



Université du Québec
à Rimouski

**DYNAMIQUE HYDROGÉOLOGIQUE DE FLÈCHES
LITTORALES :
EXEMPLE DU MARAIS DE CAP MARTEAU, TROIS-PISTOLES, ESTUAIRE DU
SAINT-LAURENT**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© HÉLÈNE COCHERIL

Mars 2019

Composition du jury :

Thomas BUFFIN-BÉLANGER, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Gwenaëlle CHAILLOU, directrice de recherche, Université du Québec à Rimouski

Pascal BERNATCHEZ, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Maxime BOIVIN, examinateur externe, Université du Québec à Chicoutimi

Dépôt initial le 16 avril 2018

Dépôt final le 14 mars 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski 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 Rimouski 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

En premier lieu, je voudrais remercier le PACES-NEBSL pour m'avoir permis d'effectuer cette recherche grâce à son financement. À cette même occasion, je remercie toute l'équipe du PACES (Gwenaëlle Chaillou, Thomas-Buffin-Bélangier, Maude Touchette, Claude-André Cloutier) pour m'avoir fait découvrir le domaine de l'hydrogéologie qui était tout nouveau pour moi et de m'avoir bien aidé et conseillé tout au long de cette maîtrise. Je remercie aussi le laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières pour leur aide au niveau de ma cartographie, Antoine Morissette pour la granulométrie et Marie-Andrée Roy toujours disponible pour me prêter le matériel nécessaire à mon terrain.

À ce propos, un grand merci à tous ceux qui m'ont prêté main-forte lors de mes sorties terrain et de mes analyses, sans eux toutes ces journées auraient été impossibles et beaucoup moins amusantes ! Alors merci à Antoine, Caroline, Catherine, Éric, Francis, Frédérique, Jens, Marie-Pierre, la grande et la petite Mathilde, Maud, Gwendoline et Zoé !

Je voudrais aussi remercier mon co-directeur Pascal Bernatchez pour ces conseils et son aide sur le terrain. Finalement, un immense merci à ma directrice de mémoire Gwenaëlle Chaillou pour m'avoir bien accueilli au Québec et donné la possibilité de faire cette maîtrise et de découvrir ce qu'était la recherche en milieu universitaire. Comme dans tout projet il y a des hauts et des bas, mais tu as toujours été là pour me remotiver, me faire avancer et aller jusqu'au terme de ce projet.

Un merci tout particulier à Monsieur et Madame Rioux, propriétaire du marais de Cap Marteau qui m'ont donné la permission d'aller sur leur terrain dans le cadre de cette recherche scientifique, sans leur accord ce mémoire n'aurait pas vu le jour ! Je remercie aussi toutes les personnes résidentes autour du marais pour leur ouverture et l'intérêt qu'elles ont porté à mon projet et d'avoir veillé sur moi tout ce temps.

Enfin, je remercie aussi toute ma famille, notamment mes parents et ma sœur ainsi que mes ami(e)s qu'ils soient au Québec ou outre-Atlantique pour tout le support moral qu'ils m'ont donné, sans eux je ne serais pas arrivé là où je suis actuellement !

MERCI !

RÉSUMÉ

Les corps sédimentaires côtiers sont des aquifères aux dynamiques hydrogéologiques particulières situés à l'interface continent-océan. Ils représentent des réserves d'eau douce qui dans certains endroits du globe forment la seule source d'approvisionnement en eau. Au Québec, le cadre bâti s'est fortement développé sur ce type de corps sédimentaires, mais leurs caractéristiques hydrogéologiques sont méconnues.

Afin de mieux comprendre ces dynamiques hydrogéologiques, le marais de Cap Marteau a été pris comme micro-modèle. L'objectif général de ce mémoire est de comprendre la dynamique hydrogéologique annuelle de flèches littorales situées en milieu tempéré froid. Plus spécifiquement, nous présenterons dans un premier temps les caractéristiques géomorphologiques du site d'étude à l'aide de cartographie, d'analyses sédimentologiques et d'imagerie *LiDAR*. Dans un deuxième temps, nous aborderons les dynamiques hydrogéologiques de ces corps sédimentaires sur différentes échelles de temps : les saisons et les cycles de marée en nous basant sur les niveaux piézométriques recueillis dans les flèches pendant deux années consécutives, ainsi que sur la nature de cette eau souterraine à l'aide des analyses isotopiques. Le marais de Cap Marteau est abrité par une flèche littorale active derrière laquelle se trouvent deux paléoflèches qui contiennent de l'eau douce. Il en ressort que les deux paléoflèches sont relativement stables depuis les années 1930. À l'inverse, la flèche active s'est allongée de 1,66 m/an. Des analyses de fréquences et par ondelettes montrent une forte corrélation entre les niveaux piézométriques et la recharge par les précipitations. Malgré sa proximité à la rivière Centrale et au Saint-Laurent, la contribution de l'eau de surface et de l'eau salée est limitée. Les flèches constituées de sables grossiers agissent comme des nappes libres granulaires avec une recharge rapide au moment de la fonte des neiges au printemps. En contraste avec les plages où les nappes d'eau s'écoulent sous le niveau marin et où les aquifères se mélangent avec l'eau de mer dans un estuaire souterrain, ici, l'aquifère contenu dans les flèches est « perché » au-dessus du niveau actuel de la mer. Bien que la qualité de la nappe soit préservée et seulement contrainte aux activités de surface, le volume potentiel de l'aquifère est très faible. Cette étude montre donc l'importance de bien connaître le milieu et les caractéristiques d'un aquifère pour le préserver et le gérer durablement.

Mots clés : Corps sédimentaire, flèche littorale, aquifère, hydrogéologie côtière, Cap Marteau, marais, cartographie, piézomètre.

ABSTRACT

Coastal sedimentary bodies of coarse grain material made up of non-cohesive particles could act as coastal aquifers at the land-ocean interface with specific hydrogeological dynamics. In some regions of the globe, they are groundwater reserves acting as the only source of freshwater supply. In Quebec, the built environment has been strongly developed on the coastal landforms. Their hydrogeological dynamics are however still not well known.

Along the St. Lawrence shores, the saltmarsh of Cap Marteau had been selected as a micro-model to explore groundwater dynamics and hydrological connectivity. The aim of this study was to document the annual water table dynamics in sand spits under cold temperate conditions. More specifically, we assessed firstly the geomorphological features of the study site by using cartography, sedimentological analysis and *LiDAR* imagery. Then, we focussed on the hydrogeological dynamics of these sedimentary bodies at different time scales including seasonal and tidal scales. We combined a two-year monitoring of piezometric levels with the analysis of the stable isotopes of water. The saltmarsh of Cap Marteau is sheltered by an active coarse sand spit behind which are two paleo-spits supplied by the infiltration of meteoric water. The two paleo-spits were relatively stable over the last 89 years. In contrast the active spit was in accretion with a mean rate of 1.66 m/year. Time-frequency and wavelet analyses indicated strong correlation between water table levels and the aquifer recharge by meteoric water. Despite the proximity with both the Central River and the coastal zone, the contribution of surficial fresh and seawater appeared to be limited. The coarse sand spits acted as a granular unconfined aquifer with a rapid recharge during snowmelt season. In contrast to sandy beaches developed under transgressive conditions originated from relative sea level rise, where coastal aquifer mix with seawater in a so-called subterranean estuary, aquifers developed in such spit systems act as “perched” aquifer, that occur above the present sea level. This perched water table is only weakly affected by tidal infiltration of seawater and fresh surficial water, limiting salinization or contamination. Despite the quality of fresh groundwater is preserved, and only constrained by surficial activities, the potential volume of the aquifer is very low in the spits of Cap Marteau. This study shows that a good knowledge of the characteristics of an aquifer is essential to better preserve and manage a given environment.

Key words : Sedimentary body, coastal dune spit, aquifer, coastal hydrogeology, Cap
Marteau, saltmarsh, cartography, piezometer.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-------------|
| REMERCIEMENTS..... | vii |
| RÉSUMÉ..... | ix |
| ABSTRACT | xi |
| TABLE DES MATIÈRES | xiii |
| LISTE DES TABLEAUX | xv |
| LISTE DES FIGURES | xvii |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES | xxi |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 1 |
| CHAPITRE 1 : ÉTATS DES CONNAISSANCES | 10 |
| 1.1 HISTOIRE DU QUATERNAIRE DES RIVES DU SAINT-LAURENT | 10 |
| 1.2 DYNAMIQUES DES CÔTES DU SAINT-LAURENT | 14 |
| 1.3 LES FLECHES LITTORALES | 18 |
| 1.4 HYDROGÉOLOGIE DES CORPS SÉDIMENTAIRES CÔTIERS | 22 |
| 1.4.1 Les facteurs influençant l'hydrogéologie des corps sédimentaires côtiers | 22 |
| 1.4.2 Vulnérabilité des aquifères côtiers : intrusion saline et recharge | 29 |
| CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES | 31 |
| 2.1 TERRAIN D'ÉTUDE..... | 31 |
| 2.2 DYNAMIQUE GÉOMORPHOLOGIQUE..... | 37 |
| 2.2.1 Échantillonnage des sédiments de surface et analyse granulométrique..... | 37 |
| 2.2.2 Carottes sédimentaires et analyse stratigraphique | 42 |
| 2.2.3 Cartographie et évolution historique | 42 |
| 2.3 DYNAMIQUE HYDROGÉOLOGIQUE..... | 46 |
| 2.3.1 Isotopes stables de l'eau | 46 |
| 2.3.2 Perméamètre de Guelph..... | 47 |
| 2.3.3 Suivi piézométrique..... | 48 |
| 2.3.4 Analyses statistiques..... | 51 |
| 2.3.5 Volume d'eau dans les corps sédimentaires | 51 |
| CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS..... | 55 |
| 3.1 DYNAMIQUE GÉOMORPHOLOGIE DES FLÈCHES LITTORALES DU MARAIS DE CAP MARTEAU | 55 |
| 3.1.1 Caractérisation des sédiments des flèches littorales | 55 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.1.2 | Évolution historique des flèches littorales entre 1924 et 2013 | 61 |
| 3.1.3 | Discussion..... | 67 |
| 3.2 | DYNAMIQUE HYDROGÉOLOGIQUE DE FLÈCHES LITTORALES | 69 |
| 3.2.1 | Variation des niveaux piézométriques | 69 |
| 3.2.2 | Signature isotopique de l'eau..... | 82 |
| 3.2.3 | Volume potentiel d'eau accessible dans le système de flèches | 86 |
| 3.2.4 | Discussion..... | 88 |
| | CONCLUSION GÉNÉRALE | 92 |
| | ANNEXES..... | 97 |
| | RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 100 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-------|
| Tableau 1.1 : Chronologie et événements marquants de la post-déglaciation dans la région du Saint-Laurent | p. 12 |
| Tableau 1.2 : Types et processus d'érosion selon le type de côte de l'estuaire du Saint-Laurent | p. 17 |
| Tableau 1.3 : Valeur de conductivité hydraulique (en m/s) pour diverses formations meubles | p. 25 |
| Tableau 2.1 : Tailles des tamis utilisés dans la colonne pour faire la granulométrie | p. 38 |
| Tableau 2.2 : Échelle de taille adoptée par le programme GRADISTAT | p. 41 |
| Tableau 2.3 : Marge d'erreur des cartographies en fonction de l'année de référence (2001) | p. 43 |
| Tableau 2.4 : Description et caractéristiques des piézomètres installés pour l'étude | p. 50 |
| Tableau 2.5 : Typologie des porosités et des ordres de valeur des porosités totale et efficace | p. 54 |
| Tableau 3.1 : Résultats des tests du Perméamètre de Guelph avec la méthode Simple Head donnée en m/s et en m/jr | p. 60 |
| Tableau 3.2 : Taux de déplacement des flèches littorales du marais de Cap Marteau entre 1924 et 2013 selon les indices EPR, NSM et SCE | p. 64 |
| Tableau 3.3 : Vitesse de propagation de l'eau entre la rivière Centrale et les piézomètres | p. 78 |
| Tableau 3.4 : Isotopes stables et composition en précipitation liquide des sites 1 et 2 prélevées au cours d'un cycle tidal | p. 85 |
| Tableau 3.5 : Volume potentiel total et réel de l'aquifère contenu dans les flèches | p. 87 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-------|
| Figure 1 : Évolution des différentes températures moyennes mondiales entre 1910 et 2010 | p. 4 |
| Figure 2 : Évolution du CO ₂ atmosphérique entre 1955 et 2015 ; du niveau moyen des mers depuis 1900 ; de l'étendue de la banquise arctique en été depuis 1900 et du manteau neigeux de l'hémisphère Nord au printemps depuis 1920 | p. 5 |
| Figure 3 : Évolution et prévision selon plusieurs scénarii de la température moyenne mondiale depuis 1900 et de l'élévation du niveau moyen des mers | p. 5 |
| Figure 4 : Nombre de publications traitant " <i>Coastal hydrogeology</i> " depuis 1970 | p. 6 |
| Figure 5 : Effet du pompage et de l'élévation du niveau marin sur les aquifères côtiers | p. 7 |
| Figure 1.1 : Courbe généralisée du niveau marin relatif du niveau du Saint-Laurent | p. 13 |
| Figure 1.2 : Proportion des différents types de côtes du Québec maritime | p. 15 |
| Figure 1.3 : Radeau échoué sur la plage du marais de Cap Marteau | p. 18 |
| Figure 1.4 : Envol d'oies sauvages au marais de Cap Marteau | p. 18 |
| Figure 1.5 : Schéma théorique d'une flèche littorale en queue de comète et à pointe libre | p. 20 |
| Figure 1.6 : Schéma de l'équilibre précipitation-évaporation d'une flèche littorale | p. 23 |
| Figure 1.7 : Schéma de l'effet de la variation du niveau marin sur les niveaux d'eau dans une flèche littorale | p. 23 |
| Figure 1.8 : Schéma de l'impact de la végétation sur le niveau d'eau dans une flèche littorale | p. 26 |
| Figure 1.9 : Variations saisonnières du niveau de la nappe d'eau entre 1987 et 2007 de la flèche littorale de Whiteford Burrows et schéma du changement de profil de la flèche et de l'écoulement avant et après la tempête de 1995 | p. 26 |

| | |
|---|-------|
| Figure 1.10 : Schéma récapitulatif des interactions en hydrogéologie côtière | p. 28 |
| Figure 1.11 : Schéma récapitulatif des effets des changements climatiques sur les aquifères côtiers | p. 29 |
| Figure 1.12 : Effet du pompage dans un aquifère côtier | p. 30 |
| Figure 2.1 : Carte de localisation du marais de Cap Marteau | p. 32 |
| Figure 2.1 : Localisation de l'aire d'étude du Cap Marteau : topographie, courants de marée et aménagements | p. 33 |
| Figure 2.2 : Photographies de l'intérieur du marais de Cap Marteau en été et en hiver | p. 36 |
| Figure 2.3 : Photographies de la plage de Cap Marteau depuis la pointe de la flèche active en été et en hiver | p. 36 |
| Figure 2.5 : Carte des positions des différents préleveurs et échantillons effectués sur le marais de Cap Marteau | p. 39 |
| Figure 2.6 : Séparateur de sédiments et agitateur de tamis | p. 40 |
| Figure 2.7 : Cartes des transects au 5 m mis en place par le programme DSAS et tracés de l'évolution des flèches | p. 45 |
| Figure 2.8 : <i>PushPoint Sample</i> de 30 et 50 cm et extrémité crépinée d'un <i>pushpoint</i> | p. 46 |
| Figure 2.9 : Photographie du perméamètre de Guelph sur la flèche littorale de Cap Marteau | p. 47 |
| Figure 2.10 : Schéma d'un piézomètre | p. 49 |
| Figure 2.11 : Capteur à pression de type Hobo U20 | p. 49 |
| Figure 2.12 : Masques utilisés pour le calcul des volumes pour chacune des années disponibles (1924, 1963, 1985, 1990, 2001, 2011, 2012 et 2013), basé sur l'imagerie Lidar de 2011 | p. 53 |
| Figure 3.1 : Diagramme de classe sédimentaire et pourcentage des sables grossiers et moyens des 25 échantillons | p. 56 |
| Figure 3.2 : Description de la carotte sédimentaire n°1 prélevée sur le crochet terminal de la flèche active | p. 58 |
| Figure 3.3 : Description de la carotte sédimentaire n°2 prélevée sur la paléoflèche centrale | p. 59 |
| Figure 3.4 : Carte de l'évolution historique des flèches du marais de Cap Marteau entre 1924 et 2013 | p. 63 |

| | |
|---|-------|
| Figure 3.5 : Les différentes zones du marais de Cap Marteau déterminées selon l'évolution historique de la Figure 3.4 | p. 65 |
| Figure 3.6 : Carte de l'indice SCE sur les flèches du marais de Cap Marteau entre 1924 et 2013 (en m) | p. 66 |
| Figure 3.7 : Variations des niveaux piézométriques dans les piézomètres installés dans les flèches littorales entre le 8 novembre 2014 et le 15 novembre 2016 | p. 70 |
| Figure 3.8 : Variation du niveau d'eau de la rivière Centrale et des précipitations | p. 72 |
| Figure 3.9 : Comparaison des variations des piézomètres CM1 et CM5 avec le niveau d'eau de la rivière Centrale entre le 9 juillet 2015 et le 15 novembre 2016 | p. 73 |
| Figure 3.10 : Résultats des corrélations croisées entre la rivière et les piézomètres installés dans les flèches | p. 76 |
| Figure 3.11 : Résultats des corrélations croisées entre CM1 et les piézomètres installés dans les flèches | p. 77 |
| Figure 3.12 : Analyse de fréquence sur les séries temporelles des piézomètres CM1 et CM5 | p. 79 |
| Figure 3.13 : Analyse par ondelettes des niveaux piézométriques enregistrés dans CM1 et CM5 | p. 81 |
| Figure 3.14 : Composition isotopique de l'eau de surface, souterraine et des précipitations du marais de Cap Marteau | p. 84 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

| | |
|----------------|---|
| BP | Before present (Avant présent) |
| BRGM | Bureau de recherches géologiques et minières |
| BSL | Bas-Saint-Laurent |
| CNG | Cote-Nord du golfe |
| DGPS | Differential global positioning system (GPS différentiel) |
| DSAS | Digital shoreline analysis system (Système d'analyse du littorale) |
| EA-IRMS | Elemental analysis – Isotope ratio mass spectrometry (Analyse élémentaire – Spectométrie de masse à rapport isotopique) |
| EPR | End point rate |
| GÉOTOP | Centre de recherche sur la dynamique du système Terre |
| GIEC | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat |
| GPS | Global positioning system (Géo-positionnement par satellite) |
| IFREMER | Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer |
| ISMER | Institut des sciences de la mer de Rimouski |
| LDGIZC | Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtière |

| | |
|--------------|--|
| LGDF | Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale |
| MELCC | Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques |
| MRC | Municipalité régionale de comté |
| MTM | Modified transverse Mercator (Mercator transverse modifiée) |
| NEBSL | Nord-Est du Bas-Saint-Laurent |
| NSM | Net shoreline movement (Mouvement net du rivage) |
| PACES | Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines |
| PVC | Polychlorure de vinyle |
| SCE | Shoreline change envelope (Enveloppe de changement de ravin) |
| SIG | Système d'information géographique |
| UQAM | Université du Québec à Montréal |
| UQAR | Université du Québec à Rimouski |
| VM | Volume moyen d'eau |
| VSMOW | Vienna standard mean ocean water (Eau océanique moyenne normalisée de Vienne) |
| ZIP | Zone d'intervention prioritaire |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte de recherche

Ce mémoire de maîtrise s'inscrit dans le cadre du Programme d'Acquisition de Connaissance sur les Eaux Souterraines du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL). Le projet a été lancé au printemps 2012 à la demande du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) et il s'est finalisé en mars 2015. Le PACES a été mis en œuvre pour pallier le manque de connaissances concernant les eaux souterraines, qui dans la région du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent, alimente 60 % de la population (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015). Il avait pour objectif principal de « *dresser un portrait de la ressource en eau souterraine à l'échelle des bassins versants [...] pour soutenir les besoins d'information sur cette ressource concernant la qualité, la quantité et la vulnérabilité de l'eau souterraine* » (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015). Ainsi, ce mémoire s'insère dans la connaissance et la compréhension des aquifères en milieu côtier et plus précisément dans les aquifères granulaires non confinés, formés par les grands corps sédimentaires côtiers comme les plages, les dunes ou les flèches littorales.

Problématique

Définition des zones humides

Les zones humides sont des « *écosystèmes qui constituent l'ensemble des sites saturés d'eau ou inondés pendant une période suffisamment longue pour influencer la nature du sol ou la composition végétale* » (Couillard et Grondin, 1986) par exemple les étangs, les marais, les marécages ou les tourbières. Au Québec, ils représentent 10 % de la superficie du territoire (MELCC, 2018). Ces zones témoignent d'interactions complexes entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Ces interactions dépendent de plusieurs facteurs comme le type de zone humide, le milieu géographique, la géomorphologie locale de la zone, la hauteur du mélange eau de surface et eau souterraine ou encore l'écoulement des eaux souterraines (Jolly *et al.*, 2008).

Perillo et ses collaborateurs (2009) définissent les zones humides côtières comme les « *écosystèmes qui se trouvent entre la limite où la lumière pénètre dans l'eau pour effectuer la photosynthèse des plantes benthiques et la côte où la mer influence l'hydrologie des eaux souterraines et des processus atmosphériques* » (traduction libre). Ainsi, ces types de milieux humides sont soumis à l'influence des milieux marins. Il ne s'agit donc plus seulement de prendre en compte les interactions entre l'eau de surface et l'eau souterraine, mais de comprendre aussi les interactions continents-océans. En effet, ces influences terrestres autant qu'océaniques entraînent des processus qui à l'heure actuelle ne sont pas encore bien compris (Moffett *et al.*, 2012). Ce déficit de connaissances est dû notamment à la méthodologie employée qui jusqu'à récemment séparait les processus continentaux et les processus océaniques alors qu'ils ne forment qu'un seul et même ensemble (Alvarez-Romero *et al.*, 2011). L'étude des zones humides côtières doit prendre en compte les composantes marées et la salinité (Carol *et al.*, 2012 ; Liu et Mou, 2014). Ces deux éléments poussent à s'interroger sur les effets des marées dans l'hydrodynamisme des zones humides côtières et sur l'impact que peut avoir un changement de salinité dans ces milieux. Cela est d'autant plus nécessaire puisque 60 % de la population mondiale habite le long des littoraux dont font partie les zones humides côtières (Comte, 2008). Les zones humides sont donc soumises à la pression qu'exerce la littoralisation croissante des hommes et de leurs activités.

Les défis des zones humides côtières

L'anthropisation des littoraux est un phénomène mondial et les problèmes qu'elle entraîne sont nombreux. Le développement économique des sociétés et l'intérêt que porte la population aux littoraux ont fortement modifié son paysage. Les zones humides côtières sont transformées en milieux urbains à vocation touristique, en zones agricoles ou industrialo-portuaires. Tout au long du 20^e siècle, Davidson (2014) a chiffré la diminution de l'étendue des zones humides dans le monde entre 69 et 75 % et celles des zones humides côtières à 63 %. Ces pertes et ces dégradations environnementales touchent tous les pays et continuent encore aujourd'hui (Gardner *et al.*, 2015). Par exemple, depuis les années 1800 jusqu'à aujourd'hui, le Canada a perdu entre 80 et 98 % de ses milieux humides situés dans ou proche des zones urbaines (biodivcanada.ca, 2018). Cette perte s'est surtout réalisée à partir des années 1950 et s'est renforcée durant les

années 1970 (Biodiversité Canada, 2018). Comme autres exemples, on peut citer le Portugal et la Chine : entre 1958 et 2007, le Portugal a perdu 85 % de ses marais salés à des fins de cultures agricoles (Almeida *et al.*, 2014) et la Chine a perdu 16 % de ses eaux côtières peu profondes (entre 0 et – 5 m) entre 1970 et 2007 (Liu et Mou, 2014). La réduction de ces zones humides côtières prive la population des services écosystémiques qu'elles fournissent comme par exemple sa fonction protectrice face à l'érosion ou aux événements météorologiques et son approvisionnement en eau potable (Moffett *et al.*, 2012 ; Liu et Mou, 2014 ; Gardner *et al.*, 2015). L'imperméabilisation des surfaces humides entraîne des changements dans les processus hydrologiques notamment au niveau des écoulements et de la recharge des eaux souterraines (Carretero *et al.*, 2014). L'urbanisation des littoraux est accompagnée de l'augmentation de la demande en eau, notamment en eau potable. La pression sur la ressource hydrique s'en retrouve renforcée. Ainsi, certaines communautés côtières font déjà face à des stress hydriques, voire dans quelques années à des pénuries en eau (Lagomasino *et al.*, 2014 ; Carretero *et al.*, 2014). Le problème étant que les fortes demandes en eau surviennent pendant l'été, saison touristique, moment où les nappes souterraines côtières sont à leur plus bas niveau avec une recharge au minimum (Comte, 2008).

Outre l'anthropisation, le littoral fait face à un autre défi : les changements climatiques. Les changements climatiques proviennent de bouleversements de processus naturels et anthropiques, mais le dernier rapport du GIEC (2014) établit maintenant que c'est principalement l'influence des humains qui en est la cause. De manière générale, les changements climatiques provoquent le réchauffement de l'atmosphère et des océans (Figure 1), augmentent la concentration en gaz à effet de serre comme le CO₂ (Figure 2.2.a) ainsi que l'élévation du niveau marin (Figure 2.b), diminuent l'étendue de la banquise et le manteau neigeux (Figure 2.c et d) et modifie le cycle de l'eau. Les différents scénarii proposés par le GIEC (2014) montrent que cela ne fera que s'accroître dans le futur (Figure 3. a et b).

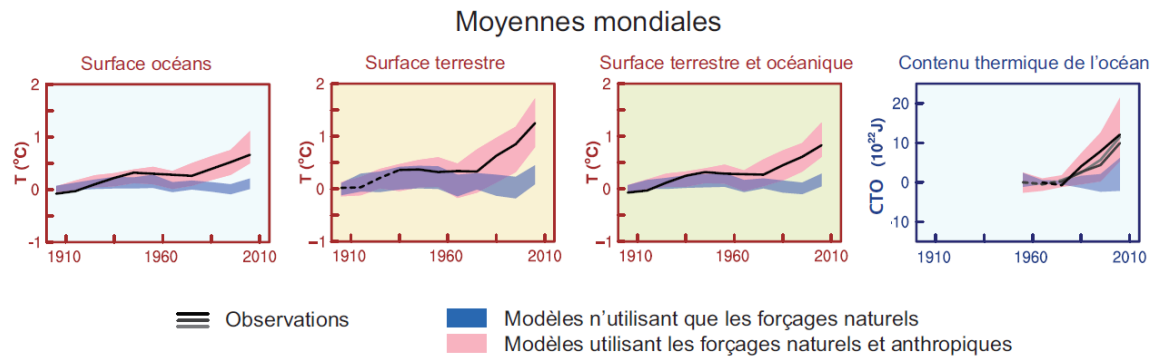


Figure 1 : Évolution des différentes températures moyennes mondiales entre 1910 et 2010 (GIEC, 2014)

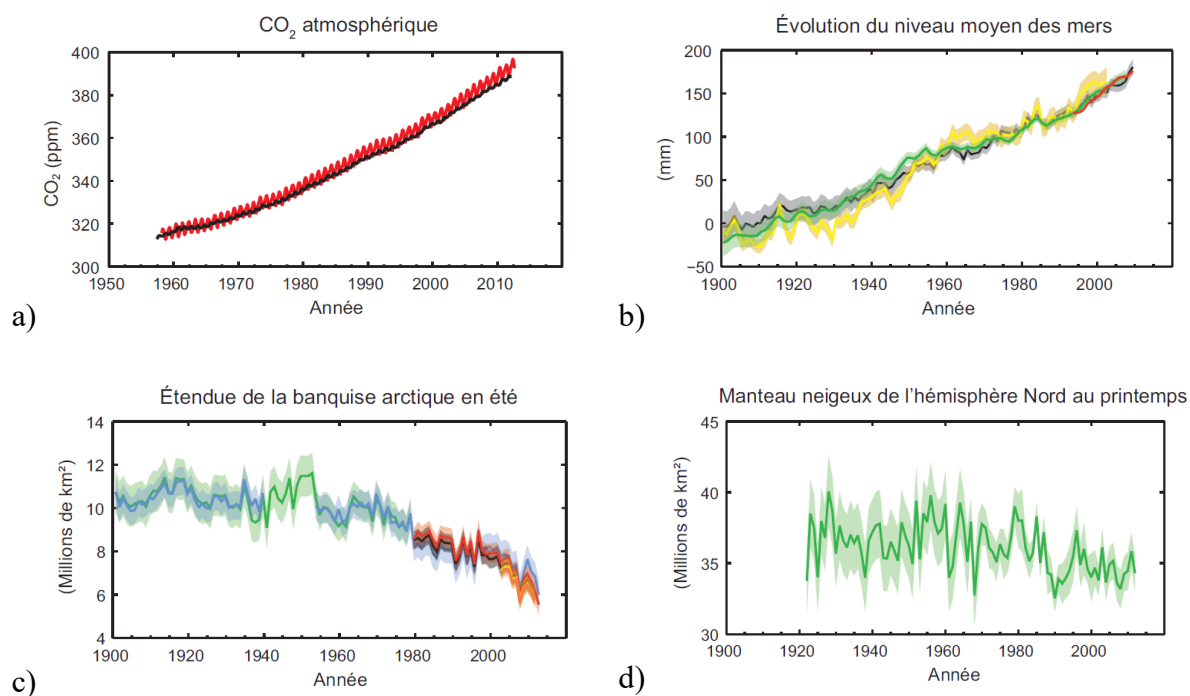


Figure 2 : Évolution a) du CO₂ atmosphérique entre 1955 et 2015 ; b) du niveau moyen des mers depuis 1900 ; c) de l'étendue de la banquise arctique en été depuis 1900 et d) du manteau neigeux de l'hémisphère Nord au printemps depuis 1920 (GIEC, 2014)

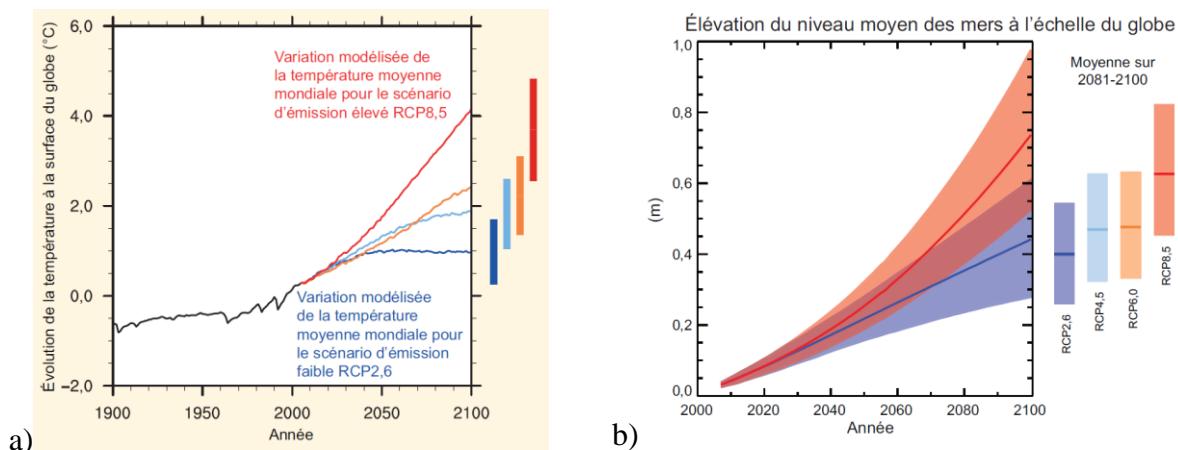


Figure 3 : Évolution et prévision selon plusieurs scénarii a) de la température moyenne mondiale depuis 1900 et b) de l'élévation du niveau moyen des mers (GIEC, 2014)

Ces accentuations vont défavoriser le développement des zones humides côtières. Comme le montre une étude récente, ce ne sont pas tant individuellement le déboisement, les variations du niveau marin, l'érosion ou l'accrétion côtière, mais le cumul de ces différents facteurs qui, en modifiant le régime hydrologique, affectent le plus les zones humides côtières (Curreli *et al.*, 2013).

Hydrogéologie côtière

Alors que les pressions augmentent sur les ressources en eau douce des milieux côtiers, la communauté scientifique porte un intérêt grandissant à l'hydrogéologie des zones côtières. Depuis une quinzaine d'années, on observe un intérêt grandissant dans l'étude de l'hydrogéologie côtière (*coastal hydrogeology*) comme le montrent les statistiques établies dans le moteur de recherche *Scopus* (Scopus, 2018) (Figure **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**4).

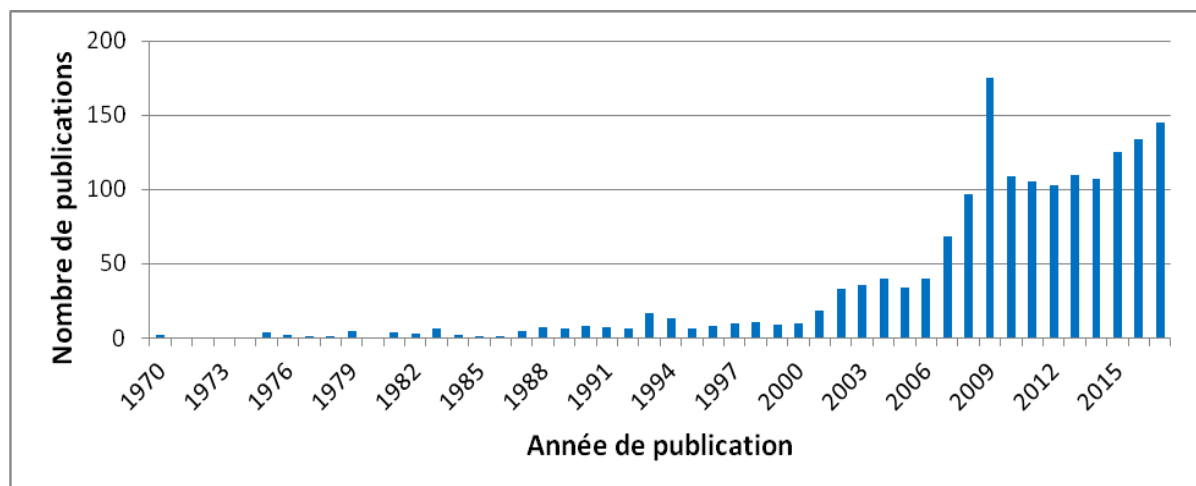


Figure 4 : Nombre de publications traitant "Coastal hydrogeology" depuis 1970 (source : Scopus, 2018)

Les corps sédimentaires tels que les plages, les dunes et les flèches littorales représentent environ 15 % des côtes mondiales (Carretero *et al.*, 2014). Ils servent non seulement de barrière côtière, mais aussi d'aquifères côtiers. Ces ressources en eau douce sont utilisées par les communautés vivants sur ces corps ou à proximité. Cette utilisation n'est pas récente, elle a vu le jour vers le milieu du XIX^e siècle grâce à l'hydrogéologue néerlandais Willem Badon Ghijben (De Vries, 1994). À cette époque la ville d'Amsterdam (Pays-Bas) rencontre des problèmes de pollution et de salinisation de ses eaux potables. L'alternative trouvée est de puiser l'eau dans des dunes situées à 30 km de la ville. Ghijben est alors chargé de les étudier. Il sera suivi au début du XX^e siècle par l'Allemand A. Herzberg. Tous les deux ont permis de mettre les bases de l'hydrogéologie côtière. Ils préconisaient déjà une utilisation prudente de cette ressource. L'utilisation de corps sédimentaires comme aquifère n'est donc pas nouvelle et s'est développée peu à peu dans le monde. Aujourd'hui, dans beaucoup de cas à travers le globe, il s'agit de la seule source d'eau douce dont les habitants disposent. Comme exemple, nous pouvons citer la nappe côtière d'Agadir au Maroc (Hsissous *et al.*, 1997), le complexe dunaire de Kapenglop sur l'île de Schiermonnikoog au Nord des Pays-Bas (Grootjans *et al.*, 1991 et 1996), la flèche littorale de Partido de la Costa en Argentine (Carretero *et al.*, 2014) ou encore les Îles-de-la-Madeleine au Québec (Chaillou *et al.*, 2012). Malheureusement, ces milieux ne sont pas exempts des problèmes que rencontrent les autres types de milieux humides. Ils subissent aussi la pression anthropique ainsi que de l'intrusion saline (remontées d'eau salée à l'intérieur des terres) engendrée par le pompage et l'élévation du niveau des océans (Figure 5).

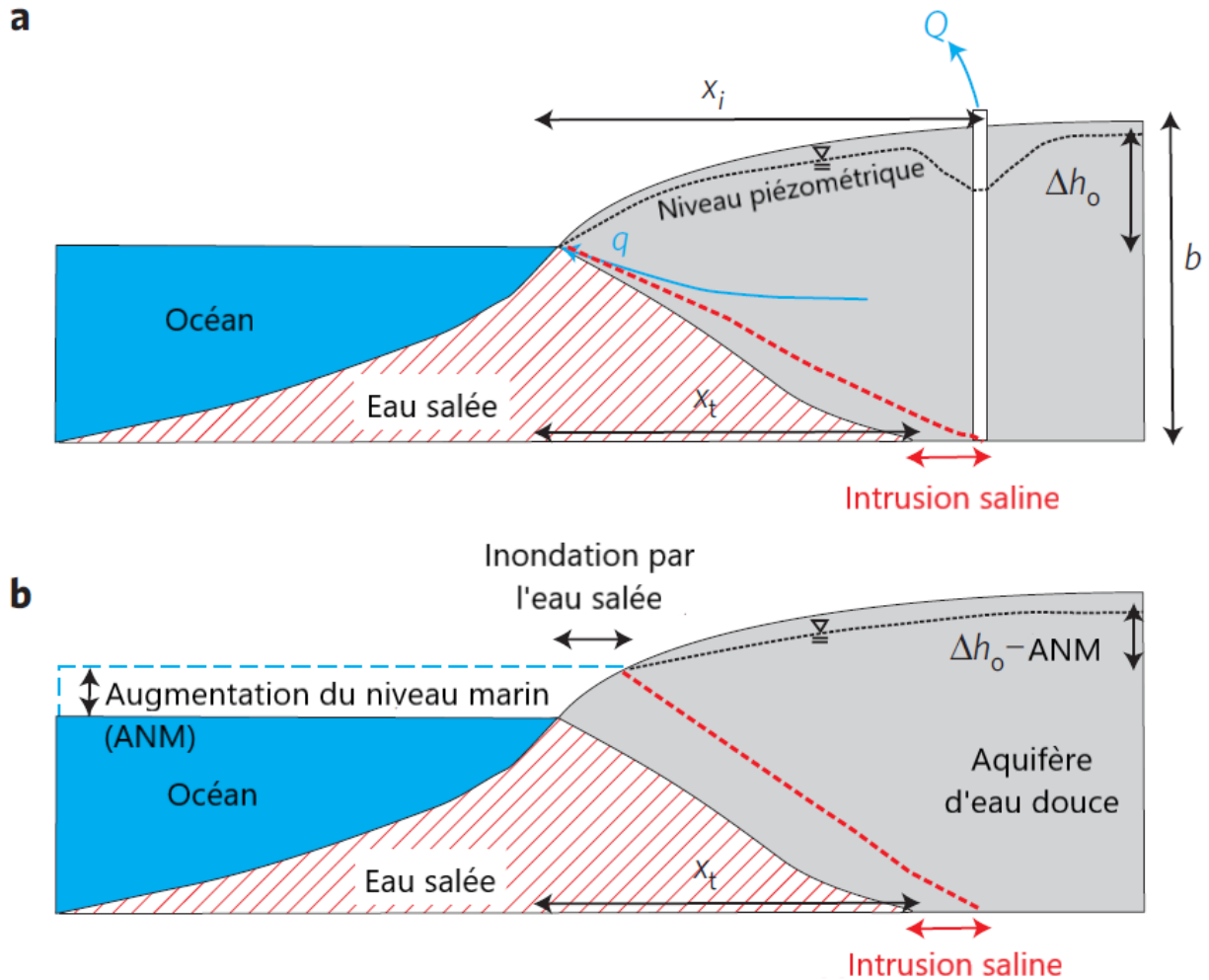


Figure 5 : Effet du pompage (a) et de l'élévation du niveau marin (b) sur les aquifères côtiers. Avec l'épaisseur de l'aquifère (b), la décharge d'eau douce à l'océan (q), l'extraction d'eau souterraine par le puits (Q), la distance entre la côte et le coin d'eau salée (x_t), la distance entre la côte et la puits (x_i) et la charge hydraulique (Δh_o). (Ferguson et Gleeson, 2012)

À ce jour, peu d'études hydrogéologiques se font sur ces corps sédimentaires côtiers. Les principales ont été réalisées en milieu tempéré océanique dans des dunes côtières au Royaume-Uni et aux Pays-Bas (Grootjans *et al.*, 1991, 1996 et 1998 ; Lammerts *et al.*, 2001 ; Jones *et al.*, 2006 ; Stratford *et al.*, 2013 ; Robins & Jones, 2013 ; Robins *et al.*, 2013) et en milieu tropical en Argentine (Carretero *et al.*, 2013 et 2014). Mais aucune n'a encore été conduite en milieu froid. Le gel du sol et de l'eau ainsi que la présence des glaces de mer hivernales sont à considérer en plus des intrusions salines et des impacts des changements climatiques et anthropiques.

À la vue de ces différentes problématiques, les flèches littorales du marais de Cap marteau (Trois-Pistoles, Québec) peuvent être abordées comme un micro-modèle pour comprendre le fonctionnement hydrogéologique de ces systèmes sédimentaires en milieu froid. En effet, le marais regroupe à lui seul plusieurs des caractéristiques citées plus haut : une biodiversité en équilibre avec les eaux douces et les eaux salées et une population résidente en augmentation, pour la plupart saisonnière, qui peuvent s'alimenter de l'eau contenue dans les flèches.

Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude vise à **documenter les dynamiques hydrogéologiques de flèches littorales**. Pour ce faire, deux sous objectifs ont été fixés :

1) Documenter la dynamique géomorphologique en retraçant l'évolution historique des flèches littorales.

Cet objectif consiste à dresser un portrait complet de la géomorphologie du site d'étude. D'abord avec un travail de cartographie pour étudier l'évolution des flèches littorales *via* des photographies aériennes et par drone. Puis, de compléter ce travail par des données terrain et des analyses en laboratoire pour déterminer la sédimentologie du site.

2) Rendre compte de la dynamique hydrogéologique des flèches littorales en milieu tempéré froid sur différentes échelles temporelles : selon les cycles de marée et selon les saisons, ainsi qu'évaluer la quantité d'eau présente dans la flèche.

Cet objectif a pour but de comprendre comment fluctue le niveau d'eau à l'intérieur des flèches sur l'année. Pour cela, des piézomètres équipés de capteur à pression ont été installés à différents endroits dans les flèches littorales. Par la suite, des analyses statistiques ont été effectuées pour comprendre les variations des niveaux piézométriques. Des analyses chimiques ont permis d'étudier l'origine de l'eau dans les flèches. Enfin, l'ensemble des données des deux sous objectifs sont réunis afin d'estimer un volume d'eau accessible à la consommation.

Organisation du mémoire

Dans un premier chapitre, un état des connaissances donne un bref rappel de l'histoire Quaternaire de la région du Saint-Laurent, sur les dynamiques physiques qui touchent actuellement les rives du Saint-Laurent et d'un autre sur la définition, la formation et le fonctionnement d'une flèche littorale. Enfin, il se terminera par un état des lieux des avancées scientifiques concernant l'hydrogéologie des systèmes côtiers.

Dans le chapitre 2, l'approche méthodologique sera détaillée. Après avoir présenté de façon exhaustive le terrain d'étude du marais de Cap-Marteau (Trois-Pistoles, Bas-Saint-Laurent), la méthodologie et les outils utilisés pour chacun des objectifs seront décrits.

La section résultats et interprétation sera divisée en deux grands chapitres selon les objectifs décrits précédemment. Dans un premier temps seront traitées les dynamiques géomorphologiques du marais et dans un deuxième temps les dynamiques hydrogéologiques. Les résultats et la discussion seront présentés conformément aux sous-objectifs.

Finalement, ce mémoire se terminera par une synthèse générale du projet et ouvrira sur quelques perspectives de recherche en termes d'hydrogéologie, mais aussi de gestion de ces milieux et de leurs ressources.

CHAPITRE 1

ÉTATS DES CONNAISSANCES

1.1 HISTOIRE DU QUATERNAIRE DES RIVES DU SAINT-LAURENT

Cette première partie de l'état des connaissances a pour but de présenter l'histoire du Quaternaire au Québec afin de mieux comprendre le contexte de la mise en place des dépôts meubles de la région d'étude et notamment des flèches littorales du marais de Cap Marteau. Nous verrons dans un premier temps, les grandes étapes qui ont marqué le Quaternaire et ce, de manière chronologique. Puis dans un second temps, nous aborderons les héritages qui ont été laissés par cette période géologique et qui façonnent de nos jours le paysage laurentien.

Le Bas-Saint-Laurent fait partie de l'Orogénèse des Appalaches qui résulte de deux phases de plissement : à l'Ordovicien supérieur (orogénèse taconienne) et au Dévonien (orogénèse acadienne) (Hétu, 1998). Le Quaternaire est une ère géologique s'étendant approximativement de 2,6 Ma à 0,0117 Ma et comprenant deux divisions stratigraphiques que sont le Pléistocène et l'Holocène. La géologie du Quaternaire est liée à la glaciation, la déglaciation et l'invasion marine des derniers 40 000 – 30 000 ans (Buffin-Bélanger et al., 2015).

L'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire sur Terre vers 18 000 ans BP entraîne la fonte des glaces (Bélanger *et al.*, 2007). D'un point de vue géologique, cette déglaciation est très rapide au Québec. La vallée du Saint-Laurent permet de rapidement évacuer de gros volumes de glace dans le golfe par le biais d'un courant de glace (*ice stream*) ou baie de vêlage qui s'y est formé (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015). L'ouverture du Saint-Laurent commence par le Golfe du Saint-Laurent vers 16 500 ans BP, pour atteindre Matane et Rimouski vers 15 000 ans BP et finir à Québec aux environs de 13 700 ans BP (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015) (Tableau 1.1). En parallèle de la déglaciation se produit l'invasion marine et notamment celle de la Mer de Goldthwait. L'ensemble de ces deux phénomènes entraîne deux événements : la création de la calotte glaciaire appalachienne et la phase marine. La phase marine peut être divisée en deux :

une phase glaciomarine avec l'influence directe de la marge glaciaire qui donne une sédimentation glaciomarine et une phase marine qui se déroule après le retrait de la marge glaciaire à l'intérieur des terres vers 13 000-13 200 ans BP. Cette dernière phase marine génère une sédimentation argileuse d'eau profonde dans laquelle, une partie des terrasses de la région vont se construire (Dionne, 2002a). Jusqu'aux environs de 12 400 ans BP, la limite marine reste quasiment stable bien qu'elle soit décroissante d'Ouest en Est entre St-Fabien (160-165 m d'altitude), Rimouski (135-140 m) et Matane (100-110 m d'altitude). Après cette période commence la Transgression laurentienne (Tableau 1.1 et Figure 1.1). Entre 12 000 ans et 8 000 ans BP, la rive Sud du Saint-Laurent connaît un relèvement isostatique rapide dû à la fonte des derniers glaciers vers 11 500 ans BP. Le niveau marin passe alors de 145 m à 10 m, soit - 3,4 mm / an (Dionne, 2002a). Vers 8 ka, le niveau marin est voisin de l'actuel (Dionne, 2002a). Puis, il descend à environ -10 m de profondeur par rapport à l'actuel, durant le milieu de l'Holocène (8 750 – 7 800 ans BP) avant de remonter (6 600 – 4 900 ans BP) pour enfin se stabiliser au niveau actuel il y a 300 ans (Dionne, 2002a). Depuis quelques centaines d'années, les provinces du Québec et des Maritimes connaissent une subsidence régionale qui résulte de l'ajustement glacio-isostatique de la dernière glaciation (Lemmen *et al.*, 2016 ; Juneau, 2012 ; Jolicoeur *et al.*, 2010). Cette subsidence influence la position des nappes phréatiques (Lemmen *et al.*, 2016 ; Juneau, 2012 ; Jolicoeur *et al.* 2010).

Tableau 1.1 : Chronologie et événements marquants de la post-déglaciation dans la région du Saint-Laurent

| Date (BP) | Période / Phase | | Évènement | Relief | |
|----------------|-----------------|----------------------------|---|--|----------------|
| 18 000 | DRYAS | Phase glacio-marine | Début de la déglaciation | | |
| 16500 | | | Ouverture du Saint-Laurent (Golfe du Saint-Laurent et Gaspésie) | | |
| 15 000 | | | Ouverture atteint Matane et Rimouski | Moraine de Luceville | |
| 14 300 | | | Ouverture au niveau de Rivière-du-Loup | Complexe morainique de St-Antonin | |
| 13 700 | | | Ouverture se finit à Québec | | |
| 13 000-13 200 | | | Retrait de la marge glaciaire à l'intérieur des terres | | |
| 12 400 | HOLOCENE | Phase marine | Stabilisation de la Mer de Goldthwait | Deltas de Ste-Luce, St-Anaclet, Ste-Odile et du Bic | |
| 12 000 – 8 000 | | | Transgression laurentienne | Relèvement isotatique Niveaumarin passe de 145 m à 10 m | |
| 8 750 – 7 800 | | | | Niveau marin se situe à -10 m | |
| 6 600 – 4 900 | | | | Niveau marin remonte | |
| 2 000 | | | | | Terrasse Mitis |
| 300 | | | | Niveau marin proche de l'actuel | |
| 0 | | | | Augmentation du niveau marin relatif le long des provinces des Maritimes | |

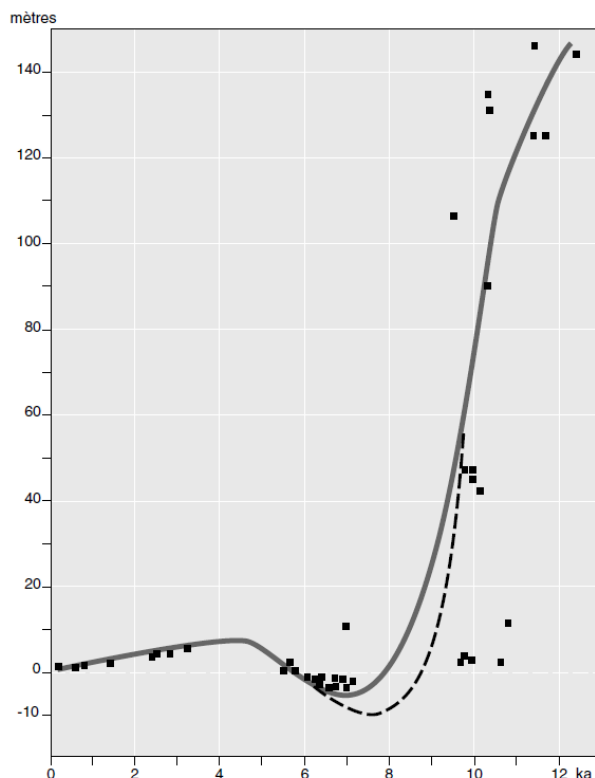


Figure 1.1 : Courbe généralisée du niveau marin relatif du niveau du Saint-Laurent (Dionne, 2002a)

L'ensemble des événements qui se sont produits durant le Quaternaire a donné naissance à des héritages encore visibles à l'heure actuelle. Les héritages sont des formes du relief façonnées par l'érosion des climats passés. Dans le Bas-Saint-Laurent, ces héritages sont liés aux processus glaciomarins, glaciaires et marins du Quaternaire.

Après l'ouverture de la rive sud du Saint-Laurent, la marge glaciaire appalachienne s'est stabilisée sur les premiers reliefs rocheux et suit la limite marine, c'est la phase glaciomarine. Durant cette période qui a duré au moins 500 ans, des formes d'accumulations glaciomarines se sont construites au niveau de cette première marge située à une altitude comprise entre 165 et 100 m. Cela a permis le déversement d'une très grande quantité de sédiments glaciaires dans la mer de Goldthwait sous forme d'argiles glaciomarines que l'on retrouve aujourd'hui le long des côtes du Saint-Laurent.

Le recul de la marge glaciaire à l'intérieur des terres marque la fin de la phase glaciomarine et le début de la phase glaciaire et fluvio-glaciaire. Cette période de recul est visible dans le paysage par des complexes fluvio-glaciaires bosselés (kames, eskers et kettles) que l'on peut

retrouver dans la vallée de la Neigette et celle de Saint-Fabien (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015) et par des deltas étagés comme celui de Trois-Pistoles (Dionne, 1986) ou de Rimouski (Hétu, 1998). Le recul de la marge glaciaire marque aussi le début de la phase marine avec comme héritages des plages soulevées (Trois-Pistoles, Sainte-Anaclet et Rimouski) et des terrasses. Les terrasses sont définies par Dionne (2002b) comme « *des surfaces relativement planes et horizontales délimitées à son front par un talus* ». Dans le cas du Saint-Laurent, trois terrasses ont été façonnées : la terrasse Micmac, la terrasse Mitis et la terrasse Rimouski (Dionne, 2002b). Cette dernière forme la zone intertidale et pré littorale du Saint-Laurent actuel avec une hauteur ne dépassant pas 3 m d'altitude (Dionne, 2002b). Plane à faible inclinaison, elle peut faire jusqu'à 5 km de large et est rocheuse ou argileuse. C'est sur cette terrasse, qui a connu une érosion importante (Quintin *et al.*, 2006), que ce sont développés les marais, les dépôts meubles et les estrans à bloc visibles de nos jours le long du Saint-Laurent. C'est le cas des flèches littorales et du marais de Cap Marteau (Quintin *et al.*, 2006).

1.2 DYNAMIQUES DES CÔTES DU SAINT-LAURENT

Dans la première partie, nous avons vu que les climats passés ont laissé des traces dans le paysage qui sont encore visibles de nos jours. Maintenant, pour mieux comprendre les dynamiques actuelles, nous allons aborder les phénomènes qui touchent actuellement les rives du Saint-Laurent. Nous allons ainsi faire le tour des différentes dynamiques qui affectent le littoral québécois.

Dans l'Est du Québec, les côtes sont majoritairement stables, si l'ensemble des côtes est pris en compte. Les côtes rocheuses qui représentent plus de la moitié du littoral québécois sont faites de roches difficilement érodables (schiste, conglomérat, granite, gneiss) (Figure 1.2). Par contre, si seules les côtes meubles sont prises en compte alors la moitié est en érosion avec un taux moyen de recul de 0,55 m/an (Drejza *et al.*, 2014 ; Bernatchez, 2015).

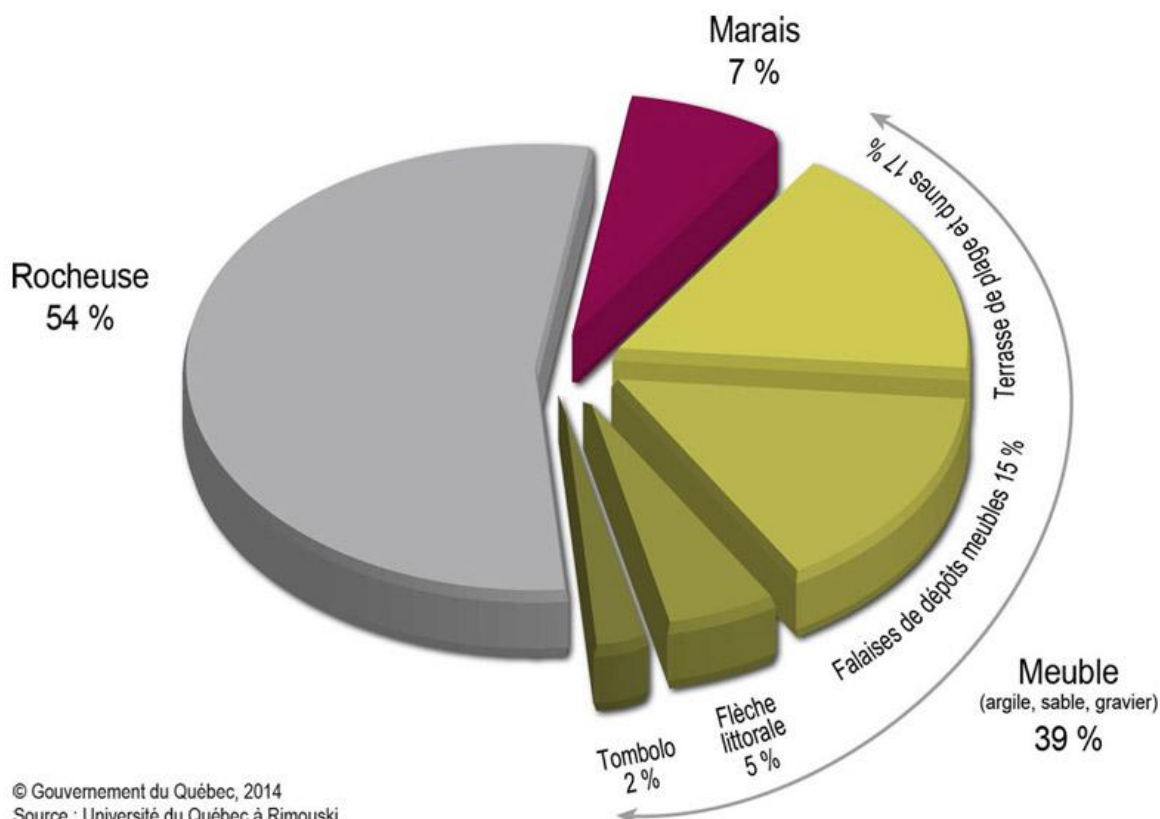


Figure 1.2 : Proportion des différents types de côtes du Québec maritime. (MELCC, 2018)

Six grands types de processus participent à l'érosion des côtes (Tableau 1.2). Ces processus sont souvent interreliés et leur action est dépendante du type de côte, de l'orientation et de l'exposition aux vagues (Bernatchez *et al.*, 2012). Les principaux facteurs touchant les côtes québécoises sont l'action des vagues, des courants et de dérives littorales, l'action des glaces et l'action du vent (Bernatchez et Dubois, 2004). Les actions hydrodynamiques abrasent la côte et sapent les bases de falaise notamment durant les événements de tempêtes couplés à des marées de vives eaux (automne). Durant l'hiver, le pied de glace protège les côtes de l'action des vagues et des courants en diminuant leurs amplitudes. Au printemps, les glaces littorales deviennent elles aussi un des principaux facteurs d'érosion des berges en arrachant des portions de côte appelé radeaux (Figure 1.3) faisant parfois reculer la côte de plusieurs mètres (Drapeau, 1992 ; Bernatchez et Dubois, 2004 ; Comité ZIP-CNG, 2007 ; Van Wierst *et al.*, 2016). Les glaces permettent aussi le transport de sédiments de toutes tailles. L'action éolienne se reflète sur les hauts de plage où les sédiments sont secs. Si leur action est plus ponctuelle sur l'ensemble des côtes du Québec, c'est l'un des principaux processus d'érosion pour les cordons littoraux et les

flèches littorales. Les processus hydrogéologiques et gravitaires tels que les glissements, les coulées, la suffosion et les écoulements souterrains et gravitaires ont des impacts sur les côtes à falaise tout comme les processus météoriques notamment de cryogénisation et les processus chimiques moins étudiés dans nos latitudes. Les processus biologiques sont observables surtout dans les marais et les zones humides côtières puisqu'ils servent de lieu de nidification et pour le picorage de la faune ailée. Les activités anthropiques sur les côtes ne sont pas négligeables non plus et peuvent être très différentes : prélèvements, piétinements, modification des surfaces ou encore artificialisation des rives (Bernatchez et Dubois, 2004). Selon l'action anthropique, ils vont favoriser les processus d'érosion cités plus haut. Le Tableau 1.2 résume les différents processus d'érosion qui touchent les rives du Saint-Laurent. Ces processus peuvent entraîner deux types d'érosion. La première est latérale avec le recul de la côte et la deuxième est verticale avec un abaissement de la pente de plage (Comité ZIP-CNG, 2007).

Ainsi, les rives du Saint-Laurent sont affectées par plusieurs types d'érosion naturelle, mais aussi par les effets directs ou indirects des activités anthropiques. Actuellement, ces effets sont accentués par les changements climatiques. Le nombre de forte tempête est en hausse. En effet, sur les 14 fortes tempêtes enregistrées entre 1968 et 2010, la moitié s'est déroulée dans la dernière décennie (2001 à 2010) (Bernatchez *et al.*, 2012). Les tempêtes renforcent l'énergie des vagues et élèvent le niveau d'eau qui submerge les côtes basses (Bernatchez *et al.*, 2008 et 2012). Les vagues de tempête affecteront donc davantage le littoral que par le passé. À cela s'ajoute la diminution du couvert de glace et de la période d'englacement qui expose les côtes aux tempêtes hivernales et aux glaces flottantes (Bernatchez *et al.*, 2008 ; Savard *et al.*, 2009). Une étude portée par Senneville et collaborateurs (2013) a estimé qu'à l'horizon 2040-2070, le nombre de jours où la glace offre une protection contre les vagues de tempête pourrait diminuer de 38 à 53 jours en moyenne. Enfin, le processus de gel-dégel qui cause l'érosion des falaises en hiver est lui aussi renforcé par la multiplication des cycles gel-dégel dans un hiver. Il est provoqué par l'augmentation des températures qui s'accompagnent de redoux hivernaux, de pluies hivernales et d'une exposition directe accrue aux rayonnements solaires. De ce fait, les côtes du Québec doivent continuer d'être surveillées et des mesures doivent être prises pour stabiliser et ralentir leur érosion.

Tableau 1.2 : Types et processus d'érosion selon le type de côte de l'estuaire du Saint-Laurent (modifié de Bernatchez et Dubois, 2004)

| Types de processus | Processus d'érosion | Type de côte principalement touchée |
|--|--|--|
| Aérodynamiques et hydrodynamiques | <ul style="list-style-type: none"> • Éolisation • Action des vagues, des courants de marée et des dérives littorales • Action des glaces littorales | Côtes sableuses |
| Hydrogéologiques et gravitaires | <ul style="list-style-type: none"> • Glissements et coulées • Suffosion et ravinement • Écroulements et éboulis | Côtes à falaise |
| Météorisation | <ul style="list-style-type: none"> • Cryogénie • Dessiccation | Côtes à falaise Côtes rocheuses Côtes à sédiments fins |
| Biologique | <ul style="list-style-type: none"> • « Picorage » • Nidification | Marais Zones humides Côtes sableuses végétalisées |
| Chimique | <ul style="list-style-type: none"> • Dissolution • Corrosion | Côtes calcaire ou de conglomérat Côtes à falaise |
| Anthropique | <ul style="list-style-type: none"> • Construction d'obstacle à la circulation des sédiments • Artificialisation des côtes • Excavation et prélèvement de matériaux • Concentration de l'écoulement des eaux • Modification des surfaces | Tous types de côtes |



Figure 1.3 : Radeau échoué sur la plage du marais de Cap Marteau, Trois-Pistoles, Québec (1^{er} octobre 2013)



Figure 1.4 : Envol d'oies sauvages au marais de Cap Marteau, Trois-Pistoles, Québec (18 septembre 2013)

1.3 LES FLECHES LITTORALES

Définition, mise en place et évolution d'une flèche littorale

Une flèche littorale est une forme littorale créée par une accumulation de petits et/ou gros matériaux, attachés à la côte par un point d'ancrage appelé racine et dont l'autre extrémité est libre. De manière générale, ce sont des formes instables évoluant très rapidement et pouvant

disparaître ou donner naissance à de nouvelles formes littorales (Pinot, 1998). Elle se retrouve principalement à l'embouchure de cours d'eau et dans des secteurs protégés des vagues (Sécurité publique du Québec, 2012). Au Québec Maritime, elles représentent 5 % des côtes (Sécurité publique du Québec, 2012).

On distingue deux types de flèches littorales (Pinot, 1998) : les queues de comète (Figure 1.5.a) et les flèches à pointe libre (Figure 1.5.b). Localement, ces deux types peuvent subsister au même endroit, il s'agit dans ce cas d'accumulation mixte.

La queue de comète (Figure 1.5.a) forme une accumulation sédimentaire (galet, sables grossiers à fins) formée par les phénomènes de réfraction et de diffraction des houles qui forment une ligne de convergence s'étirant de manière rectiligne derrière un abri (île ou rocher) éloigné du rivage (Pinot, 1998). Au niveau de la racine, elle est large, haute et composée de matériaux grossiers alors qu'elle est fine, plus basse et rassemble des matériaux plus fins au fur et à mesure qu'elle va vers le point de fuite. Cette répartition grano-classée s'explique par la proximité à la source et au fait que les vagues sont freinées à proximité de la racine (Pinot, 1998). Cependant, l'énergie présente dans la vague est encore suffisante pour transporter des sédiments plus fins.

La flèche à pointe libre (Figure 1.5.b) comme celles présentées dans le marais de Cap Marteau est une accumulation sédimentaire le plus souvent très longue et étroite qui se forme le long du littoral (Pinot, 1998). Elle est accrochée d'un côté à un point ferme du rivage alors que son autre extrémité est libre. Au-dessus du niveau des plus hautes marées, son front est battu par la mer alors que son revers est submersible. Quand son axe principal est parallèle aux crêtes des houles dominantes, on dit que la flèche est en « position frontale ». Les flèches à pointe libre sont les formes les plus instables et les plus jeunes du littoral. Elles n'ont pas plus de quelques siècles, parfois quelques milliers d'années quand il s'agit de flèches constituées de galets. Sujettes à l'érosion, elles sont simplement appelées à migrer ou disparaître à long terme (Pinot, 1998).

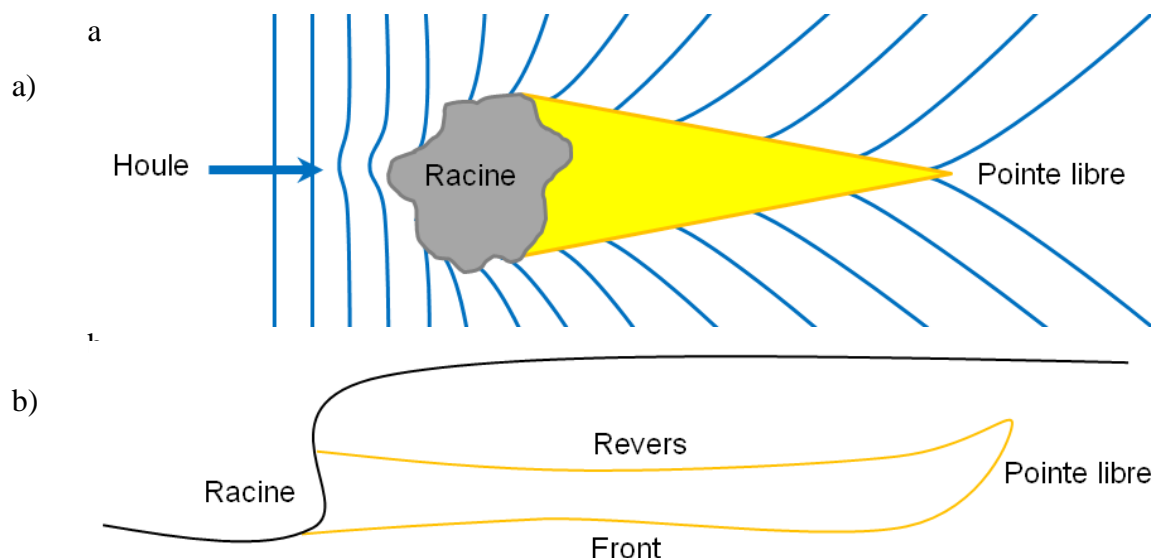


Figure 1.5 : Schéma théorique d'une flèche littorale a) en queue de comète et b) à pointe libre.

Alimentation et migration des flèches

Pour une flèche littorale, l'alimentation sédimentaire est primordiale, car ce n'est que grâce à elle que la flèche va subsister. Les matériaux (galets à sables) constituant cette alimentation proviennent de l'avant-côte, de l'embouchure d'un cours d'eau, du point d'ancrage de la flèche ou de l'érosion adjacente (Figure 1.6). L'ensemble de cette alimentation donne un bilan sédimentaire qui peut être positif, équilibré ou négatif. De manière générale, avec un bilan positif la flèche s'allonge ou s'engraisse alors qu'avec un bilan négatif elle s'érode ou s'amincit. Dans le cas d'un apport trop important en sédiments, une nouvelle flèche apparaît devant l'ancienne. Ce phénomène se produit aussi avec une variation du niveau marin qui empêche les sédiments d'atteindre le front de la flèche en place.

Les flèches littorales prennent forme avec l'accumulation progressive des matériaux à partir du point d'ancrage. La migration des matériaux est ce qui donne la forme des flèches, mais surtout ce qui lui permet d'évoluer (Pinot, 1998). Cette migration se fait via la houle et la dérive littorale (Figure 1.7). La houle entraîne l'allongement de la flèche en amenant les matériaux vers la côte où ils vont s'accumuler. Ce phénomène n'est possible qu'à certaines conditions propices à l'apparition de flèche littorale. Pour ce faire, il faut réunir une topographie à pente faible et protégée des vents forts et des houles importantes pour permettre aux sédiments de se déposer et de s'accumuler ainsi qu'une position géographique offrant un apport régulier en sédiment (Pinot,

1998). Au niveau de la pointe libre, la houle génère une perte de matériaux sédimentaires qui se tournent vers l'arrière pour créer des crochets terminaux (Figure 1.7). Ces successions donnent une indication sur les différentes étapes d'avancée de la flèche. La dérive littorale amène deux effets sur les flèches littorales : l'allongement de la pointe en amenant les sédiments du point d'ancrage vers la pointe libre et le recul de l'ensemble du front si l'alimentation de la flèche n'est pas régulière. Dans ce dernier cas, le recul s'opère au niveau de la racine alors que l'extrémité libre s'accroît. Le point neutre séparant la partie érodée de la partie en accumulation se nomme point mort ou *fulcrum* (Guilcher, 1954). Ce point a tendance à migrer vers la pointe libre au fur et à mesure de l'évolution de la flèche.

Processus d'érosion des flèches littorales

De par leur faible dénivelé, les flèches littorales sont fortement vulnérables à la submersion qui accélère leur érosion. En milieu côtier la submersion peut-être soudaine et ce manifeste lors des tempêtes, des grandes marées ou l'accumulation des deux ou sur un plus long terme via l'augmentation du niveau marin (Jolicœur *et al.*, 2010 ; Regnauld *et al.*, 2016). Dans le premier cas, les tempêtes ou marées de vives-eaux peuvent créer des brèches pouvant couper ou faire disparaître la flèche en place. Elles peuvent aussi amincir les flèches en retirant en un seul évènement de grosses portions de matériaux. À Waterford Borrow, au Pays de Galles, par exemple, Robins *et al.* (2013) reportent des pertes sédimentaires de 4 % sur l'ensemble du corps sédimentaire après une tempête. Dans le deuxième cas, l'augmentation du niveau marin va entraîner un recul de la flèche vers le littoral et une submersion progressive de la flèche (Jolicœur *et al.*, 2010 ; Regnauld *et al.*, 2016). Finalement, ce qui va déterminer la subsistance des flèches littorales est leur résilience face à ces phénomènes. Cette résilience est déterminée par la quantité et la rapidité de leur apport en matériaux. Dans un contexte de changements climatiques où la hausse du niveau marin accélère, le nombre et l'intensité des tempêtes augmentent et pour le Canada où la période du couvert de glace diminue ces deux types de submersion ne doivent pas être pris à la légère (Jolicœur *et al.*, 2010 ; Regnauld *et al.*, 2016, Ferreira 2006).

Ainsi, les flèches littorales sont des reliefs côtiers très dynamiques et vulnérables aux aléas côtiers. Comme elles contiennent de l'eau douce facilement accessible et utilisée par la population côtière (Lammerts *et al.* 2001 ; Robins *et al.*, 2013 ; Carretero *et al.*, 2013 et 2014), il

est d'autant plus important d'en faire le suivi et de les préserver puisque de leur maintien dépend la pérennité de la ressource en eau douce.

1.4 HYDROGÉOLOGIE DES CORPS SÉDIMENTAIRES CÔTIERS

L'eau douce représente 3% des réserves d'eau de la planète. Sur ces 3 %, les eaux souterraines en représentent 39 % soit un volume d'eau total 100 fois supérieur à celui des eaux de surfaces contenues dans les lacs et les rivières (Conseil des Académies Canadiennes, 2009 ; Gulli *et al.*, 2012). La majorité de la population dépend des aquifères côtiers qui en plus de subir les pressions engendrées par les activités humaines voient leur vulnérabilité s'accroître avec leur proximité à l'océan (Cheng et Ouazar, 2003 ; Chaillou *et al.*, 2012 ; Subba Rao *et al.*, 2014).

1.4.1 Les facteurs influençant l'hydrogéologie des corps sédimentaires côtiers

L'hydrogéologie des corps sédimentaires côtiers dépend de cinq facteurs : le régime des précipitations, le niveau marin, la nature des sédiments, le couvert végétal et la géomorphologie du corps. Tous ces facteurs sont interconnectés et assez difficilement dissociables.

Le régime des précipitations

Le rapport annuel et saisonnier entre précipitation et évapotranspiration contrôle la recharge des aquifères (Figure 1.6). De manière générale, en milieu tempéré, l'hiver et l'automne donnent plus de précipitations que d'évaporation et inversement au printemps et à l'été (Curreli *et al.*, 2013 ; Stratford *et al.*, 2013). Cette compensation maintient la bonne recharge et stabilise le niveau de la nappe sur l'année. Les précipitations sont les seules sources de recharge des corps sédimentaires côtiers (Carretero et Kruse, 2015). Si 100 % des précipitations s'infiltrent et atteignent la nappe, entre 10 % et 30 % participent réellement à la recharge (Vouillamoz *et al.*, 2012; Chaillou *et al.*, 2012). La grande majorité se décharge presque aussitôt par gravité. Ainsi, une diminution des précipitations ou une augmentation de l'évapotranspiration entraînent une baisse du niveau de la nappe alors qu'une augmentation des précipitations ou une diminution de l'évapotranspiration engendrent une augmentation du niveau de la nappe. Cependant, une trop

forte et longue période de pluie peut aussi provoquer l'effet inverse (baisse du niveau) en empêchant l'infiltration et favorisant le ruissellement de l'eau (Nuttle et Portnoy, 1992).

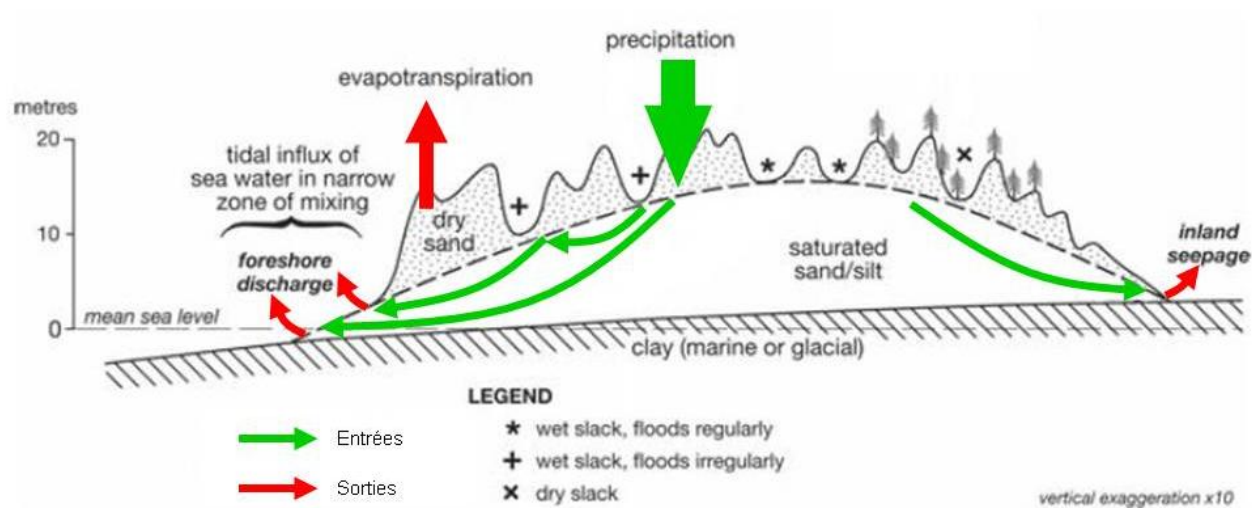


Figure 1.6 : Schéma de l'équilibre précipitation-évaporation d'une flèche littorale avec en vert les entrées d'eau et les écoulements et en rouge les sorties d'eau (décharge et évapotranspiration) (adapté de Robins *et al.*, 2013)

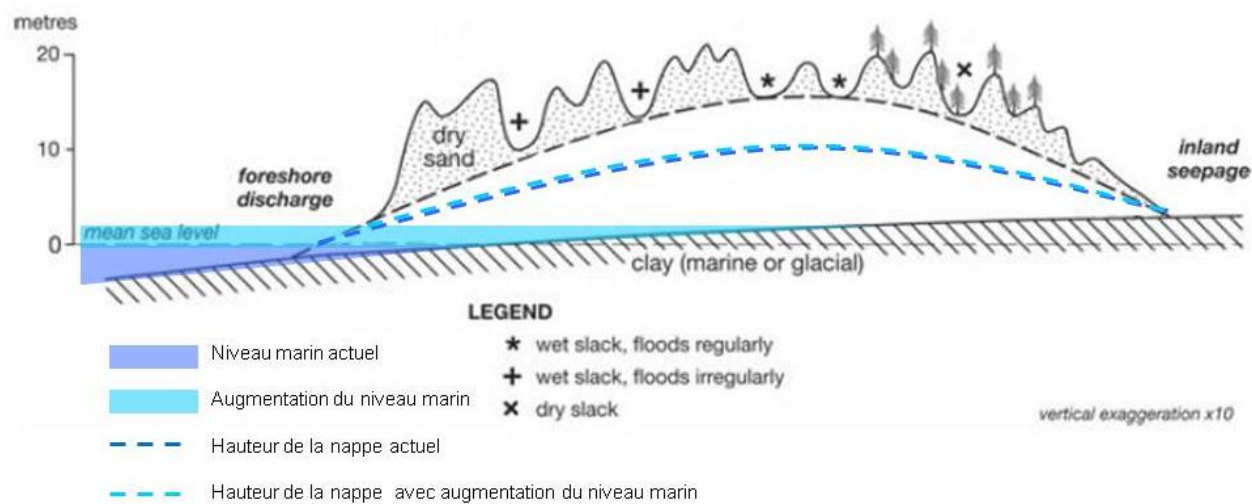


Figure 1.7 : Schéma de l'effet de la variation du niveau marin sur les niveaux d'eau dans une flèche littorale (adapté de Robins *et al.*, 2013)

Le niveau marin

Le niveau marin agit sur l'équilibre eau douce - eau salée et le positionnement du biseau salé (Figure 1.7). Cet équilibre vient des différences de densité entre les eaux douces (densité de 1) et les eaux salées (densité de 1,025). La relation de Ghyben et Herzberg, mise en avant dès la fin du XIX^e siècle, stipule que l'interface entre ces deux eaux se situe à un rapport de 1/40 : pour 1 m d'eau douce au-dessus du niveau marin (h), il y aura 40 m d'eau douce en dessous (z) qui repose sur les eaux salées (Verruijt, 1968) :

$$z = \frac{p_f}{(p_s - p_f)} h$$

Avec z Épaisseur de l'eau douce sous la mer (m)
 p_f Densité de l'eau douce (kg/m³)
 p_s Densité de l'eau salée (kg/m³)
 h Épaisseur de l'eau douce au-dessus de la mer (m)

Cette limite n'est pas nette. Un mélange se fait entre les eaux douces et salées pour former une zone saumâtre. Cette balance impacte la capacité aquifère c'est-à-dire la quantité d'eau douce et exploitable que peut emmagasiner le corps sédimentaire. Dans le cas où le niveau marin monte, l'intrusion saline avance plus à l'intérieur des terres ce qui a pour conséquence de réduire l'espace disponible pour l'eau douce dans les corps sédimentaires.

La nature des sédiments

La nature des sédiments a deux actions : une première sur la recharge de la nappe et une deuxième sur la capacité aquifère du corps sédimentaire. La nature des sédiments détermine la conductivité hydraulique du corps qui tient un rôle déterminant dans les interactions eau de surface et eau souterraine, mais aussi eau souterraine et océan (Wang *et al.*, 2014). De manière générale, plus le matériel est grossier, plus la conductivité hydraulique est rapide (Tableau 1.3). Les échanges (eaux, mais aussi polluants) sont ainsi facilités. La nature du sédiment joue sur la géomorphologie du corps sédimentaire et de ce fait sur la capacité aquifère. La grosseur du sédiment facilite ou non l'érosion du corps sédimentaire : plus le matériel est fin, plus il est facilement déplaçable et donc érodable. Le taux d'humidité du sol joue sur la fixation des

matériaux : plus les sédiments sont humides, plus ils se maintiennent entre eux et ralentissent l'érosion alors qu'un sédiment sec est facilement déplaçable par le vent.

Tableau 1.3 : Valeur de conductivité hydraulique (en m/s) pour diverses formations meubles (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2014)

| K (m/s) | Type de matériaux | Niveau de perméabilité |
|-------------------------|---|------------------------|
| $1 > k > 10^{-2}$ | Gravier sans éléments fins | Très perméable |
| $10^{-2} > k > 10^{-4}$ | Sables grossiers, graviers sableux sans éléments fins | Perméable |
| $10^{-4} > k > 10^{-6}$ | Sables moyens à fins, limons peu argileux, lœss | Peu perméable |
| $10^{-6} > k > 10^{-8}$ | Sables argileux, roche altérée à fracturée | Très peu perméable |
| $k < 10^{-8}$ | Argiles homogènes, roche non fracturée | Quasi perméable |

Le couvert végétal

La présence ou non de végétation, et surtout d'arbres, peut modifier l'évapotranspiration ainsi que le niveau piézométrique (Figure 1.8 ; Grootjans *et al.*, 1991, 1996, 1998 ; Lammerts *et al.*, 2001 ; Curreli *et al.*, 2012 ; Robins et Jones, 2013 ; Stratford *et al.*, 2013). La présence d'arbre va générer une plus forte évapotranspiration et une plus grande demande en eau. Si la demande en eau par les plantes et l'évapotranspiration augmentent et n'arrivent pas à être compensées par les précipitations, le niveau de la nappe baisse. La végétation détermine aussi la stabilité du corps sédimentaire puisqu'elle permet de fixer les sédiments. La fixation des sédiments évite l'érosion et donc la diminution du niveau piézométrique et maintient la capacité aquifère du corps sédimentaire.

La géomorphologie

Le volume du corps sédimentaire contrôle le volume d'eau pouvant s'accumuler dans la flèche. Une étude récente conduite par Robins et collaborateurs (2013) sur une flèche littorale de la côte sud du Pays de Galles (Whiteford Burrows, Royaume-Uni) montre que la morphologie et plus précisément la largeur du corps sédimentaire influence la hauteur de la nappe. Après une tempête (en 1995) qui a fortement érodé la flèche, le niveau piézométrique annuel moyen a diminué (Figure 1.9.a). Les auteurs ont remarqué que lorsque la flèche littorale s'amincit (Figure

1.9.b), le niveau piézométrique s'abaisse alors que lorsqu'elle s'élargit, la hauteur de la nappe augmente.

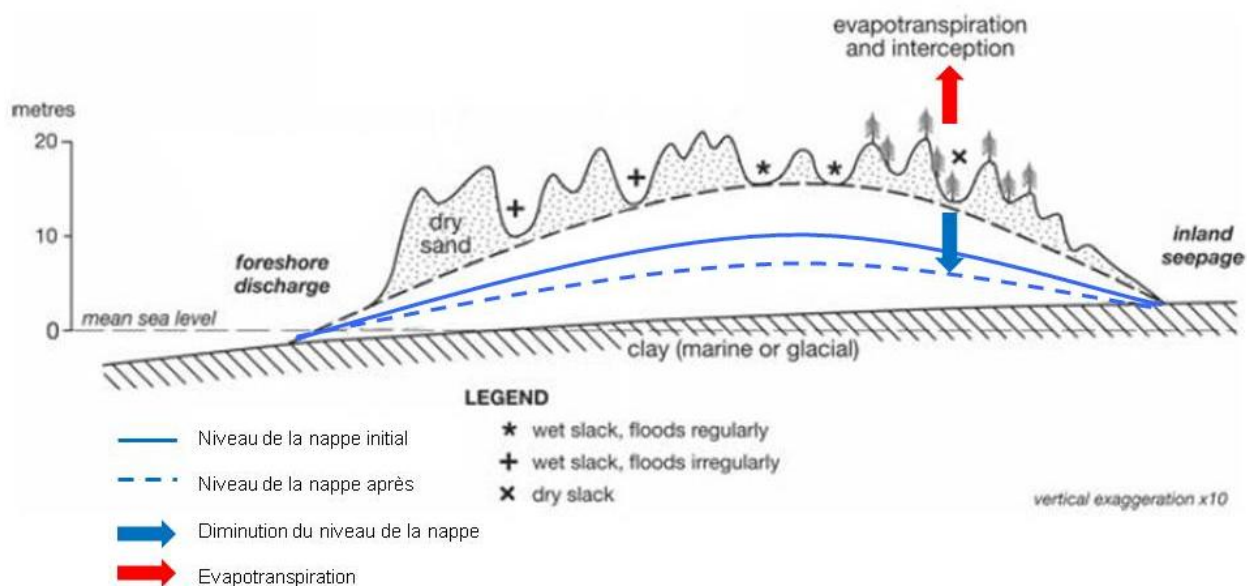


Figure 1.8 : Schéma de l'impact de la végétation sur le niveau d'eau dans une flèche littorale (adapté de Robins *et al.*, 2013)

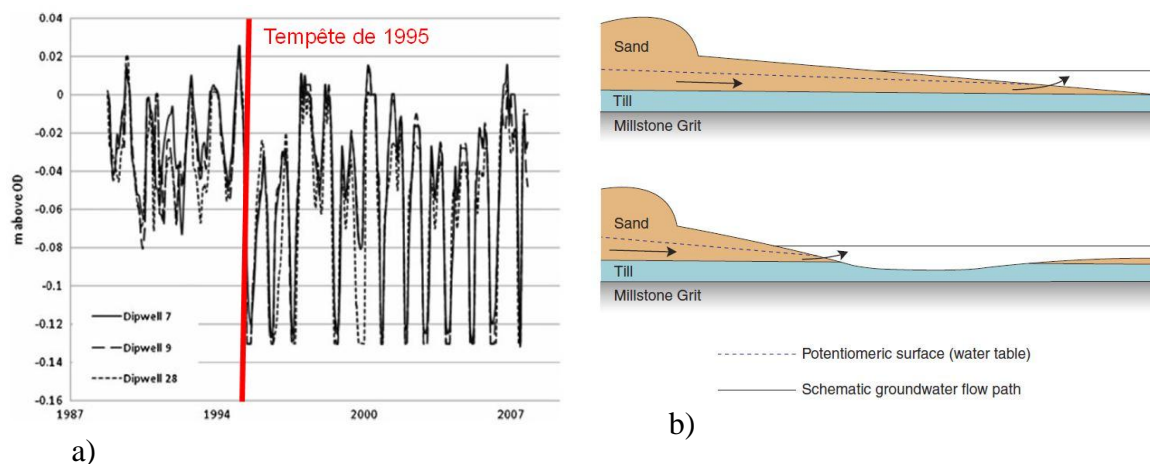


Figure 1.9 : a) Variations saisonnières du niveau de la nappe d'eau entre 1987 et 2007 de la flèche littorale de Whiteford Burrows (Pays de Galles, Royaume-Uni) ; b) Schéma du changement de profil de la flèche et de l'écoulement avant et après la tempête de 1995 (Robins *et al.*, 2013)

Ces différents facteurs agissent sur le niveau piézométrique en modifiant le volume d'accueil et/ou la recharge. La figure 1.10 résume la connectivité de ces différents facteurs qui viennent d'être expliqués. Les variations du niveau de nappe contrôlent l'écologie et la biodiversité des flèches (Jones *et al.*, 2006 ; Robin *et al.*, 2013 ; Stratford *et al.*, 2013). Dans ce cas, on ne parle plus seulement d'hydrogéologie, mais d'écohydrogéologie. Si le niveau piézométrique s'abaisse régulièrement, le sédiment de surface va s'assécher et ainsi modifier l'habitat qu'il supporte (Stratford *et al.*, 2013). Cet habitat comprend aussi des espèces rares et uniques aux zones humides côtières comme les basophytes (e.i. plantes qui préfèrent les sols alcalins) qui se retrouvent en danger si des changements surviennent (Grootjans *et al.*, 1991, 1996 et 1998). L'interconnexion entre chacun de ces facteurs rend donc ces systèmes très vulnérables aux impacts des changements climatiques et des activités humaines (Grootjans *et al.*, 1996, 1998 ; Carretero *et al.*, 2014).

La dynamique hydrogéologique des flèches littorales, et des systèmes granulaires côtiers en général, est sensible aux changements, même les plus minimes. La figure 1.11 montre l'effet d'une hausse de niveau marin sur les aquifères côtiers (de type insulaire) avec en a) l'état initial d'un aquifère côtier et en b) ce même aquifère ayant subi les effets de changements climatiques. Ainsi, entre ces 2 périodes, on remarque que la côte a été érodée entraînant une réduction de la lentille d'eau douce autant verticalement qu'horizontalement et un changement voir une disparition de la végétation. L'interconnexion entre chacun de ces facteurs rend donc ces espaces très vulnérables aux impacts des changements climatiques et à ceux des activités humaines (Grootjans *et al.*, 1996, 1998 ; Carretero *et al.*, 2014).

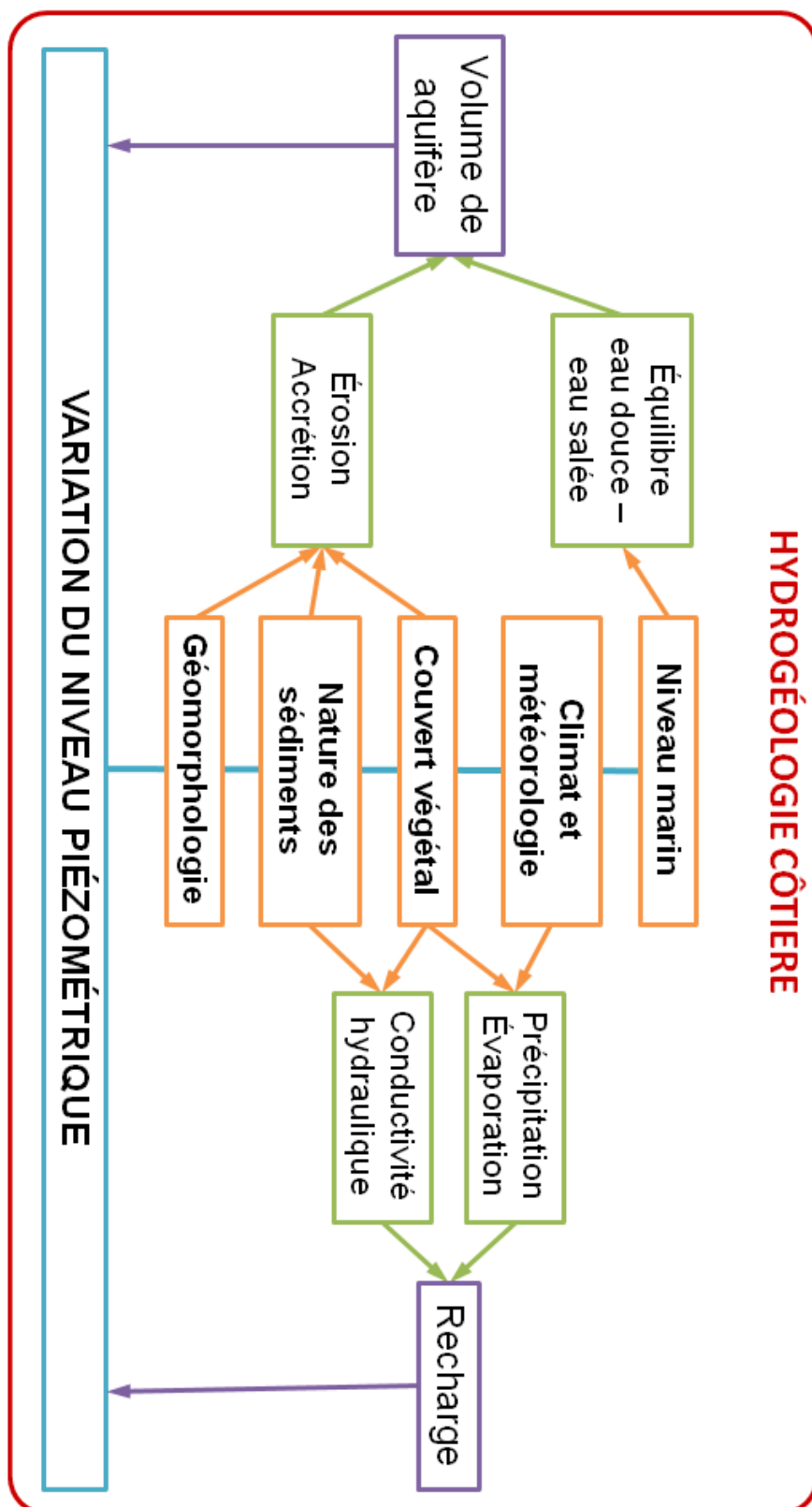


Figure 1.10 : Schéma récapitulatif des interactions en hydrogéologie côtière

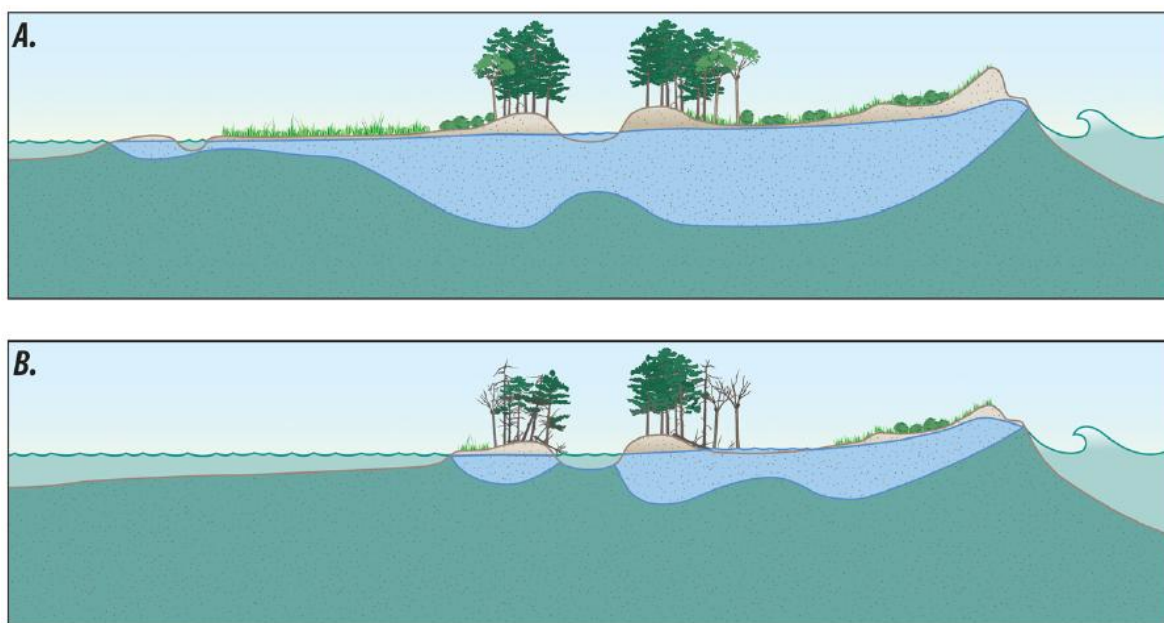


Figure 1.11 : Schéma récapitulatif des effets des changements climatiques sur les aquifères côtiers avec en a) la situation initiale de l'aquifère et en b) ce même aquifère ayant subi les effets des changements climatiques (Masterson *et al.*, 2013)

1.4.2 Vulnérabilité des aquifères côtiers : intrusion saline et recharge

L'intrusion saline est le déplacement du biseau salé dans l'aquifère (cf. Figure 5, p. 8). Seulement 3 à 4 % d'eau de mer suffit à rendre une eau douce impure à la consommation (Custodio, 2005). Par exemple au Québec, le MELCC plafonne le chlorure à 250 mg/l et le sodium à 200 mg/l (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015). Dans le monde, plusieurs cas d'intrusion saline sont répertoriés et placés sous surveillance. Au Canada, il n'existe pas de cas majeur d'intrusion saline, mais des cas ponctuels ont été observés sur l'Île-du-Prince-Edouard et aux Îles-de-la-Madeleine (Chaillou *et al.*, 2012). Cette intrusion a deux origines : l'une est liée aux changements climatiques, à la hausse du niveau marin et de processus de submersion alors que l'autre dépend des activités anthropiques tels que l'urbanisation, le tourisme ou l'agriculture qui accentuent le pompage (Oude Essink *et al.*, 2010 ; Ferguso et Gleeson, 2012 ; Carretero *et al.*, 2014). Les changements climatiques et l'élévation du niveau marin montent le biseau salé et le poussent à l'intérieur du corps sédimentaire. L'excès de pompage ou la surexploitation provoque une

remontée verticale du biseau salé en dessous des puits et un cône de rabattement (ou de dépression) autour du puits à la surface de la nappe (Ferguso et Gleeson, 2012 ; Figure 1.12). Il a d'ailleurs été suggéré que plus que l'élévation du niveau marin ou un changement dans la recharge, c'est l'impact des extractions des eaux souterraines qui provoquent le plus les intrusions salines (Oude Essink *et al.*, 2010 ; Ferguso et Gleeson, 2012 ; Loaiciga *et al.*, 2012). Il faut donc ajuster très précisément le débit de pompage pour limiter ces rabattements et empêcher la contamination des eaux douces.

Les eaux souterraines côtières sont vulnérables aux changements climatiques. Ces changements peuvent modifier la recharge et la capacité de réserve des corps sédimentaires. Les variations climatiques modifient le cycle hydrologique que ce soit au niveau des précipitations qui prennent en compte le type (pluie ou neige), la fréquence, les saisons ou la répartition géographique ou au niveau du taux d'évapotranspiration très dépendant des variations de température (Grootjans *et al.*, 1996 ; Robins et Jones, 2013 ; Rhymes *et al.*, 2014). Les différents scénarii prévoient une augmentation des températures qui chambouleraient ce cycle hydrologique et donc l'équilibre précipitation – évapotranspiration, ce qui affecterait la recharge de l'aquifère et en diminuerait son niveau (Grootjans *et al.* 1996 ; Robins et Jones, 2013 ; Rhymes *et al.*, 2014). Les scénarii prévoient aussi l'élévation du niveau marin ainsi que la récurrence des tempêtes qui provoqueraient une augmentation des submersions et de l'érosion des berges réduisant ainsi l'espace accessible à l'eau douce.

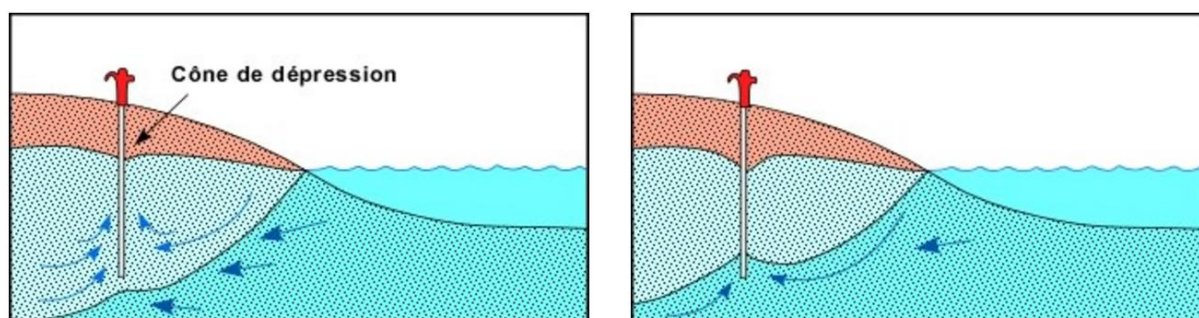


Figure 1.12 : Effet du pompage dans un aquifère côtier (Bourque et Dansereau, 2010)

CHAPITRE 2

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans un premier temps, le site d'étude utilisé pour cette recherche sera présenté en détail. Dans un deuxième temps, la méthodologie et les outils utilisés pour l'étude seront expliqués en fonction de chacun des sous-objectifs fixés, soit d'abord les dynamiques géomorphologiques puis les dynamiques hydrogéologiques.

2.1 TERRAIN D'ÉTUDE

Les flèches littorales du marais de Cap Marteau se situent sur la municipalité de Notre-Dame-des-Neiges, près de Trois-Pistoles, dans la Municipalité Régionale de Comté (MRC) des Basques et la région administrative du Bas-Saint-Laurent (69°8' N et 48°9' O) (Figure 2.1). Bordant la rive Sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, il se trouve dans ce que le PACES appelle la Plaine Côtière (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015). La Plaine Côtière se définit comme étant « le littoral actuel (terrasse de Rimouski) et les territoires qui ont été envahis par la Mer de Goldthwait ($\approx 15\ 000$ ans) ». Elle possède un faible relief constitué de sédiments meubles déposés sur la succession des terrasses marines qui la composent et laisse émerger quelques crêtes appalachiennes de faible dénivelé.

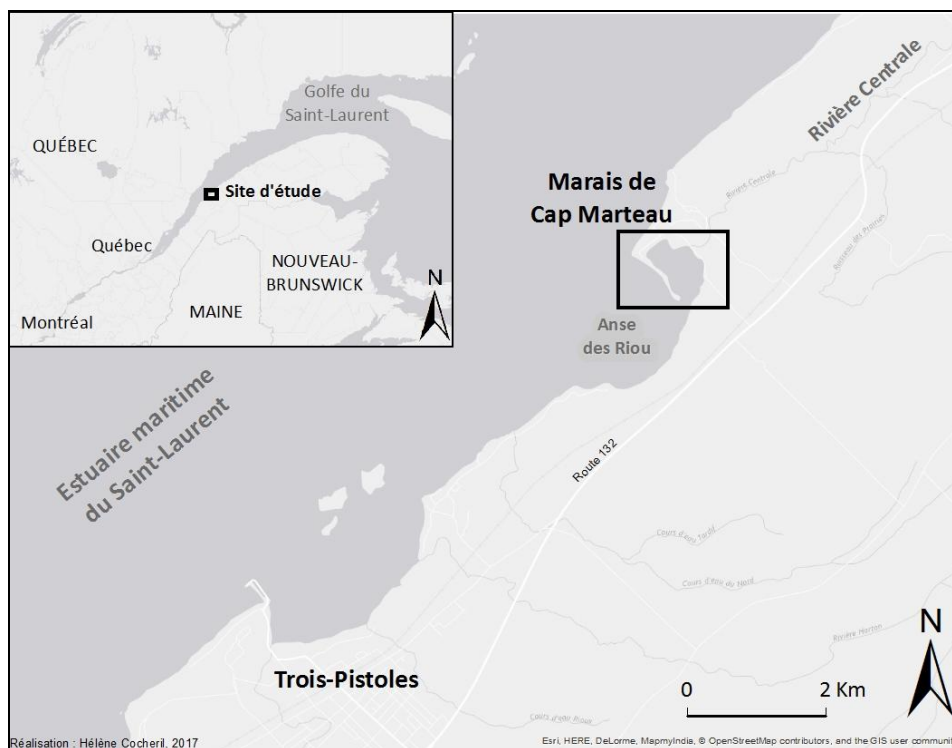


Figure 2.1 : Carte de localisation du marais de Cap Marteau.

Le marais est surplombé par une falaise morte dont le sommet culmine à 30 m d'altitude (Figure 2.2). Cette falaise correspond à la terrasse marine du Bic. Elle est constituée d'argiles glaciomarine mises en place lors de la dernière déglaciation débutée vers 15 000 BP (Bélanger *et al.*, 2007). Au sommet de la falaise s'étendent des parcelles agricoles dédiées aux cultures céréalières ainsi que la route 132 qui longe la rive Sud du fleuve.

En contrebas de la falaise, le marais de Cap Marteau est entouré par des terres agricoles cultivées à l'Est et au Nord-Est (Figure 2.2). Au Nord-Ouest, il est délimité par des crêtes rocheuses appalachiennes, parallèles au fleuve, qui le protègent des vents dominants d'Ouest. Ces crêtes sont le support d'habitations, principalement secondaires. La partie de ces crêtes donnant sur le fleuve est enrochée pour protéger les habitations et le camping municipal de Trois-Pistoles (Joubert *et al.*, 2014). Au Sud-Ouest, le marais fait face à l'Anse des Riou qui forme un vaste estran à bloc, quasiment plane, dénudée à chaque marée basse. L'anse s'étend de la pointe des Riou au Nord jusqu'à la grève Fatima au Sud-Ouest. L'estran et le marais ont été identifiés, par la MRC des Basques, comme étant un territoire d'intérêt écologique au schéma d'aménagement (Joubert *et al.*, 2014).

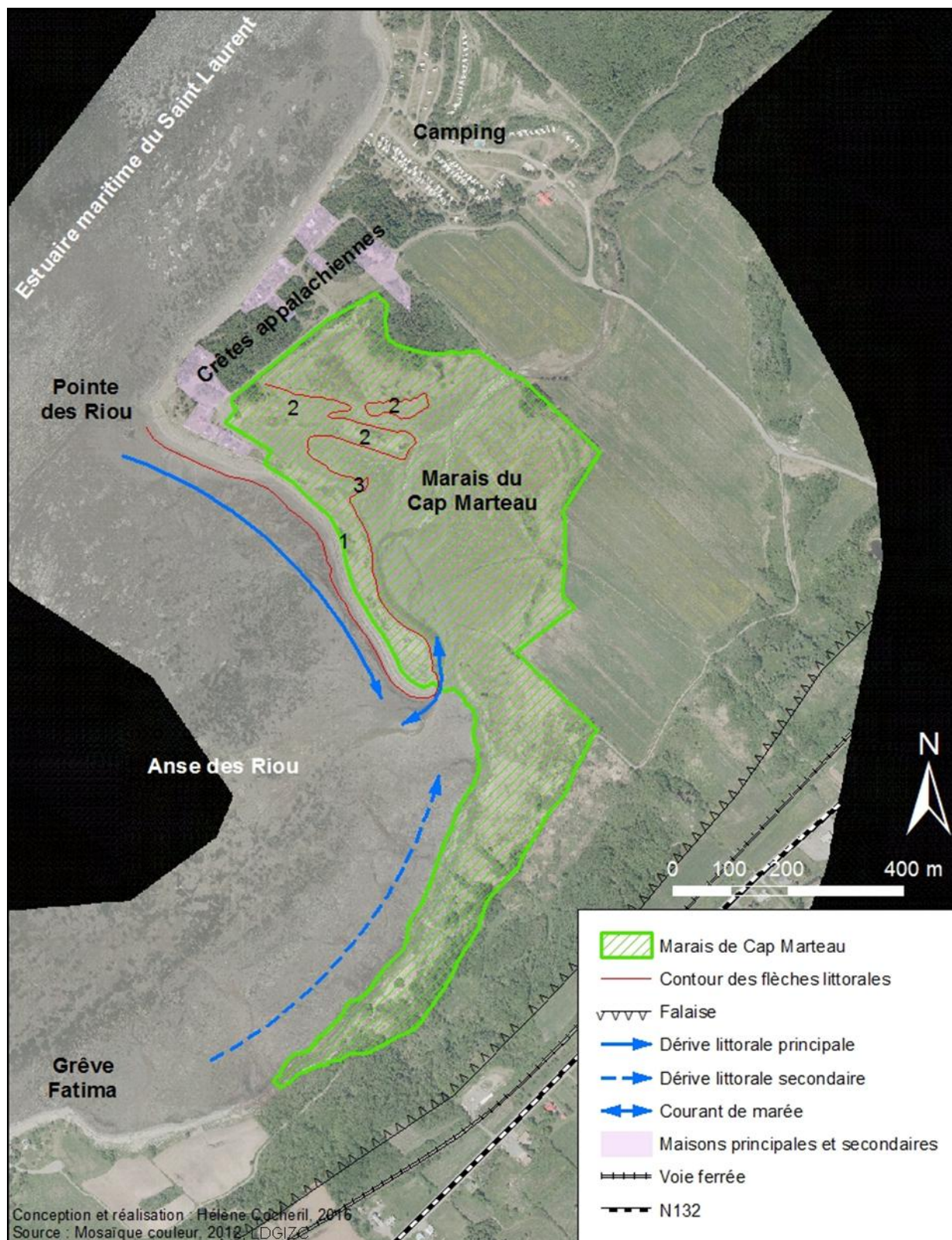


Figure 2.2 : Localisation de l'aire d'étude du Cap Marteau : topographie, courants de marée et aménagements. 1) la flèche active ; 2) les paléoflèches et 3) le crochet terminal

Le marais de Cap Marteau est une propriété privée d'une superficie de 33,7 ha qui s'étend de la grève Fatima à la Pointe des Riou (Figure 2.2). Il est compris entre 1,2 m et 5,6 m d'altitude avec une hauteur moyenne de 3,7 m (Quintin *et al.*, 2006). Situées dans la partie maritime de l'estuaire du Saint-Laurent, les marées y sont de type semi-diurne et le marnage moyen est compris entre 3 et 4 m. Localisé dans la zone de balancement des marées, il constitue ce qu'on appelle un marais maritime ou marais salé. L'une de ses spécificités est qu'il est l'un des seuls marais du Bas-Saint-Laurent à être abrité par une flèche littorale.

Le marais compte trois flèches littorales : l'une est active et les deux autres sont des paléoflèches ou des flèches dites « mortes » (Figure 2.2). Celle qui abrite le marais, perpendiculairement au Saint-Laurent, est la flèche active de type poulrier. Longue d'environ 700 m, sa hauteur moyenne est de 2,50 m d'altitude. Elle prend sa racine sur des affleurements appalachiens de la Pointe des Riou pour suivre ensuite une orientation Nord-Ouest – Sud-Est. Sa partie frontale constitue la plage de Cap Marteau et sa racine est occupée par trois chalets et une habitation permanente. Cette flèche active est la plus visible que ce soit par photographie aérienne ou sur le terrain. En arrière de celle-ci, visible à hauteur d'homme par une végétation spécifique, sont présentes deux paléoflèches parallèles l'une à l'autre. La plus en retrait dans le marais est longue d'environ 330 m avec une altitude moyenne de 2,30 m. Elle est coupée en deux par un chenal de marée. Elle est aussi la moins bien repérable des trois du fait de sa faible élévation et du flou de sa délimitation dans sa partie libre. L'autre paléoflèche se trouve entre les deux flèches et mesure approximativement 320 m. Des trois flèches, elle est la plus haute et fait en moyenne 3 m d'altitude. Probablement apparues successivement, ces trois flèches ont permis le développement d'une sédimentation et concourent à la formation du marais.

Le marais repose sur les argiles glaciomarines mises en place par la Mer de Goldthwait lors de la dernière déglaciation (voir la section 1.1 p. 12). Les flèches, quant à elles, sont constituées de sédiments sablo-graveleux homogènes.

Le marais est traversé du Nord-Ouest au Sud-Est par la rivière Centrale (Figure 2.2). Cette rivière longue de 16 km suit un cours sinueux le long de la crête appalachienne avant de se jeter dans le Saint-Laurent *via* l'Anse des Riou. Son bassin versant couvre 44 km² et compte 7 affluents. Une étude effectuée par le Comité ZIP BSL (Joubert *et al.*, 2014) révèle la mauvaise qualité de son eau ainsi que des eaux de ses bandes riveraines constituées en grande partie par des

forêts (52 %) et des terres agricoles (44 %). Cette même étude a permis de dénombrer pas moins de 215 espèces de plantes vasculaires différentes constituant 10 communautés sur l'ensemble du marais. Cette biodiversité est due à la présence d'eau douce dans le marais qui se mélange à l'eau salée ainsi qu'à sa géodiversité.

La crête appalachienne protège le Cap Marteau des vagues et des tempêtes. Seules, l'Anse des Riou et la partie du marais qui la longe font face directement à l'action des vagues (Joubert *et al.*, 2014). Cette partie du marais subit de ce fait une érosion importante (Joubert *et al.*, 2014). Malgré tout, le marais ne reste pas moins influencé par une dynamique côtière bien présente. Ainsi, il est régi par trois dérives littorales dont une est principale et deux sont secondaires et un courant de marée (Joubert *et al.*, 2014) (Figure 2.2). La dérive littorale principale se déplace de la pointe des Riou à l'extrémité libre de la flèche qui abrite le marais. C'est elle qui alimente la flèche active en sédiment et provoque son allongement. La première dérive littorale secondaire part de la grève Fatima en direction du Cap Marteau alors que la deuxième commence à la Pointe des Riou pour longer la crête appalachienne jusqu'au camping. Le courant de marée est causé par le déplacement des masses d'eau au cours du cycle de marée. Au Cap Marteau, le courant de marée se situe au bout de la flèche littorale active à l'endroit où la rivière Centrale se jette dans l'Anse des Riou. C'est cette libre circulation des eaux de la rivière Centrale vers le Saint-Laurent qui explique la présence des sédiments fins fluviaux dans le marais et l'Anse des Riou (Joubert *et al.*, 2014).

Les flèches du marais de Cap-Marteau ont été prises comme modèle pour cette étude pour leurs spécificités géographiques, géomorphologique, biologique et hydrologique. Elles peuvent être vues comme un micro-modèle du fonctionnement hydrogéologique de corps sédimentaires meubles côtiers en milieu tempéré froid où les saisons sont très contrastées (Figures 2.3 et 2.4).



Figure 2.3 : Photographies de l'intérieur du marais de Cap-Marteau en été (haut) et en hiver (bas)



Figure 2.4 : Photographies de la plage de Cap-Marteau depuis la pointe de la flèche active en été (droite) et en hiver (gauche)

2.2 DYNAMIQUE GÉOMORPHOLOGIQUE

La compréhension des dynamiques géomorphologiques des flèches littorales du site d'étude se réalise en deux temps : d'abord par l'analyse sédimentaire sur des échantillons de surface prélevés de façon aléatoire et de carottes sédimentaires puis par un travail de cartographie et d'analyse de photographies aériennes.

2.2.1 Échantillonnage des sédiments de surface et analyse granulométrique

Granulométrie

La granulométrie permet de connaître la nature des sédiments, et ainsi la perméabilité de celui-ci. En tout, 25 échantillons ont été récoltés à la surface des flèches de manière aléatoire (Figures 2.5, points blancs). Ils ont été collectés à l'aide d'une tarière manuelle sur les 10-15 premiers centimètres et conservés à température ambiante. Les échantillons sont séchés au four à 100 C°, homogénéisés, puis, quand les sédiments sont colmatés entre eux, ils sont broyés avec un mortier en caoutchouc. Les sédiments grossiers (graviers, cailloux) sont enlevés à l'aide d'un tamis de 2 mm (Tamis N°22). Pour chaque échantillon, environ 30 gr de sédiment est gardé pour l'analyse. Les 30 gr sont obtenus à l'aide d'un séparateur à sédiment (Figure 2.6.a) qui permet de garder l'uniformité de l'échantillon de base. Chaque échantillon est pesé puis déposé dans la colonne de tamis avant d'être secoué par un agitateur (Figure 2.6.b) pendant 20 minutes à une amplitude comprise entre 1 et 2. La colonne compte 10 tamis et une assiette pour récupérer les particules très fines (Tableau 2.1). Une fois bien secoué, chaque tamis est repesé et le poids final est obtenu en faisant la différence entre les tamis avant et après tamisage. Les résultats sont ensuite analysés par le logiciel GRADISTAT Version 8.0 sur Excel (Blott et Pye, 2001). Le classement des sédiments suit l'échelle de taille présentée dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Tailles des tamis utilisés dans la colonne pour faire la granulométrie

| N° de tamis | Taille du tamis |
|-------------|-------------------|
| 14 | 1,4 mm |
| 18 | 1 mm |
| 25 | 710 μm |
| 35 | 500 μm |
| 45 | 355 μm |
| 60 | 250 μm |
| 80 | 180 μm |
| 120 | 125 μm |
| 170 | 90 μm |
| 230 | 63 μm |

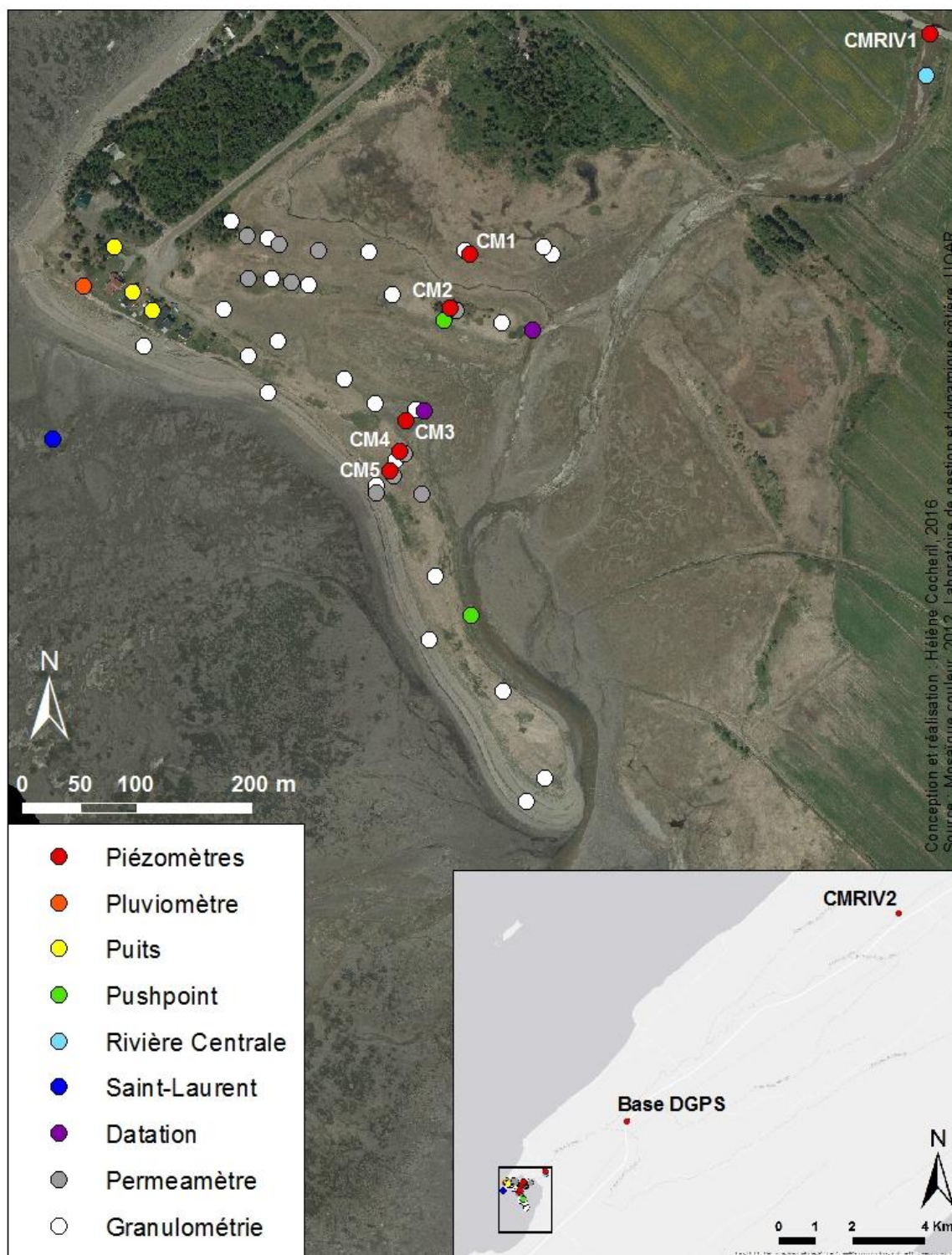


Figure 2.5 : Carte des positions des différents préleveurs et échantillons (eau, sédiment de surface et carotte sédimentaires) effectués sur le marais de Cap Marteau. CM représente les capteurs de pression installés dans les flèches littorales et CMRIV ceux mis en place dans la rivière Centrale

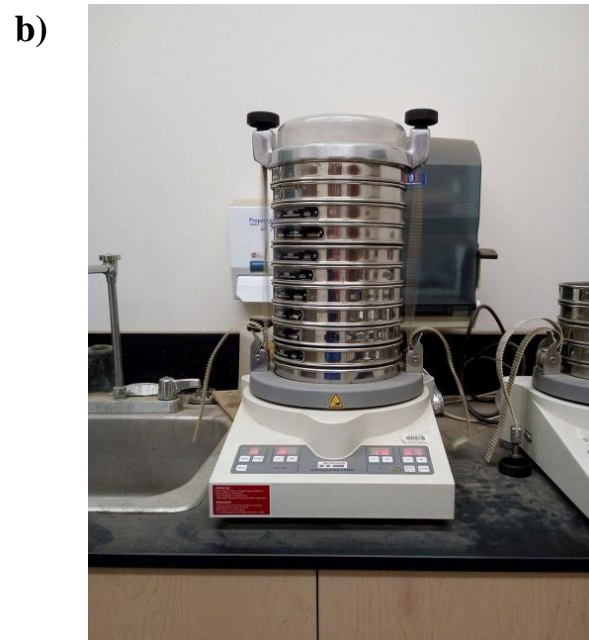


Figure 2.6 : a) Séparateur de sédiments et b) agitateur de tamis

Tableau 2.2 : Échelle de taille adoptée par le programme GRADISTAT (Source : Blott et Pye , 2001, modifiée selon Udden (1914) et Wentworth (1922))

| Taille du grain | | Description | |
|-----------------|---------|---------------|---------|
| phi | mm | | |
| -10 | 1024 mm | Très large | Roche |
| | | Large | |
| | | Moyen | |
| | | Petit | |
| | | Très petit | |
| -6 | 64 | Très grossier | Gravier |
| | | Grossier | |
| | | Moyen | |
| | | Fin | |
| | | Très fin | |
| 0 | 1 | Très grossier | Sable |
| | | Grossier | |
| | | Moyen | |
| | | Fin | |
| | | Très fin | |
| 4 | 63 | Très grossier | Vase |
| | | Grossier | |
| | | Moyen | |
| | | Fin | |
| | | Très fin | |
| 9 | 2 | Argile | |

2.2.2 Carottes sédimentaires et analyse stratigraphique

Des carottes de sédiments ont été prélevées pendant l'automne 2015 dans le but d'obtenir une description stratigraphique du corps sédimentaire. Pour cela, deux carottes sédimentaires ont été prélevées (Figure 2.5, points violet) : l'une sur l'extrémité libre de la paléoflèche centrale et l'autre sur le crochet terminal de la flèche active. Ces carottes ont été collectées à l'aide de tubes en PVC de 4 pouces de diamètre munis d'un « *core catcher* » à l'une des extrémités pour maintenir les sédiments au moment de l'extraction. Les tubes sont enfoncés dans le sol à l'aide d'une masse. Les carottes sont ensuite conservées au frais avant d'être scannées sur le *Multi Sensor Core Logger MSCL-XCT 2.0 X-Ray Imaging* (entreprise *GEOTEK*) du laboratoire de géologie marine de l'ISMER (Institut des Sciences de la Mer de Rimouski). Il fournit un scan en niveau gris pour chaque carotte sédimentaire. Ces images sont ensuite retravaillées sur le logiciel *Adobe Illustrator* pour bien faire apparaître les différentes unités sédimentaires. Une fois scannées, les carottes sont coupées en deux par deux scies circulaires. Chaque section est décrite visuellement en laboratoire.

2.2.3 Cartographie et évolution historique

Pour retracer l'évolution historique du marais et plus particulièrement celle des flèches, nous utilisons la méthode par photo-interprétation. Largement rependue en géographie, cette méthode a vu le jour en 1858 grâce au Français Gaston-Félix Tournachon. Utilisée dès le début du XXe siècle par la communauté scientifique, surtout les archéologues, les géomorphologues et les géologues, elle a connu son essor avec l'utilisation militaire. Le but de la photo-interprétation est la lecture interprétative de photographies aériennes et plus récemment d'images satellitales. Bien qu'elle comporte une marge d'erreur liée à la qualité des photographies et à la manipulation, elle permet de rendre compte de manière rapide de l'évolution d'un espace sur une période donnée.

Cinq photographies aériennes monochromes ou infrarouges provenant du Ministère des Énergies et Ressources Naturelles ont été consultées : 1924, 1963, 1985, 1990 et 2001. La mosaïque couleur de 2012 provient également du gouvernement du Québec. La mosaïque de couleur de 2013 a été produite par le laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale

(UQAR) durant l'été de cette même année, à l'aide d'un drone, un petit quadricoptère téléguidé, équipé d'une caméra haute définition. La période étudiée s'étend donc sur 89 ans, de 1924 à 2013.

Avec le logiciel de SIG (Système d'Information Géographique) *ArcGIS 10.1*, chaque photographie est géoréférencée en MTM 7 à partir de la photographie aérienne de 2001. Pour tracer l'évolution historique, la limite choisie est la flexure de plage puisque c'est l'ensemble du corps sédimentaire qui nous intéresse dans ce mémoire. Pour être plus précis, il s'agit de la limite entre les sables qui composent les flèches et les vases qui constituent le schorre.

L'estimation de la marge d'erreur des taux de déplacement inclut l'erreur de géoréférencement entre une année et celle de référence (2001), la distorsion des photographies, la taille des pixels, l'inexactitude de l'emplacement des points de contrôle. Pour la calculer, on fait la moyenne de quatre à cinq points utilisés entre la photographie et l'année de référence. Pour l'étude, les marges d'erreur sont les suivantes (Tableau 2.3)

Tableau 2.3 : Marge d'erreur des cartographies en fonction de l'année de référence (2001)

| Intervalles | Erreur de géoréférencement (en m) |
|--------------------|--|
| 1924 – 2001 | 2 |
| 1963 – 2001 | 4,5 |
| 1985 – 2001 | 4,87 |
| 1990 – 2001 | 5,86 |
| 2001 – 2012 | 0,71 |
| 2001 – 2013 | 1,93 |

Pour avoir les taux de migration entre les différentes années, l'outil statistique DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) sur ArcGIS est employé. Le principe est de tracer plusieurs transects, ici à 5 m d'intervalle, tout le long des flèches littorales et englobant l'ensemble des tracés de l'évolution par rapport à une ligne de base (Figure 2.7). La ligne de base est tracée

librement à la main mais doit toujours se retrouver derrière l'ensemble des traits de côte. Le logiciel calcule ensuite trois types de distance :

- EPR (*End Point Rate*) : Calcule la distance (m/an) entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent
- NSM (*Net Shoreline Movement*) : Calcule la distance (m) entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent
- SCE (*Shoreline Change Envelope*) : Calcule la distance (m) entre les deux traits de côte les plus éloignés sans rapport avec la date

L'outil DSAS donne de manière plus exacte l'évolution entre 1924 et 2013.



Figure 2.7 : Cartes des transects au 5 m mis en place par le programme DSAS (ligne rouge) et tracés de l'évolution des flèches (ligne de couleurs) (Réalisation : Hélène Cocheril, 2017)

2.3 DYNAMIQUE HYDROGÉOLOGIQUE

2.3.1 Isotopes stables de l'eau

Pour avoir des renseignements sur l'origine des eaux contenues dans les flèches et afin de comprendre le comportement de la nappe durant un cycle de marée, nous avons analysé les isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$). Pour l'origine de l'eau, les échantillons sont collectés dans différents points du marais (Figure 2.5) : les puits privés (points jaune), la rivière Centrale (point bleu clair), les eaux de mer du Saint-Laurent (point bleu foncé) et les eaux de pluies (point orange) collectées dans un pluviomètre. Pour connaître le comportement de la nappe lors d'un cycle de marée (12 h), les échantillons d'eau sont prélevés à l'aide de *PushPoints Samplers* (Figure 2.5, points vert et 2.8). Les *pushpoints* sont des tiges creuses en aluminium de 50 ou 30 cm de long, crépinées dans le bas. Ils sont enfoncés dans le sol à la main. Une fois par heure pendant 12 h, l'eau est collectée à l'aide d'une seringue attachée au bout du *pushpoint*. L'échantillon est ensuite stocké dans une bouteille HDPE de 30 ml sans filtration et scellé hermétiquement avec du parafilm. Les échantillons sont conservés à température pièce en attendant d'être analysés. Les traitements et les analyses sont faits au laboratoire d'isotopes stables et légers du GÉOTOP de l'UQAM. Ils sont analysés en EA-IRMS (Analyse élémentaire - Spectrométrie de masse à rapport isotopique) et les résultats sont standardisés face à un standard international VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*). L'erreur analytique est estimée pour les deux isotopes à $\pm 0,05\text{‰}$ (à 1σ) pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\pm 1\text{‰}$ (à 1σ) pour $\delta^2\text{H}$.

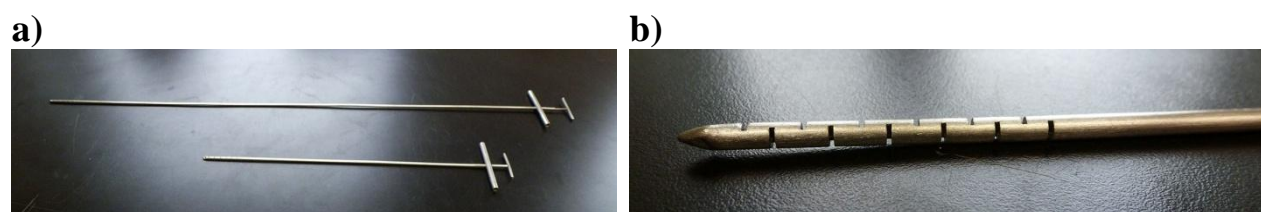


Figure 2.8 : a) *PushPoint Samplers* de 30 et 50 cm ; b) Extrémité crépinée d'un *pushpoint*

2.3.2 Perméamètre de Guelph

Pour déterminer la conductivité hydraulique d'un sol en milieu non saturé des essais de perméabilité ont été faits à l'aide d'un perméamètre de Guelph (Figure 2.9). Le principe est de faire s'écouler de l'eau dans un trou jusqu'à obtenir un débit d'écoulement constant qui est la valeur mesurée. En tout, ce sont 10 essais qui ont été faits aléatoirement au sommet des flèches littorales (Figure 2.5, points gris). Les tests ont été réalisés le 7 et le 8 juin 2015 à marée basse.

Pour ce faire, un trou d'une trentaine de centimètres de profondeur est creusé dans la zone non saturée à l'aide d'une tarière manuelle. Le perméamètre de Guelph est placé au-dessus du trou et son tube est rempli de 2 à 3 L d'eau. La valve est ensuite enlevée pour permettre à l'eau de s'écouler. Les mesures sont prises aux 10 secondes. Pour chaque trou, l'opération est faite deux fois : la première avec un embout d'entrée d'air à 5 cm et la deuxième à 10 cm. Les données récoltées sont ensuite rentrées dans le programme *Soil Moisture Guelph Permeameter* (Zhang *et al.*, 1998) qui calcule la perméabilité avec la méthode *Simple Head* c'est-à-dire que le calcul est fait un deux temps, d'abord avec la donnée à 5 cm puis avec celle prise à 10 cm.



Figure 2.9 : Photographie du perméamètre de Guelph sur la flèche littorale de Cap Marteau

2.3.3 Suivi piézométrique

Pour comprendre les dynamiques hydrogéologiques des flèches littorales, des piézomètres ont été installés pour prendre les niveaux d'eau dans les flèches et des échantillons d'eau ont été prélevés sur le terrain afin de constituer une base de données pour identifier les différentes sources d'eau présentes sur le site d'étude.

Les suivis des niveaux d'eau dans les flèches ont été effectués pendant 2 années consécutives de l'automne 2014 à l'automne 2016. En tout, c'est plus de 70 000 données qui ont été récoltées pour chacun des piézomètres. Cinq piézomètres ont été installés sur les flèches de manière à former un transect : trois sur la flèche active (CM3, CM4 et CM5) et un par paléoflèche (CM1 et CM2) (Figure 2.5, points rouge). Deux autres piézomètres sont installés dans le lit de la rivière Centrale (point rouge noté CMRIV 1 et 2 dans la Figure 2.5). Ces deux piézomètres permettent de s'assurer du niveau d'eau dans la rivière qui pourrait directement influencer les niveaux dans la nappe. Les deux ont été placés sous des ponts pour s'assurer leur bon maintien le temps de la prise de donnée. Un dernier capteur de pression (CMP) a été installé à l'air libre afin de mesurer la pression atmosphérique dans le but de corriger les données piézométriques. Une description détaillée pour chaque piézomètre se trouve dans le Tableau 2.4.

Les piézomètres fonctionnent comme des puits : un trou est fait dans le sol pour observer le niveau de l'eau (Figure 2.10). Ils sont faits d'un tube plein en PVC de 4 pouces de diamètre enfoncé à la masse dans le sol ou fixé sous un pont dans le cas des piézomètres en rivière. Chaque extrémité enfoncée dans le sol se termine par 30 cm de crépine pour laisser entrer l'eau. La partie extérieure est refermée par un bouchon auquel est accroché à l'aide d'une corde tressée un capteur à pression de type *Hobo U20* (Figure 2.11). Le capteur est programmé pour prendre les données de pression et de température toutes les 15 minutes. Pour éviter la création de condensation à l'intérieur des piézomètres, ceux-ci sont percés d'un trou en haut de la margelle. Dans la plupart des cas, une collerette de bentonite est mise au pied des piézomètres pour ralentir l'infiltration d'eau dans la zone qui a été retournée lors de l'installation.

Afin de déterminer la hauteur réelle des niveaux d'eau, la position et l'altitude de chaque piézomètre sont prises avec un DGPS (*Differential Global Positioning System*) *Trimble R8* pour la base et *R10* pour le mobile. La mesure est prise au sommet du bouchon. Les données de niveau

d'eau enregistrées sont toutes corrigées par les données de pression atmosphérique (CMP) via le logiciel *HoboWare*. Les altitudes sont données en fonction du niveau moyen terrestre.

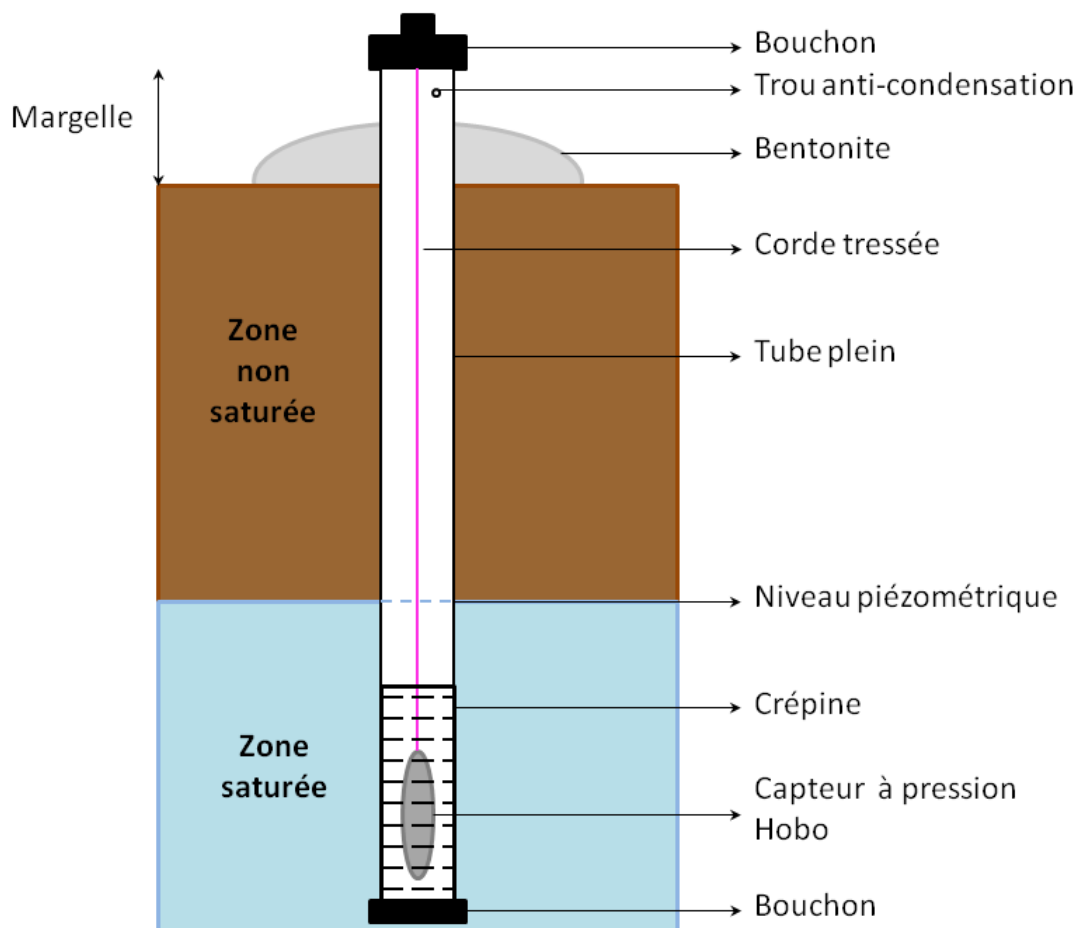


Figure 2.10 : Schéma d'un piézomètre



Figure 2.11 : Capteur à pression de type Hobo U20 (Hoskin scientifique, 2019)

Tableau 2.4 : Description et caractéristiques des piézomètres installés pour l'étude

| Nom du piézomètre | Flèche active | | | | Paléoflèche | | Rivière Centrale | |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | CMP | CM1 | CM2 | CM3 | CM4 | CM5 | CMRIV1 | CMRIV2 |
| Date d'installation | 8/11/2014 | 14/11/2014 | 14/11/2014 | 8/11/2014 | 8/11/2014 | 8/11/2014 | 9/07/2015 | 9/07/2015 |
| Date de retrait | 15/11/2016 | 15/11/2016 | 15/11/2016 | 15/11/2016 | 15/11/2016 | 15/11/2016 | 15/11/2016 | 15/11/2016 |
| Position | N 5336818,705 W 406287,974 | N 5336911,175 W 406470,854 | N 5336864,146 W 406453,448 | N 5336737,121 W 406414,654 | N 5336737,707 W 406409,136 | N 5336721,025 W 406400,056 | N 5337105,379 W 406872,928 | N 5341948,264 W 413232,370 |
| Altitude (m, bouchon) | X | 3,22864 | 3,90232 | 2,42476 | 3,28034 | 2,4388 | 2,53309 | 71,30423 |
| Tubage total (m) | X | 1,9 | 2,24 | 1,48 | 2,11 | 1,81 | X | X |
| Tub. plein | | 1,6 | 1,94 | 1,18 | 1,81 | 1,51 | | |
| Tub. crépiné | | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | | |
| Margelle (m) | X | 0,9 | 0,46 | 0,35 | 0,51 | 0,27 | X | X |
| Dans le sol (m) | X | 1 | 1,78 | 1,13 | 1,6 | 1,54 | X | X |
| Longueur de la corde (m) | X | 1,7 | 2,04 | 1,28 | 1,91 | 1,61 | 1,79 | 1,73 |
| Longueur du capteur à pression (m) | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
| Corde et capteur à pression (m) | X | 1,84 | 2,18 | 1,42 | 2,05 | 1,75 | 1,93 | 1,87 |
| Altitude du capteur (m, 0 terrestre) | X | 1,389 | 1,722 | 1,005 | 1,230 | 0,689 | 0,603 | 69,434 |
| Bentonite | Non | Oui | Oui | Non | Oui | Oui | Non | Non |

Le traitement des données piézométriques comprend plusieurs étapes. Les données sont d'abord téléchargées *via* le logiciel *HoboWare*. Sur ce même logiciel, le capteur de pression atmosphérique (CMP) est utilisé pour corriger les données de pression afin d'obtenir les niveaux piézométriques pour chaque piézomètre. Avec le logiciel *Excel*, les données négatives sont ensuite supprimées, car elles signifient que le capteur de pression n'était pas immergé, les données sont donc invalides. Puis, l'altitude des niveaux piézométriques est corrigée par rapport au 0 terrestre. Pour cela, on calcule l'altitude du *Hobo* en soustrayant la longueur de la corde et celle du *Hobo* à l'altitude prise par DGPS. On ajoute ensuite l'altitude des *Hobo* aux données piézométriques pour avoir le niveau réel de l'eau souterraine pour chaque piézomètre.

2.3.4 Analyses statistiques

Les données des niveaux piézométriques sont traitées et analysées avec les logiciels *Excel* et *Rstudio*. Les données sont d'abord mises sur un fichier *Excel* pour les vérifier et les nettoyer des données incohérentes prises au moment des téléchargements de données ou au cours de la période d'étude. Le logiciel *RStudio* permet de faire les analyses de séries temporelles. Pour avoir un graphique avec les variations annuelles des différents niveaux piézométriques, les bibliothèques *grid* et *graphics* sont utilisées. Pour les corrélations croisées, c'est la bibliothèque *astsa* qui est employée. Les corrélations croisées sont faites pour voir si les niveaux d'eau covarient et s'il existe une onde de propagation à travers les flèches venant de la rivière ou du fleuve. Les analyses par périodogrammes et par ondelettes permettent de visualiser les variations temporelles des composantes de fréquences qui influencent les niveaux d'eau. De plus, les ondelettes indiquent quand ces événements sont influents. Pour les périodogrammes, c'est la bibliothèque *TSA* qui est utilisée et pour les ondelettes, c'est la bibliothèque *dplr*.

2.3.5 Volume d'eau dans les corps sédimentaires

Afin de quantifier le volume d'eau douce potentiellement disponible dans les flèches du marais de Cap Marteau, le logiciel *ArcGIS* a aussi été utilisé pour évaluer les volumes du corps sédimentaire. Pour cela, une imagerie *LiDAR* (télé-détection par laser) de 2011 a été utilisée et servira de base pour chaque année de calcul de volume. Cette imagerie *LiDAR* a été produite et fournie par le Laboratoire de Dynamique et de Gestion Intégrée des Zones Côtières de l'UQAR.

L'objectif est de calculer le volume d'eau potentiel des huit années que nous avons pour donner une idée de l'évolution de la quantité d'eau que peuvent contenir les flèches littorales. Il est à noter que les résultats sont donnés à titre indicatif car la recharge et l'évapotranspiration ne sont pas pris en compte et du fait que les volumes sont calculés à partir du Lidar de 2011 et par rapport à un niveau piézométrique moyen (donc statique) des deux années de suivis. Comme nous manquons de données le but n'est pas de donner un volume réel et exact mais de donner un aperçu de ce que peuvent contenir les flèches littorales de Cap Marteau.

Pour évaluer le volume des corps, on commence par quantifier le volume sédimentaire des flèches. Pour cela, on délimite l'ensemble du corps sédimentaire que l'on extrait pour en faire un masque et extraire les données nécessaires au calcul (Figure 2.12). Cette délimitation se fait de la même manière que pour l'évolution historique. Comme pour cette dernière, c'est la flexure de plage qui est choisie (la limite entre les sables et les argiles). Pour connaître la hauteur moyenne de la ligne de flexure, plusieurs points sont pris le long de la flexure pour en faire une moyenne. Cette moyenne de -0,007 m par rapport au niveau 0 terrestre va servir de base pour le calcul. Ainsi, pour le calcul du volume sédimentaire total, seuls seront pris en compte la hauteur entre cette moyenne (-0,007 m) et le sommet de chaque pixel du *LiDAR*. Ensuite, le volume total est calculé avec l'outil *Surface volume* de *3D Analyst (ArcGIS)*. L'opération est répétée pour calculer le volume sédimentaire réel des flèches c'est-à-dire la portion des flèches qui contient l'aquifère. Ce volume réel est obtenu en utilisant la moyenne sur les deux ans des niveaux piézométriques de l'ensemble des cinq piézomètres installés dans les flèches qui est de 1,512 m (en se basant sur une vision statique). Ainsi, pour obtenir un volume plus réel, l'outil *Surface volume* calcule le volume entre la surface de base (-0,007 m) et 1,512 m. Cette opération est faite pour chacune des cartes disponibles soit pour 1924, 1963, 1985, 1990, 2001, 2011 2012 et 2013 en se basant sur l'imagerie Lidar de 2011 pour donner un aperçu de l'évolution du volume d'eau disponible.

Afin de pouvoir calculer le volume moyen d'eau (VM) des flèches littorales, il faut connaître la porosité totale et la porosité efficace du milieu. La porosité totale est la quantité de vide d'un matériau et la porosité efficace est la quantité d'eau qui circule dans un matériau. Les différences de porosité totale et efficace dépendent du matériau, le tableau 2.5 donne les porosités

pour les milieux granulaires. La porosité utilisée va être fonction des résultats obtenus de l'analyse granulométrique et des tests de perméamètre de Guelph des flèches.

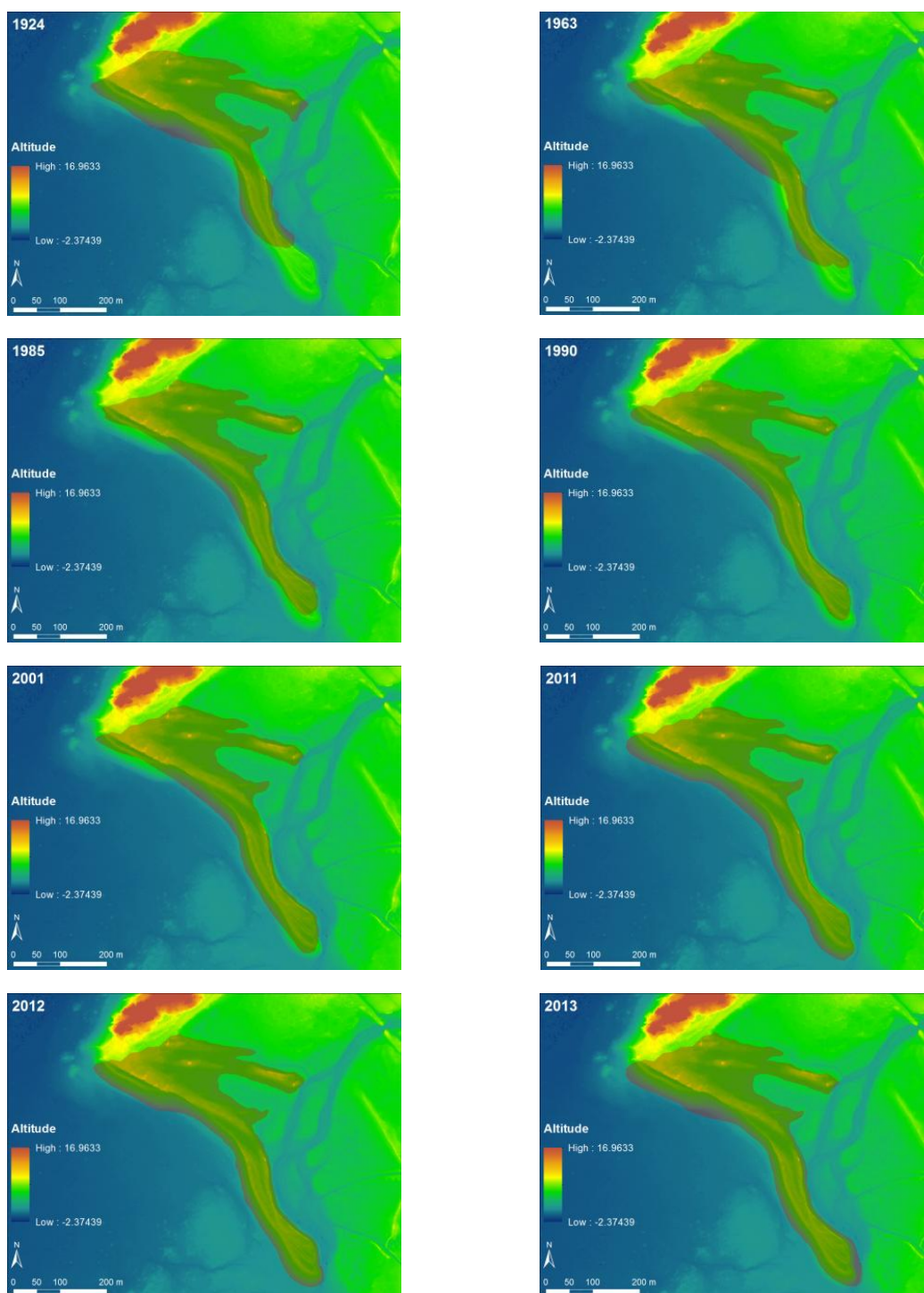


Figure 2.12 : Masques utilisés pour le calcul des volumes pour chacune des années disponibles (1924, 1963, 1985, 1990, 2001, 2011, 2012 et 2013), basé sur l'imagerie Lidar de 2011

Tableau 2.5 : Typologie des porosités et des ordres de valeur des porosités totale et efficace

| Matériau | Porosité totale (%) | Porosité efficace (%) |
|----------------------------|---------------------|-----------------------|
| Sable | 20 à 40 | 10 à 25 |
| Argile | 40 à 50 | 1 à 2 |
| Craie | 10 à 40 | 1 à 5 |
| Calcaires massifs fissurés | 1 à 10 | 1 à 5 |

(Source : BRGM, 2018)

Avec l'ensemble de ces données, il est possible de calculer le volume moyen d'eau des flèches littorales par le calcul ci-dessous. Il est à noter que ce volume d'eau est donné à titre indicatif puisqu'il ne prend pas en compte la recharge ni l'évapotranspiration du milieu.

$$VM = \frac{pe \times V_{sed}}{100} \quad \text{avec } pe = \text{Porosité efficace}$$

$$V_{sed} = \text{Volume sédimentaire}$$

Ensuite, pour se rendre compte de la durée d'exploitation de la nappe en cas d'utilisation par l'homme, le VM est divisé par la consommation d'eau en litre par jour par québécois. En 2009, cette consommation est de 386 L/jours/Québécois (Environnement Canada). Le volume est transformé en nombre de jours de la façon suivante :

$$\frac{VM}{\text{Consommation d'eau (L)/jours/québécois}} = \frac{VM}{386 \text{ L/jours/québécois}}$$

Ainsi pour répondre aux objectifs de ce mémoire, différents outils et méthodes de divers domaines (géographie, géologie, hydrogéologie, chimie) ont été employés. Les sorties terrains ont permis la mise en place des outils de *monitorage* ainsi que la prise d'échantillons d'eau et de sédiment. Ces données ont ensuite été analysées en laboratoire puis travaillées sur différents plateformes tels que GRADISTATS, ArcGIS et R. Les résultats obtenus ainsi que leurs interprétations sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 DYNAMIQUE GÉOMORPHOLOGIE DES FLÈCHES LITTORALES DU MARAIS DE CAP MARTEAU

3.1.1 Caractérisation des sédiments des flèches littorales

Granulométrie des échantillons de surface

L'analyse de la matrice (< 2 mm) des 25 échantillons de sédiments collectés sur les 10-15 premiers cm du sol (figure 2.5, points blancs) montre que les flèches littorales sont constituées de sables grossiers avec un diamètre moyen de $583,3 \mu\text{m}$. Cette moyenne est très proche de la limite entre les sables grossiers (1mm à $500 \mu\text{m}$) et moyens ($500 \mu\text{m}$ à $250 \mu\text{m}$) (Figure 3.1.a). L'ensemble des échantillons est bien représentatif de cette moyenne puisque 52 % des échantillons sont des sables grossiers et 48 % sont des sables moyens (Figure 3.1.b). 23 des 25 échantillons de la matrice comptent plus de 95 % de sables et seulement 2 en contiennent moins de 95 %. Les pourcentages restants correspondent à des argiles ou des limons.

a)

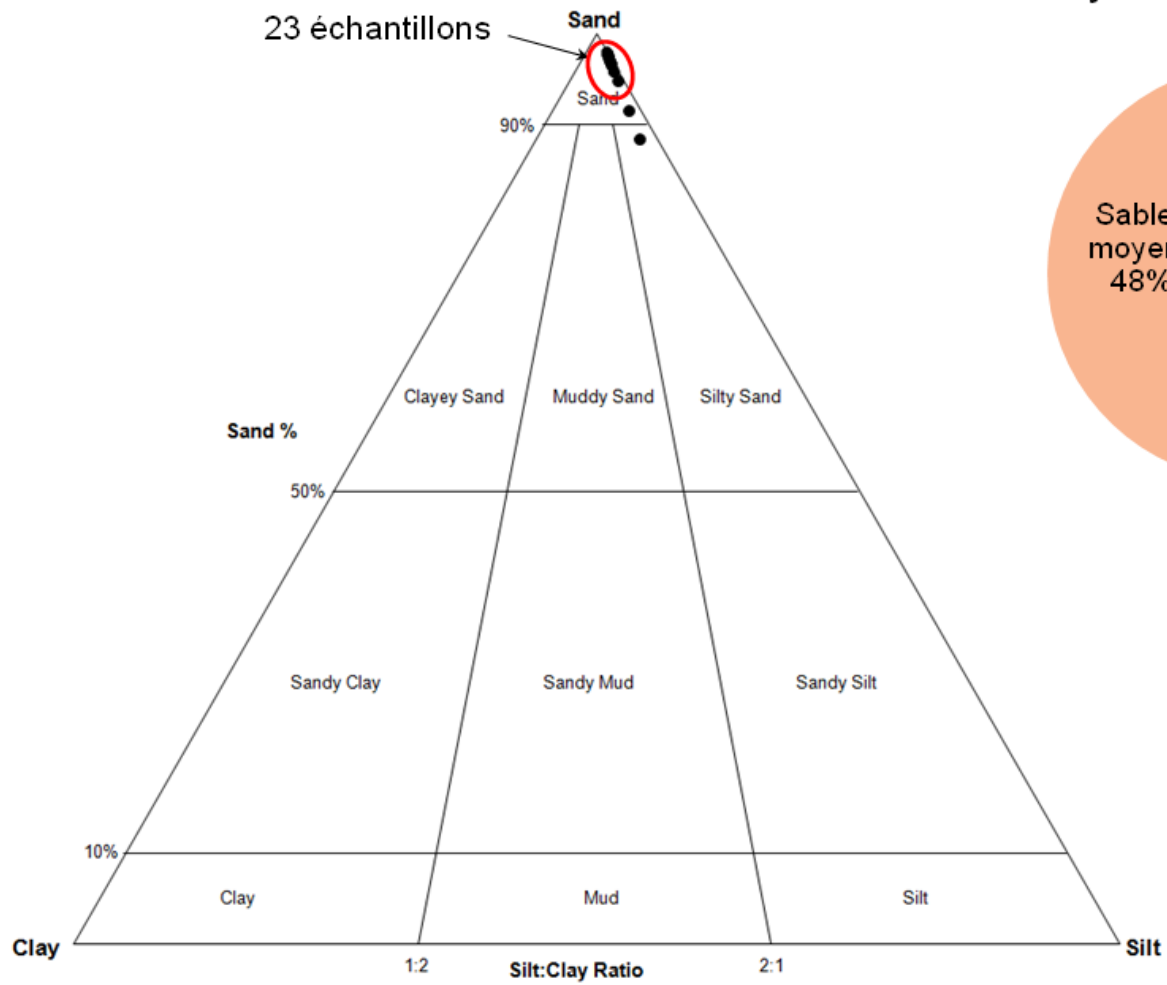
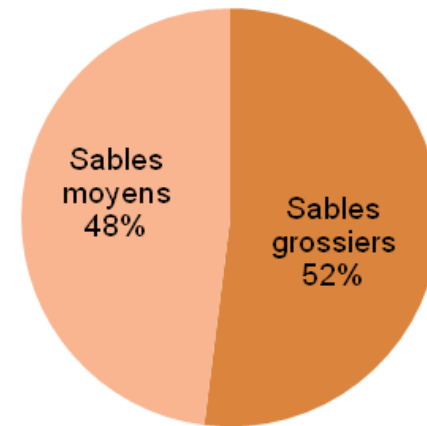
b) **Proportion de sables grossier et moyen sur les 25 échantillons**

Figure 3.1 : a) Diagramme de classe sédimentaire et b) pourcentage des sables grossiers et moyens des 25 échantillons

Carottes sédimentaires

Les deux carottes sédimentaires (Figure 2.5, points violets) montrent des résultats similaires aux échantillons de surface. La carotte n°1 prise sur le crochet terminal de la flèche active (Figure 3.2.a) fait 66 cm de long (Figure 3.2.b). A la base de cette carotte, on retrouve un sable grossier accompagné de petits cailloux (Figures 3.2.c, d et e). Au dessus repose une succession de couches fines alternant du sable moyen et du sable moyen mélangé à de l'argile. Au centre, se présente une épaisse couche (environ 35 cm) de sables grossiers à moyens parsemée de graviers anguleux de toutes tailles. Le haut de la carotte se termine par une couche argilo-limoneuse à laquelle se mélangent des sables moyens. L'imagerie par rayon-X de la carotte n°1 laisse voir différentes unités sédimentaires légèrement obliques (Figure 3.2.d). La couche 1 est homogène alors que le reste de la carotte montre une certaine inclinaison des couches et les petits graviers et cailloux retrouvés dans les différentes couches y sont visibles.

La carotte n°2 prélevée sur l'extrémité libre de la paléoflèche centrale (Figure 3.3.a) mesure aussi 66 cm de long (Figure 3.3.b). À son sommet, des cailloux de surface recouvrent les différentes couches de sables grossiers mélangés à de petits cailloux (couche 2 à 5) (Figure 3.3.c, d et e). Elle est suivie par la couche 6 qui est constituée de sable grossier à fin et se termine par la succession de couches (7 à 15) alternant sable grossier de couleur ferreux et sable grossier non ferreux parfois parsemé de petits cailloux. L'imagerie par rayon-X ne laisse pas voir d'unités sédimentaires mais on peut noter la présence de petits cailloux dans le haut de la carotte sédimentaire (Figure 3.3.d).

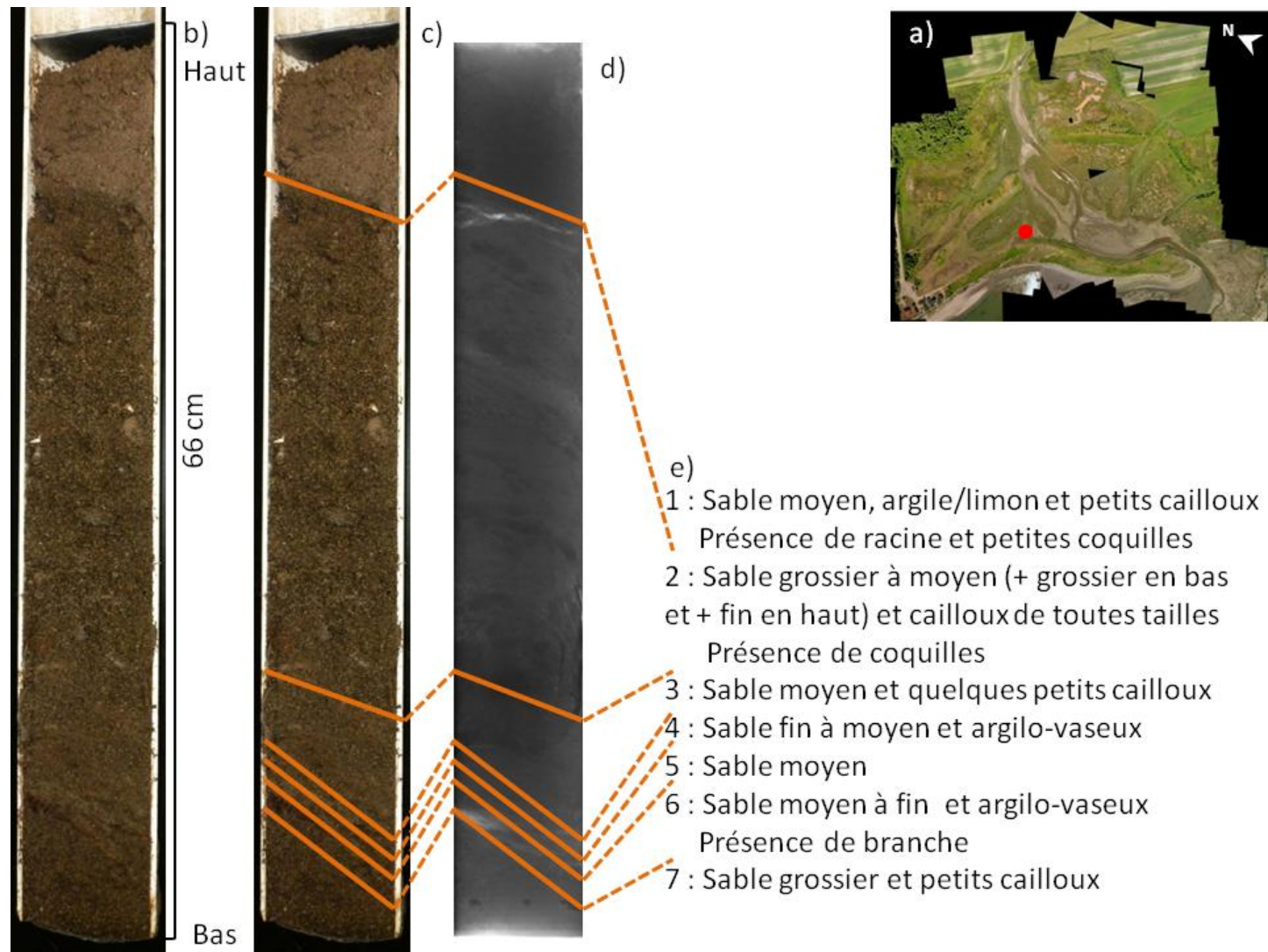


Figure 3.2 : Description de la carotte sédimentaire n°1 prélevée sur le crochet terminal de la flèche active. a) carte de localisation du prélèvement ; b) photographie de la carotte ; c) photographies avec les différentes unités sédimentaires ; d) imagerie par Rayon-X avec les différentes unités sédimentaires ; e) description des unités sédimentaires

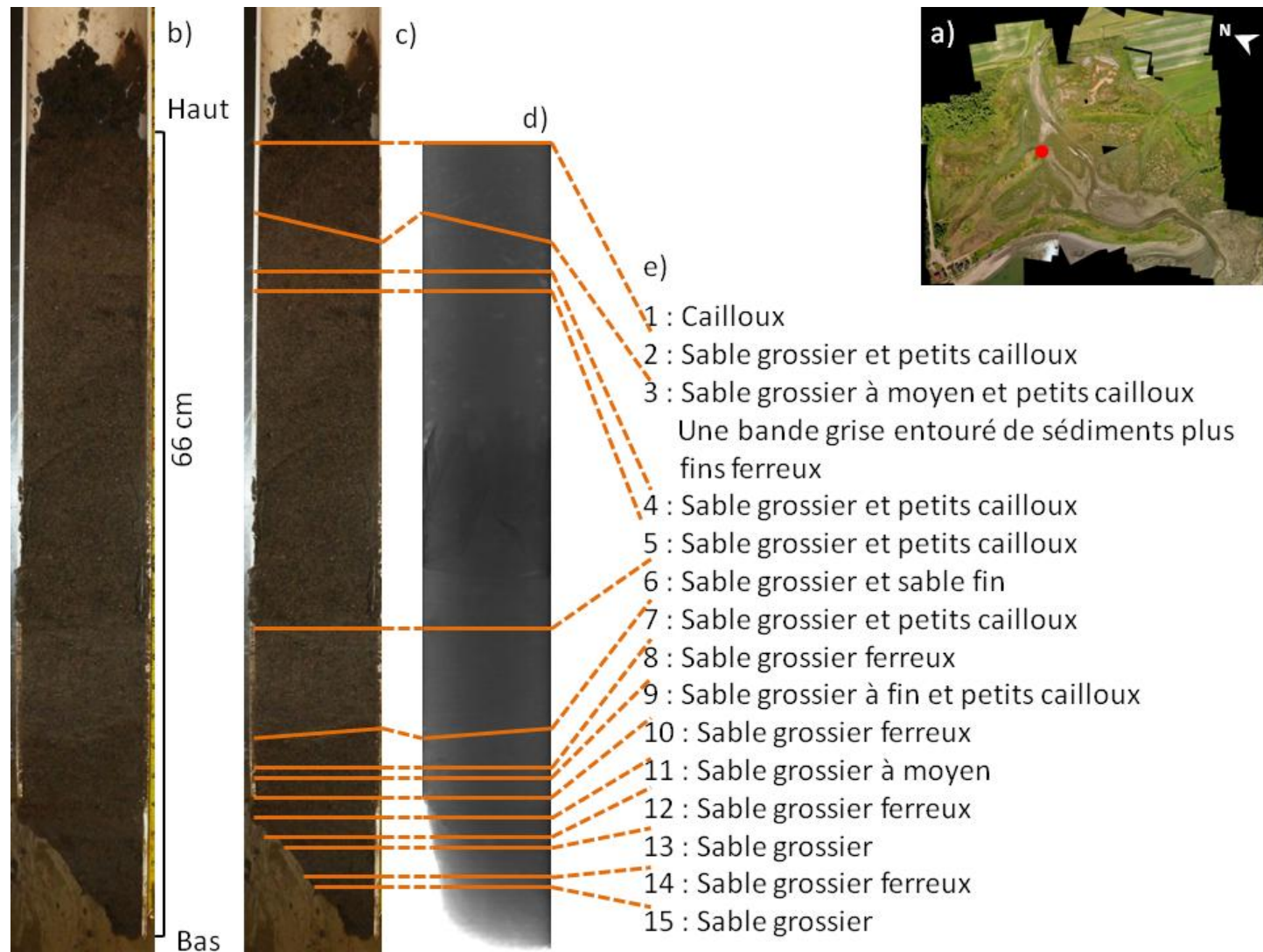


Figure 3.3 : Description de la carotte sédimentaire n°2 prélevées sur la paléoflèche centrale. a) carte de localisation du prélèvement ; b) photographie de la carotte ; c) photographies avec les différentes unités sédimentaires ; d) imagerie par Rayon-X avec les différentes unités sédimentaires ; e) description des unités sédimentaires.

Perméamètre de Guelph

Sur les 10 tests de perméamètre de Guelph effectués sur les flèches (cf. Figure 2.5, points gris), les valeurs de perméabilité sont comprises entre 15 et 69 m/jr avec une moyenne de 31,48 m/jr ce qui correspond à 0,036 cm/s (Tableau 3.1). Basé sur le tableau 2.4 (voir la section 2.3.5 p. 58), cette perméabilité moyenne correspond à une porosité totale de 20 à 40 % soit une porosité efficace de 10 à 25 %.

Tableau 3.1 : Résultats des tests du Perméamètre de Guelph avec la méthode Simple Head donnée en m/s et en m/jr.

| Nom | R1 (5 cm) | R2 (10 cm) | K-Simple Head Method (m/s) | | | K-Simple Head Method (m/jr) | | |
|----------------------|--------------|---------------|-------------------------------|-----------|-----------|--------------------------------|---------|----------------|
| | | | | | | | | |
| CM4 | 210 | 300 | 3,71 E-03 | 2,70 E-03 | 3,20 E-04 | 320,544 | 233,280 | 27,6480 |
| CM5 | 180 | 240 | 3,18 E-03 | 2,16 E-03 | 2,67 E-04 | 274,752 | 186,624 | 23,0688 |
| Haut de plage | 210 | 240 | 3,71 E-03 | 2,16 E-03 | 2,93 E-04 | 320,544 | 186,624 | 25,3152 |
| Flèche active | 210 | 420 | 3,71 E-03 | 3,78 E-03 | 3,74 E-04 | 320,544 | 326,952 | 32,3136 |
| CM11 | 360 | 510 | 6,36 E-03 | 4,59 E-03 | 5,47 E-04 | 549,504 | 396,576 | 47,2608 |
| CM13 | 180 | 300 | 3,18 E-03 | 2,70 E-03 | 2,94 E-04 | 274,752 | 233,280 | 25,4016 |
| CM15 | 90 | 210 | 1,59 E-03 | 1,89 E-03 | 1,74 E-04 | 137,376 | 163,296 | 15,0336 |
| CM3-01 | 210 | 330 | 3,71 E-03 | 2,97 E-03 | 3,34 E-04 | 320,544 | 256,608 | 28,8576 |
| CM3-02 | 150 | 240 | 2,65 E-03 | 2,16 E-03 | 2,40 E-04 | 228,960 | 186,624 | 20,7360 |
| CM3-03 | 60 | 60 | 1,06 E-03 | 5,40 E-03 | 8,00 E-04 | 91,584 | 466,560 | 69,1200 |
| | | | | | | | | 31,4755 |

3.1.2 Évolution historique des flèches littorales entre 1924 et 2013

La carte de l'évolution historique de la ligne de flexure des flèches du marais de Cap Marteau entre 1924 et 2013 montre que la flèche principale est très active, alors que les paléoflèches varient peu (Figure 3.4). En effet, les flèches à l'intérieur du marais semblent stables alors que la pointe libre de la flèche active s'est constamment allongée. La partie frontale de la flèche active connaît des variations alternant érosion et accrétion. Le tableau 3.2 présente les valeurs de EPR (*End Point Rate*, cf. p 49) et NSM (*Net Shoreline Movement*, cf. p 49) selon des tronçons déterminés avec la carte de l'évolution historique (Figure 3.4 et 3.5). Ainsi, les flèches sont divisées en cinq zones, comme présenté à la Figure 3.5 :

- Z1 : correspond à la section devant les terrains privés ;
- Z2 : à la première moitié de la flèche active ;
- Z3 : à la deuxième moitié de la flèche active ;
- Z4 : à la pointe libre de la flèche active. Pour cette section, seul le transect le plus représentatif de la zone a été sélectionné afin de rendre compte au mieux du développement de la pointe de la flèche ;
- Z5 : au revers de la flèche active et aux deux paléoflèches.

Sur l'ensemble de la période d'étude, les résultats présentés dans le tableau 3.2 montrent que les flèches se sont agrandies en moyenne de 0,02 m/an entre 1924 et 2013. On constate cependant que la période allant de 1924 à 1963 connaît un recul de - 0,04 m/an sur les trois flèches. Lors des 50 années suivantes (1963 - 2013), les flèches s'engraissent d'environ 0,11 m/an avec d'abord une accrétion lente de 0,04 m/an entre 1963 et 2001 puis une accélération après 2001 de 0,34 m/an. Si, on regarde cette évolution par zone. Z1

s'érode d'en moyenne - 0,31 m/an entre 1924 et 2001 avec une période d'accrétion forte de + 2,18 m/an entre 1985 et 1990. Après 2001, elle engraisse d'environ 25 m. Z2 connaît tout au long de la période d'étude des alternances d'érosion et d'accrétion qui ont permis à cette zone de s'équilibrer et de finir sur un bilan positif avec un engraissement de 4,52 m sur l'ensemble de la période. Z3 subit d'abord, entre 1924 et 1963, une longue période d'érosion en perdant 18,22 m avant de s'engraisser au cours des 49 années suivantes en regagnant un peu plus de ce qu'elle avait perdu (+ 19,50 m). Elle est de nouveau en érosion sur la dernière période de 2012 à 2013 avec un recul de 0,64 m. La pointe de la flèche (Z4) connaît une accrétion permanente sur l'ensemble de la période avec une progression de 1,66 m/an. Au total, elle s'est allongée de 147,37 m entre 1924 et 2013. Z5 est dans son ensemble plutôt stable avec une progression de quelques millimètres par an (+ 0,003 m/an) et d'une vingtaine de centimètres sur l'ensemble de la période d'étude.

La carte de la figure 3.6 et la dernière ligne du tableau 3.2 montrent l'indice SCE (*Shoreline Change Envelope*, cf. p 49). Le front et la pointe de la flèche active ont connu de forts changements allant jusqu'à 147,37 m de distance entre les traits de côte les plus éloignés sur la période de 1924 à 2013. Le revers de la flèche et les paléoflèches ont quant à eux subi des variations faibles. Les valeurs de SCE montrent que le front de la flèche, représenté par Z1, Z2 et Z3, a subi de fortes variations avec respectivement des différences de 28,40 m, 26,36 m et 22,88 m. La pointe de la flèche n'a quant à elle jamais cessé de s'allonger (+ 147,37 m) et le revers de la flèche active et les paléoflèches sont restés quasiment stables avec une variation d'en moyenne 0,25 m sur l'ensemble de la période. Cependant, il faut remarquer pour la paléoflèche centrale qui longe la rivière que celle-ci a connu une érosion importante entre 1924 et 1963 d'environ 12,5 m.

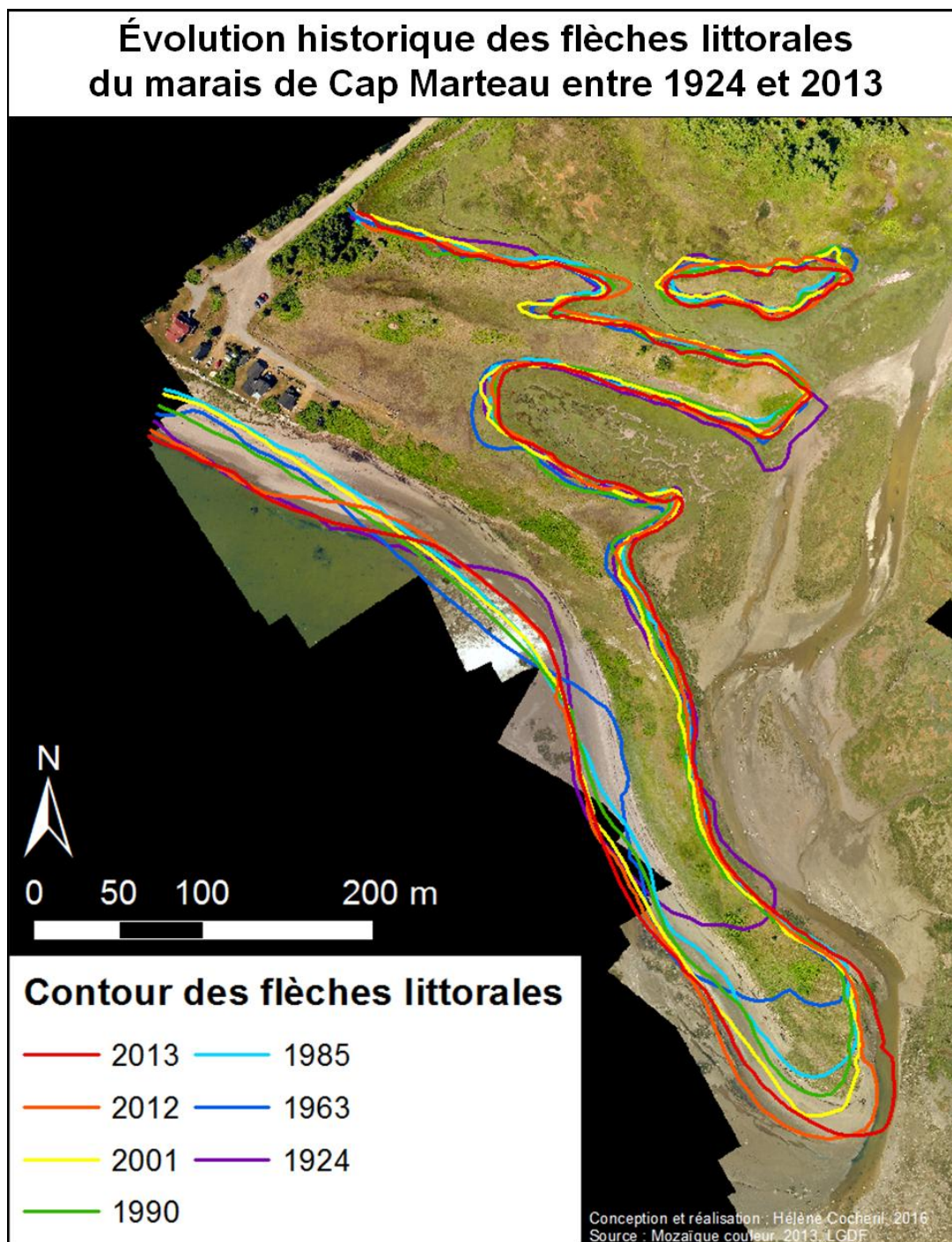


Figure 3.4 : Carte de l'évolution historique des flèches du marais de Cap Marteau entre 1924 et 2013.

Tableau 3.2 : Taux de déplacement des flèches littorales du marais de Cap Marteau entre 1924 et 2013 selon les indices EPR (*End Point Rate*, en mètre par an), NSM (*Net Shoreline Movement*, en mètre) et SCE (*Shoreline Change Envelope*, en m). Les valeurs positives (en vert) correspondent à l'accrétion et les valeurs négatives (en rouge) correspondent à l'érosion.

| Zone \ Période | Z1 | | Z2 | | Z3 | | Z4 | | Z5 | | TOTAL | |
|---------------------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| | EPR (m/an) | NSM (m) | EPR (m/an) | NSM (m) | EPR (m/an) | NSM (m) | EPR (m/an) | NSM (m) | EPR (m/an) | NSM (m) | EPR (m/an) | NSM (m) |
| 1924-1963 | -0,45 | -17,37 | 0,56 | 21,85 | -0,47 | -18,22 | 1,07 | 41,89 | -0,09 | -3,40 | -0,04 | -1,51 |
| 1963-1985 | -0,41 | -9,13 | -0,58 | -12,75 | 0,48 | 10,51 | 0,7 | 15,43 | 0,13 | 2,92 | 0,05 | 1,12 |
| 1985-1990 | 2,18 | 10,73 | 1,08 | 5,32 | 0,41 | 1,90 | 0,55 | 2,71 | -0,53 | -2,60 | 0,06 | 0,31 |
| 1990-2001 | -0,73 | -8,07 | -0,35 | -3,85 | 0,42 | 4,61 | 0,51 | 5,64 | 0,12 | 1,37 | 0,02 | 0,26 |
| 2001-2012 | 1,83 | 20,09 | -0,69 | -7,57 | 0,22 | 2,45 | 0,72 | 7,91 | 0,15 | 1,68 | 0,26 | 2,81 |
| 2012-2013 | 4,91 | 4,91 | 1,53 | 1,53 | -0,64 | -0,64 | 7,47 | 7,47 | 0,47 | 0,47 | 1,22 | 1,22 |
| 1924-2013 | 0,61 | 1,15 | 0,05 | 4,52 | 0,01 | 0,69 | 1,66 | 147,37 | 0,003 | 0,25 | 0,02 | 2 |
| SCE (m) (1924-2013) | 28,40 | | 26,36 | | 22,88 | | 147,37 | | 0,25 | | 15,37 | |

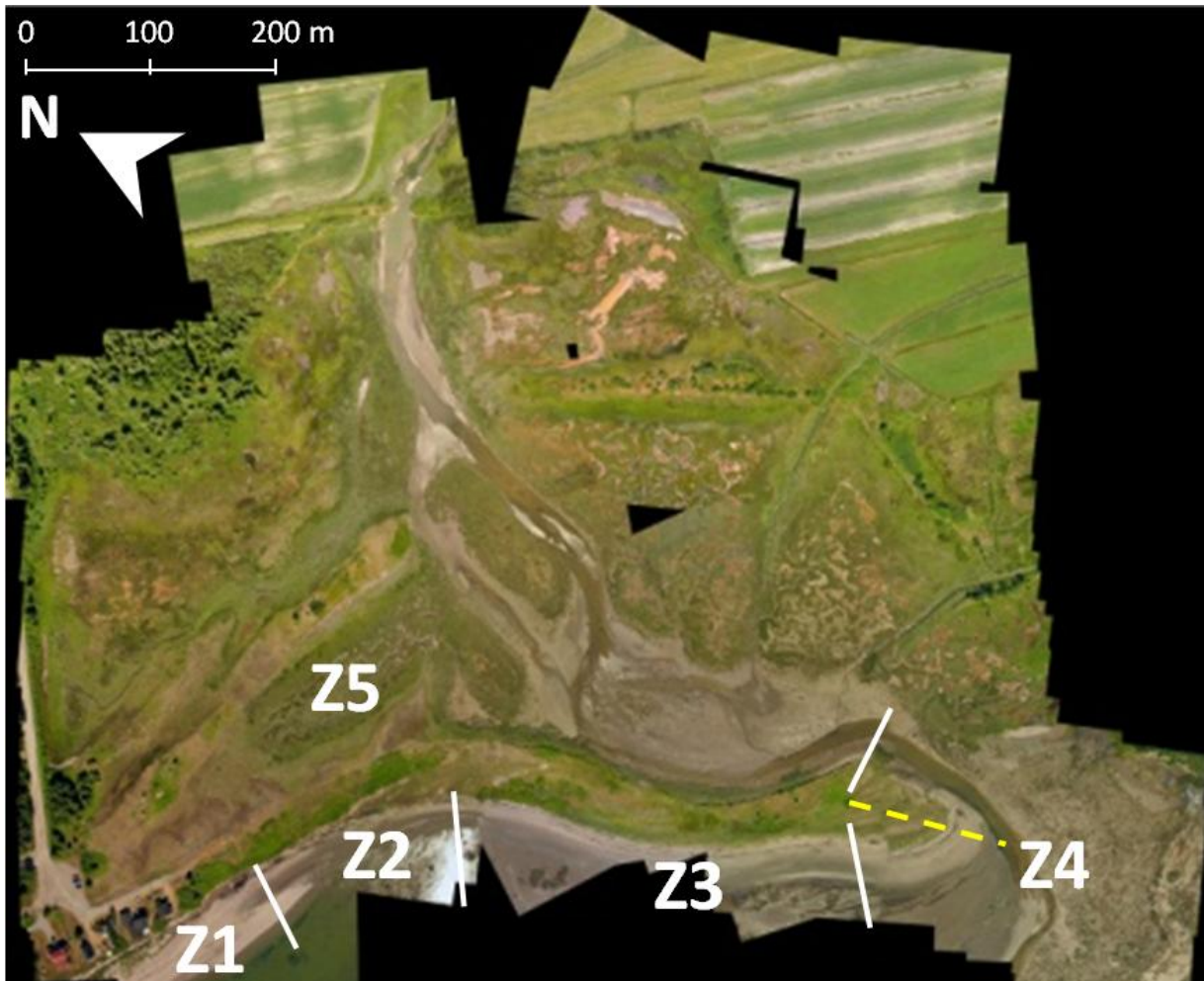


Figure 3.5 : Les différentes zones du marais de Cap Marteau déterminées selon l'évolution historique de la Figure 3.4. Le trait en pointillé jaune représente le transect sélectionné pour représenter la Zone 4.

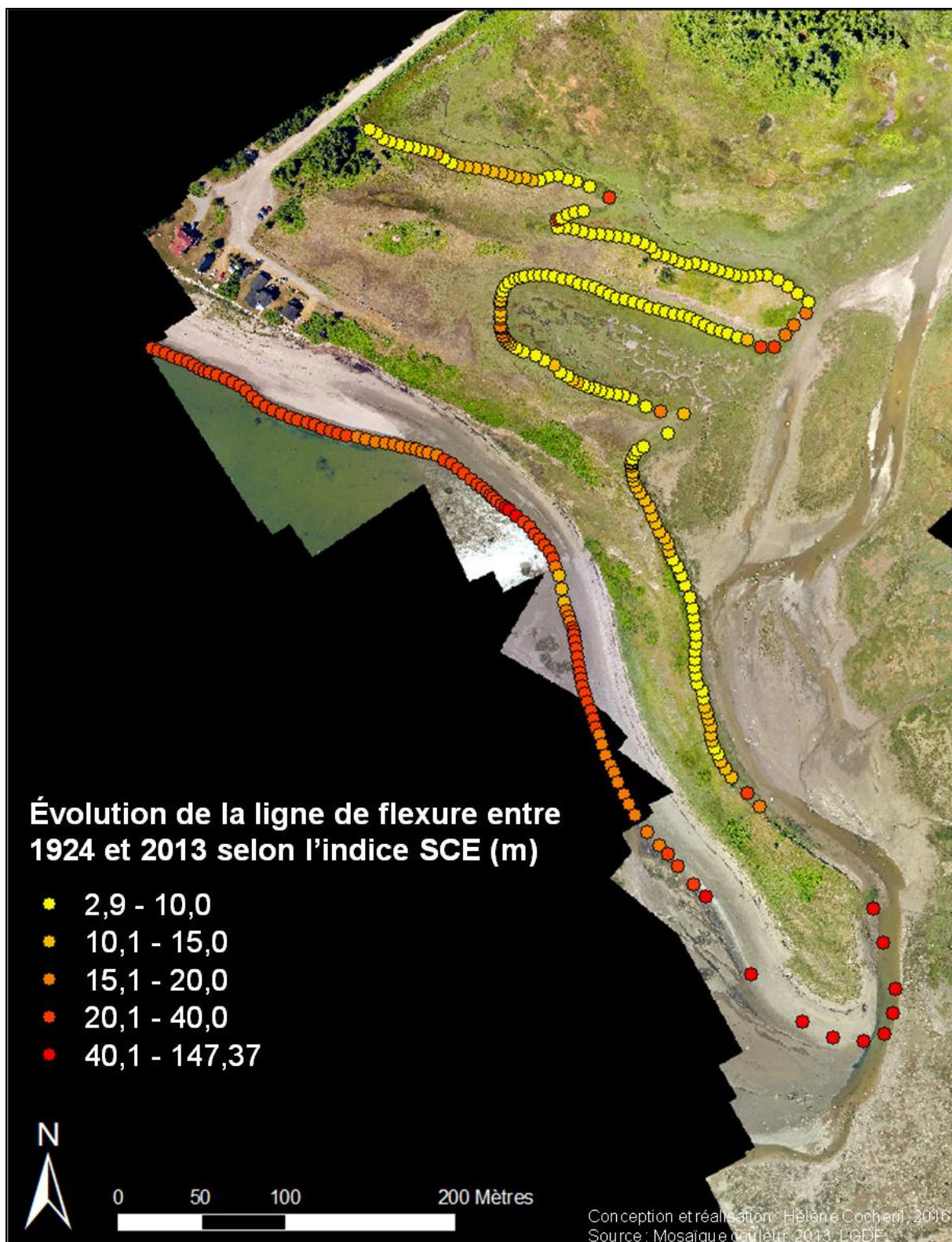


Figure 3.6 : Carte de l'indice SCE (*Shoreline Change Envelope*, cf. p 59) sur les flèches du marais de Cap Marteau entre 1924 et 2013 (en m).

3.1.3 Discussion

La granulométrie des sédiments de surface ainsi que les carottes sédimentaires prélevées dans les flèches du marais de Cap Marteau montrent que l'ensemble du corps sédimentaire est assez homogène et composé de sables grossiers à moyens. Cette homogénéité s'observe autant en surface qu'en profondeur comme le montrent les sédiments des carottes sédimentaires aussi constituées de sables grossiers à moyens. Ces résultats concordent avec ce que Morin (1981) et Quintin *et al.* (2006) avaient décrit et observé dans leurs études respectives sur le marais de Cap Marteau. Comme le précisent Dionne (1972) et Morin (1981), la présence de graviers, de cailloux et de galets que l'on retrouve en surface et en profondeur sur le marais et la plage de Cap Marteau s'explique par les glaces hivernales et les vagues de tempête qui ont la capacité de déplacer des éléments aussi gros.

Si les carottes sédimentaires ont montré que la composition des flèches était homogène autant horizontalement que verticalement, elles ne nous ont pas permis de faire de nouvelles datations par manque de matériaux pouvant être datés tel que les coquilles ou des morceaux de bois. Actuellement, nous pouvons seulement nous appuyer sur celles effectuées par Morin (1981). En tout, cinq carottes sédimentaires avaient été prélevées et datées à partir de bois ou de coquilles : une dans la paléoflèche centrale et quatre dans la flèche active (Annexe I). La paléoflèche daterait de 830 ± 145 ans BP alors que la flèche active serait une construction récente d'âge moderne, c'est-à-dire postérieure à 1950, âge de référence utilisé par le laboratoire de Géochron et le Ministère des Richesses Naturelles (actuellement Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles). Cependant, la carte aérienne de 1924 indique qu'à cette époque la flèche active mesurait déjà 600 m de long. L'apparition de cette flèche est donc antérieure à 1924. Malgré tout, ces dates nous montrent que les trois flèches littorales ne sont pas apparues en même temps, mais l'une après l'autre, soit vers la fin de la Transgression Laurentienne alors que la région subissait une baisse du niveau marin relatif (Dionne, 2002a) ou soit lors de l'actuelle subsidence régionale (Jolicoeur *et al.*, 2010). De nouvelles datations permettraient d'affiner l'histoire de construction des flèches littorales du marais de Cap Marteau. De nouvelles carottes sédimentaires pourraient être prises jusqu'à la base des flèches pour pouvoir en extraire des informations et du matériel pour datation. Ces prélèvements pourraient se faire sur les extrémités et des points d'ancrage des flèches mais aussi au niveau du crochet terminal de la flèche active.

Dans son rapport de 2014, Joubert *et al.* réalisaient une évolution historique du marais de Cap Marteau, mais les limites et la zone ciblée diffèrent. Dans ce rapport de 2014, la limite choisie n'était pas la ligne de flexure, mais la ligne de rivage et il prenait en compte l'ensemble du marais alors que mon étude s'est focalisée sur les flèches littorales. Malgré tout, les deux études montrent des résultats similaires qui prouvent que le marais de Cap Marteau est un milieu dynamique : le front de la flèche active présente de forts changements, la pointe libre continue de s'allonger et l'intérieur du marais est plutôt stable. Cependant une nuance est à apporter concernant la paléoflèche centrale. Bien que les paléoflèches n'ont que très peu bougées, l'évolution de la paléoflèche centrale montre que celle-ci a été érodée entre 1924 et 1963. Ce recul est probablement dû à l'érosion fluviale provenant de la migration latérale du chenal secondaire de la rivière Centrale qui traverse le marais. Ainsi, le cours d'eau contribuerait aussi à l'érosion des flèches. Comme les autres flèches littorales à travers le monde, l'évolution historique des flèches du marais de Cap Marteau montre bien que ce sont des milieux très dynamiques (Jolicoeur *et al.*, 2010 ; Joubert *et al.* 2014 ; Robins *et al.*, 2013). Dans le cas du marais de Cap Marteau, le marais est protégé en grande partie des aléas côtiers comme les tempêtes grâce à la crête appalachienne qui protège des vents et à l'étendue de l'anse qui ralentit la force des vagues. Ainsi, c'est surtout le front de la flèche active qui est impacté, ce qui explique les fortes variations qu'il a connu entre 1924 et 2013. La flèche active forme alors une deuxième barrière qui protège le reste du marais de l'érosion notamment lors des tempêtes. C'est ce qui a permis l'apparition et le maintien du marais et des paléoflèches. L'allongement continu de la flèche active montre qu'elle reçoit un apport régulier en sédiments. Ces sédiments proviennent du large, et s'acheminent jusqu'à la pointe libre avec la dérive littorale, mais aussi de la rivière Centrale qui traverse le marais et dépose les sédiments plus fins (Joubert *et al.*, 2014). L'évolution historique montre que jusqu'en 2001, le front de la flèche ne cesse de reculer à cause d'une succession de tempêtes et d'évènements de submersion (Joubert *et al.*, 2014). Ce retrait amène, en 2009, l'artificialisation de la côte avec l'édification d'encochement devant les habitations (Joubert *et al.*, 2014). Le manque de photographies aériennes ne permet pas de savoir si cet encochement a eu des effets positifs ou négatifs sur ce secteur. Selon Joubert *et al.* (2014) c'est la tempête du 6 décembre 2010 qui aurait permis l'engraissement massif de ce secteur. En effet, la tempête aurait apporté une grosse quantité de sable renflouant la plage devant les habitations. Depuis, et comme le montre les tracés de 2012 et 2013, la plage s'est maintenue et s'engraisse grâce au peuplement d'élymes des sables d'Amérique (type de graminée) qui s'est fixé et s'est propagé le long du littoral sur cette nouvelle plage (Joubert *et al.*, 2014). Finalement, la flèche

active du marais de Cap Marteau est l'un des rares endroits de l'estuaire du Saint-Laurent à être en accrétion. Pour rappel, moins 1% des côtes de l'Est du Québec sont actuellement en accrétion (Drejza *et al.*, 2014). Cependant, l'intérieur du marais est stable comme la majorité du littoral québécois (Drejza *et al.*, 2014). Pour cette étude, la technique par photo-interprétation permet seulement de mesurer les évolutions horizontales des formes littorales, mais ne donne aucune donnée sur les changements verticaux qu'il peut y avoir. Ainsi, dans l'ensemble, les paléoflèches sont restées plutôt stables et la flèche active s'est allongée et élargie, mais on ne peut pas savoir si elles ont pris de la hauteur. Des imageries *LiDAR* ou des transects DGPS sur différentes années auraient permis de mieux documenter cette dynamique.

3.2 DYNAMIQUE HYDROGÉOLOGIQUE DE FLÈCHES LITTORALES

3.2.1 Variation des niveaux piézométriques

Les variations des niveaux d'eau enregistrés dans les piézomètres CM1 à CM5 (Figure 3.7) installés dans les flèches littorales, entre le 8 novembre 2014 et le 15 novembre 2016, fluctuent de manière synchrone, quelque soit la flèche. L'absence de données durant l'hiver 2014-2015 provient du fait que les piézomètres n'étaient pas assez enfoncés dans le sol pour permettre aux capteurs de pression la saisie de données. Seul CM5 et dans une moindre mesure CM3, permet d'avoir des enregistrements continus sur les deux années. Ces enregistrements présentent des pics réguliers sur l'ensemble de la période d'étude. Globalement, les niveaux piézométriques oscillent entre 1 m en hiver et 3 m au printemps et à l'automne par rapport au niveau 0 terrestre.

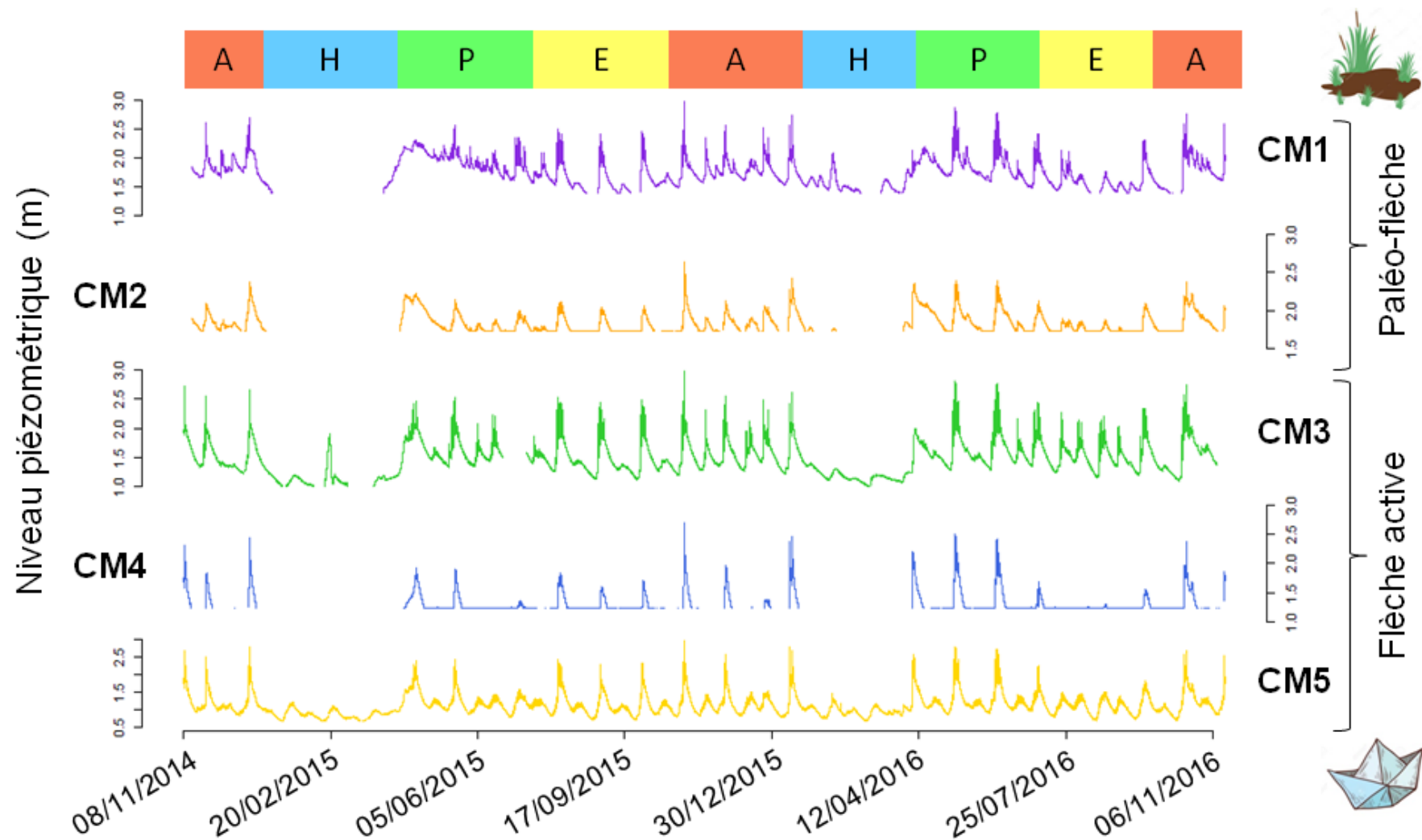


Figure 3.7 : Variations des niveaux piézométriques dans les piézomètres installés dans les flèches littorales (CM1 à CM5) entre le 8 novembre 2014 et le 15 novembre 2016. Les niveaux piézométriques sont donnés en m par rapport au 0 terrestre. La bande de couleurs en haut représente les différentes saisons avec A pour automne, H pour hiver, P pour printemps et E pour été.

La Figure 3.8.a présente les variations du niveau de la rivière Centrale (CMRIV2) et les données de précipitation entre le 5 juillet 2015 et le 11 novembre 2016. En moyenne, le niveau d'eau de la rivière se situe autour de 40 cm de profondeur et peut atteindre jusqu'à 2 m au moment des crues printanières. La Figure 3.8.b est un zoom des variations de la rivière Centrale entre le 15 février et le 15 juin 2016. On observe que les fluctuations de la rivière ne se font pas simultanément avec les précipitations, mais avec un décalage. En effet, à chaque événement de pluie, de redoux hivernaux ou de fonte des neiges au printemps, le niveau de la rivière augmente avec un décalage de quelques heures (entre 30 min et 5h selon les piézomètres, nous revenons sur ce point plus tard).

La Figure 3.9 compare les niveaux piézométriques dans les flèches avec les variations de la rivière Centrale et les précipitations pour les piézomètres CM1 (Figure 3.9.a et b) et CM5 (Figure. 3.9.c et d). Les niveaux piézométriques semblent fluctuer avec la rivière. Pour chaque augmentation du niveau de la rivière, les niveaux d'eau dans les piézomètres montent aussi. Cependant, ces montées d'eau ne sont pas synchrones comme le montrent les zooms de CM1 et CM5 (Figure 3.9.b et d), mais avec un décalage de quelques heures avec la rivière qui réagit avant les piézomètres. Ces graphiques laissent aussi voir des fluctuations du niveau piézométrique même quand la rivière n'en connaît pas. Ces fluctuations ressemblent aux variations mensuelles des marées de vives eaux et de mortes eaux.

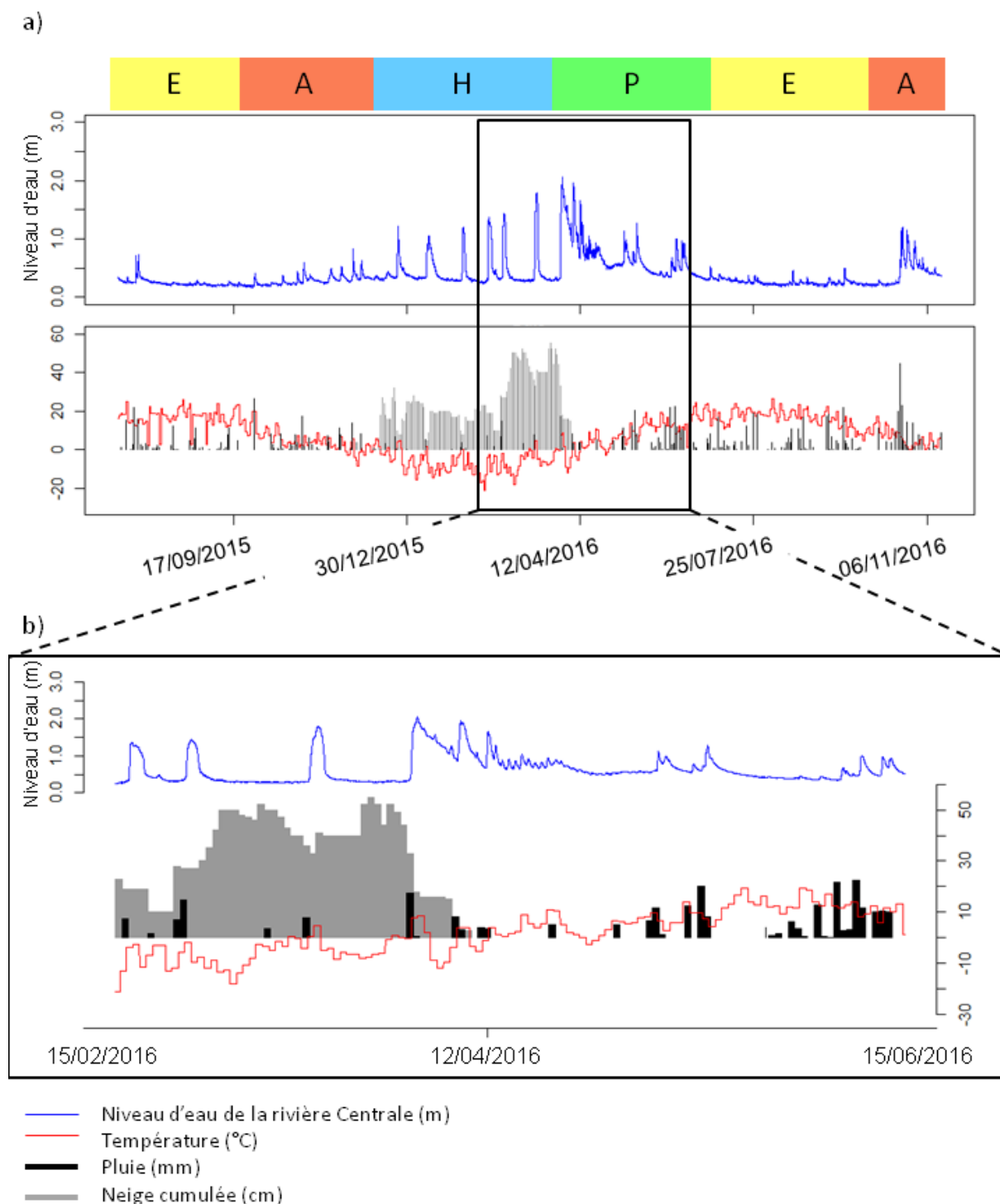


Figure 3.8 : Variation du niveau d'eau de la rivière Centrale (en haut) et des précipitations (en bas), avec en gris la neige cumulée en cm, en noir les pluies en mm et en rouge les températures en °C pour a) entre le 9 juillet 2015 et le 15 novembre 2016 et pour b) entre le 15 février et le 15 juin 2016. La bande de couleurs en haut représente les différentes saisons avec A pour automne, H pour hiver, P pour printemps et E pour été.

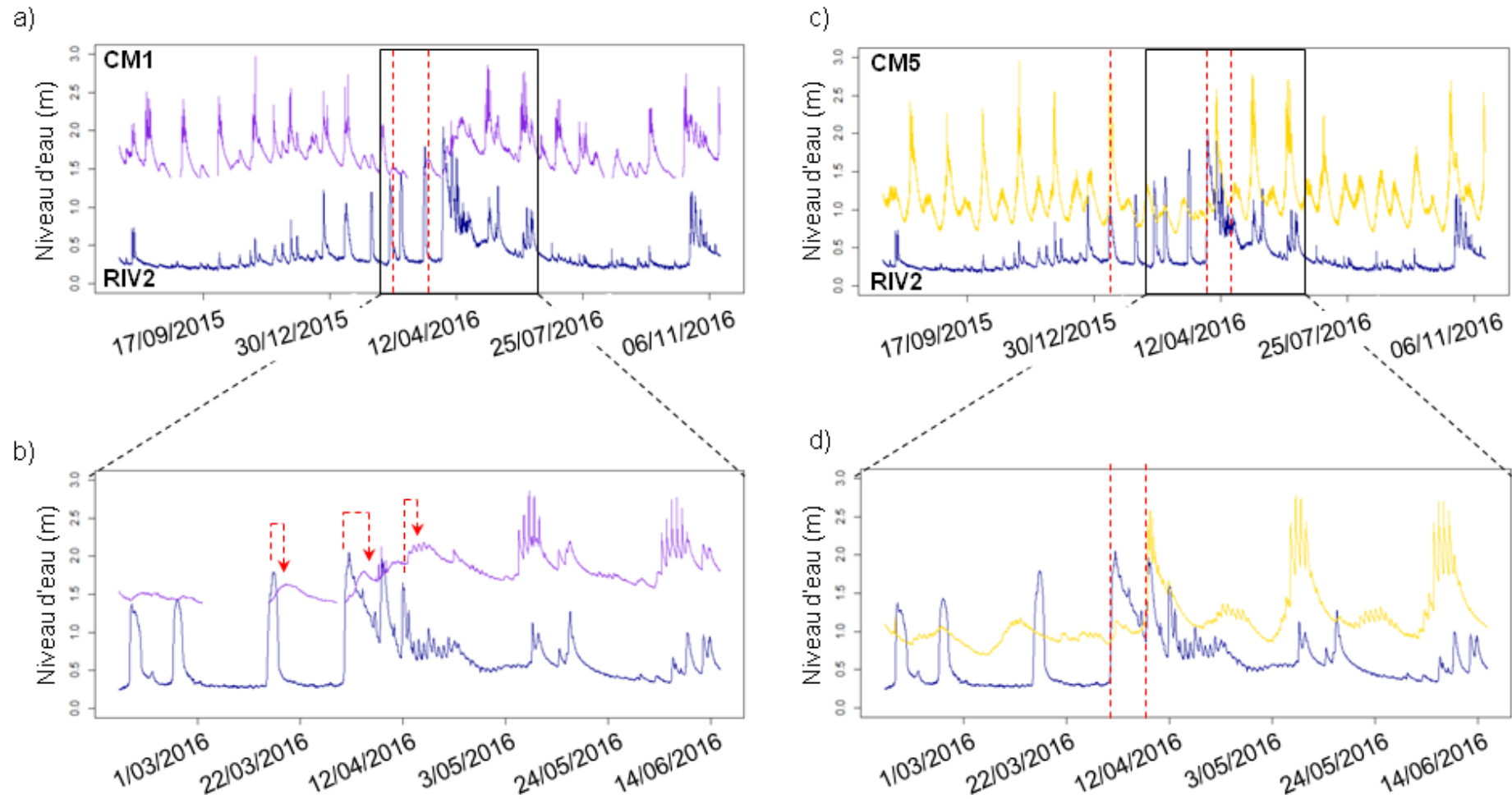


Figure 3.9 : Comparaison des variations des piézomètres CM1 (a, ligne en violet) et CM5 (b, ligne en jaune) avec le niveau d'eau de la rivière Centrale (ligne en bleu) entre le 9 juillet 2015 et le 15 novembre 2016. Les traits en pointillés indiquent les décalages qu'ils existent entre la Rivière Centrale et les niveaux piézométriques.

Afin de mieux comprendre la dynamique qui lie les précipitations, le débit de la rivière centrale et les niveaux piézométriques dans les flèches, les séries temporelles ont été analysées par une approche de corrélations croisées. Les corrélogrammes de la Figure 3.10 comparent les enregistrements des niveaux d'eau de la rivière (CMRIV2) avec les piézomètres situés dans les flèches (CM1 à CM5). Ils montrent l'existence d'une corrélation significative puisque toutes les corrélations sont au-dessus du seuil critique (Figure 3.10, droite en pointillée bleue). Les maxima de corrélation sont significatifs, mais faibles avec un r compris entre 0,4 à proximité de la rivière (pour CM1, Figure 3.10.a) et 0,25 en s'éloignant de la rivière Centrale (Figure 3.10.c et d). Entre CMRIV2 et les piézomètres CM1 à CM5, le décalage est négatif ce qui signifie que les signaux dans la rivière s'enregistrent avant ceux dans les flèches, comme suggéré dans la figure 3.9. Ces décalages sont de l'ordre de 30 min (CM3) à 5h (CM4). Le Tableau 3.3 présente la vitesse de propagation théorique de l'eau, en m/jr, de la rivière Centrale et à chacun des piézomètres en faisant l'hypothèse d'un transport ou d'une propagation d'onde perpendiculaire à la rive de la rivière. On fait l'hypothèse ici que l'aquifère est isotrope et que les vitesses sont homogènes dans toutes les directions. Le temps (en seconde) est déterminé par le temps moyen que prend l'eau pour atteindre un piézomètre selon les résultats obtenus par les corrélogrammes de la Figure 3.10. Il en ressort que la vitesse de l'eau est très rapide, comprise entre 0,005 (CM4) et 0,051 m/s (CM3). La perméabilité des sédiments des flèches littorales du marais de Cap Marteau, basé sur les mesures de perméamètre réalisées à une dizaine de points (figure 3.1), est évaluée à $K = 31,48$ m/jr soit 0,0004 m/s. Ces valeurs sont typiques des milieux granulaires sableux (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015). Ces vitesses sont cependant bien inférieures (2 ordres de grandeur) à celles calculées précédemment.

Les analyses de corrélations croisées ont aussi été faites entre les niveaux piézométriques eux-mêmes (Figure 3.11). Les corrélogrammes entre CM1 et les autres piézomètres dans les flèches montrent là aussi une corrélation significative. Mais, cette

fois-ci, les corrélations avec CM1 sont fortes avec des valeurs de corrélation r autour de 0,8 pour les piézomètres CM2 et CM3, de 0,75 avec CM5 et de 0,55 avec CM4.

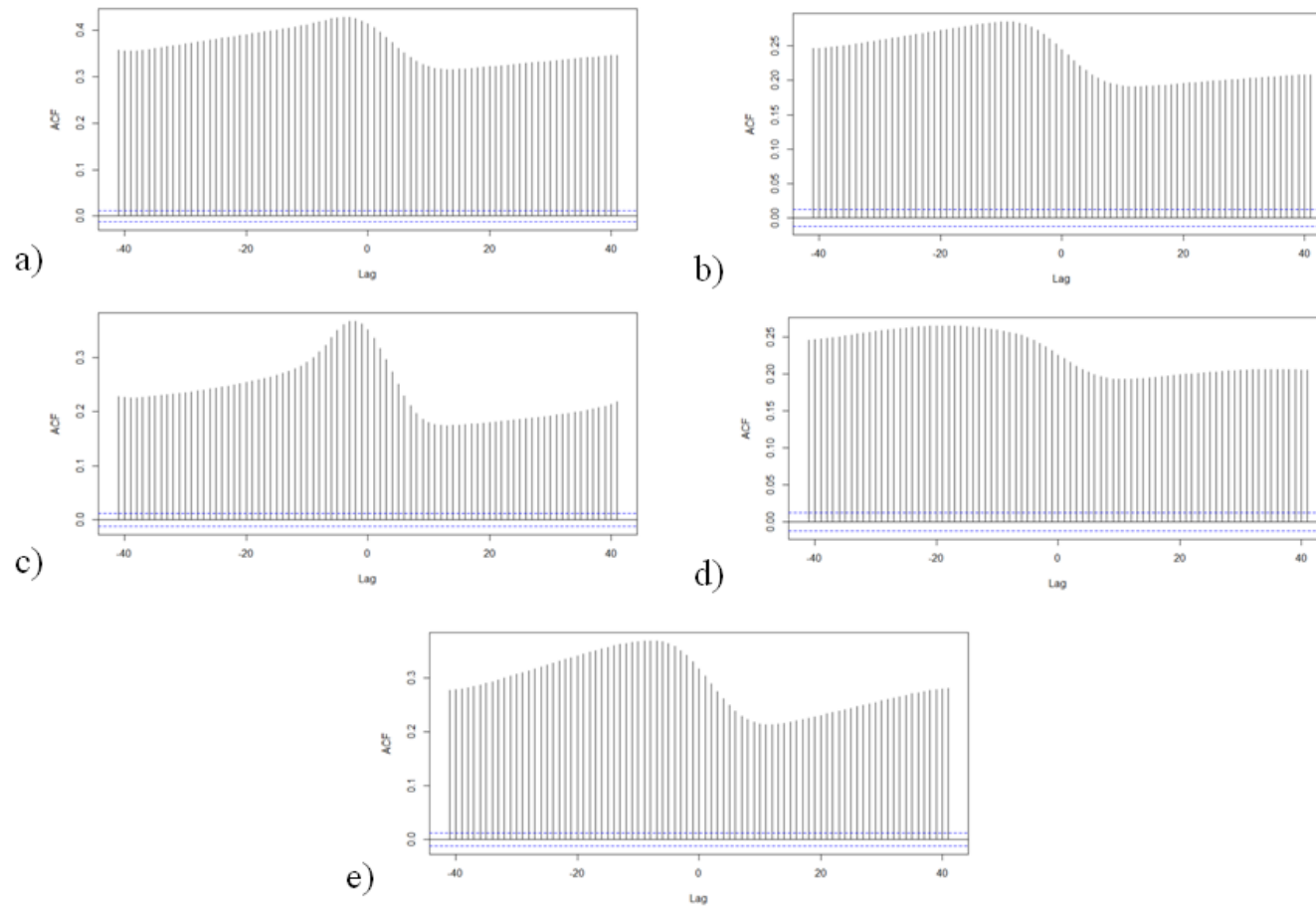


Figure 3.10 : Résultats des corrélations croisées entre la rivière (CMRIV2) et les piézomètres installés dans les flèches, a) CM1, b) CM2, c) CM3, d) CM4 et e) CM5. Les lignes bleues correspondent au seuil critique. Les décalages (*lags* sur l'axe des x) représentent le temps, ici 1 décalage est égal à 15 min. Un décalage de 0 indique aucun décalage entre les enregistrements : les séries temporelles sont alors synchrones. Un décalage de + ou - 10 indique un décalage de + ou - 150 minutes (2h30min)

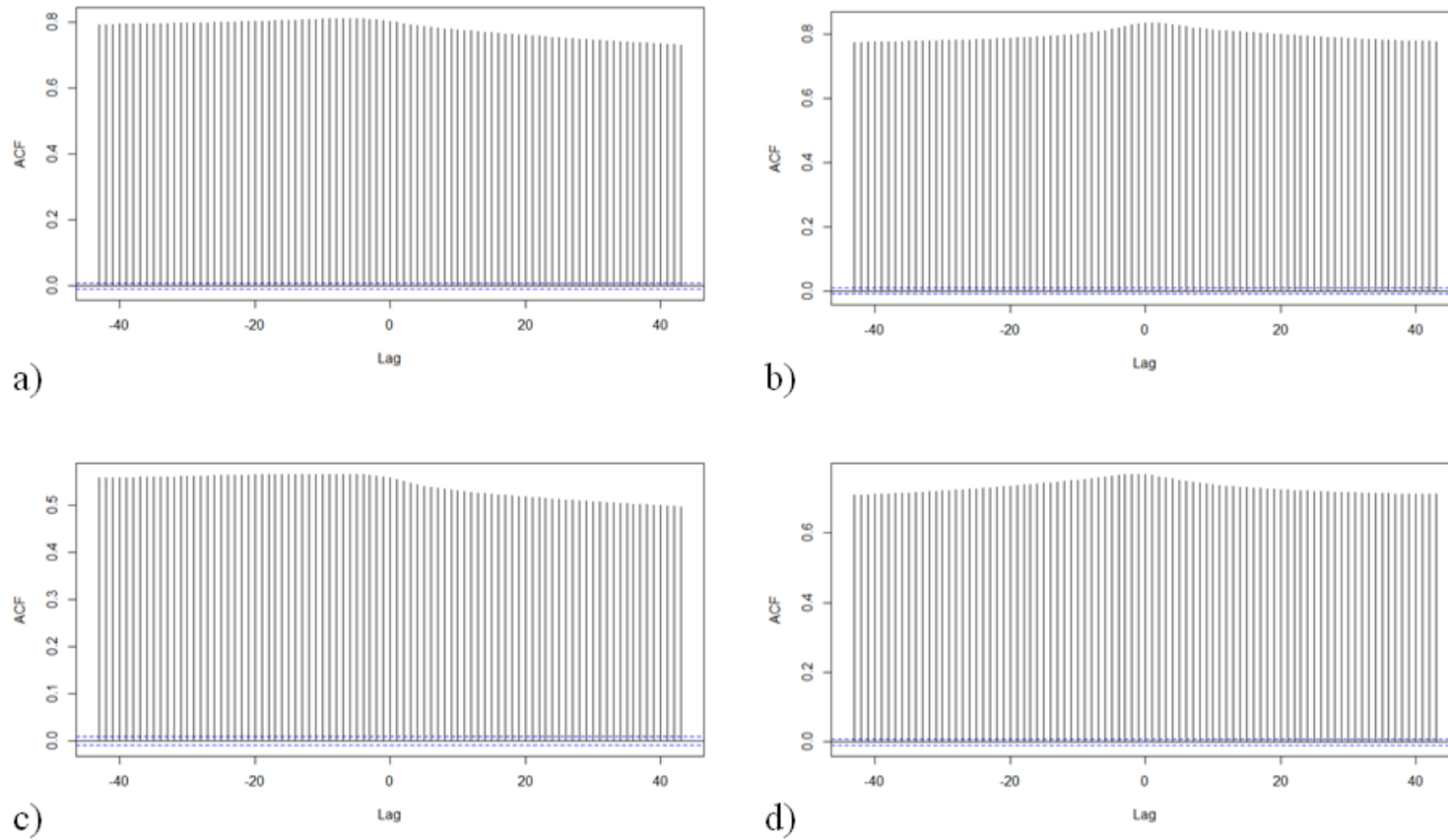


Figure 3.11 : Résultats des corrélations croisées entre CM1 et les piézomètres installés dans les flèches, a) CM2, b) CM3, c) CM4 et d) CM5. Les lignes bleues correspondent au seuil critique. Les décalages sont exprimés en minute, ici 1 décalage est égal à 15 minutes.

Tableau 3.3 : Vitesse de propagation de l'eau entre la rivière Centrale et les piézomètres

| | Distance¹ entre les piézomètres et la rivière Centrale (m) | Temps² moyen que prend l'eau de la rivière pour atteindre le piézomètre (s) | Vitesse (m/s) | Vitesse (m/jr) |
|------------|--|---|----------------------|-----------------------|
| CM1 | 137 | 3 150 | 0,043 | 3 715,200 |
| CM2 | 82 | 8 100 | 0,01 | 864,000 |
| CM3 | 92 | 1 800 | 0,051 | 4 404,400 |
| CM4 | 89 | 17 100 | 0,005 | 432,000 |
| CM5 | 87 | 6 300 | 0,012 | 1 036,800 |

¹ La distance est calculée avec l'outil règle d'ArcGIS. La distance est prise perpendiculairement à la rivière à partir des piézomètres.

² Le temps (en seconde) est déterminé par le temps moyen que prend l'eau pour atteindre un piézomètre selon les résultats obtenus par les corrélogrammes de la Figure 3.10.

Des analyses spectrales ont été réalisées afin de mieux comprendre la variabilité temporelle des niveaux piézométriques dans les flèches. Les piézomètres avec les plus longues séries temporelles ont été analysés. Ces analyses ont été effectuées sur le piézomètre CM1 qui se trouve dans le fond du marais sur la première paléoflèche (Figure 3.12.a) et sur CM5 installé proche de la plage sur la flèche active (Figure 3.12.b). Les périodogrammes obtenus permettent de voir les fréquences qui influencent les niveaux d'eau et indiquent les principales harmoniques de marées lunaires et solaires qui entrent en jeu (Figure 3.12, écriture en rouge ; Annexe II). Les fréquences des principales harmoniques de marée O1, K1, S2, M1 et M2 ont un pouvoir très faible, avec un poids inférieur à 30 pour CM5 et à 5 pour CM1. Cette décroissance du poids des harmoniques de marée entre CM5 (flèche active) et CM1 (fond du marais) montre que l'onde de marée s'estompe plus elle s'avance dans le marais. Le poids de la marée sur le niveau de la nappe dépend donc de la distance à la rive du Saint-Laurent.

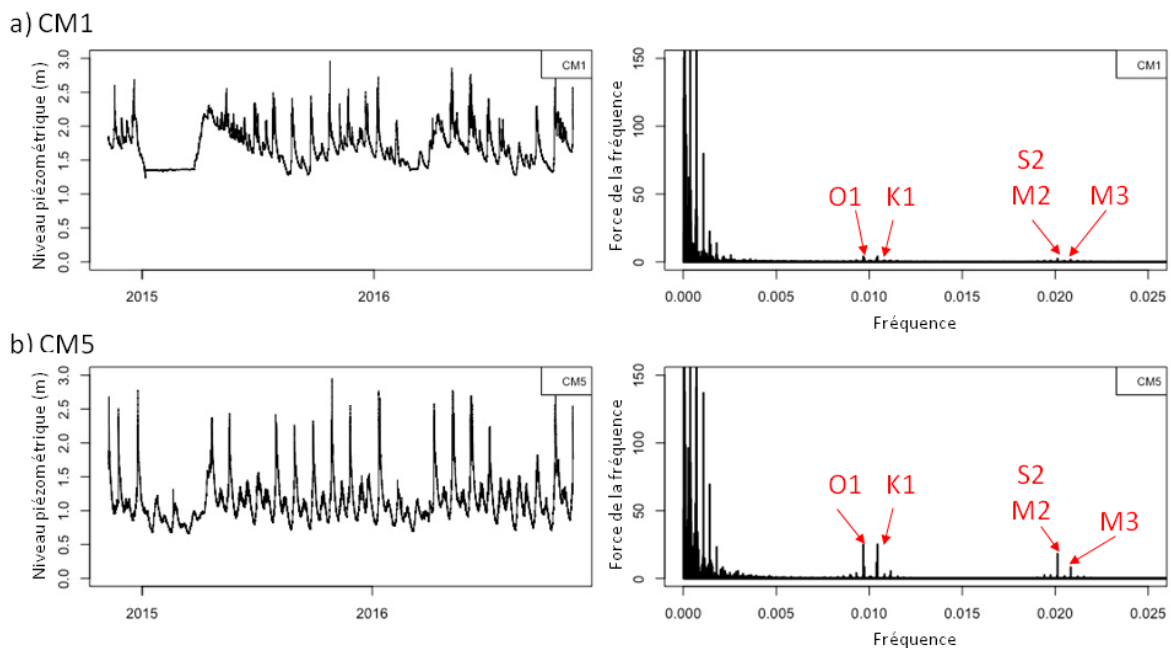
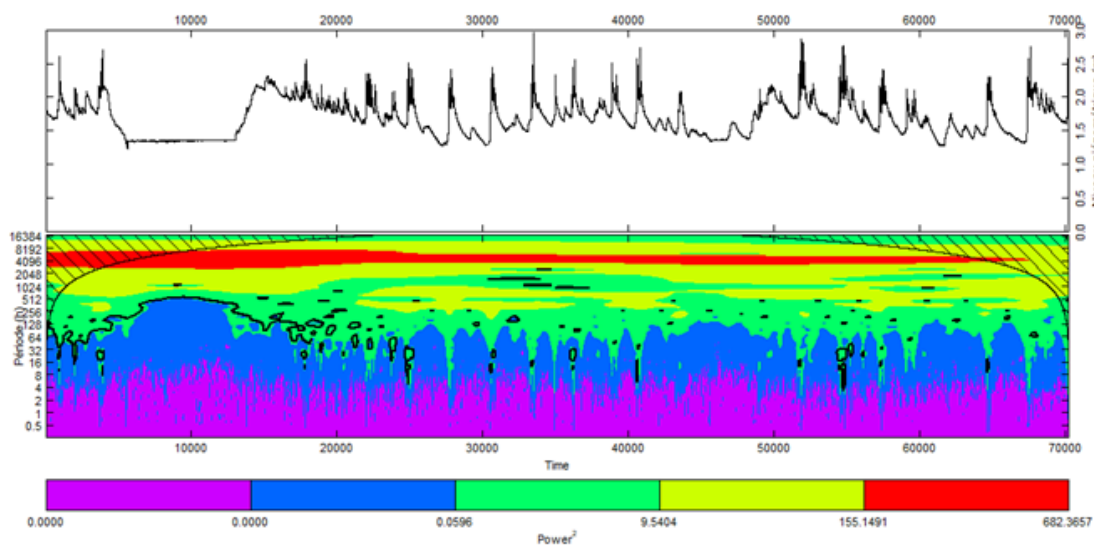


Figure 3.12 : Analyse de fréquence sur les séries temporelles des piézomètres a) CM1 et b) CM5. À gauche le niveau d'eau des piézomètres et à droite le périodogramme de fréquence sur lesquels sont reportées les principales harmoniques de marée. Les fréquences sont au 15 min. Ces composantes sont présentées dans l'annexe II

La variabilité des séries temporelles des niveaux d'eau a aussi été analysée par des analyses par ondelettes qui permettent de rendre compte de la ou des périodes influençant les niveaux d'eau (Figure 3.13) et de la variabilité temporelle de ces périodes au cours de l'enregistrement. La méthode des ondelettes décompose la série temporelle dans le domaine du temps et des périodicités. Cette méthode permet de caractériser les périodicités des variations piézométriques en fonction du temps. Les périodes (ici, en heure) ayant un poids les plus importantes sont en rouge alors que les moins importantes sont en violet. Ces analyses ont été faites sur les deux mêmes piézomètres que précédemment : CM1 (Figure 3.13.a) et CM5 (Figure 3.13.b). Dans ces deux cas, la période la plus influente se situe autour de 4 096 h ce qui équivaut à 5,6 mois, ce qui ne correspond pas aux composantes de marée dont les périodes sont inférieures à 26h (Annexe II). Les périodes liées aux différentes composantes de marée ont un pouvoir faible à nul. La seule composante de

marée qui ressort un peu sont les marées semi-diurnes (couleur verte) qui ont une petite influence journalière. Cette influence des marées semi-diurnes sont un peu plus marquées lors des périodes de vives eaux et de mortes eaux qui sont influencés par le cycle lunaire (environ tous les 26 jours). Cela signifie que les marées n'influencent que très peu les variations des niveaux piézométriques de la nappe même sur CM5 qui est le plus proche du rivage.

a) CM1



b) CM5

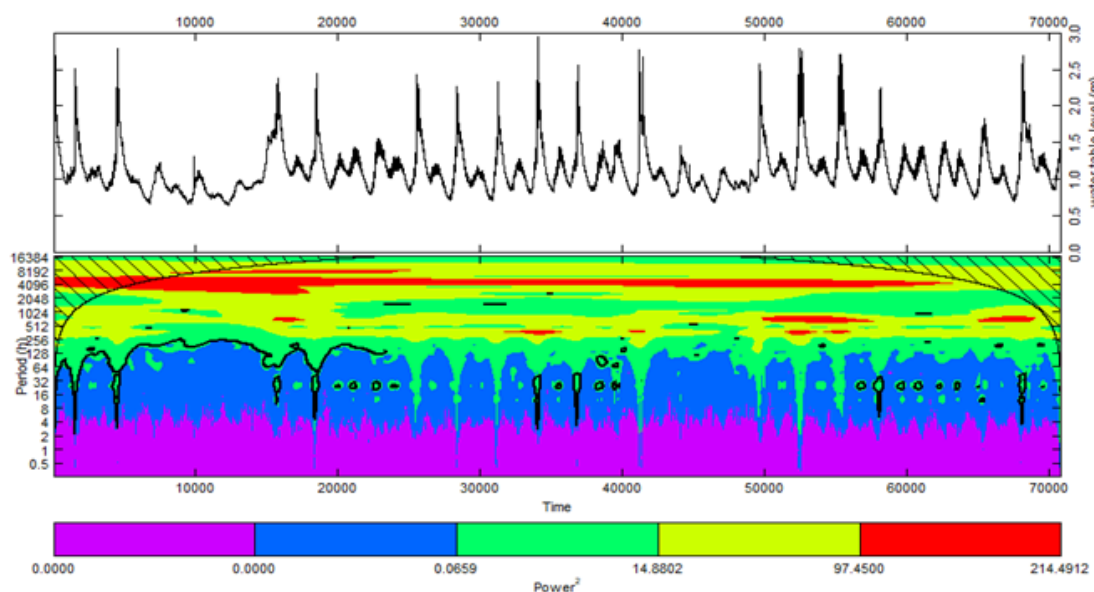


Figure 3.13 : Analyse par ondelettes des niveaux piézométriques enregistrés dans a) CM1 et b) CM5 avec en haut en noir le niveau piézométrique et en bas la force des périodes en heure. Le graphique du haut retrace le niveau piézométrique (en m) alors que le graphique du dessous montre les périodes (en heure) les plus influentes sur l'année avec en rouge une période très influente et en violet une période non influente.

3.2.2 Signature isotopique de l'eau

La figure 3.14 montre la signature isotopique des eaux échantillonnées dans le site d'étude. Ces échantillons incluent des échantillons d'eau souterraine collectés dans les flèches ainsi que de l'eau de surface de la rivière, de l'anse (Saint-Laurent) et de la pluie. Dans la figure 3.14.a, ces échantillons sont comparés avec ceux prélevés par le PACES-NEBSL (Figure 3.14.a). Ils montrent que les échantillons pris dans les puits privés dans l'aquifère au roc (cercle rouge) se retrouvent mélangés à ceux du PACES et sont compris entre le pôle neige et le pôle pluie. Ces pôles correspondent respectivement à la signature isotopique moyenne des échantillons de neige et de pluie collectés dans la région de Notre-Dame-des-Neiges par le PACES-NEBSL. Les autres échantillons prélevés sur le marais de Cap Marteau se regroupent principalement entre le pôle de référence pluie et la signature isotopique de l'eau de mer collectée dans l'Anse. La Figure 3.14.b situe ces échantillons entre un pôle eau douce (pluie et rivière Centrale) et un pôle eau de mer. La Figure 3.14.b montre aussi l'évolution de la signature isotopique de l'eau à l'intérieur des flèches sur un cycle de marée de 12 h avec une donnée prise à chaque heure. Les échantillons du site 1 (vert clair) et 2 (vert foncé) restent regroupés durant le cycle de 12 h de la marée, à l'exception de l'échantillon 1 où au moment du maximum de la marée haute, la signature isotopique de l'eau se rapproche de celle de la rivière Centrale.

La signature isotopique des échantillons permet aussi de calculer la contribution relative des différents pôles aux échantillons. Ici, nous avons calculé la proportion d'eau de pluie qui compose chaque échantillon. Pour calculer cette proportion, un modèle à deux composantes isotopiques (deux inconnues) est utilisé. Ici, les deux composantes sont celles qui englobent l'ensemble des données (en excluant celles prises dans les puits privés) soit la référence pluie ($-8,485 \delta^2\text{H}$ et $-55,575 \delta^{18}\text{O}$) et la référence eau de mer ($-2,023 \delta^2\text{H}$ et $-12,772 \delta^{18}\text{O}$). Le pourcentage de composition est calculé comme suit :

$$X = \left[\frac{(C_{\text{éch}} - C_{\text{pluie}})}{C_{\text{mer}} - C_{\text{pluie}}} \right] \times 100$$

Où X est le pourcentage de composition, $C_{\text{éch}}$ est la signature isotopique de l'échantillon, C_{mer} la signature isotopique du Saint-Laurent et C_{pluie} la signature isotopique de la pluie. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.4. Les échantillons du site 1 sont composés en moyenne de 76,3 % de pluie et 23,7 % d'eau de mer, à l'exception de l'échantillon pris durant le maximum de la marée haute qui est 100 % de l'eau de pluie. Au site 2, les échantillons collectés sont composés à 46,6 % d'eau douce et 53,4 % d'eau de mer. Ces contributions varient peu lors du cycle de marée.

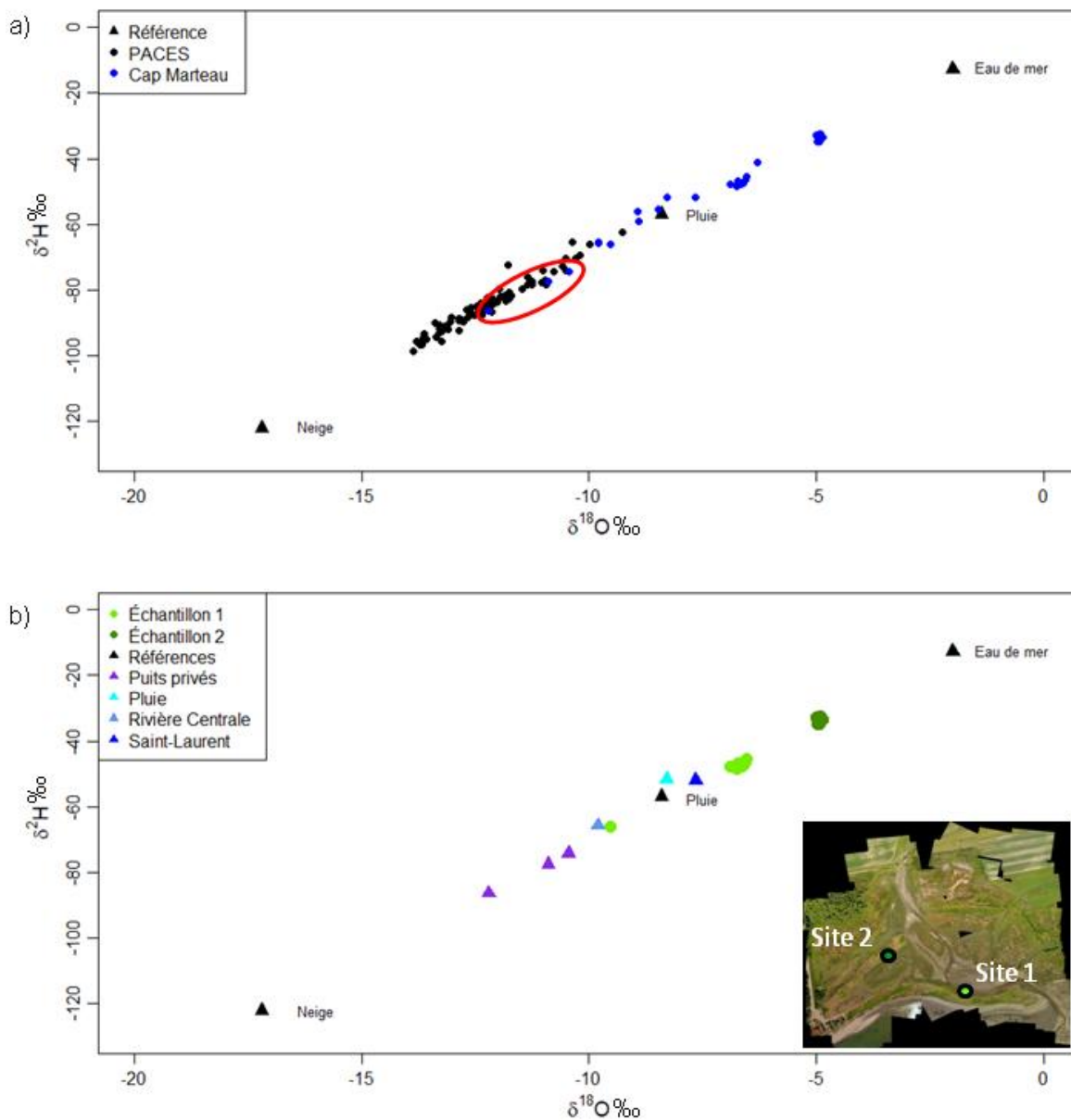


Figure 3.14 : Composition isotopique ($\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$) de l'eau de surface, souterraine et des précipitations du marais de Cap Marteau a) comparée avec les données recueillies par le PACES-NEBSL dans les aquifères du Bas St-Laurent et en b) au sein du marais sur un cycle de marée de 12h. Le cercle en rouge dans le graphique a) représente les échantillons des puits privés du marais de Cap Marteau. Les sources potentielles (eau de mer et précipitations) sont reportées dans chacun des panneaux (triangles noirs).

Tableau 3.4 : Isotopes stables et composition en précipitation liquide des sites 1 et 2 prélevées au cours d'un cycle tidal

| # | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^2\text{H}$ | % de précipitation | Heure de la prise de l'échantillon |
|--------|-----------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|
| Site 1 | -6,55 | -45,33 | 73,04 | 8h04 |
| Site 1 | -6,60 | -47,38 | 75,82 | 8h42 |
| Site 1 | -6,58 | -46,94 | 75,18 | 9h32 |
| Site 1 | -6,56 | -46,44 | 74,40 | 10h35 |
| Site 1 | -6,53 | -66,09 | 100 | 12h50 |
| Site 1 | -6,90 | -47,74 | 78,57 | 13h39 |
| Site 1 | -6,69 | -47,67 | 76,88 | 14h33 |
| Site 1 | -6,75 | -48,46 | 78,27 | 15h34 |
| Site 1 | -6,65 | -47,95 | 76,86 | 16h37 |
| Site 1 | -6,74 | -46,93 | 76,37 | 17h27 |
| Site 1 | -6,74 | -47,92 | 77,53 | 18h33 |
| Site 2 | -4,90 | -32,55 | 45,35 | 7h08 |
| Site 2 | -4,91 | -32,94 | 45,89 | 7h39 |
| Site 2 | -4,93 | -32,66 | 45,72 | 8h21 |
| Site 2 | -4,99 | -32,88 | 46,46 | 9h20 |
| Site 2 | -4,98 | -32,86 | 46,34 | 10h24 |
| Site 2 | -4,97 | -33,48 | 47,02 | 11h22 |
| Site 2 | -4,85 | -33,60 | 46,20 | 12h18 |
| Site 2 | -4,90 | -33,09 | 46,03 | 13h24 |
| Site 2 | -4,96 | -33,85 | 47,37 | 14h20 |
| Site 2 | -4,94 | -34,78 | 48,30 | 15h23 |
| Site 2 | -4,97 | -34,68 | 48,42 | 16h23 |
| Site 2 | -4,90 | -33,92 | 46,93 | 17h16 |
| Site 2 | -4,86 | -33,47 | 46,12 | 18h18 |

3.2.3 Volume potentiel d'eau accessible dans le système de flèches

Les résultats des tests de perméamètre de Guelph ainsi que les analyses granulométriques ont montré que les flèches littorales étaient constituées de sables grossiers et que cette distribution était assez homogène. En ce basant sur le Tableau 2.4 (cf. section 2.3.5), le sable correspond à une porosité totale comprise entre 20 et 40 % ce qui donne une porosité efficace entre 10 et 25 %. La Figure 3.15 présente les masques des différentes années utilisés pour calculer les volumes à partir de l'imagerie Lidar de 2011 et le Tableau 3.5 les volumes potentiels total et réel du corps sédimentaire avec la disponibilité en jours de l'eau contenu dans ces volumes.

Que ce soit pour le volume sédimentaire total ou réel et pour une porosité efficace de 10 ou 25 %, entre 1924 et 2013, le volume et la disponibilité en eau augmente. Par exemple, pour le volume sédimentaire réel avec une porosité efficace de 10 %, le volume d'eau passe de 91 292,23 à 102 149,39 m³ entre 1924 et 2013. Il est à noter une diminution du volume et de disponibilité en eau entre 1924 et 1963. Le temps de disponibilité de l'eau des flèches du marais de Cap Marteau dévoile que le volume potentiel de l'aquifère des flèches est assez faible. En effet, sur le volume sédimentaire total, la disponibilité en eau varie entre une quarantaine de jours (pe 10 %) et une centaine de jours (pe 25 %). Cette disponibilité diminue de moitié si l'on prend le volume sédimentaire réel. Bien que cette vision statique ne tienne pas compte ni de la recharge, ni de l'évapotranspiration, elle montre que le volume potentiel de l'aquifère est peu durable. Au maximum, avec le volume réel (pe 25 %), l'aquifère fournit pour deux mois d'eau et ce seulement pour une seule personne.

Tableau 3.5 : Volume potentiel total et réel de l'aquifère contenu dans les flèches

| | Année | Volume (m ³) | Porosité efficace à 10 % | | Porosité efficace à 25 % | |
|---------------------|-------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | Volume d'eau (m ³) | Disponibilité (jours arrondis) | Volume d'eau (m ³) | Disponibilité (jours arrondis) |
| VOLUME TOTAL | 1924 | 158 784,11 | 15 878,411 | 41 | 39 696,028 | 103 |
| | 1963 | 146 159,38 | 14 615,938 | 38 | 36 539,845 | 95 |
| | 1985 | 154 782,86 | 15 478,286 | 40 | 38 695,715 | 100 |
| | 1990 | 156 877,09 | 15 687,709 | 41 | 39 219,273 | 102 |
| | 2001 | 161 347,90 | 16 134, 790 | 42 | 40336,975 | 104 |
| | 2011 | 171 365,26 | 17 136,526 | 44 | 42 841,315 | 111 |
| | 2012 | 172 471,27 | 17 247,127 | 45 | 43 117,818 | 112 |
| | 2013 | 171 371,94 | 17 137,194 | 44 | 42 842,985 | 111 |
| VOLUME RÉEL | 1924 | 91 292,23 | 9 129,223 | 24 | 22823,057 | 59 |
| | 1963 | 84 028,84 | 8 402,884 | 22 | 21 007,210 | 54 |
| | 1985 | 88 720,39 | 8 872,039 | 23 | 22180,097 | 57 |
| | 1990 | 89 898,88 | 8 989,888 | 23 | 22 474,72 | 58 |
| | 2001 | 93 251,44 | 9 325,144 | 24 | 23 312,860 | 60 |
| | 2011 | 102 634,54 | 10 263,454 | 27 | 25 658,635 | 66 |
| | 2012 | 102 954,74 | 10 295,474 | 27 | 25 738,685 | 67 |
| | 2013 | 102 149,39 | 10 214,939 | 26 | 25 537,35 | 66 |

3.2.4 Discussion

Sur les deux années de niveaux piézométriques enregistrés, des tendances saisonnières se dessinent. À l'automne, le niveau piézométrique augmente avec les précipitations et les crues automnales. En hiver, le niveau diminue. Au printemps, la nappe se recharge par les crues, les précipitations printanières et la fonte des neiges. Enfin, en été, le niveau s'abaisse de manière régulière jusqu'aux premières recharges de l'automne. Ainsi, pour chaque année, il existe deux périodes d'étiage en hiver et en été et deux périodes de recharge à l'automne et au printemps. La recharge au printemps étant la plus importante (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015 ; Fillion, 2017). Ces variations diffèrent de ce qui est vu habituellement dans les climats tempérés et tropicaux où il n'existe qu'une période d'étiage au printemps et à l'été et qu'une période de recharge entre l'automne et l'hiver (Curreli *et al.*, 2012, Stratford *et al.* 2013 ; Robins et Jones, 2013).

L'observation des variations du niveau piézométrique dans le marais de Cap Marteau et la rivière Centrale montre une réponse rapide aux événements de pluie et de fonte des neiges lors des événements de recharge avec un décalage de quelques heures. À chacun de ces événements, le niveau piézométrique augmente rapidement. La décharge de l'aquifère est aussi rapide. En effet, sur le marais de Cap Marteau, la grande porosité et la perméabilité du sable des flèches font que l'eau emmagasinée lors de l'évènement de pluie ou de fonte de neige se décharge presque aussitôt que l'évènement météorique prend fin. Lors de la fonte des neiges, aux printemps, cette décharge est plus progressive et dure plus longtemps du fait de la quantité de neige accumulée durant l'hiver (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015 ; Fillion, 2017). Aussi, comme la plupart des aquifères côtiers, leur recharge provient des précipitations (pluie et neige ; Buffin-Bélanger *et al.*, 2015 ; Fillion, 2017). Ceci est confirmé avec les analyses par isotopes stables de l'eau où les précipitations représentent plus de 75 % pour le site 1 et plus de 45% pour le site 2. Le marais de Cap Marteau présente donc toutes les caractéristiques des nappes granulaires libres comme il a été

observé dans le PACES à propos des aquifères granulaires à nappe libre du Bas-Saint-Laurent (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015 ; Filion *et al.*, 2017). Cependant, les différentes analyses faites sur les séries des données piézométriques permettent de nuancer le rôle joué par la rivière et les marées sur les niveaux piézométriques du marais.

Les figures 3.8 et 3.9 montrent que les niveaux piézométriques dans le marais fluctuent comme le niveau de la rivière. Cette fluctuation n'est pas synchrone, mais décalée de quelques heures avec en premier une réponse de la rivière aux précipitations. Les analyses spectrales et par ondelettes montrent que les variations piézométriques sont fortement influencées par des fréquences faibles (proche de 0), donc par des événements de longues périodes. Ces influences aux périodes de retour de 5,6 mois correspondent aux événements de forte recharge de la nappe au moment des crues printanières et automnales. Cependant, les corrélations apportent une nuance à l'importance de l'action de la rivière sur la nappe. En effet, bien que les corrélations croisées démontrent l'existence d'une relation entre les différents piézomètres, cette relation est meilleure entre les piézomètres (r compris entre 0,55 et 0,8) qu'entre les piézomètres avec la rivière (r entre 0,25 et 0,4). La vitesse de propagation de l'eau de la rivière pour se rendre aux différents piézomètres (Tableau 3.3) est comparée avec la perméabilité du sol ($K = 31,48$ m/jr). Il en ressort que la vitesse de propagation pour chacun des piézomètres ($V_{CM1} = 432$ m/jr et $V_{CM5} = 4\,404$ m/jr) est de deux ordre de grandeur supérieure qu'à ce que permet la perméabilité du milieu. Ce n'est donc pas l'eau de la rivière qui entre profondément dans la flèche et fait varier les niveaux piézométriques, mais plutôt une onde dynamique qui se propage dans la nappe. Ce phénomène a déjà été observé sur une plaine alluviale de la rivière Matane lors d'un événement de crue (Cloutier, 2013 ; Cloutier *et al.*, 2014, Buffin-Bélanger *et al.*, 2015). Dans ces études, la crue provoque une onde dynamique qui se propage dans la plaine avec une vitesse 2 à 3 fois supérieure à ce que le milieu lui permet. Il est expliqué que l'amplitude de cette onde dépend de sa distance au chenal, de la magnitude de l'évènement et du temps de la montée de la crue. Bien que la rivière ne pénètre pas profondément dans

les flèches, les isotopes stables (Figure 3.14.b, site 1) permettent de voir que l'eau de la rivière s'infiltré pendant les marées hautes dans les bordures des flèches avant de se retirer avec la marée basse. D'autres études sur les flèches du marais de Cap Marteau seraient pertinentes à entreprendre afin de comprendre de manière plus poussée la connectivité entre la nappe, les marées et la rivière. Pour cela d'autres piézomètres pourraient être disposés à divers endroits sur les flèches pour une meilleure répartition spatiale. Ces dispositifs pourraient être couplés avec la prise de paramètres physico-chimiques et d'échantillons d'eau pour des analyses d'isotopes stables. Pour les isotopes stables, les piézomètres permettraient de prendre l'eau plus en profondeur et sur les différentes saisons. Ainsi, les entrées d'eau de mer et de la rivière dans les flèches seraient mieux renseignées.

Les séries de données des niveaux d'eau (Figure 3.7) laissent voir des variations marquées par le cycle lunaire provoquant mensuellement les marées de vives eaux et de mortes eaux. Ces signaux semblent plus marqués durant la période estivale et sur les piézomètres proches de la plage telle que CM3, CM4 et CM5. L'influence tidale moins marquée en hiver peut s'expliquer par l'influence limitée de la rivière en cette saison (étiage hivernal et présence de glace de rivière). Les analyses par ondelettes ainsi que l'analyse spectrale sur CM1 et CM5, montrent une influence faible à nulle des composantes de marée semi-diurne. L'enregistrement des composantes de marées est maximal sur la flèche active et s'atténue plus on se dirige au fond du marais, vers CM1. Cette atténuation de l'intensité des marées se fait avec la distance. Enfin, les isotopes stables de l'eau indiquent qu'il n'y a pas de mélange entre les eaux douces contenues dans la flèche et l'eau salée du Saint-Laurent. Cela s'explique par le fait que la nappe phréatique dans les flèches littorales se situe au-dessus du niveau marin. Ainsi, lors des marées hautes, l'eau de mer ne se mélange pas à l'eau douce, mais soulève l'eau douce du fait des différences de densité. À la différence de ce qu'on observe dans les aquifères côtiers non confinés qui montrent l'existence d'une boucle de recirculation dans les estuaires souterrains comme le montre Bratton (2010) ou comme il est observé aux Îles-de-la-Madeleine (Couturier *et al.*, 2017).

Pour ce qui est du volume potentiel des flèches, les résultats montrent que l'augmentation du volume en eau se fait en parallèle avec l'allongement et l'élargissement du corps sédimentaire et notamment de la flèche active. Une étude plus approfondie mettant en relation l'évolution de la largeur des flèches et des variations du niveau piézométrique permettrait de mettre en application le calcul développé par Robins *et al.* (2013) qui stipule que le niveau piézométrique de la nappe fluctue avec la largeur de la flèche comme expliqué dans l'état des connaissances. Malgré tout, les calculs montrent que l'aquifère côtier ne peut contenir qu'une petite quantité d'eau douce permettant pour une seule personne de tenir au maximum deux mois si elle n'est pas renouvelée. Donc, si elle venait à être utilisée par la population locale des chalets de villégiature, un bilan hydrique serait nécessaire. Il faudrait une étude approfondie prenant en compte notamment la recharge de l'aquifère afin d'établir un plan de gestion de l'eau adapté à ce site et pour ne pas voir l'eau disparaître ni modifier l'environnement du marais. L'utilisation du *LiDAR*, ici, est utile pour déterminer avec précision le volume du corps sédimentaire et sa capacité aquifère. La production d'imagerie *LiDAR* sur différentes années donnerait à voir l'évolution de ces volumes dans le temps. Ainsi, elles viendraient compléter par la même occasion l'étude de l'évolution historique du site qui ne permet de voir que les évolutions horizontales du relief.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce mémoire était de comprendre les dynamiques hydrogéologiques d'un aquifère granulaire côtier en milieu tempéré froid avec 1) une documentation sur la géomorphologie et 2) la compréhension de l'hydrogéologie des flèches. Pour cela, le marais de Cap Marteau (Trois-Pistoles) a été pris pour exemple. Dans le but de répondre à ces objectifs, nous avons étudié le site d'étude de manière historique en retraçant son évolution depuis 1924 à partir de photographies aériennes. Des échantillons de sédiments et d'eau ont été analysés pour connaître la composition du corps sédimentaire et l'origine de l'eau souterraine. Pour les variations piézométriques, des capteurs de pression ont permis le suivi durant deux années consécutives entre 2014 et 2016. Finalement, la compilation de l'ensemble de ces données a permis de faire une estimation du volume potentiel d'eau douce que peuvent contenir les flèches littorales.

Il en ressort que les flèches littorales du marais de Cap Marteau sont des reliefs très récents d'un point de vue géologique (moins de 1000 ans) et constitués de matériaux homogènes (sables moyens à grossiers). La flèche principale est en accrétion continue alors que les deux paléoflèches sont stables. Les variations des niveaux piézométriques montrent une nappe phréatique typique des aquifères granulaires à nappe libre comme il a été vu dans le PACES-NEBSL avec une recharge qui se fait par les précipitations, et notamment lors de la fonte des neiges au printemps. Dans le cas du Cap Marteau, le marais est traversé par une rivière qui influence en partie les variations de la nappe via la propagation d'une onde dynamique lors des périodes de crue. Ces variations sont aussi dues, dans une plus faible mesure, à l'influence des marées qui soulèvent la nappe d'eau lors des marées hautes. Enfin, de manière théorique, le volume potentiel de l'aquifère fluctue avec les variations

(érosion et accrétion) des flèches et notamment de la flèche active. Finalement, son potentiel est faible et permet de stocker seulement deux mois d'eau douce si elle n'est pas renouvelée.

Cette recherche permet d'enrichir les connaissances en hydrogéologie côtière. Faisant partie du PACES, elle participe à la compréhension du fonctionnement des aquifères côtiers granulaires au Québec. L'originalité de cette recherche provient du fait que le site d'étude se situe en milieu tempéré froid alors que la plupart des études sont réalisées en milieu tempéré ou tropical (Carol *et al.*, 2012 ; Carretero *et al.* 2013 ; Robins *et al.* 2013 ; Robins et Jones, 2013 ; Lagomasino *et al.*, 2014 ; Subba Rao *et al.*, 2014). De plus, cette étude à grande échelle a permis un suivi en continu (données prises aux deux minutes) des variations des niveaux piézométriques sur deux années consécutives, chose jamais faite auparavant.

D'un point de vue géomorphologique, cette recherche montre l'importance d'un suivi régulier de l'évolution du littoral et ouvre aussi d'autres perspectives en termes de gestion des ressources naturelles, ici les ressources en eau. Sur le marais de Cap Marteau, par exemple, la comparaison d'imagerie LiDAR jumelée avec des profils de plage permettrait de rendre compte des changements verticaux qui s'opèrent sur les flèches en fonction des saisons, mais aussi des années. Ces changements de forme pouvant avoir un impact sur le volume de l'aquifère. Refaire des datations serait aussi pertinent pour préciser l'histoire de la mise en place du marais et des flèches. Faire une étude au géoradar donnerait à voir la forme réelle de l'aquifère contenu dans les flèches. D'un point de vue hydrogéologique, cette étude pourrait être approfondie par des analyses chimiques (paramètre physico-chimiques, isotopes stables, radon) plus poussées afin de mieux rendre compte de la connectivité entre la nappe, la rivière Centrale et les marées. Il serait intéressant d'effectuer ces analyses à différentes échelles de temps : par saisons et en continu sur quelques jours ou quelques heures. Enfin, l'ensemble de ces résultats permettrait d'établir le bilan

hydrogéologique et la capacité d'emmagasinement des flèches. Bien sûr, ces recherches seraient transposables sur d'autres sites au Québec et au Canada. Ainsi, cette recherche montre l'importance de la multidisciplinarité pour comprendre ce type de milieu. C'est la collaboration entre les différentes disciplines qui permet d'augmenter les connaissances,. Une meilleure compréhension du fonctionnement des aquifères permet une meilleure gestion de leur ressource.

ANNEXES

ANNEXE I

**RÉSULTATS DES DATATIONS AU ¹⁴C EFFECTUÉES PAR MORIN (1981) SUR
LES FLECHES LITTORALES DU MARAIS DE CAP MARTEAU**

| Latitude | Longitude | Matériel | Datation | Laboratoire |
|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|
| 48° 9,5' N | 69° 7,9' O | Bois | Moderne | Ministère des Richesses Naturelles |
| 48° 9,5' N | 69° 8,0' O | Bois | Moderne | Ministère des Richesses Naturelles |
| 48° 9,6' N | 69° 8,1' O | Coquilles | Moderne | Ministère des Richesses Naturelles |
| 48° 9,7' N | 69° 8,2' O | Coquilles | Moderne | Ministère des Richesses Naturelles |
| 48° 9,7' N | 69° 8,0' O | Coquilles | 830 ±145 ans BP | Geochron |

ANNEXE II
LES COMPOSANTES DU POTENTIEL SOLAIRE ET LUNAIRE

(d'après Berroir *et al.*, 1984)

| Symbole | Nom de la composante | Vitesse angulaire Degré/heure | Période Jours ou heures |
|-----------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|
| | <i>Longues périodes</i> | | <i>Jours</i> |
| S_a | Annuelle | 00,041 068 64 | 365,242 189 66 |
| S_{sa} | Semi-annuelle | 00,082 137 28 | 182,621 094 83 |
| M_m | Mensuelle | 00,544 374 68 | 27,554 551 21 |
| M_{sf} | Variationnelle | 01,015 895 76 | 14,765 295 42 |
| M_f | Bimensuelle | 01,098 033 04 | 13,660 791 11 |
| | <i>Diurnes</i> | | <i>Heures</i> |
| Q₁ | Elliptique majeure | 13,398 660 92 | 26,868 356 63 |
| p₁ | Évectionnelle | 13,398 660 92 | 26,723 053 25 |
| O₁ | Lunaire principale | 13,943 035 60 | 25,819 341 66 |
| M₁ | Elliptique mineure | 14,496 693 96 | 24,833 248 26 |
| P₁ | Solaire principale | 14,958 931 36 | 24,065 890 22 |
| S₁ | radiationnelle | 15,000 000 00 | 24,000 000 00 |
| K₁ | Déclinationnelle luni-solaire | 15,041 068 64 | 23,934 469 59 |

| | | | |
|-----------------------|----------------------------|---------------|---------------|
| J₁ | Elliptique secondaire | 15,585 443 32 | 23,098 476 73 |
| Oo₁ | Lunaire du second ordre | 16,139 101 68 | 22,306 074 22 |
| | <i>Semi-diurnes</i> | | <i>Heures</i> |
| 2N₂ | Elliptique du second ordre | 27,895 354 45 | 12,905 374 45 |
| μ₂ | Variationnelle | 27,968 354 87 | 12,871 757 60 |
| N₂ | Elliptique majeure | 28,439 729 56 | 12,658 348 21 |
| λ₂ | Évectionnelle majeure | 28,512 583 16 | 12,626 004 38 |
| M₂ | Lunaire moyenne | 28,984 104 24 | 12,420 601 20 |
| L₂ | Elliptique mineure | 29,528 478 92 | 12,191 620 20 |
| T₂ | Elliptique majeure | 29,958 933 32 | 12,016 449 19 |
| S₂ | Solaire moyenne | 30,000 000 00 | 12,000 000 00 |
| K₂ | Declinationnelle | 30,082 137 28 | 11,967 234 80 |
| | <i>Tier-diurnes</i> | | <i>Heures</i> |
| M₃ | | 43,476 156 36 | 8,280 400 80 |
| S₃ | | 45,000 000 00 | |

*Les harmoniques de marée en gras sont celles agissant sur les niveaux piézométriques des flèches

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Almeida D, Neto C, Esteves L-S et Costa JC (2014) The impacts of land-use changes on the recovery of saltmarshes in Portugal. *Ocean and Coastal Management*, vol. 92, p. 40–49
- Álvarez-Romero JG, Pressey RL, Ban NC, Vance-Borland K, Willer C, Klein CJ et Gaines SD (2011) Integrated land-sea conservation planning: the missing links. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 42, p. 381–409
- Bélangier S, Buffin-Bélangier T, Chaillou G, Héту B, Audet-Gagnon F, Côté M, Thériault M, Bélangier V, Villeneuve R et Dubé J (2007) Les changements climatiques : mise en contexte des connaissances du climat passé, présent et futur pour le Bas-Saint-Laurent et le Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick. *Presse de l'Université du Québec à Rimouski*, 406 p.
- Bergkamp G et Orlando B (1999) Les zones humides et les changements climatiques : explorer les avenues de la collaboration entre la Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran 1971) et la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 37 p.
- Bernatchez P (2015) Bilan des connaissances sur l'érosion et la submersion côtière au Québec : enjeux, causes et perspectives. *Colloque sur la sécurité civile et incendie 2015*, 77 p.
- Bernatchez P et Dubois JM (2004) Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 58, n° 1, p. 45-71
- Bernatchez P, Fraser C, Friesenger 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, Fraser C, Lefaiivre D et Dugas S (2011) Integrating anthropogenic factor, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. *Ocean & Coastal Management*, vol. 54, p. 621-632.
- Bernatchez P, Boucher-Brossard G et Sigouin-Cantin M (2012). Contribution des archives à l'étude des événements météorologiques et géomorphologiques causant des dommages aux côtes du Québec maritime et analyse des tendances, des fréquences et des temps de retour des conditions météo-marines extrêmes. Rapport présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec, Université du Québec à Rimouski, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière, 140 p. - See more at: http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-rivesCotes-Quelle-situation_EstuaireGolf.htm#sthash.I3Hoopd2.dpuf
- Berroir A, Buat-Ménard P et Crépon M (1984) Encyclopédie scientifique de l'univers : la Terre, les eaux, l'atmosphère. Bureau des longitudes, Gauthier-Villars, vol. 1, Paris, 345 p.
- Biodiversité Canada (2018) Milieux Humides. Dans Biodiversité Canada. En ligne, < <https://biodivcanada.chm-cbd.net/fr/etat-tendances-ecosystemes-2010/milieux-humides?lang=Fr&n=F07D520A-1> > Consulté le 17/11/2018
- Blott SJ et Pye K (2001) Gradistat : a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 26, p. 1237-1248. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.261>
- Bourque et Dansereau (2010) Les eaux souterraines. Dans *Planète terre*, Université Laval. En ligne < <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/eaux.souterraines.html> > Consulté le 01/11/2018
- Bratton JF (2010) The three scales of submarine groundwater flow and discharge across passive continental margins. *The Journal of Geology*, vol. 118, p. 565-575
- Buffin-Bélanger T, Chaillou G, Cloutier CA, Touchette M, Héту B, et McCormack R (2015) Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) : Rapport final. 199 p.

- Bureau de recherches géologiques et minières (2018) Caractéristiques principales des nappes : les paramètres hydrodynamiques (définitions). Dans système d'information pour la gestion des eaux souterraines en seine-normandie. En ligne < <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article313#header> > Consulté le 19/12/2018
- Carol ES, Dragani WC, Kruse EE et Pousa JL (2012) Surface water and groundwater characteristics in the wetlands of the Ajó River (Argentina). *Continental Shelf Research*, vol. 49, p. 25–33
- Carretero S et Kruse E (2015) Iron and manganese content in groundwater on the northeastern coast of the Buenos Aires Province, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, p. 1983-1995
- Carretero S, Braga F, Kruse E et Tosi L (2014) Temporal analysis of the changes in the sand-dune barrier in the Buenos Aires Province, Argentina, and their relationship with the water resources. *Applied Geography*, vol. 54, p. 169-181
- Carretero S, Rapaglia J, Bokuniewicz et Kruse E (2013) Impact of sea-level rise on saltwater intrusion length into the coastal aquifer, Partido de La Costa, Argentina. *Continental Shelf Research*, vol. 61–62, p. 62–70
- Chaillou G, Touchette M, Rémillard AM, Buffin-Bélanger T, St-Louis R, Héту B et Tina G (2012) Synthèse de l'état des connaissances sur les eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine - Impacts de l'exploration et de l'exploitation des ressources naturelles sur celles-ci. Université du Québec à Rimouski, Département de biologie, chimie et géographie, Synthèse remise au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la faune et des Parcs (MDDEFP) et au Ministère des Ressources naturelles (MRN), Décembre 2012, 200 p.
- Cheng AHD et Ouazar D (2003) Coastal aquifer management: monitoring, modeling & case studies. Lewis Publishers, 280 p. ISBN: 1-56670-605-X.
- Cloutier CA (2013) Vers l'analyse à haute résolution spatiale et temporelle de la connectivité entre une rivière et son aquifère alluvial lors d'événements de crue. Université du Québec à Rimouski, mémoire de maîtrise en géographie, 84 p.
- Cloutier CA, Buffin-Bélanger T et Larocque M (2014) Controls of groundwater floodwave propagation in a gravelly floodplain. *Journal of Hydrology*, vol 511, p. 423-431. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.02.014.

- Comité ZIP Côte-Nord du Golfe (2007) L'érosion des berges au Québec maritime. Document d'information, 50 p.
- Comte JC (2008) Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers : application à trois contextes climatiques contrastés (Canada, Nouvelle-Calédonie, Sénégal), thèse, 200 p.
- Conseil des Académies Canadiennes (2009) La gestion durable des eaux souterraines au Canada, 292 p.
- Couillard et Grondin (1986) La végétation des milieux humides du Québec. Les publications du Québec, 400 p.
- Couturier M (2017) Biogéochimie des eaux interstitielles des plages de sable nordiques. Université du Québec à Rimouski, thèse de doctorat en biologie, 225 p.
- Curreli A, Wallace H, Freeman C, Hollingham M, Stratford C, Johnson H et Jones L (2013) Eco-hydrological requirements of dune slack vegetation and implications of climate change. *Science of the Total Environment*, vol. 443, p. 910-919
- Custodio E, Bocanegra EM, Hernández MA, Usunoff E (2005) Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. *Groundwater and human development*, Taylor & Francis, London, UK, p. 15–38, ISBN 987-544-063-9.
- Davidson NC (2014) How much wetland has the world lost ? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, vol. 65 (10), p. 934-941. <http://dx.doi.org/10.1071/MF14173>
- De Vries JJ (1994) Willem Badon Ghilben and Johan M.K. Pennink pioneers of coastal-dune hydrology. *Applied Hydrogeology*, vol. 4, p. 55-57
- Dionne JC (1972) La terrasse et la falaise Micmac, p. 34-38. *In* Le Quaternaire de la région de Rivière-du-Loup / Trois-Pistoles, côte sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Environnement Canada, Centre de recherches forestières des Laurentides, Québec, Rapport d'information Q-F-X-27, 95 p.
- Dionne JC (1986) Érosion récente des marais intertidaux de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 40, n°3, p. 307-323

- Dionne JC (2002a) Une nouvelle courbe du niveau marin relatif pour la région de Rivière-du-Loup (Québec). *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 56, n°1, p. 33-44
- Dionne JC (2002b) État des connaissances sur ligne de rivage Micmac de J. W. Goldthwait (estuaire Saint-Laurent). *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 56, n°1, p. 97-121
- Drapeau G (1992) Sediment Dynamics in the St. Lawrence Estuary. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 46, p. 233–242.
- Drejza S, Friesinger S et Bernatchez P (2014) Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec. Volume 1, Projet X008.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au Ministère des Transport du Québec Rapport final, 226 p. + annexes
- Ferguson G et Gleeson T (2012) Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature climate change*, vol. 2, p. 342-345
- Ferreira O (2006) The role of storm groups in the erosion of sandy coasts. *Wiley InterScience, Earth Surface Processes and Landforms*, vol.31, p. 1058-1060
- Filion E (2017) La problématique des nitrates dans l'eau souterraine en milieu agricole: du sol à l'aquifère. Cas de l'aire d'alimentation de l'eau souterrain de la municipalité de Sainte-Luce, Québec, Canada. Université du Québec à Rimouski, mémoire de maîtrise en géographie, 182 p.
- Gardner RC, Barchiesi S, Beltrame C, Finlayson CM, Galewski CM, Harrison I, Paganini N, Perennou C, Pritchard DE, Rosenqvist A et Walpole M (2015) State of the World's Wetlands and their Services to People : A compilation of recent analyses. Ramsar Briefing Note no. 7. Gland, Switzerland : Ramsar Convention Secretariat. 21 p.

- GIEC (2014) Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques, résumé à l'intention des décideurs, résumé technique et foire aux questions. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V et Midgley PM (dir. publ.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, Etats-Unis d'Amerique. 222 p.
- Grootjans AP, Ernst WHO Stuyfzand PJ (1998) European dune slacks: strong interactions of biology, pedogenesis and hydrology. *Trends Ecol Evol*, vol. 13, p. 96-100.
- Grootjans AP, Hartog PS, Fresco LFM et Esselink H (1991) Succession and fluctuation in a wet dune slack in relation to hydrological changes. *J Veg Sci*, vol. 2, p. 545-54
- Grootjans AP, Sival FP et Stuyfzand PJ (1996) Hydro-geochemical analysis of a degraded dune slack. *Vegetatio*, vol. 126, p. 27-38
- Guilcher A (1954) *Morphologie littorale et sous-marine*, Persée, 209 p.
- Gulli E, Mangan Cet Mudry J(2012) *Hydrogéologie : objets, méthodes, applications* (3^{ème} édition). Dunod, 340 p.
- Heiss JW et Michael HA (2014) Saltwater-freshwater mixing dynamics in a sandy beach aquifer over tidal, spring-neap, and seasonal cycles. *Water Resources Research*, vol. 50, p. 6747-6766
- Hétu B (1998) La déglaciation dans la région de Rimouski, Bas Saint-Laurent (Québec) : indices d'une récurrence glaciaire dans la Mer de Goldthwait entre 12 400 et 12 000 BP. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 52, p. 325-347.
- Hoskin scientifique (2019) Hobo U20-001. Dans *Produit*. En ligne < <http://www2.hoskin.qc.ca/productsInfo.php?pID=3155&depID=1&cmpID=104,108,Onset&divID=> > Consulté le 23/02/2019
- Hsissous Y, Mudry J, Mania J, Bouchaou L et Chauve P (1997) Dynamique et salinité de la nappe côtière d'Agadir (Maroc), influence du biseau salée et des faciès évaporitiques. *Hydrochemistry (Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997)* IAHS Publ, vol. 244, p. 73-162

Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (2008) Dérive littorale. Dans Glossaire. En ligne < http://envlit.ifremer.fr/infos/glossaire/d/derive_littorale > Consulté le 23/02/2019

Jolicoeur S, Giangioppi M et Bérubé D (2010) Réponses de la flèche littorale de Bouctouche (Nouveau-Brunswick, Canada) à la hausse du niveau marin relatif et aux tempêtes entre 1944 et 2000. Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 16, n° 1, p. 91-108.

Jolly ID, McEwan KL et Holland KL (2008) A review of groundwater–surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology. *Ecohydrology*, vol. 1, p. 43-58

Jones MLM, Reynolds B, Brittain SA, Norris DA, Rhind PM et Jones RE (2006) Complex hydrological controls on wet sand dune slacks: the importance of local variability. *Science of the Total Environment*, vol. 372, p. 266–77

Joubert JE, Cauchon MH, Hubert C et Bachand E (2014) Au fil de l'eau, Caractérisation biophysique de l'Anse des Riou et du bassin versant de la rivière Centrale. Comité ZIP du Sud-de-l'Estuaire et Organisme des bassins versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent, Rimouski. 151 p.

Juneau MN (2012) Hausse récente du niveau marin relatif aux Îles-de-la-Madeleine. Université du Québec à Rimouski, mémoire de maîtrise en géographie, 174 p.

Lagomasino D, Price RM, Herrera-Silveira J, Miralles-Wilhelm F, Merediz-Alonso G et Gomez-Hernandez Y (2014) Connecting groundwater and surface water sources in groundwater dependent coastal wetland and estuaries : Sian Ka'an biosphere reserve, Quintana Roo, Mexico. *Estuaries and Coasts*, 20 p.

Lammerts EJ, Maas C et Grootjans AP (2001) Groundwater variables and vegetation in dune slacks. *Ecological engineering*, vol. 17, p. 33-47

Lemmen DS, Warren FJ, James TS et Mercer Clarke CSL éditeurs (2016). Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 280 p.

Liu Q et Mou X (2014) Interaction between surface water and groundwater : key processes in ecological restoration of degraded coastal wetland caused by reclamation. *Wetlands*, vol. 36, p. 1-8

- Loáiciga HA, Pingel TJ et Garcia ES (2012) Sea water intrusion by sea-level rise : Scenarios for the 21st century. *Ground Water*, vol. 50, p. 37-47
- Masterson JP, Fienen MN, Thieler ER, Gesch DB, Gutierrez BT et Plant G (2013) Effect of sea-level rise on barrier island groundwater system dynamics – ecohydrogeological implications. *Ecohydrology*, Published online in Wiley Online Library
- Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques (2018a) Quelles est la situation et qu'elles sont les causes ? Dans Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec. Rapport en ligne < http://www.environnement.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-rivesCotes-Quelle-situation_EstuaireGolf.htm > Consulté le 01/11/2018
- Ministère de la sécurité publique du Québec (2012) Processus d'érosion selon les types de côtes. Dans Ministère de la sécurité publique du Québec. En ligne < <https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-civile/surveillance-du-territoire/erosion-cotiere/processus-derosion.html> > Consulté le 01/11/2018
- Ministère de la transition écologique et solidaire (2014) Écoulement souterrains. Dans Wikigeotech. En ligne < http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Wikigeotech:Ecoulements_souterrains > Consulté le 19/12/2018
- Moffett KB, Gorelick SM, McLaren RG et Sudicky EA (2012) Salt marsh ecohydrological zonation due to heterogeneous vegetation–groundwater–surface water interactions. *Water Resources Research* 48, W02516
- Morin R (1981) Contribution à la sédimentologie de la région de Trois-Pistoles. Université du Québec à Rimouski, Département océanographie, thèse de maîtrise non publique, 118 p.
- Nuttle WK et Portnoy JW (1992) Effect of Rising Sea Level on Runoff and Groundwater Discharge to Coastal Ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol 34, p. 203-212
- Oude Essink GHP, Van Baaren ES and De Louw PGB (2010) Effects of climate change on coastal groundwater systems : a modeling study in the Netherlands, *Water Resour. Res.*, 46 p. W00F04, doi:10.1029/2009WR008719

- Perillo GME, Wolanski EJ, Cahoon DR et Brinson MM (2009) Coastal wetlands : an integrated ecosystem approach. Elsevier, Oxford, 974 p.
- Pinot J-P (1998) La gestion du littoral, Tome 1, Institut océanographique, Paris, 400 p.
- Prichonnet G (1977) La déglaciation de la vallée du Saint-Laurent et l'invasion marine contemporaine. Géographie physique et Quaternaire, vol. 31, n° 3-4, p. 323-345.
- Quintin C, Bernatchez P et Buffin-Bélangier T (2006) Géomorphologie et diversité végétale des marais du Cap Marteau et de l'Isle-Verte, estuaire du Saint-Laurent, Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 60, numéro 2, p. 149-164
- Regnauld H, Riwalenn R, Proust JN, Tiercelin JJ, Pustoc'H F (2016) Evolution of a coastal beach/barrier/marsh system in response to sea level rise, storm events and human impacts : a case study of Trunvel marsh, western Brittany. Michael E. Meadows, Jiun-Chuan Lin (Eds.). *Geomorphology and Society*, Springer, p. 231-243, *Advances in Geographical and Environmental Sciences*, 978-4-431-55998-6. [〈10.1007/978-4-431-56000-5_14〉](https://doi.org/10.1007/978-4-431-56000-5_14). [〈insu-01441783〉](https://doi.org/10.1007/978-4-431-55998-6_6)
- Rhymes J, Wallace H, Fenner N et Jones L (2014) Evidence for sensitivity of dune wetlands to groundwater nutrients. *Science of the Total Environment*, vol.490, p. 106-113
- Robins NS et Jones MLM (2013). Ecohydrological 'indicators of alteration'-robust measure of change in dune slacks. *Ecohydrol*, vol. 6, p. 256–263
- Robins NS, Pye K et Wallace H (2013) Dynamic coastal dune spit : the impact of morphological change on dune slacks at Whiteford Burrows, South Wales, UK – *J Coast Conserv*, vol. 17, p. 473-482
- Savard JP, Bernatchez P, Morneau F et Saucier F (2009) Vulnérabilité des communautés côtières de l'est du Québec aux impacts des changements climatiques. *La Houille Blanche*, vol. 2, p. 59-66. - See more at : http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-rivesCotes-Quelle-situation_EstuaireGolf.htm#sthash.I3Hoopd2.dpuf
- Scopus (2018) Coastal hydrogeology. Dans Scopus. En ligne < www.scopus.com > Consulté le 6/04/2018

- Senneville S, St-Onge-Drouin S, Dumont D, Bihan-Poudec AC, Belemaalem Z, Corriveau M, Bernatchez P, Bélanger S, Tolszczuk-Leclerc S et Villeneuve R (2013) Rapport final : modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques. ISMER-UQAR, Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec, 384 p.
- Sharpley C (1995) Geoconservation in forest management ; principles and procedures. Forestry Tasmania, vol. 7, p. 37-50
- Stratford CJ, Robins NS, Clarke D, Jones L et Weaver G (2013) An ecohydrological review of dune slacks on the west coast of England and Wales. *Ecohydrol.* vol. 6, p. 162-171
- Subba Rao N, Vidyasagar G, Surya Rao P et Bhanumurthy P (2014) Assessment of hydrogeochemical processes in a coastal region : application of multivariate statistical model. *Journal geological society of india*, vol. 84, p. 494-500
- Udden, JA (1914) Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 25, p. 655-744
- Van Wierts S, Bernatchez P et Certain R (2016) Effet de protection du pied de glace sur une côte basse sablonneuse en contexte de changements climatiques en milieu tempéré-froid. Colloque sur les risques naturels au Québec (ACFAS), conférence
- Verruijt A (1968) A note on the Ghyben-Herzberg formula. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, XIII, vol. 4, p. 43-46
- Vouillamoz JM, Hoareau J, Grammare M, Caron D, Nandagiri L et Legchenko A (2012) Quantifying aquifer properties and freshwater resource in coastal barriers : a hydrogeological approach at Sasihithlu (Karnataka stata, India). *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, p. 4387-4400
- Wang X, Li H, Yang J, Wan L, Wang X, Jiang X et Guo H (2014) Measuring in situ vertical hydraulic in tidal environments. *Advances in Water Resources*, vol. 70, p. 118-130
- Wentworth, CK (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, vol. 30, p. 377-392

Zhang ZF, Groenevelt PH et Parkin GW (1998) The well shape-factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter. Soil Tillage Res., vol. 49, p. 219-221