



**Géoarchéologie du site de l'épave du *Scotsman* : géophysique,
sédimentologie, courantométrie.**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© **Quentin Beauvais**

Mars 2026

Composition du jury :

André Pellerin, président du jury, ISMER-UQAR

Guillaume St-Onge, directeur de recherche, ISMER-UQAR

Dany Dumont, codirecteur de recherche, ISMER-UQAR

Najat Bhiry, examinatrice externe, Université Laval

Dépôt initial le 30 octobre 2025

Dépôt final le 13 mars 2026

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 Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur, Guillaume St-Onge, pour la confiance qu'il m'a accordée dans la réalisation de ce projet, mené parallèlement à mon emploi d'auxiliaire de recherche au sein de son laboratoire. Il m'a offert une grande liberté dans la conception du travail, et je suis très heureux d'avoir pu mener ce projet à terme grâce à son encadrement. Je souhaite également remercier mon co-directeur, Dany Dumont, pour son aide précieuse dans l'analyse des données de courantométrie et pour le temps qu'il a consacré aux discussions qui ont permis d'en approfondir l'interprétation. Je remercie aussi mon président de jury, André Pellerin, et Najat Bhiry pour avoir accepté d'être évaluatrice externe de mon mémoire.

Mes remerciements vont aussi à Jean Carlos Montero Serrano, pour son soutien dans l'analyse des données géochimiques et pour ses conseils concernant leur interprétation. Je tiens à remercier les membres du Centre Interdisciplinaire de Développement en Cartographie des Océans (CIDCO) pour leur aide lors de l'acquisition des données bathymétriques et géophysiques à bord du navire de recherche *F.-J. Saucier*. Je souhaite souligner tout particulièrement la contribution du capitaine Alain St-Pierre, ainsi que des hydrographes Sylvain Gautier, Julien Desrochers, Papa Médoune Ndir et Mohamed-Ali Chouaer, pour leur appui sur le terrain et leur assistance lors du traitement des données. Je souhaite également remercier les membres de l'équipe de plongée, Dany St-Cyr, Édouard Thériault, Luc Garand et Olivier Barthell, pour leur précieuse participation au prélèvement de la carotte sédimentaire et à l'installation des courantomètres autour de l'épave.

Enfin je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné dans ce projet que ce soit de près à travers des discussions sur mon travail ou de loin lors de nos parties de tarots endiablées du midi ou des nombreuses autres activités partagées. Je veux remercier plus particulièrement ma famille toujours présente et bienveillante, ainsi que ma conjointe, Morgane Brunet, que j'ai eu la chance de rencontrer au cours de ce projet. Elle a été d'un

grand soutien et m'accompagne dans tous mes projets, j'ai hâte de poursuivre de nombreuses aventures dans notre vie commune.

RÉSUMÉ

Le 20 novembre 1846, le navire marchand *Scotsman* fait naufrage au large de l'île du Bic après avoir heurté des récifs lors d'une violente tempête. L'épave repose aujourd'hui à 25 mètres de profondeur, sur la marge continentale de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Dans le cadre du projet *Voir la mer*, soutenu par le programme Odysée Saint-Laurent du Réseau Québec maritime, une équipe multidisciplinaire a mené plusieurs missions sur le terrain pour étudier ce site submergé. L'objectif de cette étude était de documenter la morphologie du fond, la dynamique sédimentaire et hydrodynamique autour de l'épave, ainsi que son état de conservation. Les résultats ont permis de cartographier les zones d'érosion et d'accumulation sédimentaire à proximité de l'épave et de caractériser la composition lithologique du substrat marin. L'hydrodynamisme local joue un rôle clé dans la distribution des sédiments et dans la dégradation progressive de la structure. Les interactions entre les courants marins et l'épave créent des formes d'affouillement variables selon la nature du substrat et l'exposition aux flux hydrodynamiques. Une carotte sédimentaire prélevée à proximité de l'épave a été analysée pour ses propriétés géochimiques et datée à l'aide du ^{210}Pb . Ces analyses ont permis d'identifier une couche sédimentaire distincte, interprétée comme le témoin du dépôt initial de l'épave sur le fond marin. Cette couche présente des caractéristiques granulométriques, géochimiques et d'oxydoréduction propres à un événement de remobilisation rapide des sédiments. En croisant les données géophysiques, sédimentologiques et hydrodynamiques, l'étude met en lumière les mécanismes d'interaction entre les épaves immergées, les sédiments et les courants. Elle contribue à une meilleure compréhension des processus de dégradation à long terme des structures submergées et constitue un exemple concret de l'apport des géosciences dans la gestion et la préservation du patrimoine archéologique subaquatique.

Mots clés : géoarchéologie, épave, variabilité sédimentaire, hydrodynamisme

ABSTRACT

On November 20, 1846, the merchant ship *Scotsman* sank off Bic Island after hitting reefs during a violent storm. Today, the wreck lies at a depth of 25 meters on the continental margin of the St. Lawrence maritime estuary. As part of the *Voir la mer* project, supported by the Odyssee Saint-Laurent program of the Réseau Québec maritime, a multidisciplinary team carried out several field missions to study this submerged site. The aim of the study was to document the morphology of the seabed, the sedimentary and hydrodynamic dynamics around the wreck, and its state of preservation. The results enabled us to map areas of erosion and sediment accumulation in the vicinity of the wreck, and to characterize the lithological composition of the marine substrate. Local hydrodynamics play a key role in sediment distribution and the progressive degradation of the structure. Interactions between marine currents and the wreck create variable scouring patterns depending on the nature of the substrate and exposure to hydrodynamic flows. A sediment core taken near the wreck was analyzed for its geochemical properties and dated using ^{210}Pb . These analyses allowed the identification of a distinct sedimentary layer, interpreted as evidence of the wreck's initial deposition on the seabed. This layer displays granulometric, geochemical and redox characteristics typical of a rapid sediment remobilization event. By combining geophysical, sedimentological and hydrodynamic data, the study sheds light on the interaction mechanisms between submerged wrecks, sediments and currents. It contributes to a better understanding of the long-term degradation processes of submerged structures, and is a concrete example of the contribution of geosciences to the management and preservation of underwater archaeological heritage.

Keywords: geoarchaeology, shipwreck, sediment variability, hydro dynamism

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ.....	ix
ABSTRACT.....	x
TABLE DES MATIÈRES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES FIGURES.....	xiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 MÉTHODOLOGIE.....	11
1.1 BATHYMETRIE ET GEOPHYSIQUE.....	12
1.2 SEDIMENTOLOGIE.....	13
1.2.1 Propriétés physiques et géochimiques.....	13
1.2.2 Modèle d'âge.....	17
1.3 COURANTOMETRIE.....	19
CHAPITRE 2 RÉSULTATS.....	20
2.1 MORPHOLOGIE DE L'ÉPAVE ET STRUCTURES SEDIMENTAIRES DE SURFACE.....	20
2.2 VARIABILITE DES SEDIMENTS AU COURS DU TEMPS.....	23
2.3 CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES.....	26
CHAPITRE 3 DISCUSSION.....	30
3.1 VARIABILITE SEDIMENTAIRE AUTOUR DE L'ÉPAVE.....	30
3.2 ROLE DES COURANTS DANS LA VARIABILITE SEDIMENTAIRE.....	33
3.3 SIGNATURE DE L'ARRIVEE DE L'ÉPAVE SUR LE FOND.....	37
3.4 SEDIMENTATION POST DEPOT DE L'ÉPAVE.....	41

3.5 DEGRADATION DE L'ÉPAVE AU COURS DU TEMPS.....	42
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	45
Annexe I.....	47
Annexe II.....	48
Annexe III.....	49
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Évolution de la couverture sédimentaire locale autour de débris de l'épave illustrée par des images obtenues par les plongeurs sur le pourtour de l'épave du <i>Scotsman</i> de 2019 à 2021.....	32
---	----

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Représentation d'un brick (A) accompagné d'une carte illustrant les hypothèses d'échouage du *Scotsman* lors de la tempête du 20 novembre 1846 (B). Le navire aurait heurté les récifs du Nord-Ouest ou les récifs du Nord-Est avant de sombrer un peu plus au large (Delmas 2022). 6
- Figure 2. Carte du site d'étude montrant la position de l'épave dans la région du Bic maritime, les positions des deux carottes sédimentaires Scotsman2021 et COR2002-01BC-C ainsi que l'emplacement des deux courantomètres B1267 et B1274 par rapport à l'épave. 7
- Figure 3. Carte des sédiments superficiels dans la région de Rimouski et du Bic maritime issue de la carte de la géologie des sédiments superficiels et relief ombré du fond marin, estuaire du Saint-Laurent, Québec (Pinet et al. 2011). 8
- Figure 4. Vedette hydrographique *F.J. Saucier* équipée pour effectuer les levés de bathymétrie et de géophysique lors des expéditions de 2019 et 2020 (A), opération de plongée sous-marine sur l'épave du *Scotsman* pour la réalisation du carottage et la disposition des courantomètres lors de l'expédition de 2021 (B), photo de l'épave du *Scotsman* réalisée lors d'une plongée sur l'épave (C) et système de carottage en plongée et courantomètres (tubes bleus) déployés en septembre 2021 (D). 10
- Figure 5: Représentation des différents types de levés effectués sur le site de l'épave du *Scotsman*, incluant les relevés de bathymétrie et géophysiques : (A) échosondeur multifaisceaux, (B) sondeur de sous-surface, (C) sonar à balayage latéral et (D) magnétomètre marin, (E) les prélèvements sédimentaires et (F) les mesures de courantométrie. 11
- Figure 6. MSCL-S de Geotek (A), MSCL-XCT de Geotek (B), granulomètre laser Mastersizer 3000 de Malvern Panalytical (C) et MSCL-XZ de Geotek (D). 16
- Figure 7. Spectrophotomètre alpha EGG-Ortec modèle 576A. 18
- Figure 8. De gauche à droite ; image acoustique de l'épave du *Scotsman* obtenue à l'aide du sonar à balayage latéral, surface bathymétrique du site d'épave du *Scotsman* et surface de réflectivité issue des données de l'échosondeur multifaisceaux montrant l'orientation des lignes sismiques 24 et 27..... 21

Figure 9. Profils sismiques des lignes 24 (longitudinale) et 27 (transversale) acquis sur le site de l'épave du <i>Scotsman</i> . En orange : signature de l'épave dans les couches superficielles. En vert : couche sédimentaire sous-jacente.	22
Figure 10. Photographies de l'épave et des structures sédimentaires du fond marin, extraites des vidéos réalisées par l'équipe de plongeurs. La carte bathymétrique du site indique la localisation des prises de vue.....	23
Figure 11. Propriétés physiques, géochimiques et sédimentologiques de la carotte Scotsman2021, associées à la photographie de la carotte, à l'image radiographique (rayons X) et au modèle d'âge. Les couleurs indiquent les différentes couches décrites en section 5.b. Le modèle d'âge repose sur les mesures de ^{210}Pb et la date de naufrage du <i>Scotsman</i> ; la courbe en pointillés illustre sa projection au-delà des résultats ^{210}Pb . Le taux de sédimentation a été interpolé entre les âges disponibles, la courbe en pointillés représentant son extrapolation.	25
Figure 12: Vitesse du courant à la station B1267 (à 10 mètres de l'épave) et B1274 (au plus proche de l'épave) sur la période du 6 au 29 septembre 2021 et vitesse du vent à la station météorologique de Pointe-au-père pour le mois de septembre 2021.....	27
Figure 13. (A) Courants de fond mesurés sur la marge continentale à l'aide du courantomètre B1267 dans la région du Bic maritime entre le 6 et le 29 septembre 2021. (B) Vents enregistrés à la station météorologique de l'île Bicquette sur la même période.	28
Figure 14. Courants de fond enregistrés à 1 mètre en amont de l'épave avec le courantomètre B1274. (A) Période du 6 au 11 septembre 2021 ; (B) période du 22 au 29 septembre 2021.....	29
Figure 15. (A) Carte bathymétrique de la zone de l'épave du <i>Scotsman</i> obtenue à partir des données multifaisceaux de 2019. (B) Carte des différences entre les données multifaisceaux de 2019 et de 2013, mettant en évidence les zones d'érosion (rouge) et d'accumulation (bleu).....	31
Figure 16. Schémas et observations liés à la dynamique sédimentaire autour des épaves submergées. (A) Modèle d'écoulement et développement de vortex autour d'une épave entièrement submergée (d'après Quinn, 2006). (B) Modèles conceptuels des processus d'érosion et de dépôt autour des épaves (d'après Quinn et Smyth, 2018). (C) Application au site du <i>Scotsman</i> : cartographie des zones d'accumulation, d'érosion et d'affouillement obtenue à partir des données bathymétriques de 2019.....	35
Figure 17. Statistiques des courants mesurés pendant les 12 heures suivant la marée basse semi-diurne, entre le 22 et le 29 septembre 2021. Les lignes noires	

représentent les vitesses moyennes, les zones gris foncé indiquent l'écart-type, et les zones gris pâle montrent les valeurs extrêmes. Courantomètres : B1267 (A, B) et B1274 (C, D). Les panels A et C correspondent aux courants totaux, B et D aux courants résiduels..... 37

Figure 18. Diagramme Q7/4 comparant les carottes SCOTSMAN2021 et COR2002-01BC-C. Les deux pôles reflètent la variabilité de la sédimentation : la matière organique altérée (orange pour SCOTSMAN2021, noir pour COR2002-01BC-C) et la couche de dépôt carbonaté plus détritique dans la carotte SCOTSMAN2021 (rouge)..... 39

Figure 19. Diagramme Si/Ca versus Mn/Fe pour les carottes SCOTSMAN2021 et COR2002-01BC-C. Cette représentation permet d'identifier la couche détritique et la couche de remise en suspension présentes dans la carotte SCOTSMAN2021. 40

Figure 20. (A) Diagramme ternaire de la granulométrie à chaque centimètre des sédiments de la carotte SCOTSMAN2021 avant le dépôt de l'épave sur le fond. (B) Diagramme ternaire de la granulométrie à chaque centimètre des sédiments de la carotte SCOTSMAN2021 après le dépôt de l'épave sur le fond. 42

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Mise en contexte du projet

Dans le cadre des fouilles archéologiques, l'étude des paléoenvironnements entourant les sites archéologiques est devenue essentielle pour comprendre les processus de formation et l'évolution de ces sites au cours du temps. Cette approche, appelée géoarchéologie, est définie comme une discipline des sciences de la Terre mobilisée pour coordonner les études paléoenvironnementales sur les sites archéologiques ou pour reconstituer les paléomilieus à distance des zones d'occupation humaine (Berger, 1997). Les études géoarchéologiques appliquées aux sites historiques et préhistoriques permettent ainsi d'évaluer les processus de dégradation des ressources archéologiques à travers le temps, notamment en analysant les dynamiques de transport, d'enfouissement et de préservation des vestiges.

La géoarchéologie joue donc un rôle clé dans la reconstitution des dépôts archéologiques en identifiant les mécanismes naturels et anthropiques ayant conduit à leur formation. Pour ce faire, elle s'appuie sur plusieurs disciplines des sciences de la Terre, telles que la sédimentologie, la géochimie, la géochronologie et la géographie (Waters, 1992, Couture et al., 2016). Ces approches permettent de reconstruire les paléoenvironnements, de retracer le développement historique des sites, d'identifier les activités humaines qui y sont associées et d'interpréter les relations entre les sociétés et leur environnement (Hassan, 1978, Elias, 2021). Par ailleurs, en étudiant les transformations environnementales survenues au fil des siècles, la géoarchéologie offre un éclairage précieux sur les stratégies d'adaptation des sociétés humaines face aux fluctuations climatiques et aux changements géologiques. Elle contribue ainsi à une compréhension plus globale et intégrée des interactions entre l'humain et son milieu.

En milieu terrestre, l'archéologie bénéficie d'un accès facilité aux sites, permettant l'échantillonnage des sols, de la végétation et des vestiges eux-mêmes (e.g., Lisé-Pronovost et al. 2019, Barbel 2019, Elias 2021, Labrie 2024). À l'inverse, en milieu subaquatique, les recherches sont plus complexes en raison des conditions d'accès restreintes et de la visibilité réduite. L'intervention de plongeurs spécialisés est souvent requise pour inventorier et analyser les artefacts immergés.

L'essor des techniques de télédétection, amorcé dans les années 1970-1980 par l'utilisation des magnétomètres marins et des sonars à balayage latéral, et largement diffusé dans les années 1990 avec le développement des échosondeurs multifaisceaux, a favorisé le développement de la géoarchéologie subaquatique (e.g., Blake 1995, Faulk 2019, Violante 2025). De nombreuses études se sont basées sur l'utilisation de ces outils dans le but de détecter et de cartographier des sites archéologiques subaquatiques. Des auteurs comme Plets et al. (2011) et Westley et al. (2019) utilisent les échosondeurs multifaisceaux afin de localiser les sites d'épaves. D'autres auteurs vont plus loin afin de mieux comprendre la morphologie des sites d'épaves en intégrant des levés géophysiques avec sonars à balayage latéral, magnétomètres marins ou encore sondeurs de sous-surface (e.g., Quinn et al. 1997, 2000, 2002, Gron et al. 2015, Matei et al. 2015).

Au-delà de la simple détection des sites, l'étude de l'environnement entourant les sites archéologiques subaquatiques joue un rôle clé dans la compréhension de l'évolution des sites d'épave et de la conservation des artefacts historiques de ces sites. L'environnement subaquatique, en perpétuelle évolution, influence directement la formation des sites d'épaves ainsi que l'état des structures immergées (Stewart 1999, Wheeler 2002). Les facteurs biologiques et les paramètres physico-chimiques, tels que le pH, la salinité et l'oxygénation, déterminent la préservation des artefacts au fil du temps (Bethencourt et al. 2018). Les processus hydro-sédimentaires ont également une grande importance dans la formation des sites d'épaves et sont très souvent étudiés à partir des données de bathymétrie et de géophysique (Caston 1979, Ward et al. 1999, McNinch et al. 2001, Quinn et al. 2010,

Majcher et al. 2021), mais aussi à partir de modèles numériques afin de mieux comprendre l'évolution de la dégradation (Smyth et al. 2014, Litter et al. 2022).

Dans le cadre du projet *Voir la mer* financé par le Réseau Québec maritime (RQM, 2019-2022), nous avons tenté d'approfondir cette approche en réalisant des prélèvements in situ et des analyses en laboratoire. Le site de l'épave du *Scotsman*, un voilier marchand de type brick naufragé en 1846 au large du Bic dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent, a été sélectionné pour effectuer ce travail. L'analyse des processus hydro-sédimentaires autour du site de l'épave a permis de mieux comprendre l'enfouissement progressif de l'épave et son interaction avec les courants locaux.

Ainsi, en combinant cartographie et géophysique haute résolution avec des analyses précises de la sédimentation et des courants marins, ce mémoire de maîtrise illustre le potentiel de la géoarchéologie subaquatique pour la préservation et la mise en valeur du patrimoine maritime québécois.

Les objectifs de la recherche

L'objectif de cette maîtrise est d'explorer, de manière novatrice, l'apport croisé de la sédimentologie et de la courantologie dans l'étude du site de l'épave du *Scotsman*. En mobilisant conjointement ces disciplines rarement intégrées en archéologie subaquatique, cette recherche propose une approche originale pour comprendre la dynamique sédimentaire et les processus environnementaux qui façonnent la formation, l'évolution et la dégradation d'un site d'épave au fil du temps.

Dans un premier temps, une analyse à large échelle a permis de caractériser les processus sédimentaires et hydrodynamiques qui contrôlent la morphologie du fond marin et la stabilité des dépôts en périphérie de l'épave. Cette approche globale permet de replacer l'épave du *Scotsman* dans son contexte environnemental et de comprendre les forçages naturels qui influencent l'évolution du site.

Dans un second temps, l'étude a visé à documenter finement les interactions locales entre l'épave, les courants et les sédiments grâce à une approche ciblée menée au plus près de la structure immergée. L'objectif était d'identifier les mécanismes d'érosion, d'accumulation et d'affouillement directement liés à la présence de l'épave. Cette méthodologie, encore peu développée en archéologie sous-marine, permet de mieux étudier les conditions hydrosédimentaires responsables à la fois du dépôt initial de l'épave et de son évolution post-dépositionnelle.

Enfin, l'objectif de la synthèse des résultats est de proposer une interprétation intégrée des processus de dégradation et de préservation affectant l'épave du *Scotsman*. En combinant analyses à large et fine échelle, cette démarche offre une lecture renouvelée de la dynamique des sites archéologiques subaquatiques. Elle contribue non seulement à l'avancement des connaissances scientifiques, mais également à l'élaboration de stratégies de conservation et de gestion durable mieux adaptées aux environnements marins à forte dynamique.

Le contexte historique

L'aire maritime entourant les îles du Bic et de Bicquette a joué un rôle historique majeur dans le développement de la région et dans la navigation sur le fleuve Saint-Laurent (Camu 1923). Dès le XVII^e siècle, les monts du Bic, notamment le pic Champlain (alors désigné sous le nom de « Bic »), ont servi de repère stratégique pour les navigateurs. Samuel de Champlain lui-même utilisait ce point de repère pour orienter ses explorations dans cette région difficile d'accès (Delmas 2020, Delmas 2022).

De 1730 à 1905, l'île du Bic abritait une station de pilotage, un point clé pour la sécurité maritime dans les eaux souvent tumultueuses du Saint-Laurent (Camu, 1923, Leclerc 2001). Les pilotes expérimentés embarquaient à bord des navires en mer pour les guider à travers les nombreux récifs, haut-fond et courants puissants, jusqu'à la ville de Québec, facilitant ainsi le passage des navires dans cette zone dangereuse.

À partir de 1845, avec l'essor de l'exploitation du bois, notamment au village du Bic, le trafic maritime dans la région a considérablement augmenté. Cette période de prospérité a

vu la construction, entre 1864 et 1899, de plusieurs goélettes à deux mâts, utilisées pour le transport des pilotes et des marchandises vers les grands navires au large, contribuant ainsi au développement économique de la région (Rosa 1897, Ross 2021).

Malgré la présence des pilotes et des nombreuses mesures de sécurité, l'aire maritime autour du Bic reste l'une des zones les plus périlleuses pour la navigation du Saint-Laurent. La combinaison des nombreux récifs, des courants puissants et des brouillards fréquents constituait un véritable défi pour les marins. Ainsi, malgré les efforts pour sécuriser les trajets, plusieurs navires ont fait naufrages dans cette région, un phénomène bien documenté dans les récits historiques (Rosa 1897, Potvin 1945, Fournier 1985). Certaines épaves sont bien connues comme celle du *Germanicus*, du *Brier Mist*, du *Lina Gagné* ou encore du *Scotsman* qui reposent sur le fond de la région du Bic et constituent un patrimoine archéologique précieux.

L'un des naufrages les plus marquants de cette période est celui du *Scotsman*, un navire marchand de type brick construit en 1834 en Écosse. Le *Scotsman* réalisait des liaisons commerciales entre les ports du Royaume Uni et plusieurs destinations d'outre-mer afin de transporter sucre et/ou café. Après un départ tardif pour la saison du port de Montréal en direction de Liverpool, le *Scotsman*, pris dans une violente tempête dans la nuit du 20 au 21 novembre 1846, heurte l'un des récifs entourant l'île du Bic (Fig. 1). Après avoir dérivé pendant plusieurs kilomètres, il sombre au large de l'île laissant un seul survivant. Cet incident tragique témoigne de la dangerosité de cette zone maritime et de l'importance de la station de pilotage pour la sécurité des marins.

L'épave du *Scotsman* fût découverte en 2002 par le Service Hydrographique du Canada au large de l'Île du Bic mais ne fût identifié qu'en 2013 par une équipe de plongeur dans le cadre de l'émission télévisé « Chasseurs d'Épave ».

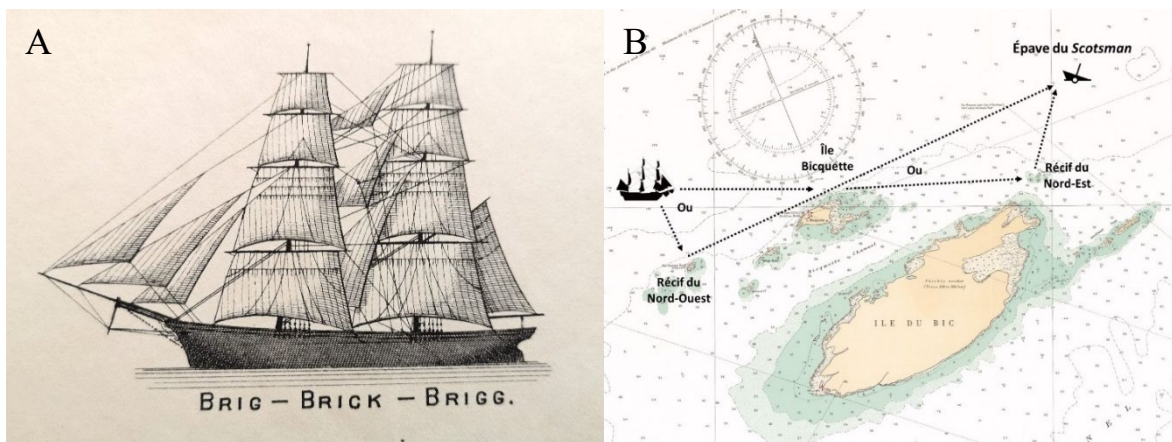


Figure 1. Représentation d'un brick (A) accompagné d'une carte illustrant les hypothèses d'échouage du *Scotsman* lors de la tempête du 20 novembre 1846 (B). Le navire aurait heurté les récifs du Nord-Ouest ou les récifs du Nord-Est avant de sombrer un peu plus au large (Delmas 2022).

Le cadre morphologique et géologique régional

Le site de l'épave se situe sur la marge continentale sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent à proximité de Rimouski - Le Bic (Fig. 2). Dans cette zone, la marge continentale s'étend jusqu'à 12 km au large et se termine par une forte pente jusqu'aux grandes profondeurs (environ 300 mètres) du chenal Laurentien. Les profondeurs maximales de cette marge continentale sont autour de 40 mètres, formant un plateau vers le large ayant une pente d'environ $0,16^\circ$ (Silverberg 1978). L'épave du *Scotsman* repose sur ce plateau situé au nord-est des îles du Bic et de Bicquette dans des profondeurs allant de 15 à 25 m.

Dans cette partie de l'estuaire du Saint-Laurent, les apports sédimentaires sont contrôlés par les apports fluviaux et l'érosion continentale des côtes nord, c'est-à-dire du bouclier canadien composé de roches ignées et métamorphiques datant du Précambrien et Cambrien, et sud où l'on retrouve la chaîne de montagne des Appalaches constituée de roche sédimentaire datant du Paléozoïque (Hocq et Dubé 1994, Jaegle 2015). En période hivernale, une autre source d'apport sédimentaire peut se développer avec le recouvrement des eaux de l'estuaire du Saint-Laurent d'une couche de glace qui va piéger et transporter les sédiments (Drapeau 1992, Saucier 2003, Bernatchez et al. 2004, de Vernal et al. 2011). Au niveau de la marge sud, Loring et Nota (1973) et Jaegle (2015) ont démontré que les apports sédimentaires sont essentiellement issus de l'érosion du bouclier canadien de la côte nord. En effet, la

présence de nombreuses rivières sur la côte nord permet un plus grand apport de particules comparé aux rivières de la côte sud. La décharge annuelle moyenne en eau des rivières de la côte sud est inférieure à 150 m³/s, alors que celle des rivières de la côte nord atteint environ 3250 m³/s (St. Lawrence Center 1996).

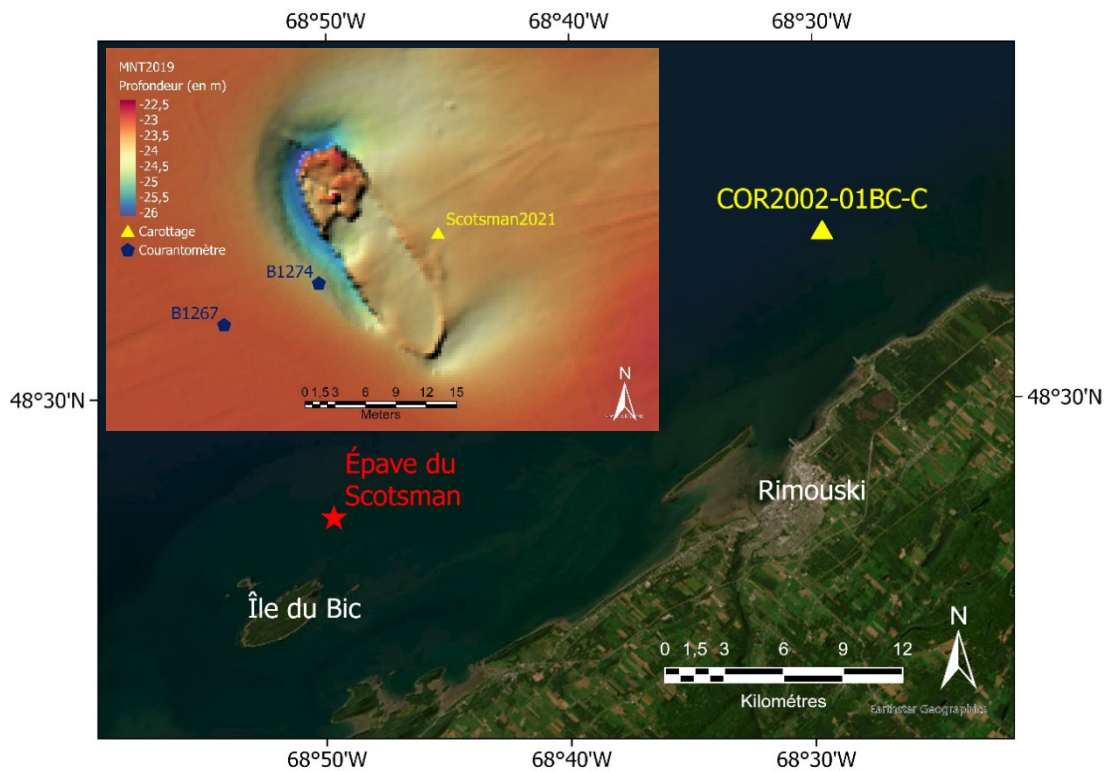


Figure 2. Carte du site d'étude montrant la position de l'épave dans la région du Bic maritime, les positions des deux carottes sédimentaires Scotsman2021 et COR2002-01BC-C ainsi que l'emplacement des deux courantomètres B1267 et B1274 par rapport à l'épave.

La carte présentée à la figure 3 montre la variabilité des sédiments de surface dans la région de Rimouski-le Bic maritime. Les sédiments présents à la surface du fond sur la marge du Bic maritime varient entre le sable et le silt et sont issus des processus sédimentaires d'érosion actuellement en place dans l'estuaire du Saint-Laurent (Jaegle 2015, Pinet et al. 2011, St-Onge et al. 2011). Le transport et la répartition de ces sédiments sur la marge continentale sont contrôlés par les processus hydrodynamiques locaux de courte échelle tels que les ondes de tempêtes et les marées, les courants entraînant la remise en suspension des

particules les plus fines (Dalrymple et Choi 2007, Loring et Nota 1973). D'après Smith et Schafer (1999) et St-Onge et al. (2011), le taux de sédimentation dans cette zone de l'estuaire du Saint-Laurent est estimé à 0,70 cm/an. Ce taux de sédimentation a tendance à augmenter légèrement depuis le milieu du 20^e siècle avec l'augmentation de l'exploitation des terres entourant l'estuaire du Saint-Laurent à l'origine d'une érosion plus accrue des terres émergées (St-Onge et al. 2011).

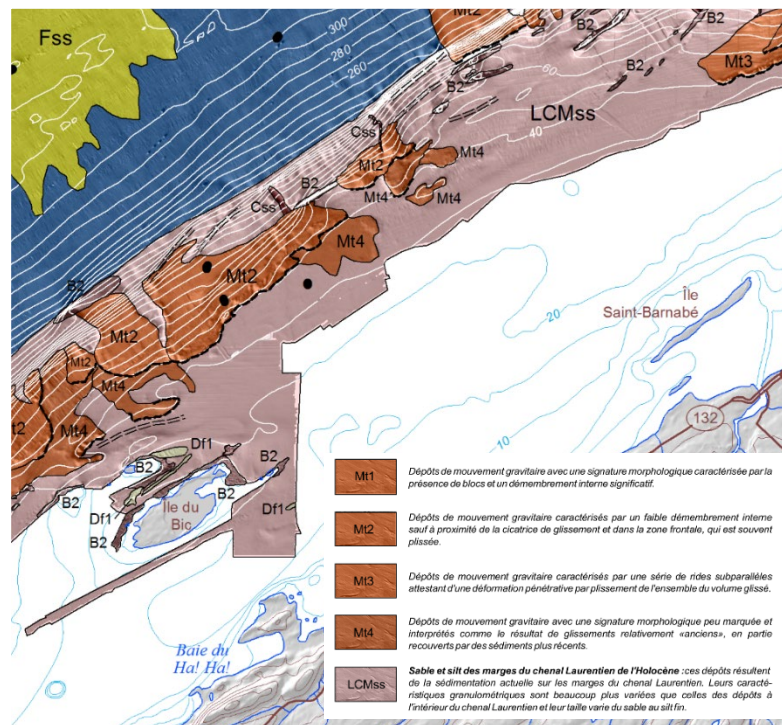


Figure 3. Carte des sédiments superficiels dans la région de Rimouski et du Bic maritime issue de la carte de la géologie des sédiments superficiels et relief ombré du fond marin, estuaire du Saint-Laurent, Québec (Pinet et al. 2011).

Les expéditions scientifiques

L'étude présentée dans ce mémoire de maîtrise est fondée sur des données provenant des trois expéditions scientifiques qui ont été réalisées sur le site de l'épave en 2019, 2020 et 2021 dans le cadre du projet *Voir la mer* du Réseau Québec maritime rendu possible grâce à un partenariat entre l'Institut des sciences de la mer (ISMER-UQAR), le Centre Interdisciplinaire de Développement en Cartographie des Océans (CIDCO), l'Institut de

Recherche en Histoire Maritime et Archéologie Subaquatique (IRHMAS) et le Centre de Développement et de Recherche en Intelligence Numérique (CDRIN).

À l'été 2019, une première phase exploratoire de levés bathymétriques a été conduite par une équipe conjointe regroupant des membres du CIDCO, de l'IRHMAS et de l'ISMER-UQAR afin de détecter d'éventuelles ressources archéologiques sur plusieurs sites d'intérêt dans la région du Bic maritime (Delmas et al. 2020). Ces sites d'intérêt ont été déterminés précédemment à travers une étude historique, menée par les archéologues de l'IRHMAS, permettant d'évaluer le potentiel archéologique. Lors de cette première expédition, des données bathymétriques, sismiques et de réflectivité ont été acquises sur le site de l'épave du *Scotsman*.

Une deuxième expédition s'est déroulée à l'été 2020 afin de compléter les acquisitions de levés bathymétriques et sismiques et de retourner sur les sites d'intérêt archéologiques déterminés à partir des données acquises en 2019 pour effectuer des nouveaux levés bathymétriques et sismiques plus précis, mais aussi réaliser des levés au magnétomètre marin. Des prélèvements de sédiment de surface ont également été faits un peu partout dans la zone d'étude afin de valider la composition du fond à l'aide de données sismiques et de rétrodiffusion.

Pour la dernière phase de terrain du projet réalisée en septembre 2021 (Delmas et al. 2022), il a été décidé de se concentrer sur la variabilité de la sédimentation autour de l'épave du *Scotsman*. Pour cela, une équipe de plongeurs de l'Institut maritime du Québec (IMQ) a été intégrée au projet afin de réaliser un carottage au plus proche de l'épave et de mettre en place deux courantomètres autour de l'épave. Les opérations de carottage ont été réalisées par une équipe de plongeurs professionnels afin de ne pas endommager les artefacts archéologiques présents sur le fond. Le système de carottage (Fig. 4) utilisé est inspiré du carottier inventé par P. Corboud de l'Université de Genève (Farah 2011) et repose sur une pince en métal, qui se referme sur l'extrémité d'un tube de plastique, avec deux poignées permettant aux plongeurs de manipuler le carottier sur le fond pour l'enfoncer dans les sédiments. Un *core catcher* a été fixé à la base du tube pour retenir les sédiments lors de la

remontée du carottier. Un tuyau de plastique a été disposé le long du tube du carottier permettant au plongeur de propulser de l'air à la base du carottier s'il est difficile d'extraire le carottier des sédiments. Grâce à cette méthode, une carotte de 30 cm a pu être prélevée sur la partie tribord de l'épave, au plus proche du mât qui s'est effondré sur la surface des sédiments (Fig. 2). Les courantomètres montrés à la figure 4 ont quant à eux été installés sur une ligne de mouillage mise en place par les plongeurs pour permettre la récupération des instruments à partir d'une petite embarcation. Les courantomètres sont restés en place autour de l'épave du 6 au 29 septembre 2021.



Figure 4. Vedette hydrographique *F.J. Saucier* équipée pour effectuer les levés de bathymétrie et de géophysique lors des expéditions de 2019 et 2020 (A), opération de plongée sous-marine sur l'épave du *Scotsman* pour la réalisation du carottage et la disposition des courantomètres lors de l'expédition de 2021 (B), photo de l'épave du *Scotsman* réalisée lors d'une plongée sur l'épave (C) et système de carottage en plongée et courantomètres (tubes bleus) déployés en septembre 2021 (D).

CHAPITRE 1 MÉTHODOLOGIE

Le travail mené dans le cadre de ce projet a été conçu comme une étude intégrée et multidisciplinaire de l'ensemble du site de l'épave du *Scotsman*. La méthodologie repose sur la complémentarité des différents types de données de terrain et de laboratoire afin de reconstituer, de la manière la plus fine possible, les mécanismes impliqués dans la formation, l'évolution et la dynamique actuelle du site. Pour cela, plusieurs couches d'informations ont été superposées et analysées conjointement, chacune apportant un éclairage spécifique mais complémentaire (Fig. 5).

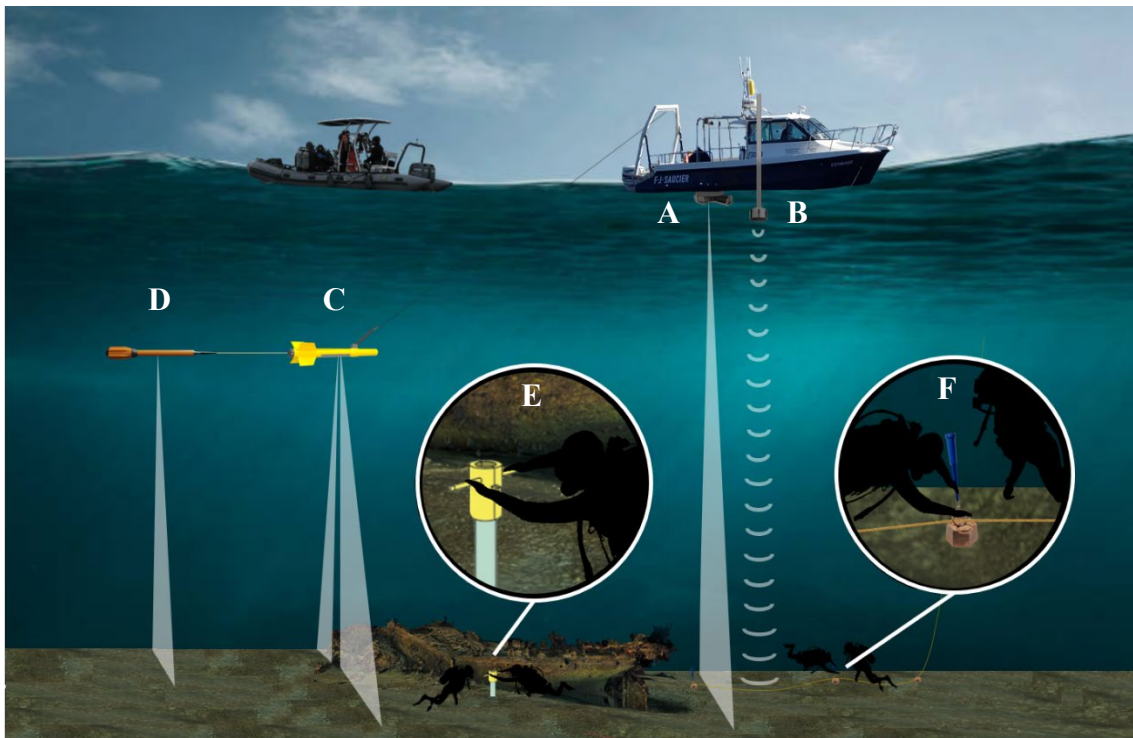


Figure 5: Représentation des différents types de levés effectués sur le site de l'épave du *Scotsman*, incluant les relevés de bathymétrie et géophysiques : (A) échosondeur multifaisceaux, (B) sondeur de sous-surface, (C) sonar à balayage latéral et (D) magnétomètre marin, (E) les prélèvements sédimentaires et (F) les mesures de courantométrie.

D'une part, les levés réalisés *in situ*, incluant la cartographie précise de la zone, l'enregistrement des paramètres environnementaux et l'observation directe des vestiges, ont permis d'obtenir un cadre spatial et contextuel essentiel. Ces données de terrain ont été complétées par des prélèvements ciblés d'échantillons sédimentaires, destinés à documenter les processus de dépôt, de préservation et d'interaction entre l'épave et son environnement marin. D'autre part, les analyses effectuées en laboratoire ont fourni des informations plus détaillées sur la composition, la structure et l'évolution des sédiments associés à l'épave. Ces résultats ont été confrontés aux observations de terrain afin d'identifier les facteurs physiques et sédimentaires qui gouvernent la dynamique du site.

1.1 BATHYMETRIE ET GEOPHYSIQUE

L'échosondeur multifaisceaux est une méthode non destructive largement utilisée pour cartographier la bathymétrie des fonds marins avec une grande précision. Grâce à sa haute résolution, il permet d'étudier les sites d'épaves, d'analyser leur morphologie et de suivre leur évolution au fil du temps, notamment en observant les processus d'enfouissement, d'érosion et de sédimentation qui influencent leur conservation (Quinn et al. 2010).

Dans le cadre du projet *Voir la Mer*, plusieurs levés bathymétriques ont été réalisés par le Centre interdisciplinaire de développement en cartographie des océans (CIDCO) à l'aide d'échosondeurs multifaisceaux lors de campagnes menées en 2013, 2019 et 2020, à bord du *N/R F.J. Saucier*.

- 2013: Premier levé effectué dans le cadre d'une recherche sur plusieurs épaves du Saint-Laurent, utilisant un échosondeur Teledyne Reson Seabat 7125 fonctionnant à une fréquence de 400 kHz, avec un recouvrement de 100 %. Ce levé a permis d'établir une première cartographie détaillée du relief sous-marin et des vestiges présents.
- 2019: Levé réalisé avec un échosondeur R2Sonic 2026, opérant également à 400 kHz, avec un recouvrement de 100 %. Pour cette mission, le mode ultra haute densité a été

utilisé afin d'améliorer la résolution des points de sondage et d'obtenir une représentation plus détaillée des structures sous-marines.

- 2020: Un nouveau levé a été réalisé avec un échosondeur Teledyne Reson Seabat 7125, présentant les mêmes caractéristiques que celui utilisé en 2013 (400 kHz, recouvrement 100 %), afin d'étudier l'évolution des épaves et des dépôts sédimentaires sur plusieurs années.

Une correction de la marée à l'aide du modèle estuaire2012 (Service hydrographique du Canada) et de la vitesse du son dans l'eau à l'aide des données *in situ* ont été appliquées aux données des levés multifaisceaux. Par la suite, des surfaces bathymétriques ont été créées pour chaque année à partir du modèle CUBE (Calder 2003) avec une résolution de 30 cm. L'analyse comparative de ces surfaces a permis de suivre l'évolution de l'épave au fil du temps, d'identifier les zones d'accumulation et d'érosion sédimentaire, et d'affiner les modèles de sédimentation et de conservation de l'épave du *Scotman*.

Les données de sismique ont été acquises avec un profileur de sous-surface de type CHIRP 3.5 kHz Knudsen lors des missions de 2019 et 2020, les images acoustiques de l'épave ont quant à elle été réalisées avec un sonar à balayage latéral Edgetech 272-TD à 400 kHz en 2019.

Les logiciels Caris HIPS and SIPS ainsi qu'IHS Kingdom ont été utilisés pour le traitement et l'analyse données de bathymétrie et de géophysiques respectivement.

1.2 SEDIMENTOLOGIE

1.2.1 Propriétés physiques et géochimiques

La densité (mesurée par atténuation des rayons gamma), la susceptibilité magnétique volumétrique (kLF) et la vitesse des ondes P ont été analysées sur la carotte sédimentaire à l'aide du banc d'analyse multi-senseurs *MSCL-S* de *GEOTEK* (Fig. 6), avec un pas

d'acquisition de 5 mm. Ces mesures fournissent des informations essentielles sur la compaction, la porosité et la structure interne des sédiments, permettant d'identifier des variations lithologiques et d'éventuels événements de dépôt (St-Onge et al. 2007, Debret et al. 2011).

Après ouverture de la carotte en deux sections, des données supplémentaires ont été acquises à des intervalles de 5 mm en utilisant un banc d'analyse multi-senseurs MSCL-XZ de GEOTEK (Fig. 6) :

- La réflectance spectrale diffuse a été mesurée avec un spectrophotomètre CM-700d de Konica Minolta. Les données obtenues ont été converties en paramètres colorimétriques (L^* , a^* , b^*) selon les normes de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Ces paramètres permettent d'évaluer les variations de couleur des sédiments : L^* représente la luminosité, variant de 0 (noir) à 100 (blanc), a^* indique une transition du vert (-60) au rouge (+60), b^* varie du bleu (-60) au jaune (+60);
- La composition chimique élémentaire a été analysée par fluorescence X à l'aide d'un analyseur Olympus Vanta, permettant de quantifier la concentration en éléments chimiques et d'identifier d'éventuelles signatures géochimiques associées aux changements environnementaux ou aux processus sédimentaires.

En complément, une imagerie digitale aux rayons X de la demi-section de la carotte a été réalisée avec un scanneur MSCL-XCT de *Geotek* (Fig. 6). Ce dispositif intègre une source de rayons X ajustable entre 45 kV et 130 kV, ainsi qu'un détecteur haute résolution offrant une précision allant de 30 μm à 350 μm . Cette technique permet d'observer la stratification interne, de détecter d'éventuelles discontinuités sédimentaires et d'identifier des structures comme des bioturbations ou des laminations fines.

Enfin, une photographie digitale haute résolution de la carotte a été acquise à l'aide de la caméra *GeoScan VI* de *Geotek*, offrant une documentation visuelle détaillée et facilitant l'interprétation des résultats issus des autres analyses.

Ces mesures combinées offrent une caractérisation approfondie des sédiments, essentielle pour reconstituer l'histoire sédimentaire et les processus environnementaux ayant influencé le site étudié.

Les données issues des carottes sédimentaires ont été analysées à l'aide du logiciel Matlab et les résultats d'analyse à composante principale (voir annexe I) ont été obtenus à l'aide du logiciel CoDaPack (Comas-Cufi et al. 2011).

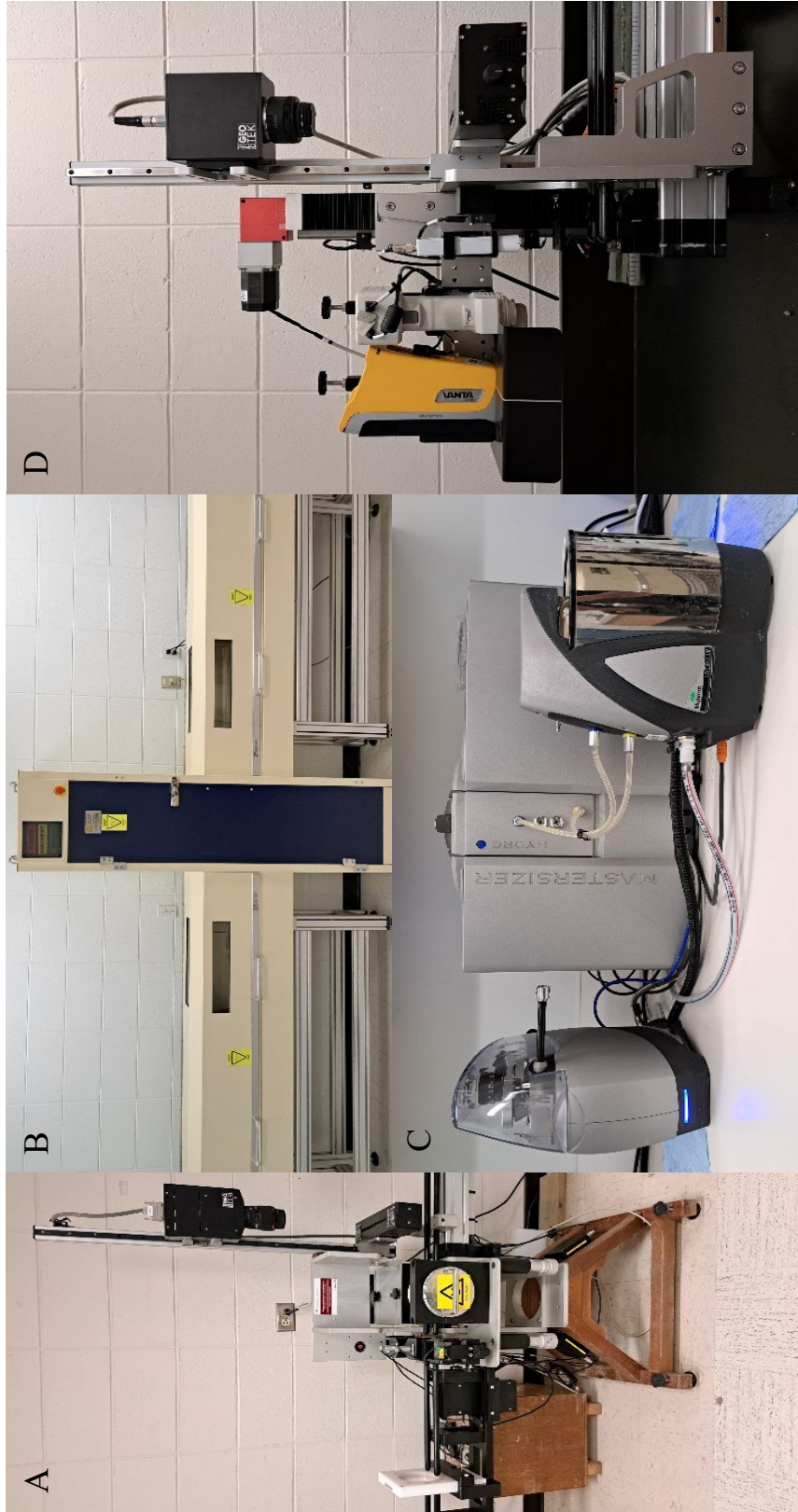


Figure 6. MSCL-S de Geotek (A), MSCL-XCT de Geotek (B), granulomètre laser Mastersizer 3000 de Malvern Panalytical (C) et MSCL-XZ de Geotek (D).

Des analyses granulométriques ont été réalisées sur des sous-échantillons de sédiment, prélevés tous les centimètres dans la carotte, afin de caractériser la distribution des tailles de grains et d'identifier les processus sédimentaires impliqués dans leur dépôt. Ces analyses ont été effectuées à l'aide d'un analyseur de particules à diffraction laser Mastersizer 3000 de Malvern Panalytical (Fig. 6), capable de mesurer des particules comprises entre 0,04 μm et 2000 μm , couvrant ainsi l'ensemble du spectre granulométrique allant des argiles aux graviers fins.

Avant l'analyse, les échantillons ont subi deux pré-traitements chimiques pour éliminer les composés susceptibles d'altérer la mesure de la taille des particules détritiques (Jaijel et al. 2021) :

- Traitement peroxyde d'hydrogène (H_2O_2): une solution de peroxyde d'hydrogène a été ajoutée progressivement (par incréments de 5 mL) jusqu'à une quantité totale de 15 mL, afin d'oxyder et éliminer la matière organique présente dans les échantillons.
- Traitement à l'acide chlorhydrique (HCl): un volume de 10 mL d'acide chlorhydrique (10%) a été ajouté afin de dissoudre les carbonates marins.

Après ces pré-traitements, les échantillons ont été dispersés dans une solution d'héxamétaphosphate de sodium et d'eau, puis homogénéisés par ultrasons afin de désagréger les agrégats de particules. Les résultats obtenus permettent de quantifier la distribution des différentes classes granulométriques (argiles, silts, sables) et d'analyser les variations sédimentaires en lien avec les conditions hydrodynamiques et les processus de dépôt. Les paramètres statistiques de la distribution de la taille des particules ont été calculés à partir de la feuille de calcul Gradistat 4.2 développé par Blott et Pye (2001).

1.2.2 Modèle d'âge

La chronologie de la carotte SCOTSMAN2021 repose sur des analyses du ^{210}Pb , réalisées tous les centimètres sur les 20 premiers centimètres de sédiment. Pour cela, les échantillons ont été pesés puis séchés afin de déterminer leur densité sèche avant d'être

envoyés au laboratoire de radiochronologie du *Geotop* (Université du Québec à Montréal, UQAM) pour analyse. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre alpha EGG-Ortec modèle 576A (Fig. 7), permettant de quantifier l'activité du ^{210}Pb non soutenu.

Les résultats ont ensuite été traités avec le logiciel *Plum* sous *R Studio*, un outil bayésien permettant d'estimer les âges en fonction de la profondeur dans la carotte en prenant en compte les incertitudes associées aux mesures et aux modèles de dépôt sédimentaire (Aquino-López et al. 2018). Cette approche offre une modélisation plus robuste de la chronologie en intégrant les variations naturelles du dépôt du ^{210}Pb et en optimisant les ajustements des taux de sédimentation au fil du temps.

Afin de vérifier la cohérence du modèle d'âge, les résultats ont été comparés à d'autres indicateurs chronologiques, notamment les variations géochimiques et les éventuelles anomalies sédimentaires identifiées dans la carotte.

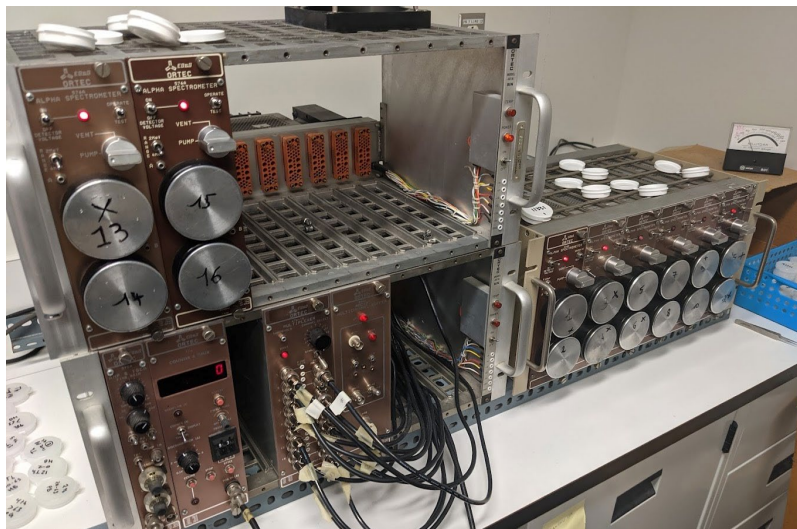


Figure 7. Spectrophotomètre alpha EGG-Ortec modèle 576A.

1.3 COURANTOMETRIE

Les données de courantométrie ont été acquises à l'aide de deux courantomètres Marotte HS de type *drag and tilt*, développés par le laboratoire de géophysique marine de l'Université James Cook en Australie. Ce dispositif à faible coût comprend un boîtier flottant équipé d'un accéléromètre, qui mesure l'angle d'inclinaison, et d'un magnétomètre, qui en détermine la direction.

Selon Marchant et al. (2014), le seuil de détection de la vitesse du courant avec cet instrument est de 0,05 m/s, tandis que l'incertitude sur la direction est d'au plus 15° pour des vitesses de courant supérieures à 0,15 m/s.

Les instruments ont été déployés du 6 au 29 septembre 2021 à l'aide d'une équipe de plongeurs. Ils ont été installés sur une ligne de mouillage positionnée autour de l'épave (Fig. 2 et 5). Cette ligne comprenait trois poids disposés au fond, perpendiculairement à l'épave, et reliés par un câble afin de faciliter la récupération du matériel depuis une embarcation. Les courantomètres ont été fixés sur les deux premiers poids :

- Le premier, situé à moins de 1 mètre de l'épave.
- Le second, positionné 10 mètres en amont.
- Le troisième poids, ancré plus loin, était équipé d'une bouée de surface servant de repère et de point d'extraction pour le matériel.

CHAPITRE 2

RÉSULTATS

2.1 MORPHOLOGIE DE L'ÉPAVE ET STRUCTURES SEDIMENTAIRES DE SURFACE

Les données bathymétriques (Fig. 8) indiquent que les profondeurs sur le site de l'épave varient entre 22,5 et 26 mètres. L'épave repose à la verticale sur le fond marin, sa quille étant entièrement enfouie dans les sédiments comme on peut voir dans les résultats du sonar de sous-surface. Les profils sismiques présentés en figure 9 mettent en évidence l'impact de l'épave sur les couches sédimentaires sous-jacente. D'après ces profils sismiques, il semblerait que la quille de l'épave se trouve à 3 mètres de profondeur dans les sédiments sous la surface du fond marin. Son orientation suit un axe nord-ouest/sud-est, avec la proue pointant vers le nord-ouest et la poupe vers le sud-est. Cette disposition est perpendiculaire au courant principal d'écoulement des eaux de surface du fleuve qui traverse cette portion de l'estuaire maritime du Saint-Laurent.

L'enfouissement de l'épave n'est pas uniforme : la partie bâbord est nettement plus exposée, s'élevant d'environ 2 mètres au-dessus des sédiments, tandis que la partie tribord est largement recouverte, ne laissant apparaître que quelques dizaines de centimètres de la structure. L'intérieur de l'épave présente deux zones distinctes. À l'avant, on observe une accumulation de débris issus du navire, comprenant des ancres, des pièces de bois variées et divers objets (assiettes, etc.). En revanche, la partie arrière est nettement plus dégagée de vestiges et se caractérise par une forte accumulation de sédiments (Fig. 10).

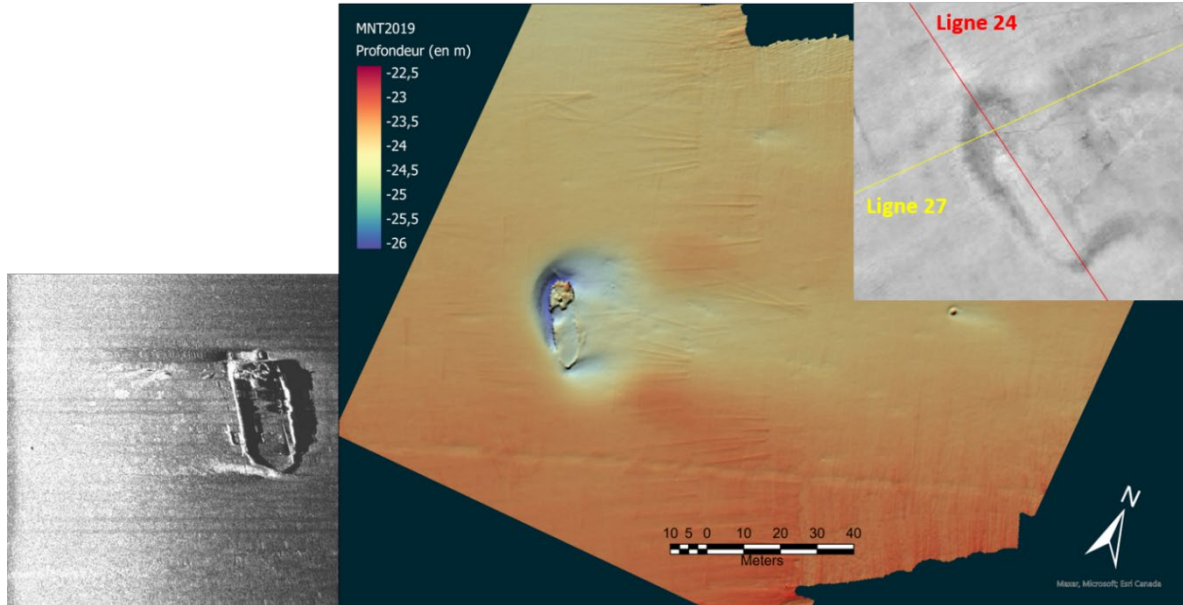


Figure 8. De gauche à droite ; image acoustique de l'épave du *Scotsman* obtenue à l'aide du sonar à balayage latéral, surface bathymétrique du site d'épave du *Scotsman* et surface de réflectivité issue des données de l'échosondeur multifaisceaux montrant l'orientation des lignes sismiques 24 et 27.

À proximité immédiate de l'épave, deux zones de plus grande profondeur atteignent jusqu'à 26 mètres. Celles-ci entourent la proue et la poupe du navire, ainsi qu'une partie de son flanc bâbord. L'analyse des données de rétrodiffusion issues de l'échosondeur multifaisceaux (Fig. 8) révèle que ces zones plus profondes correspondent également à une variation de la composition des sédiments de surface. Cette différence est confirmée par les vidéos filmés par les plongeurs sur le site (Fig. 10), qui montrent un fond constitué de coquilles de bivalves, de petites roches et de débris issus de l'épave. En-dehors de ces zones, le fond marin est principalement recouvert d'un sable silteux homogène, dans lequel sont visibles des traces d'organismes fouisseurs.

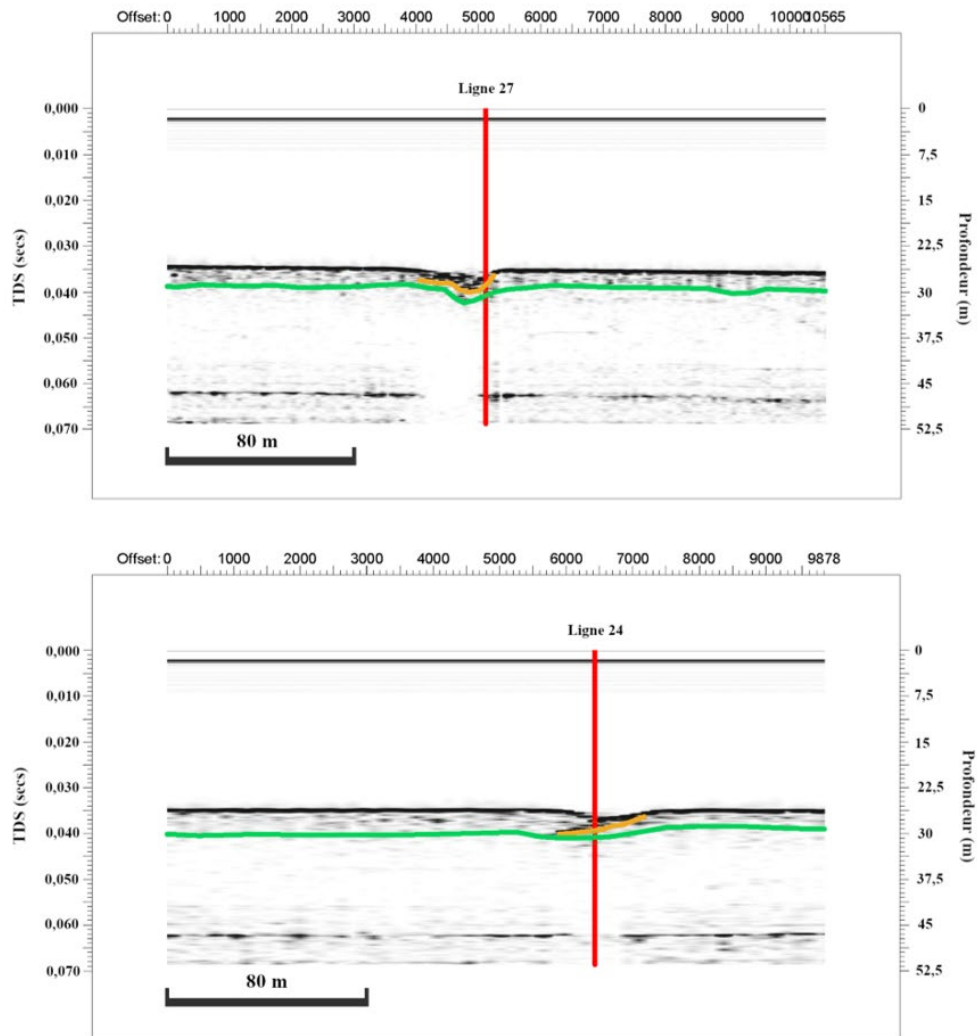


Figure 9. Profils sismiques des lignes 24 (longitudinale) et 27 (transversale) acquis sur le site de l'épave du *Scotsman*. En orange : signature de l'épave dans les couches superficielles. En vert : couche sédimentaire sous-jacente.

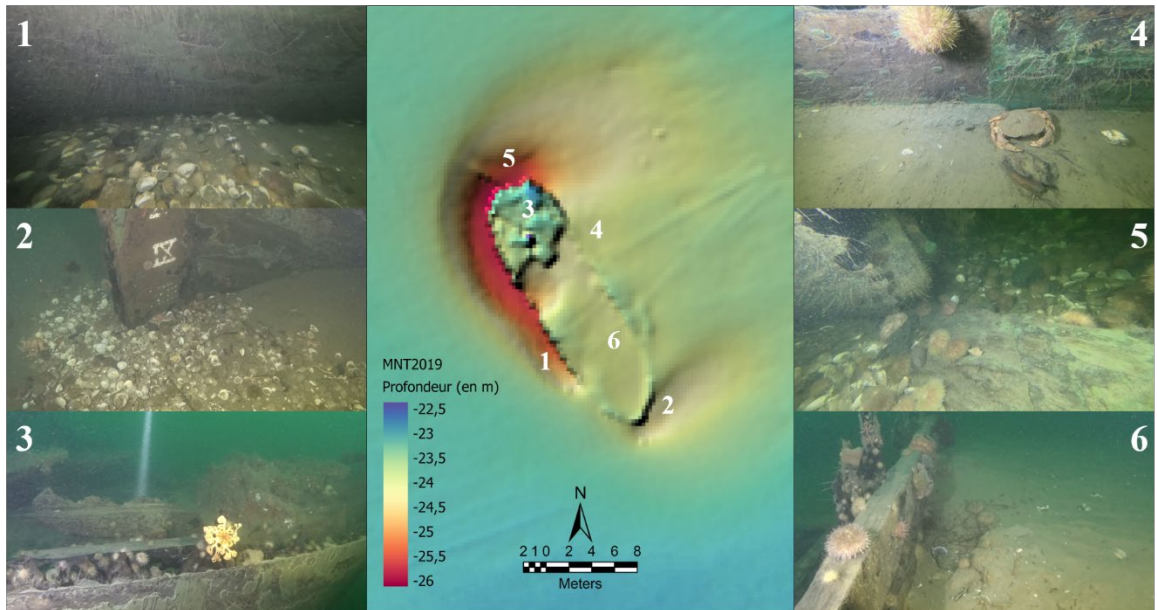


Figure 10. Photographies de l'épave et des structures sédimentaires du fond marin, extraites des vidéos réalisées par l'équipe de plongeurs. La carte bathymétrique du site indique la localisation des prises de vue.

2.2 VARIABILITE DES SEDIMENTS AU COURS DU TEMPS

L'analyse en composante principale (voir annexe I) basée sur les données de géochimie de la carotte SCOTSMAN2021 indique que les 30 premiers centimètres de sédiment dans notre zone d'étude sont formés de deux unités de compositions distinctes. L'analyse plus détaillée des résultats de géochimie et sédimentologie ont permis de subdiviser ces deux unités en 5 unités sédimentaires (C1a, C2, C1b, C3 et C4), dont C1a et C1b présentent des caractéristiques sédimentologiques similaires (Fig. 11). La sédimentation hémipélagique présente sur la marge continentale est très peu présente dans la séquence sédimentaire prélevée proche de l'épave comparativement à la carotte sédimentaire de référence COR2002-01BC-C prélevée au large de Rimouski (Fig. 2) et dont les résultats sont exposés en annexe II. La séquence sédimentaire de cette carotte, située au large de Rimouski, ne semble pas affectée par de fortes perturbations de la sédimentation faisant de cette carotte un bon analogue de la sédimentation hémipélagique dans notre zone d'étude.

La couche C1, incluant C1a et C1b, correspond à la sédimentation hémipélagique observable dans la zone d'étude, avec des valeurs de Mn/Fe et de Si/Ca oscillant entre 0,013 et 0,016 et entre 3 et 6 respectivement. Ces valeurs sont aussi observées dans les résultats de la carotte sédimentaire COR2002-01BC-C validant ainsi cette hypothèse. Les analyses granulométriques confirment que les sédiments dans cette partie de la marge sont composés de sable silteux ayant une moyenne géométrique supérieure à 140 μm comme mentionné dans la carte de composition des sédiments de surface de l'estuaire maritime du Saint-Laurent présentée en figure 3 (Pinet et al. 2011).

Les analyses de spectrophotométrie réalisées sur la carotte sédimentaire proche de l'épave révèlent une couche très distincte C2 entre 26,5 et 20 cm de profondeur. Cette couche se caractérise par une augmentation marquée du paramètre L^* , qui passe de valeurs fluctuantes autour de 35 à des niveaux excédant 40. Cet intervalle de sédiment plus claire est facilement identifiable dans l'image au rayon X de la carotte. Cette couche sédimentaire particulière est aussi présente dans les analyses géochimiques. En effet, on peut y observer un pic élevé du ratio Fe/Zr entre 24 et 20 cm avec des valeurs quasiment triplées par rapport aux résultats moyens de la sédimentation hémipélagique, précédé par une nette augmentation des valeurs de Mn/Fe à partir de 26,5 cm jusqu'à 23 cm, passant de valeurs oscillant autour de 0,015 à des valeurs supérieures à 0,022. De plus, la moyenne de la taille des grains diminue à environ 100 μm dans la partie supérieure de la couche sédimentaire C2 et revient à la normale de la sédimentation hémipélagique locale au même titre que les autres paramètres, formant ainsi la couche C1b.

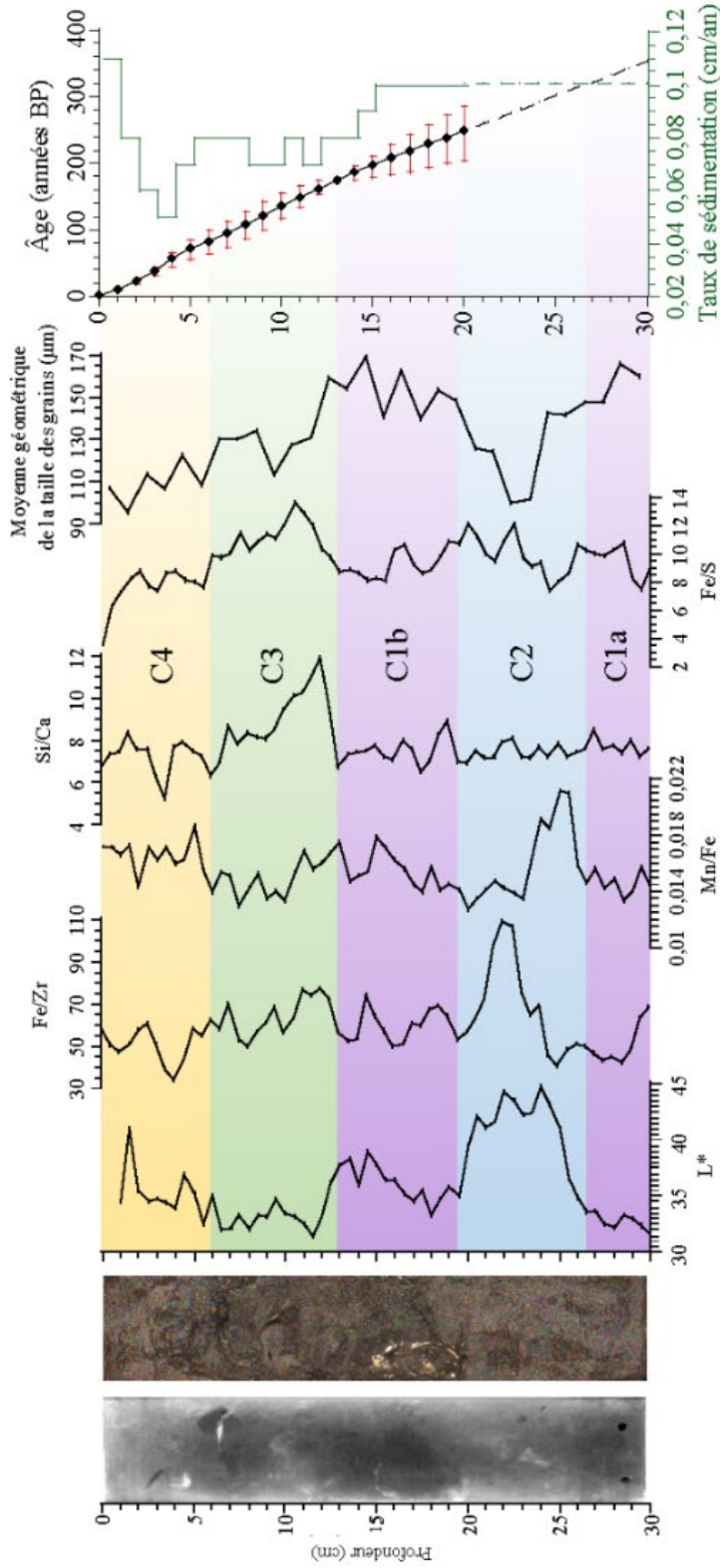


Figure 11. Propriétés physiques, géochimiques et sédimentologiques de la carotte Scotsman2021, associées à la photographie de la carotte, à l'image radiographique (rayons X) et au modèle d'âge. Les couleurs indiquent les différentes couches décrites en section 5.b. Le modèle d'âge repose sur les mesures de ^{210}Pb et la date de naufrage du *Scotsman* ; la courbe en pointillés illustre sa projection au-delà des résultats ^{210}Pb . Le taux de sédimentation a été interpolé entre les âges disponibles, la courbe en pointillés représentant son extrapolation.

Une augmentation subite des valeurs de Si/Ca survient à 13 cm de profondeur, les valeurs diminuent ensuite progressivement pour revenir à des valeurs observées dans la sédimentation hémipélagique vers 6 cm de profondeur. Cette nouvelle couche appelée C3 est corrélée avec une diminution progressive de la taille moyenne des grains et une légère diminution du paramètre L^* . Cet intervalle est également marqué par une hausse des valeurs du ratio Fe/S qui se fait progressivement pour atteindre un pic autour de 10,5 cm de profondeur. La couche C3 est directement suivie par la couche C4 qui est caractérisée par le retour de la sédimentation hémipélagique locale. Dans cette nouvelle couche, on observe tout de même une différence granulométrique par rapport à la sédimentation hémipélagique de la couche C1. En effet, la taille moyenne des grains diminue légèrement jusqu'au sommet de la séquence sédimentaire. Les données des ratios présentées en figure 11, semblent tout de même avoir une variabilité plus importante dans la couche C4 que dans la couche de sédimentation hémipélagique C1.

2.3 CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

Les conditions hydrodynamiques de la partie du plateau continentale du Bic sur laquelle repose l'épave du *Scotsman* sont en grande partie contrôlées par les courants de marées (voir annexe III), mais également par le vent et, dans une moindre mesure, les gradients de pression associés aux variations horizontales de la température et de la salinité. La marée semi-diurne dominante (composantes M_2 et S_2) se propage à peu près comme une onde progressive dans l'estuaire maritime, induisant un flot orienté vers l'amont à marée montante et en jusant vers l'aval à marée descendante (Saucier et al. 2003). La turbulence générée par la cisaille du courant près du fond tend à maintenir la colonne relativement peu profonde dans un état faiblement stratifié. L'épave ayant une orientation transversale par rapport à ces courants de marée, impose une trainée significative qui perturbe l'écoulement près du fond et qui en retour entraîne des contraintes tout aussi significatives à la structure. L'analyse spectrale réalisée sur les données du courantomètre B1267 éloigné de l'épave (voir

annexe III) confirme la dominance de la fréquence des courants de marées dans l'hydrodynamisme dans notre zone d'étude. La figure 12 présente les résultats de la vitesse des courants mesurée à 10 mètres de l'épave (B1267) et à 1 mètre de l'épave (B1274) à l'ouest de celle-ci. On peut facilement observer la cyclicité engendrée par la marée avec des courants plus forts à marée haute et des courants plus faibles à marée basse. Les données du courantomètre disposé au plus proche de l'épave indiquent que le courantomètre a eu quelques problèmes de mesure du courant sur une bonne partie de la période d'acquisition des données (Fig. 12). Des résultats sont tout de même disponibles sur les périodes du 6 au 11 septembre et du 22 au 29 septembre 2021. Il se peut que la turbulence au plus proche de la zone d'influence de l'épave fût telle que le courantomètre s'est bloqué vers le 12 septembre, puis il s'est débloqué naturellement aux environs du 21 septembre pour acquérir à nouveau des données.

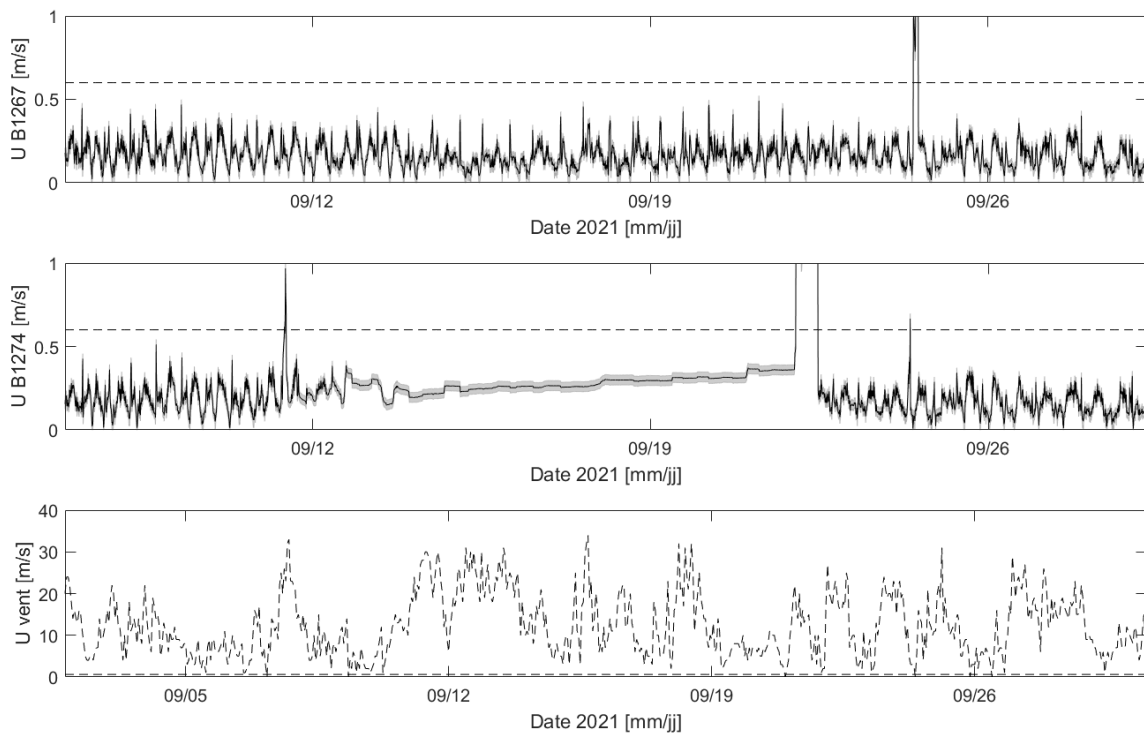


Figure 12: Vitesse du courant à la station B1267 (à 10 mètres de l'épave) et B1274 (au plus proche de l'épave) sur la période du 6 au 29 septembre 2021 et vitesse du vent à la station météorologique de Pointe-au-père pour le mois de septembre 2021.

Les données de courant obtenus à la station B1267 et présentés en fonction de leur orientation dans la figure 13.A, nous indiquent également la présence d'un autre courant sur le plateau à 25 mètres de profondeur. Sur cette figure, on observe la prépondérance des courants de marée montante vers l'ouest et des épisodes de courants plus forts mais de plus courtes durées de marée basse vers l'est. Toutefois, on peut observer un autre courant de grande importance se dirigeant vers le nord-est/nord-nord-est. Ce courant est généré par la présence de forts vents d'intensité supérieure à 20 km/h (Fig. 13.B) provenant du sud-ouest sur des périodes de temps permettant une influence sur les courants à 25 mètres de profondeur.

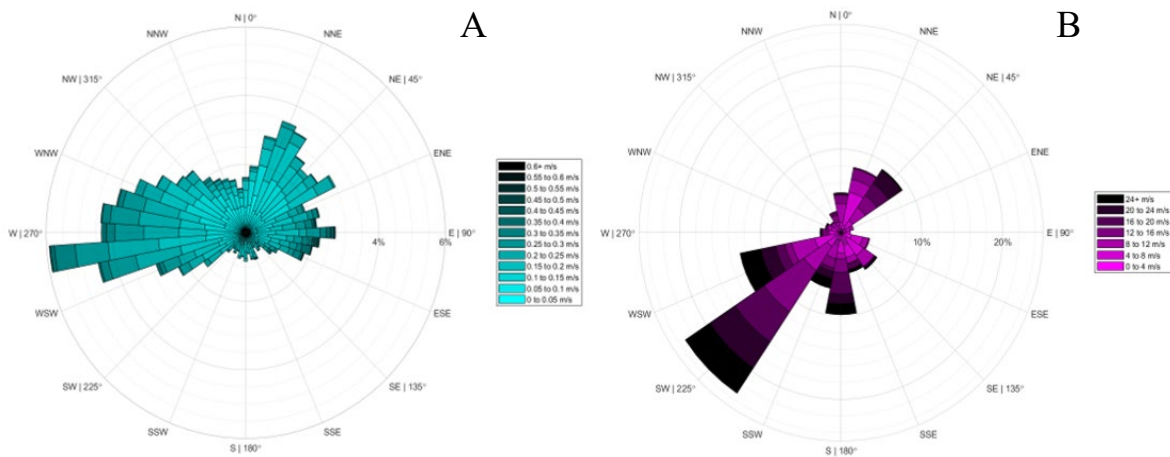


Figure 13. (A) Courants de fond mesurés sur la marge continentale à l'aide du courantomètre B1267 dans la région du Bic maritime entre le 6 et le 29 septembre 2021. (B) Vents enregistrés à la station météorologique de l'île Bicquette sur la même période.

Malgré la perte d'information sur le courantomètre de la station B1274, les résultats nous permettent quand même de constater que les courants au plus proche de l'épave sont influencés par la présence de celle-ci (Fig. 14). En effet, les courants de marée montante semblent contourner l'épave et longer sa partie bâbord. Les courants de marée montante sont alors désaxés et semblent orientés vers le sud-ouest. Ce phénomène est très probablement aussi associé aux marées descendantes, mais sur la partie tribord de l'épave qui n'a malheureusement pas été étudiée dans ce projet.

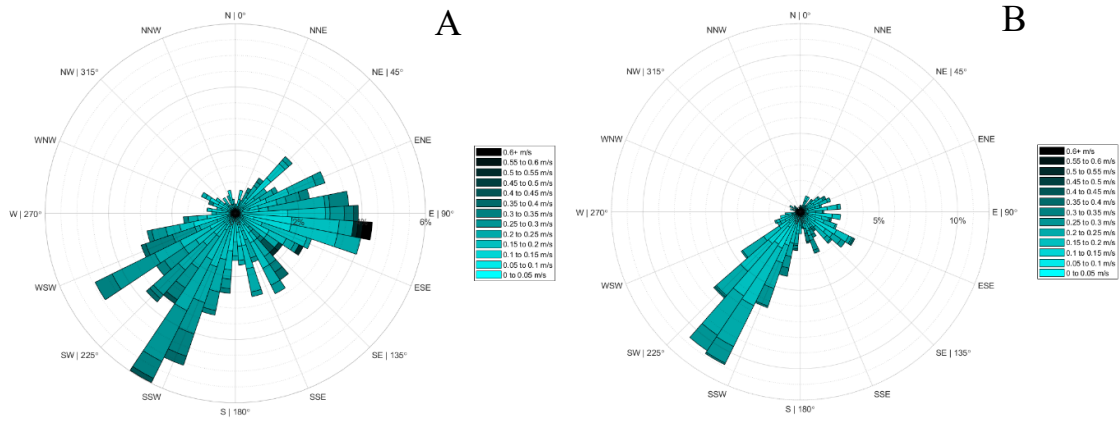


Figure 14. Courants de fond enregistrés à 1 mètre en amont de l'épave avec le courantomètre B1274. (A) Période du 6 au 11 septembre 2021 ; (B) période du 22 au 29 septembre 2021.

CHAPITRE 3

DISCUSSION

3.1 VARIABILITE SEDIMENTAIRE AUTOUR DE L'ÉPAVE

Le site de l'épave du *Scotsman*, tout comme les autres sites d'épave, est un système ouvert où les processus sédimentaires et hydrodynamiques ont été perturbés et où il existe des échanges de sédiment et d'énergie avec le milieu avoisinant (Quinn 2006). L'arrivée de l'épave du *Scotsman* sur le fond a créé un obstacle influençant la vitesse des courants et la dynamique sédimentaire en place. En modifiant les conditions d'écoulement près du fond, l'épave module le transport et les conditions de dépôt de sédiments dans son voisinage. Les levés bathymétriques successifs réalisés sur le site de l'épave du *Scotsman* ont permis d'évaluer le déplacement de sédiments à courte échelle entre 2013 et 2019 sur tout le pourtour de l'épave (Fig. 15). Au cours de cette période, on peut observer un comblement de la zone d'affouillement (en érosion) se situant au niveau de la proue de l'épave. Ce comblement de plusieurs dizaines de centimètres fait suite à la chute d'une partie de la proue de l'épave sur le fond. Ce morceau d'épave est alors devenu un obstacle modifiant les conditions hydrodynamiques sur le fond en modifiant la direction et la vitesse des courants au niveau de la proue de l'épave. L'écoulement se voit ralentir au niveau du fond, mais cette nouvelle dynamique va augmenter la présence de turbulence dans cette zone. D'après les images obtenues par les plongeurs, ce changement dans l'hydrodynamisme local est à l'origine de l'accumulation sédimentaire puisque la proue qui repose sur le fond se retrouve aujourd'hui en grande partie ensevelie par les sédiments.

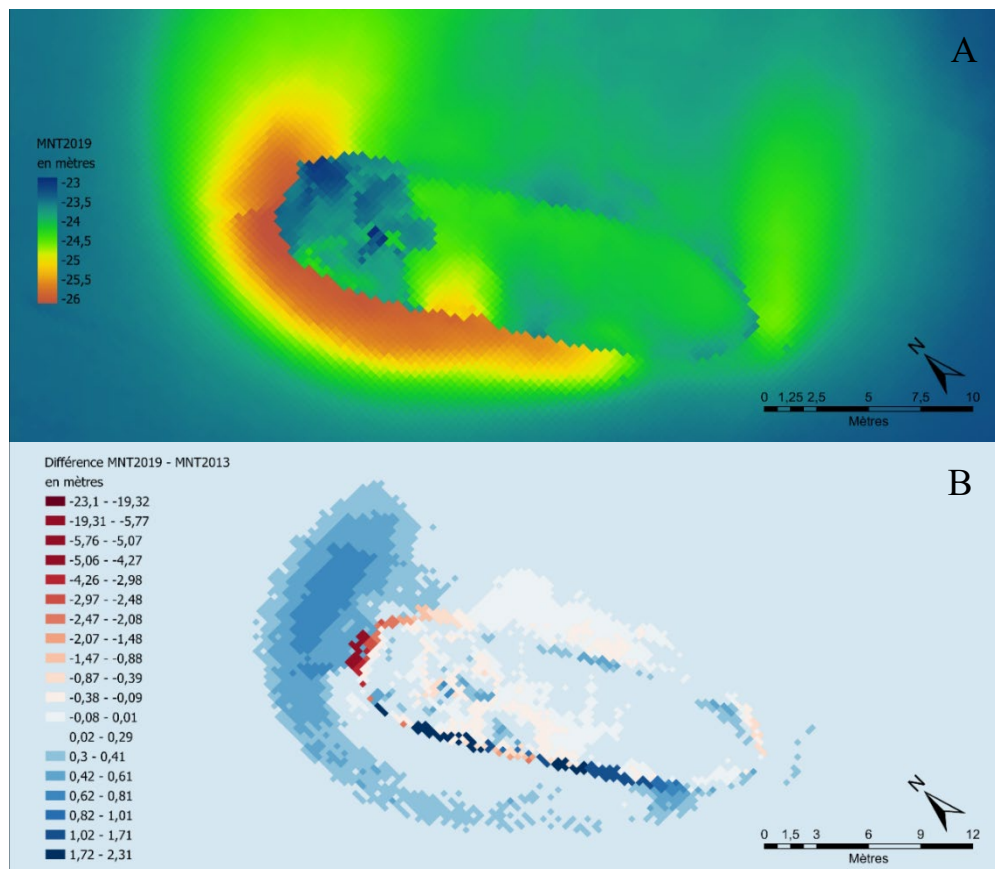

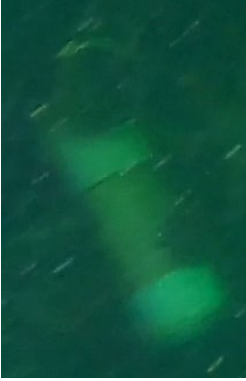





Figure 15. (A) Carte bathymétrique de la zone de l'épave du *Scotsman* obtenue à partir des données multifaisceaux de 2019. (B) Carte des différences entre les données multifaisceaux de 2019 et de 2013, mettant en évidence les zones d'érosion (rouge) et d'accumulation (bleu).

Malgré les conditions d'accumulation de sédiment opérant dans cette zone du site d'épave depuis la chute de la proue, il existe une variabilité sédimentaire très localisée qui diffère des conclusions précédentes. L'analyse des images obtenues par les plongeurs entre 2019 et 2020 nous permet de voir qu'en dépit de l'accumulation de sédiment, une perte de sédiment a été observée sur certaines parties dont la proue qui repose sur le fond. Le tableau 1 nous montre deux structures, la proue et un morceau de canalisation, qui se trouve dans la zone d'accumulation de sédiment et qui ont été partiellement découvertes entre 2019 et 2020. Cette perte de sédiment pourrait être occasionnée par la turbulence induite dans le sillage des obstacles sur le fond, accentué lors des tempêtes par les courants associés aux vagues.

Tableau 1. Évolution de la couverture sédimentaire locale autour de débris de l'épave illustrée par des images obtenues par les plongeurs sur le pourtour de l'épave du *Scotsman* de 2019 à 2021.

Débris de l'épave	2019	2020	2021
Pièce de canalisation		∅	
Proue			

D'après les données d'état de la mer issues de la bouée Viking déployée au large de Rimouski, entre 2014 et 2024 sur la période d'avril à novembre, une forte tempête a pu être enregistrée le 18 octobre 2019 pendant laquelle la hauteur maximale des vagues a atteint 7 à 8 mètres (hauteur moyenne de 4 à 5 mètres et hauteur significative de 5 à 6 mètres) avec une période de 7 secondes dans le chenal Laurentien (cf. conditions maritimes de l'Observatoire Globale du Saint-Laurent). On peut déterminer la vitesse du courant de fond engendré par l'influence de ces vagues utilisant la formule de la dispersion en eau de profondeur finie :

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

avec ω la pulsation ($\omega = \frac{2\pi}{T}$), g la constante gravitationnelle, k le nombre d'onde et h la profondeur ; et la formule de la vitesse orbitale horizontale à 25 mètres de profondeur :

$$U_{\max} = \frac{a\omega}{\sinh(kh)}$$

où U_{\max} est la vitesse maximale du courant horizontal et a l'amplitude de vague ($a = \frac{H}{2}$) (Soulsby 2006, Xiong et al. 2018).

Ainsi, lors de cet évènement de fortes vagues, le courant orbital associé à ces vagues à 25 mètres de profondeur pouvait atteindre environ 0,9 m/s, ce qui est très significatif et aurait pu causer une turbulence inhabituelle sur le site d'épave à 25 mètres de profondeur causant la remobilisation et le déplacement des sédiments comme observé localement à l'aide des images des plongeurs.

À plus large échelle, une autre zone d'érosion des sédiments est visible sur le pourtour de l'épave (Fig. 15). Entre 2013 et 2019, on observe en effet une érosion le long de l'épave avec une différence de plusieurs centimètres, voire dizaines de centimètres. Cette zone se trouve sur la partie tribord de l'épave et est quant à elle directement liée à l'hydrodynamisme autour de l'épave et par la perturbation de l'écoulement engendrée par l'épave.

3.2 RÔLE DES COURANTS DANS LA VARIABILITÉ SEDIMENTAIRE

L'hydrodynamisme du site de l'épave du *Scotsman* et du reste de cette partie de la marge continentale est contrôlée par les courants de marées, l'écoulement des eaux du Saint-Laurent ou encore les courants générés par l'influence des vents. Différents environnements de site d'épave caractérisés par des formes d'affouillement et d'accumulation ont été identifiés en fonction des conditions hydrodynamiques et de l'orientation des épaves par rapport aux courants marins (Fig. 16A et 16B, Quinn et al. 2006, Quinn 2018, Smyth 2014). Dans notre cas, l'environnement du site d'épave présente des formes d'érosion/accumulation

autour de l'épave spécifiques aux conditions hydrodynamiques de type flux régulier. Le type flux régulier signifie que l'hydrodynamisme du site de l'épave est principalement contrôlé par un écoulement continu des masses d'eau environnantes. Ainsi pour l'épave du *Scotsman*, l'écoulement continu correspond à l'écoulement des masses d'eau du fleuve Saint-Laurent de l'amont vers l'aval comme on peut l'observer dans cette partie de l'estuaire maritime. De l'interaction entre cet écoulement continu et l'épave résulte une vaste zone d'influence sur la sédimentation recouvrant une superficie d'environ 9 km² en aval de l'épave (Fig. 16C). Dans cette zone d'influence, on peut identifier deux aires allongées d'accumulation de sédiment entourant une plus vaste aire d'érosion centrale se développant à partir de l'épave sur 180 mètres de longueur vers l'aval. Cette dernière est identifiable sur la carte de différence entre les données bathymétriques de 2019 et 2013 (Fig. 15B) où l'on peut très distinctement observer une érosion des sédiments le long de partie tribord de l'épave. D'après le modèle proposé par Quinn R. et Smyth T.A.G., cette forme d'érosion/accumulation observée suggère que l'épave a une orientation d'environ 30° par rapport à l'écoulement principal des eaux du Saint-Laurent sur la marge continentale du Bic maritime (Fig. 16B).

La perturbation de l'écoulement engendrée par la présence de l'épave est à l'origine de la formation de vortex de *lee wake* et de vortex de type fer à cheval qui se forme autour de l'épave (Fig. 16A). Les vortex de type *lee wake* sont des courants tourbillonnaires qui se forment au contact de l'épave et sont accentués par les effets d'extrémité (la proue et la poupe). Ces courants vont s'étendre dans le sillage de l'épave sur le côté sous le courant (Quinn 2006, Testik et al. 2005). Les vortex de type fer à cheval sont quant à eux formés par la rotation de l'écoulement à l'approche de l'épave entraîné par un déficit du gradient de pression à la structure. Ces tourbillons se produisent autour de la structure et s'estompent en aval en forme de fer à cheval plus ou moins étiré selon le schéma d'écoulement (Quinn 2006, Testik et al. 2005, Sumer et al. 1997). Ces vortex créent de la turbulence le long de l'épave formant ainsi des aires d'affouillement où les sédiments sont érodés et transportés en aval de l'épave. Ces aires d'affouillement vont différer en taille, forme et orientation en fonction du type de d'écoulement présent sur le site d'étude, de la profondeur de ce site mais également

en fonction de l'orientation de l'épave par rapport à cet écoulement. Autour de l'épave du *Scotsman*, les aires d'affouillement se trouvent majoritairement au niveau de la proue de l'épave, du flanc bâbord de l'épave et de la poupe de l'épave et correspondent également à des aires d'accumulation de débris de coquille, de roches et de morceaux d'épave.

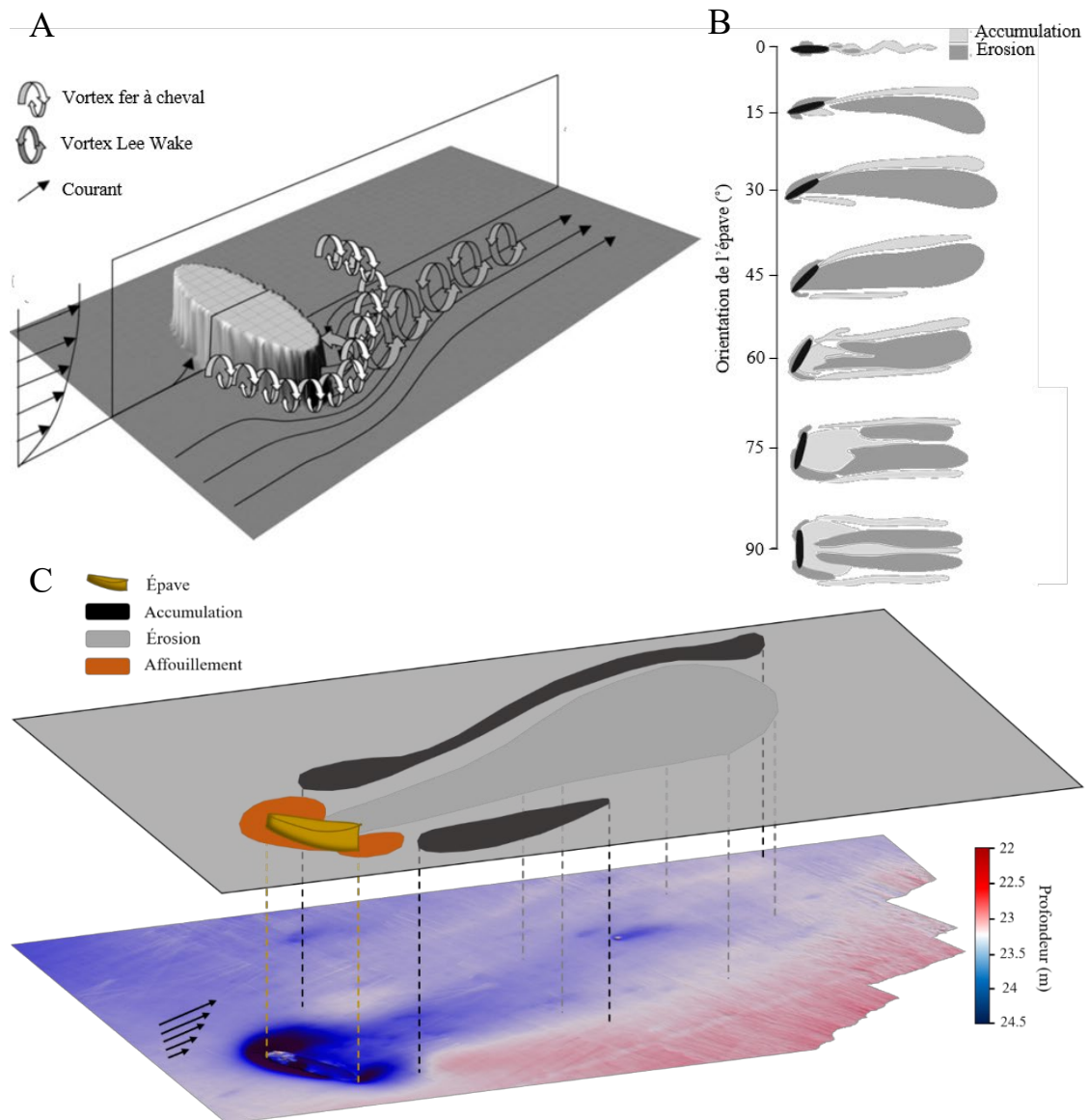


Figure 16. Schémas et observations liés à la dynamique sédimentaire autour des épaves submergées. (A) Modèle d'écoulement et développement de vortex autour d'une épave entièrement submergée (d'après Quinn, 2006). (B) Modèles conceptuels des processus d'érosion et de dépôt autour des épaves (d'après Quinn et Smyth, 2018). (C) Application au site du *Scotsman* : cartographie des zones d'accumulation, d'érosion et d'affouillement obtenue à partir des données bathymétriques de 2019.

L'action des vortex de turbulence est donc très clairement visible à la surface des sédiments, mais elle est moins bien observée sur les résultats de courantométrie acquis à environ 1,5 mètres de l'épave sur le flanc bâbord avec le courantomètre B1274. La faible densité de point de ce type de courantomètre combinée à la fréquence d'acquisition peu élevée nous empêche de distinguer facilement la turbulence générée par les vortex. Le moyennage et la soustraction des harmoniques de marée des résultats des deux courantomètres ont permis d'obtenir le signal de courant résiduel autour de l'épave présenté dans la figure 17. Cette figure présente la compilation des courants sur la période du 22 au 29 septembre 2021 en respectant le cycle de marée afin d'observer la perturbation du cycle de marée au plus proche de l'épave. Après avoir retiré l'harmonique du cycle de marée des résultats, on peut observer la présence des courants résiduels tel que les courants générés par le vent ou encore les courants de turbulence. Ainsi, pour le courantomètre B1267 éloigné de l'épave, on peut identifier une variabilité plus importante de courant résiduel se produisant au début de la marée haute, c'est-à-dire lorsque le courant moyen est le plus élevé et le plus susceptible de générer des instabilités. La variabilité du courant résiduel demeure faible pendant le reste du cycle de marée, avec des valeurs inférieures à 0,1 m/s. Concernant le courantomètre B1274 au plus proche de l'épave, la dynamique des courants semble assez différente. On observe une plus grande perturbation du courant résiduel sur toute la période du cycle de marée qui ne semble pas suivre de schéma particulier. Cette variabilité plus ou moins aléatoires du courant résiduel illustre l'action des vortex autour de l'épave.

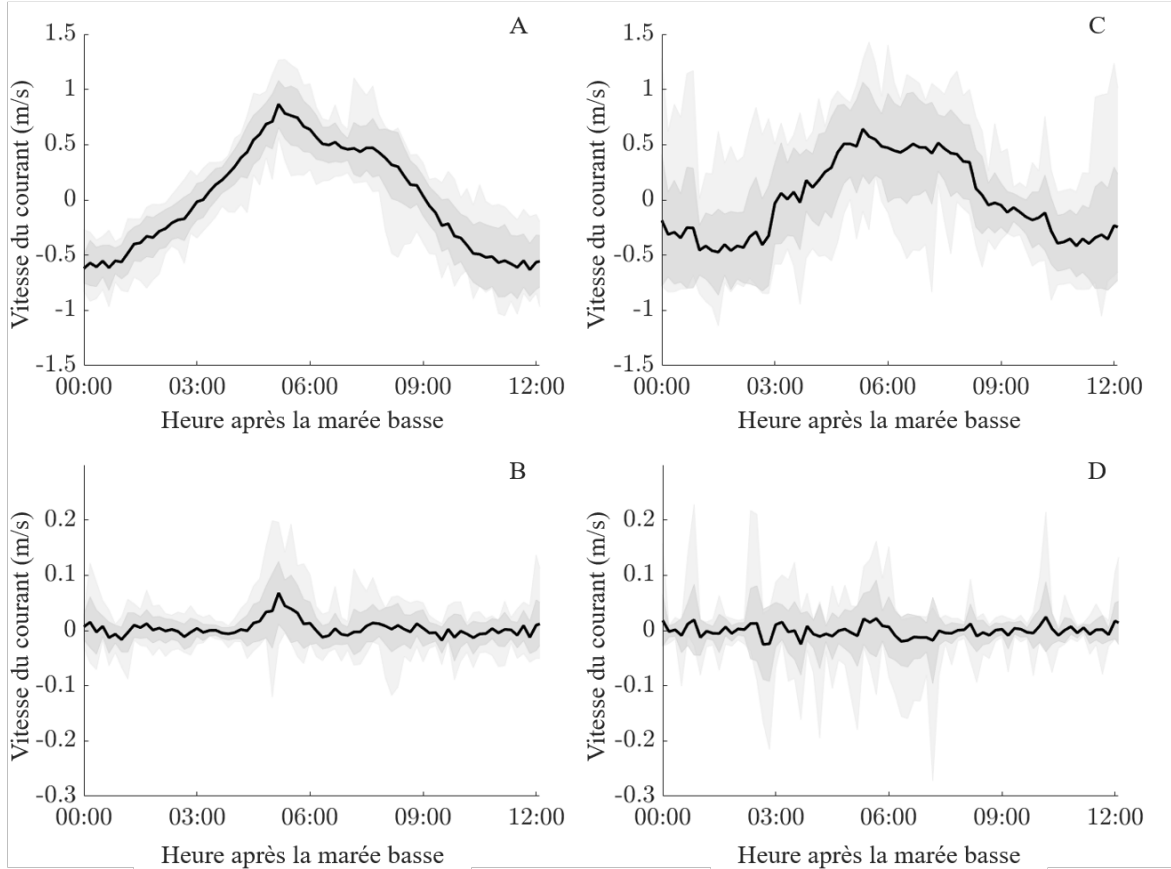


Figure 17. Statistiques des courants mesurés pendant les 12 heures suivant la marée basse semi-diurne, entre le 22 et le 29 septembre 2021. Les lignes noires représentent les vitesses moyennes, les zones gris foncé indiquent l'écart-type, et les zones gris pâle montrent les valeurs extrêmes. Courantomètres : B1267 (A, B) et B1274 (C, D). Les panels A et C correspondent aux courants totaux, B et D aux courants résiduels.

3.3 SIGNATURE DE L'ARRIVEE DE L'EPAVE SUR LE FOND

Pour évaluer l'impact de l'arrivée de l'épave sur le fond et déterminer si l'une des couches C2 ou C3 y est associée, un modèle d'âge a été élaboré à partir des analyses au ^{210}Pb . Les résultats indiquent que la couche C3 est la plus susceptible de correspondre au dépôt de l'épave, car sa datation est proche de 1846, année du naufrage du *Scotsman* au large du Bic. Pour confirmer cette hypothèse, il a été nécessaire d'analyser en détail la variabilité sédimentologique des couches C2 et C3, afin d'identifier d'éventuelles signatures spécifiques liées à l'impact de l'épave sur l'environnement sédimentaire.

Les couches C2 et C3 présentent toutes les deux un gradient granulométrique normal, avec une concentration plus importante de sédiment fin vers le sommet de chaque couche. L'impact de l'épave sur le fond marin a pu provoquer une remobilisation des sédiments entraînant les particules sédimentaires sur les bords de l'épave (Uchupi et al. 1988) et formant ainsi un gradient granulométrique caractéristique des événements de remise en suspension rapide. Ce granoclassement normal résulte du dépôt graduel des particules : les sédiments les plus grossiers, moins facilement remis en suspension, se déposent plus rapidement que les particules fines. Bien que la variabilité granulométrique soit faible dans la zone d'étude, les analyses montrent une concentration accrue de particules fines dans les couches C2 et C3 autour de 22-23 cm et 10 cm de profondeur respectivement. Ces particules argileuses atteignent environ 1 % de la fraction sédimentaire, contre une moyenne de 0,5 % dans le reste de la carotte.

Cependant, les signatures colorimétrique et géochimique des couches C2 et C3 diffèrent suggérant des processus de dépôt distincts. Dans la couche C2, les variations de la spectrophotométrie suggèrent un apport continental important. La hausse du paramètre L^* est caractéristique de sédiment plus clair et est souvent associée à un apport accru de matériaux détritiques (Debret et al. 2011). Une telle variation dans la sédimentation pourrait être associée à fort apport continental de type crue ou tempête. Cette variation est également observée aux mêmes profondeurs dans la carotte sédimentaire prélevée en face de Rimouski indiquant ainsi un phénomène généralisé à cette partie de la marge continentale. L'analyse du diagramme Q7/4 de la figure 18 met en évidence cet apport particulier dans les sédiments de la couche C2 et confirme son caractère détritique. En effet, ce diagramme nous montre l'existence de deux pôles. Le premier, avec un ratio Q7/4 proche de 1 et une réflectance comprise entre 40 et 45 %, correspond à la couche C2. Il suggère une composition sédimentaire plus riche en carbone détritique. Le second pôle, caractérisé par un ratio Q7/4 variant entre 1,1 et 1,8 et une réflectance de 30 à 40 %, représente le reste de la carotte incluant la couche C3 et reflète une sédimentation hémi-pélagique dominée par du carbone organique altéré (Debret et al. 2011).

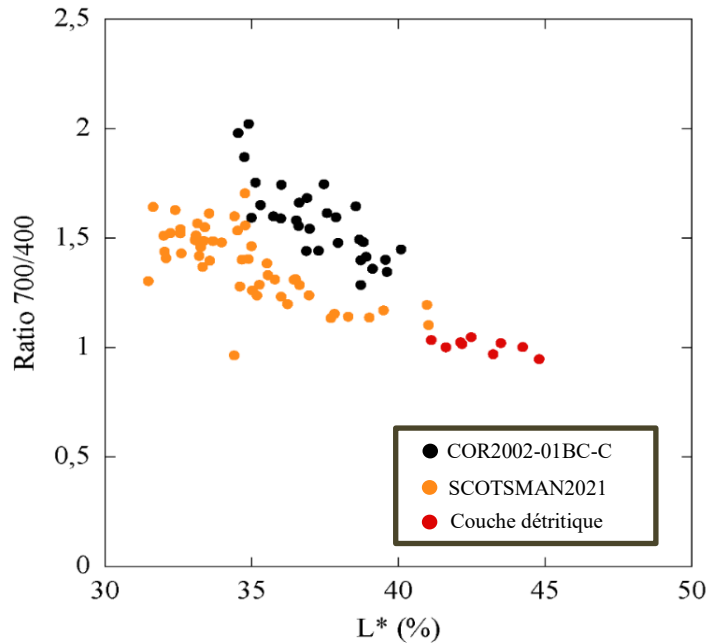


Figure 18. Diagramme Q7/4 comparant les carottes SCOTSMAN2021 et COR2002-01BC-C. Les deux pôles reflètent la variabilité de la sédimentation : la matière organique altérée (orange pour SCOTSMAN2021, noir pour COR2002-01BC-C) et la couche de dépôt carbonaté plus détritique dans la carotte SCOTSMAN2021 (rouge).

Au niveau géochimique, l'augmentation soudaine des valeurs de Si/Ca (Fig. 11) observée au niveau de la couche C3 suggère une perturbation rapide de la sédimentation en place dans ce niveau de la séquence sédimentaire. La perturbation de ce ratio, qui exprime la proportion de silicium principalement associé aux particules sableuses, par rapport au calcium associé aux particules fines d'origine pélagique (Hanebuth et al. 2009), pourrait être associée à la remise en suspension des sédiments engendrée par l'impact de l'épave sur le fond à l'origine du tri granulométrique des particules sédimentaires. Dans la couche C2, la forte augmentation des ratios Mn/Fe et Fe/Zr, souvent associés aux mécanismes de transport

et de triage des particules sous des conditions de flux énergétique élevé (Hanebuth et al. 2008), renforce l'hypothèse d'un apport continental majeur.

Afin de mieux différencier les couches C2 et C3 et d'associer la signature sédimentaire d'une des deux couches au dépôt de l'épave sur le fond, les deux rapports Si/Ca et Mn/Fe ont été mis en relation dans la figure 19 en incluant les résultats de la carotte COR2002-01BC-C servant de standard de la sédimentation hémi-pélagique locale. Cette figure met en évidence la différence sédimentaire entre les deux couches formant deux pôles qui se démarquent de la sédimentation hémi-pélagique semblable entre les deux carottes. Un premier pôle présentant des valeurs de Si/Ca semblables à celles de la sédimentation hémi-pélagique, mais des valeurs de Mn/Fe plus fortes correspondent à la couche C2. Le second pôle quant à lui se caractérise par des valeurs plus élevées de Si/Ca que celles de la sédimentation hémi-pélagique et des valeurs de Mn/Fe similaires à la sédimentation locale.

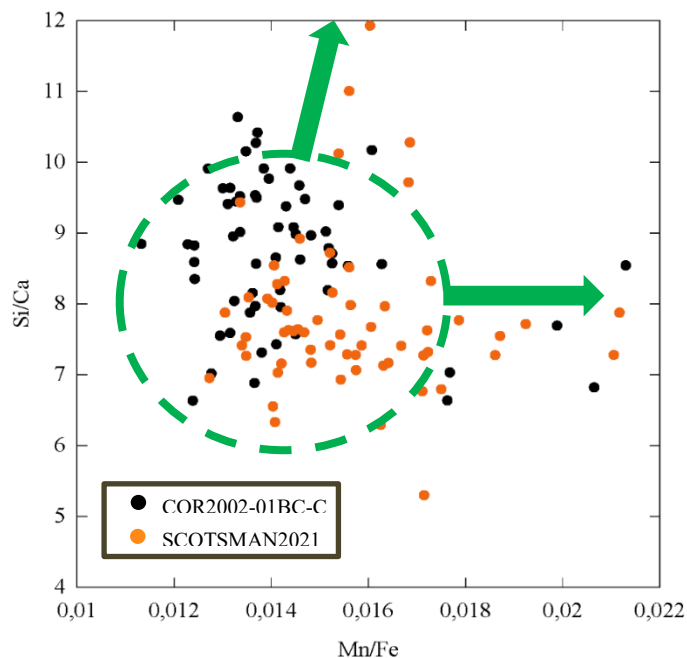


Figure 19. Diagramme Si/Ca versus Mn/Fe pour les carottes SCOTSMAN2021 et COR2002-01BC-C. Cette représentation permet d'identifier la couche détritique et la couche de remise en suspension présentes dans la carotte SCOTSMAN2021.

Le premier pôle correspond aux forts apports continentaux survenant entre 26,5 et 20 cm et le second pôle correspond donc à la couche sédimentaire C3 de remise en suspension des sédiments engendrée par le dépôt de l'épave.

L'analyse détaillée de la géochimie de ces deux couches, combinée à la réalisation du modèle d'âge, confirme que la couche C3 s'est formée à l'arrivée de l'épave sur le fond en 1846. La variabilité des paramètres sédimentaires de la couche C3 peut donc être indiquée comme la signature du dépôt de l'épave sur le fond. La couche C2 se serait quant à elle produite environ 100 ans avant l'arrivée de l'épave du *Scotsman* sur le fond soit autour de 1740-1750 d'après l'interpolation des données de datation.

3.4 SEDIMENTATION POST DEPOT DE L'EPAVE

La perturbation de conditions d'hydrodynamisme engendrée par l'arrivée de l'épave sur le fond est à l'origine d'un changement dans la dynamique et la composition sédimentaire sur le site. En effet, depuis l'arrivée de l'épave sur le fond, la moyenne géométrique de la taille des grains diminue progressivement jusqu'au sommet de la séquence sédimentaire. Ce changement est caractérisé par une augmentation du pourcentage de particules fines qui se fait progressivement jusqu'à la surface du sédiment (Fig. 20B). Le dépôt des sédiments fins de type silt et argile est favorisé par la protection qu'offre l'épave face aux forts courants d'écoulement présents dans la zone.

Dans la séquence sédimentaire précédant l'arrivée de l'épave, la moyenne géométrique de la taille des particules est plus élevée que dans la séquence post dépôt, sauf pour l'intervalle de la couche C2. Il ne semble pas y avoir de tendance à l'augmentation de la concentration en particules fines comme on peut observer dans la séquence sédimentaire post-dépôt de l'épave (Fig. 20A).

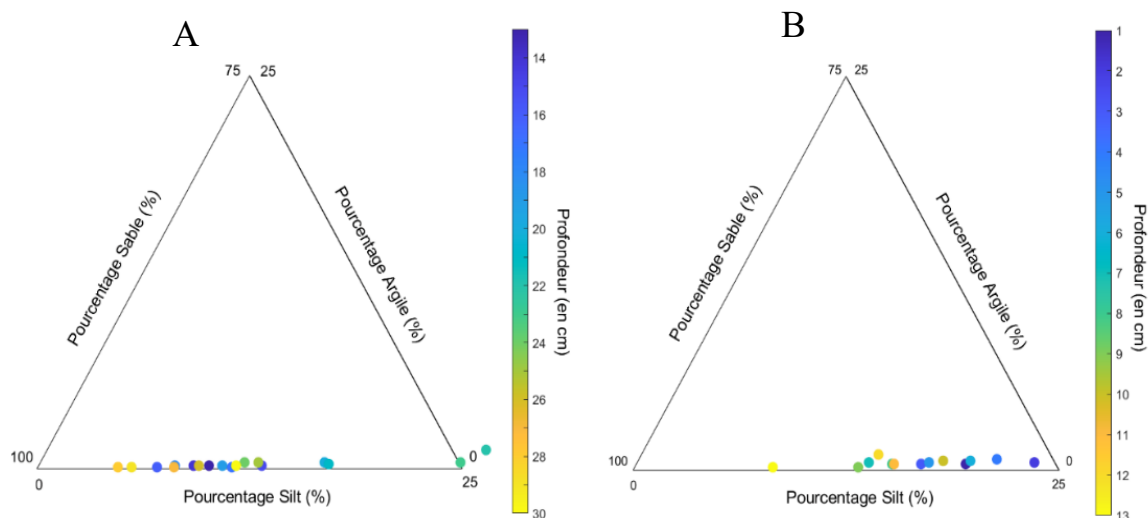


Figure 20. (A) Diagramme ternaire de la granulométrie à chaque centimètre des sédiments de la carotte SCOTSMAN2021 avant le dépôt de l'épave sur le fond. (B) Diagramme ternaire de la granulométrie à chaque centimètre des sédiments de la carotte SCOTSMAN2021 après le dépôt de l'épave sur le fond.

La carotte sédimentaire ayant été prélevée dans une aire influencée par l'épave, la zone d'érosion en aval de l'épave, on peut aussi observer que le taux de sédimentation interpolé des résultats de datation (Fig. 11) est très perturbé et semble varier au cours du temps. La présence de l'épave a donc une influence sur la répartition des sédiments dans toute la zone de son influence et donc sur le taux de sédimentation, pouvant ainsi perturber la répartition des espèces sur le fond.

3.5 DEGRADATION DE L'EPAVE AU COURS DU TEMPS

L'épave du *Scotsman* présente aujourd'hui un état de dégradation avancé, témoignant de l'influence marquée des processus environnementaux sur sa préservation. La chute de l'étrave observée entre 2013 et 2019 constitue une preuve directe de l'évolution dynamique

du site. Cette déstabilisation est probablement liée à l'action de la turbulence et des courants, qui ont engendré une zone d'affouillement au niveau de la proue. L'érosion localisée des sédiments à la base de l'étrave aurait fragilisé la structure, entraînant progressivement sa rupture et sa chute sur le fond marin. Depuis la chute de l'étrave sur le fond, il semble y avoir eu une accumulation de sédiment atteignant quelques dizaines de centimètres. Cette accumulation tranche considérablement avec le taux de sédimentation observable dans la région. La perturbation du taux de sédimentation est directement observable dans les données de datation de la carotte sédimentaire (Fig. 11). Depuis l'arrivée de l'épave sur le fond, on observe une fluctuation importante du taux de sédimentation avec une tendance à la diminution de ce taux dans la zone de prélèvement de la carotte sur le site de l'épave. Au contraire, l'accumulation de sédiment au niveau de l'étrave et telle que celle-ci se verra recouverte par les sédiments dans les années à venir. Seules des tempêtes de forte énergie avec de grandes vagues, comme observée le 18 octobre 2019, pourraient éventuellement découvrir l'étrave de sa protection sédimentaire et la resoumettre aux contraintes de l'environnement marin.

L'analyse comparative des surfaces bathymétriques de 2013 et 2019 (Fig. 15) met également en évidence d'autres modifications morphologiques, moins marquées mais révélatrices d'un mouvement de la coque pouvant atteindre quelques centimètres. La partie bâbord, qui est plus exposée et moins recouverte par les sédiments, semble s'être légèrement affaissée, contrairement au côté tribord qui est plus enseveli et relativement stable. Ce déséquilibre suggère une déformation progressive de la coque, résultant de la combinaison entre l'usure structurelle et les forces exercées par le courant principal du Saint-Laurent. Cette exposition accrue au flux hydrodynamique accentue l'érosion des matériaux et favorise la désagrégation de la charpente de l'épave. Les observations visuelles réalisées par les plongeurs confirment cette dégradation : le revêtement métallique (alliage de zinc et de cuivre, Delmas 2020), qui assurait autrefois une protection et un soutien partiel de la structure en bois, est aujourd'hui fortement corrodé et fragmenté. La perte de ce renfort entraîne un affaissement progressif de la coque, qui tend à s'effondrer sur elle-même.

Les zones d'érosion sédimentaire situées à proximité immédiate de l'épave apparaissent donc comme un facteur majeur de déstabilisation. Toutefois, la variabilité spatiale de la sédimentation autour du *Scotsman* joue un rôle ambivalent : si l'érosion accélère la dégradation de certaines parties, les zones d'accumulation sédimentaire peuvent, au contraire, favoriser la préservation des fragments déjà détachés. L'enfouissement partiel de ces éléments les isole des processus physiques (turbulence, abrasion) et chimiques (corrosion, oxydation) actifs à l'interface eau-sédiment.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire s'est penché sur l'étude intégrée de l'épave du *Scotsman*, navire marchand naufragé en 1846 au large de l'île du Bic, sur la marge continentale de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. À travers une approche interdisciplinaire combinant la géophysique, la sédimentologie et la courantométrie, l'objectif principal était de mieux comprendre les interactions entre l'épave, les dynamiques hydrodynamiques locales et les processus sédimentaires post-naufage.

Sur le plan sédimentologique, l'étude de la carotte prélevée à proximité de l'épave a révélé la présence d'une couche sédimentaire distincte associée au dépôt initial de l'épave. L'association de cette couche avec l'arrivée de l'épave repose sur un modèle d'âge établi par datation au ^{210}Pb ainsi que sur l'analyse des propriétés géochimiques et granulométriques des sédiments révélant une signature particulière : présence d'un granoclassement normal, augmentation de la fraction fine, modification du ratio Fe/S et d'autres indicateurs de conditions réductrices en surface. La mise en relation des ces variabilités sédimentaires entre la carotte étudiée et une carotte de référence (COR2002-01BC-C) a permis de distinguer les signatures propres aux événements ponctuels (remise en suspension, dépôt soudain) des tendances plus stables de la sédimentation hémi-pélagique locale.

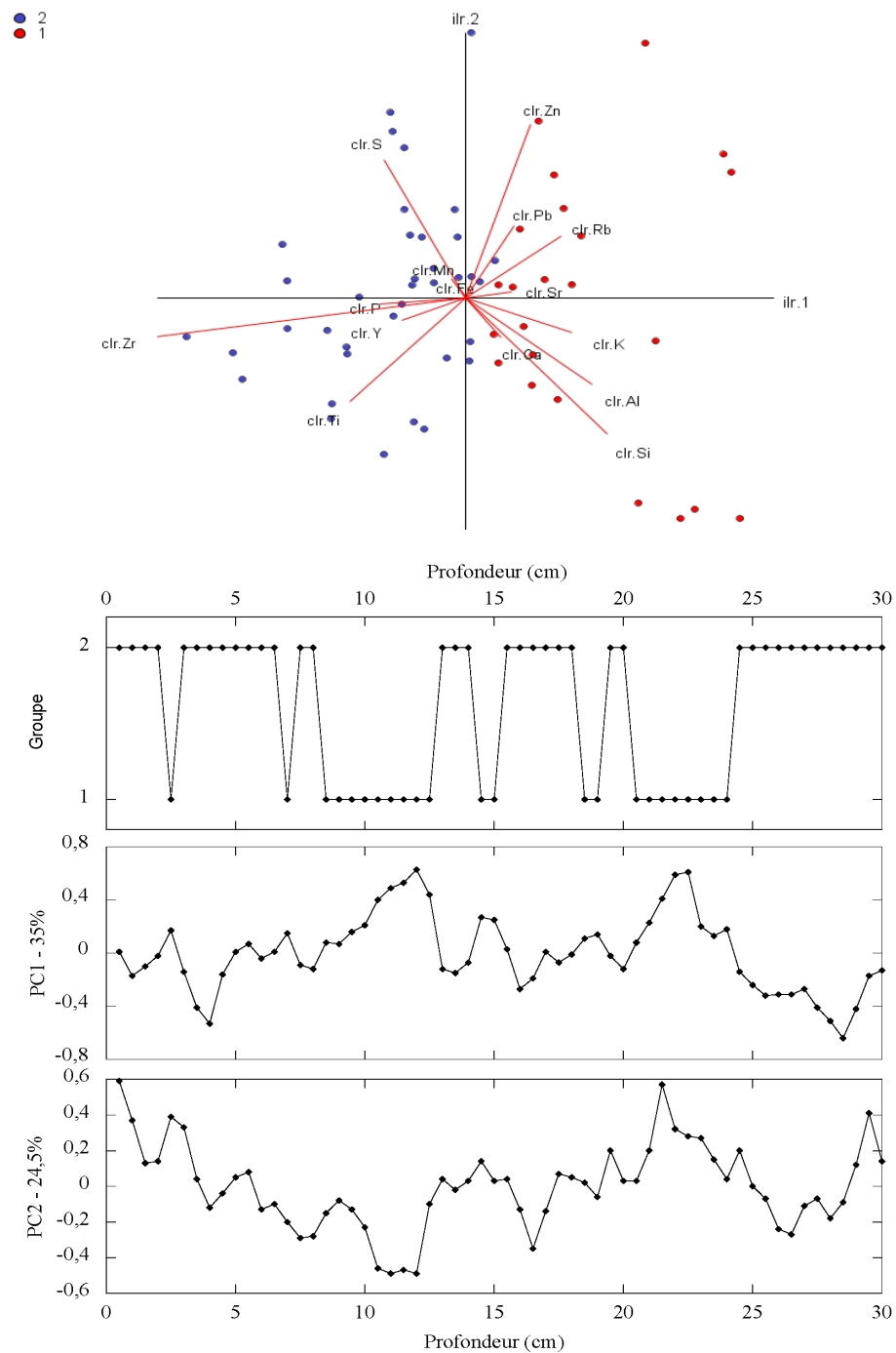
Les levés géophysiques et les observations directes ont permis de caractériser la morphologie du fond marin et d'identifier les zones d'érosion et de dépôt autour de l'épave. L'analyse des mesures de courant a mis en évidence un hydrodynamisme marqué, influencé par la structure même de l'épave, créant des phénomènes d'affouillement asymétriques selon les orientations des flux. Les phénomènes de turbulence accentués par la présence de l'épave amènent à une variabilité sédimentaire spatiale et temporelle très localisée et très changeante.

Les résultats montrent que le naufrage du *Scotsman* a induit une perturbation marquée du régime sédimentaire local, modifiant durablement la granulométrie des sédiments et la géochimie des couches les plus récentes. Ces effets témoignent de la sensibilité des environnements marins à l'introduction soudaine de structures anthropiques et illustrent l'intérêt d'une approche multidisciplinaire pour comprendre les processus post-naufrage et leurs impacts sur les sédiments. En somme, cette étude contribue à la compréhension des mécanismes de dégradation et de transformation des épaves en milieu marin. Elle offre des perspectives utiles pour la gestion du patrimoine submergé et souligne l'importance de documenter les interactions complexes entre les épaves, les dynamiques océaniques et les sédiments, dans une optique à la fois scientifique, patrimoniale et environnementale.

Dans la poursuite de ce projet, il serait primordial de s'intéresser à la répartition des sédiments de surface sur toute la zone de l'épave en effectuant un échantillonnage en maillage sur toute la zone pour mieux comprendre la variabilité sédimentaire à fine échelle. Ce travail pourrait être combiné à une analyse plus fine des phénomènes de turbulence sur le pourtour et dans l'épave en mettant en place une série d'ADCP proche du fond et orientée vers différentes parties de l'épave.

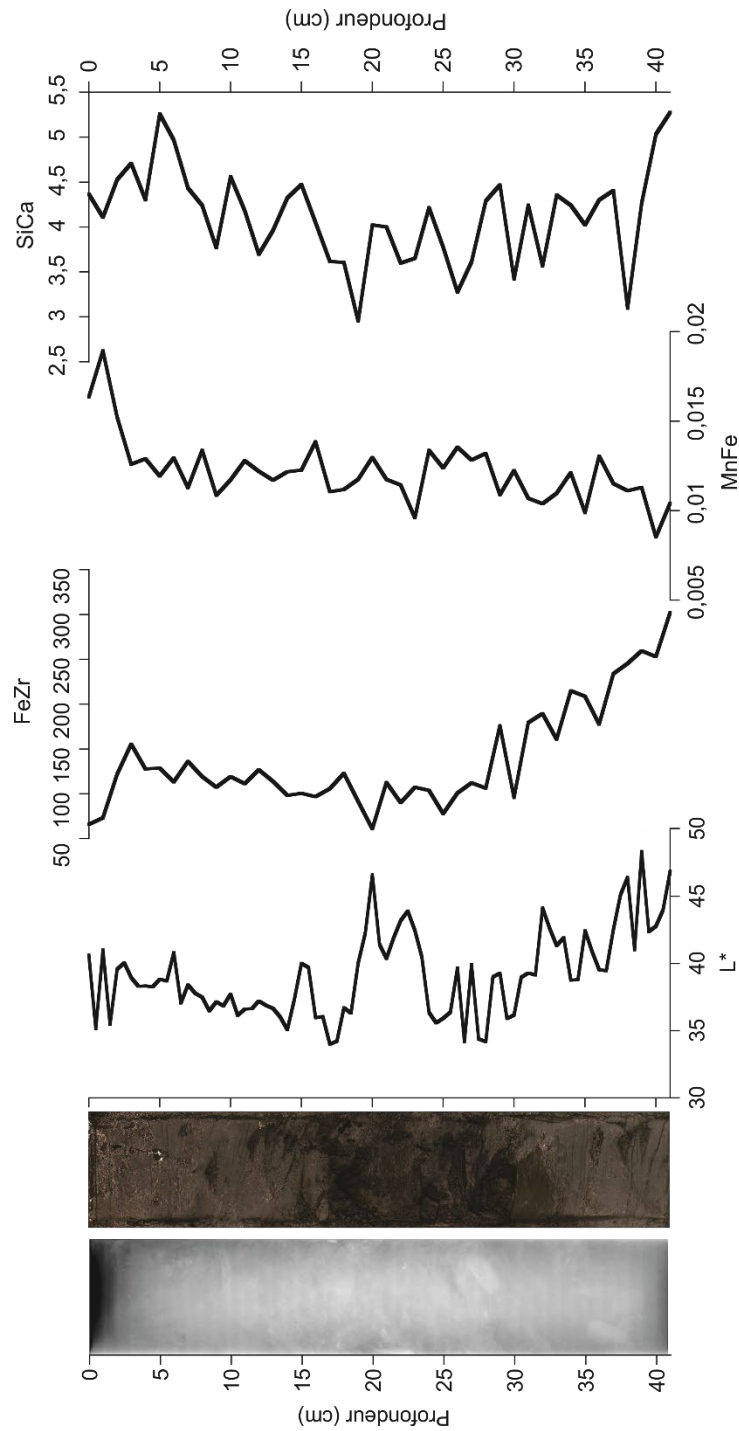
ANNEXE 1

ANALYSE À COMPOSANTE PRINCIPALE RÉALISÉE SUR LES DONNÉES DE GÉOCHIMIE DE LA CAROTTE SCOTSMAN2021



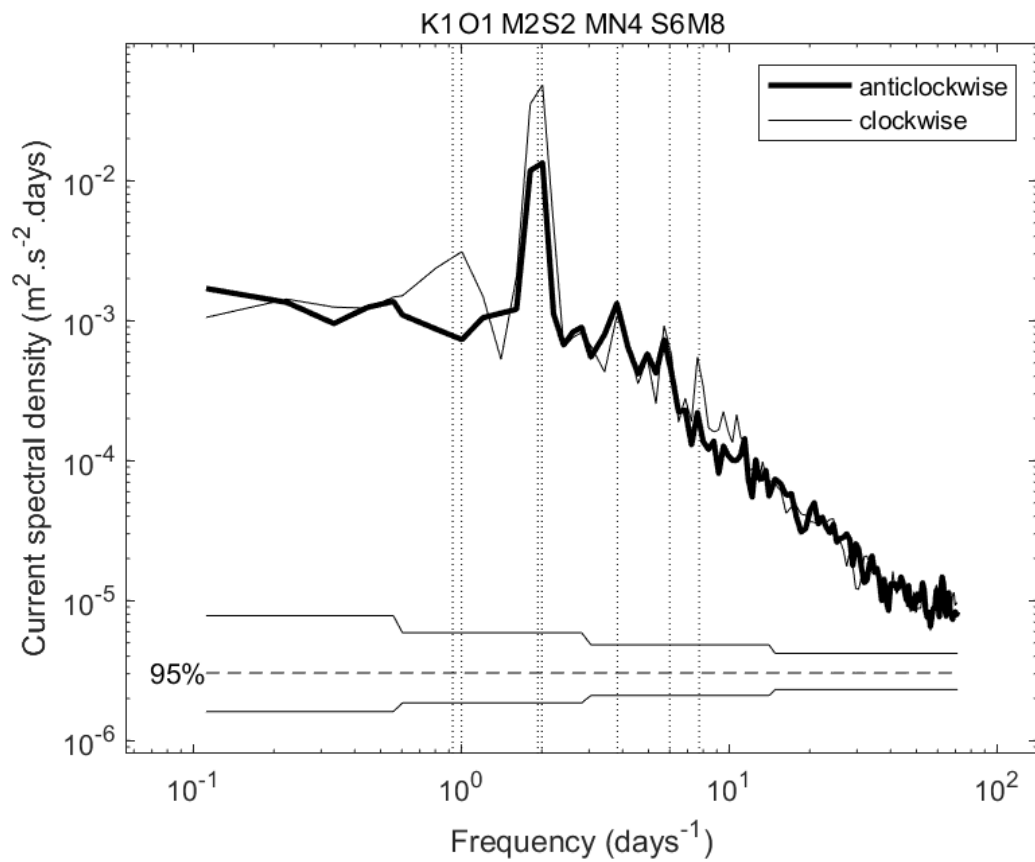
ANNEXE II

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET GÉOCHIMIQUES DE LA CAROTTE COR2002-01BC-C ASSOCIÉES À LA PHOTOGRAPHIE ET À L'IMAGE RADIOGRAPHIQUE DE LA CAROTTE



ANNEXE III

ANALYSE SPECTRALE DES COURANTS ANTI-HORAIRE ET HORAIRE OBTENUS AVEC LE COURANTOMÈTRE B1267 SUR LE SITE DE L'ÉPAVE DU SCOTSMAN



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aquino-López, M.A., Blaauw, M., Christen, J.A., Sanderson, N.K., 2018. Bayesian Analysis of ^{210}Pb Dating. *JABES* 23, 317–333.
- Barbel, H., Bhiry, N., Todisco, D., Desrosiers, P., Marguerie, D. (2019). Paaliup Qarmangit 1 site geoarchaeology: Taphonomy of a Thule-Inuit semi-subterranean dwelling in a periglacial context in northeastern Hudson Bay. *Geoarchaeology*, 34(6), 809-830.
- Bethencourt, M., Fernandez-Montblanc, T., Izquierdo, A., Gonzalez-Duarte, M.M., Munoz-Mas, C. (2018). Study of the influence of physical, chemical and biological conditions that influence the deterioration and protection of underwater cultural heritage. *Science of the total environment* 613-614, 98-114.
- Berger, J.F. (1997). Géoarchéologie du Bassin Valdanais (Drôme) dans : *Dynamique du paysage : Entretiens de géoarchéologie*. Éd. Alpara.
- Bernatchez, P. & Dubois, J.M. (2004). Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire*, 58,45-7L.
- Blake, V. S. (1995). Remote sensing in underwater archaeology: Simulation of side scan sonar images using ray tracing techniques. *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 598, 39-39.
- Blott, S.J., Pye, K. (2001). Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1237-1248.
- Camu, P. (1923). *Le Saint-Laurent et les Grands Lacs au temps de la voile, 1606-1850*. Cahier du Québec, Collection Géographie.
- Calder, B. (2003). Automatic statistical processing of multibeam echosounder data. *International hydrographic review*, vol. 4, no. 1.
- Caston, G.F. (1979). Wreck marks: Indicators of net sand transport. *Marine geology* 33, 193-204.

- Collinson, J. D. & Thompson, D. B. (2019). *Sedimentary Structures. 4th Edition*. London: Unwin Hyman.
- Comas-Cufi M., Thió-Henestrosa S. (2011). CoDaPack 2.0: a stand-alone, multi-platform compositional software. In : Egozcue JJ, Tolosana-Delgado R, Ortego MI, eds. CoDaWork'11 : 4th International Workshop on Compositional Data Analysis. Sant Feliu de Guíxols.
- Couture, A., Bhiry, N., Monette, Y., Woolett, J. (2016). A geochemical analysis of 18th-century Inuit communal house floors in northern Labrador. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 6, 71-81.
- Dalrymple, R.W., & Choi, K. (2007). Morphologic and facies trends through the fluvial marine transition in tide-dominated depositional systems: A schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. *Earth-Science Reviews*, 81, 135-174.
- Debret, M., Sebag, D., Desmet, M., Balsam, W., Copard, Y., Mourier, B., Susperrigui, A. S., Arnaud, F., Bentaleb, I., Chapron, E., Lallier-Vergès, E. & Winiarski, T. (2011). Spectrocolorimetric interpretation of sedimentary dynamics: the new “Q7/4 diagram”. *Earth-Science Reviews* 109,1–19.
- Delmas V. (2020). Intervention archéologique dans le parc du Bic. Rapport d'intervention archéologique effectuée en 2019.
- Delmas V. (2022). Intervention archéologique subaquatique sur l'épave du *Scotsman* (DcEc-19) dans le parc du Bic. Rapport d'intervention archéologique effectuée en 2021.
- de Vernal, A., St-Onge, G., & Gilbert, D. (2011). Oceanography and Quaternary geology of the St. Lawrence Estuary and the Saguenay Fjord. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 14, 012004.
- Drapeau, G. (1992). Dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire* vol.46, no2, 233-242.
- Elias, S.A., (2021). Geoarchaeology. *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, pp. 538-553.
- Farah R. (2011). Étude sédimentologique des sables cortiqués de l'Holocène tardif dans la Rade de Genève (Suisse). Unpublished Master thesis, University of Geneva, Geneva (Switzerland), 124 pp.

- Faulk, K. L., 2019. 50 Years of Offshore Technological Innovation Illuminates Millennia of Archaeological Discoveries. Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas.
- Ferentinos, G., Fakiris, E., Christodoulou, D., Geraga, M., Dimas, X., Georgiou, N., Kordella, S., Papatheodorou, G., Prevenios, M., Sotiropoulos, M. (2020). Optimal sidescan sonar and sub-bottom profiler surveying of ancient wrecks: the Fiskardo wreck, Kefallinia Island, Ionian Sea. *Journal of archaeological science*, 113, 105032.
- Fernandez-Montblanc, T., Quinn, R., Izquierdo, A., Bethencourt, M. (2016). Evolution of shallow water wave-dominated shipwreck site: Fougueux (1805), Gulf of Cadiz. *Geoarchaeology: An international journal* 31, 487-505
- Fournier, M. (1985). *Les îles et récifs du Bic, l'île des mille et une nuits*. Revue La Plongée, volume 12, numéro 6, Hiver 1985-86.
- Gron, O., Boldreel, L.O., Cvikel, D., Kahanov, Y., Galili, E., Hermand, J.-P., Naevestad, D., Reitan, M. (2015). Detection and mapping of shipwrecks embedded in sea-floor sediments. *Journal of Archaeological Science, Reports* 4, 242-251.
- Hanebuth, T.J.J., Lantsch, H. (2008). A late quaternary sedimentary shelf system under hyperarid conditions: Unravelling climatic, oceanographic and sea-level controls (Golfe d'Arguin, Mauritania, NW Africa). *Marine Geology* 256, 77-89.
- Hanebuth, T.J.J., Henrich, R. (2009). Recurrent decadal-scale dust events over Holocene western Africa and their control on canyon turbidite activity (Mauritania). *Quaternary science reviews* 28, 261-270.
- Hassan, F.,A., (1978). Sediments in Archaeology : Methods and implications for Paleoenvironmental and cultural Analysis. *Journal of Field Archaeology* 5. pp. 197-213.
- Hocq, M. Dubé, C. (1994). *Géologie du Québec*. Les Publications du Québec, Québec, 154 p.
- Jaegle, M. (2015). Nature et origine des sédiments de surface de l'estuaire du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Institut des sciences de la mer de Rimouski, 82p.
- Jaijel, R., Goodman Tchernov, B. N., Biton, E., Weinstein, Y., Katz, T. (2021). Optimizing a standard preparation procedure for grain size analysis of marine sediments by laser diffraction (MS-PT4SD: Marine sediments-pretreatment for size distribution). *Deep-Sea Research I*, 167, 103429.

- Labrie, R., Bhiry, N., Todisco, D., Finco, C., Couillet, A. (2024). Conceptual model of permafrost degradation in an Inuit archaeological context (Dog Island, Labrador): a geophysical approach. *Geosciences*, 14(4), 95.
- Lafferty, B., Quinn, R., Breen, C. (2006). A side-scan sonar and high-resolution chirp sub-bottom profile study of the natural and anthropogenic sedimentary record of the Lower Lough Erne, northwestern Ireland. *Journal of archaeological science*, 33, 756-766.
- Leclerc, J. (2001). Pilotes du Saint-Laurent: le fleuve dans le creux de la main. *Continuité*, 89, 33-39.
- Lisé-Pronovost, A., Salomon, F., Goiran, J.-P., St-Onge, G., Herries, A. I. R., Montero-Serrano, J.C., Heslop, D., Roberts, A. P., Levchenko, V., Zawadzki, A., Heijnis, H. 2019. Dredging and Canal Gate Technologies in the Ancient Harbour of Rome from Multi-Proxy Sediment Analysis. *Quaternary International* 511, 78-93.
- Littler, G., Coughlan, M., Majcher, J., Keenahan, J. (2022). Understanding sediment dynamics at a shipwreck site using CFD modelling. *Geosciences* 12, 369.
- Loring, D.H., and Nota, D.J.G., 1973, Morphology and sediments of the Gulf of St. Lawrence: Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada, Ottawa, v. 182, 147 p.
- Majcher, J., Quinn, R., Plets, R., Coughlan, M., McGonigle, C., Sacchetti, F., Westley, K. (2021). Spatial and temporal variability in geomorphic change at tidally influenced shipwreck sites: the use of time-lapse multibeam data for the assessment of site formation processes. *Geoarchaeology* 36, 429-454.
- Marchant, R., Stevens, T., Choukroun, S., Coombes, G., Santarossa, M., Whinney, J., Ridd, P. (2014). A buoyant sphere for marine current estimation. *IEEE Journal of oceanic engineering*, vol. 39, no 1.
- Mattei, G., Giordano, F. (2015). Integrated geophysical research of Bourbonic shipwrecks sunk in the Gulf of Naples in 1799. *Journal of Archaeological Science, Reports* 1, 64-72.
- McNeely, R., Dyke, A.S., Southon, J.R. (2006). Canadian marine reservoir ages preliminary data assessment. Geological Survey of Canada.
- McNinch JE, Wells JT, Drake TG (2001). The fate of artifacts in an energetic, shallow-water environment: scour and burial at the wreck site of Queen Anne's Revenge. *Southeastern Geol* 40:19–27.

- Pinet, N., Brake, V., & Campbell, C. (2011). Seafloor and Shallow Subsurface of the St. Lawrence River Estuary, *Geoscience Canada* 38,3140.
- Pinet, N., Brake, V. I., Campbell, D. C., Duchesne, M. J., Gagné, H. & Bolduc, A. M. (2011). Surficial geology and shaded seafloor relief, St. Lawrence River Estuary, Quebec. *Commission géologique du Canada, Carte série "A", 2161A*, Ressources naturelles Canada.
- Plets, R.M.K., Dix, J.K., Adams, J.R., Bull, J.M., Henstock, T.J., Gutowski, M., Best, A.I. (2009). The use of a high-resolution 3D chirp sub-bottom profiler for the reconstruction of the shallow water archaeological site of the Grace Dieu (1439), River Hamble, UK. *Journal of archaeological science*, 36, 408-418.
- Plets, R., Quinn, R., Forsythe, W., Westley, K., Bell, T., Benetti, S., McGrath, F., Robinson, R. (2011). Using multibeam echo-sounder data to identify shipwreck sites: archaeological assessment of the Joint Irish bathymetric survey data. *The international journal of nautical archaeology*, 40.1, 87-98.
- Potvin D. (1945). *Le Saint-Laurent et ses îles – Histoire, Légendes, Anecdotes, Description, Topographie*. Québec, Éditions Garneau, 1945, 1 ressource en ligne (425 p.), Collections de BAnQ.
- Quinn, R., Bull, J.M., Dix, J.K. (1997). Imaging wooden artefacts using Chirp sources. *Archaeological Prospection* vol.4, 25-35.
- Quinn, R., Cooper, A., Williams, B. (2000). Marine geophysical investigation of the inshore coastal waters of Northern Ireland. *The International Journal of Nautical Archaeology* 29.2: 294-298.
- Quinn, R., Breen, C., Forsythe, W. (2002). Integrated geophysical surveys of the French frigate *La Surveillante* (1797), Bantry Bay, Co. Cork, Ireland. *Journal of archaeological science* 29, 413-422.
- Quinn, R. (2006). The role of scour in shipwreck site formation processes and the preservation of wreck-associated scour signatures in the sedimentary record – evidence from seabed and sub-surface data. *Journal of archaeological science* 33, 1419-1432.
- Quinn R, Boland D (2010) The role of time-lapse bathymetric surveys in assessing morphological change at shipwreck sites. *J Archaeol Sci* 37:2938–2946.
- Quinn, R., Smyth T. A. G. (2018). Processes and patterns of flow, erosion, and deposition at shipwreck sites: a computational fluid dynamic simulation. *Archaeological Anthropological Sciences, Reports* 10: 1429-1442.

- Rosa, N. (1897). La construction des navires à Québec et ses environs – Grèves et Naufrages. Ancien constructeur, Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Ross, A., Munro, J., Deslauriers-Chouinard, L., Gohier, M., Broué, C. (2021). Le Bic: une histoire maritime. Comité du patrimoine naturel et culturel du Bic.
- Saucier, F. J. (2003). Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Geophysical Research*, I08(C8),3269.
- Silverberg N. (1978). Sediments of the Rimouski shelf region, lower Saint Lawrence estuary. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 15(11): 1724-1736.
- Smith, J.N., and Schafer, C.T., 1999, Sedimentation, bioturbation, and Hg uptake in the sediments of the estuary and Gulf of St. Lawrence: *Limnology and Oceanography*, v. 44, p. 207-219.
- Smyth, T.A.G., Quinn, R., (2014). The role of computational fluid dynamics in understanding shipwreck site formation processes. *Journal of Archaeological Science* 45, 220-225.
- Soulsby, R. L. (2006). Simplified calculation of wave orbital velocities.
- Stewart, D.J. (1999). Formation processes affecting submerged archaeological sites: an overview. *Geoarchaeology: An international journal*, vol.14, no.6, 565-587.
- St. Lawrence Center. (1996). State of the Environment Report on the St. Lawrence River. Volume 1: The St. Lawrence Ecosystem. "St. Lawrence UPDATE" series. Environment Canada - Quebec Region, Environmental Conservation, and Éditions MultiMondes. Montreal,
- St-Onge, G., Mulder, T., Francus, P. & Long, B. (2007). Continuous physical properties of cored marine sediments. In Hillaire-Marcel, C.& de Vernal, A. (eds.). *Developments in Marine Geology, Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography* 1,63–98. Elsevier, Amsterdam.
- St-Onge, G., Duchesne, M.J., & Lajeunesse, P. (2011). Marine geology of the St. Lawrence Estuary. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 14,012003.
- Uchupi, E., Muck, M.T., Ballard, R.D. (1988). The geology of the Titanic site and vicinity. *Deep-Sea Research* vol.35, no.7, 1093-1110.

- Violante, C., Abate, N., Ferdani, D., Masini, N., Gallocchio, E., Pagano, A., & Pagano, F. (2025). 3D Acoustic Remote Sensing mapping of the Underwater Cultural Heritage in the Marine Protected Area of Baia submerged Park (Bay of Pozzuoli, Southern Italy). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 303-308.
- Ward, I. A. K., Larcombe, P., Veth, P. (1999). A new process-based model for wreck site formation. *Journal of Archaeological Science* 26, 561–570.
- Ward, I. A. K., Larcombe, P., Brinkman, R., Carter, R.M. (1999). Sedimentary processes and the Pandora wreck, Great Barrier Reef, Australia. *Journal of field archaeology* 26:1, 41-53.
- Waters, M.R. (1992). *Geoarchaeology, Principles of Geoarchaeology: A North American perspective*. The University of Arizona Press, Tuscon, pp. 3–13.
- Westley, K., Plets, R., Quinn, R., McGonigle, C., Sacchetti, F., Dale, M., McNeary, R., Clements, A. (2019). Optimising protocols for high-definition imaging of historic shipwrecks using multibeam echosounder. *Archaeological and Anthropological Sciences* 11, 3629-3645.
- Wheeler, A. (2002) Environmental controls on shipwreck preservation: the Irish context. *J Archaeol Sci* 29:1149–1159.
- Xiong, J., Wang, Y. P., Gao, S., Du, J., Yang, Y., Tang, J., & Gao, J. (2018). On estimation of coastal wave parameters and wave-induced shear stresses. *Limnology and Oceanography: Methods*, 16(9), 594-606.

