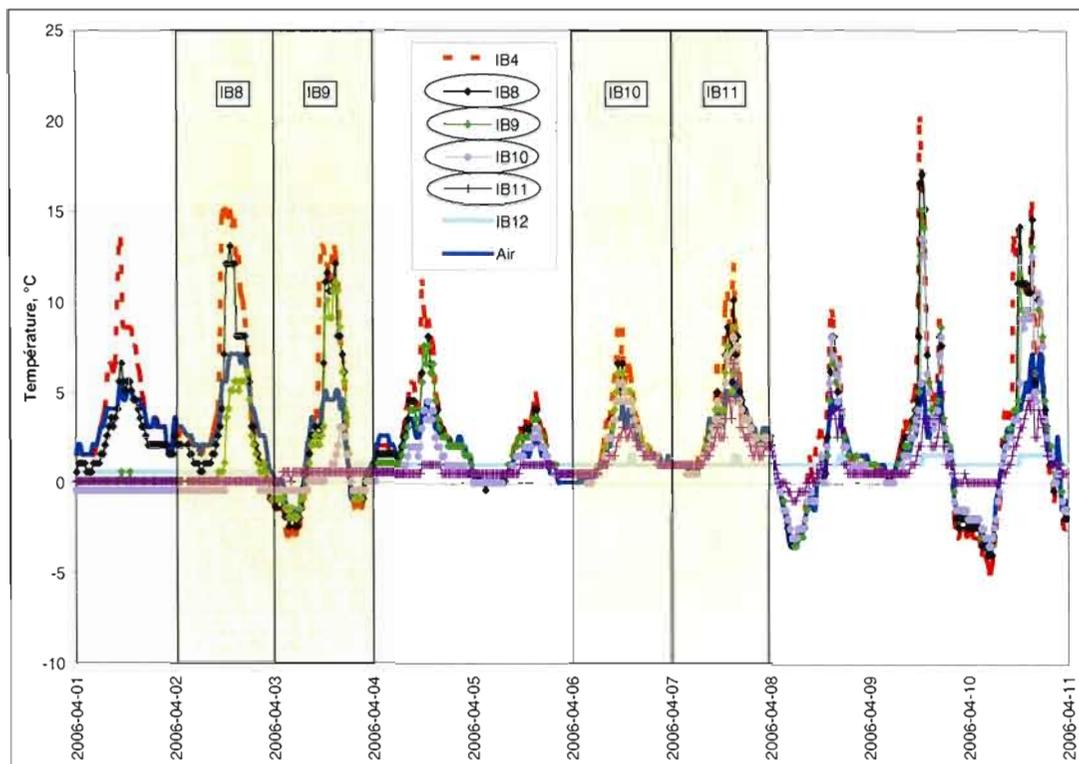


Figure A.16. Signature thermique des reculs du 2, 3, 6 et 7 avril 2006 impliquant les iB8 à iB11 de l'unité de silt intertidal de la station 1.

1^{er} avril, 4 avril et 9 avril 2006 : iB9 à iB11, station 2 (silt marin)

À la station 2, dans l'unité de silt marin, la modification du comportement thermique du iB10 porte à notre attention le recul de la falaise qui permet la sortie du iB9 en date du 1^{er} avril 2006 (figure A.17). Puis, on constate que les températures du iB10 rejoignent à partir du 4 avril celles du *iButton* de référence. La sortie du iB11 est observée en date du 9 avril 2006 (figure A.18).

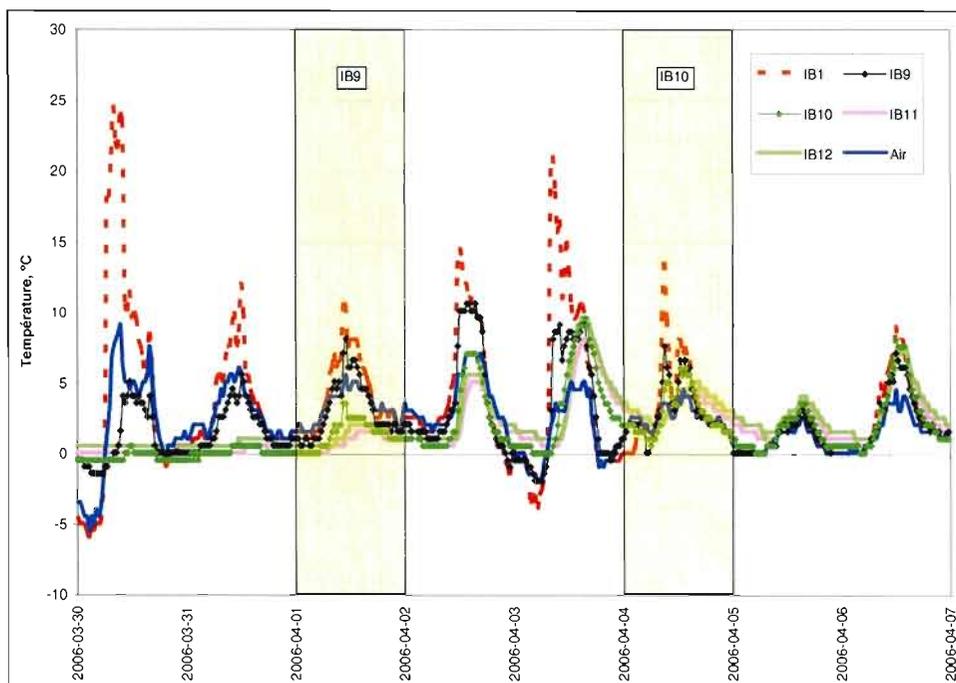


Figure A.17. Signature thermique du recul du 1^{er} et du 4 avril 2006 impliquant les iB9 et iB10 de l'unité de silt marin à la station 2.

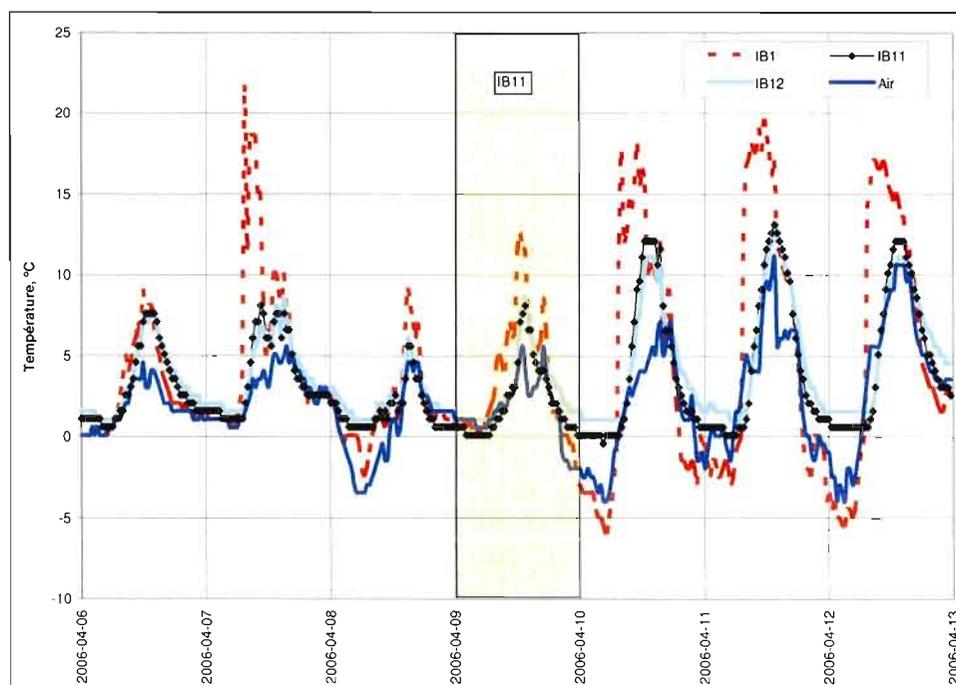


Figure A.18. Signature thermique du recul du 9 avril 2006 impliquant le iB11 de l'unité de silt marin à la station 2.

Saison 2006-2007

28 octobre 2006 : iB2 et iB3, station 2 (silt marin)

À la station 2 (silt marin), un recul se produit le 28 octobre 2006 et implique la sortie des iB2 et iB3. On observe qu'à partir de ce jour, les températures enregistrées par ces *iButtons* correspondent à celles du *iButton* de référence (figure A.19).

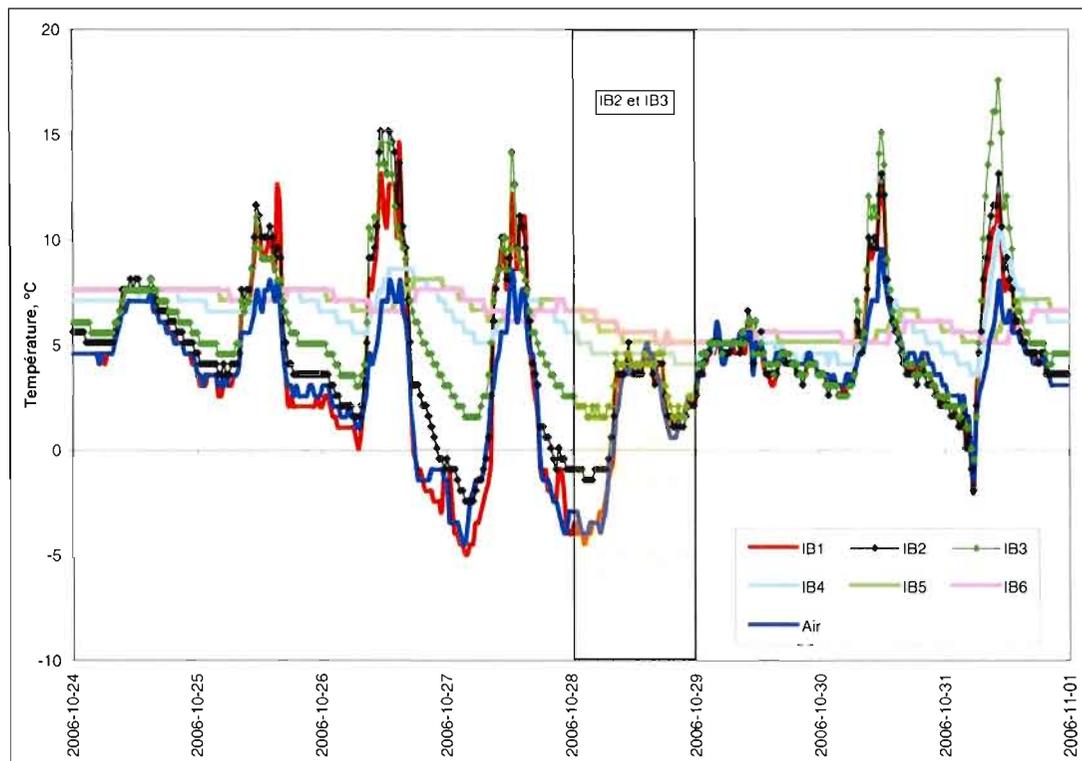


Figure A.19. Signature thermique du recul du 28 octobre 2006 impliquant le iB2 et le iB3 de l'unité de silt marin à la station 2.

29 octobre 2006 : iB2 à iB6, station 1 (silt intertidal), iB2 à iB4, station 1 (silt marin) et iB2, station 3 (silt marin)

À la station 1, toutes les unités sont affectées par un recul en fin de journée le 29 octobre 2006 (vers 18 h 00). Les reculs provoquent l'émergence des iB2 à iB6 (5 *iButtons*) de l'unité de silt intertidal et des iB2, iB3, iB4 de l'unité de silt marin. Le passage à l'extérieur de la falaise de ces *iButtons* se manifeste de manière abrupte ce jour-là à travers les comportements thermiques des *iButtons* impliqués (figure A.20 et A.21). À la station 3, le recul provoque la sortie du iB2 (figure A.22).

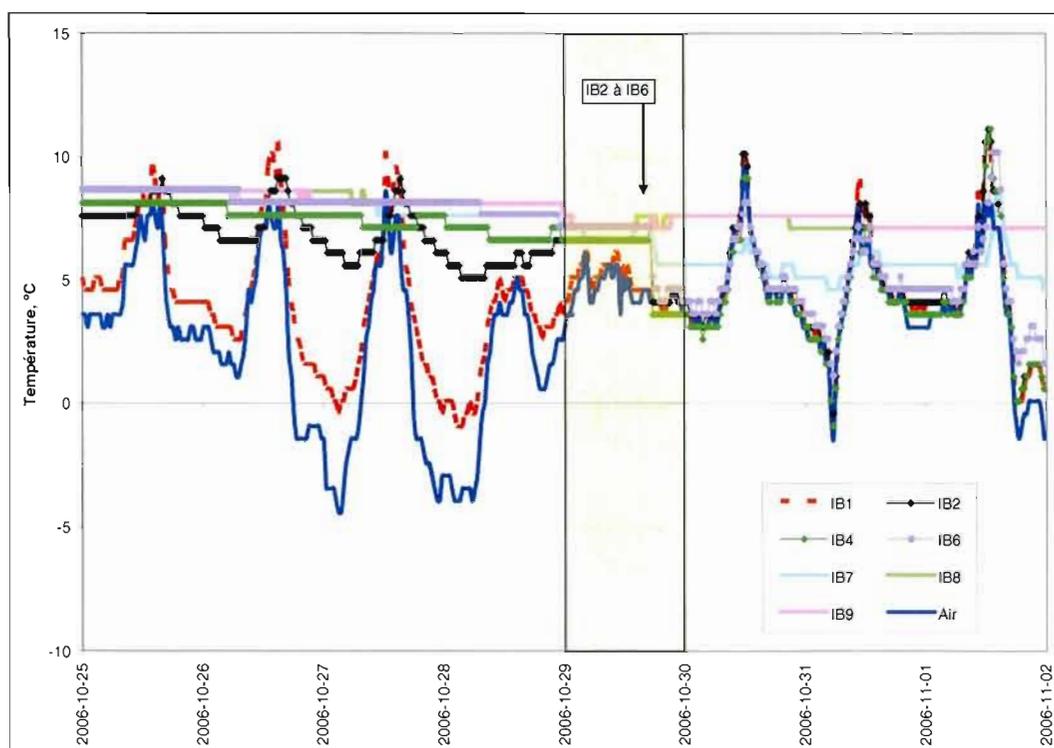


Figure A.20. Signature thermique du recul du 29 octobre 2006 (18 h 00) impliquant le iB2 à iB6 de l'unité de silt intertidal à la station 1.

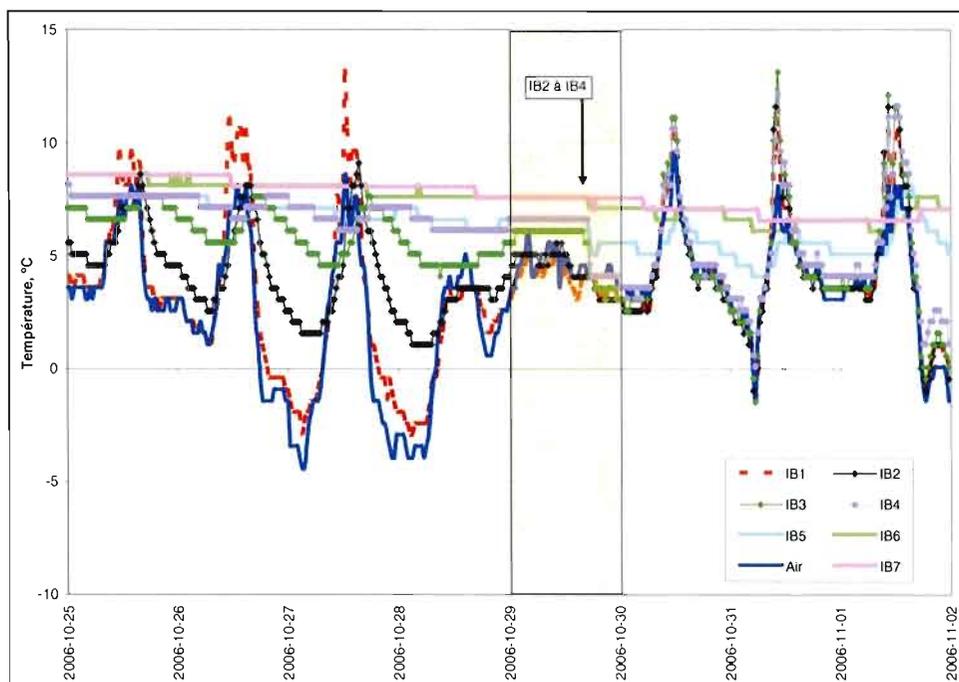


Figure A.21. Signature thermique du recul du 29 octobre 2006 (18 h 00) impliquant les iB2 à iB4 de l'unité de silt marin à la station 1.

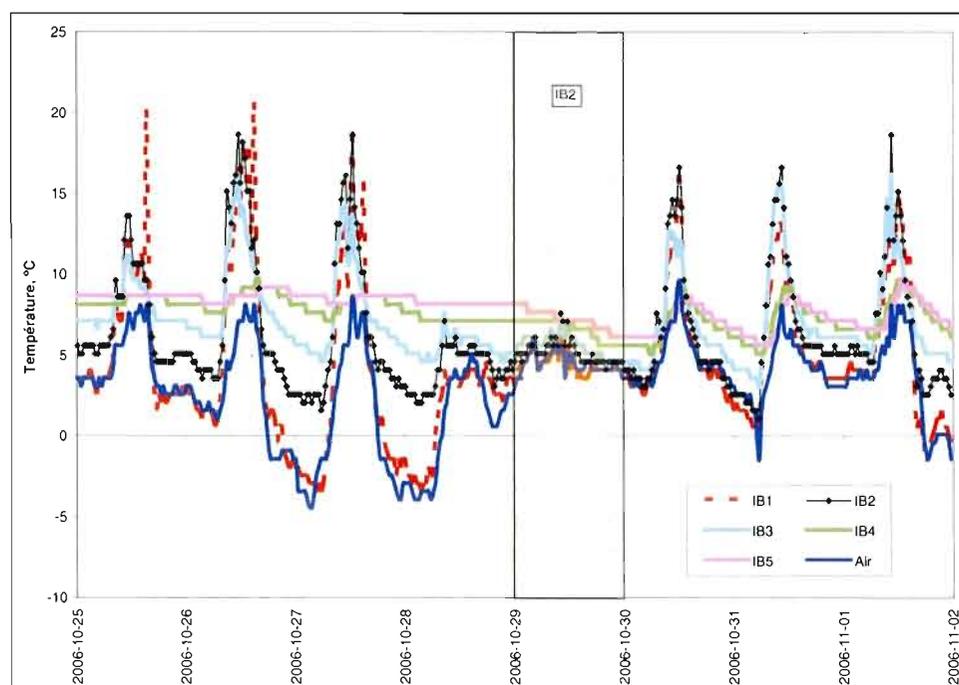


Figure A.22. Signature thermique du recul du 29 octobre 2006 impliquant le iB2 de l'unité de silt marin à la station 3.

7 novembre et 9 novembre 2006 : iB3 et iB4, station 3 (silt marin) et iB7, station 1 (silt intertidal)

Le 7 novembre 2006, les signatures thermiques des *iButtons* des iB3 et iB4 de la station 3 (silt marin) indiquent qu'un recul s'est produit (figure A.23). Puis, l'unité de silt intertidal (iB7) de la station 1 subit un recul le 9 novembre 2006. Dans le silt intertidal, on observe un certain décalage entre le *iButton* de référence et le iB7 compte tenu de sa position limitrophe avec la surface et de l'ombrage du débord organique (figure A.24). La campagne de terrain du 23 novembre nous permet de confirmer que 7 *iButtons* sont à l'extérieur de la falaise et d'observer que le 8^e *iButton* est très près de la surface.

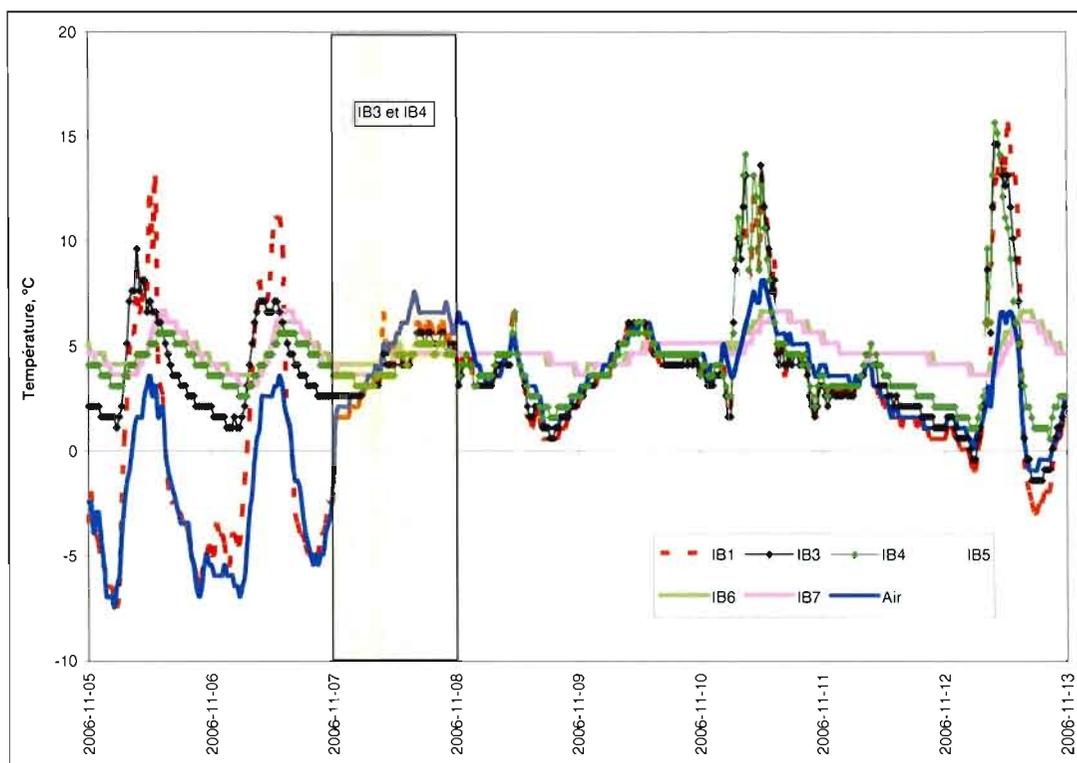


Figure A.23. Signature thermique du recul du 7 novembre 2006 impliquant le iB3 et le iB4 de l'unité de silt marin à la station 3.

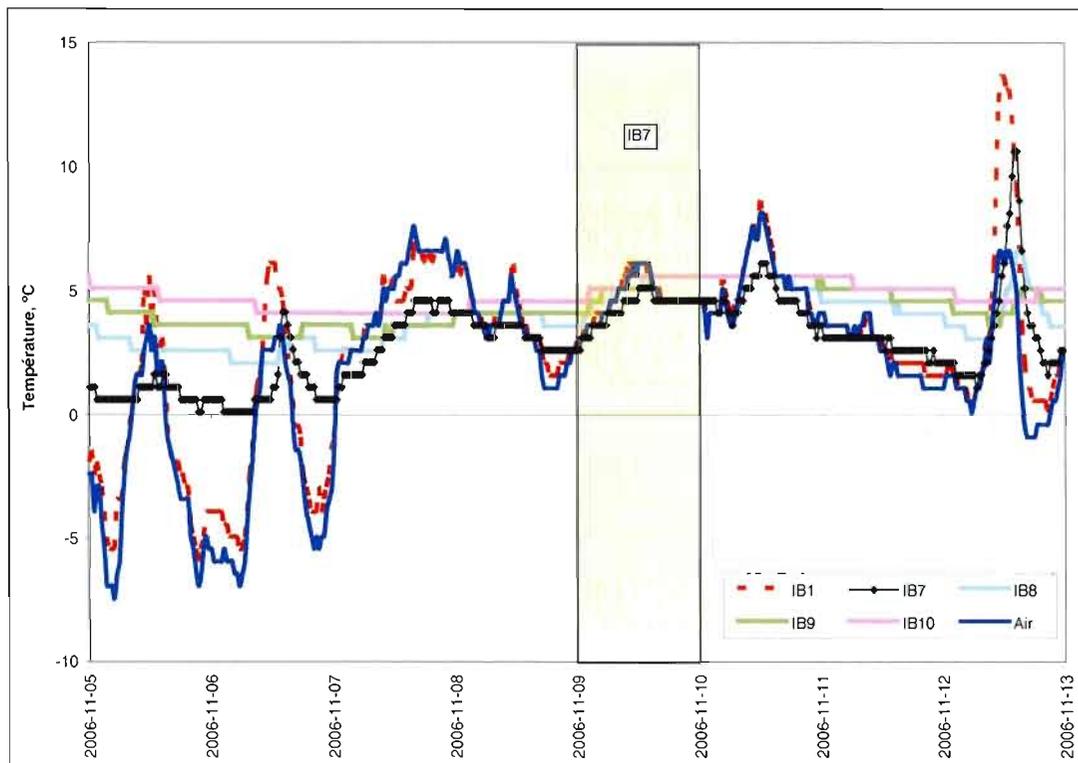


Figure A.24. Signature thermique du recul du 9 novembre 2006 impliquant le iB7 de l'unité de silt intertidal à la station 1.

24 novembre 2006 : iB5, station 1 (silt marin)

Le recul impliquant le iB5 à la station 1 (silt marin) se produit le 24 novembre 2006. À partir de cette date en milieu de journée, ses températures suivent celles du *iButton* de référence (figure A.25).

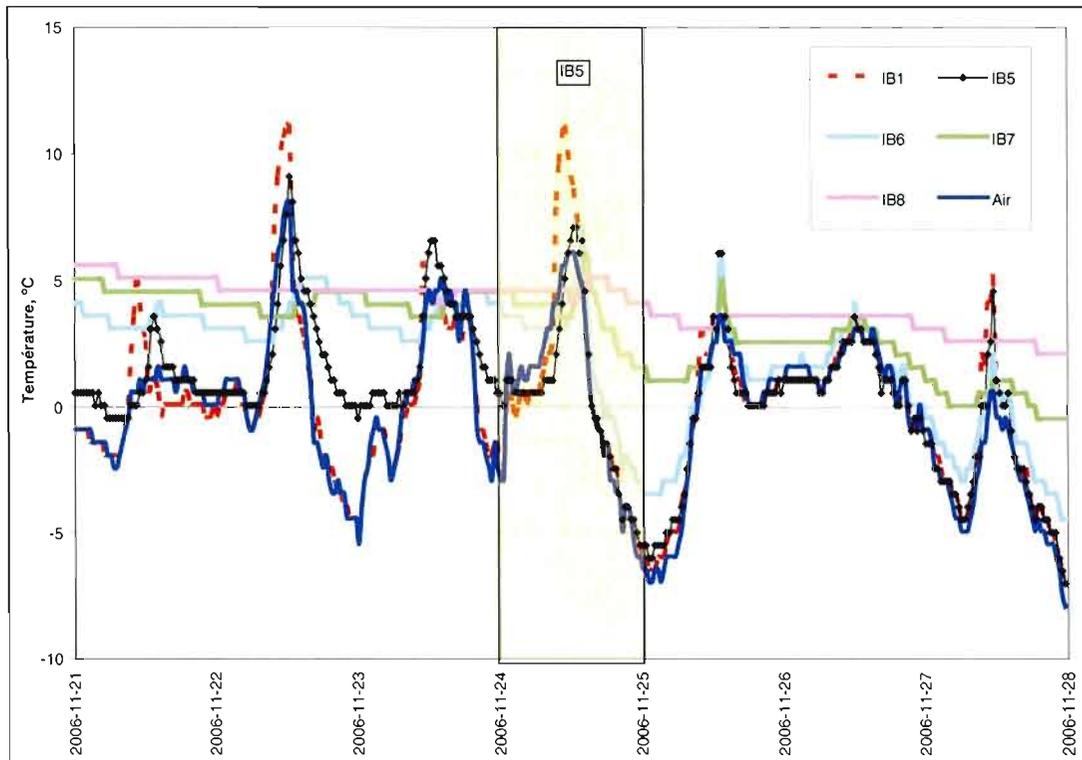


Figure A.25. Signature thermique du recul du 24 novembre impliquant le iB5 de l'unité de silt marin à la station 1.

6 décembre 2006 : perturbation, station 3 (silt marin)

Une perturbation importante affecte la tige implantée à la station 3 (silt marin) le 6 décembre 2006. À partir de cette date, tous les *iButtons* suivent les températures du *iButton* de référence (figure A.26).

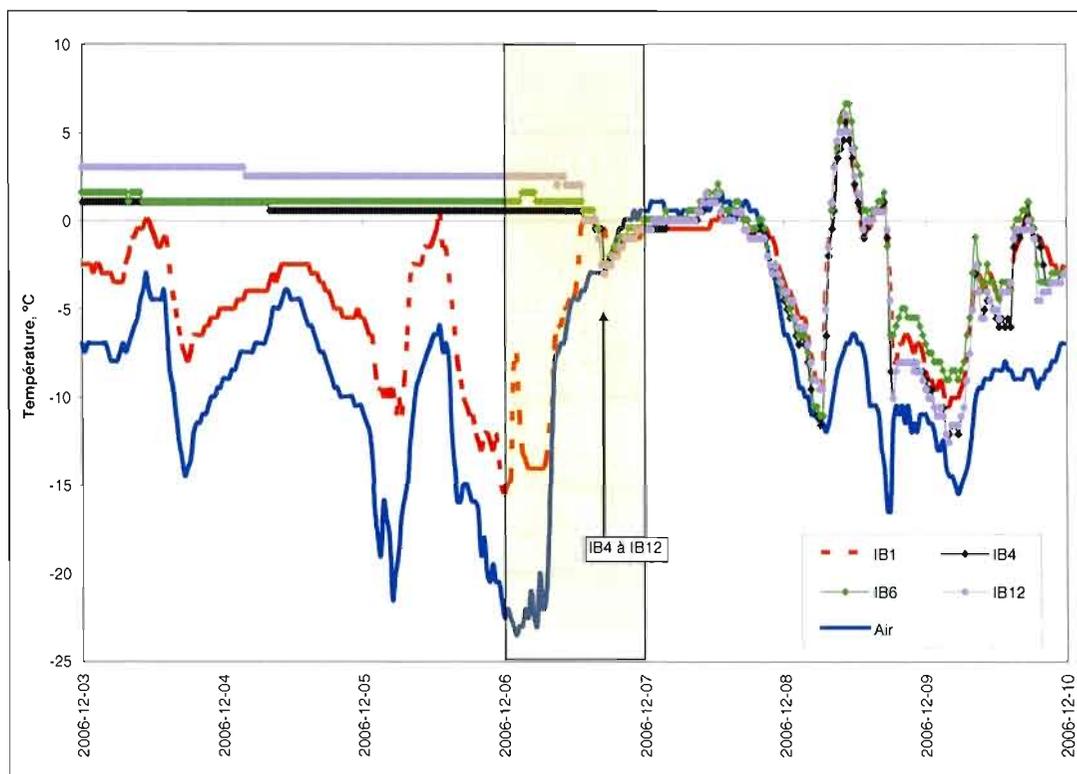


Figure A.26. Signature thermique du recul du 6 décembre (vers 13 h 30) impliquant les iB4 à iB12 de l'unité de silt marin à la station 3.

7 décembre 2006 : iB6 à iB12, station 1 (silt marin)

À la station 1 (silt marin), un important recul se produit le 7 décembre 2006 (vers 19 h 00 - 20 h 00). Ce recul implique les iB6 à iB12 et est parfaitement visible à la figure A.27.

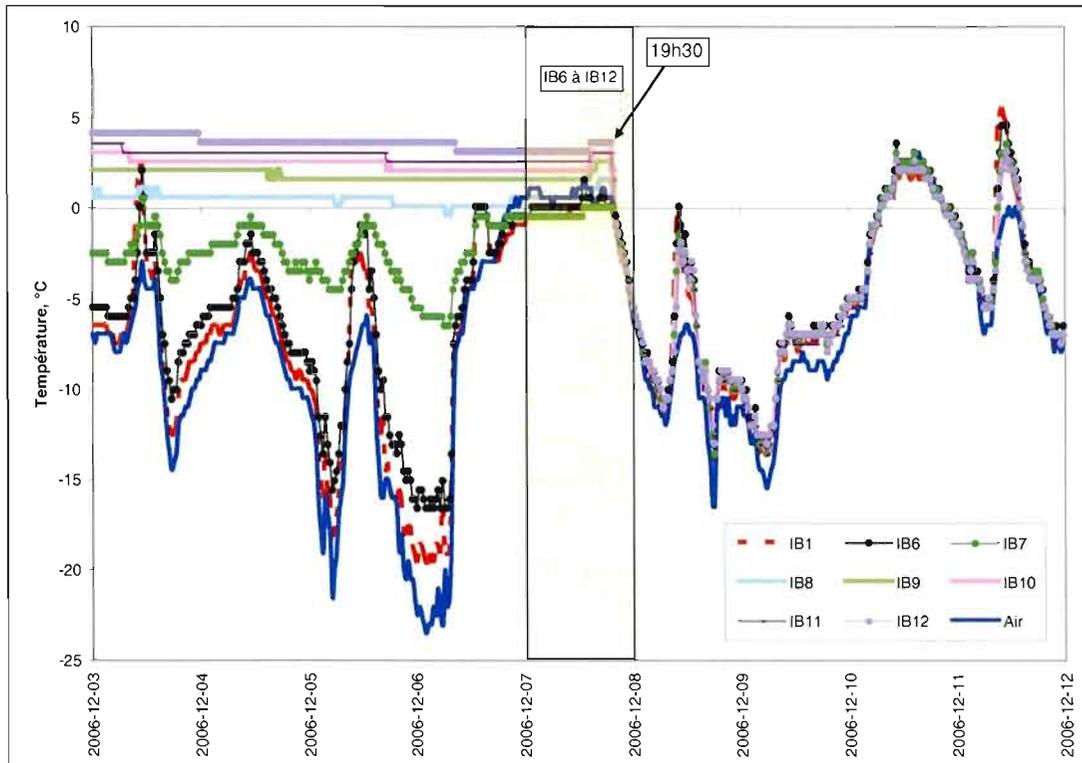


Figure A.27. Signature thermique du recul du 7 décembre 2006 (vers 19 h 30) impliquant les iB6 à iB12 de l'unité de silt marin à la station 1.

7 janvier et 8 janvier 2007 : perturbations, station 1 (silt marin et silt intertidal)

L'unité de silt marin de la station 1 est touchée par une perturbation dont la signature thermique apparaît vers 23 h 00 dans la nuit du 7 au 8 janvier 2007 avec un changement abrupt des comportements thermiques des *iButtons* (figure A.28). Toujours à la station 1, l'unité de silt intertidal est également touchée par un évènement majeur qui se produit possiblement le lendemain soit le 8 janvier 2007 et qui entraîne des dommages importants. La tige est brisée à la hauteur du iB4, 9 *iButtons* sont perdus et 3 sont retrouvés et sont fonctionnels (iB1, iB2 et iB3). Compte tenu de la perte de la majorité des *iButtons*, il est difficile d'identifier avec certitude le moment du bris. Cependant, on observe à la figure A.29 que les

températures des iB1 et iB3 (les seuls disponibles), qui sont à l'extérieur de la falaise, cessent de suivre la courbe des températures de l'air ce qui signifie qu'ils ne sont plus en contact direct avec l'air et qu'ils ont été enfouis sous la glace ou sous des sédiments.

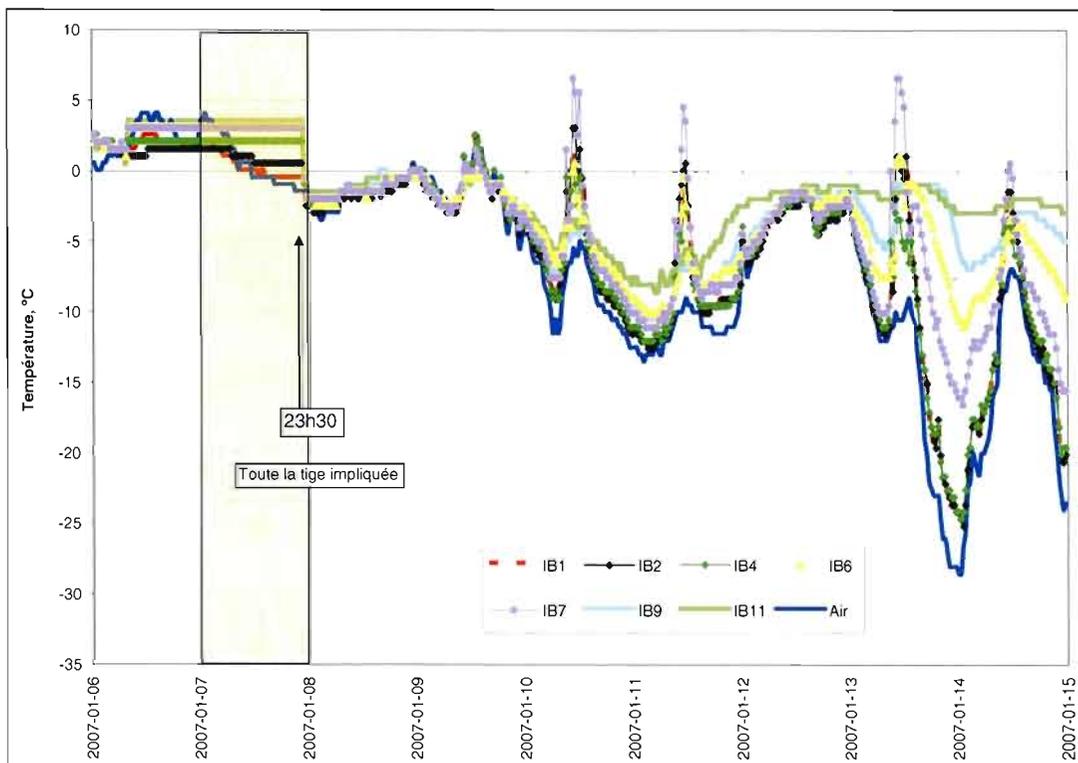


Figure A.28. Signature thermique du recul survenu dans la nuit du 7 au 8 janvier 2008 impliquant toute la tige de l'unité de silt marin de la station 1.

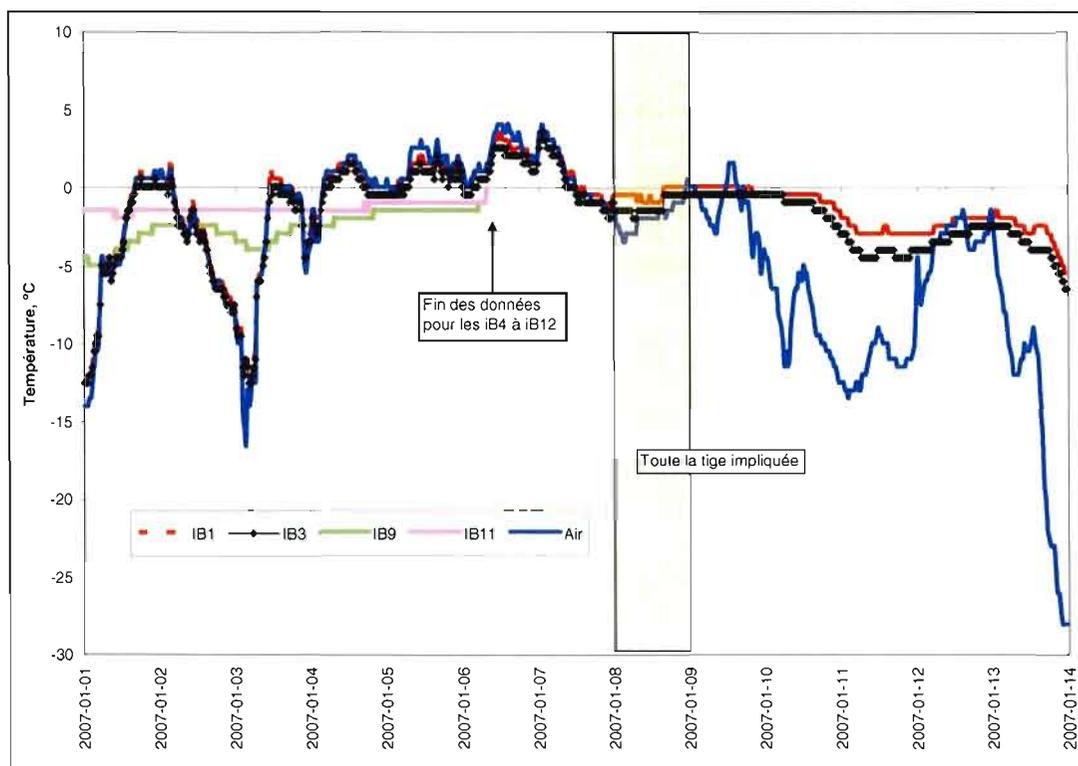


Figure A.29. Signature thermique du recul du 8 janvier 2007 impliquant toute la tige de l'unité de silt intertidal à la station 1.

26 février 2007 : iB4, station 2 (silt marin)

Lors du relevé de terrain du 9 février à la station 2, on observe que le 4^e *iButtons* n'est pas très loin sous la surface (entre 1 et 2 cm) mais celui-ci ne passe à l'extérieur de la falaise qu'au courant de l'après-midi du 26 février 2007. La proximité de la surface explique pourquoi la différence entre le comportement thermique avant et après sa sortie n'est pas majeure (figure A.30).

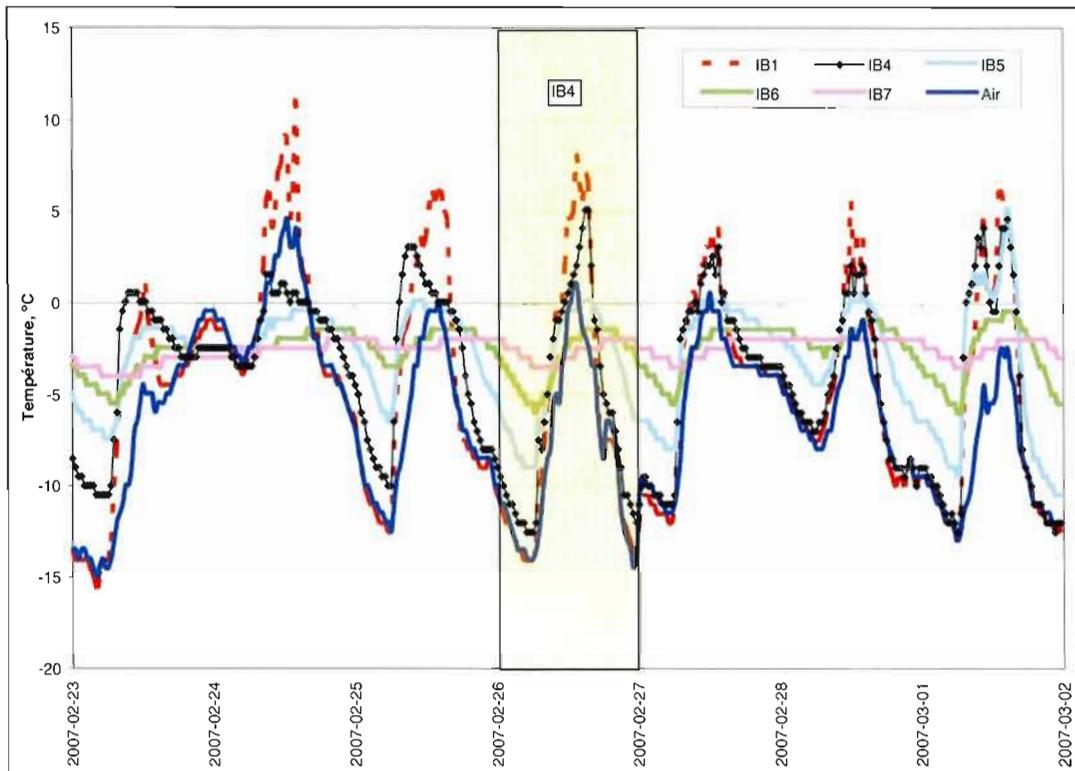


Figure A.30. Signature thermique du recul du 26 février 2007 impliquant le iB4 de l'unité de silt marin à la station 2.

1^{er} mars 2007: iB5, station 2 (silt marin)

Le 1^{er} mars 2007, on enregistre un recul qui implique la sortie du iB5 à la station 2. À partir de cette date, le comportement thermique du iB5 adopte les caractéristiques du *iButton* de référence (figure A.31).

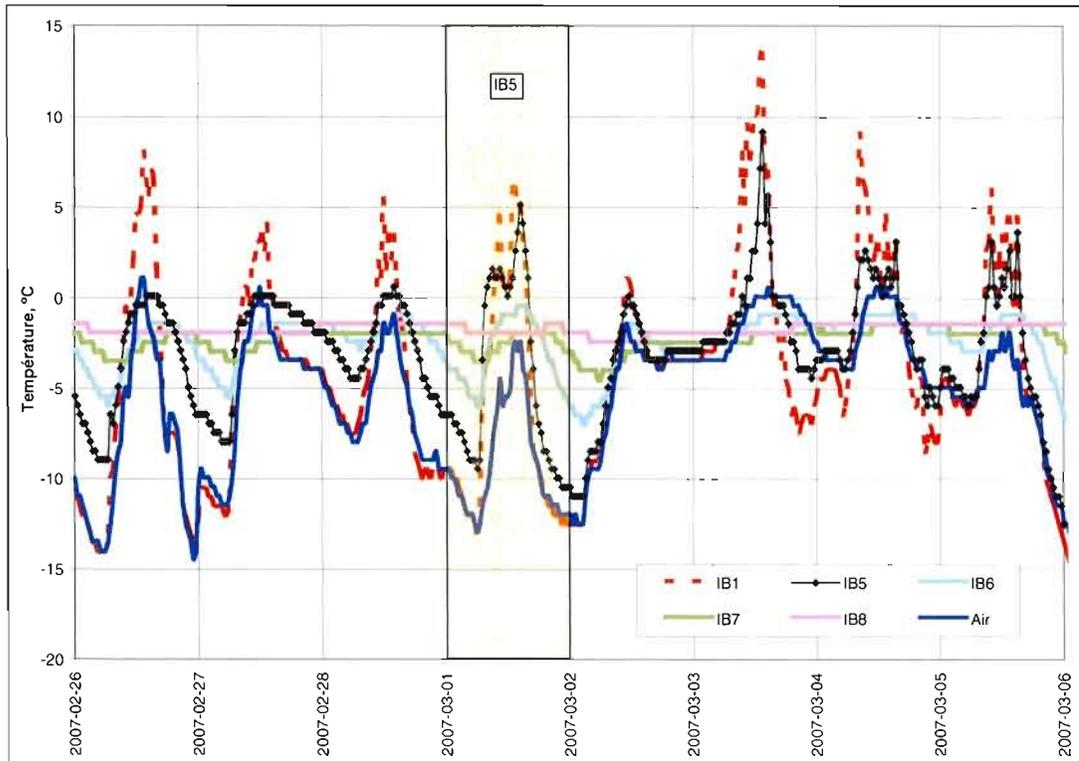


Figure A.31. Signature thermique du recul du 1^{er} mars 2007 impliquant le iB5 de l'unité de silt marin à la station 2.

23 mars 2007 : iB6, station 2 (silt marin)

À la suite de la fusion du couvert de neige le 22 mars 2007, on enregistre un recul impliquant la sortie du iB6 à la station 2 (silt marin) le 23 mars. On observe à la figure A.32 l'effet du couvert nival sur le comportement du iB6 de même que le recul impliquant sa sortie.

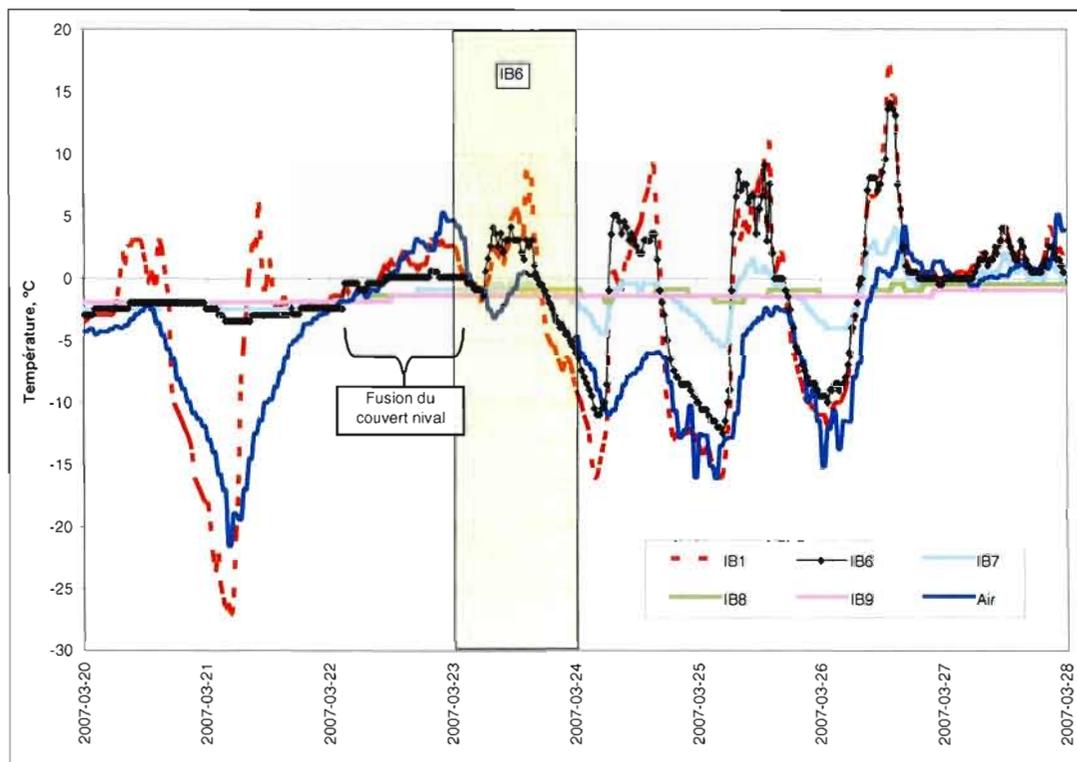


Figure A.32. Signature thermique du recul du 23 mars 2007 impliquant le iB6 de l'unité de silt marin à la station 2.

16 mars 2007 : iB4, station 3 (silt marin)

On observe à la figure A.33 la modification du comportement thermique du iB4 à la station 3 (silt marin) à partir du 16 mars 2007. Cependant, la chute de neige et la présence du couvert nival qui s'installe le 17 mars brouillent momentanément les signaux du iB4²⁶ qui semblent alors être encore à l'intérieur de la falaise (figure A.33).

²⁶ Les précipitations du 17 mars (neige, 36 mm en équivalent en eau) viennent troubler les signaux thermiques des *iButtons* à l'extérieur de la falaise. De plus, le *iButton* mesurant la température et utilisé normalement pour les signatures thermiques est lui aussi enfoui sous la neige. Les données des températures de l'air de Ragueneau ont été substituées par les données de la station météorologique de Baie-Comeau à parti du 16 mars et jusqu'à la fin du mois en raison de cette situation.

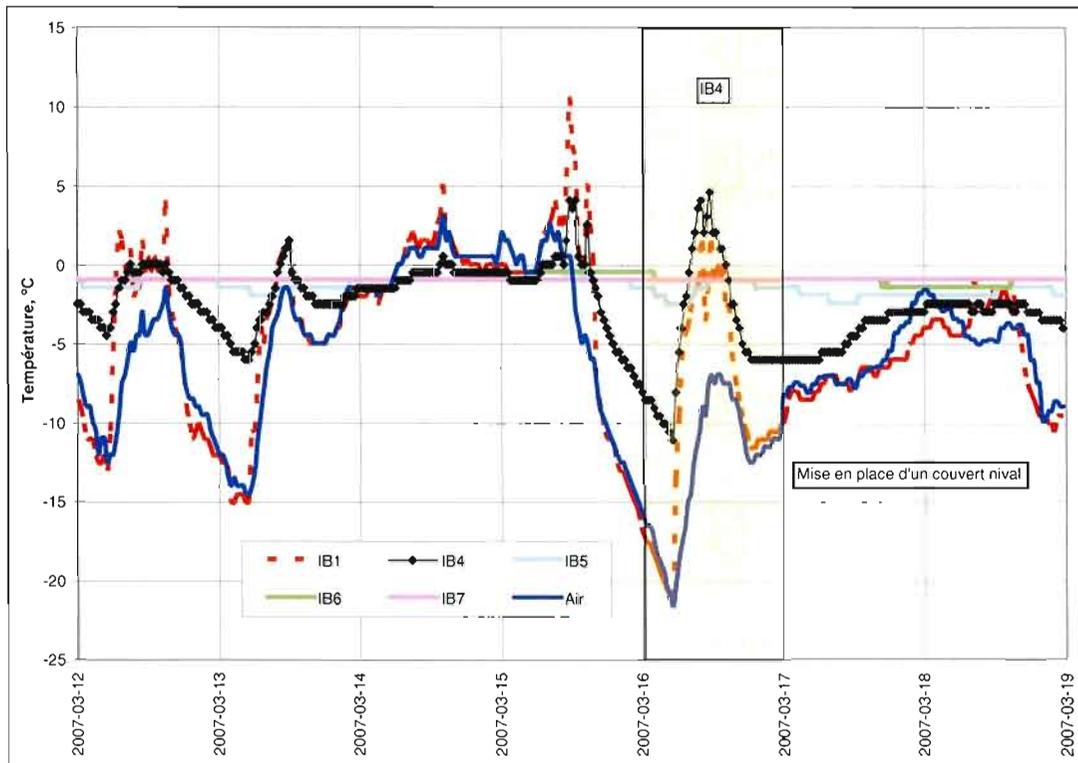


Figure A.33. Signature thermique du recul du 16 mars 2007 impliquant le iB4 de l'unité de silt marin à la station 3.

28 mars et 29 mars 2007 : iB7 et iB8, station 2 (silt marin) et iB5, station 3 (silt marin)

Le 28 mars et le 29 mars 2007, on enregistre des reculs qui impliquent l'émergence des iB7 et iB8 à la station 2. Les modifications des comportements thermiques de ces *iButtons* attribuables aux reculs sont présentées à la figure A.34. Le 29 mars 2007, on enregistre également un recul à la station 3 (iB5). Déjà, le 28 mars, on remarque que son comportement thermique commence à changer ce qui nous permet d'affirmer que le recul est progressif (figure A.35).

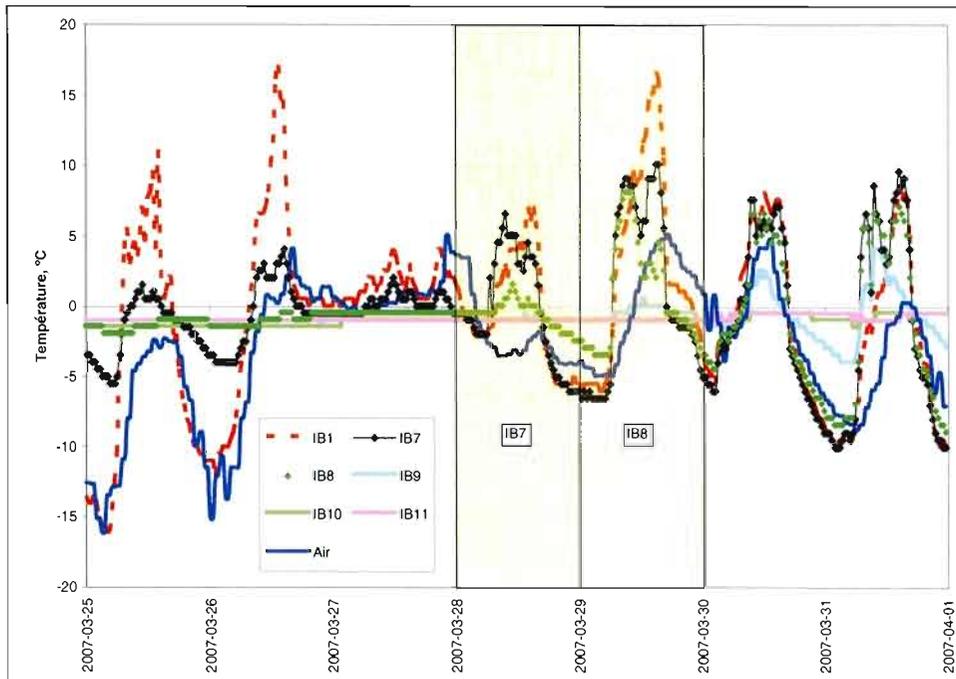


Figure A.34. Signature thermique des reculs du 28 et 29 mars 2007 impliquant les iB7 et iB8 de l'unité de silt marin à la station 2.

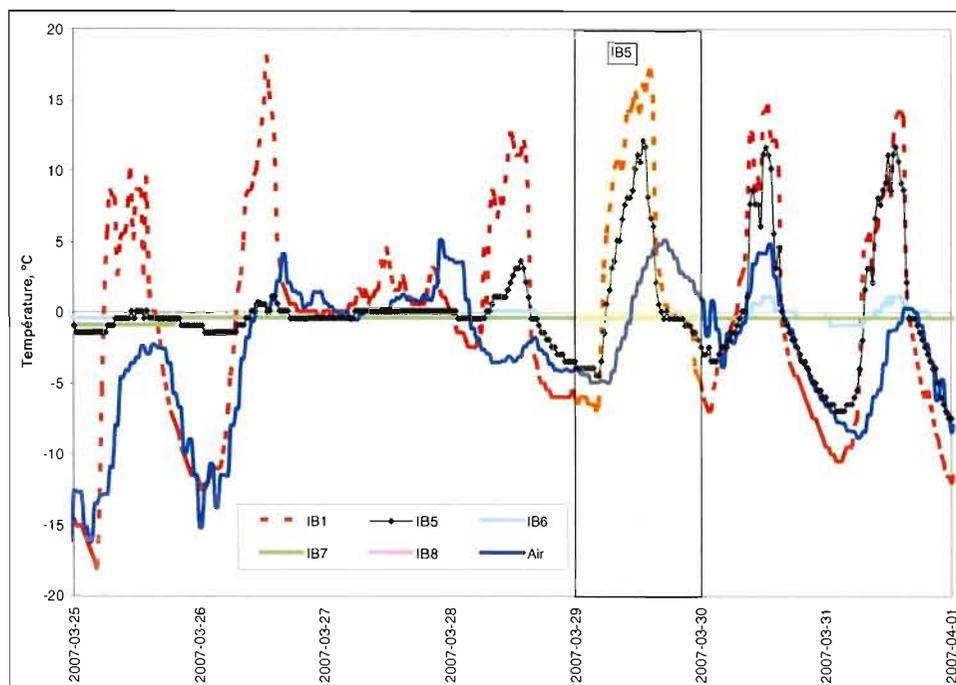


Figure A.35. Signature thermique du recul du 29 mars 2007 impliquant le iB5 de l'unité de silt marin à la station 3.

6 avril 2007 : iB9, station 2 (silt marin)

Lors de la visite de terrain du 2 avril 2007, on observe que le 9^e *iButton* se situe tout juste à la surface de l'unité de silt marin de la station 2. Comme en témoigne sa signature thermique, l'érosion le dégage complètement quelques jours plus tard, soit le 6 avril 2007 (figure A.36).

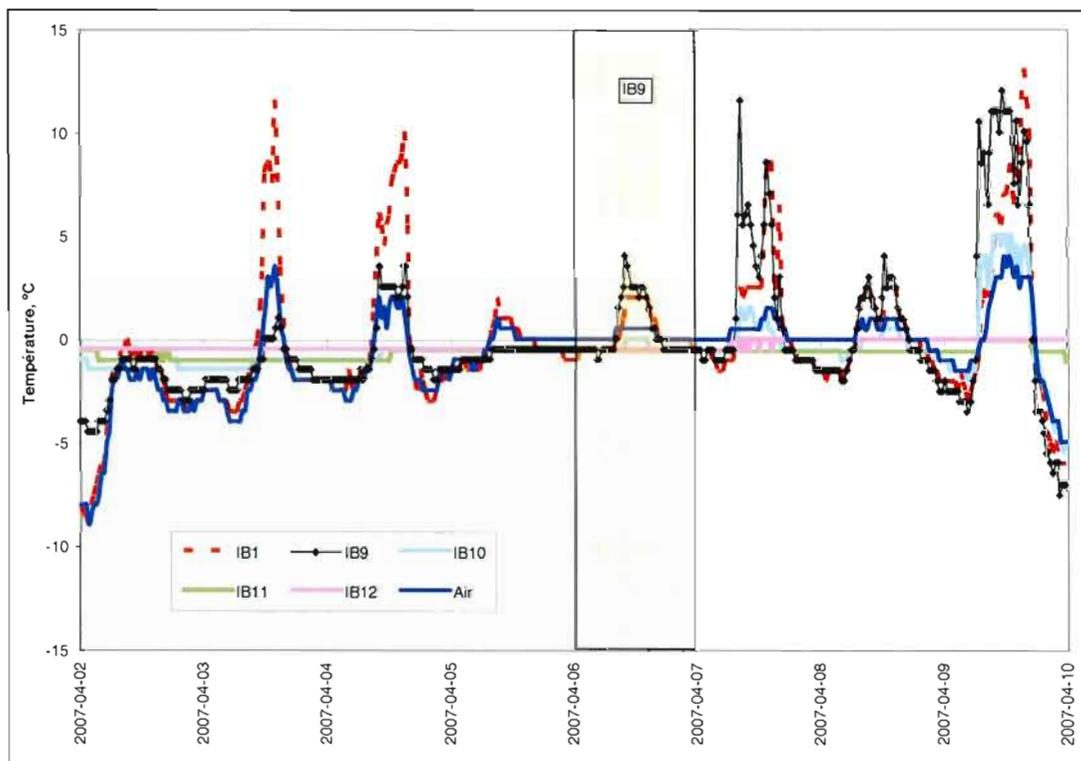


Figure A.36. Signature thermique du recul du 6 avril 2007 impliquant le iB9 de l'unité de silt marin à la station 2.

10 avril, 11 avril et 12 avril 2007 : iB10, iB11 et iB12, station 2 (silt marin)

Les derniers reculs qui affectent la station 2 se produisent le 10 (iB10), le 11 (iB11) et le 12 avril 2007 (iB12). Les signatures thermiques de ces reculs sont présentées à la figure A.37.

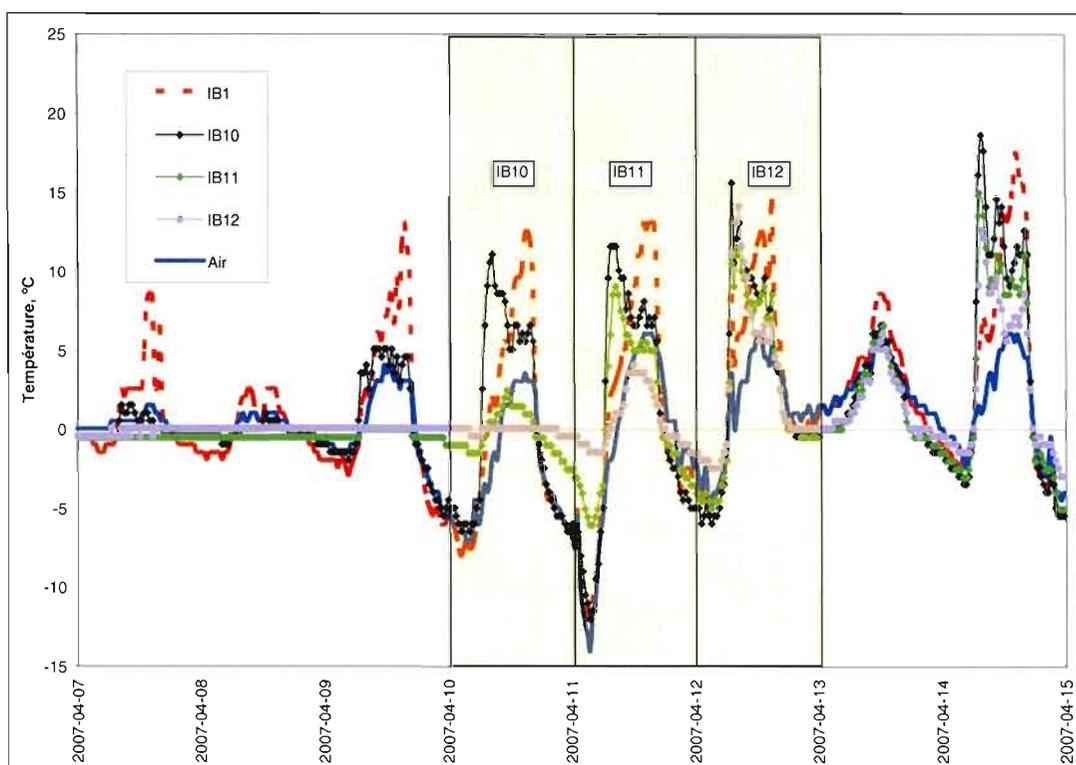


Figure A.37. Signature thermique des reculs du 10, 11 et 12 avril 2007 impliquant les iB10, iB11 et iB12 de l'unité de silt marin à la station 2.