

Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

Détection des changements de la bathymétrie des zones côtières par analyse des séries temporelles d'imagerie satellitaires : application aux Îles-de-la-Madeleine

Guillaume Leclerc

Essai présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences géographiques (M.Sc.),
cheminement en géodéveloppement durable

Février 2021

© Guillaume Leclerc

Superviseur d'essai : Yacine Bouroubi

Membres du jury d'évaluation de l'essai :

- Yacine Bouroubi (directeur de l'essai), professeur au Département de géomatique appliquée de l'université de Sherbrooke
- Mickaël Germain, professeur au Département de géomatique appliquée de l'université de Sherbrooke

Résumé

Les relevés bathymétriques sont un outil indispensable pour le transport maritime afin d'assurer une navigation sécuritaire. Les instruments traditionnellement utilisés comme les échosondeurs embarqués sur des navires sont en mesure de prendre des mesures en eaux profondes, mais peinent à y parvenir en eaux peu profondes en raison des tirants d'eau trop élevés. De plus, l'acquisition de ces mesures de profondeur s'avère un processus coûteux et chronophage. Or, dans une optique de détecter régulièrement les changements de profondeur en eaux peu profondes, les méthodes dites traditionnelles ne sont pas optimales. Pour ce faire, Pêches et Océans Canada a lancé un projet de recherche dans le but de développer une méthodologie permettant de détecter les changements de bathymétrie en zones peu profondes pour l'ensemble des côtes canadiennes.

Une méthodologie a été développée pour le secteur de Cap-aux-Meules aux Îles-de-la-Madeleine dans la province du Québec, Canada à l'aide de la bathymétrie dérivée de satellites (*satellite derived bathymetry* (SDB)). La technique utilisée permet le traitement automatisé de l'imagerie satellitaire Sentinel-2 par l'acquisition (Copernicus Open Access Hub), la correction atmosphérique avec Sen2Cor et la détection des changements à l'aide de l'analyse de séries temporelles entre 2018 et 2019. Un indice de profondeur a été calculé pour chacun des pixels d'eau puis a été converti en profondeur avec une régression linéaire en utilisant une carte bathymétrique de référence. La corrélation obtenue est élevée avec un $R^2 = 0,78$. Les changements bathymétriques ont été prédits par une pente temporelle calculée pour chacun des pixels d'eau. En moyenne, près de 35 % de la zone d'étude a subi une perte de profondeur et près de 65 % a subi un gain. Dans les zones de perte de profondeur, une perte moyenne de 0,31 m/an a été prédite tandis que dans les zones de gain de profondeur une accumulation de sédiments de 0,38 m/an été prédite.

À l'issue de ce projet, la méthodologie développée dans ce projet bien qu'appliquée à un secteur des Îles-de-la-Madeleine pourrait facilement est déployée pour d'autres régions en raison de sa simplicité d'utilisation et de sa robustesse.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Mise en contexte	1
1.2	Problématique	2
1.3	Objectifs	3
2	Cadre théorique.....	4
2.1	Le transport maritime au Canada.....	4
2.1.1	L'industrie du transport maritime.....	4
2.1.2	Une navigation sécuritaire	5
2.2	Méthodes de mesure de la bathymétrie.....	6
2.2.1	Échosondeur	6
2.2.2	LiDAR bathymétrique aéroporté	9
2.2.3	Bathymétrie dérivée de satellites	11
2.3	Détection de changements à partir d'images satellitaires	15
2.3.1	Détection de changements bitemporels	16
2.3.2	Détection de changements à échelle continue	16
3	Matériel et méthode	17
3.1	Site d'étude	17
3.2	Données	20
3.3	Méthodologie	24
3.3.1	Prétraitement des images satellitaires.....	25
3.3.2	Calcul de l'indice de profondeur	26
3.3.3	Analyse de séries temporelles.....	29
3.3.4	Performance de l'identification des changements de bathymétrie	30
4	Résultats	30

4.1	Indice de profondeur	30
4.2	Détection de changements de bathymétrie	34
4.2.1	Analyse de série temporelle.....	34
4.2.2	Cartographie des changements de bathymétrie	37
5	Interprétation et discussion des résultats	41
5.1	Détection de changements de bathymétrie	41
5.2	Originalité de la méthode.....	42
5.3	Limites de la méthode.....	44
5.3.1	Justesse des résultats.....	44
5.3.2	Sensibilité à la turbidité de l'eau	45
5.3.3	Présence de couverture nuageuse	45
5.3.4	Rugosité de la surface de l'eau	46
5.3.5	Délimitation des milieux	46
6	Conclusion	47
7	Bibliographie	49
	Annexe.....	53

Liste des figures

Figure 1 Échosondeur monofaisceau.....	7
Figure 2 Configuration des faisceaux d'un échosondeur multifaisceaux	8
Figure 3 Spectre d'absorbance de l'eau entre 400 nm et 2000 nm.....	10
Figure 4 Réponse type d'une impulsion d'un LiDAR bathymétrique	11
Figure 5 Principes physique de la bathymétrie obtenue par satellite	12
Figure 6. Localisation de la zone d'étude	19
Figure 7. Classification de l'occupation du sol.....	22
Figure 8. Relevé bathymétrique de la zone d'étude.....	23
Figure 9. Diagramme méthodologique.....	24
Figure 10 Image Sentinel 2 TOA Niveau-1C (à gauche) et BOA Niveau-2A (à droite)	25
Figure 11. Classes utilisées pour la classification de la scène par Sen2Cor.....	26
Figure 12. Comparaison entre une image non filtrée et filtrée.....	28
Figure 13. Comparaison entre un indice de profondeur et le relevé bathymétrique	32
Figure 14. Comparaisons entre la bathymétrie dérivée de l'indice de profondeur et le relevé bathymétrique pour les pixels d'eau.....	33
Figure 15. Corrélation entre la profondeur de référence et la profondeur prédite.....	34
Figure 16. a) Évolution temporelle de l'indice de profondeur. b) Évolution temporelle de l'indice temporel normalisé. c) Évolution temporelle de la profondeur prédite	37
Figure 17. La zone délimitée en rouge représente les limites des sédiments qui se sont accumulés durant la période d'étude a) Vue du littoral en date du 3 juillet 2018. b) Vue du littoral en date du 21 septembre 2019. c) Illustration des changements de bathymétrie.....	38
Figure 18. Changements de bathymétrie détectés à l'aide de la méthode des pentes temporelles dans les zones entre 4 et 12 m.....	40
Figure 19. Distribution de la fréquence des indices de profondeur pour identifier les valeurs de référence.....	43

Liste des tableaux

Tableau 1. Bandes spectrales des capteurs Sentinel-2A et 2B (MSI)	20
Tableau 2. Données utilisées	21
Tableau 3. Synthèse des résultats pour le choix du meilleur indice spectral.....	27
Tableau 4. Comparaison des méthodes de filtrage	27
Tableau 5. Évolution de l'indice de profondeur dans les différentes zones.....	30
Tableau 6. Valeurs de référence des zones profondes et peu profondes	36
Tableau 7. Statistiques des changements de profondeur	39

Glossaire

API: Application Programming Interface

BOA: Bottom of Atmosphere

CNN: Convolutional Neural Networks

EPSG: European Petroleum Survey Group

ESA: European Space Agency

LiDAR : Light Detection and Ranging

MSI : Mutispectral Instrument

MTM: Modified Transverse Mercator

PIR : Proche infrarouge

TOA : Top of Atmosphere

SDB : Satellite Derived Bathymetry

SWIR : Short Wave Infrared

UTM : Universal Transverse Mercator

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Effigis inc. pour la confiance qu'ils m'ont donnée pour l'accès aux données et à l'opportunité de participer à ce projet innovant.

Je souhaite également remercier Mickaël Germain pour ses commentaires constructifs pour l'amélioration de cet essai.

Évidemment, je souhaite remercier ma famille et ma conjointe pour toute l'aide et tout le support qu'elles m'ont apportés tout au long de ce cheminement.

Finalement, un énorme merci à Yacine Bouroubi pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée tout au long de ce projet. Il a été très généreux de son temps et de ses conseils judicieux.

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Le Canada est un pays vaste ayant le plus long littoral du monde, avec 243 042 km de côtes (Statistique Canada, 2016). Ces côtes touchent trois océans différents, soit l'Atlantique, le Pacifique et l'Arctique. Ces milieux très diversifiés au niveau géologique sont constamment affectés par l'érosion causée par l'eau (Atkinson et al., 2016). L'effet de l'érosion sur les zones côtières peut causer le déplacement et l'accumulation de sédiments sur leurs fonds marins, pouvant nuire ainsi à la navigation de plaisance ou commerciale (Lyzenga et al., 2006). En effet, ces accumulations peuvent modifier localement la bathymétrie de plans d'eau et créer ainsi des menaces à la navigation maritime (Lyzenga et al., 2006).

Le présent essai réalisé, depuis 2019, en partenariat avec Effigis, une firme spécialisée en géomatique, s'insère dans un plus grand projet initié par l'Agence spatiale canadienne et Pêches et Océans Canada visant à élaborer une méthode automatisée et peu coûteuse pour identifier les changements de la bathymétrie des côtes canadiennes, notamment celles qui causent des menaces à la navigation maritime. Dans le but de développer et de tester cette méthode, un site d'étude a été sélectionné dans la partie centrale des Îles-de-la-Madeleine, dans le secteur de Cap-aux-Meules.

L'érosion des zones côtières est une problématique couramment rencontrée dans le secteur des Îles-de-la-Madeleine, situé dans le golfe du Saint-Laurent, dans la province du Québec au Canada. Cet archipel est constamment affecté par les aléas de la météo. Lors d'épisodes de tempêtes, les vagues qui déferlent sur les côtes de ces îles causent leur érosion (Rioux et al., 2008). De plus, la diminution de la couverture de la glace de mer en période hivernale et l'augmentation du niveau de la mer rendent les berges plus vulnérables à l'érosion (Rioux et al., 2008). En ajout à cela, les changements climatiques augmenteront la fréquence et l'intensité des épisodes de tempête. Ceci augmentera davantage les risques d'érosion des berges de l'archipel (Rioux et al., 2008).

La région des Îles-de-la-Madeleine, en raison de sa nature insulaire, dépend grandement du transport maritime pour le transport de personnes et de marchandises avec le continent. De nombreux navires et bateaux naviguent à proximité des côtes de l'archipel. L'accumulation de sédiments sur les fonds marins et les voies navigables diminue la hauteur de la colonne

d'eau, ce qui peut nuire à la navigation. Il en découle une augmentation des risques d'échouement. De ce fait, un suivi continu de la bathymétrie permet de valider la profondeur de l'eau et d'assurer la sécurité des usagers maritimes. Au Canada, le suivi de la bathymétrie et la mise à jour des cartes marines sont réalisés par Pêches et Océans Canada (Pêches et Océans Canada, 2019).

1.2 Problématique

Actuellement, Pêches et Océans Canada acquiert les mesures de bathymétrie à l'aide de méthodes traditionnelles. Plus précisément, ces méthodes utilisent des sondeurs multifaisceaux embarqués sur la coque d'un navire (Favoretto et al., 2017; Monteys et al., 2015). Ces méthodes de télédétection dites actives permettent d'acquérir des mesures précises de la topographie des fonds marins (Evagorou et al., 2019). Cependant, ces techniques sont coûteuses et chronophages (Evagorou et al., 2019). De plus, les eaux côtières peu profondes rendent difficile, voire impossible, l'utilisation des sondeurs multifaisceaux puisque la navigation peut y être risquée (Monteys et al., 2015; Gao, 2009). Ainsi, ces contraintes techniques, de coût et de temps ne sont pas souhaitables dans un contexte de suivi continu et automatisé de la bathymétrie des zones d'eau peu profondes.

En considérant ces limitations, Pêches et Océans Canada souhaite développer une nouvelle approche permettant de détecter les changements de la bathymétrie de manière régulière, automatique et à moindre coût. Cette nouvelle méthode permettrait de pallier le manque d'efficacité des sonars en eaux peu profondes. Cette méthode utiliserait la bathymétrie obtenue par satellite (*Satellite-Derived Bathymetry* (SDB)). La technique de SDB permet l'acquisition rapide et à intervalles relativement réguliers d'une bathymétrie offrant une précision suffisante pour le suivi de changements de profondeur sur de grandes superficies (Caballero & Stumpf, 2019). Ainsi, un atout majeur du SDB est d'offrir l'opportunité d'obtenir une cartographie de la bathymétrie rapidement sur un grand territoire, à faible coût (Caballero & Stumpf, 2019; Cahalane et al., 2019). De plus, cette technique permet de couvrir les régions éloignées et difficiles d'accès (Caballero & Stumpf, 2019). L'utilisation d'images multidates permettra également de faire un suivi et une détection des changements, notamment ceux qui causent une menace à la navigation (réduction de la profondeur). Cependant, l'approche SDB a ses limites. La turbidité de l'eau influence de manière

importante la pénétration des longueurs d'onde dans l'eau (Casal et al., 2019; Chybicki, 2017). Des eaux de fortes turbidités produisent une bathymétrie erronée. En ajout à cela, la présence de nuages dans les images satellitaires nuit à une bonne cartographie, car les secteurs couverts ne peuvent pas être mesurés (Casal et al., 2019). De plus, les zones profondes n'obtiennent pas de bonnes estimations en raison de la difficulté de la lumière visible à pénétrer l'eau au-delà de 20 mètres de profondeur (Gao, 2009). Outre ces contraintes liées à la méthode SDP, il s'avère non seulement possible, mais également idéal de l'utiliser dans un contexte d'eau côtière peu profonde (Caballero & Stumpf, 2019). Ces limitations peuvent être surmontées en sélectionnant adéquatement les images satellitaires ayant peu de couverture nuageuse et de calibrer adéquatement les images couvrant des eaux de plus forte turbidité (Traganos et al., 2018). L'utilisation de longues séries temporelles permet également de réduire certaines sources de bruit en lien avec l'information dérivée des images satellites. Ainsi, la méthode SDP est préconisée par Pêches et Océans Canada pour développer une nouvelle approche pour la détection de changements dans la bathymétrie des zones côtières canadiennes à plus faibles coûts avec une précision raisonnable.

1.3 Objectifs

L'objectif principal de ce projet est de développer une approche automatisée pour identifier les changements de la bathymétrie des zones côtières des Îles-de-la-Madeleine à partir de séries d'images satellitaires. La méthode pourra s'appliquer par la suite à d'autres secteurs similaires.

Objectifs spécifiques :

- Identifier les meilleurs indices spectraux pour estimer la bathymétrie avec les images satellitaires.
- Cartographier et identifier les changements de bathymétrie à l'aide de séries temporelles.
- Développer un script d'automatisation des traitements (extraction, correction atmosphérique et traitements de l'imagerie satellitaire) sous le langage Python.
- Proposer une méthodologie pouvant être reproduite à d'autres zones d'étude.

2 Cadre théorique

2.1 Le transport maritime au Canada

2.1.1 L'industrie du transport maritime

Le transport maritime est une composante essentielle pour l'économie et le développement des différentes régions du Canada (Transport Canada, 2018). Les secteurs économiques utilisant ce moyen de transport sont nombreux. Que ce soit le transport de fret maritime, la pêche, les traversiers ou bien la navigation de plaisance, tous jouent un rôle de premier plan dans l'industrie du transport maritime (Transport Canada, 2018). Il est reconnu que le transport de fret maritime joue un rôle majeur dans l'économie (Association of Canadian Port Authorities, 2017; Transport Canada, 2018). L'utilisation de navires pour le transport de marchandises en partance des différents ports canadiens permet l'exportation des ressources naturelles et manufacturières vers des marchés étrangers comme la Chine, le Japon et les États-Unis. Annuellement, près de 310 millions de tonnes de marchandise transitent par les ports canadiens. De ces activités d'imports-exports, plus de 400 milliards de dollars en biens transitent chaque année dans ces ports ce qui représente 25% des échanges commerciaux canadiens (Association of Canadian Port Authorities, 2017).

Le transport de la marchandise par les ports est assuré par les navires-cargos empruntant différents itinéraires en circulant souvent par des voies maritimes. La plupart des sites portuaires majeurs au Canada sont localisés dans la partie septentrionale du territoire où sont situés les centres économiques (Transport Canada, 2018). Au total, le Canada possède 18 administrations portuaires. L'ensemble de ces ports majeurs sont désignés comme essentiels pour le commerce national et international canadien (Association of Canadian Port Authorities, 2017). Parmi ces sites importants, on retrouve le Port de Vancouver en Colombie-Britannique, le Port de Montréal au Québec et le Port de Saint John au Nouveau-Brunswick. Toutefois, de nombreux ports secondaires existent sur l'ensemble des côtes canadiennes pour desservir les populations dans les régions éloignées, telles que les communautés nordiques.

L'une des plus importantes régions au Canada pour le commerce maritime est le réseau des Grands Lacs - Voie maritime du fleuve Saint-Laurent (Association of Canadian Port Authorities, 2017). En 2010, ce réseau maritime assurait près de 38 % du transport de

marchandises au niveau national. Respectivement, les régions de l'Atlantique et du Pacifique accueilleraient 26,2 et 35,9 % du transport de fret (Association of Canadian Port Authorities, 2017).

2.1.2 Une navigation sécuritaire

La navigation dans les eaux canadiennes soulève un enjeu important relativement à la sécurité de l'ensemble des utilisateurs. Pour ce faire, la gestion et l'entretien des voies maritimes sont sous l'autorité de Pêches et Océan Canada, avec l'appui de la Garde côtière canadienne et du Service hydrographique du Canada (SHC) (Garde côtière canadienne, 2019; Pêches et Océans Canada, 2019). Ces entités fédérales assurent une surveillance constante sur l'état des infrastructures des voies navigables et des aides à la navigation qui s'y rattachent. Un élément critique quant à la sécurité de la navigation est la profondeur des cours d'eau empruntés (Chénier et al., 2018). Selon le Bureau de la sécurité des transports du Canada (2019), annuellement il y aurait en moyenne 73 échouements, ce qui représente 45% des accidents rapportés. Ainsi, des cartes de bathymétrie à jour s'avèrent un outil indispensable pour les navigateurs (Chénier et al., 2018). Or, réaliser une cartographie des fonds marins pour les eaux canadiennes s'avère une tâche considérable. En effet, le territoire maritime du Canada s'étend sur près de 7,1 millions de kilomètres carrés (Direction générale des océans, 2009). En raison de l'envergure du territoire et de la présence de zones éloignées, la réalisation de cette cartographie engendre des défis techniques et logistiques importants (Chénier et al., 2018).

En dépit de la grandeur du territoire, certaines voies maritimes importantes nécessitent une surveillance constante en raison de leur achalandage et des caractéristiques physiques du milieu. Un exemple probant est la Voie maritime du Saint-Laurent. Celle-ci fait l'objet d'un suivi constant pour assurer la sécurité de la navigation. La Voie maritime du Saint-Laurent a minimalement une profondeur de 8,08 m (Corporation de Gestion de la Voie Maritime du Saint-Laurent, 2020). Cette profondeur minimale assure une circulation sécuritaire pour les navires en prenant compte du tirant d'eau de chacun d'entre eux. Dans le but d'assurer un passage sécuritaire de manière continue, le Service hydrographie du Canada réalise des relevés bathymétriques de manière régulière. Ces mesures permettent de valider la profondeur des voies navigables et de détecter des variations de profondeurs pouvant nuire à

la navigation (Chénier et al., 2018). Lorsque des diminutions de profondeurs significatives sont identifiées, des travaux annuels de dragage sont commandés auprès de la Garde côtière canadienne (Transport Canada, 2017).

2.2 Méthodes de mesure de la bathymétrie

La bathymétrie des fonds marins peut être obtenue à partir de différentes méthodes de mesures. En fonction des besoins et du contexte, la méthode privilégiée peut différer. De manière traditionnelle, l'échosondeur et le sonar sont utilisés pour cartographier les fonds marins (Yunus et al., 2019). Il est également possible d'utiliser le lidar aéroporté ainsi que l'imagerie satellitaire (Pêches et Océans Canada, 2020a; Caballero & Stumpf, 2019; Yunus et al., 2019; Chybicki, 2017; Gao, 2009; Wang & Philpot, 2007; Stumpf et al., 2003).

2.2.1 Échosondeur

L'échosondeur est un appareil embarqué sur un navire produisant des impulsions sonores qui se propagent dans l'eau. Cette technique conventionnelle de mesure de la bathymétrie est répandue pour la surveillance et la cartographie des fonds marins (Yunus et al., 2019). Cet outil utilise les principes physiques de la vitesse de propagation du son dans l'eau pour établir des mesures de profondeur précises. Le principe de base consiste en l'émission d'une onde acoustique par un émetteur-récepteur vers le fond marin. Une fois que l'onde sonore est émise, celle-ci se propage dans l'eau jusqu'à ce qu'elle touche le fond et un écho revient vers le capteur. Le temps que prend l'écho pour revenir au capteur peut être converti en une profondeur (Yunus et al., 2019). Plus précisément, la profondeur est fonction de la vitesse de propagation du son dans l'eau et du temps de retour de l'écho (1) :

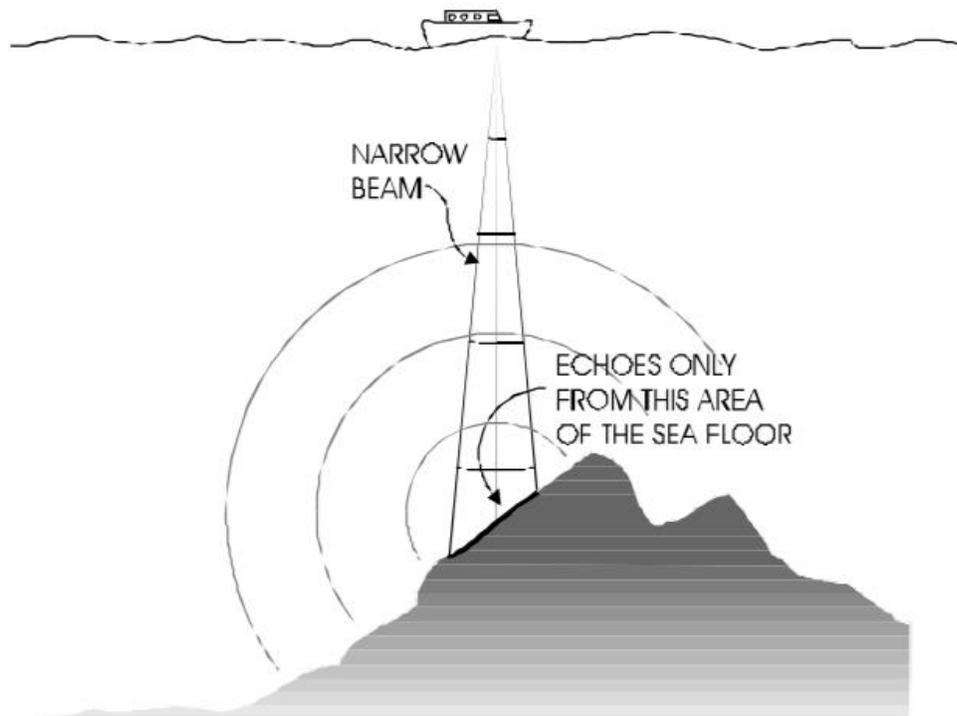
$$Profondeur = \frac{c \times t}{2} \quad (1)$$

où c est la vitesse du son dans l'eau (m/s) et t est le temps de retour de l'écho (s) (L-3 Communications SeaBeam Instruments, 2000)

L'échosondeur est un appareil embarqué sur un navire. Cette configuration limite l'étendue spatiale d'utilisation de l'échosondeur. En effet, en raison de la dimension de ces embarcations, des contraintes techniques, d'accessibilités et environnementales rendent la prise de mesures complexes et hasardeuses dans les zones peu profondes (Gao, 2009; Yunus

et al., 2019). De plus, l'utilisation de l'échosondeur est chronophage et nécessite une main-d'œuvre spécialisée, ce qui génère des frais d'exploitation importants (Yunus et al., 2019). Toutefois, malgré ces inconvénients, la bathymétrie acquise par un échosondeur permet de produire des données de haute précision utiles pour la production de cartes bathymétriques détaillées.

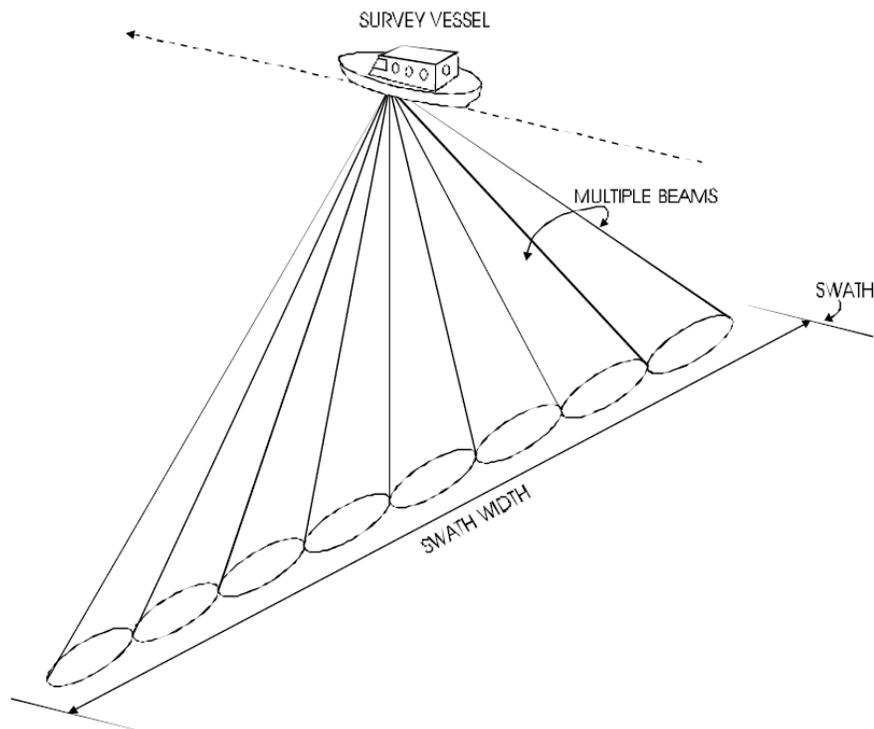
De manière répandue, les relevés de fonds marins sont généralement faits à l'aide de deux types d'échosondeurs, soit le monofaisceau et le multifaisceaux (Evagorou et al., 2019; Gao, 2009; Monteys et al., 2015). L'échosondeur monofaisceau permet de mesurer la profondeur de la colonne d'eau en émettant un seul faisceau sonore vers le fond marin (Figure 1). Cette configuration couvre une petite aire de surface pour chaque impulsion sonore. Ainsi, cette méthode de recensement produit une faible densité d'échantillonnage (Monteys et al., 2015). Pour produire une représentation de la bathymétrie de manière continue, il s'avère nécessaire d'utiliser des méthodes d'interpolations. Ceci réduit la précision des produits bathymétriques. De plus, les campagnes de mesures faites à partir de cette méthode nécessitent un temps important pour couvrir un grand territoire (Yunus et al., 2019).



Extrait de L-3 Communications SeaBeam Instruments (2000)

Figure 1 Échosondeur monofaisceau

Contrairement à l'échosondeur monofaisceau, l'échosondeur multifaisceaux a la capacité d'émettre simultanément de multiples faisceaux étroits d'ondes acoustiques vers le fond marin (Figure 2) (L-3 Communications SeaBeam Instruments, 2000). En réponse à ces émissions sonores, autant de retours d'échos reviennent aux capteurs (Yunus et al., 2019). La largeur de chacun des faisceaux étant faible, seule une petite aire du fond marin est couverte à la fois. En revanche, la sommation de l'ensemble de ces faisceaux permet de couvrir une largeur de fauchée importante (L-3 Communications SeaBeam Instruments, 2000). Cette caractéristique permet de couvrir une plus grande superficie plus rapidement qu'avec la méthode monofaisceau (L-3 Communications SeaBeam Instruments, 2000). De plus, l'intensité d'échantillonnage est également plus élevée ce qui produit des mesures d'une plus grande résolution spatiale (Monteys et al., 2015). Toutefois, la plus grande complexité d'utilisation de cet équipement induit des coûts d'opérations et de traitement des données plus élevés (Monteys et al., 2015).



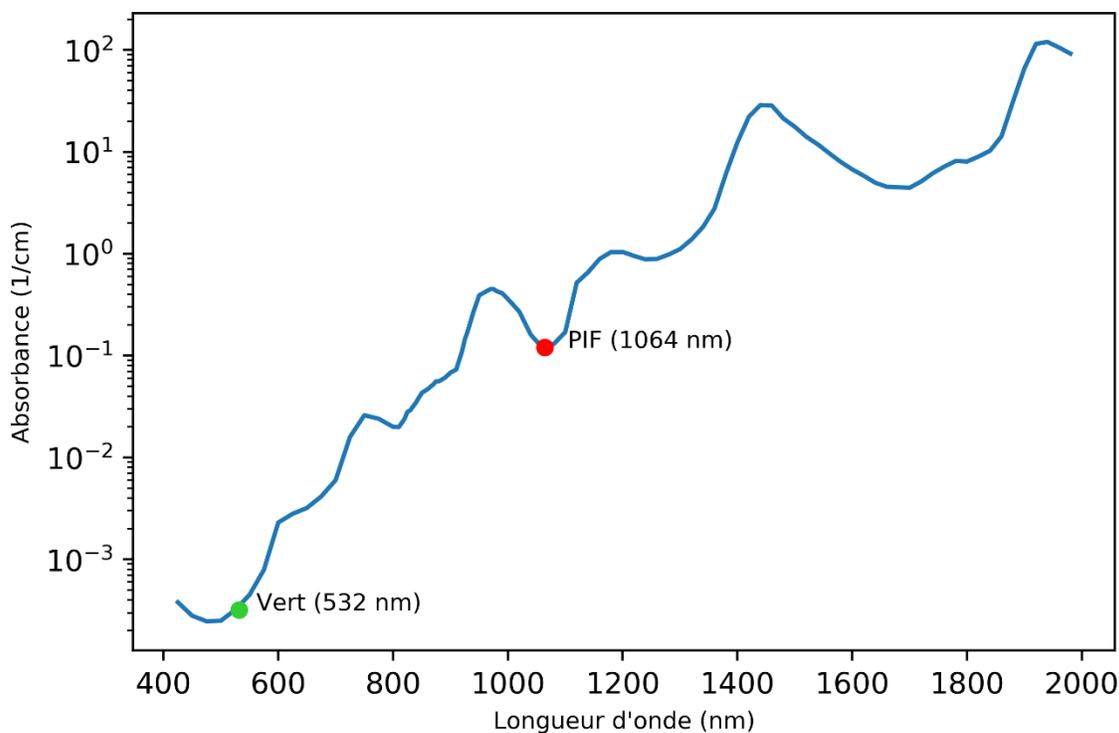
Extrait de L-3 Communications SeaBeam Instruments (2000)

Figure 2 Configuration des faisceaux d'un échosondeur multifaisceaux

2.2.2 LiDAR bathymétrique aéroporté

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technologie utilisant des impulsions lumineuses sous forme de laser (Wang & Philpot, 2007). Cette technique permet de mesurer la distance d'un objet en calculant la différence de temps entre l'émission initiale du laser et le retour du signal réfléchi par la cible (Wang & Philpot, 2007). Cette technique de mesure de distance entre le capteur et un objet peut être utilisée pour de nombreuses applications, dont la mesure de la bathymétrie (Yunus et al., 2019). Plus précisément, il s'agit du LiDAR bathymétrique aéroporté.

Le LiDAR bathymétrique aéroporté est une technique de mesure de la bathymétrie surtout utilisée dans les zones côtières ou les étendues d'eau ayant des eaux peu profondes (Yunus et al., 2019). Dans cette approche, le capteur envoie des impulsions lasers de deux longueurs d'onde différentes en direction de l'eau, soit le bleu vert (532 nm) et le proche infrarouge (1064 nm) (Wang & Philpot, 2007). Ces longueurs d'onde sont sélectionnées en raison de leurs caractéristiques spectrales et de leur niveau d'absorbance dans l'eau. La couleur verte a une faible absorbance dans l'eau, comme représentée dans la Figure 3. Le minimum d'absorption spectrale de l'eau se situe dans le spectre de la couleur bleue (446 – 500 nm), ce qui est très près de la longueur d'onde utilisée par le laser bleu vert. Cette couleur est en mesure de pénétrer l'eau en profondeur. Ainsi, à l'aide de cette longueur d'onde, il est possible de mesurer la profondeur de l'eau à partir de 1,5 m jusqu'à 60 m dans des conditions idéales (Wang & Philpot, 2007). Du côté du proche infrarouge, cette longueur d'onde a une absorbance plus élevée. Ainsi, cette longueur d'onde pénètre très peu profondément dans l'eau. De ce fait, une rétrodiffusion du signal est faite sur la surface de l'eau ce qui permet d'identifier le niveau de sa surface (Guenther et al., 2000).

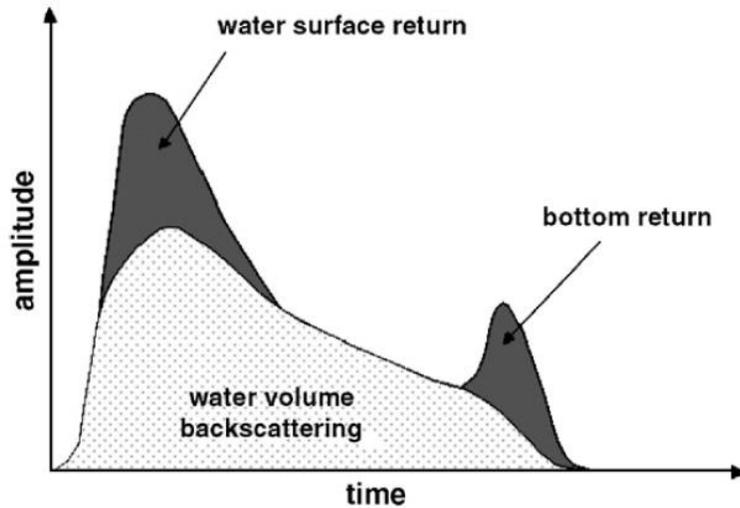


Données extraites et adaptées de (Hale & Querry, 1973)

Figure 3 Spectre d'absorbance de l'eau entre 400 nm et 2000 nm.

À la suite à l'émission de l'impulsion initiale des deux lasers, le bleu vert et le proche infrarouge atteignent respectivement le fond marin et la surface de l'eau (Guenther et al., 2000; Wang & Philpot, 2007). Une partie de chacun des signaux est rétrodiffusée vers les capteurs LiDAR de l'aéronef. En raison de la distance plus faible de la surface de l'eau par rapport au fond marin, le signal de retour du laser du proche infrarouge arrive en premier. Quant à l'impulsion bleu vert, le phénomène de rétrodiffusion de volume se produit dès qu'elle traverse la surface de l'eau. Cette rétrodiffusion de volume génère des retours de signaux au capteur. Malgré la présence de ce bruit, il reste possible d'identifier le signal provenant du fond marin. En effet, la rétrodiffusion provenant du fond marin correspond aux derniers signaux reçus ayant une plus forte intensité (Wang & Philpot, 2007). Ainsi, la profondeur de l'eau est obtenue à partir de la différence de temps entre le retour du signal de la surface et du fond (Figure 4) (Guenther et al., 2000; Wang & Philpot, 2007). Toutefois, l'intensité du signal provenant du fond peut varier considérablement selon les conditions environnementales qui prévalent au moment du relevé. La rugosité de la surface de l'eau joue un rôle important sur l'intensité du retour du signal. En effet, une surface complètement lisse peut causer une réflexion spéculaire ce qui causera la perte du signal (Wang & Philpot, 2007).

En ajout à ce facteur, la nature du fond marin peut influencer l'intensité de la rétrodiffusion en raison de leur réflectance respective (Wang & Philpot, 2007).



Extrait de Wang & Philpot (2007)

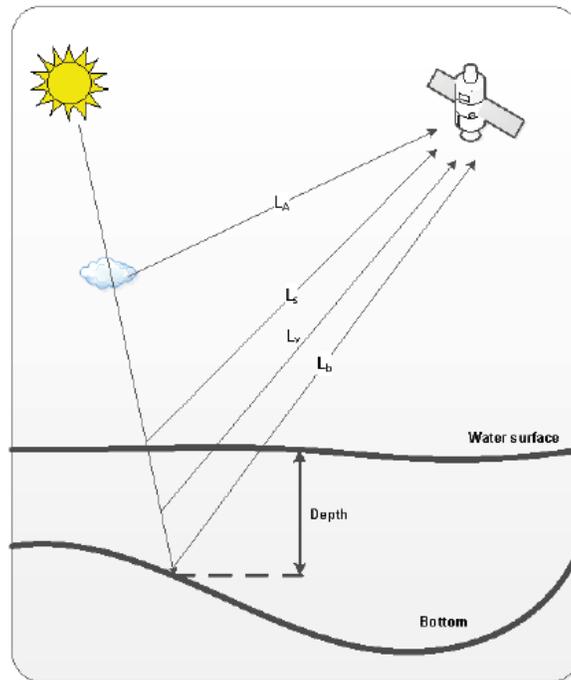
Figure 4 Réponse type d'une impulsion d'un LiDAR bathymétrique

2.2.3 Bathymétrie dérivée de satellites

La bathymétrie dérivée à partir de satellites (*Satellite Derived Bathymetry*) (SDB) est une méthode pour obtenir la bathymétrie en utilisant l'imagerie satellitaire multispectrale (Caballero & Stumpf, 2019; Yunus et al., 2019; Chybicki, 2017; Wang & Philpot, 2007; Gao, 2009; Stumpf et al., 2003). Cette approche, qui a vu le jour dans les années 70, s'est largement améliorée avec l'avancement des technologies optiques utilisées dans les capteurs multispectraux, notamment en lien avec la qualité radiométrique des images (Caballero & Stumpf, 2019). De plus, la disponibilité croissante des capteurs avec une résolution spatiale et temporelle élevée permet de couvrir les zones d'études avec une plus grande fréquence et avec une plus grande précision (Yunus et al., 2019). La méthode SDB se veut plus abordable et plus facile à produire que les techniques conventionnelles (Yunus et al., 2019).

Cette technique capte les longueurs d'onde provenant du Soleil qui ont réfléchi sur les surfaces d'eau (Figure 5). Ainsi, le signal enregistré par le capteur provient de différents types de réflexions durant son trajet. Plus précisément, les composantes du signal comprennent la luminance provenant du fond marin (L_B), celle provenant des éléments en suspension dans l'eau (L_V), la luminance de la réflectance spéculaire (L_S) et la luminance

provenant de l'atmosphère (L_A) (Chybicki, 2017). Les deux premières luminances sont atténuées par la colonne d'eau dont on cherche à déterminer la profondeur.



Extrait de Chybicki (2017)

Figure 5 Principes physique de la bathymétrie obtenue par satellite

En considérant chacun de ces signaux, seulement le signal provenant du fond marin (L_B) est utile pour estimer la profondeur de l'eau. Toutefois, la présence des autres éléments génère un signal bruité. Des corrections s'avèrent essentielles pour minimiser ce bruit (Favoretto et al., 2017). Plus particulièrement, la composante L_A , qui est le produit de la réflexion des photons sur divers éléments présents dans l'atmosphère comme la vapeur d'eau et les aérosols, peut être retirée à l'aide d'une correction atmosphérique (Chybicki, 2017; Favoretto et al., 2017; Gao, 2009). En ajout à cela, la composante L_S représente la réflexion spéculaire des photons sur la surface de l'eau. Une correction pour retirer cet effet de reflet solaire (*sun glint*) permet d'améliorer le signal capté par le capteur (Chybicki, 2017; Favoretto et al., 2017). Puis, la composante L_V peut être filtrée du signal en mesurant la réflectance dans une zone d'eau profonde. Ces zones, en raison de leur profondeur, les longueurs d'onde sont entièrement absorbées avant d'atteindre le fond marin. Ainsi, seulement les longueurs d'onde réfléchies par la colonne d'eau retournent au capteur (Chybicki, 2017). Ultiment, la réflectance qui résulte de ces filtres provient uniquement du fond marin.

La mesure de la bathymétrie par SDB peut être obtenue à l'aide de différents modèles. Les deux modèles principalement utilisés sont empiriques ou physiques (Chybicki, 2017; Favoretto et al., 2017; Gao, 2009). Ces modèles utilisent une méthodologie différente pour la calibration de leurs paramètres. Les modèles empiriques sont généralement développés à la base de données in situ provenant de relevés bathymétriques de référence (Favoretto et al., 2017; Gao, 2009). La calibration des paramètres de ce type de modèles est obtenue par une régression entre les valeurs de bathymétrie in situ et les valeurs de la réflectance provenant, par exemple d'un ratio logarithmique entre deux bandes spectrales (équation 2) (Chybicki, 2017; Gao, 2009). Ainsi, la relation obtenue permet de calibrer les constantes m_1 et m_0 . Du côté des modèles physiques, ceux-ci utilisent uniquement les principes physiques de propagation de la lumière dans l'eau (Favoretto et al., 2017; Gao, 2009). Ce type de modèle nécessite des données sur les propriétés de l'eau comme la quantité et la nature des matières en suspension, la signature spectrale des fonds marins et une correction atmosphérique très précise au moment de la capture de l'image satellitaire (Caballero & Stumpf, 2019; Gao, 2009). Ultimement, les données recueillies sont insérées dans une équation d'optimisation (Caballero & Stumpf, 2019; Chybicki, 2017). Dans une optique de mesure de bathymétrie de manière opérationnelle, cette méthode est laborieuse (Caballero & Stumpf, 2019). En comparant les méthodes empiriques et physiques, il est possible de noter que la deuxième est plus complexe d'utilisation (Gao, 2009). En plus de sa plus grande complexité, cette dernière nécessite un plus grand nombre de données pour effectuer la calibration des paramètres du modèle que l'approche empirique. Pour ces raisons, l'utilisation d'un modèle empirique pour ce projet est privilégiée.

Les propriétés de diffusion de la lumière visible dans l'eau sont utilisées pour mesurer la profondeur du fond marin (Favoretto et al., 2017). L'une des méthodes de détermination de la profondeur la plus répandue utilise un ratio logarithmique entre deux bandes spectrales, notamment les bandes bleues et vertes (2) :

$$Z = m_1 \frac{\ln(R(\lambda_B))}{\ln(R(\lambda_V))} - m_0 \quad (2)$$

où m_1 est une constante pour calibrer le ratio de la profondeur, $R(\lambda_B)$ est la réflectance de la bande bleue, $R(\lambda_V)$ est la réflectance de la bande verte et m_0 représente le décalage par rapport à la profondeur de 0 m (Favoretto et al., 2017; Stumpf et al., 2003). Ces constantes

sont déterminées à partir d'un modèle empirique comme mentionné précédemment. Les longueurs d'onde qui pénètrent dans l'eau subissent une atténuation de leur intensité de manière exponentielle en fonction de la profondeur. Le taux d'atténuation varie en fonction de l'énergie qu'elles transportent. Ce phénomène est expliqué par la relation de Planck-Einstein où l'énergie d'une onde électromagnétique est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde (3) :

$$E = h \cdot c / \lambda \quad (3)$$

où h est la constante de Planck ($h \approx 6,626 \times 10^{-34}$ J s) et c est la vitesse de la lumière dans le vide et λ est la longueur d'onde. De ce fait, le bleu possédant une longueur d'onde plus courte que le vert a une plus grande énergie. Ainsi, les longueurs d'onde qui possèdent le plus d'énergie peuvent pénétrer plus loin dans la colonne d'eau. En fonction de la profondeur, le ratio logarithmique varie puisque les deux longueurs d'onde n'ont pas la même atténuation (Stumpf et al., 2003). Dans l'eau, la lumière s'atténue de manière exponentielle plus la profondeur augmente comme le démontre la loi de Beer-Lambert. La luminance est régie par l'équation suivante (4):

$$L_{(z)} = L_0 e^{-kz} \quad (4)$$

où k est le coefficient d'atténuation et z la profondeur (Stumpf et al., 2003). De ceci découle une relation entre la profondeur et la valeur du ratio entre les bandes. Outre la profondeur, il a été soulevé que la nature du substrat dans les fonds marins pourrait affecter l'atténuation des bandes utilisées. Toutefois, Philpot (1989) assure que la nature et l'albédo du fond marin affectent de manière similaire l'absorption des bandes utilisées (Stumpf et al., 2003). Cette présomption vient valider que la profondeur a un plus grand impact sur la variation du ratio (Stumpf et al., 2003). De ce fait, cette méthode peut être utilisable dans les milieux avec une grande variation du type de substrat dans les fonds marins (Stumpf et al., 2003).

À partir de l'indice de profondeur, une bathymétrie peut être produite. Pour ce faire, différentes techniques sont utilisées pour y parvenir. En premier lieu, la méthode par régression linéaire entre le ratio logarithmique des bandes bleues et vertes et les données de bathymétrie de référence permet de produire un SDB (Pacheco et al., 2015; Traganos et al., 2018). Préalablement au calcul du modèle, un filtre de lissage 3 x 3 est appliqué pour réduire le bruit présent dans les images satellitaires (Traganos et al., 2018). Ainsi, les calculs de SDB

permettent d'obtenir de meilleures estimations de profondeur. En ajout à cela, cette méthode permettrait la cartographie de vastes zones côtières en raison de sa simplicité d'utilisation (Pacheco et al., 2015). Cependant, cette méthode de régression linéaire apporte des limites quant à la précision de la bathymétrie obtenue (Yunus et al., 2019).

La mesure de la bathymétrie par la méthode SDB possède certaines limitations quant à son utilisation. Les longueurs d'onde vertes et bleues ont tout de même une capacité limitée de pénétration dans l'eau. Dans des conditions idéales, soit des eaux limpides, la lumière bleue peut se propager jusqu'à 30 mètres de profondeur. Quant à la lumière verte, la profondeur maximale pouvant être atteinte est de 15 mètres (Chybicki, 2017). Cette limitation dans la profondeur de pénétration ne rend pas possible de créer une bathymétrie dans les zones plus profondes. La présence de sédiments dans l'eau peut interférer avec l'absorption, et donc affecter la pénétration des longueurs d'onde utilisées (Chybicki, 2017; Favoretto et al., 2017; Stumpf et al., 2003). La turbidité de l'eau est un critère important pour assurer une mesure fiable de la profondeur de l'eau. De plus, les scènes captées par les satellites doivent être exemptes de nuages puisque les images optiques sont sensibles à ceux-ci. La présence d'une couverture nuageuse empêche de capter la réflectance provenant de l'eau.

2.3 Détection de changements à partir d'images satellitaires

Les images satellitaires sont disponibles en grand nombre et couvrent une étendue temporelle imposante. La série Landsat (Landsat-4-5 TM, Landsat-7 ETM+ et Landsat-8 OLI) acquiert continuellement, depuis 1982, des images à 30 m de résolution pour l'ensemble de la planète. Ces images sont disponibles gratuitement et avec un accès automatisable. La constellation Sentinel-2 (A lancé en 2015 et B en 2017) a renforcé la disponibilité d'images gratuites, avec une résolution spatiale à 10 m et une meilleure résolution temporelle (5 jours depuis le lancement de Sentinel-2B). Les capteurs commerciaux (images payantes) sont encore plus nombreux et ont de meilleures résolutions spatiales (autour de 2 m) et temporelles (capacité d'acquisition quotidienne). Ceci offre la possibilité d'utiliser une diversité de types de capteur en fonction des besoins (Traganos & Reinartz, 2018). Comme pour la surface terrestre, la nature de la surface marine peut varier au fil du temps de manière spatiale et spectrale (Coppin et al., 2004). Selon la nature du phénomène, les changements peuvent être graduels ou brusques. Ces changements peuvent être détectés par diverses méthodes d'analyse de

séries temporelle dont la détection de changements bitemporels ou à échelle temporelle continue (Coppin et al., 2004).

2.3.1 Détection de changements bitemporels

L'analyse multitemporelle est une méthode d'analyse pour identifier des changements captés par des images satellitaires. L'extraction de ce genre d'informations peut se faire en comparant deux images d'une même scène capturée à des moments différents et d'en extraire le changement d'un phénomène (Coppin et al., 2004). Puisque cette approche permet seulement de comparer deux scènes à la fois, la sélection et le prétraitement des images sont cruciaux pour effectuer une analyse représentative du changement survenu. La durée de la période entre les acquisitions est un élément à considérer en fonction du phénomène étudié. Un évènement qui se produit de manière graduelle pourrait nécessiter des dates d'acquisition éloignées, alors qu'un phénomène provenant d'une perturbation plus sévère comme un feu de forêt, un déboisement, une inondation, l'urbanisation, un éboulement, etc. nécessiterait des dates rapprochées pour bien saisir les variations (Coppin et al., 2004). De plus, une sélection appropriée des images en limitant la période d'analyse à une même saison permet de réduire les effets de saisonnalités (Verbesselt et al., 2010). Ainsi, la précision de la détection de changements est améliorée (Coppin et al., 2004; Verbesselt et al., 2010). Un autre élément critique pour une bonne détection des changements est de procéder à une bonne correction géométrique et atmosphérique. Ces corrections permettent de réduire le bruit provenant d'aérosols dans l'atmosphère, des nuages et d'une mauvaise registration des pixels (Verbesselt et al., 2010). Bien que cette méthode soit relativement simple d'utilisation, le nombre limité de dates prises en compte dans ce type d'analyse produit un bruit important dans le signal temporel. Il devient plus difficile d'extraire l'information provenant uniquement du signal, spécialement dans l'application visée par la présente étude, à savoir les changements de la bathymétrie.

2.3.2 Détection de changements à échelle continue

La détection de changements à échelle continue utilise une série d'images satellitaires prises à des intervalles plus ou moins réguliers sur une longue période de temps. Cette méthode d'analyse de série temporelle permet de contourner la problématique de choisir l'image parfaite pour faire une détection de changements (Coppin et al., 2004). La multiplication des

scènes capturées rend possible la détection de changements sur une période plus grande, donc de prendre en compte la variabilité de manière continue. Ainsi, l'analyse de séries temporelles continue réduit le risque de confondre le véritable changement avec d'autres éléments tels que le bruit, les artefacts, etc. (Verbesselt et al., 2010). À partir de cette série temporelle, un signal contenant un bruit et le phénomène étudié peuvent être extraits. En raison d'un signal temporel plus grand que la méthode bitemporelle, le bruit peut être filtré plus facilement à partir de diverses méthodes telles que les régressions, l'analyse de Fourier et la décomposition d'ondelettes (Verbesselt et al., 2010). De cela, une tendance, qui correspond au changement, peut être isolée. Le bruit peut être composé de diverses variables environnementales telles que les marées, la présence de vagues, la présence de nuages, d'aérosols, etc. Tout comme la détection de changements bitemporels, une correction géométrique et dans une moindre mesure une correction atmosphérique sont essentielles pour assurer une bonne analyse (Coppin et al., 2004; Verbesselt et al., 2010).

3 Matériel et méthode

3.1 Site d'étude

Le site à l'étude est localisé aux Îles-de-la-Madeleine qui sont situées dans le golfe du Saint-Laurent dans la province du Québec, au Canada. Plus précisément, les zones côtières près de l'île Cap-aux-Meules constituent la zone d'intérêt (Figure 6). Le secteur d'étude couvre une superficie totale de 21,9 km². Cependant, dans le cadre de cette étude, uniquement les zones côtières maritimes seront ciblées. Ce secteur a été sélectionné en raison de la disponibilité d'un relevé bathymétrique récent, des changements fréquents de bathymétrie et de la présence de voies maritimes utilisées par différents types d'embarcations.

L'archipel des Îles-de-la-Madeleine est composé de 12 îles couvrant une superficie de 202 km² sur une longueur de 65 km (Municipalité des îles de la Madeleine, 2020). De ces îles, sept d'entre elles sont connectées. Plus précisément, ces îles sont liées entre-elles par des dunes ou des ponts comme le sont l'île de la Grande Entrée, Grosse Île, l'île du Cap-aux-Meules, l'île du Havre Aubert, l'île du Havre-aux-Maisons et l'île aux Loups (Municipalité des îles de la Madeleine, 2020). Cet archipel possède un littoral constitué de falaises, de plages et de dunes. Ces caractéristiques physiques particulières rendent les côtes plus sensibles aux phénomènes d'érosion causés par l'effet du vent, des courants et des marées

(ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2006). Cette vulnérabilité est d'autant plus grande que les plages et les dunes de sable couvrent près du tiers de la superficie des Îles-de-la-Madeleine (ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2006). Ces mouvements de sédiments transforment le littoral et provoquent leur accumulation dans les fonds marins (Municipalité des îles de la Madeleine, 2020). Ainsi, la bathymétrie peut être affectée. Or, un changement important de la profondeur de l'eau peut avoir des répercussions dramatiques pour l'économie du transport maritime et la sécurité des infrastructures. De nombreux bateaux de tout genre (pêche, traversier, marchandise, etc.) y circulent régulièrement (Municipalité des îles de la Madeleine, 2020).

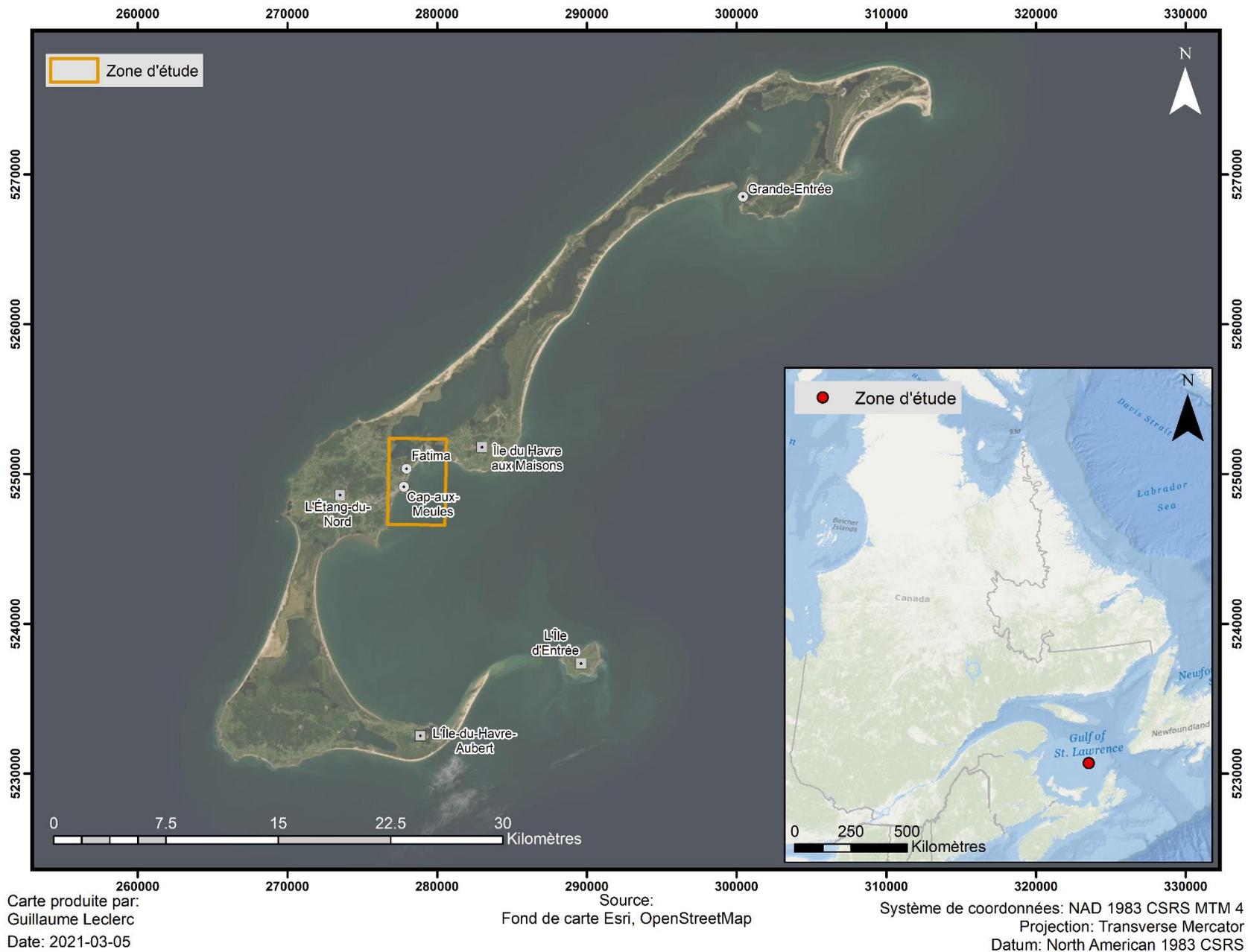


Figure 6. Localisation de la zone d'étude

3.2 Données

La détection de changements de bathymétrie à l'aide de la télédétection satellitaire pour le secteur de Cap-aux-Meules nécessite des données géospatiales. Plus précisément, des images satellitaires provenant de différents capteurs tels que Sentinel-2A (MSI) et Sentinel-2B (MSI) ont été acquises. La résolution spatiale de ces capteurs est de 10, 20 ou 60 mètres selon les bandes spectrales utilisées (Tableau 1). À remarquer, dans le cadre de ce projet, seules les bandes spectrales bleues et vertes seront utilisées en raison de l'indice spectral utilisé (équation 5).

Tableau 1. Bandes spectrales des capteurs Sentinel-2A et 2B (MSI)

Numéro de bande	Nom de la bande	Sentinel-2A	Sentinel-2B	Résolution (m)
		Longueur d'onde centrale (nm)	Longueur d'onde centrale (nm)	
1	Aérosol côtier	443,9	442,3	60
2	Bleu	496,6	492,1	10
3	Vert	560,0	559,0	10
4	Rouge	664,5	665,0	10
5	<i>Vegetation Red edge</i>	703,9	703,8	20
6	<i>Vegetation Red edge</i>	740,2	739,1	20
7	<i>Vegetation Red edge</i>	782,5	779,7	20
8	PIR	835,1	833,0	10
8b	PIR étroit	864,8	864,0	20
9	Vapeur d'eau	945,0	943,2	60
10	SWIR – Cirrus	1373,5	1376,9	60
11	SWIR	1613,7	1610,4	20
12	SWIR	2202,4	2185,7	20

Extrait de Earth Observatory System (2020)

L'acquisition de ces images a été faite de manière automatisée à l'aide d'un script Python. L'automatisation du processus permet d'obtenir l'identifiant des images recouvrant la zone d'étude à partir de l'API *Earth Engine* de Google pour être en mesure d'enclencher le téléchargement des images Sentinel-2 hébergées par le *Copernicus Open Access Hub*. Cette plateforme est une initiative de l'Agence spatiale européenne donnant accès gratuitement et de manière libre aux produits de Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 et Sentinel-5P (ESA, 2020a). Dans une optique de construction d'une série temporelle contenant suffisamment d'informations tout en éliminant la présence de neige ou de glace, les images sont sélectionnées entre les mois de juin et octobre sur une étendue de 2 ans précédant la date du

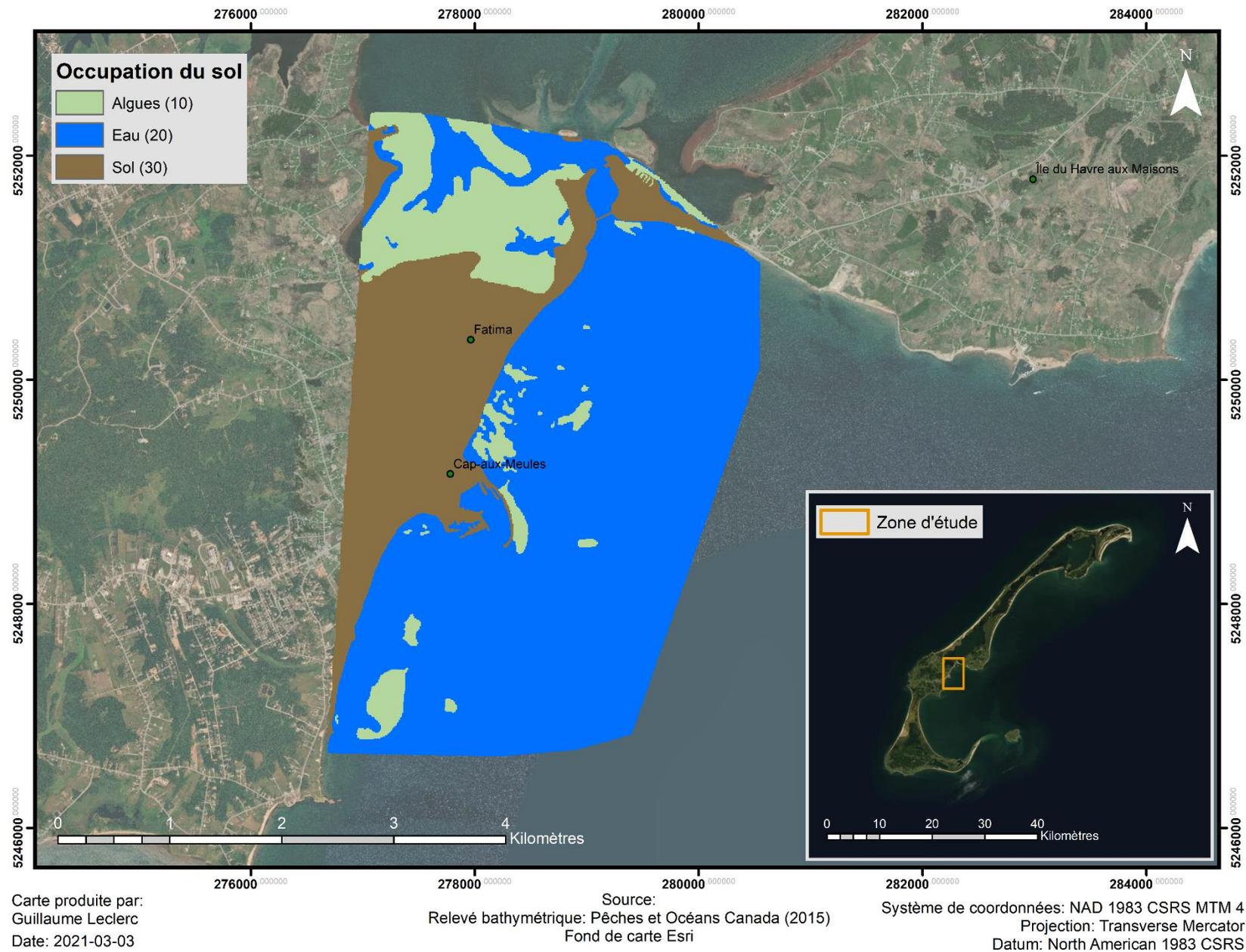
lancement de l'analyse. Dans ce cas-ci, les images ont été acquises entre le 15 juin 2018 et le 6 octobre 2019 (Tableau 2). Lors de la sélection des images à télécharger, un filtre est appliqué pour extraire uniquement les images ayant moins de 10 % de couverture nuageuse.

En ajout aux images satellitaires, le processus de l'analyse temporelle se base sur une classification de l'occupation du sol produite par photo-interprétation par la firme Effigis Géo-Solutions inc. pour l'identification des milieux marins (Tableau 2). Cette classification comprend trois classes représentant les zones terrestres, zones d'algues et zones d'eau (Figure 7). De plus, les limites de la zone d'étude correspondent à l'emprise de cette matrice. Aussi, un relevé bathymétrique de la zone d'étude (Figure 8) produit par Pêches et Océans Canada a permis d'extraire les zones ayant les profondeurs pertinentes pour la détection de changements (Tableau 2).

Tableau 2. Données utilisées

Nom	Type	Date	Source
Images Sentinel-2 A et B (MSI) *	Matriciel	Entre juin 2018 et octobre 2019	ESA, 2020a
Relevé bathymétrique	Matriciel (courbes de niveau rasterisées)	2014	Pêches et Océans Canada, 2014
Photo-interprétation de l'occupation du sol	Matriciel	2019	Effigis, 2019a
Limite de la zone d'étude	Vectoriel	2019	Effigis, 2019b

* La liste complète des images utilisées est détaillée en annexe.



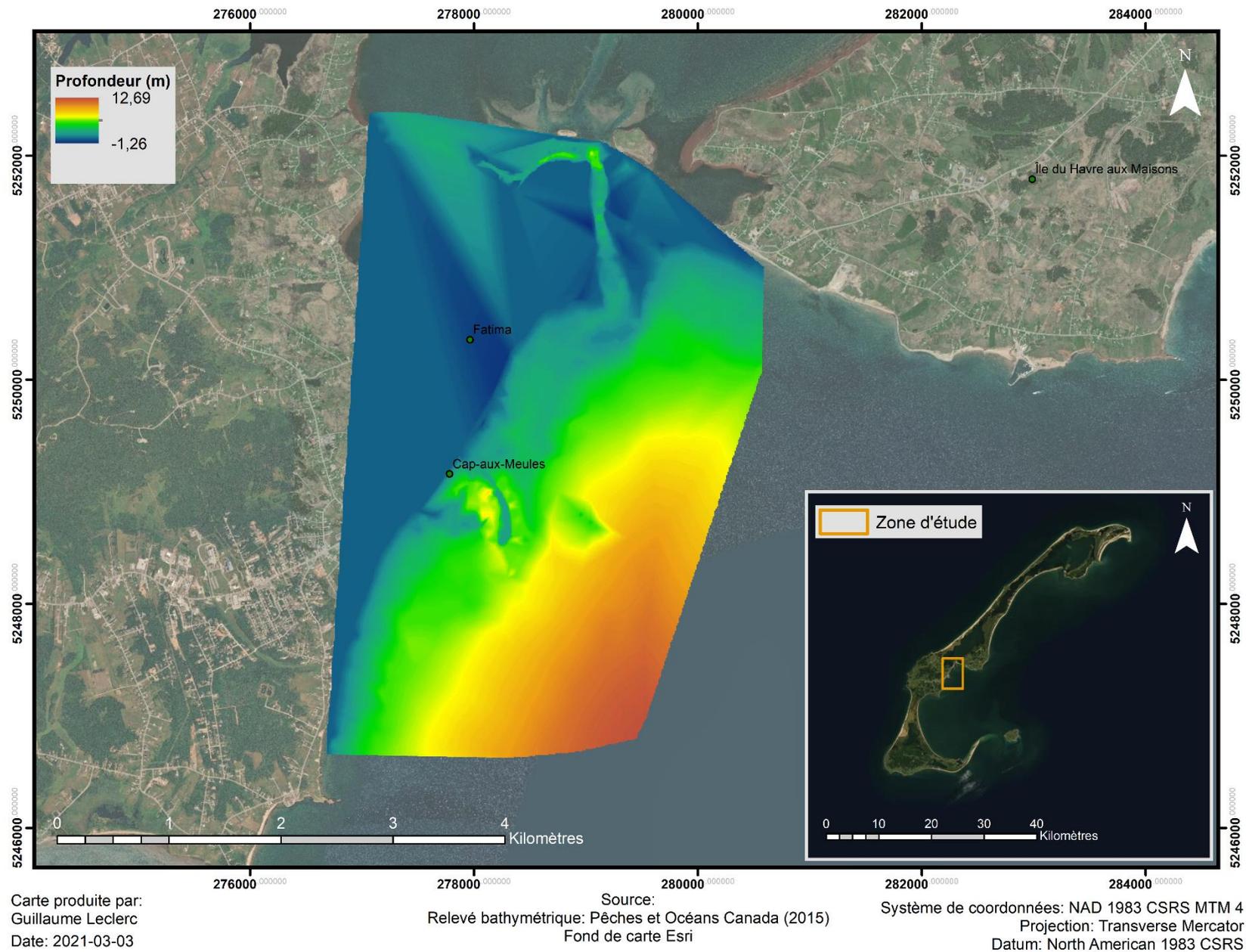


Figure 8. Relevé bathymétrique de la zone d'étude

3.3 Méthodologie

Dans le cadre de cet essai, les images satellitaires servant à l'analyse de séries temporelles pour la détection de changements de la bathymétrie ont été acquises par un processus automatisé. Les images obtenues constituent le fondement de l'analyse. De ce fait, différents traitements doivent être appliqués pour extraire une information de qualité pour permettre de répondre à la problématique. La méthodologie est illustrée par le diagramme de la Figure 9.

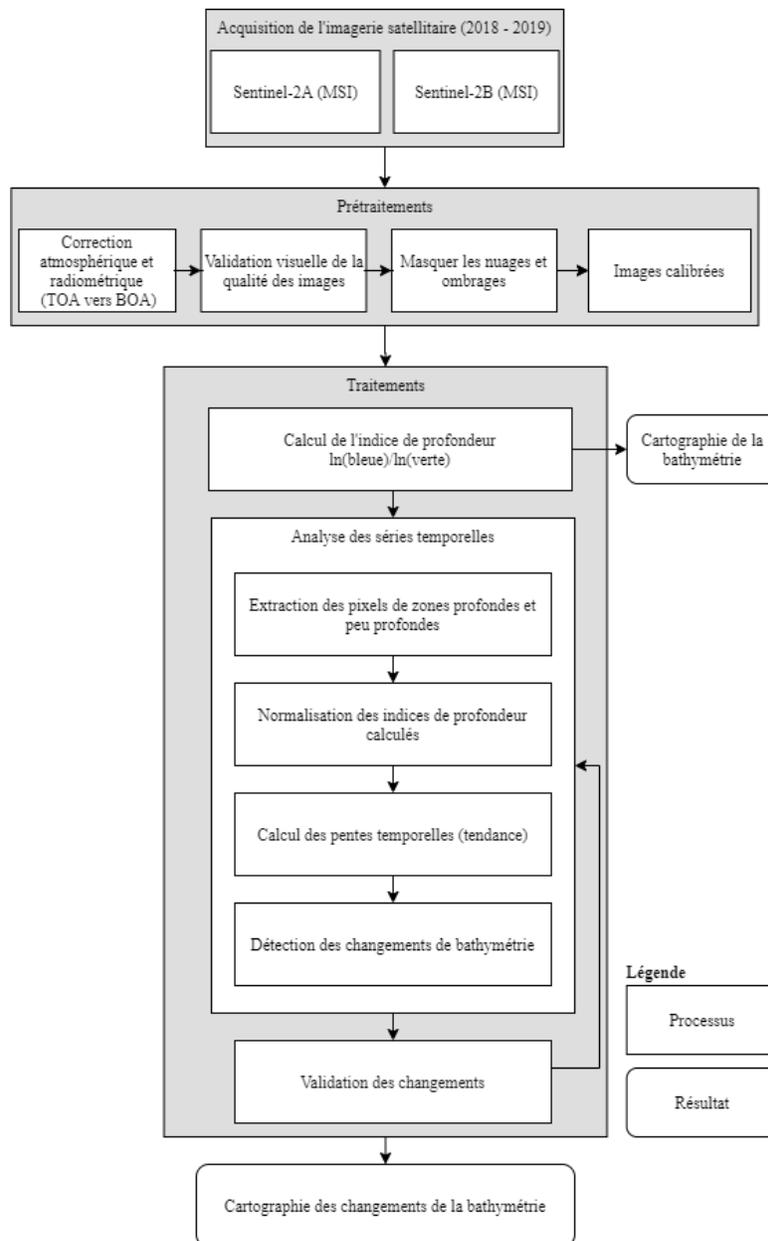


Figure 9. Diagramme méthodologique

3.3.1 Prétraitement des images satellitaires

Les images satellitaires téléchargées à partir de la plateforme *Copernicus Hub* représentent la réflectance en haut de l'atmosphère (*top of atmosphere* (TOA)) (Figure 10). Dans l'optique d'obtenir la réflectance au niveau du sol (*bottom of atmosphere* (BOA)), l'outil Sen2Cor est utilisé (ESA, 2020b). Cet algorithme de correction atmosphérique a été intégré dans la chaîne de traitement pour automatiser le processus. Les paramètres par défaut de Sen2Cor ont été utilisés, à l'exception de la sélection des aérosols de type « Maritime ».



Tiré de (ESA, 2021)

Figure 10 Image Sentinel 2 TOA Niveau-1C (à gauche) et BOA Niveau-2A (à droite)

Une fois la correction atmosphérique complétée, chacune des scènes est visuellement inspectée pour évaluer la qualité de l'image. Cette étape a pour but d'identifier les images qui présenteraient une couverture nuageuse trop importante sur les zones d'intérêts. De plus, la présence de nuages de type cirrus n'est pas désirable puisqu'ils altèrent l'information radiométrique du sol. Puis, les scènes comportant des zones de réflexion spéculaire trop importante ou des vagues trop prononcées sont également retirées.

Par la suite, certaines images peuvent contenir de petites zones contenant des nuages avec leur ombre projetée au sol. Les pixels représentant ces zones sont masqués à l'aide de la bande SCL produite par Sen2Cor lors de la correction atmosphérique (ESA, 2020b). Cette bande représente une classification des éléments de la scène. La classification utilise 12 classes comme présentées dans la Figure 11. Les nuages et leurs ombrages sont masqués à l'aide des classes 3, 8, 9 et 10. Finalement, pour assurer un positionnement adéquat des pixels, une reprojection des images a été appliquée. Le système de coordonnées original des images est utilisé pour cette étape, soit WGS84 / UTM zone 20N (code EPSG :32620).

Label	Classification
0	NO_DATA
1	SATURATED_OR_DEFECTIVE
2	DARK_AREA_PIXELS
3	CLOUD_SHADOWS
4	VEGETATION
5	NOT_VEGETATED
6	WATER
7	UNCLASSIFIED
8	CLOUD_MEDIUM_PROBABILITY
9	CLOUD_HIGH_PROBABILITY
10	THIN_CIRRUS
11	SNOW

Figure 11. Classes utilisées pour la classification de la scène par Sen2Cor

3.3.2 Calcul de l'indice de profondeur

Le calcul de l'indice de profondeur utilise un ratio logarithmique entre les bandes bleues et vertes (5) :

$$Z = \frac{\ln(R(\lambda_B))}{\ln(R(\lambda_V))} \quad (5)$$

où $R(\lambda_B)$ est la réflectance de la bande bleue et $R(\lambda_V)$ est la réflectance de la bande verte (Favoretto et al., 2017; Stumpf et al., 2003). Le choix des bandes bleues et vertes se base sur leur performance accrue pour générer une bathymétrie (SDB) comme présentée précédemment dans le cadre théorique. La firme Effigis Géo-Solutions inc. arrive aux mêmes conclusions quant à ce choix de bandes lors de leurs analyses pour sélectionner les meilleures bandes (Effigis Géo-Solutions inc., 2019). Le Tableau 3 montre une corrélation plus élevée

avec l'utilisation de cet indice spectral. De plus, l'application d'un filtre gaussien aux réflectances améliore la corrélation avec le relevé bathymétrique (Tableau 4). Ainsi, préalablement au calcul de l'indice de profondeur, un filtre gaussien 3X3 est appliqué aux bandes. L'application d'un filtre gaussien réduit le bruit dans l'image causé par la présence de vagues et les reflets sur l'eau (Figure 12).

Tableau 3. Synthèse des résultats pour le choix du meilleur indice spectral

Ratio	Moyenne R² avec filtre gaussien
Bleu/Vert	0,953
Coastal/Bleu	0,893
Coastal/Vert	0,921

Modifié de Effigis Géo-Solutions inc. (2019a)

Tableau 4. Comparaison des méthodes de filtrage

Type de filtre	Moyenne R²
Sans filtre	0,893
Filtre gaussien	0,904
Filtre modal	0,893

Modifié de Effigis Géo-Solutions inc. (2019a)

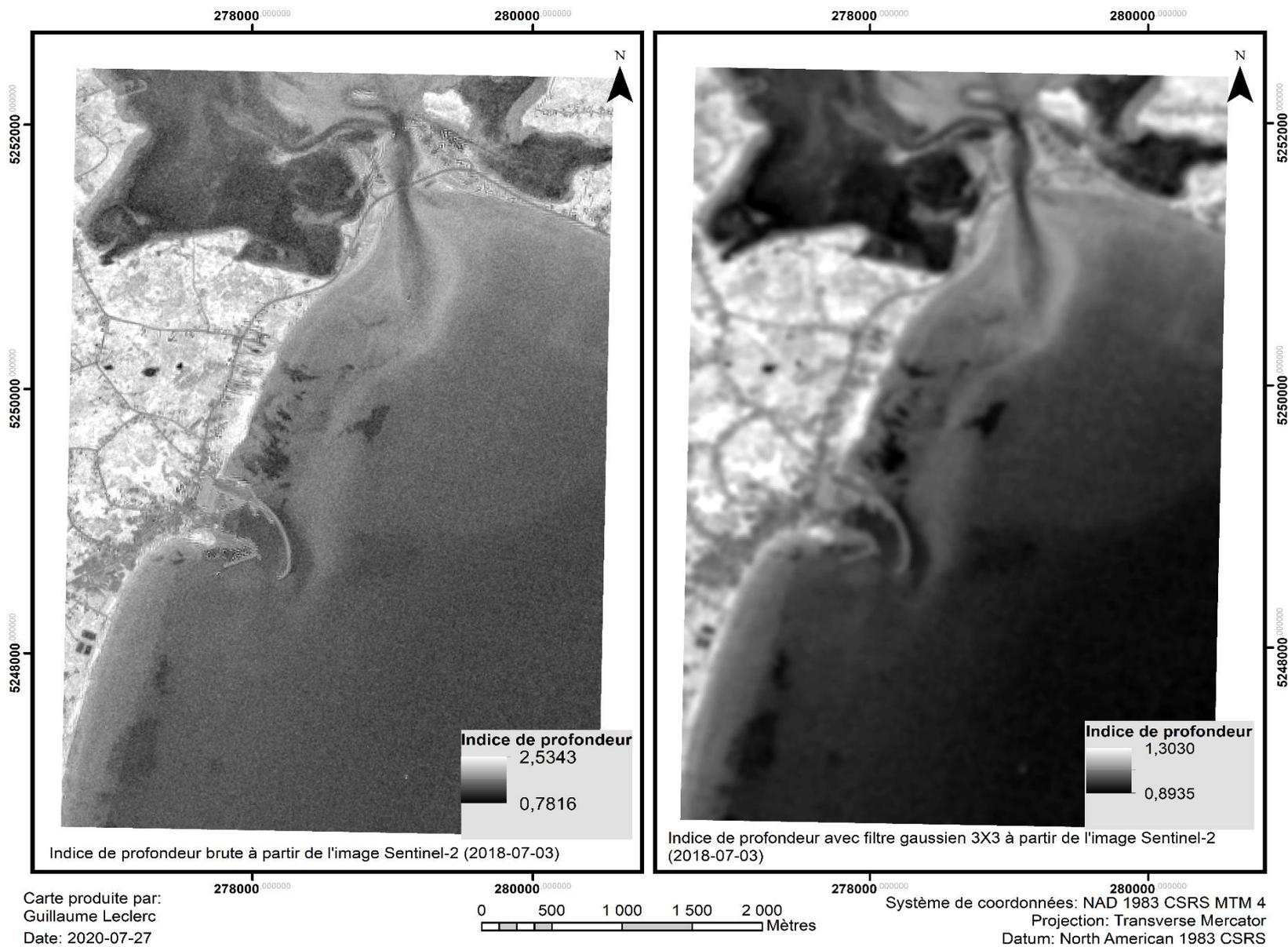


Figure 12. Comparaison entre une image non filtrée et filtrée

Bien que ce filtrage réduise le bruit dans les images de réflectance, les filtres gaussiens ne prennent pas en compte la variabilité spatiale de la valeur des pixels. Pour ce faire, un filtre spatial adaptatif a été appliqué avant de produire l'analyse de séries temporelles. Plus précisément, le filtre Wiener a été appliqué. Il a été déterminé que les meilleurs résultats sont obtenus avec un filtrage à trois passages avec une fenêtre de dimension variable, soit respectivement 3x3, 3x3 et 5x5 (Effigis Géo-Solutions inc., 2019b).

3.3.3 Analyse de séries temporelles

Dans le but d'identifier les changements de profondeur des zones d'eau profonde vers les eaux peu profondes, seulement les pixels de l'indice de profondeur de ces zones sont utilisés pour chacune des dates. Plus précisément, il a été établi que les zones profondes se situent entre 8 et 12 mètres de profondeur et les zones peu profondes entre 4 et 6 mètres. Ce choix correspond à une situation typique de menace à la navigation a été validé par Pêches et Océans Canada.

Les pixels extraits pour l'ensemble des dates permettent de produire une série temporelle qui montre l'évolution de la valeur de l'indice de profondeur. Les changements peuvent être identifiés à l'aide de pentes temporelles. En raison de la présence d'éléments environnementaux pouvant influencer l'indice de profondeur (marée, vent, sédiments, etc.) la variabilité de l'indice spectral produit peut être importante. Ainsi, pour faciliter l'identification de changements significatifs et réduire les fluctuations, les séries temporelles sont normalisées. Pour ce faire, des valeurs de référence pour les zones profondes et peu profondes sont utilisées, soit respectivement 0,9 et 1,0 (6).

$$Indice_{normalisé} = 0,1 \frac{Indice_{brut} - Référence_{Profond}}{Référence_{Peu\ profond} - Référence_{Profond}} + 0,9 \quad (6)$$

Les valeurs de référence 0,9 et 1,0 ont été choisies empiriquement, elles correspondent environ à la moyenne des indices dans les zones profondes et peu profondes, respectivement. Les changements sont identifiés à l'aide de la pente (c.-à-d. la tendance) temporelle couvrant l'ensemble de la période étudiée. Les pentes sont obtenues à l'aide d'une fonction polynomiale de 1^{er} ordre. Ainsi, les pentes les plus fortes représentent des changements potentiels de bathymétrie.

3.3.4 Performance de l'identification des changements de bathymétrie

La validité des changements de bathymétrie est obtenue par photo-interprétation des images satellitaires de la période d'étude. De manière à être en mesure de bien valider la méthode, les zones très peu profondes (entre 0,5 et 2 mètres) servent à la validation. En effet, ces zones permettent de bien voir les changements dans le fond marin. Les zones de changements identifiées sur la cartographie des changements sont comparées avec les images satellitaires pour voir si elles correspondent à de véritables changements. Ultimement, si la comparaison démontre qu'il y a des changements, la validité de la méthode est étendue aux autres zones d'eau plus profonde.

4 Résultats

4.1 Indice de profondeur

Une matrice de l'indice de profondeur a été calculée pour chacune des dates. Cette matrice représente le ratio logarithmique entre la bande bleue et la bande verte. La Figure 13 permet de visualiser l'évolution de l'indice de profondeur en comparaison avec le relevé bathymétrique du secteur. L'indice de profondeur est élevé dans les zones peu profondes et diminue en zones profondes. À titre de comparatif, la variation de l'indice de profondeur est observable à l'aide des moyennes des indices de profondeur pour chacune des zones. Respectivement, les régions profondes, peu profondes et très peu profondes ont un indice moyen de 0,9781, 1,0170 et 1,0727 (Tableau 5).

Tableau 5. Évolution de l'indice de profondeur dans les différentes zones

Zones	Moyenne des indices de profondeur
Profondes (10-12 m)	0,9781
Peu profondes (4-6 m)	1,0170
Très peu profondes (0,5-2 m)	1,0727

Dans le cadre de ce projet, seules les profondeurs entre 4 m et 12 m sont analysées, puisque les changements de profondeur pouvant se produire dans cet intervalle peuvent constituer un risque à la navigation. La zone couverte par l'étude est délimitée à l'aide de la bathymétrie de référence. Dans un objectif de quantifier l'ampleur des changements de bathymétrie, les indices de profondeur de ces zones ont été convertis en profondeur calculée. La Figure 14

illustre la zone marine à l'étude ainsi que les profondeurs prédites calculées à partir de l'indice de profondeur en date du 3 juillet 2018. Dans cette figure, certains secteurs ont des données manquantes en raison de l'utilisation d'une couche de masquage pour retirer les zones contenant des algues ou bien des nuages. L'évolution de la profondeur prédite entre les zones peu profondes, qui se trouvent près du littoral, et les zones profondes en s'éloignant vers le large, au sud-est de la côte correspondent assez fidèlement à la bathymétrie de référence. Malgré le fait que la bathymétrie de référence date de 2014, soit quatre années plus tôt que la bathymétrie prédite à partir d'une image datant du 3 juillet 2018, la distribution spatiale des profondeurs prédite est similaire à celles de référence. Ceci est supporté à l'aide de la corrélation entre la profondeur de référence et celle prédite avec un $R^2 = 0,78$ (Figure 15).

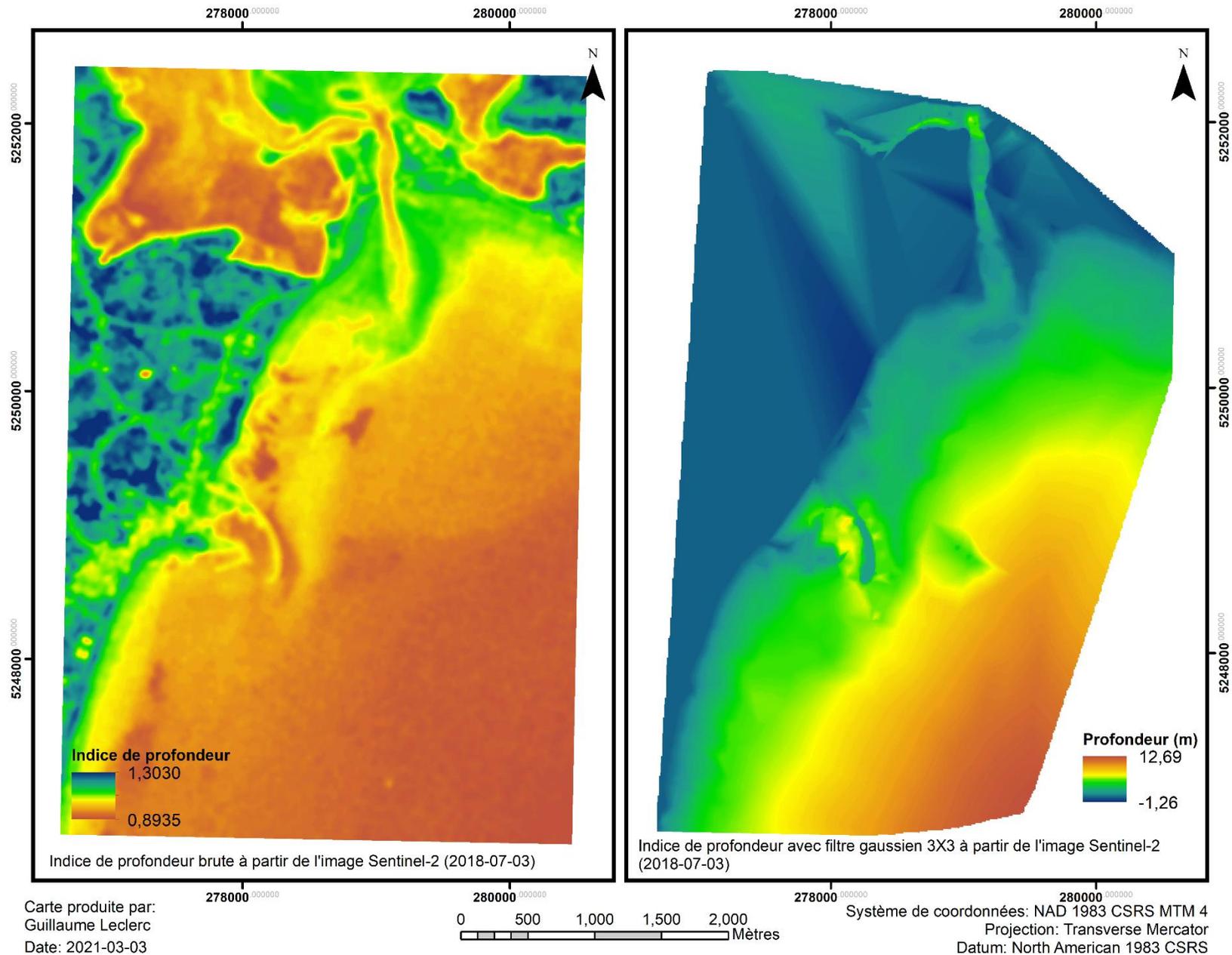


Figure 13. Comparaison entre un indice de profondeur et le relevé bathymétrique

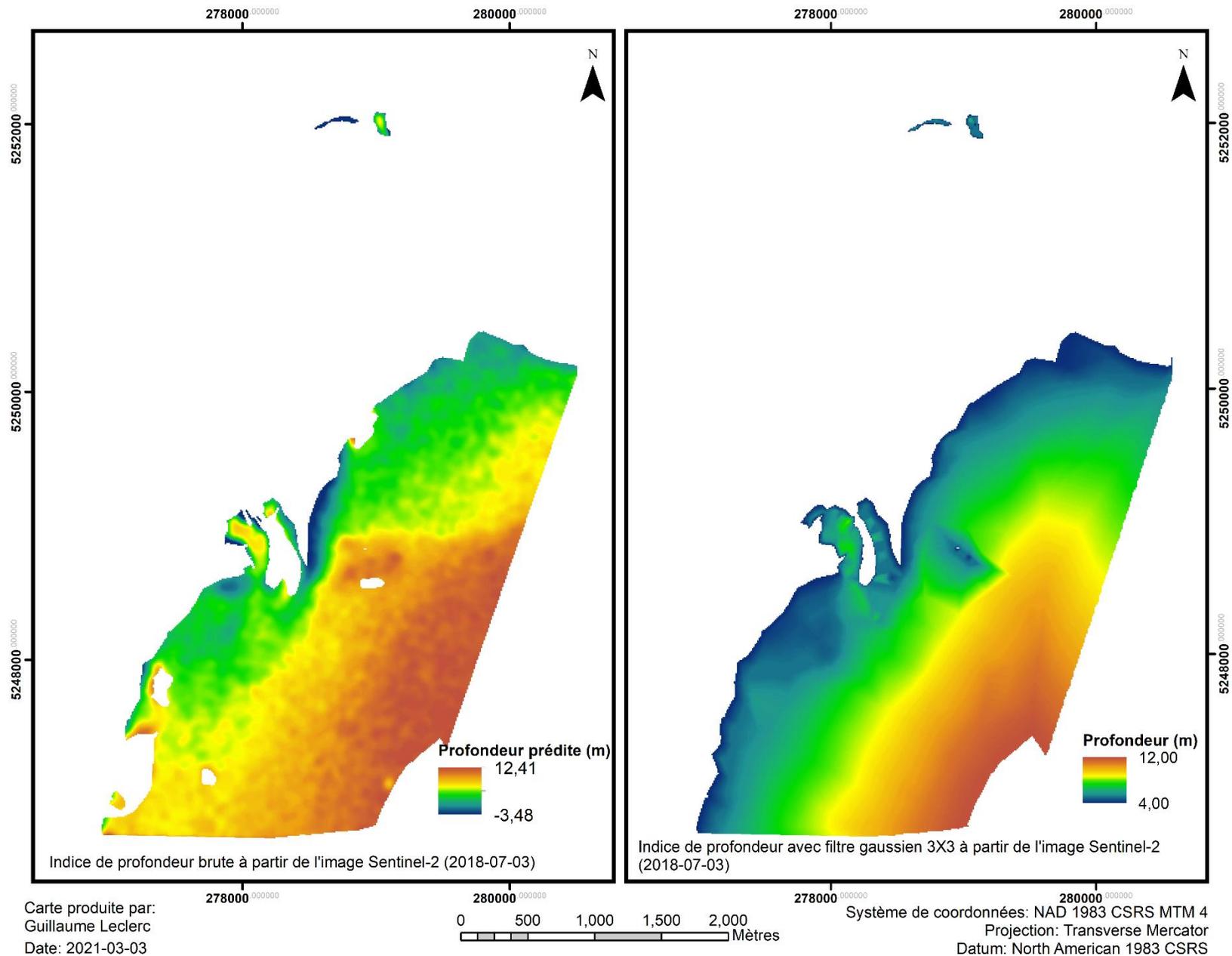


Figure 14. Comparaisons entre la bathymétrie dérivée de l'indice de profondeur et le relevé bathymétrique pour les pixels d'eau

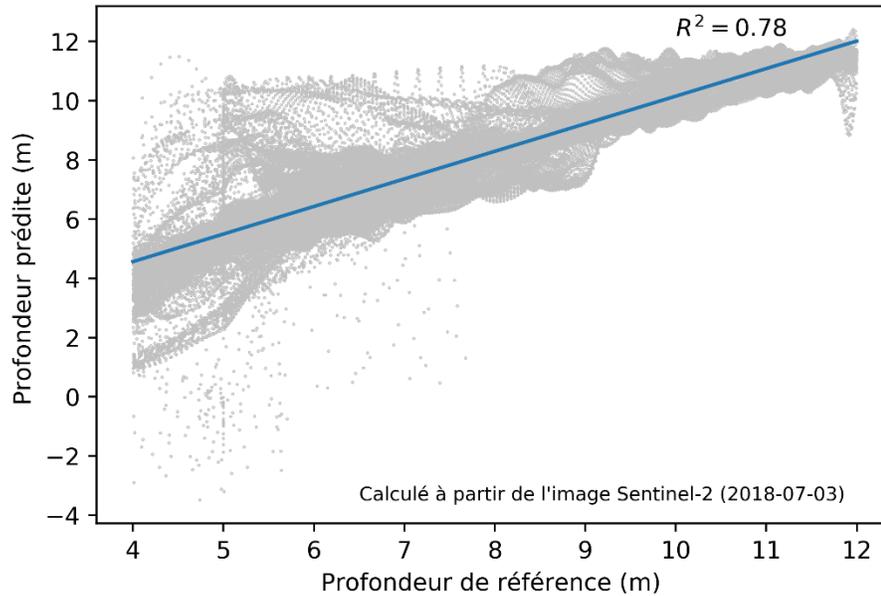


Figure 15. Corrélation entre la profondeur de référence et la profondeur prédite

L'étendue des valeurs de la profondeur prédite diffère légèrement de la bathymétrie de référence, pour les zones profondes. Les différences entre les valeurs maximales et minimales de ces deux matrices sont respectivement de 41 cm et de 748 cm (Figure 14). La différence pour les zones peu profondes, près du littoral, diffère de manière plus importante en raison des possibles variations de la bathymétrie qui sont survenues depuis 2014 ou de l'effet de la marée qui pourrait laisser certaines zones de fonds marins sans eau au moment de la capture de l'image. Ainsi, l'indice de profondeur servant à calculer la profondeur n'est plus valide et produit des valeurs aberrantes. Les valeurs négatives représentent seulement 0,1% de l'ensemble des pixels ce qui est négligeable.

4.2 Détection de changements de bathymétrie

4.2.1 Analyse de série temporelle

L'analyse de série temporelle s'étalant sur une période allant de 2018 à 2019 a permis d'identifier les sites ayant eu des changements de bathymétrie présumés. Pour ce faire, l'ensemble des pixels compris dans les zones de profondeur entre 4 et 12 mètres ont été analysés. Une pente temporelle a été calculée pour chacun des pixels. Cette pente temporelle correspond à la variation de la profondeur en mètre entre le début et la fin de la période visée.

En premier lieu, une série temporelle brute des différentes zones de profondeur est obtenue à partir de l'indice de profondeur. La Figure 16a représente l'évolution de l'indice de profondeur au fil des mois. Il est à noter que l'échelle de temps est en années décimales dans une optique d'uniformiser la durée variable des mois. Les courbes représentant les zones peu profondes et profondes correspondent respectivement au 75^e et au 25^e percentile des valeurs de l'indice de profondeur brut pour chacune des images. Ces indices de référence servent à identifier une référence correspondant aux différentes zones de profondeur. La courbe centrale est la variation de la valeur de l'indice de profondeur d'un pixel quelconque compris entre 4 et 12 mètres de profondeur. Les valeurs de référence des deux zones de profondeur subissent globalement les mêmes variations temporelles. Ces tendances se suivent même avec un changement brusque de l'indice de profondeur comme observable à l'image du 23 septembre 2018. Les indices de référence augmentent de manière importante pour atteindre respectivement pour les zones profondes et peu profondes 1,1410 et 1,2000. Du côté du pixel d'eau analysé, les valeurs évoluent entre les valeurs de référence. Ainsi, les variations sont similaires. Dans la partie centrale de la figure, un espace temporel allant du mois de novembre au mois de mai ne possède aucune donnée. Ceci est attribuable en raison de l'exclusion de l'étude de cette période de l'année. Visuellement, en raison de sa forte variabilité, le changement temporel de l'indice de profondeur brut est difficile à utiliser pour identifier l'ampleur du changement.

Dans un objectif de rendre plus notables les changements pouvant se produire, l'indice brut a été normalisé en utilisant les valeurs de référence des zones profondes comme limite inférieure (0,9) et des zones peu profondes comme limite supérieure (1,0). L'indice normalisé est illustré dans la Figure 16b. La normalisation de l'indice de profondeur a réduit les écarts dans la série temporelle. Ainsi, les changements, s'ils ont lieu, peuvent être identifiés à l'aide de la pente temporelle issue d'un polynôme de 1^{er} ordre. Les pentes positives correspondent aux zones ayant eu une accumulation importante de sédiments, donc une perte de profondeur. À l'inverse, les pentes négatives élevées correspondent aux zones ayant eu une perte de sédiments, donc un gain en profondeur. Les valeurs normalisées de la série temporelle évoluent majoritairement entre 0,9 et 1,0. Toutefois, dans le cas du pixel du 1^{er} octobre 2018 représenté dans la Figure 16b, la valeur de l'indice de profondeur normalisé atteint une valeur basse de 0,8190. Cette valeur aberrante est causée par la valeur de l'indice de profondeur brute, qui est de manière notable, inférieure à la valeur de référence de la zone profonde. Une

autre valeur se trouve à l'extérieur des limites des indices de références, dont celle du 4 août 2019. Ces grandes différences génèrent des valeurs normalisées erronées dont l'effet est toutefois réduit par le calcul de la pente temporelle des indices normalisés de plusieurs dates.

L'utilisation de l'indice de profondeur ne permet pas de quantifier directement l'ampleur du changement. Une conversion de l'indice normalisé vers une profondeur en mètres rend l'analyse plus intuitive. La conversion se base sur l'hypothèse qu'il y a une relation linéaire inverse entre les indices de profondeur normalisés et les profondeurs issues de la bathymétrie de référence. Dans le but de respecter cette linéarité, les percentiles des valeurs de référence des indices de profondeur sont inversés pour les valeurs bathymétriques des zones profondes et peu profondes soit respectivement le 75^e et le 25^e percentile (Tableau 6).

Tableau 6. Valeurs de référence des zones profondes et peu profondes

Zones	Valeur de référence de profondeur (m)
Profondes (10-12 m)	11,32 (75 ^e percentile)
Peu profondes (4-6 m)	4,68 (25 ^e percentile)

La Figure 16c représente la variation temporelle de la profondeur prédite. Au fil de la période à l'étude, la profondeur prédite oscille principalement entre 8 et 10 m. Cependant, comme présentées précédemment, certaines données sont aberrantes. Ceci a pour effet de prédire des profondeurs erronées. C'est notamment le cas pour le 1^{er} octobre 2018 et le 4 août 2019 où les valeurs atteignent respectivement 16,72 m et 3,15 m. Dans le cas du 1^{er} octobre 2018, ce changement correspond à un gain en profondeur de 10,71 m par rapport à l'image précédente du 23 septembre 2018. Cette variation est peu probable pour une si courte période de temps. Il en va de même pour le cas du 4 août 2019 où ce changement correspond à une perte de profondeur de 6,52 m. Malgré ces écarts de valeurs, la pente temporelle de ce pixel représente une perte de profondeur de 0,86 m/an.

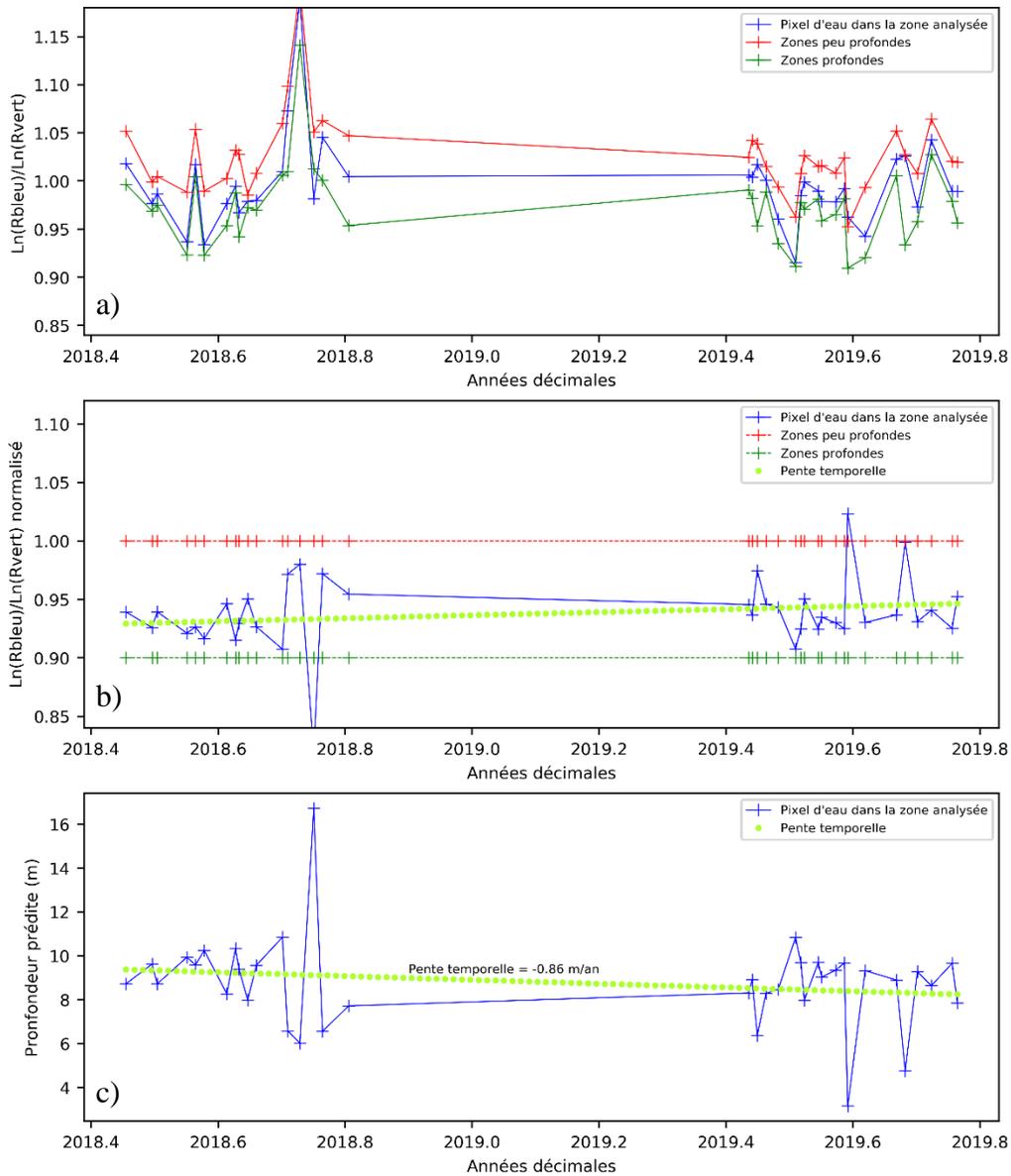


Figure 16. a) Évolution temporelle de l'indice de profondeur. b) Évolution temporelle de l'indice temporel normalisé. c) Évolution temporelle de la profondeur prédite

4.2.2 Cartographie des changements de bathymétrie

À l'aide de la conversion des pentes temporelles des indices de profondeur normalisés en pentes temporelles de profondeurs prédites, des cartographies ont été produites. Comme présenté précédemment, les gains en profondeur et les pertes de profondeur sont respectivement représentés par une pente positive et une pente négative. La Figure 17 illustre

bien le cas d'une zone, qui est délimitée en rouge, ayant des pixels de valeurs négatives. La même scène en bordure du port de Cap-aux-Meules y est représentée, mais à deux moments différents, soit le 3 juillet 2018 à 15h16 (Figure 17a) et le 21 septembre 2019 à 15h16 (Figure 17b). La zone délimitée en rouge correspond à une zone d'accumulation de sédiments qui sont observables le 21 septembre 2019. En comparant l'image de 2018 avec celle de 2019, il est possible de remarquer que les sédiments ne sont pas présents de manière aussi importante près de la rive dans la première image. Effectivement, les pixels dans la zone délimitée en rouge sont plus blancs ce qui indique une accumulation de sédiments. Cette perte de profondeur est détectée à l'aide de la méthode de la pente temporelle dans la Figure 17c. Il est estimé que la perte de profondeur dans la zone délimitée s'est faite à un taux annuel maximal d'environ 0,51 m. Les zones ayant la plus forte accumulation de sédiments sont identifiées par des pixels allant de l'orangé au rouge. Il est à noter que ce secteur a été sélectionné uniquement pour faire la preuve de concept puisqu'il est facile d'observer visuellement les changements de bathymétrie. En effet, les profondeurs sont de 2 m et moins, donc le fond marin peut être observable sur le composé « vraies couleurs ».

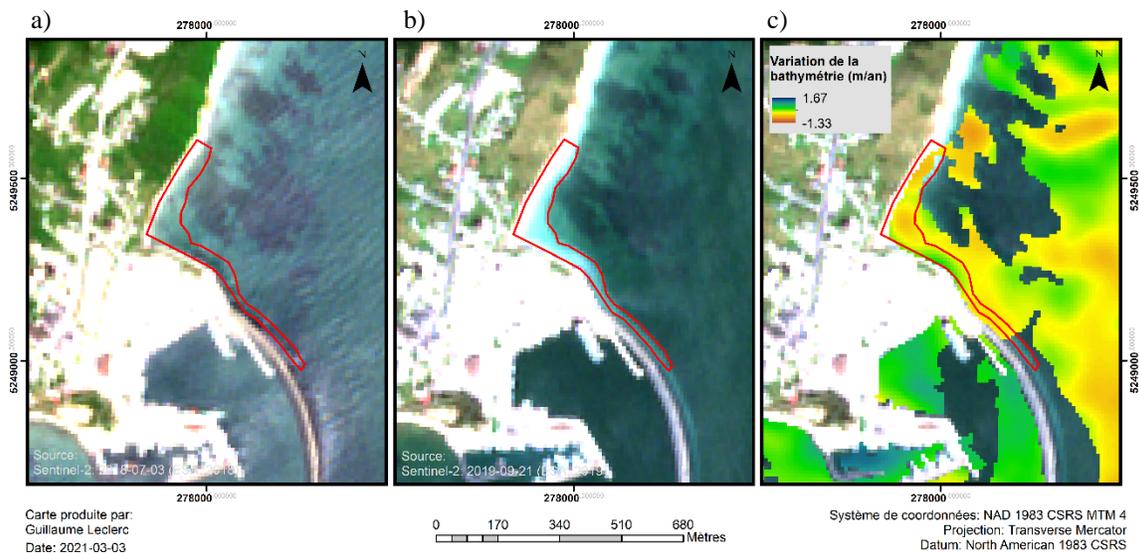


Figure 17. La zone délimitée en rouge représente les limites des sédiments qui se sont accumulés durant la période d'étude a) Vue du littoral en date du 3 juillet 2018. b) Vue du littoral en date du 21 septembre 2019. c) Illustration des changements de bathymétrie.

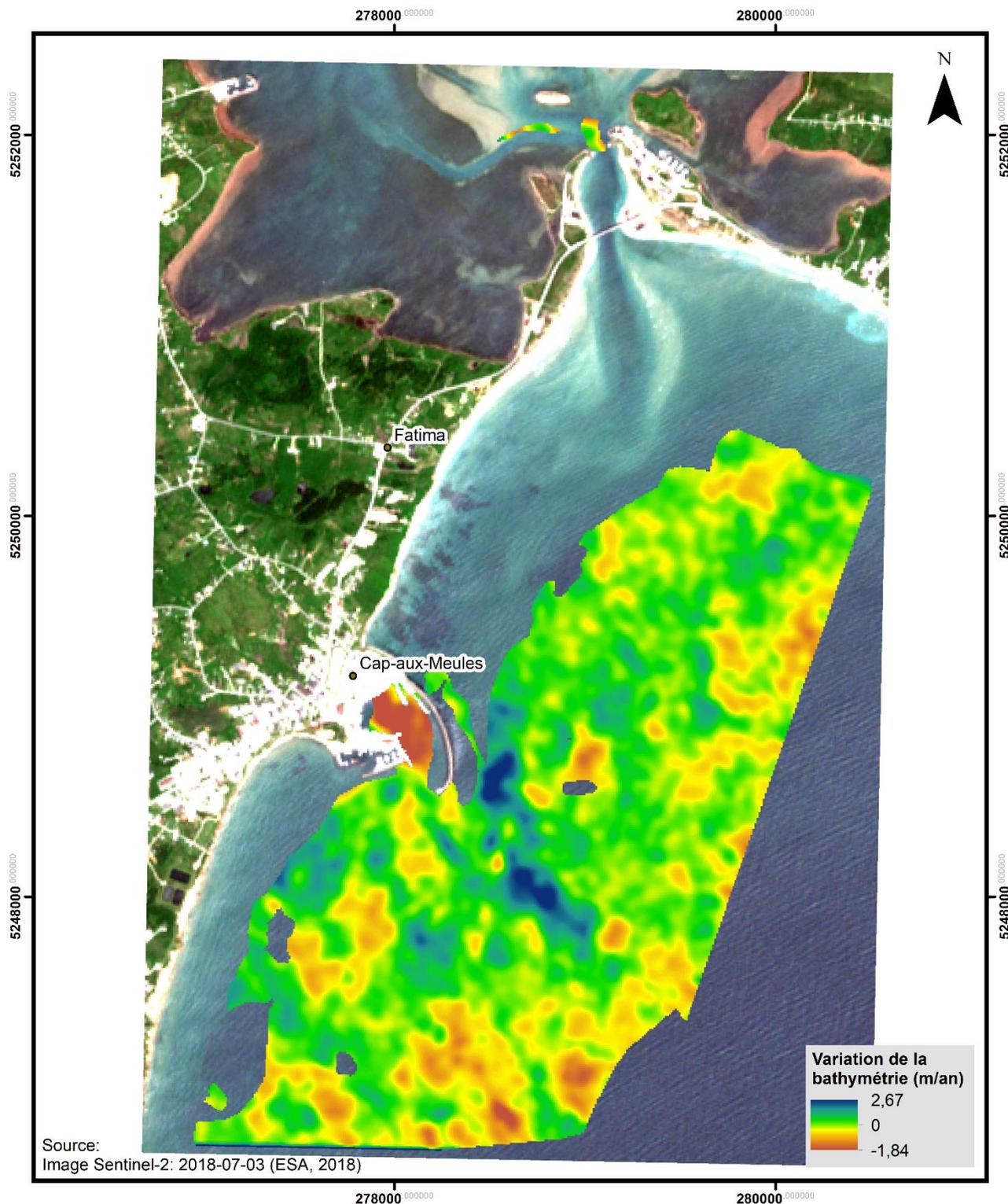
En utilisant le même raisonnement, cette technique peut être utilisée pour la détection de changements dans les zones plus profondes, où il est plus difficile d'attester visuellement des changements de bathymétrie. Les changements de la bathymétrie pouvant éventuellement

mener à des problèmes pour la navigation sont illustrés dans la Figure 18. Les pixels qui ont eu une accumulation de sédiments ont des valeurs négatives. Dans l'ensemble, près de 35 % de la zone d'étude a subi une perte de profondeur (Tableau 7). Toutefois, une nuance doit être apportée. Les changements de profondeurs sont parfois de très faibles amplitudes. À titre d'exemple, près de 25% des pertes de profondeur sont évaluées à moins de 0,1 m/an. Du côté des gains en profondeur, ils représentent près de 65 % de la zone d'étude (Tableau 7). De manière générale, les pertes de profondeurs moyennes s'élèvent à -0,31 m/an et les gains en profondeur à 0,38 m/an.

Tableau 7. Statistiques des changements de profondeur

Zones de changements	Nombre de pixels	Superficie (ha)
Gains de profondeur	44 493 (65,2 %)	444,9
Perte de profondeur	23 699 (34,8 %)	237,0

Certains secteurs, qui sont névralgiques pour la circulation maritime ont subi des accumulations plus importantes. C'est notamment le cas à l'intérieur du port de Cap-aux-Meules où des sédiments se sont accumulés à proximité des quais et des voies navigables. À l'intérieur du port, il y a eu une perte annuelle moyenne de profondeur de 1,16 m. Toutefois, près des quais commerciaux, dans la portion est du port, il est prédit que des accumulations allant jusqu'à 1,41 m/an ont eu lieu. Du côté des quais pour les bateaux de pêche, dans la portion ouest du port, des accumulations allant jusqu'à 1,83 m/an sont mesurées. De manière générale, l'ensemble du port a subi une perte de profondeur. Outre ce secteur, les accumulations de sédiments ont affecté d'autres zones. Plus précisément, la portion au sud de la zone d'étude a eu une diminution de la profondeur allant jusqu'à 1,56 m/an. De plus, plus, dans la portion à l'est de la zone d'étude, près de la limite étudiée, des diminutions de bathymétrie ont été observées. La profondeur a diminué jusqu'à 1,00 m/an.



Carte produite par:
Guillaume Leclerc
Date: 2021-03-03

Figure 18. Changements de bathymétrie détectés à l'aide de la méthode des pentes temporelles dans les zones entre 4 et 12 m.

5 Interprétation et discussion des résultats

5.1 Détection de changements de bathymétrie

Les changements détectés à l'aide de la méthode de séries temporelles montrent que cette approche est en mesure d'identifier de réels changements comme présentés et validés à la Figure 17. Bien que cet exemple soit en zone très peu profonde (0,5 - 2 m) et qu'elle ne représente pas les profondeurs visées par l'étude, soit les zones peu profondes (4 – 6 m), l'identification des sédiments accumulés s'est avérée concluante. De ce fait, les sédiments, qui se sont accumulés entre le moment de la première image et la seconde, correspondent très bien aux changements prédits. De plus, cette présence accrue de sable n'est pas causée par une période de marée basse, car le niveau de la marée du 21 septembre 2019 était plus élevé qu'au 3 juillet 2018. En effet, le 21 septembre 2019 à 15h15 le niveau de la marée était de 1,03 m et le 3 juillet 2018 à 15h15 le niveau était de 0,78 m (Pêches et Océans Canada, 2020b). De plus, la répartition spatiale des accumulations de sédiments prédits correspond à l'identification visuelle. En considérant cette démonstration de concept, il est possible d'appliquer la même analyse en zones profondes (10 -12 m) même s'il n'est pas possible de bien visualiser les changements en profondeur.

En observant la Figure 18, les changements les plus marqués sont observables à l'intérieur du port de Cap-aux-Meules ainsi que dans la portion sud de la zone d'étude. Ces zones sont névralgiques pour la circulation maritime, car elles sont utilisées fréquemment par différents types d'embarcations tels que des bateaux de pêche, des bateaux cargos, des bateaux de croisière et des traversiers. En effet, ce port est la porte d'entrée de plusieurs trajets de différentes lignes de traversier (Tourisme Îles-de-la-Madeleine, 2020).

Du côté du port de Cap-aux-Meules, le fond marin semble avoir subi une perte de profondeur moyenne de 1,16 m/an. Cependant, les accumulations semblent plus prononcées à proximité des quais commerciaux et de pêche allant respectivement pour chacun de ces lieux jusqu'à 1,41 et 1,83 m/an. En considérant que certains quais commerciaux peuvent avoir une profondeur allant de 5 à 7 mètres et que certains quais de pêcheurs peuvent avoir une profondeur allant de 1,8 m à 5,3 m, ces variations peuvent potentiellement avoir un impact sur l'accessibilité de certains navires ayant un tirant d'eau plus élevé (High Seas Maritime Agency Ltd., 2020). Ainsi, selon les résultats obtenus, les efforts de dragage devraient être

davantage concentrés dans le port, plus précisément en bordure des quais. Cependant, dans l'analyse de ces résultats il faut considérer la présence d'un léger décalage des pixels entre chacune des images et avec les couches de masquage. Ce décalage, bien que mineur, peut être de l'ordre de 1 à 2 pixels en longitude et en latitude. Ceci représente un déplacement de 10 à 20 m. Ainsi, il est possible que les pixels se trouvant à la limite de deux milieux différents (ex. : eau et sol) soient pris en compte dans l'analyse. Ce chevauchement possible peut mener à des prédictions erronées de changements, qui peuvent toutefois être éliminés en analysant le modèle spatial de ces changements (non réalisé dans cette étude). La proximité de deux milieux différents peut causer un mauvais calcul d'indice de profondeur et générer des pentes temporelles plus prononcées. Mis à part les quais, dans le restant du port, un phénomène d'accumulation est tout de même présent, mais de manière plus modérée en atteignant une moyenne de 1,16 m/an. Ainsi, la tendance générale est à l'accumulation de sédiments dans l'ensemble du port.

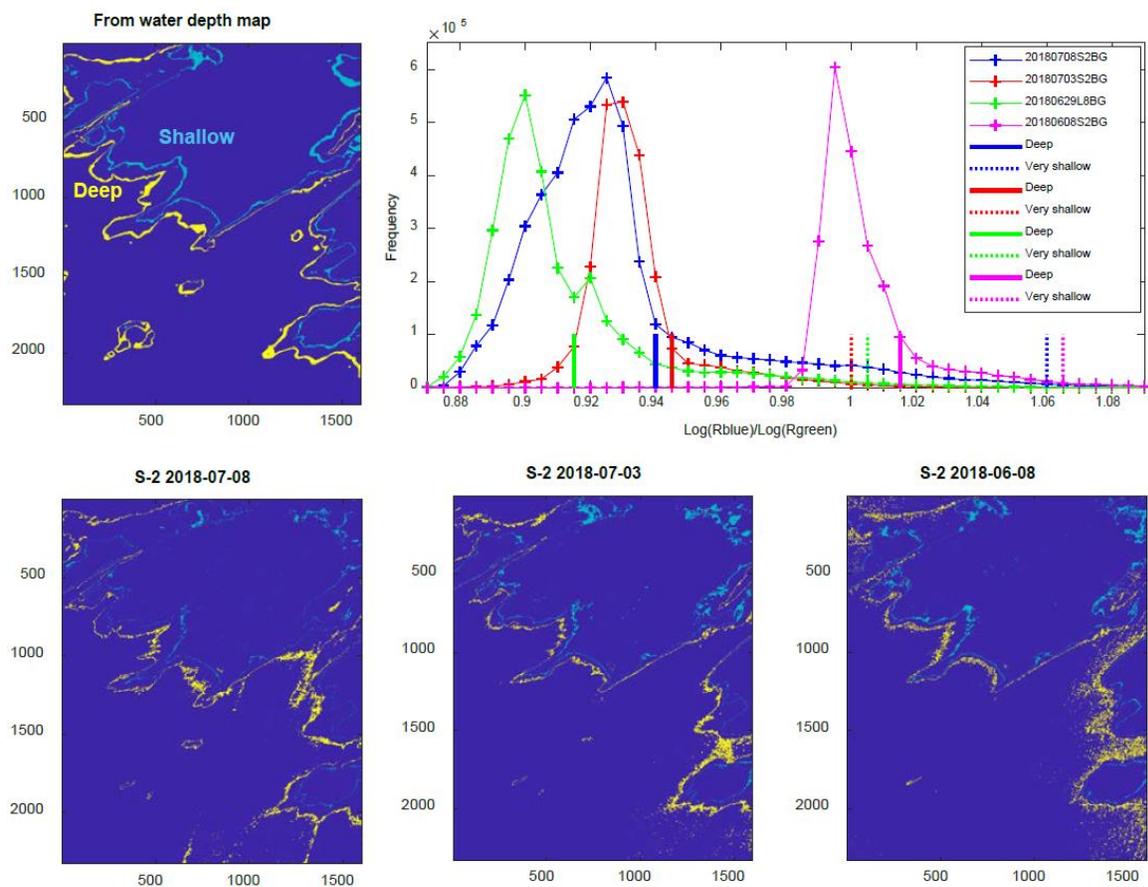
Outre ce précédent secteur, les accumulations de sédiments ont affecté d'autres zones. Plus précisément, la portion au sud de la zone d'étude a eu une perte de la profondeur allant jusqu'à 1,56 m/an. Cependant, en raison d'une profondeur plus importante, ce changement ne semble pas poser une menace à la sécurité de la navigation. En effet, le relevé bathymétrique de référence de cette zone a une profondeur de plus de 8 mètres. Dans la portion à l'est de la zone d'étude, près de la limite étudiée, des diminutions de bathymétrie ont également été observées allant jusqu'à 1,00 m/an. Toutefois, l'absence de corridor maritime d'importance jumelée à la présence d'une profondeur approximative de 7 mètres, les risques à la navigation sont faibles. Ainsi, il semblerait que des interventions de dragage ne seraient pas nécessaires. Dans l'ensemble, l'accumulation des sédiments pourrait être causée par l'effet des courants marins, des marées ou lors d'épisodes de tempêtes.

Dans l'application opérationnelle de cette méthode, il est possible de se concentrer seulement sur les variations significatives; les faibles variations peuvent être considérées comme étant dues aux différentes sources de bruit.

5.2 Originalité de la méthode

Dans le cadre de ce projet, une bathymétrie de référence issue de la carte bathymétrique de Pêche et Océans Canada a été utilisée pour établir la relation entre les indices de profondeur

et la profondeur réelle. Il se trouve que la carte bathymétrique n'est pas disponible dans l'ensemble des côtes canadiennes en raison de l'immensité du territoire maritime. Ainsi, la méthode décrite ci-haut ne pourrait pas être utilisée dans les zones n'ayant pas de bathymétrie. Or, une alternative est possible pour pallier l'absence potentielle de données bathymétriques. Les valeurs de référence pour chacune des zones de profondeur (profonde, peu profonde et très peu profonde) utilisées pour faire la normalisation des indices de profondeur peuvent être extraites à partir d'un histogramme des valeurs des indices de profondeur calculés pour chacune des images. Plus précisément, ces valeurs peuvent être identifiées à l'aide du patron de la courbe des fréquences des indices de profondeur. La localisation des valeurs des zones profondes et très peu profondes suit un patron de fréquence qui peut être utilisé pour montrer la ressemblance avec la bathymétrie de référence (Figure 19).



Extrait de Effigis Géo-Solutions inc. (2019b)

Figure 19. Distribution de la fréquence des indices de profondeur pour identifier les valeurs de référence.

La normalisation des indices de profondeur a permis de réduire la variabilité du signal dans les séries temporelles produites. Ainsi, cette approche réduit l'amplitude des valeurs extrêmes. Les séries temporelles permettent de voir l'évolution du signal dans le temps. Ce signal est composé de plusieurs éléments, dont le phénomène étudié (changements réels de la bathymétrie) et le bruit (marées, vagues, reflet de soleil, co-registation, correction atmosphérique) (Verbesselt et al., 2010). L'utilisation d'une multitude d'images permet de capturer la même scène, mais avec des conditions environnementales qui diffèrent. Ainsi, le signal temporel est plus grand ce qui permet d'atténuer le bruit présent dans les séries temporelles. Il en résulte une détection de changements plus représentatifs. Ces changements sont identifiés à l'aide de la technique des pentes temporelles. Cette méthode identifie sur la période à l'étude la variation d'un signal à l'aide d'une régression linéaire de premier ordre. D'autres méthodes plus avancées sont généralement utilisées pour détecter les changements dans les signaux, comme l'analyse par ondelettes (Martínez & Gilabert, 2009). Bien que la méthode par pente temporelle soit moins sophistiquée que d'autres techniques de traitement de signal ou d'intelligence artificielle, elle s'avère efficace et simple d'utilisation pour estimer les variations et s'insère parfaitement dans une optique d'automatisation du processus.

5.3 Limites de la méthode

5.3.1 Justesse des résultats

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de détecter des changements de bathymétrie potentiels, mais il est difficile d'établir le degré de performance surtout dans les milieux où le fond marin n'est pas visible. Actuellement, il n'y a pas de mesures comparatives permettant de lier un changement de profondeur prédit à un changement réel. Pour ce faire, un relevé bathymétrique de référence pris à une date rapprochée du moment de l'étude permettrait d'attester que les résultats correspondent bel et bien à de véritables changements dans les zones profondes. Présentement, les résultats ne font que montrer une estimation des tendances à l'accumulation ou à la dispersion des sédiments. Quant à l'ampleur de ces phénomènes, elle n'est également qu'une estimation.

5.3.2 Sensibilité à la turbidité de l'eau

La zone d'étude de Cap-aux-Meules possède des eaux généralement limpides selon l'évaluation visuelle faite sur les différentes images analysées. Ainsi, peu de sédiments se trouvent en suspension dans la colonne d'eau. Il n'en demeure pas moins qu'il peut arriver que les eaux deviennent turbides. La présence d'une turbidité élevée peut réduire la portée de la méthode. En effet, les particules en suspension empêchent la lumière d'atteindre le fond marin en l'absorbant et en la réfléchissant (Casal et al., 2019; Chybicki, 2017). Ceci réduit la profondeur potentielle d'étude, donc limite les zones marine pouvant être couvertes. Dans un scénario où la méthodologie serait utilisée dans un autre milieu côtier avec une forte turbidité, la détection de changements de bathymétrie serait moins appropriée, voire impossible (Gao, 2009).

5.3.3 Présence de couverture nuageuse

Dans cette étude, l'imagerie optique est utilisée pour obtenir des informations au niveau de la surface de l'eau. Or, en raison de la nature de ce type d'imagerie utilisé, la présence d'une couverture nuageuse empêche de capter la réflectance provenant de la surface de l'eau puisque les nuages interceptent la lumière. Il devient primordial que les images soient le plus possible exemptes de nuages (Casal et al., 2019). Bien qu'un filtre ait initialement été appliqué pour retirer toutes scènes ayant plus de 10 % de couverture nuageuse, certains nuages étaient encore visibles sur certaines images. Dans le cas de cette étude, les nuages résiduels ne couvraient pas une majeure partie des zones d'intérêt. Ainsi, l'ensemble des images a été conservé pour éviter de perdre de l'information temporelle. Toutefois, cela impose le masquage de ses nuages et de leurs ombrages puisqu'ils peuvent induire des erreurs dans les résultats.

La scène de classification produite lors de la correction atmosphérique par l'extension Sen2Cor de l'application SNAP a été utilisée pour le masquage de ces éléments. L'algorithme de classification utilisé par cette extension n'est pas parfait et des erreurs sont présentes. Certaines zones nuageuses et d'ombrages ne sont pas totalement correctement classifiées. Puisque cette classification sert de référence pour masquer les nuages et les ombrages, les erreurs de classification ont probablement induit certaines valeurs extrêmes dans le calcul des indices de profondeur. En revanche, en raison de l'utilisation d'une série

temporelle pour l'analyse des changements de profondeur, l'impact des valeurs extrêmes est atténué et celles-ci peuvent être considérées comme une source de bruit.

Dans une optique où l'extension Sen2Cor ne serait pas utilisée, il serait nécessaire que les images aient préalablement un minimum de présence de nuages. Dans un tel cas, Traganos et al. (2018) propose plutôt d'uniquement utiliser la bande QA60 qui contient les pixels de nuages pour le masquage. Cependant, il est courant que cette bande sous-estime grandement la présence de couverture nuageuse.

Une autre alternative impliquerait l'utilisation l'intelligence artificielle par l'utilisation de réseau de neurones. La détection de nuage automatisée permettrait assurément d'identifier avec plus de justesse les nuages et pourrait potentiellement améliorer les analyses de séries temporelles.

5.3.4 Rugosité de la surface de l'eau

La surface de l'eau est susceptible d'avoir des vagues lorsque le vent est suffisamment fort. La présence de vagues à la surface de l'eau augmente sa rugosité et peut causer des reflets de soleil (*sun glint*). Dans le cadre de cette étude, les reflets de soleil à la surface de l'eau n'ont pas été retirés. Certaines images possèdent des effets de reflet solaire ce qui rend ces pixels inutilisables pour extraire de l'information sur la profondeur. Ceci a probablement causé des divergences dans les calculs de l'indice de profondeur. L'ajout d'une méthode de correction des *sun glint*, comme proposé dans Hedley et al. (2005) pourrait améliorer la détection de changements en augmentant le nombre de pixels contenant de l'information utilisable.

5.3.5 Délimitation des milieux

La délimitation des milieux est un aspect important de la détection de changements de la bathymétrie. Cette étape, qui a préalablement été faite manuellement, délimite les zones terrestres, aquatiques contenant des algues et maritimes. Pour un secteur d'une petite superficie, cette étape ne nécessite pas trop de temps de photo-interprétation. Toutefois, dans une optique d'élargir le territoire étudié, cette méthode de délimitation devient très chronophage. Ainsi, il deviendrait indispensable de surmonter cette limite en développant une méthode pour discerner les différents milieux. Il serait possible d'intégrer au processus une méthode de classification d'images ou d'utilisation d'indices spectraux impliquant le

proche infrarouge (sépare bien l'eau et le sol et est sensibles aux algues) pour automatiquement identifier les milieux terrestres, aquatiques contenant des algues et maritimes comme le propose Traganos et al. (2018).

6 Conclusion

Le présent projet a pour but de détecter les changements bathymétriques de manière automatique dans le secteur de Cap-aux-Meules aux Îles-de-la-Madeleine au Québec (Canada). Ce projet, initié par l'Agence spatiale canadienne et Pêches et Océans Canada, en partenariat avec la firme Effigis Géo-Solutions, s'insère dans un projet de plus grande envergure qui vise à développer une méthode pour la détection de changement de bathymétrie sur l'ensemble des côtes canadiennes. Ce projet a vu le jour en raison de la nécessité de faire un suivi continu des changements de bathymétrie sur le littoral canadien pour assurer une navigation sécuritaire et d'être en mesure de localiser les secteurs nécessitant des interventions de dragage.

Cette étude a démontré la pertinence de l'utilisation de la méthode de détection de changements bathymétrique à l'aide de la technique des pentes temporelles. De plus, le développement d'un script pour l'automatisation des traitements permet de simplifier et de réduire au maximum l'intervention humaine pour obtenir les résultats. Cet aspect rend le concept particulièrement intéressant pour l'étendre à une plus grande échelle. De plus, la manipulation de l'outil est simple et accessible pour toutes personnes avec des connaissances de base en géomatique.

Du côté de la performance du processus, certaines améliorations peuvent être suggérées. L'automatisation du processus de détection de changements de bathymétrie présente elle-même certaines limites/contraintes. L'acquisition de l'imagerie nécessite une grande capacité de mémoire puisque les images sont téléchargées sur le disque dur de l'ordinateur utilisé. Cette contrainte d'espace disque peut rapidement devenir contraignante dans le cas d'une grande zone d'étude. De plus, le temps que nécessite le téléchargement des images pourrait s'avérer un obstacle important dans les cas d'une zone d'étude beaucoup plus étendue à celle de ce projet. Une solution serait d'utiliser les images Sentinel-2 (L1C) disponible sur la plateforme d'imagerie satellitaire et de donnée géospatiales Google Earth Engine et de procéder aux divers traitements sur leurs serveurs infonuagiques. Toutefois, une des

limitations concernant cette plateforme est la faible disponibilité des images avec la correction atmosphérique (L2A). L'utilisation d'un outil externe comme *i.atcorr* utilisant l'algorithme 6S offert par GRASS GIS. En raison de la simplicité de cet outil, son accessibilité (logiciel libre et *open source*) et l'allègement considérable des ressources informatiques, cet outil serait à privilégier pour un futur projet similaire.

La méthode par les pentes temporelles s'avère relativement simple d'utilisation et pourrait être utilisée à plus grande échelle. D'autres techniques ont été testées et éprouvées par une équipe d'Effigis Géo-Solutions dont celles de l'analyse par ondelettes et la régression d'un réseau neuronal convolutionnel (CNN) (Effigis Géo-Solutions inc., 2019b). La première méthode qui utilise une technique plus avancée de traitement de signal a démontré une bonne efficacité. L'approche par CNN, quant à elle, a plutôt été utilisée pour produire une bathymétrie robuste face aux différentes sources de bruits environnementales (*vagues, sun glint, marées, etc.*). Pour finir, la technique des pentes temporelle pourrait être appliquée sur les bathymétries issues du CNN. En bref, l'ensemble de ces solutions pourraient très bien être intégrées dans une chaîne de traitement automatisé pour développer un outil fonctionnel dans un contexte opérationnel.

7 Bibliographie

- Association of Canadian Port Authorities. (2017). *Industry Information—Canadian Port Industry*. <http://www.acpa-ports.net/industry/industry.html>
- Atkinson, D. E., Forbes, D. L., & James, T. S. (2016). Un littoral dynamique dans un contexte de climat en mutation. In *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat* (Gouvernement du Canada, p. 27-68).
https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/assess/2016/Coastal_Assessment_Chapitre2_Littoral_dynamique.pdf
- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2019). *Sommaire statistique des évènements de transport maritime en 2018*.
- Caballero, I., & Stumpf, R. P. (2019). Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 226, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106277>
- Cahalane, C., Magee, A., Monteys, X., Casal, G., Hanafin, J., & Harris, P. (2019). A comparison of Landsat 8, RapidEye and Pleiades products for improving empirical predictions of satellite-derived bathymetry. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111414. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111414>
- Casal, G., Monteys, X., Hedley, J., Harris, P., Cahalane, C., & McCarthy, T. (2019). Assessment of empirical algorithms for bathymetry extraction using Sentinel-2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 40(8), 2855-2879.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1533660>
- Chénier, R., Abado, L., & Martin, H. (2018). CHS Priority Planning Tool (CPPT)—A GIS Model for Defining Hydrographic Survey and Charting Priorities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/ijgi7070240>
- Chybicki, A. (2017). Mapping South Baltic Near-Shore Bathymetry Using Sentinel-2 Observations. *Polish Maritime Research*, 24(3). <https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0086>
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Lambin, E. (2004). Digital Change Detection Methods in Ecosystem Monitoring : A Review. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 1565-1596. <https://doi.org/10.1080/0143116031000101675>
- Corporation de Gestion de la Voie Maritime du Saint-Laurent. (2020). *L'histoire de la Voie maritime*. <http://www.greatlakes-seaway.com/fr/voie-maritime/seaway60/index.html>
- Direction générale des océans. (2009). *Le rôle du gouvernement canadien dans le secteur des océans*. <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/337910.pdf>
- Effigis Géo-Solutions inc. (2019a). *Cartographie et suivi satellitaires des hauts-fonds par intelligence artificielle—Rapport de mi-projet*.
- Effigis Géo-Solutions inc. (2019b). *Cartographie et suivi satellitaires des hauts-fonds par intelligence artificielle—Rapport final (Phase 1)*.
- ESA. (2020a). *Copernicus Open Access Hub*. Disponible à :
<https://scihub.copernicus.eu/userguide/WebHome> (consulté le 27 mai 2020)

- ESA. (2020b). *Sentinel-2 MSI - Level-2 Processing*. Disponible à: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2> (consulté le 27 mai 2020)
- Evagorou, E., Mettas, C., Agapiou, A., Themistocleous, K., & Hadjimitsis, D. (2019). Bathymetric maps from multi-temporal analysis of Sentinel-2 data : The case study of Limassol, Cyprus. *Advanced Geosciences*, 45, 397-407. <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-397-2019>
- Favoretto, F., Morel, Y., Waddington, A., Lopez-Calderon, J., Cadena-Roa, M., & Blanco-Jarvio, A. (2017). Testing of the 4SM Method in the Gulf of California Suggests Field Data Are not Needed to Derive Satellite Bathymetry. *Sensors*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/s17102248>
- Gao, J. (2009). Bathymetric mapping by means of remote sensing : Methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography*, 33(1), 103-116. <https://doi.org/10.1177/0309133309105657>
- Garde côtière canadienne. (2019). *Programme de gestion des voies navigables*. Disponible à: <https://www.ccg-gcc.gc.ca/navigation/waterways-voies-navigables/program-info-programme-fra.html> (consulté le 14 janvier 2020)
- Guenther, G., Cunningham, A., LaRocque, P., & Reid, D. (2000). Meeting the accuracy challenge in airborne Lidar bathymetry. *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, 1*.
- Hedley, J. D., Harborne, A. R., & Mumby, P. J. (2005). Technical note : Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10), 2107-2112. <https://doi.org/10.1080/01431160500034086>
- High Seas Maritime Agency Ltd. (2020). *Cap aux Meules*. Disponible à: <http://www.hsmaritime.com/fr/ports/cap-aux-meules/> (consulté le 19 juillet 2020)
- Kokaly, R. F., Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C., Wise, R. A., Benzel, W. M., Lowers, H. A., Driscoll, R. L., & Klein, A. J. (2017). *USGS Spectral Library Version 7* (Report N° 1035; Data Series, p. 68). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/ds1035>
- L-3 Communications SeaBeam Instruments. (2000). *Multibeam Sonar – Theory of Operation*. Disponible à: <https://www3.mbari.org/data/mbsystem/sonarfunction/SeaBeamMultibeamTheoryOperation.pdf> (consulté le 18 janvier 2020)
- Lyzenga, D. R., Malinas, N. P., & Tanis, F. J. (2006). Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8), 2251-2259. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872909>
- Martínez, B., & Gilabert, M. A. (2009). Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. *Remote Sensing of Environment*, 113(9), 1823-1842. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.04.016>
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. (2006). *Portrait territorial—Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine*. Disponible à: <https://mern.gouv.qc.ca/documents/territoire/portrait-gaspesie.pdf> (consulté le 26 mai 2020)

- Monteys, X., Harris, P., Caloca, S., & Cahalane, C. (2015). Spatial Prediction of Coastal Bathymetry Based on Multispectral Satellite Imagery and Multibeam Data. *Remote Sensing*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/rs71013782>
- Municipalité des Île de la Madeleine. (2020). *Portrait des Îles-de-la-Madeleine*. Disponible à: <https://www.ilesdelamadeleine.com/portrait-des-iles-de-la-madeleine/> (consulté le 25 mai 2020)
- Pacheco, A., Horta, J., Loureiro, C., & Ferreira, Ó. (2015). Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images : A tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, 159, 102-116. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.004>
- Pêches et Océans Canada. (2019, octobre 3). À propos du Service hydrographique du Canada. Disponible: <http://www.charts.gc.ca/help-aide/about-apropos/index-fra.html> (consulté le 25 janvier 2020)
- Pêches et Océans Canada. (2020a). *Acquisition de données hydrographiques*. Disponible à: <https://www.dfo-mpo.gc.ca/science/hydrography-hydrographie/data-acquisition-fra.html>
- Pêches et Océans Canada. (2020b). *Données d'inventaire de la station—Station 1970*. <http://www.isdm-gdsi.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/inventory-inventaire/sd-ds-fra.asp?user=isdm-gdsi®ion=PAC&tst=1&no=1970&ref=maps-cartes> (consulté le 13 juillet 2020)
- Philpot, W. D. (1989). Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. *Applied Optics*, 28(8), 1569–1578. <https://doi.org/10.1364/AO.28.001569>
- Rioux, C., Roussel, D., Eisenberg, A., Kleiser, M., & Lévesque, M.-C. (2008). *Évaluation économique des risques associés à l'érosion des zones côtières et aux méthodes d'adaptation dans le golfe du Saint-Laurent : Secteurs de Sept-îles, Percé et des Îles-de-la-Madeleine* (p. 44) [Rapport de recherche]. Gestion des ressources maritimes, Département des sciences de la gestion, Université du Québec à Rimouski. Disponible à: <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportRioux2008.pdf> (consulté le 1^{er} novembre 2019)
- Statistique Canada. (2016, octobre 7). *Géographie*. Disponible à: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/11-402-x/2012000/chap/geo/geo-fra.htm> (consulté le 29 novembre 2019)
- Stumpf, R. P., Holderied, K., & Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48(1part2), 547-556. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547
- Tourisme Îles-de-la-Madeleine. (2020). *Île du Cap aux Meules*. Disponible à: <https://www.tourismeilesdelamadeleine.com/fr/decouvrir-les-iles/les-iles/ile-du-cap-aux-meules/#carte> (consulté le 13 juillet 2020)
- Traganos, D., Poursanidis, D., Aggarwal, B., Chrysoulakis, N., & Reinartz, P. (2018). Estimating Satellite-Derived Bathymetry (SDB) with the Google Earth Engine and Sentinel-2. *Remote Sensing*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/rs10060859>
- Traganos, D., & Reinartz, P. (2018). Interannual Change Detection of Mediterranean Seagrasses Using RapidEye Image Time Series. *Frontiers in Plant Science*, 9, 96. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00096>

- Transport Canada. (2017). *Navigation on the St.Lawrence Echo of the Past, Path to the Future*. Disponible à:
http://planstlaurent.qc.ca/fileadmin/site_documents/documents/Usages/Navigation_St-LaurentANG.pdf (consulté le 15 janvier 2020)
- Transport Canada. (2018). *Transportation in Canada 2018*. Disponible à:
<https://www.tc.gc.ca/eng/policy/transportation-canada-2018.html> (consulté le 13 janvier 2020)
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, *114*(1), 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014>
- Wang, C.-K., & Philpot, W. D. (2007). Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, *106*(1), 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.003>
- Yunus, P. A., Dou, J., Song, X., & Avtar, R. (2019). Improved Bathymetric Mapping of Coastal and Lake Environments Using Sentinel-2 and Landsat-8 Images. *Sensors*, *19*(12). <https://doi.org/10.3390/s19122788>

Annexe

Document 1 Liste des images Sentinel-2 utilisées.

Image 1 20180615
Image 2 20180630
Image 3 20180703
Image 4 20180720
Image 5 20180725
Image 6 20180730
Image 7 20180812
Image 8 20180817
Image 9 20180819
Image 10 20180824
Image 11 20180829
Image 12 20180913
Image 13 20180916
Image 14 20180923
Image 15 20181001
Image 16 20181006
Image 17 20181021
Image 18 20190608
Image 19 20190610
Image 20 20190613
Image 21 20190618
Image 22 20190625
Image 23 20190705
Image 24 20190708
Image 25 20190710
Image 26 20190718
Image 27 20190720
Image 28 20190728
Image 29 20190802
Image 30 20190804
Image 31 20190814
Image 32 20190901
Image 33 20190906
Image 34 20190913
Image 35 20190921
Image 36 20191003
Image 37 20191006

Document 2 Script Python permettant de réaliser l'analyse de séries temporelle des images Sentinel-2.

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
@title: Script pour la détection des changements de la bathymétrie des zones
côtières par analyse des séries temporelles d'imagerie satellitaires.
@author: Guillaume Leclerc
"""

import os
import ee
import gdal, ogr, osr
import json
import datetime
import numpy as np
from scipy.ndimage import gaussian_filter
from scipy.signal import wiener
from scipy import stats
import requests
import matplotlib.pyplot as plt
from xml.dom import minidom
import timeit
import zipfile
import sys

# Contient la géométrie de la zone d'étude
geomLayer = []

# Liste contenant les matrices numpy des images S2
array_s2_clip = {}

# Compteur pour identifier des scènes différentes prises au même moment pour les fusionner
name_img_dict = {}

# Contient le nom des images à fusionner à l'aide de gdal_merge.
img_to_merge = {}

def readStudyArea(inputFeature):
    """
    """

    fn = r'%s' % (inputFeature)
    ds = ogr.Open(fn,0)

    lyr = ds.GetLayer()

    for feature in lyr:
        geom = feature.GetGeometryRef()
        geomLayer.append(geom)

    return lyr

def getProjection(layer):
    """
    """

    inProj = layer.GetSpatialRef()

    # Détecter le code EPSG/SRID
    srid = inProj.GetAuthorityCode(None)

    return int(srid)

def reprojeter(geom, inProj, outProj):
    """
    """
    inSpatialRef = osr.SpatialReference()
    inSpatialRef.ImportFromEPSG(inProj)

    # Output SpatialReference
    outSpatialRef = osr.SpatialReference()
    outSpatialRef.ImportFromEPSG(outProj)

    # Calculer la transformation entre les deux systèmes de coordonnées
    transform = osr.CoordinateTransformation(inSpatialRef, outSpatialRef)

    for i in geom:

        # Reprojection de la géométrie
        poly = ogr.CreateGeometryFromWkt(str(i))

```

```

        poly.Transform(transform)

        wkt = poly.ExportToWkt()

        return wkt

def getStudyAreaCoordinates(geom):
    """
    """

    wkt = ogr.CreateGeometryFromWkt(str(geom))

    geojson = wkt.ExportToJson()

    x = json.loads(geojson)

    return x["coordinates"]

def getLatLongImg(img):
    """
    Exporter la latitude, la longitude et la valeur du pixel prêt à être introduite dans une matrice NumPy.
    """

    img = img.addBands(ee.Image.pixelLonLat())

    img = img.reduceRegion(reducer=ee.Reducer.toList(),\
                           geometry=area,\
                           maxPixels=1e13,\
                           scale=15);

    data = np.array((ee.Array(img.get("result")).getInfo()))
    lats = np.array((ee.Array(img.get("latitude")).getInfo()))
    lons = np.array((ee.Array(img.get("longitude")).getInfo()))

    return lats, lons, data

def imgToArray(img, capteur, zoneEtude):
    """
    Converti la latitude, longitude et la valeur du pixel dans une matrice Numpy.
    Les variables proviennent de la fonction 'getLatLongImg(img)'.
    """

    latlon = ee.Image.pixelLonLat().addBands(img)

    latlon_new = latlon.reduceRegion(
        reducer=ee.Reducer.toList(),
        geometry=zoneEtude,
        maxPixels=1e10,
        scale=15)

    if capteur=='L8':

        B = np.array((ee.Array(latlon_new.get("B2")).getInfo()))
        G = np.array((ee.Array(latlon_new.get("B3")).getInfo()))
        R = np.array((ee.Array(latlon_new.get("B4")).getInfo()))
        N = np.array((ee.Array(latlon_new.get("B5")).getInfo()))
        S1 = np.array((ee.Array(latlon_new.get("B6")).getInfo()))
        S2 = np.array((ee.Array(latlon_new.get("B7")).getInfo()))

        lats = np.array((ee.Array(latlon_new.get("latitude")).getInfo()))
        lons = np.array((ee.Array(latlon_new.get("longitude")).getInfo()))

        # print(B.shape,G.shape,R.shape,lats.shape,lons.shape)
        # print(B.dtype.name,G.dtype.name,R.dtype.name,N.dtype.name,lats.dtype.name,lons.dtype.name)

        img_np = np.stack((R,G,B,N,S1,S2))

        uniqueLats = np.unique(lats)
        uniqueLons = np.unique(lons)

        ncols = len(uniqueLons)
        nrows = len(uniqueLats)

        ys = uniqueLats[1] - uniqueLats[0]
        xs = uniqueLons[1] - uniqueLons[0]

        arr = np.zeros([nrows, ncols, len(img_np)], np.float32)

```

```

    for z in range(0, len(arr[0][0]), 1):
        counter = 0
        for y in range(0, len(arr), 1):
            for x in range(0, len(arr[0]), 1):
                if lats[counter] == uniqueLats[y] and lons[counter] == uniqueLons[x] and counter < len(lats)-1:
                    counter += 1
                    arr[len(uniqueLats)-1-y, x, z] = img_np[z, counter]
    return arr

if capteur == 'S2':

    B = np.array((ee.Array(latlon_new.get("B2")).getInfo()))
    G = np.array((ee.Array(latlon_new.get("B3")).getInfo()))
    N = np.array((ee.Array(latlon_new.get("B8")).getInfo()))

    lats = np.array((ee.Array(latlon_new.get("latitude")).getInfo()))
    lons = np.array((ee.Array(latlon_new.get("longitude")).getInfo()))

    # print(B.shape, G.shape, N.shape, lats.shape, lons.shape)
    # print(B.dtype.name, G.dtype.name, N.dtype.name, lats.dtype.name, lons.dtype.name)

    img_np = np.vstack((B, G, N))

    uniqueLats = np.unique(lats)
    uniqueLons = np.unique(lons)

    ncols = len(uniqueLons)
    nrows = len(uniqueLats)

    ys = uniqueLats[1] - uniqueLats[0]
    xs = uniqueLons[1] - uniqueLons[0]

    arr = np.zeros([nrows, ncols, len(img_np)], np.float32)

    for z in range(0, len(arr[0][0]), 1):
        counter = 0
        for y in range(0, len(arr), 1):
            for x in range(0, len(arr[0]), 1):
                if lats[counter] == uniqueLats[y] and lons[counter] == uniqueLons[x] and counter < len(lats)-1:
                    counter += 1
                    arr[len(uniqueLats)-1-y, x, z] = img_np[z, counter]
    return arr, uniqueLats, uniqueLons, ys, xs, ncols, nrows

def array2img(array, uniqueLats, uniqueLons, pixelWidth, pixelHeight, ncols, nrows, img_name, bands):
    '''
    ...
    # Appliquer le geotransform
    # SetGeoTransform((originX, pixelWidth, 0, originY, 0, pixelHeight))
    transform = (np.min(uniqueLons), pixelWidth, 0, np.max(uniqueLats), 0, -pixelHeight)

    # set the coordinate system
    target = osr.SpatialReference()
    target.ImportFromEPSG(4326)

    # set driver
    driver = gdal.GetDriverByName('GTIFF')

    count = -1

    for b in range(array.shape[2]):

        count += 1

        outputDataset = driver.Create("%s%s.tif" % (img_name, bands[count]), ncols, nrows, 1, gdal.GDT_Float32)
        outputDataset.SetGeoTransform(transform)
        outband = outputDataset.GetRasterBand(1)
        outband.WriteArray(array[:, :, b])
        outputDataset.SetProjection(target.ExportToWkt())

        # Read in the band's data into the third dimension of our array
        # outputDataset.WriteArray(b)

        # outband = outputDataset.GetRasterBand(b + 1)
        # outputDataset.SetNoDataValue(-9999)

        print("Image %s saved" % ("%s%s.tif" % (img_name, bands[count])))

```

```

outband.FlushCache()

outputDataset = None

def download_S2(imgName,filepath,username,password):
    """
    Fonction permettant d'extraire le ID des images S2 à télécharger' et d'extraire la localisation des
    évènements se produisant sur un territoire donné.

    imgName: Nom de l'image Sentinel 2. ex.: 'S1A_IW_SLC__1SDV_20141101T165548_20141101T165616_003091_0038AA_558F'.
    username: Nom d'utilisateur pour se connecter à Scihub (serveur contenant les images S2.
    password: Mot de passe pour se connecter à Scihub

    """

    server = "https://scihub.copernicus.eu/apihub/odata/v1/Products"

    imgQuery = "?$filter=Name+eq+'%s'" % imgName

    response = requests.get(server+imgQuery,auth=(username,password))

    # Lecture et parser la réponse du serveur
    xmlFile = minidom.parseString(response.text)

    # Chercher les noeuds ENTRY
    for node in xmlFile.getElementsByTagName('entry'):

        for i in node.getElementsByTagName('d:Id'):
            id = i.firstChild.nodeValue

            for d in node.getElementsByTagName('d:Online'):

                status = d.firstChild.nodeValue

                if status == 'false':

                    # Création du nom de la requête à envoyer aux serveurs. La requête permet
                    # de télécharger les images
                    dwnQuery = "(('%s')/$value" % id
                    dwn_url = server+dwnQuery

                    r = requests.get(dwn_url,auth=(username,password), stream=True)
                    print('Réponse du serveur :',r)
                    r.close()

                    return status

            else:
                # Chercher les noeuds d:ID dans ENTRY
                for i in node.getElementsByTagName('d:Id'):
                    # Récupérer le texte
                    id = i.firstChild.nodeValue

                    # Création du nom de la requête à envoyer aux serveurs. La requête permet
                    # de télécharger les images
                    dwnQuery = "(('%s')/$value" % id
                    dwn_url = server+dwnQuery

                    print('URL de téléchargement :', dwn_url)

                    # Création du nom du fichier à télécharger
                    fileName = r"%s\\%s.zip" % (filepath,imgName)

                    with open(fileName, "wb") as file:

                        r = requests.get(dwn_url,auth=(username,password), stream=True)
                        file.write(r.content)
                        file.flush()
                        os.fsync(file.fileno())

                        r.close()

                    return status

    response.close()

```

```

def atmCorrS2(locSen2Cor,locFileName,outfilepath,param,bands):
    '''
    Fonction utilisant le plugin Sen2Cor intégré dans SNAP. Dans ce cas-ci,
    Sen2Cor est utilisé à partir de son fichier .bat.

    La fonction convertie les images S2 de L1C (TOA) vers L2A (BOA).

    locSen2Cor: Chemin d'accès vers l'exécutable de Sen2Cor.
    locFileName: Chemin d'accès vers le répertoire contenant le fichier .SAFE.
    outfilepath: Chemin d'accès pour les images L2A géoréférencées. Ces images
    ...                seront celles qui seront utilisées pour de futures analyses.
    ...
    file = os.listdir(locFileName)

    count = 0

    img_10m = ['B02','B03','B04','B08','TCI','WVP']
    img_20m = ['B05','B06','B07','B8A','B11','B12','SCL']

    for f in file:
        if "L1C" in f and f.endswith('.SAFE'):
            count += 1

            print("Correction atmosphérique avec Sen2Cor")
            print("\nCorrection atmosphérique de l'image %d\n" % (count))

            # Identification du lecteur à utiliser
            lecteur = locFileName[:2]

            # Identification du chemin d'accès au dossier contenant le fichier .SAFE
            filePath = locFileName[3:]

            # Activation de la console CMD pour lancer Sen2Cor
            os.system('cmd /k "cd \& %s & cd %s & %s --GIP_L2A %s --tif %s & exit"' %
(lacteur,filePath,locSen2Cor,param,f))

            granule = lecteur+'\\'+filePath+'\\'+f+'\\'+ 'GRANULE'
            granule_dir = os.listdir(granule)

            imgFile = granule+'\\'+granule_dir[0]+'\\'+ 'IMG_DATA'
            imgFile_dir = os.listdir(imgFile)
            imgFilePath = imgFile+'\\'+imgFile_dir[1]
            proj,geotransform = getRasterProj(imgFilePath)

            product_date = f[11:26]

            file2 = os.listdir(locFileName)

            for f2 in file2:
                if "L2A" in f2 and product_date in f2 and f2.endswith('.SAFE'):
                    granule2 = lecteur+'\\'+filePath+'\\'+f2+'\\'+ 'GRANULE'
                    granule_dir2 = os.listdir(granule2)
                    imgFile_10m = granule2+'\\'+granule_dir2[0]+'\\'+ 'IMG_DATA'+ '\\'+ 'R10m'
                    imgFile_dir_10m = os.listdir(imgFile_10m)
                    imgFile_20m = granule2+'\\'+granule_dir2[0]+'\\'+ 'IMG_DATA'+ '\\'+ 'R20m'
                    imgFile_dir_20m = os.listdir(imgFile_20m)

                    for b in bands:
                        if b in img_10m:

```

```

        for i in imgFile_dir_10m:
            if b in i and i.endswith('.tif'):
                xsize,ysize,geotransform2,proj2,array = readRaster(imgFile_10m+'\\'+i)
                writeRaster(outfilepath+'\\'+i,geotransform,proj,array,0)
    if b in img_20m:
        for i in imgFile_dir_20m:
            if b in i and i.endswith('.tif'):
                xsize,ysize,geotransform2,proj2,array = readRaster(imgFile_20m+'\\'+i)

                # Créer un geotransform adapté aux images de résolution de 20 m
                geotransform_20m = (geotransform[0], 20, 0.0, geotransform[3], 0.0, -20)
                writeRaster(outfilepath+'\\'+i,geotransform_20m,proj,array,0)

print('Correction atmosphérique terminée')

def unzip(filePath):
    """
    Fonction pour décompresser un fichier .zip.
    """
    file = os.listdir(r"%s" %filePath)

    for f in file:
        if f.endswith('.zip'):
            path = filePath+'\\'+f
            print('Extraction du fichier %s en cours' %path)
            with zipfile.ZipFile("%s" % path,"r") as unzip:
                unzip.extractall(filePath)

            print('Extraction du fichier %s terminé' %path)

def export2json(data, filename, filepath):
    """
    Fonction permettant d'exporter une liste, dictionnaire, etc. en fichier .json.

    data: liste ou dictionnaire à exporter
    filename: nom du fichier .json
    filepath: chemin d'accès ou sera enregistré le fichier .json
    """

    import json

    with open("%s/%s.json" % (filepath,filename), 'w') as f:
        json.dump(data, f, indent=2)

def importJson(filepath):
    """
    Fonction permettant d'importer un fichier .json contenant une liste ou un dictionnaire

    filepath: chemin d'accès vers le fichier .json
    """

    with open(r"%s" % filepath, 'r') as f:
        data = json.load(f)

    return data

def getRasterProj(filename):
    """
    Fonction permettant d'obtenir la projection d'une image, ainsi que le GeoTransform.

    filename: chemin d'accès pour l'image.
    """

    raster = gdal.Open(filename)
    geotransform = raster.GetGeoTransform()
    proj = raster.GetProjection()

    print('Extraction de la projection de l\'image %s' % filename)

```

```

    return proj,geotransform
def getNodata(filename, band):
    '''
    Fonction permettant d'obtenir les valeurs de pixels NoData.
    '''
    raster = gdal.Open(filename)
    band = raster.GetRasterBand(band)

    return band.GetNoDataValue()
def readRaster(filename,*band):
    '''
    Fonction pour lire un raster. En sortie, les dimensions en X et Y, le
    geotransform, la projection et la matrice de l'image sont produits.

    Il est possible d'extraire l'ensemble des bandes du raster ou seulement les
    bandes désirées. L'argument *band est activé uniquement lorsqu'il est déclaré,
    donc est facultatif.

    filename: chemin vers le raster
    *band: Argument facultatif. Il est activé uniquement lorsqu'il est déclaré.
           ex. d'utilisation de *band -> band = [1,2,3,...]
    '''

    print('Lecture de l\'image %s' % filename)

    raster = gdal.Open(filename)
    geotransform = raster.GetGeoTransform()
    proj = raster.GetProjection()

    xsize = raster.RasterXSize
    ysize = raster.RasterYSize

    # Si une ou des bandes particulières sont fournies celles-ci seront extraites.
    if band:
        array = np.empty([len(band[0]),ysize,xsize])

        count = -1

        for i in band[0]:

            count += 1

            b = raster.GetRasterBand(i)
            a = b.ReadAsArray()

            array[count,:,:] = a

    else:
        array = raster.ReadAsArray()

    return xsize,ysize,geotransform,proj,array
def writeRaster(outfilename,geotransform,projection,array,noData):
    '''
    Fonction permettant d'écrire une matrice 2D ou 3D sous forme de raster.

    outfilename: Chemin d'accès pour enregistrer l'image en sortie
    geotransform: Geotransform contenant les informations de l'origine de l'image et de la résolution
    projection: projection en sortie
    array: matrice contenant l'image
    noData: valeur désirée des pixels sans valeur
    '''

    array[np.isnan(array)] = noData

    format = "GTiff"
    driver = gdal.GetDriverByName(format)

    dtype = gdal.GDT_Float32

    try:
        band,x,y = array.shape

        dst_ds = driver.Create(outfilename,y,x,band,dtype)

```

```

dst_ds.SetGeoTransform(geotransform)
dst_ds.SetProjection(projection)

for i,image in enumerate(array,1):
    dst_ds.GetRasterBand(i).WriteArray(image)
    dst_ds.GetRasterBand(i).SetNoDataValue(noData)

except:
    x,y = array.shape

    dst_ds = driver.Create(outfilename,y,x,1,dtype)

    dst_ds.SetGeoTransform(geotransform)
    dst_ds.SetProjection(projection)

    dst_ds.GetRasterBand(1).WriteArray(array)
    dst_ds.GetRasterBand(1).SetNoDataValue(noData)

dst_ds.FlushCache()
dst_ds = None
array = None

print('Exportation de \'image avec projection terminée')

def depth(b,g):
    """
    b: Array représentant une bande bleue
    g: Array représentant une bande verte
    """
    b = b.astype(np.float32)
    g = g.astype(np.float32)

    d = np.log(b)/np.log(g)

    return np.array(d)

def decimalYear(jour,mois,annee):
    """
    Fonction pour convertir les dates en années décimales.

    jour: jour en entrée
    mois: mois en entrée
    annee: année en entrée
    """
    year = int(annee)
    month = int(mois)
    day = int(jour)

    # Cette condition vérifie si l'année est bissextile. Ces conditions doivent
    # être rencontrées pour être une année bissextile.
    if (year % 4) == 0 and (year % 100) != 0 or (year % 400) == 0:

        dyear = (1/366) * julianDay(day,month,year) + year

        return dyear

    else:
        dyear = (1/365) * julianDay(day,month,year) + year

        return dyear

def julianDay(jour,mois,annee):
    """
    Conversion des dates en jours Juliens.

    jour: jour en entrée
    mois: mois en entrée

```

```

annee: année en entrée
...

# Liste du nombre de jours dans les mois
m1 = [31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31]

# Liste du nombre de jours dans les mois des années bissextiles.
m2 = [31,29,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31]

year = int(annee)
month = int(mois)
day = int(jour)

# Cette condition vérifie si l'année est bissextile. Ces conditions doivent
# être rencontrées pour être une année bissextile.
if (year % 4) == 0 and (year % 100) != 0 or (year % 400) == 0:

    jd = day + sum(m2[0:month-1])

    return jd

else:

    jd = day + sum(m1[0:month-1])

    return jd

#####
##### Section paramètres #####
#####

# Localisation du fichier de formes contenant la zone d'étude
inputFeature = r"path"

# Localisation de la carte bathymétrique
bathymetrie = r"path"

classes_sol = r"path"

# Chemin vers le fichier recevant les images téléchargées
filePath = r"path"

# Chemin vers le fichier contenant les images S2 corrigées (L2A)
locL2AFile = r"path"

# Chemin vers le fichier contenant les images S2 corrigées et clippées à la ZE.
locL2AClip = r"path"

# Pourcentage du couvert nuageux à appliquer pour le filtrage des images
cloudPerc = 10

# Mois de début et de fin à prendre en compte pour l'étude.
startMonth = 6
endMonth = 10

# Bandes spectrale des images Sentinel-2 à utiliser dans l'analyse.
bands = ['B02','B03','B04','B08','SCL']

# Valeur de noData à attribuer aux rasters.
noData = -9999

# Information pour la connection au serveur de Copernicus pour le téléchargement des images.
username = 'username'
password = 'password'

# Localisation de l'exécutable de Sen2Cor
sen2cor = r"C:\Users\User\.snap\auxdata\Sen2Cor-02.08.00-win64\L2A_Process.bat"

# Localisation du fichier des paramètres pour la correction atmosphérique de sen2cor.
atmcorr_param = r"path"

```

```

#####
##### Commandes pour exécuter le code #####
#####

tic = timeit.default_timer()

# Enregistrer les noms des images 'offline' lors du téléchargement pour y
# accéder lorsqu'elles seront mises en ligne
imgOffline = []

# Fait la lecture du fichier de forme et l'ouvre
fn = r'%s' % (inputFeature)
ds = ogr.Open(fn,0)

# Accède à la couche
lyr = ds.GetLayer()

# Exporte la géométrie de la couche vers la liste geomLayer
for feature in lyr:
    geom = feature.GetGeometryRef()
    wkt = geom.ExportToWkt()
    extent = geom.GetEnvelope()
    geomLayer.append(wkt)

# Active la couche pour obtenir le SRID de la couche
proj = getProjection(lyr)

if proj != 4326:
    wkt = reprojeter(geomLayer, proj,4326)

    # Convertie la géométrie WKT vers GeoJSON pour être compatible avec EarthEngine
    coord = getStudyAreaCoordinates(wkt)

else:
    # Convertie la géométrie WKT vers GeoJSON pour être compatible avec EarthEngine
    coord = [getStudyAreaCoordinates(i) for i in geomLayer]

# Initialise la librairie earthengine. Un compte google earthengine doit être connecté à l'ordinateur.
ee.Initialize()

# Création du polygone délimitant la zone d'étude
study_area = ee.Geometry.Polygon(coord, 'EPSG:4326').bounds()

# Obtenir l'année en cours et calculer 24 mois avant l'année en cours
actual_year = datetime.datetime.now().year
start_year = actual_year - 2

#Identification du capteur à utiliser
s2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')

# define your collection
time_series_s2 = s2.filter(ee.Filter.calendarRange(start_year,actual_year,'year'))\
.filter(ee.Filter.calendarRange(startMonth,endMonth,'month'))\
.filterBounds(study_area)\
.filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE',cloudPerc))

nb_img_s2 = time_series_s2.size().getInfo()

print('Nombre d\'images recouvrant la zone d\'étude: ',nb_img_s2)

# All name of the images are stored in images.
images_names_s2 = [item.get('id') for item in time_series_s2.getInfo().get('features')]

# Si des images n'ont pas été téléchargées en raison de leur status
# 'offline', activer cette ligne et saisir le chemin d'accès lorsqu'elles
# seront disponibles. Généralement, le serveur remet les remet en ligne maximum
# 24 heures après la demande.

# imgOnline = importJson(r"path to json")

# Téléchargement des images selon leur ID.
count = 0

```

```

for i in images_names_s2:
# Décommenter cette ligne si imgOnline est actif
# for i in imgOnline:
#     try:
#         count += 1

# Commenter cette ligne si imgOnline est actif
# img = ee.Image(i).get('PRODUCT_ID').getInfo()
# print("\nImage %d sur %d \n" % (count,int(nb_img_s2)))

if img not in data:
    count += 1
    print("\nImage %d sur %d \n" % (count,len(data)))

# Décommenter cette ligne si imgOnline est actif
print("\nImage %d sur %d \n" % (count,len(imgOnline)))

# Activation de la fonction permettant de télécharger les images S2
# provenant des serveurs de Copernicus
print("Téléchargement de l'image :", img)

if count == 1:
    online = download_S2(img,filePath,username,password)

# Ajoute le nom des images hors ligne, donc pas téléchargées pour y
# accéder plus tard lorsqu'elles seront en ligne

if online == 'false':
    imgOffline.append(img)

    print("Téléchargement de l'image complété\n")

    toc = timeit.default_timer()
    print('\nTemps écoulé :', (toc-tic)/60)

except:
    print("\nImage %d sur %d\n pas téléchargée" % (count,int(nb_img_s2)))

    print("\nImage %s\n" % i)

    continue

if imgOffline:
    export2json(imgOffline,'imgoffline',filePath)

    print('\n\nDes images n\'ont pas été téléchargées. Status: offline')

print("\nTéléchargement de l'ensemble des images S2 complété\n")

# Décompresser les images S2 téléchargées.
unzip(filePath)

toc = timeit.default_timer()
print('\nTemps écoulé :', (toc-tic)/60)

# Activation de la correction atmosphérique pour les images S2
atmCorrS2(sen2cor,filePath,locL2AFile,atmcorr_param,bands)

toc = timeit.default_timer()
print('\nTemps écoulé :', (toc-tic)/60)

#####
### Clipper les images à l'étendue de la zone d'étude ###
#####

# Déclarer la résolution de l'image
pixelSize = 10

# Valeur de l'étendue
minX = extent[0]
minY = extent[2]
maxX = extent[1]

```

```

maxY = extent[3]
bounds = (minX,minY,maxX,maxY)

for i in os.listdir(locL2AFile):
    if i.endswith('.tif'):

        # Déclaration des options
        options = {
            'xRes':pixelSize,
            'yRes':pixelSize,
            'resampleAlg':None,
            'outputBounds':bounds,
            # 'cutlineDSName':inputFeature,
            # 'cropToCutline':True,
            # 'srcNodata':0,
            'dstNodata':0,
            'multithread':True
        }
        # Appliquer le ré-échantillonnage pour les image de résolution de 20m.
        if '20m' in i:
            options['resampleAlg'] = 'near'

        gdal.Warp("%s/%s_clip.tif" % (locL2AClip,i[:-4]),"%s/%s" % (locL2AFile,i),**options)

        print('Clip de l\'image %s à la zone d\'étude' % i)

# Détecter les images des mêmes dates pour les fusionner ensemble
for i in sorted(os.listdir(locL2AClip)):

    if i[7:26] in name_img_dict:
        name_img_dict[i[7:26]] += 1

    else:
        name_img_dict[i[7:26]] = 1

# Déterminer si des images de même date existent. Si oui, extraire le nom des
# images qui serviront à réaliser les futurs traitements. Si non, conversion des
# images en matrice numpy.
for x,y in sorted(name_img_dict.items()):

    # Si une date image est comptée plus d'une fois, le nom des images à
    # mosaïquer est enregistré dans le dictionnaires img_to_merge.
    if y > 1:

        for i in sorted(os.listdir(locL2AClip)):

            if x in i and i.endswith('.tif'):
                if x not in img_to_merge:
                    img_to_merge[x] = [i]

            else:
                img_to_merge[x].append(i)

    # Si une date d'image est présente une seule fois, l'image est
    # directement ajoutée au dictionnaire array_s2_clip.
    else:
        for i in sorted(os.listdir(locL2AClip)):

            if x in i and i.endswith('.tif'):

                # Lecture de l'image Sentinel-2 clippée
                X, Y, geotransform,proj,array = readRaster("%s/%s" % (locL2AClip,i),[1])

                # Le filtre gaussien n'est pas appliqué à la matrice de
                # classification produite par Sen2Cor.
                # if 'SCL' not in i:
                #     array = gaussian_filter(array,2)

                # Ajout des différentes bandes spectrales utilisées pour
                # chacune des dates.
                if i[7:22] not in array_s2_clip:
                    array_s2_clip[i[7:22]] = [array/10000]

            else:
                array_s2_clip[i[7:22]].append(array/10000)

        del X,Y,geotransform,proj,array

```

```

# name_img_dict.clear()

# Importer le script MERGE de GDAL.
sys.path.append('C:\\OSGeo4W64\\bin')
import gdal_merge as gm

# Si des images d'une même date sont détectées, appliquer gdal_merge pour
# fusionner les tuiles de la zone d'étude.
if img_to_merge:

    # Recherche des noms de fichier dans le dictionnaire.
    for x,y in img_to_merge.items():

        file = []
        for d in y:
            file.append("%s/%s" %(locL2AClip,d))

        # Activation du script pour exécuter le mosaïquage. Les images S2 ont comme nodata la valeur 0.
        gm.main(['','-o', "%s/%s_merge.tif" % (locL2AClip,y[1]), '-ot', 'Int16', '-n','0','-
a_nodata',noData,*file])

        # Lecture des images mosaïquées
        X,Y,geotransform,proj,array = readRaster("%s/%s" % (locL2AClip,y[1]+'_merge.tif'),[1])

        # Stocker les images sous forme de liste
        if y[1][7:22] not in array_s2_clip:
            array_s2_clip[y[1][7:22]] = [array/10000]

        else:
            array_s2_clip[y[1][7:22]].append(array/10000)

        del X,Y,geotransform,proj,array

    print('Mosaïquage terminé')

else:
    print('Aucune image n\'a été mosaïquée')

#####
### Créer la série temporelle ###
#####

# Lire les rasters représentant le MNT et la couverture au sol
x,y,geotransform,proj,bathym = readRaster(bathymetrie,[1])
x,y,geotransform,proj,occ_sol = readRaster(classes_sol,[1])

bathym = bathym[0]
occ_sol = occ_sol[0]

img_date = []

# Contient l'index des images pour chacune des années.
index_year = {}

indice_prof = []

indice_prof_mask = []

limite_Shallow = [4.,6.]
limite_Deep = [10.,12.]
limite_VeryShallow = [0.5,2.]

# Dictionnaire pour extraire les valeurs de l'indice de profondeur pour
# chacun des pixels et pour chacune des zones de profondeur
indice_VShal = {}
indice_Shal = {}
indice_Deep = {}

# Liste pour extraire les valeurs de profondeur pour chacune des zones de profondeur.
pixel_VShal = []
pixel_Shal = []
pixel_Deep = []

# Index des bandes bleue,verte,rouge, pif et la couche de masque de nuages
blue = 0
green = 1
red = 2
nir = 3
idx_mask_cloud = len(bands)-1

```

```

countVShal = 0
countShal = 0
countDeep = 0

# Compteur pour identifier l'index des images dans le dictionnaire
count_index = 0

# Masquer les zones nuageuses à l'aide de la bande 'SCL' de S2.
for i,j in sorted(array_s2_clip.items()):

    for b in range(0,len(bands),1):

        # Ne prend pas en compte la dernière bande qui est le masque 'SCL'. Cette condition peut être changée en
        # fonction de la localisation réelle de la bande de masque ou tout simplement si elle existe.
        if b < idx_mask_cloud:

            ### Appliquer un filtre gaussien aux images pour réduire le bruit.
            array_s2_clip[i][b][0] = gaussian_filter(j[b][0],2)

    print('Filtre gaussien appliqué aux images: ')

    year = i[0:4]
    month = i[4:6]
    day = i[6:8]

    img_date.append(decimalYear(day,month,year))

# Identification des index des images pour chacune des années.
if year not in index_year:
    index_year[year] = [count_index]
else:
    index_year[year].append(count_index)

count_index += 1

print('Calcul de l'indice de profondeur pour la date: ', year+month+day)

### Calcul de l'indice de profondeur
DEPTH = depth(j[blue][0],j[green][0])

indice_prof.append(DEPTH)

### Appliquer un filtre adaptatif Wiener ###
DEPTH3 = wiener(DEPTH,3)
DEPTH33 = wiener(DEPTH3,3)
DEPTH335 = wiener(DEPTH33,5)

del DEPTH,DEPTH3,DEPTH33

print('Filtre adaptatif de type Wiener pour la date: ', year+month+day)

### Masquer les nuages présents dans les images ###
mask_band = j[idx_mask_cloud][0].copy()

mask_band[np.where((mask_band == 3) |
                  # mask_band == 7 |
                  (mask_band == 8) |
                  (mask_band == 9) |
                  (mask_band == 10))] = noData

mask_band[np.where(mask_band != noData)] = 1

mask_band[np.where(mask_band == noData)] = np.nan

depth_mask = DEPTH335 * mask_band

indice_prof_mask.append(depth_mask)

del DEPTH335

print('Masquage des nuages pour la date: ', year+month+day)

```

```

for k in range(0,np.size(bathym,0),1):
    for l in range(0,np.size(bathym,1),1):

        # Extraction des pixel de l'indice de profondeur représentant
        # les zones 'Shallow'.
        if occ_sol[k][l] == 20 and bathym[k][l] > limite_Shallow[0] and bathym[k][l] < limite_Shallow[1]:

            if count_index == 1:
                pixel_Shal.append(bathym[k][l])

            if countShal not in indice_Shal:
                indice_Shal[countShal] = [depth_mask[k][l]]
                countShal += 1
            else:
                indice_Shal[countShal].append(depth_mask[k][l])
                countShal += 1

        # Extraction des pixel de l'indice de profondeur représentant
        # les zones 'Deep'.
        if occ_sol[k][l] == 20 and bathym[k][l] > limite_Deep[0] and bathym[k][l] < limite_Deep[1]:

            if count_index == 1:
                pixel_Deep.append(bathym[k][l])

            if countDeep not in indice_Deep:
                indice_Deep[countDeep] = [depth_mask[k][l]]
                countDeep += 1
            else:
                indice_Deep[countDeep].append(depth_mask[k][l])
                countDeep += 1

        # Extraction des pixel de l'indice de profondeur représentant
        # les zones 'Very Shallow'.
        if occ_sol[k][l] == 20 and bathym[k][l] > limite_VeryShallow[0] and bathym[k][l] <
limite_VeryShallow[1]:

            if count_index == 1:
                pixel_VShal.append(bathym[k][l])

            if countVShal not in indice_VShal:
                indice_VShal[countVShal] = [depth_mask[k][l]]
                countVShal += 1
            else:
                indice_VShal[countVShal].append(depth_mask[k][l])
                countVShal += 1

        # Remet les compteurs de pixels à 0.
        countVShal,countShal,countDeep = [0,0,0]

# Conversion de la liste de dates en matrice numpy.
img_date = np.array(img_date)

# Conversion des listes en matrice numpy.
indice_prof = np.array(indice_prof)
indice_prof_mask = np.array(indice_prof_mask)

# Conversion des listes des pixels des différentes zones de profondeur en matrice numpy.
pixel_Shal = np.array(pixel_Shal)
pixel_Deep = np.array(pixel_Deep)

```

```

pixel_VShal = np.array(pixel_VShal)

# Moyenne de la valeur de l'indice de profondeur pour chaque pixel et pour chacune des classes de profondeur.
moyPixDeep = [np.nanmean(j) for i,j in indice_Deep.items()]
moyPixShal = [np.nanmean(j) for i,j in indice_Shal.items()]
moyPixVShal = [np.nanmean(j) for i,j in indice_VShal.items()]

# Valeur de l'indice de profondeur de référence pour chacune des classes de profondeur.
refIndiceDeep = []
refIndiceShal1 = []
refIndiceShal2 = []
refIndiceVShal = []
refIndiceVShal2 = []

# Permet de calculer le percentile des indices de profondeur pour chacune des zones.
for i in range(0,len(indice_prof_mask),1):

    valueDeep = []
    valueShal = []
    valueVShal = []

    for j in indice_Deep.values():
        valueDeep.append(j[i])

    for j in indice_Shal.values():
        valueShal.append(j[i])

    for j in indice_VShal.values():
        valueVShal.append(j[i])

    refIndiceDeep.append(np.nanpercentile(valueDeep,25))
    refIndiceShal1.append(np.nanpercentile(valueShal,75))
    refIndiceShal2.append(np.nanpercentile(valueShal,20))
    refIndiceVShal.append(np.nanpercentile(valueVShal,60))
    refIndiceVShal2.append(np.nanpercentile(valueVShal,60))
    # del valueDeep,valueShal,valueVShal

# Conversion des listes en matrice numpy
refIndiceDeep = np.array(refIndiceDeep)
refIndiceShal1 = np.array(refIndiceShal1)
refIndiceShal2 = np.array(refIndiceShal2)
refIndiceVShal = np.array(refIndiceVShal)
refIndiceVShal2 = np.array(refIndiceVShal2)

refPixelDeep = np.percentile(pixel_Deep,75)
refPixelShal1 = np.percentile(pixel_Shal,25)
refPixelShal2 = np.percentile(pixel_Shal,60)
refPixelVShal = np.percentile(pixel_VShal,20)
refPixelVShal2 = np.percentile(pixel_VShal,20)

#####
### Création de la matrice représentant les changements de bathymétrie ###
#####

j = np.arange(0,len(indice_prof_mask),1)
pente_bathym = np.full_like(bathym,np.nan)
prof_calcl = np.full_like(bathym,np.nan)

# n = np.arange(0,len(j),1)
n = img_date[0:len(j)]
# p = []
for k in range(0,np.size(bathym,0),1):

    for l in range(0,np.size(bathym,1),1):

        # if k ==360 and l ==237:

            # Extraction des pixel de l'indice de profondeur représentant
            # les zones 'Shallow' à 'Deep'.
            if occ_sol[k][l] == 20 and bathym[k][l] > 4. and bathym[k][l] < 12.:

                # Extraction d'un pixel pour l'ensemble des dates.
                x = indice_prof_mask[j[0]:j[-1]+1,k,l]

```

```

        # Calculer les changements pour les zones Deep.
        norm_indice = (1-0.9)*((x-refIndiceDeep[j[0]:j[-1]+1])/(refIndiceShal1[j[0]:j[-1]+1]-
refIndiceDeep[j[0]:j[-1]+1]))+0.9

        # Calculer changement pour les zones Shallow
        # norm_indice = (1-0.9)*((x-refIndiceVShal2[j[0]:j[-1]+1])/(refIndiceShal2[j[0]:j[-1]+1]-
refIndiceVShal2[j[0]:j[-1]+1]))+0.9

        idx = np.isfinite(n) & np.isfinite(norm_indice)

        pente_indice =
np.polynomial.polynomial.Polynomial.fit(n[idx[0:len(idx)]],norm_indice[idx[0:len(idx)]],1)

        p_indice = pente_indice.convert().coef

        # Conversion des indices de profondeur normalisés en profondeur réelle
        pente_metre = np.polynomial.polynomial.Polynomial.fit([0.9,1.0],[refPixelDeep,refPixelShal1],1)
        # pente_metre = np.polynomial.polynomial.Polynomial.fit([0.9,1.0],[refPixelShal2,refPixelVShal2],1)

        # Obtenir l'origine et la pente de la fonction
        p_metre = pente_metre.convert().coef
        p_metre = [p_metre[1],p_metre[0]]

        # Créer la fonction de conversion
        p = np.polyld(p_metre)

        # Liste contenant les profondeurs calculées
        prof_calc = []

        for a in norm_indice:
            prof_calc.append(p(a))

        prof_calc = np.array(prof_calc)

        idx2 = np.isfinite(n) & np.isfinite(prof_calc)

        prof_calcl[k,l] = p(norm_indice[3])

        try:
            pente =
np.polynomial.polynomial.Polynomial.fit(n[idx2[0:len(idx2)]],prof_calc[idx2[0:len(idx2)]],1)

            pente_coef = pente.convert().coef

            pente_bathym[k,l] = pente_coef[1]

        except:
            pente_bathym[k,l] = np.nan

# Enregistre une image de la profondeur prédite pour une date particulière
writeRaster('profondeur_predite.tif',geotransform,proj,prof_calcl,noData)

print('image de la profondeur prédite exportée')

# Enregistre une image des changements de profondeur prédits
writeRaster('changement_bathym.tif',geotransform,proj,pente_bathym,noData)

print('image des changements prédits exportée')

toc = timeit.default_timer()

print('\nTemps total de traitement: ', (toc-tic)/60)

```