



université
de bretagne
occidentale

MASTER SML

SCIENCES DE LA MER ET DU LITTORAL
MENTION

EXPERTISE ET GESTION DE
L'ENVIRONNEMENT LITTORAL

Grégoire MUREAU

ÉTUDE DES IMPACTS DES ÉVÉNEMENTS
EXTRÊMES SUR LE MASSIF DUNAIRE DE
LA PLAGE DE SANDVÍK (ISLANDE)

Mémoire de stage de Master 1

Année Universitaire 2020-2021

Structure d'accueil : LETG

Tuteurs universitaires : Serge SUANEZ

Maître de stage : Guillaume DODET

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Guillaume DODET pour son accompagnement soutenu dans mes démarches de traitement et d'interprétation des données hydrodynamiques propres à la plage de Sandvík, ainsi que pour les nombreux conseils qu'il m'a prodigués.

Je tiens également à remercier sincèrement Serge SUANEZ, pour sa patience ainsi que les enseignements de géomorphologie et d'hydrodynamisme qu'il m'a dispensés lors de mon parcours universitaire ainsi que tout au long de ce stage, me permettant d'appréhender la géomorphologie de la dune de Sandvík.

Je remercie également Pierre STÉPHAN pour s'être rendu disponible à de nombreuses reprises dans le but de m'accompagner avec pédagogie dans mes démarches d'acquisition, de traitement des données géomorphologiques ainsi que dans l'interprétation de mes résultats.

Mes remerciements vont également à Ronan Autret avec qui j'ai échangé par mail à plusieurs reprises à propos de méthodes d'acquisition et de traitements des données et qui s'est toujours montré disponible et très clair dans ses explications.

Je remercie également David Didier qui m'a aidé à plusieurs reprises à acquérir des données météorologiques et océanographiques pertinentes dans le cadre de cette étude.

Je profite également de cette section pour remercier le géophysicien Vincent Drouin qui m'a aidé à comprendre globalement l'activité géologique de la presqu'île de Reykjanes, en particulier près de la plage de Sandvík. La présence d'un interlocuteur français travaillant dans ce pays s'est avérée surprenante et très appréciable pour nous aider à mener nos recherches.

Je remercie aussi Kristinn Sveinsson de l'entreprise Loftmyndir, responsable des campagnes de survols en Islande, qui a gracieusement accepté de nous fournir les photographies haute résolution autour de la plage de Sandvík, utiles pour l'étude de la cinématique du trait de côte.

Enfin, je remercie Magnús H. Steinarsson, employé de la station météorologique et marégraphique de Sandgerði, qui a répondu à mes questions concernant l'acquisition des données à Sandgerði.

Table des matières

Table des matières	1
1 Introduction.....	2
2 Description générale du site.....	3
3 Matériel et méthodes.....	6
3.1 Analyse par photo-interprétation	6
3.1.1 Photographies aériennes anciennes et orthorectification.....	6
3.1.2 Traitement photogrammétrique des acquisitions de photos stéréoscopiques.....	9
3.1.3 Numérisation de la position du trait de côte	9
3.1.4 Analyse de la cinématique du trait de côte.....	10
3.2 Génération et exploitation de modèles numériques d'élévation	10
3.3 Hydrodynamisme	12
3.3.1 Observations in situ.....	12
3.3.2 Réanalyse météo-océanique ERA5 et de marée FES2012.....	13
3.3.3 Estimation du runup et des niveaux extrêmes.....	15
3.3.4 Calcul du flux d'énergie des vagues incidentes.....	16
3.4 Détermination des événements morphogènes	16
4 Résultats	17
4.1 Cinématique du trait de côte	17
4.2 Profils moyens et pentes du centre de la plage de Sandvík.....	20
4.3 Forçages hydrodynamiques	20
4.4 Croisement des données morphologiques et hydrodynamiques	23
5 Discussions	24
5.1 Période 1940-1978	24
5.2 Périodes 1999-2006.....	25
5.3 Périodes 2013-2017.....	25
6 Limites	26
7 Conclusion	28
8 Bibliographie	29
9 Annexes	31

1 Introduction

Les plages dunaires aux hautes latitudes présentent des caractéristiques différentes de celles observées dans les milieux tempérés. Ces premières se séparent en deux grandes catégories : les plages arctiques et les plages subarctiques. Dans la zone arctique, les dunes sont petites, et les dunes embryonnaires (notamment des *nebkas*) sont les plus présentes, voire les seules existantes. Dans les zones subarctiques où les périodes de gel sont moins longues, permettant ainsi aux espèces constructrices de se développer, on rencontre une plus grande variété de dunes. Ces dernières sont principalement des avant-dunes qui peuvent évoluer sous l'action d'une importante érosion éolienne (Ruz et Hesp, 2014), pouvant générer des creux de déflation (*blowouts*, *depressions* ou encore *hollows*) en avant de la plage et des dunes paraboliques à l'arrière, formées par le sable transporté par déflation éolienne : on parle alors de *blowout dunes* (González-Villanueva et Hargitai, 2014). Les plages de la péninsule de Varanger, situées le long des côtes arctiques norvégiennes, sont de bons exemples de plages arctiques à subarctiques présentant un apport abondant de sédiment et où des flèches sableuses ont été remaniées par de la déflation éolienne efficace, présentant des dunes paraboliques et creux de déflation associés importants (Kelletat, 1985 ; Sanjaume et Tolgensbakk, 2009). Dans les régions subarctiques comme la Baie de Hudson (Canada), les processus niveo-éoliens (liés au transport de neige) sont présents, mais n'impactent pas significativement la dynamique des dunes (Ruz et Hesp, 2014). D'une manière générale, la construction des dunes dans les régions subarctiques suivent un processus plus lent et délicat que dans les autres zones géographiques et les activités anthropiques peuvent facilement impacter le développement de ces constructions ou formes fragiles (Ruz et Allard, 1994). Avec une température moyenne de 11°C en juillet, l'Islande peut être considérée comme un climat subarctique, car cette température moyenne estivale se situe au-dessus de l'isotherme 10°C qui définit la limite entre climats arctiques et subarctiques. À ce jour, les études de Moutney et Russel (2006) sur le développement de la dune de Sólheimasandur (Islande du sud) et de Bodéré (1989) portant sur les accumulations dunaires littorales entre Myrdalsjökull (Islande du sud) et les fjords de l'est sont les seuls travaux permettant d'établir un état de l'art de l'évolution de ce type de plages en Islande. L'Islande occidentale étant soumise à des conditions météo-océaniques différentes, l'étude de ses formations dunaires est un sujet de recherche d'intérêt car non décrit jusqu'alors. Le système plage/dune de Sandvík située sur la côte ouest de la péninsule de Reykjanes (SO de l'Islande) est donc apparu comme un site d'étude tout à fait intéressant. L'objectif du travail réalisé dans le cadre de ce stage a porté sur l'étude de l'évolution pluridécennale de la plage de Sandvík à travers des indicateurs géomorphologiques (cinématique du trait de côte et évolution du système dunaire), biologiques (espèces constructrices de la dune), éoliens, et hydrodynamiques (tempêtes, calculs de niveaux extrêmes et flux d'énergies pouvant impacter la plage).

2 Description générale du site

La plage de Sandvík est située à l'extrémité ouest de la presqu'île de Reykjanes, région du sud-ouest de l'Islande réputée pour son activité volcanique intense de *rifting*. Les systèmes de la ceinture volcanique de Reykjanes sont les suivants : les Brennisteinsfjöll, Krýsuvík, la Fagradalsfjall, Svartsengi et le Cap Reykjanes (Sæmundsson et al., 2020), que l'on retrouve d'est en ouest, sur la Figure 1.

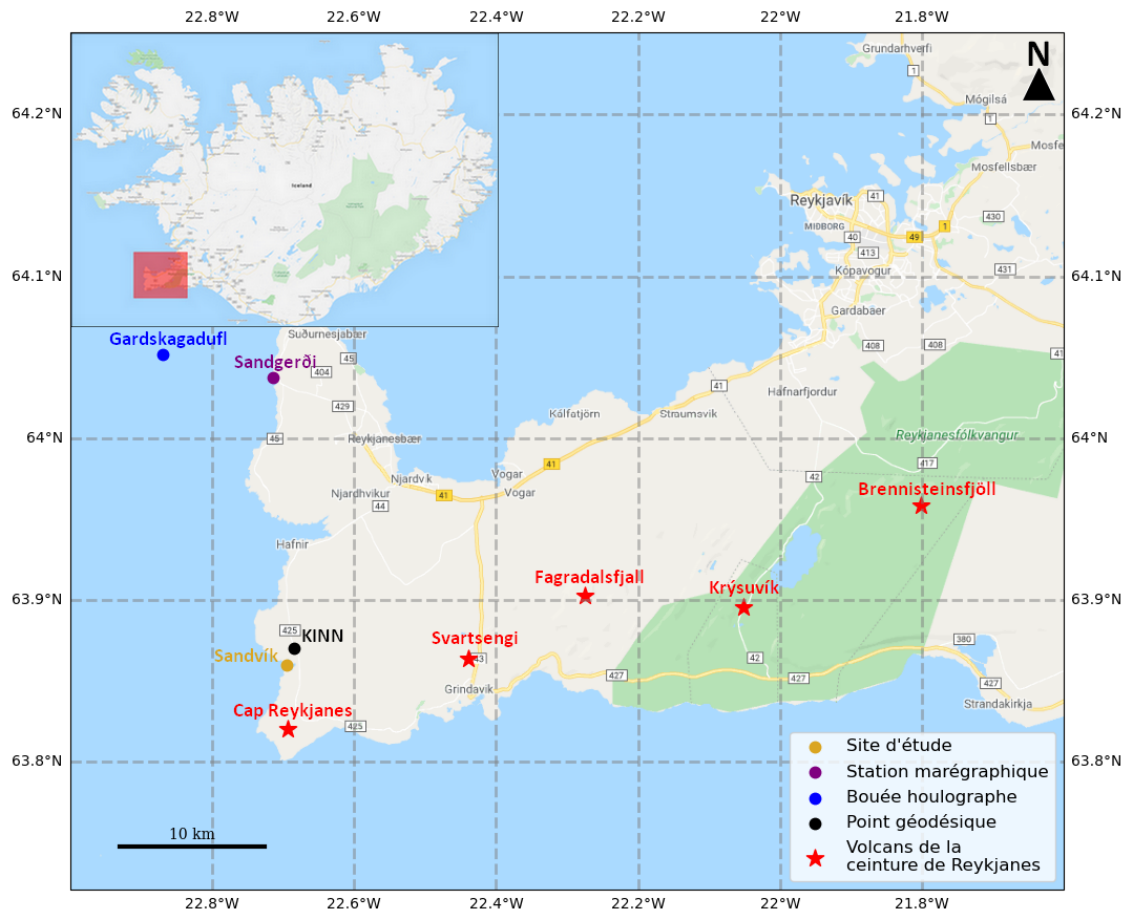


Figure 1 : Localisation de la presqu'île de Reykjanes, du site d'étude et des instruments de mesures exploités pour ce travail.

La plage de Sandvík (Figure 2), a été construite dans un compartiment effondré de type graben, encadré par deux lignes de faille soulignées par des escarpements présente une partie centrale relativement homogène arborant des dunes de type nebkas (Figures 3 et 4) pouvant atteindre un niveau d'élévation de 16 mètres, et des parties nord et sud où les dunes sont moins développées. A l'arrière de cette plage se trouve une lagune d'eau saumâtre probablement formé à la suite de la remontée d'une nappe phréatique. Constituée principalement de dunes, cette plage est soumise à des pressions anthropiques intenses, en particulier des passages de plusieurs types de véhicules venant sillonner et entretenir des couloirs de déflation (Figures 3 et 4). Ces pressions sont les plus importantes dans les parties nord et sud de la plage, qui seront donc éludées dans cette étude.



Figure 2: Photographie aérienne de la plage de Sandvík (2019)



Figure 3 : Photographie générale (Point 1) de la plage de Sandvík. Prise de photographie à la limite nord de la plage, vue orientée au sud. (Ronan Autret, 2021)



Figure 4 : Vue zoomée (Point 2) sur les dunes et les couloirs de déflation, prise de vue dans la moitié nord de la plage, vue orientée au sud (Ronan Autret, 2021)

Le volcanisme à Krísuvík (Michalczewska et al., 2011) ainsi que les activités anthropiques liées à la géothermie à Reykjanes ou Svartsengi (Receveur et al., 2019) sont des raisons qui expliquent la subsidence de plusieurs zones de la presqu'île de Reykjanes. Les données de mesures géodésiques sur 20 ans (08/04/2001-14/03/2019) fournies par Vincent Drouin, géophysicien à l'Université d'Islande et au ISOR (Iceland Geosurvey) nous ont permis d'estimer la subsidence de la plage de Sandvík (Figure 5). Ces mesures ont été effectuées sur un point géodésique KINN (<https://strokkur.raunvis.hi.is/gpsweb/station.php?id=KINN>) situé à environ 1,3 km de la plage; elles montrent un taux de subsidence d'environ 1 cm par an . Ce mouvement négatif permettrait d'expliquer la formation d'une lagune située en arrière du système plage/dune.

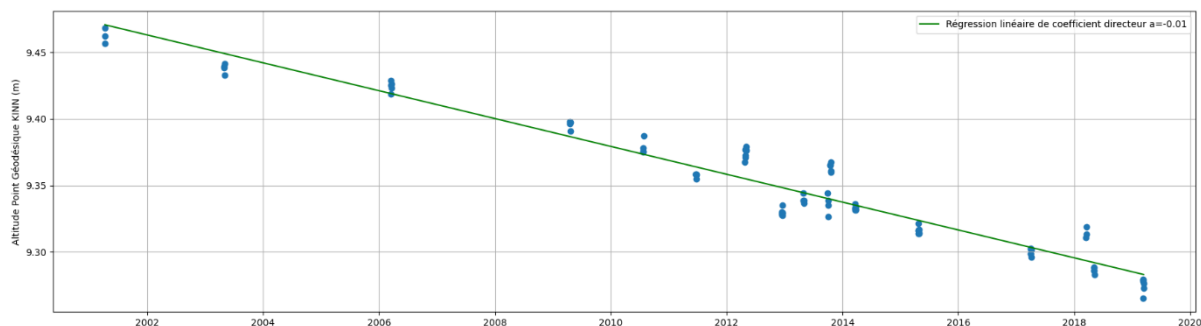


Figure 5: Subsidence du point géodésique KINN, près de la plage de Sandvík.

Nous pouvons estimer les températures annuelles de la plage de Sandvík à l'aide des mesures sur 10 ans (26/01/2011-14/04/2021) de la station Sandgerði (Figure 1), située à environ 20 km du site (Figure 1). Ainsi, le site est caractérisé par une amplitude thermique de 29°C sur environ 10 ans (entre -10,14°C et 18,86°C), avec une moyenne d'environ 5,52°C. La moyenne des températures sur l'ensemble des mois de Juillet a été calculée à 10,67°C, ce qui confirme bien le contexte climatique subarctique auquel appartient notre secteur d'étude.

La plage de Sandvík est soumise à un régime de marée macrotidal avec des amplitudes de marnages en vives-eaux atteignant jusqu'à 4,6 m. La moyenne des marnages est de 2,5 m. Les houles d'Ouest à Sud-Ouest (entre 180° et 270°) totalisent 60 % du régime annuel (données ERA5), et les hauteurs significatives de vague (bouée Gardskagadufll) peuvent atteindre des valeurs maximales allant jusqu'à 16 m, nuancée par un 99^{ème} percentile de 6,92 m. Le site est également soumis à des vents d'ouest et sud-ouest (entre 180° et 270°), totalisant 23,7 % du régime annuel, présentant des rafales moyennes hivernales (décembre-mars) de 40 km/h, avec un maximum enregistré à 138 km/h, sur une période de 10 ans de mesures (Station Sandgerði). La pression barométrique comprise entre 940 et 1049,9 hPa présente une valeur moyenne de 1003,8 hPa (Station Sandgerði)

L'exploitation des modèles numériques 3D d'élévation permet d'établir les bilans sédimentaires de la plage de Sandvík sur la période 2016-2018. Ces derniers montrent un engraissement d'environ +33 5534 +/- 3131 m³ entre le 15/05/2016 et le 30/08/2017 ; à l'inverse, le système plage/dune a perdu 376 +/- 4 090 m³ entre le 30/08/2017 et le 23/06/2018, ce qui revient à dire que le bilan est resté stable au vu de la marge d'erreur. Le bilan global entre 2016 et 2018 indique un engraissement d'environ +33 178 +/- 3 421 m³.

L'exploitation des différents profils de plage tracés le long des transects 2, 3 et 4 pour l'année 2018 a permis de générer un profil général (Figure 6) de la partie centrale de la plage. La pente moyenne de la zone intertidale (à moitié découverte) a été calculée à 12 %. Les nombres d'Iribarren ξ calculés à partir de la pente de plage moyenne à Sandvík sont compris entre 0,47 et 4,34 ce qui traduit un comportement essentiellement réfléchissant (Stockdon et al., 2006).

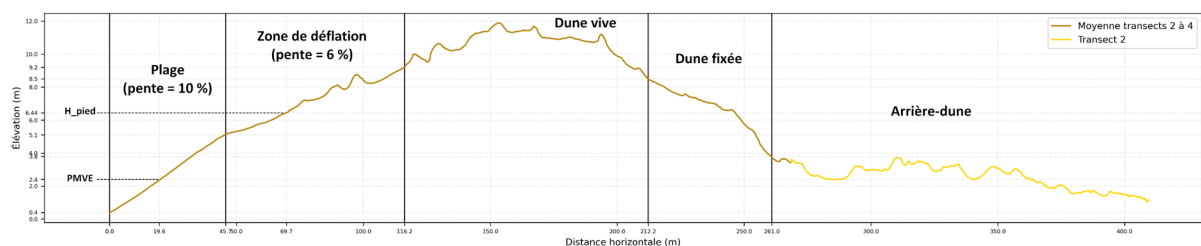


Figure 6: Profil général de la plage de Sandvík dans sa partie centrale (transects 2 à 4).

3 Matériel et méthodes

3.1 Analyse par photo-interprétation

La cinématique du trait de côte de la plage de Sandvík a été analysée par photo-interprétation. Ce travail s'appuie sur deux types de données : 1) des photographies aériennes acquises sur la période 1940-2019 ; 2) des acquisitions par drone réalisées durant trois campagnes de mesures, les 15/05/2016, 30/08/2017 et 23/05/2018.

3.1.1 Photographies aériennes anciennes et orthorectification

Les photographies aériennes mobilisées dans cette étude proviennent de différents organismes ayant pris des clichés depuis les années 1940. Toutes les photographies n'ont pas pu être orthorectifiées car elles ne couvraient pas la totalité de la plage et/ou présentaient une résolution suffisante pour permettre l'identification de points d'amer nécessaire à l'orthorectification. Cela a été le cas des 8 clichés obtenus auprès de la *National Collection of Aerial Photography (Scotland)*, pour les années 1940 et 1945. 49 photographies prises entre 1957 et 1998 ont également été obtenues auprès du Landmælingar Íslands (www.lmi.is), organisme public chargé de recenser et d'effectuer des campagnes de survol et de cartographie du territoire jusqu'aux années 2000. Enfin, 32 photographies aériennes plus récentes (entre 1996 et 2019) ont été acquises par la société privée Loftmyndir (www.loftmyndir.is).

Au total, 89 photographies ont été utilisées sur la période 1940-2019. Ces photographies doivent présenter une couverture de la partie dunaire de la plage, ainsi qu'une résolution permettant l'identification claire d'amers afin de pouvoir générer des orthophotographies. Comme certaines campagnes photographiques proposaient des clichés particulièrement zoomés, des reconstitutions photogrammétriques avec la fonction « photomerge » du logiciel Adobe Photoshop® ont été réalisées, puis orthorectifiées.

Le travail d'orthorectification des photographies aériennes a été réalisé à partir du logiciel ArcMap, en utilisant l'outil « Géoréférencement ». La méthode est basée sur la saisie de points d'amer entre la photo à corriger et celle servant d'image de référence. La rectification est ensuite effectuée par l'application d'une déformation polynomiale de second ou troisième ordre en fonction des cas (Figure 7). Le nombre d'amers, l'erreur quadratique moyenne, le biais maximal, la résolution, la date, l'organisme de production des données ainsi que des remarques éventuelles pour chaque photographie sont présentés dans le Tableau 1. L'erreur maximale a été calculée en multipliant par 2 la somme du biais maximal et de l'erreur quadratique moyenne maximale sur l'ensemble des clichés, de manière à pouvoir les comparer entre eux. Le travail est intégralement réalisé dans le datum Lambert 1993 (ESPG :3057). Au total, 15 orthophotographies ont été générées de cette manière.

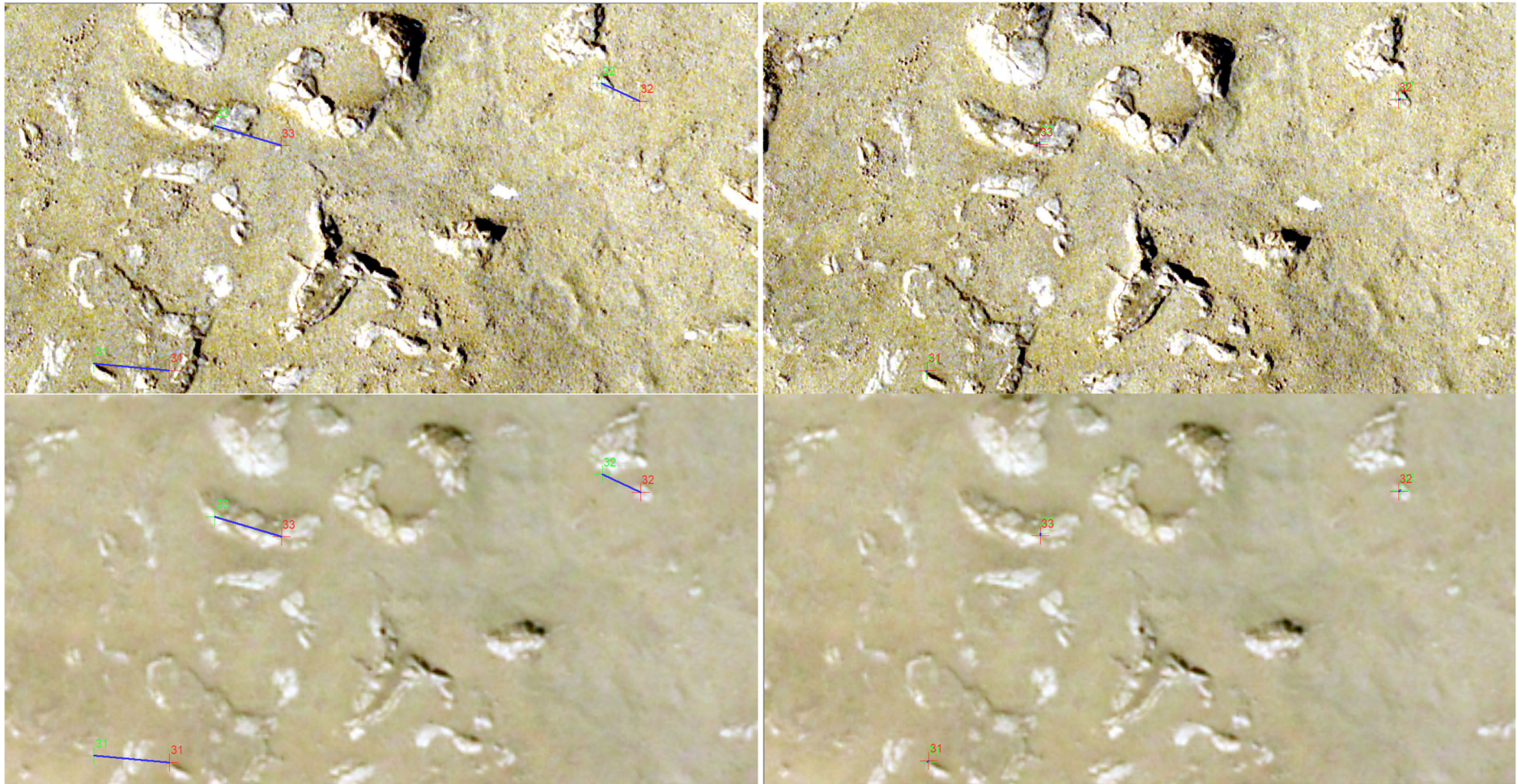


Figure 7: Comparaison des positions des amers avant (gauche) et après (droite) correction polynomiale de 3^e ordre appliquée à la photographie de 1999 (en haut) par rapport à la photographie de référence Loftmyndir (en bas).

Tableau 1: Informations relatives aux orthophotographies générées à l'aide de l'outil d'orthorectification "Géoréférencement" d'Arcmap.

Année	Organisme	Nombre d'amers	Erreur Quadratique Moyenne	Biais Maximal	Taille de cellule (m)	Correction polynomiale appliquée	Remarque
07/06/1957	LMI	45	1,02	2,35	0,27 x 0,27	2nd ordre	
19/08/1959	LMI	47	0,88	2,20	0,58 x 0,58	2nd ordre	
09/09/1978	LMI	38	0,65	1,08	0,76 x 0,76	2nd ordre	
16/07/1981	LMI	25	1,27	2,18	0,27 x 0,27	3ème ordre	partie Est manquante, plus de 5 mètres d'erreur au centre de la photographie
27/08/1985	LMI	37	0,88	1,58	0,82 x 0,82	2nd ordre	
02/09/1986	LMI	41	0,80	1,60	0,72 x 0,72	2nd ordre	
24/08/1989	LMI	30	0,64	1,00	0,58 x 0,58	2nd ordre	
10/09/1991	LMI	48	0,86	1,85	0,55 x 0,55	2nd ordre	
28/08/1996	Loftmyndir	33	0,86	1,57	0,78 x 0,78	3ème ordre	
16/08/1998	LMI	32	0,62	1,13	0,54 x 0,54	3ème ordre	
07/09/1999	Loftmyndir	46	0,87	1,87	0,19 x 0,19	3ème ordre	assemblage de 2 photographies, correction du vignelage
19/07/2006	Loftmyndir	58	0,62	1,36	0,56 x 0,56	2nd ordre	
05/08/2008	Loftmyndir	41	1,12	2,01	0,38 x 0,38	2nd ordre	
02/08/2013	Loftmyndir	52	1,00	2,01	0,35 x 0,35	2nd ordre	
24/08/2018	Loftmyndir	40	0,68	1,43	0,26 x 0,26	2nd ordre	
18/07/2019	Loftmyndir	47	0,84	1,47	0,16 x 0,16	2nd ordre	assemblage de 11 photographies
			erreur maximale (m)	7,23			

3.1.2 Traitement photogrammétrique des acquisitions de photos stéréoscopiques

Les campagnes de terrain menées à Sandvîk les 15/05/2016 (cerf-volant), 30/08/2017 (drone : Phantom2) et 23/05/2018 (drone : Phantom4Pro) ont permis de générer 3 orthomosaïques et Modèles Numériques d'Élévation (MNE) en coordonnées Lambert 1993 (ESPG :3057). Pour chaque campagne, plusieurs points de contrôle (amers) ont permis d'affiner l'orientation et l'alignement des photographies. Également, 2 points de calage ont permis de corriger les décalages entre les différentes campagnes, afin de pouvoir décrire des évolutions relatives de manière plus fine. Enfin, des nuages denses ont été calculés afin de pouvoir générer les MNE et orthomosaïques pour chaque date. Les principales informations relatives aux orthomosaïques générées sont présentes dans le tableau 2.

Tableau 2: Informations relatives à la génération des orthomosaïques à partir des photographies et points de contrôle acquis sur le terrain.

Date	Dispositif d'acquisition	Nombre de clichés	Nombre de points de contrôle	Résolution au sol (cm/px)	Erreur (x; y; z) en cm	Nombre de points nuage dense	Zone de couverture (km ²)	Zone après découpage (km ²)
15/05/2016	cerf-volant + ricoh imaging GR	424	30	1,66	0,49; 0,71; 0,68	936 170 250	0,254	0,212
30/08/2017	drone phantom 2	210	11	4,43	1,64; 3,15; 1,05	292 862 568	0,674	0,389
23/05/2018	drone phantom 4 pro	788	24	1,72	2,44; 3,48; 1,21	1 348 425 94	0,489	0,327

3.1.3 Numérisation de la position du trait de côte



La numérisation du trait de côte a été effectuée via logiciel QGIS, pour chacune des 18 orthophotographies générées. Le critère défini pour le tracé du trait de côte est la ligne de végétation dunaire, qui marque le contact entre la dune et les sables vifs du haut de plage (Figure 8). L'étude de l'évolution de cet indicateur morpho-biologique permet de mettre en évidence la formation ou le recul des dunes, et par là-même, en déduire une information sur la cinématique du trait de côte.

Figure 8: Tracé du trait de côte sur l'orthophotographie du 07/09/1999.

3.1.4 Analyse de la cinématique du trait de côte

L'analyse de la cinématique du trait de côte consiste à quantifier les mouvements de ce dernier afin de pouvoir déterminer des phases d'accrétion ou d'érosion de la plage de Sandvík.

Cette analyse a été réalisée via l'extension *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* v4.3 du logiciel ArcMap. Le principe revient à tracer des transects perpendiculaires à une ligne de référence parallèle à la ligne de rivage. 5 transects ont été tracés suivant un espacement d'environ 170 mètres. L'intersection de ces transects avec les différents traits de côte permet de déterminer et de quantifier le mouvement de la limite de végétation chaque date (Figure 9).

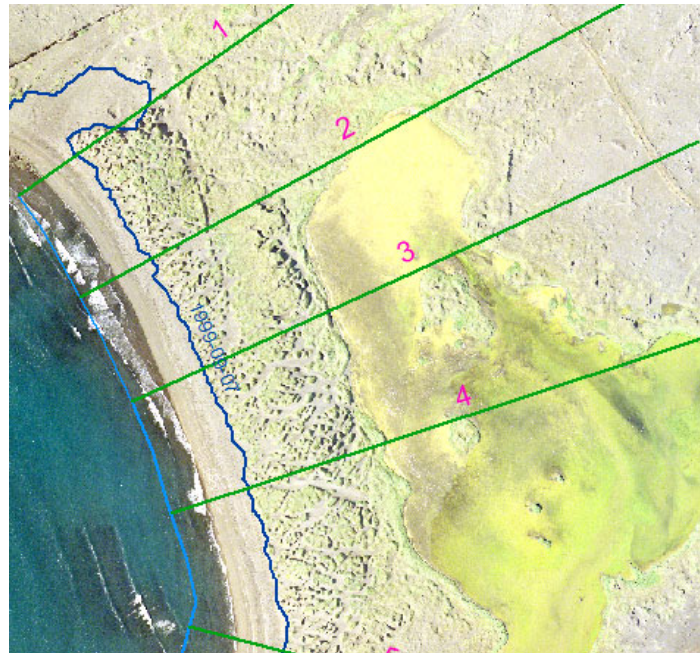


Figure 9: Utilisation de DSAS sur l'orthophotographie du 07/09/1999. On voit la ligne de tracé (bleu clair) pour les différents transects (1 à 5, en vert) qui viennent intersecter le trait de côte (bleu foncé).

DSAS génère alors une table d'attributs des distances positives et négatives des traits de côte entre chaque période. Comme les parties nord et sud de la plage sont soumises à de fortes pressions anthropiques, notamment par le passage répété de véhicules, la cinématique du trait de côte au niveau des transects 1 et 5 n'a pas finement étudiée ; l'analyse s'est plutôt concentrée sur la partie centrale de la plage, moins soumise à l'action de l'homme.

3.2 Génération et exploitation de modèles numériques d'élévation

La construction des modèles numériques d'élévation de terrain a été effectuée conjointement à la génération d'orthomosaïques grâce au traitement des photographies stéréoscopiques acquises par drone, à partir du logiciel Metashape. L'ensemble des informations concernant l'acquisition de ces données sont présentes dans le tableau 1. Les MNE ont été raccordés au système géodésique islandais ISN1993 ; les altitudes niveau 0 topographique se situant à +2,115 mètres par rapport au zéro hydrographique utilisé par le marégraphe de Sandgerði (Figure 1).

Il est important de mentionner que seule la campagne de 2018 recouvre une partie de la zone intertidale. Les photographies ont été acquises le 23/05/2018 entre 15h47 et 16h44, heures locales, pour des hauteurs de marée à Sandgerði comprises respectivement entre 2,36 m et 2,06 m (marée descendante). Le déphasage d'environ 10 minutes entre la marée à Sandvík et celle de Sandgerði permet de corriger ces valeurs entre 2,32 m et 1,98 m (de 16h00 à 16h50). Sachant que la hauteur maximale du niveau marin atteinte à Sandgerði est de 4,76 mètres, et en supposant à la fois que ce niveau maximal soit identique à Sandvík et que la pente de la zone intertidale y soit régulière, on peut estimer qu'environ la moitié de cette surface était découverte.

Le niveau 0 du MNE (ISN1993) correspond au niveau moyen de la mer. Comme l'amplitude de marée maximale est de 4,76 mètres, on estime à 2,38 mètres ce niveau 0. Cette information est confirmée par une élévation minimale du MNE de 2018 de 0 m dans la partie la plus au sud de la plage, photographiée à 15h47, pour une hauteur de marée estimée à cette heure à 2,32 mètres (semblable au niveau moyen, donc) : ces informations permettent donc de clarifier les différences entre les référentiels hydrographique et géographique.

Une fois générés, les MNE ont été superposés de date en date sur une surface commune de 0,181 km², afin de cartographier et de quantifier les changements morphologiques à partir des surfaces en érosion et en accrétion. Les erreurs de calcul de volume associées de respectivement 1230,8 m³, 1900m³ et 2190,1 m³ pour les années 2016, 2017 et 2018.

Les différents MNE découpés ont ensuite été soustraits les uns aux autres afin de calculer des différentiels d'élévation (Figure 10). Pour ce faire, j'ai utilisé l'outil « Soustraction » de la boîte à outils « 3D Analyst Tools » intégrée à Arcmap qui calcule le différentiel de hauteur entre 2 couches raster, pour chaque point commun aux deux. Cette soustraction implique des limites, en raison de la différence du nombre et de la répartition de ces derniers au sein des 2 nuages utilisés pour la soustraction. Une fois les différentiels d'élévation générés, j'ai pu calculer les volumes des surfaces en érosion et en accrétion afin d'établir les bilans sédimentaires entre chaque année. Les bilans sédimentaires ont été calculés sur une surface d'emprise commune à tous les MNE (soit 0,181 km²) (Figure 10).

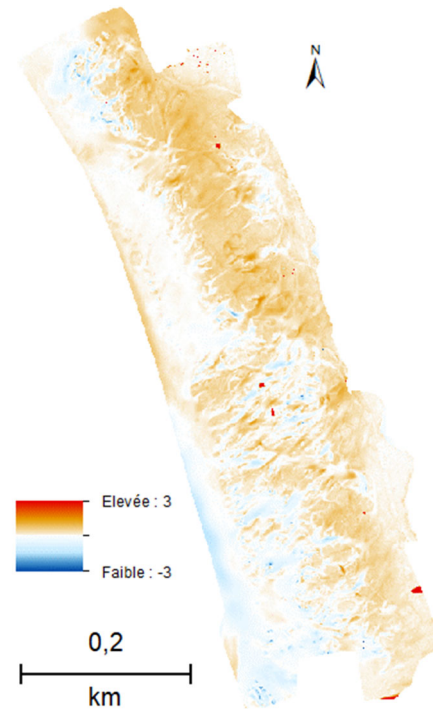


Figure 10: Différentiel d'élévation entre le 15/05/2016 et le 23/05/2018.

Le MNE de l'année 2018 présentant la plus grande emprise a également été exploité afin de générer un profil de la partie centrale de la plage de Sandvík le long des transects 2 à 4. L'extension Profile Tool de QGIS a été utilisée pour générer des profils. La génération de ces derniers a notamment permis de déterminer la pente de la zone intertidale, utile aux approches théoriques comme le calcul de runup (nécessaire à l'estimation des niveaux d'eau extrêmes), ou du nombre d'Iribarren permettant de déterminer le caractère morphodynamique de la plage (Stockdon et al., 2006).

L'analyse topo-morphologique des différents MNE a également permis d'obtenir la hauteur moyenne H_{pied} du pied de dune $H_{pied}(H_{pied})$ utile pour l'analyse morphodynamique basées sur l'impact morphosédimentaire des niveaux extrêmes. H_{pied} a été calculée en moyennant la hauteur du pied de dune pour toutes les dates des MNE (2016 à 2018) à plusieurs endroits de la plage.

3.3 Hydrodynamisme

Afin de calculer les niveaux extrêmes et analyser la fréquence et l'intensité des événements tempétueux sur la période 1979-2020, il a été nécessaire d'exploiter des sorties de modèles rétrospectifs, après les avoir validées par comparaison avec des mesures in situ (Figure 11).

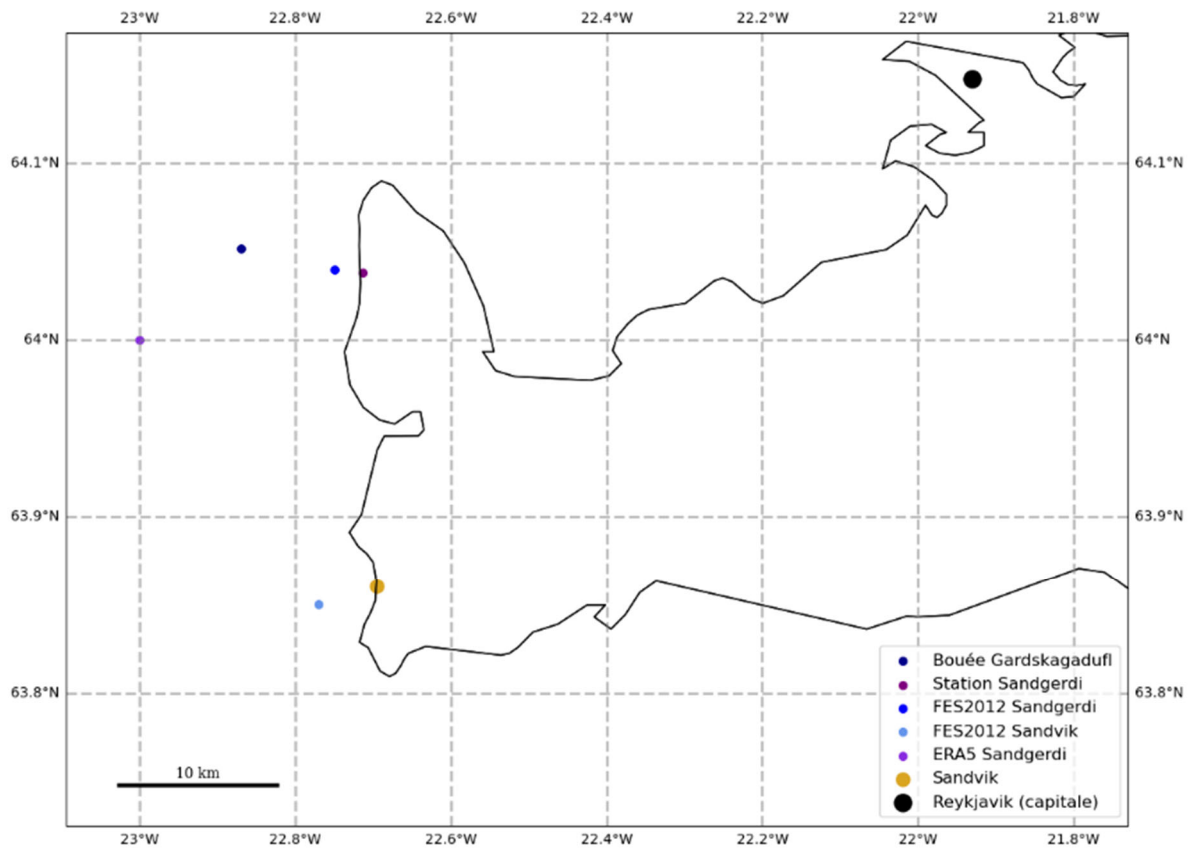


Figure 11: Différentes localisations associées aux sources de données employées dans cette étude.

3.3.1 Observations in situ

Afin de caractériser les forçages hydrodynamiques qui impactent la presqu'île de Reykjanes, les données issues de la station d'observation de Sandgerði (Figure 11) et de la bouée houlographe de Gardskagadufll (Figure 11) ont été exploitées. Les positions de ces deux points de mesures ainsi que des nœuds de modèle permettant d'acquérir de plus longues séries d'observation, sont représentées sur la figure 11.

La station à Sandgerði fournit des données de marée prédite et de marée observée « théoriques » issues du modèle de l'institution océanographique islandaise (<https://www.lhg.is>) à une fréquence de 10 minutes. Ces données couvrent la période allant du 26/01/2011 au 14/04/2021. Cette station marégraphique comporte également une station météorologique qui enregistre les paramètres de pression atmosphérique, de vitesse et de direction du vent avec la même fréquence d'échantillonnage, et pour la même période d'observation. La bouée Gardskagadufll fournit des mesures horaires de l'état de mer (hauteurs significatives des vagues, période moyenne). Les données disponibles couvraient la période allant du 10/03/2015 au 01/01/2021. Elles ont été obtenues sur la plateforme de données *in situ* du service de Surveillance de l'Environnement Marin Copernicus CMEMS (<http://www.marineinsitu.eu/>).

Des diagrammes de dispersion (scatter diagrams) croisant les données in situ et de modèles ont été générés afin d'estimer les différences entre les deux types de données, et/ou de valider les sorties de modèles.

3.3.2 Réanalyse météo-océanique ERA5 et de marée FES2012

ERA5 (Herschbach et al., 2020) est un produit de réanalyse météo-océanique développé par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF). Ce produit couvre la période 1979-2021 et fournit des paramètres atmosphériques et océaniques avec une résolution horaire et une résolution horizontale d'environ 30 km.

Les paramètres étudiés ainsi que les données *in situ* exploitées pour confirmer les résultats du modèle sont présentés dans le Tableau 3. Ces paramètres ont permis de calculer les niveaux extrêmes de la mer, le *runup* (nécessaire au calcul des niveaux extrêmes) ainsi que le flux d'énergie des vagues incidentes à Sandvík. Les niveaux extrêmes représentent l'élévation instantanée de la ligne d'eau et se calculent en tenant compte de la marée, de la surcote atmosphérique et du *wave setup/runup* (Stéphan et al, 2018).

Tableau 3: Paramètres du modèle ERA5 étudiés et données *in situ* mobilisées pour la validation de sortie des résultats de modélisation.

Paramètre étudié	Source de données <i>in situ</i>	Coordonnées <i>in situ</i>	Coordonnées nœud de modèle correspondant
Pression atmosphérique à la surface de la mer (P_a)	Station Sandgerði	(64,038°N ; 22,714°O)	(64°N ; 23°O)
Hauteur significative des vagues (H_{sig})	Bouée Gardskagadufl	(64,052°N ; 22.87°O)	(64°N ; 23°O)
Période moyenne des vagues (T_m)	Bouée Gardskagadufl	(64,052°N ; 22.87°O)	(64°N ; 23°O)

FES2012 est un modèle de marée barotrope développé conjointement par le LEGOS, NOVELTIS et CLS (Carrère 2012). Il se base sur le modèle en éléments finis T-UGO pour la résolution des équations de Saint-Venant (Lyard et al., 2006) et assimile les mesures altimétriques satellitaires. Les amplitudes et phases de 32 constituants de marée ont été extraites aux points de coordonnées (64,04°N ; 22,75°O) et (63,85°N ; 22,77°O) afin de reconstituer la marée astronomique prédite (M_{pred}) sur la période 1979-2021 à proximité de Sandgerði et Sandvík, respectivement.

Avant de déterminer le nombre d'événements tempétueux sur l'ensemble de la période d'analyse (1979-2021), les données de houle de marée issues des sorties de modèles rétrospectifs ont été validées à partir des enregistrements houlographiques et marégraphiques *in situ* (bouée houlographe Gardskagadufl et le marégraphe de Sandgerði) (Figure 11). Les paramètres statistiques permettant de quantifier les différences d'une série de données à une autre sont le coefficient de pearson (r), la moyenne quadratique ($rmse$), et le biais ($bias$) ; ils décrivent respectivement la corrélation, l'erreur aléatoire et l'erreur systématique entre les données *in situ* et de modèle. La marée observée de modèle, comparée avec la marée observée de la Station Sandgerði, est reconstituée à partir de la marée prédite du modèle FES2012 et des données de pression de surface du modèle ERA5 ; les effets locaux du vent ne sont pas inclus dans cette reconstitution. Des figures de nuage de points (Figures 12 à 16) pour chaque paramètre ainsi que les indicateurs statistiques associés (Figure 4) permettent de représenter la qualité de la relation statistique entre les données *in situ* et de modèles.

Tableau 4: Résultats de calculs d'indicateurs statistiques de comparaison entre les données *in situ* et de sortie de modèle pour les différents paramètres étudiés.

Paramètre	Données <i>in situ</i>	Modèle	r	$rmse$	$bias$
M_{pred} (m)	Sandgerði (modèle Sjósmælingar)	FES2012	0,996	0,13	-0,001
P_a (hPa)	Sandgerði	ERA5	0,999	1,08	0,92
M_{obs} (m)	Sandgerði	FES2012 + ERA5	0,981	0,19	-0,01
H_{sig} (m)	Gardskagadufl	ERA5	0,936	0,57	0,30
T_m (s)	Gardskagadufl	ERA5	0,882	1,84	-1,6

Les résultats obtenus (Tableau 4) ainsi que les nuages de points associés (Figures 29 à 33) permettent de mesurer la bonne relation entre les paramètres M_{pred} , M_{obs} et P_a par les modèles FES2012 et ERA5. À l'inverse, les corrélations sont moins bonnes pour les paramètres de vagues H_{sig} et T_m . Bien que la T_m ne soit pas utilisée dans le calcul du runup R , la validation particulièrement difficile de cette dernière (Figure 33) amène des questions quant à la véracité des données de période de pic prédites par le modèle, que nous ne pouvons valider. Il résultera donc de ces conclusions une incertitude sur les valeurs exactes de R et donc de niveaux extrêmes H_{ext} calculés.

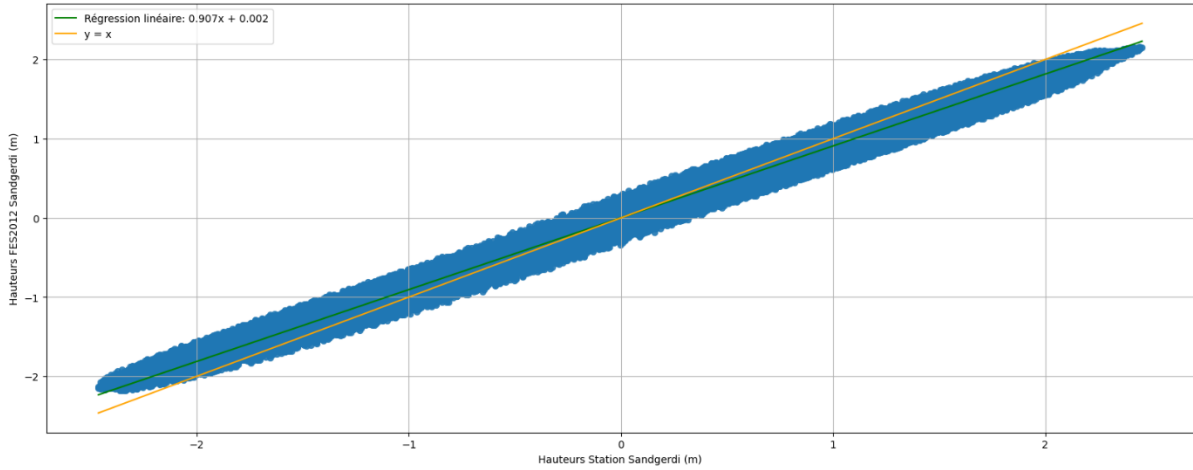


Figure 12: Comparaison de M_{astro} entre le modèle de la station à Sandgerði et le modèle FES2012.
($r = 0,996$; $rmse = 0,13$; $bias = 0,002$)

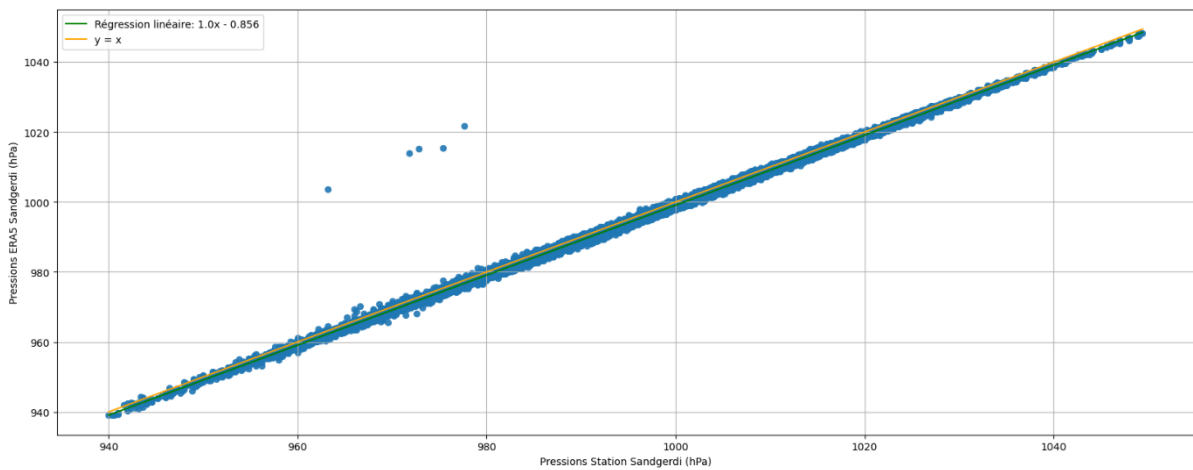


Figure 13 : Comparaison de P_a entre les données in situ de la station à Sandgerði et le modèle ERA5.
($r = 0,999$; $rmse = 1,08$; $bias = 0,925$)

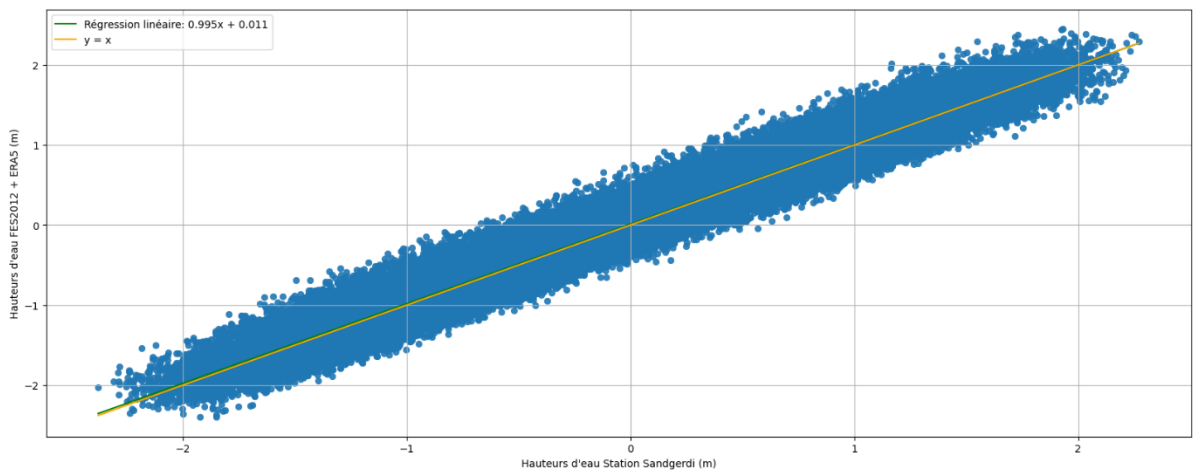


Figure 14 : Comparaison de $M_{réelle}$ entre les données in situ de la station à Sandgerði et la reconstitution de modèle avec M_{astro} (FES2012) et P_a (ERA5). ($r = 0,981$; $rmse = 0,189$; $bias = -0,011$)

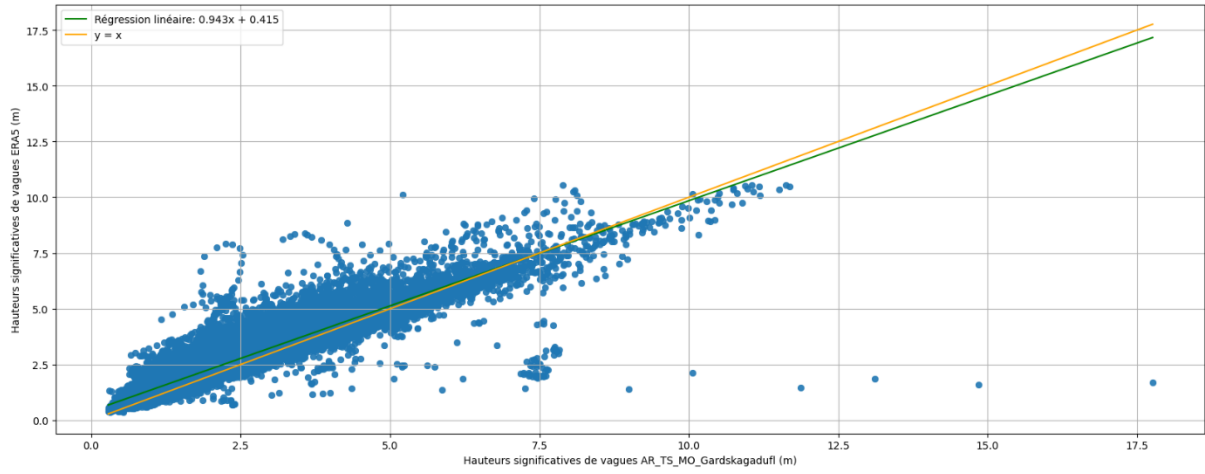


Figure 15 : Comparaison des H_s entre les données in situ de la bouée Gardskagadufli et de modèle ERA5. ($r_{mse} = 0,57$; $bias = 0,304$)

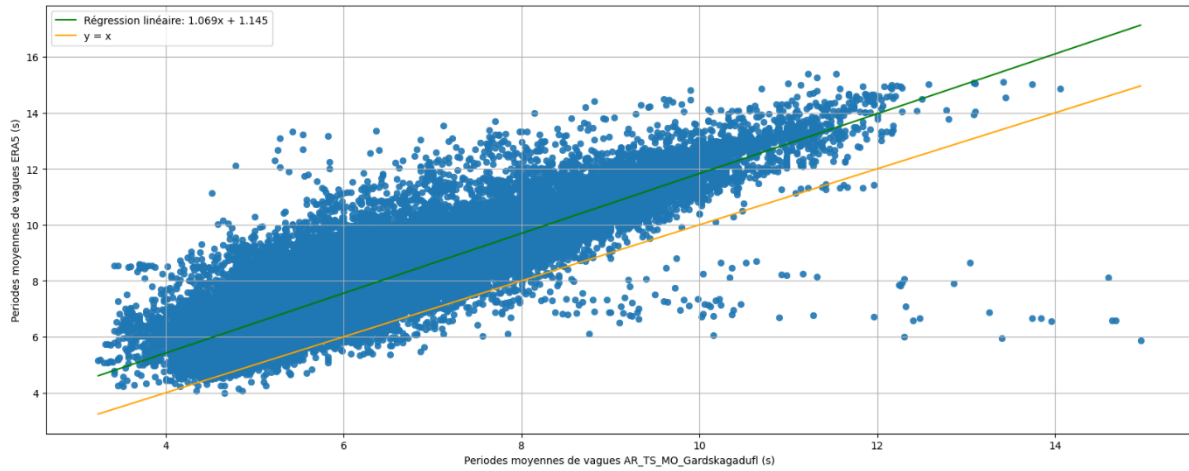


Figure 16 : Comparaison des T_m entre les données in situ de la bouée Gardskagadufli et de modèle ERA5. ($r = 0,882$; $rmse = 1,836$; $bias = -1,606$)

3.3.3 Estimation du runup et des niveaux extrêmes

Le runup R décrit l'élévation maximale de la ligne d'eau sur une plage soumise à l'action des vagues. La formule empirique de Stockdon et al. (2006), permet de calculer le runup à partir de la pente moyenne S de la plage (zone intertidale) ainsi que des longueurs d'onde L (en m) et hauteurs significatives H_{sig} (en m) des vagues incidentes (Équation 1).

$$R = 1.1 \left(0.35S(H_{sig}L)^{\frac{1}{2}} + \frac{[H_{sig}L(0.563S^2 + 0.004)]^{\frac{1}{2}}}{2} \right) \quad (1)$$

La longueur d'onde L des vagues a été calculée à partir de la période de pic T_p (s) en utilisant la relation de dispersion :

$$L = \frac{2\pi}{k}, \quad \text{avec } k \text{ solution de } \omega^2 = gk \tan h(kd) \quad (2)$$

où ω est la fréquence angulaire ($\omega = 2\pi/T_p$), k est le nombre d'onde ($k = 2\pi/L$) et g l'accélération gravitationnelle. Cette dernière est environ égale à $9.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ aux points de latitude 64°N .

Les niveaux extrêmes sont calculés comme la somme de la marée prédite, de la surcote atmosphérique calculée elle-même à partir de la pression atmosphérique (baromètre inverse), et du runup (Stéphan et al, 2018). De cette manière, j'ai reconstitué les niveaux extrêmes H_{ext} à Sandvík comme niveaux maximaux à chaque marée, me permettant alors de déterminer les épisodes où la mer atteint une hauteur suffisante pour éroder la dune. Le tableau 5 recense les sources de données utilisées pour chaque paramètre entrant en compte dans le calcul des niveaux extrêmes.

Tableau 5: Sources de données mobilisées dans le calcul des niveaux extrêmes pour la plage de Sandvík

Dates	Niveaux d'eau extrêmes H_{ext}					
	Runup R				Marée observée M_{obs}	
	H_{sig}	L		S	Marée prédite M_{pred}	Surcote barométrique $(1003,8 - P_a)$
T_p		d				
01/04/1979 - 01/01/2021	Modèle ERA5	Modèle ERA5	Modèle ETOPO1	MNT 23/05/2018	Modèle FES2012	Modèle ERA5

Le flux d'énergie des vagues F est également un paramètre important dont il faut tenir compte dans l'analyse des niveaux d'eau extrêmes. En effet, deux épisodes présentant un niveau d'eau extrême équivalent peuvent être caractérisés par des conditions de houles totalement différentes : houle peu énergétique (H_{sig} et/ou T_p peu élevés) ou houle très énergétique (H_{sig} et T_p très élevés).

3.3.4 Calcul du flux d'énergie des vagues incidentes

Le flux d'énergie des vagues F a été quantifiée en utilisant l'équation suivante (Holthuijsen L. H., 2010) :

$$F = \frac{\rho g^2 H_{sig}^2 T_p}{64\pi} \quad (1)$$

où ρ est la densité de l'eau ($\rho = 1,025 \text{ kg.m}^{-3}$).

3.4 Détermination des événements morphogènes

La détermination des événements morphogènes s'effectue en confrontant les données décrivant les mouvements relatifs du trait de côte et les données hydrodynamiques, éoliennes, biologiques, etc. Les reculs du trait de côte entre 2 orthophotographies pourront par exemple s'expliquer par la présence d'un hiver particulièrement tempétueux, caractérisé par des niveaux extrêmes et flux énergétiques importants. Les tempêtes sont déterminées à partir de la définition de M.Harley (2017), selon 3 paramètres :

- Le seuil à partir duquel on détermine que les mesures sont suffisamment importantes pour être considérées comme une tempête : ce seuil a été fixé à la même hauteur que celle des pieds de dunes ayant disparu entre une orthophotographie et la suivante.
- La durée minimale pour laquelle les mesures dépassent le seuil, ici choisie à 3 heures.
- Le critère d'indépendance : il s'agit de la durée minimale utilisée pour séparer 2 tempêtes distinctes : nous avons ici choisi une durée minimale de 5 heures.

Ainsi, pour chaque hiver, le nombre de tempêtes sera alors compté, et les valeurs hivernales maximales de niveaux extrêmes et de flux énergétiques seront également représentés, permettant ainsi une analyse plus complète.

4 Résultats

4.1 Cinématique du trait de côte

La figure 17 représente les mouvements de la ligne de végétation (et donc des fronts de dunes) sur la période 1957-2019 pour chacun des 5 transects considérés.

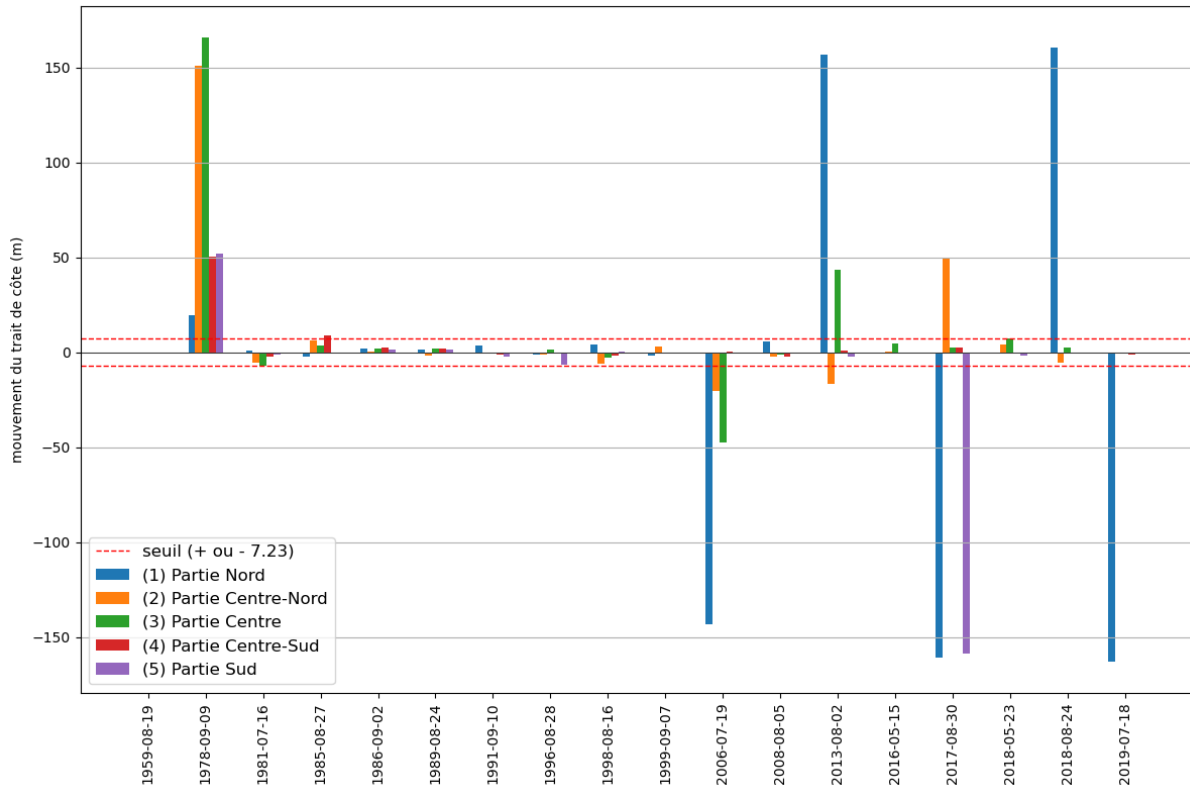


Figure 17: Mouvement relatif du trait de côte à Sandvik, selon les différents transects.

On observe en premier lieu une forte variabilité des amplitudes de déplacement de la ligne de végétation en fonction des périodes considérées, avec des valeurs comprises entre 166 m et -163 m. Étant donnée l'incertitude sur les mesures de position de la ligne de végétation (voir Section 3.1.3), les déplacements inférieurs à 7,23 mètres (ligne rouge en pointillés sur la figure 17) sont considérés comme trop faible pour être significatifs (et ne sont donc pas discutés dans la suite de l'analyse). On observe également une forte variabilité des déplacements entre chacun des transects avec parfois des évolutions de sens opposés, même lorsque ceux-ci sont significatifs (e.g. transect 1 et 2 au 02/08/2013). La période 1959-1978 semble marquée par une forte construction des dunes (figure 18). En effet, l'avancée du trait de côte est estimée en moyenne à 122 m pour les transects 2 à 4 sur cette période.

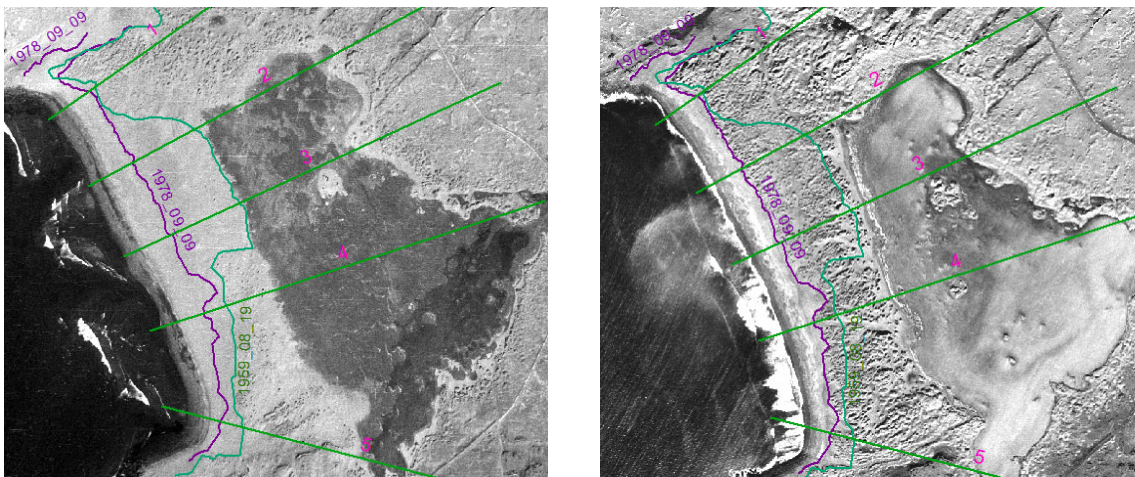


Figure 18: Plage de Sandvik en 1959 (gauche) et 1978 (droite)

Les transects 1 et 5 indiquent également une forte variabilité du trait de côte. La cinématique du trait de côte indique un net recul des dunes entre 1999 et 2008, pour les transects 1, 2 et 3, c'est-à-dire sur la partie centrale et nord de la plage ; la surface érodée a été estimée à 24186 m² (Figures 19 et 20). On constate ensuite une reconstruction progressive des dunes à partir de 2008 autour du transect 3 (Figures 21 et 22, 25), et 2016 autour du transect 2 (Figures 23 et 24).



Figure 19: Partie centrale-nord de la plage de Sandvik, le 07/09/1999.



Figure 20: Partie centrale-nord de la plage de Sandvik, le 19/07/2006.

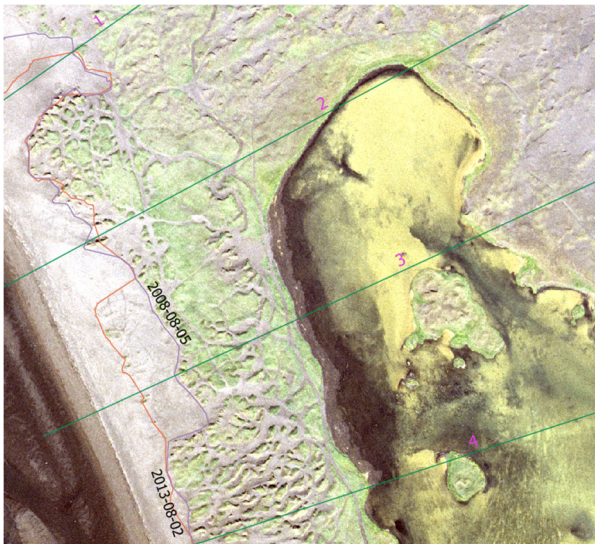


Figure 21: Partie centrale-nord de la plage de Sandvik, le 05/08/2008.

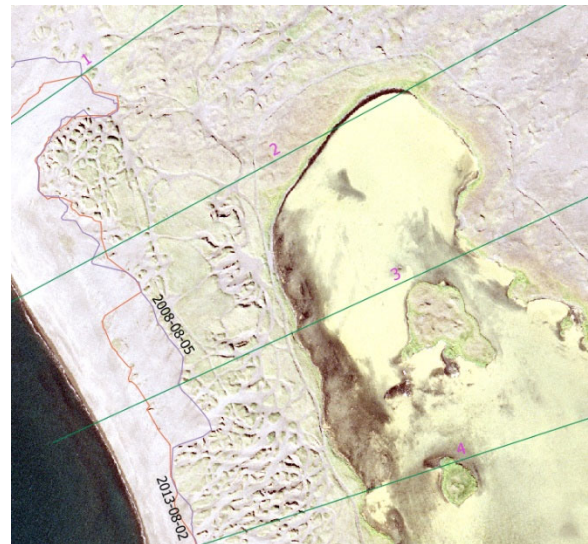


Figure 22: Partie centrale-nord de la plage de Sandvik, le 02/08/2013.

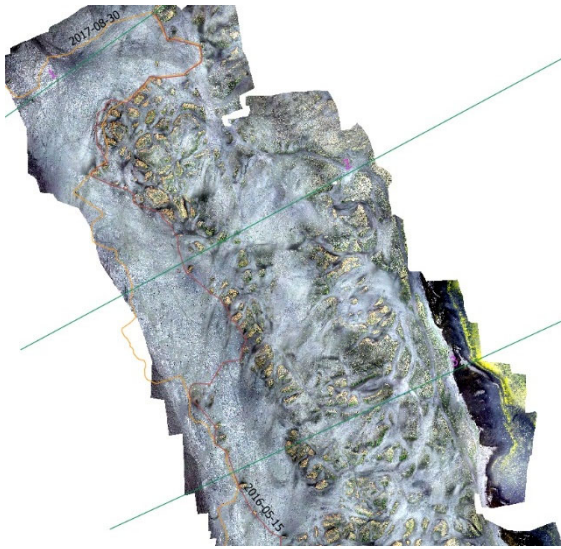


Figure 23: Partie centrale-nord de la plage de Sandvik, le 15/05/2016.

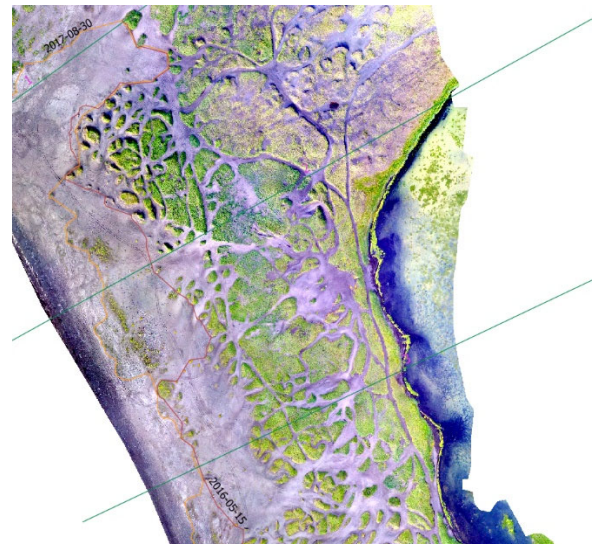


Figure 24: Partie centrale-nord de la plage de Sandvik, le 30/08/2017.

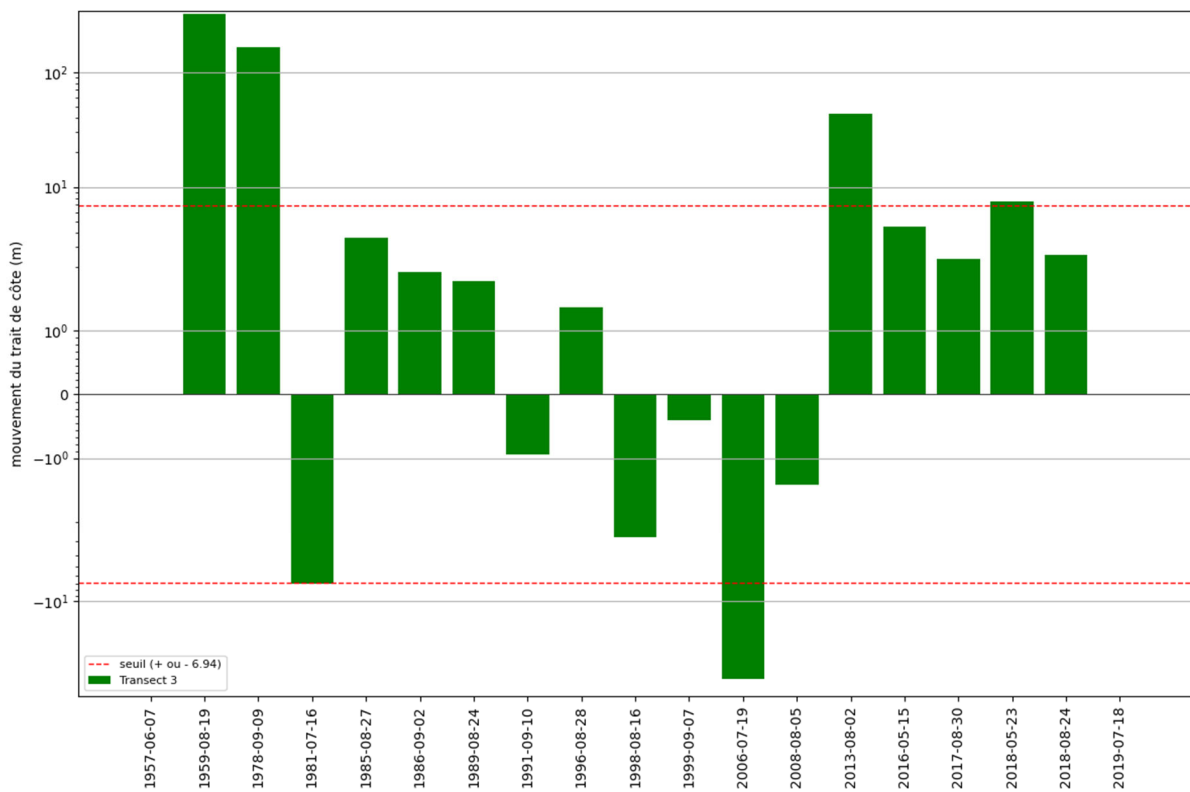


Figure 25: Mouvement relatif du trait de côte à Sandvik au niveau du transect 3.

Enfin, la plage au niveau des transects 1 et 5 a connu un net recul lors de la période 2013-2017 (Figure 26). Ces reculs semblent visibles sur l'orthomosaïque de 2016 ; cependant, comme cette dernière est incomplète, il a été impossible de les quantifier entre 2013 et 2016.

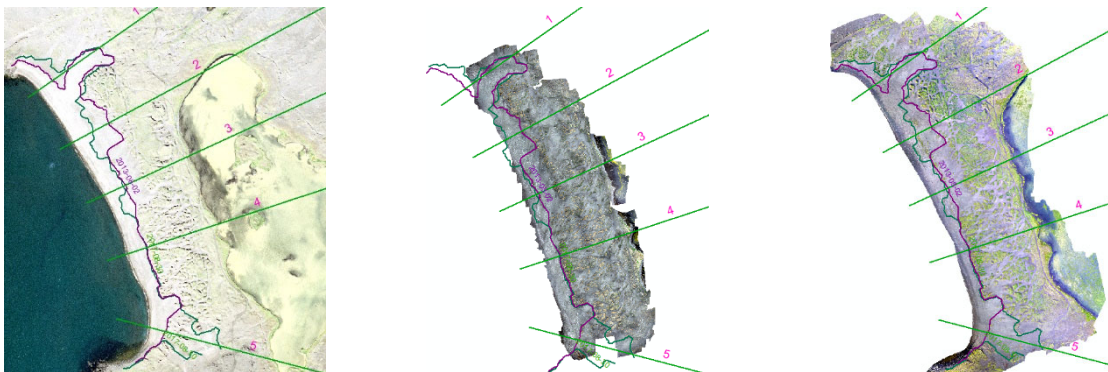


Figure 26: Plage de Sandvik en 2013, 2016 et 2017

4.2 Profils moyens et pentes du centre de la plage de Sandvík

L'étude du centre de la plage vise à chercher des éléments permettant d'expliquer le net recul du trait de côte constaté dans cette zone entre le 07/09/1999 et le 19/07/1999. Un profil de plage pour l'année 2018 a donc été généré (Figure 27). La hauteur moyenne des pieds de dunes reconstituées a été calculée à partir des 3 MNE (2016, 2017 et 2018) et culmine à 6,44 mètres de hauteur. Cette hauteur a été utilisée comme seuil pour déterminer les niveaux d'eaux extrêmes (calculées dans la partie suivante) capables d'affecter les dunes. La pente moyenne en zone intertidale a quant à elle été calculée dans cette zone à 12,67%, à partir des données de 2018 : elle sera utilisée pour les calculs de runup R et de niveaux d'eau extrêmes H_{ext} .

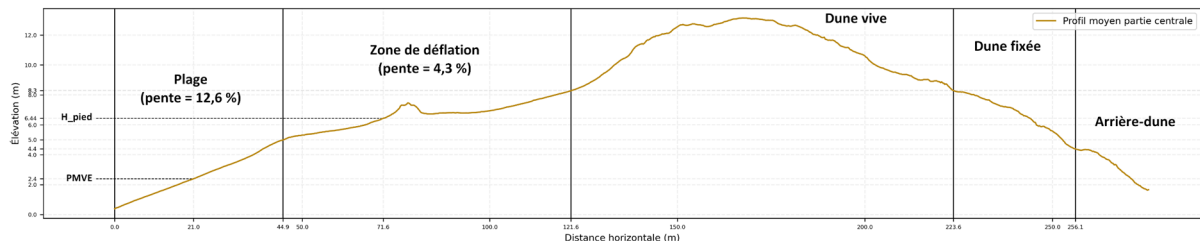


Figure 27: Profil moyen de la plage de Sandvík (2018) autour du transect 3.

Les nombres d'Iribarren ξ calculés à partir de la pente de plage moyenne de la partie centrale de la plage sont compris entre 0,49 et 4,50 (Figure 28). Comme pour la description générale de la plage, cette dernière n'est pas dissipative, car $\xi > 0,3$. La portion de plage autour du transect 3 est aussi réfléchive et majoritairement réfléchive environ 29% du temps, plutôt en été, où l'on retrouve $\xi > 1,25$ (Stockdon et al., 2006).

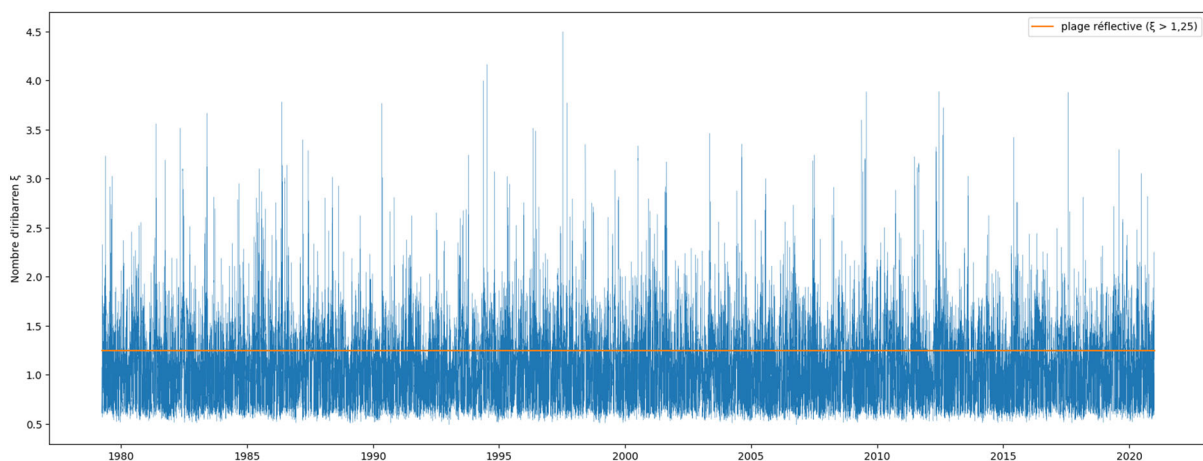


Figure 28: Nombres d'Iribarren pour la portion de plage de Sandvík autour du transect 3.

4.3 Forçages hydrodynamiques

Le calcul des niveaux extrêmes H_{ext} et flux d'énergie F (Figure 29) grâce aux données de modèle (Tableau 5 et Équation 3) permet de déterminer les années présentant les événements les plus extrêmes, pouvant avoir le plus d'influence sur l'évolution morphologique de la plage de Sandvík (Figure 17 à 26) : on désigne les « événements les plus extrêmes » comme ceux présentant la conjugaison de niveaux d'eaux extrêmes et de flux énergiques importants. Parmi les mesures obtenues, 237 tempêtes ont été détectées sur la période 1979-2020, à partir des paramètres exposés dans la partie 3.4. Parmi celles-ci, la tempête du 10/01/2000 semble être la plus importante de la période 1999-2006 : durant 17 heures, elle présente un niveau extrême maximal de 8,96 m, ainsi qu'un flux énergétique associé de 1,05 MJ.m⁻². Cette tempête pourrait justifier le recul du trait de côte entre 1999 et 2006. Le nombre de tempêtes hivernales détectées ainsi que les paramètres de niveaux d'eau extrêmes et de flux énergétique associés à la plus grande tempête de chaque hiver sont présents dans la Figure 30.

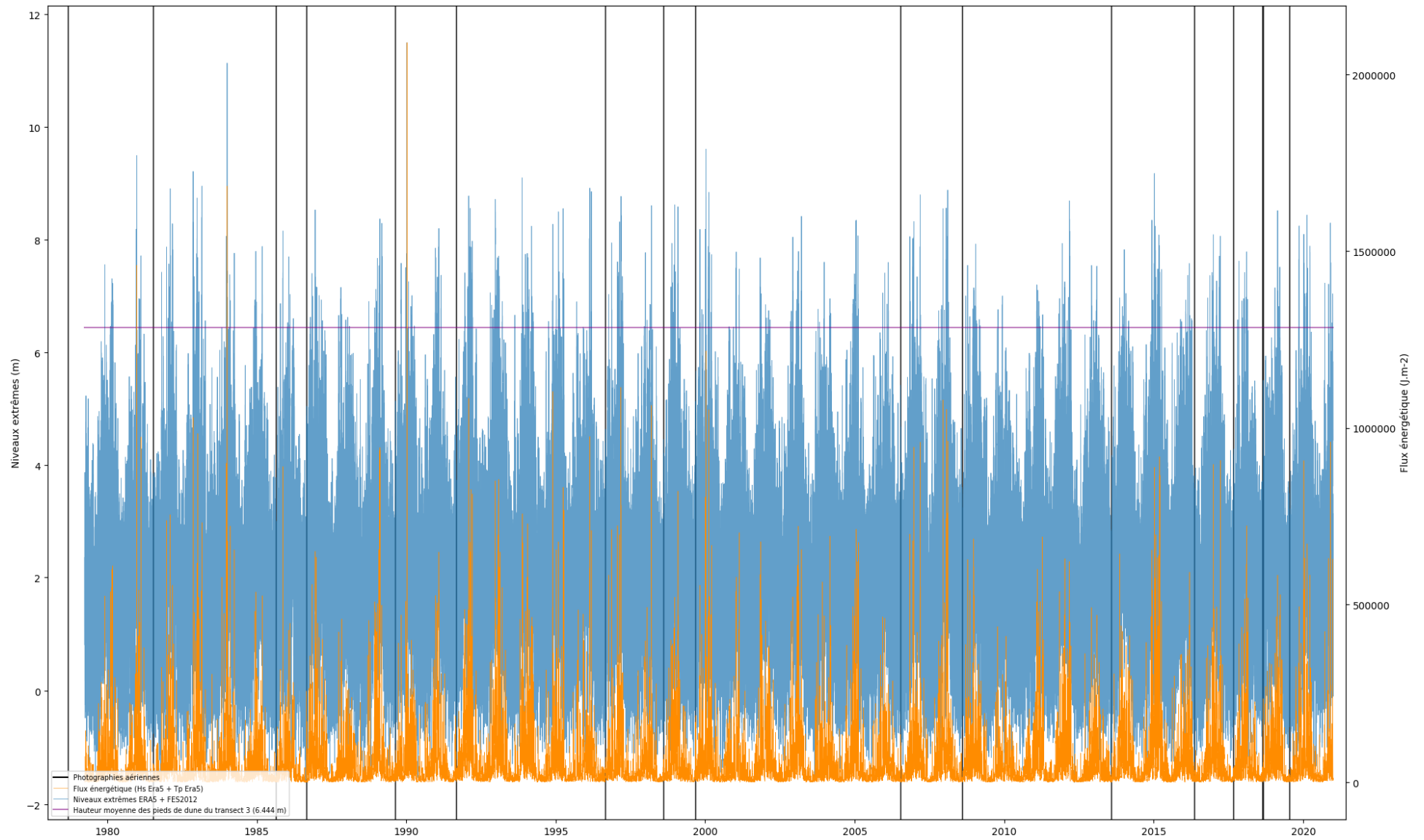


Figure 29 : Niveaux extrêmes et flux d'énergie des vagues atteints entre 1979 et 2021. Les dates des différentes orthophotographies sont indiquées par des barres verticales noires, et le niveau altitudinal du pied de dune en violet.



Figure 30: Nombre de tempêtes hivernales et maximums hivernaux des niveaux extrêmes dépassant la hauteur moyenne $H_{piéd} = 6,44$ de la partie centrale de la plage ainsi que de flux énergétiques.

4.4 Croisement des données morphologiques et hydrodynamiques

La Figure 31 vise à établir une ou plusieurs relations entre les mouvements relatifs de la ligne de végétation, et les différents indicateurs hydrodynamiques (niveaux extrêmes, flux énergétique) calculés pour la partie centrale de la plage de Sandvík. Elle ne semble cependant pas permettre, a priori, d'établir un lien direct entre les indicateurs hydrodynamiques et les mouvements relatifs représentés.

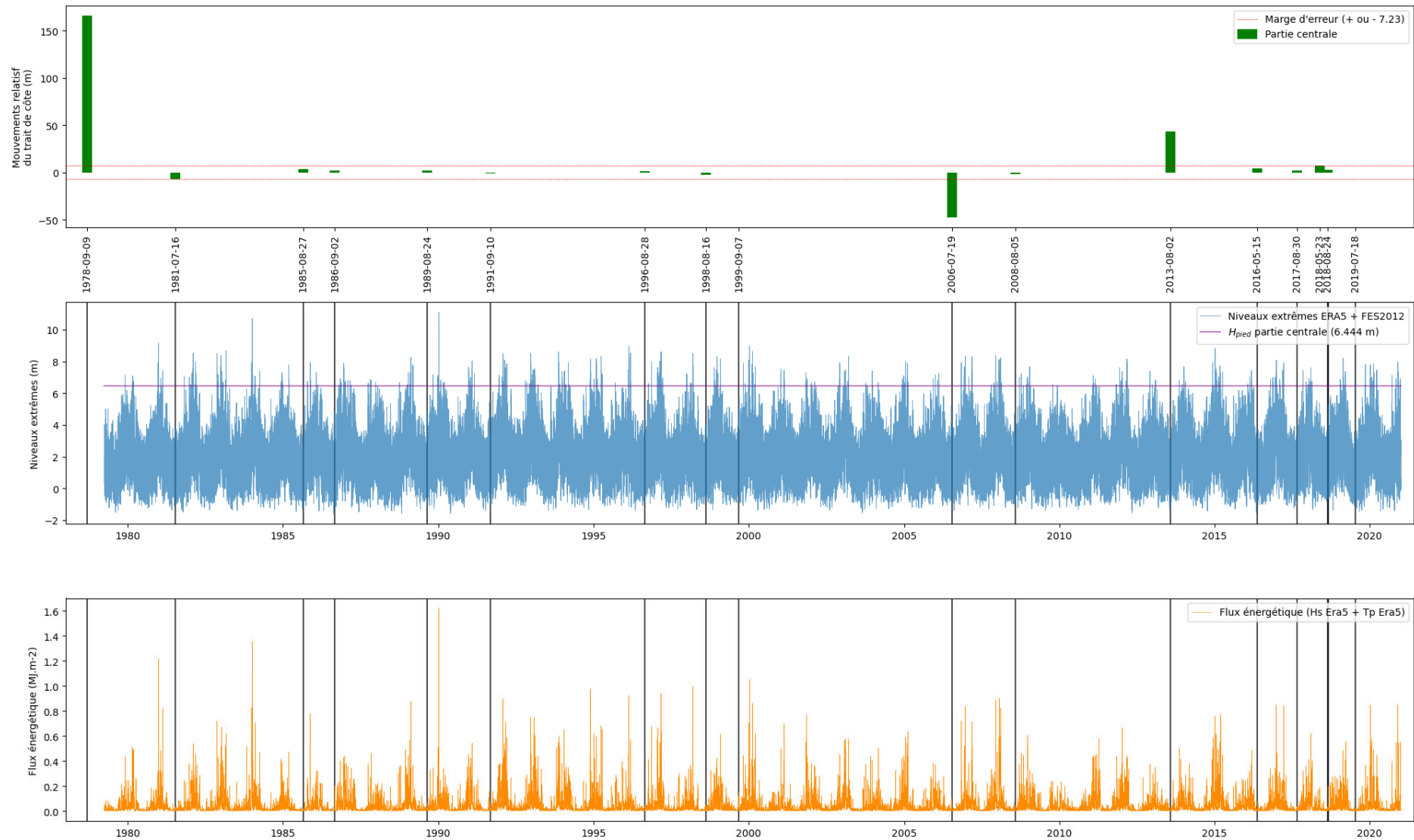


Figure 31: Comparaison entre le recul de la partie centrale de la plage ainsi que les niveaux extrêmes et flux énergétique pour la plage de Sandvík (1979-2020)

5 Discussions

L'étude de la cinématique du trait de côte ainsi que des données hydrodynamiques ne semble pas permettre de dégager une tendance d'évolution de la plage de Sandvík sur le long terme : nous pouvons donc au moins conclure que l'élévation du niveau marin sur la période 1957-2019 ne semble pas avoir entraîné un recul systématique du trait de côte. L'étude semble cependant indiquer 3 événements majeurs lors de la période d'étude de cette plage, que nous allons tenter de décrire et expliquer.

5.1 Période 1940-1978

Tout d'abord, la plage semble marquée par une grande phase de construction dunaire quantifiée entre 1957 et 1978. Cette construction reste difficile à expliquer, en raison de l'absence de données de modèles de houle et atmosphériques remontant à cette période. Mounthey et Russel (2006) mentionnent pour la plage de Sólheimasandur une construction de dunes à partir de 1940, en raison de jökulhaups (débâcles glaciaires) réguliers liés à la fonte du glacier Sólheimajökull situé à 8 km du site, et qui empêchaient jusqu'alors la végétation, nécessaire à la construction de dunes à ces latitudes, de pousser. Ces processus de construction dunaire liés à des apports sédimentaires réguliers ne semblent pas s'appliquer à Sandvík où aucun glacier n'existe ou n'a existé dans ces années où l'on ne constatait qu'une très faible (07/06/1957) voire inexistante (09/10/1940 et 24/08/1945) présence de dunes. Les dunes embryonnaires formées à Sandvík (Figure 33) ne semblent pas être de la même nature que ceux observés à Sólheimasandur (Figure 32). En effet, la principale espèce constructrice à Sólheimasandur s'avère être *Ammophila* (marram grass), tandis qu'à Sandvík, il semble que ce soit plutôt *Elymus arenarius* L. (lyme-grass) aussi appelée « Élyme des sables », présente en Islande (Gudmundsson et Gardar, 1996) et aux hautes latitudes en général (Ruz et Allard, 1994).



Figure 32: Nebkhas à Sólheimasandur
(Mounthey et Russel, 2006)



Figure 33 : Nebkhas à Sandvík (Grégoire Mureau, 2021)

L'étude du champ de dunes du Skeidarársandur central, dans le sud-est de l'Islande par Jean-Claude Bodéré (1989), composé d'élymes des sables, semble donner des pistes de réflexion intéressantes. En effet, l'auteur montre que dans cette zone un engraissement accéléré de ce champ dunaire au fur et à mesure qu'il était de plus en plus abrité des jökulhaups, et également en raison de l'abaissement du toit de la nappe phréatique en raison du retrait frontal du glacier Skeidarárjökull. En effet, la pousse optimale de l'élyme des sables nécessite la proximité d'une nappe phréatique peu profonde tout en ayant des sables de surface toujours secs. Il ne faut pas que la nappe affleure, autrement elle ralentirait fortement la croissance des plantes, lesquelles servent à piéger le sable ; également, le transit éolien du sable se retrouverait fortement ralenti. Il est possible que la subsidence progressive de Sandvík (environ 1 cm/an) ait fait remonter une nappe phréatique dans la partie avant de la plage, la rendant proche d'une épaisseur de sable sec où les différentes dunes de Sandvík se seraient alors formées. La présence de la zone humide dans l'arrière-plage depuis le 09/10/1940 qui se serait transformée progressivement en lagune (09/09/1978) semble confirmer cette hypothèse de subsidence. On peut d'ailleurs noter qu'avant que la lagune ne soit formée (09/10/1940, 24/08/1945, 07/06/1957, 19/08/1959) tel qu'on peut l'observer sur la photographie du 09/09/1978, aucune dune ne semblait

construite à cet emplacement qui semblait trop humide. L'action intense et/ou répétée d'événements tempétueux importants aurait pu ralentir la formation des dunes, mais l'absence de données de modèle antérieures à 1979 empêche d'aboutir à la détermination de tels événements.

5.2 Périodes 1999-2006

La seconde période morphogène majeure que nous pouvons identifier à partir des données morphologiques et hydrodynamiques s'étend de 1999 à 2006 (Figures 19, 20 et 25). En effet, la destruction de nombreuses dunes de plus de 24 000 m² semble indiquer qu'une ou plusieurs tempêtes intenses ont eu lieu, et que les conditions hydrodynamiques n'ont pas permis aux dunes de se reconstituer jusqu'à 2008. Parmi celles-ci, la tempête du 10/01/2000, bien que semblant violente par son niveau extrême maximum et son flux énergétique associé (respectivement 8,96 m et 1,05 MJ.m⁻²), n'égale pas d'autres tempêtes s'étant déroulées lors des hivers 1983-1984 et 1989-1990. En effet, le premier présente une tempête le 05/01/1984 ayant duré 18h, et présentant un niveau extrême et un flux énergétique associé de 10,7 m et 1,35 MJ.m⁻². De même, pour le deuxième hiver susmentionné, on retrouve également une tempête durant 18h, le 09/01/1990, présentant un niveau extrême maximal de 11,1 m et un flux énergétique associé de 1,62 MJ.m⁻². Cependant, ces deux tempêtes plus violentes que celle de 2000 ne semblent pas avoir engendré un recul du trait de côte, d'après les orthophotographies dont nous disposons (entre le 16/07/1981 et le 27/08/1985 puis entre le 24/08/1989 et le 10/09/1991). Il semble donc difficile d'établir un lien entre recul du trait de côte et présence de tempêtes les plus violentes (caractérisées par des niveaux extrêmes importants et des flux énergétiques associés importants également).

5.3 Périodes 2013-2017

Même si cette analyse ne porte pas sur les parties nord et sud de la plage, nous pouvons tout de même noter un recul important du trait de côte, associé à une destruction des dunes, durant la période 2013-2016 (Figure 17). Cette évolution peut être liée à une forte action anthropique (difficilement quantifiable), car ces deux secteurs constituent des voies d'accès à la plage pour les véhicules motorisés (4x4 et motocross). La présence de traces de pneus très visibles sur les photographies aériennes à ces endroits atteste de cette action anthropique. Elle pourrait également être liée à une tempête lors de l'hiver 2014, relativement importante par rapport aux autres constatées lors de la décennie passée (Figure 30). En opposition à cela, la présence de tempêtes bien plus importantes par le passé ne semblant pas avoir induit de recul du trait de côte interroge sur la stabilité des dunes.

6 Limites

Le travail mené dans le cadre de ce stage comporte de nombreuses limites qu'il est important de mentionner.

Tout d'abord, nous rencontrons un problème d'échantillonnage trop faible des prises de vues aériennes. Un échantillonnage annuel permettrait de décrire plus précisément l'évolution du secteur, notamment les variations interannuelles. Concernant les photographies aériennes traitées, le recours à une couche de référence pour chaque orthorectification appartenant à Loftmyndir, mais dont les métadonnées ne nous ont pas été fournies contribue à une incertitude difficile à quantifier. L'application par Loftmyndir d'une interpolation sur les photographies aériennes servant de base à la génération de cette couche de référence rend difficile l'évaluation de la réelle résolution de cette dernière, et complique l'orthorectification d'autres photographies aériennes par la technique de géoréférencement de points de contrôle. Également, aucun point fixe ne semble exister sur la plage : les points de contrôle utilisés pour l'orthocorrection se situent donc autour de cette dernière. Ensuite, l'acquisition et le traitement des données de terrain présentent également des limites. Tout d'abord, les campagnes de 2016 et 2017 ne couvrent pas la totalité de la plage de Sandvík du nord au sud. Seul le levé de 2018 a pu être utilisé pour déterminer la pente de la plage. L'orthomosaique de 2018 ne révèle quant à elle qu'environ la moitié de la surface intertidale, car le levé a été réalisé entre la marée basse et la marée haute, sur un cycle de marée qui n'était pas de vive eau. Il est alors possible que la pente moyenne de la plage calculée notamment dans la partie centrale, ait été surestimée. Un autre biais est également à prendre en compte : en effet, nous n'avons aucune idée des variations interannuelles (et saisonnières) de cette pente puisqu'un seul levé (2018) a été utilisé pour l'analyse morphométrique de la plage. La pente a ainsi été considérée tout au long de cette étude comme un paramètre constant de 1979 à 2020, impliqué dans les calculs de runup, ce qui constitue un biais potentiellement très important dans l'estimation des niveaux extrêmes. D'une manière générale, la présence de végétation sur les dunes de Sandvík lors des campagnes 2016, 2017 et 2018 pourrait avoir un impact sur l'élévation générée dans les MNE de terrain : le manque de temps n'a pas permis de corriger ce problème.

Concernant l'aspect géomorphologique de cette étude, l'évolution de la plage a été principalement décrite à travers la cinématique du trait de côte. L'évolution surfacique du système dunaire n'a pas été traitée par manque de temps ; l'analyse en termes de surfaces érodées ou en accrétion mériterait d'être faite. De plus, ce travail se concentre principalement sur les reculs d'un trait de côte défini par la ligne de végétation : cette dernière ne présentant que globalement peu de mouvement alors que la mer pourrait sembler progressivement progresser en direction des terres, il est difficile de ne pas s'interroger sur la pertinence de cet indicateur ; les laisses de mer (matérialisées par la présence de sable coquillé) pourraient constituer un indicateur plus pertinent, mais leurs comparaisons posent problème en raison de leur dépendance à la marée (difficile à corriger sans les heures précises des clichés). . Également, le tracé du trait de côte comporte des incertitudes en raison de la difficulté à définir le caractère végétalisé ou non de certains secteurs dunaires. En se basant sur l'indicateur choisi dans cette étude, on ne constate aucune tendance d'évolution de la plage (progradation ou rétrogradation) sur le long terme. Il est également impossible d'estimer la variabilité saisonnière et interannuelle du trait de côte en raison de la faible fréquence des campagnes de photographies aériennes. Une acquisition à plus haute fréquence (annuelle ou mensuelle) d'images satellite à haute résolution (e.g. Pléiades) pourrait permettre une étude approfondie de cette variabilité. Également, il est difficile de quantifier l'impact des activités anthropiques sur la plage de Sandvík, notamment dans les secteurs nord et sud de la plage soumis à une fréquentation de véhicules thermiques importante.

Concernant l'étude hydrodynamique de la plage de Sandvík, plusieurs limites peuvent également être pointées. On rappelle que la pente moyenne qui a été retenue pour le calcul du runup (et des niveaux d'eau extrêmes) ne prend pas en compte le fait qu'elle ait pu varier dans le temps. De plus, les erreurs quadratiques et systématiques importantes entre les données *in situ* de la bouée Gardskagadúfl et celles du modèle Era5 jouent également un rôle dans la faible précision des calculs de niveaux extrêmes, et de flux énergétiques. Il est également important de mentionner que la valeur seuil correspondant à la hauteur du pied de dune (i.e. 6,5 m) ne prend pas en compte la subsidence d'environ 1 cm par an : la prise en compte de ce paramètre reste à implémenter dans l'étude. Également, le calcul des niveaux extrêmes et flux énergétiques pour la période précédant le 01/04/1979 n'a pas pu être réalisé en raison de l'absence de données de hauteur significative et de périodes de pic dans la sortie de modèle ERA5. Ainsi, les forçages hydrodynamiques ne sont pas pris en compte dans l'explication de la construction rapide des dunes entre 1957 et 1978. Enfin, les calculs de flux énergétiques et niveaux ont été établis pour le point de coordonnées (64°N, 23°O), plus proche des sources de données *in situ* mobilisées pour la validation, et non le point (63,5°N, 23°O), situé à 55,56 km du premier point cité, et étant plus proche de Sandvík.

7 Conclusion

L'étude de l'évolution de la plage de Sandvík de 1940 à 2019 effectué dans le cadre de ce stage a été principalement centrée sur la mesure de la cinématique du trait de côte par photointerprétation sur la période 1957-2019. Il ressort que la plage de Sandvík a connu 3 phases d'évolutions majeures au cours des 80 dernières années.

Tout d'abord, la plage, presque dépourvue de dunes en 1940 et 1957 est entrée dans une phase constructive au terme de laquelle de nombreuses dunes se sont construites, et sont à l'origine d'une avancée moyenne du trait de côte calculée pour la partie centrale de la plage à 122 m, entre 1957 et 1978. Cette croissance peut s'expliquer par le développement de l'élyme des sables (espèce constructrice présente en Islande) en réponse à une subsidence d'environ 1 cm/an du site, qui aurait permis la remontée d'une nappe phréatique nécessaire au développement de cette espèce : bien que les géologues islandais n'aient pas réussi à déterminer l'origine de la subsidence propre à cette zone, la génération d'un lagon entre 1959 et 1978 semble confirmer un affaissement du site.

Ensuite, la partie centrale de la plage (autour du transect 3) a connu entre 1999 et 2006 un net recul, sur une surface d'environ 25000 m², que l'on aurait pu expliquer par la présence d'une tempête importante, lors de l'hiver 1999-2000, présentant des flux d'énergie élevés et atteignant des hauteurs extrêmes suffisamment importantes (pour atteindre les pieds de dunes (6,44m de hauteur), en partie reconstruites depuis. Cependant, la présence de tempêtes plus intenses, antérieures, dans l'histoire de cette plage, et ne semblant pas avoir induit de recul de la ligne de végétation vient contrarier cette interprétation. Il se pourrait que les dunes aient été plus stables lors des tempêtes plus importantes (et plus anciennes), et qu'elles aient commencé à perdre en stabilité en raison des activités anthropiques, menant à un recul entre 1999 et 2006.

Enfin, les parties nord (transect 1) et sud (transect 5) de la plage semblent avoir connu un recul entre 2013 et 2016 : ce recul peut s'expliquer par la présence d'une tempête relativement intense lors de l'hiver 2014-2015. Cependant, comme cette tempête est bien moins intense que d'autres s'étant produites par le passé, et n'ayant pas eu d'incidence sur la position de la ligne de végétation, on peut une fois de plus s'interroger sur la stabilité peut-être décroissante des dunes de Sandvík, alors fragilisées et vulnérables à des tempêtes qu'elles auraient autrefois pu absorber sans recul.

L'étude de la plage selon les paramètres hydrodynamiques (niveaux extrêmes et flux énergétiques) n'a pas permis d'établir un lien évident avec les mouvements relatifs du trait de côte. L'étude pourrait se poursuivre en choisissant un autre indicateur pour le trait de côte, comme les laisses de mer contenant du sable coquillé (indiquant la présence de la berme) : cependant, pour chaque trait de côte relevé, l'heure exacte de la prise de vue du site est primordiale afin de corriger la position de la marée et permettre la comparaison entre les différentes orthophotographies.

Cette étude comporte de nombreuses limites, et des descriptions annuelle et interannuelle permettraient de décrire plus précisément la plage (variabilités de la pente, annuelle du trait de côte), et d'affiner les résultats obtenus ici. Également, l'étude des forçages éoliens et de leur implication sur le transport sédimentaire par déflation n'a pas été traitée. Ainsi, les processus de transit sédimentaire éolien à l'origine de l'engraissement de la plage entre 2016 et 2017 n'ont pas été analysés.

8 Bibliographie

- Bodéré, Jean-Claude. « Les accumulations dunaires littorales d'Islande entre le Myrdalsjökull et les fjords de l'est ». *Hommes et Terres du Nord* 3, n° 1 (1989): 147-53. <https://doi.org/10.3406/htn.1989.2220>.
- González-Villanueva, Rita, et Henrik Hargitai. « Blowout Dune and Hollow », 2014. https://doi.org/10.1007/SpringerReference_367945.
- Greipsson, Sigurdur, et Anthony Davy. « Leymus arenarius: Uses and characteristics of a dune-building grass ». *Icelandic Agricultural Sciences* 8 (1 janvier 1994): 41-50.
- Gudmundsson, Gardar. « Gathering and processing of lyme-grass (*Elymus arenarius* L.) in Iceland: an ethnohistorical account ». *Vegetation History and Archaeobotany* 5, n° 1/2 (1996): 13-23.
- Harley, Mitchell. « Coastal Storm Definition », 1-22, 2017. <https://doi.org/10.1002/9781118937099.ch1>.
- Hersbach, Hans, Bill Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, Joaquín Muñoz-Sabater, Julien Nicolas, et al. « The ERA5 Global Reanalysis ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146, n° 730 (2020): 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Holthuijsen, Leo H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>.
- Lyard, F., Fabien Lefèvre, Thierry Letellier, et Olivier Francis. « Modelling the global ocean tides: Modern insights from FES2004 ». *Ocean Dynamics* 56 (1 décembre 2006): 394-415. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0086-x>.
- Michalczywska, Karolina, Sigrun Hreinsdottir, A. Auriac, Thorbjorg Agustsdottir, Thóra Árnadóttir, Halldór Geirsson, Andy Hooper, et al. « The inflation and deflation episodes in the Krísuvík geothermal area ». *AGU Fall Meeting Abstracts*, 1 décembre 2011, 2589.
- Mountney, Nigel, et Andrew Russell. « Coastal aeolian dune development, Sólheimasandur, southern Iceland ». *Sedimentary Geology - SEDIMENT GEOL* 192 (1 décembre 2006): 167-81. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.04.004>.
- Receveur, Mylene, Freysteinn Sigmundsson, Vincent Drouin, et Michelle Parks. « Ground deformation due to steam cap processes at Reykjanes, SW-Iceland: effects of geothermal exploitation inferred from interferometric analysis of Sentinel-1 images 2015–2017 ». *Geophysical Journal International* 216, n° 3 (1 mars 2019): 2183-2212. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy540>.
- Ruz, Marie-Hélène, et Michel Allard. « Foredune Development along a Subarctic Emerging Coastline, Eastern Hudson Bay, Canada ». *Marine Geology* 117, n° 1 (1 mars 1994): 57-74. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(94\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0025-3227(94)90006-X).
- Ruz, Marie-Hélène, et Patrick Hesp. « Geomorphology of high-latitude coastal dunes: a review ». *Geol. Soc. Lond. Special Publ.* 388 (1 janvier 2014): 199-212.
- Sæmundsson, Kristján, Magnús Á. Sigurgeirsson, et Guðmundur Ómar Friðleifsson. « Geology and Structure of the Reykjanes Volcanic System, Iceland ». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 391 (1 février 2020): 106501. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.11.022>.
- Sanjaume, Eulalia, et Jon Tolgensbakk. « Beach ridges from the Varanger Peninsula (Arctic Norwegian coast): Characteristics and significance ». *Geomorphology* 104 (1 mars 2009): 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.029>.
- Stéphan, Pierre, Guillaume Dodet, Serge Suanez, Isabel Tardieu, et Laurence David. « Dynamique pluri-décennale du trait de côte en lien avec les variations des forçages météo-océaniques au nord de la Bretagne (baie de Goulven, France) ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 24 (21 avril 2018). <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11908>.

Stockdon, Hilary F., Rob A. Holman, Peter A. Howd, et Asbury H. Sallenger. « Empirical Parameterization of Setup, Swash, and Runup ». *Coastal Engineering* 53, n° 7 (1 mai 2006): 573-88.

<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>.

Tamer Bagatur. « Modified Newton–Raphson Solution for Dispersion Equation of Transition Water Waves ». *Journal of Coastal Research - J COASTAL RES* 23 (1 novembre 2007): 1588-92.

<https://doi.org/10.2112/06-0758.1>.

9 Annexes

Rapport Metashape campagne 2016

Plage de Sandvík (15/05/2016)

Rapport de traitement Metashape

28 April 2021



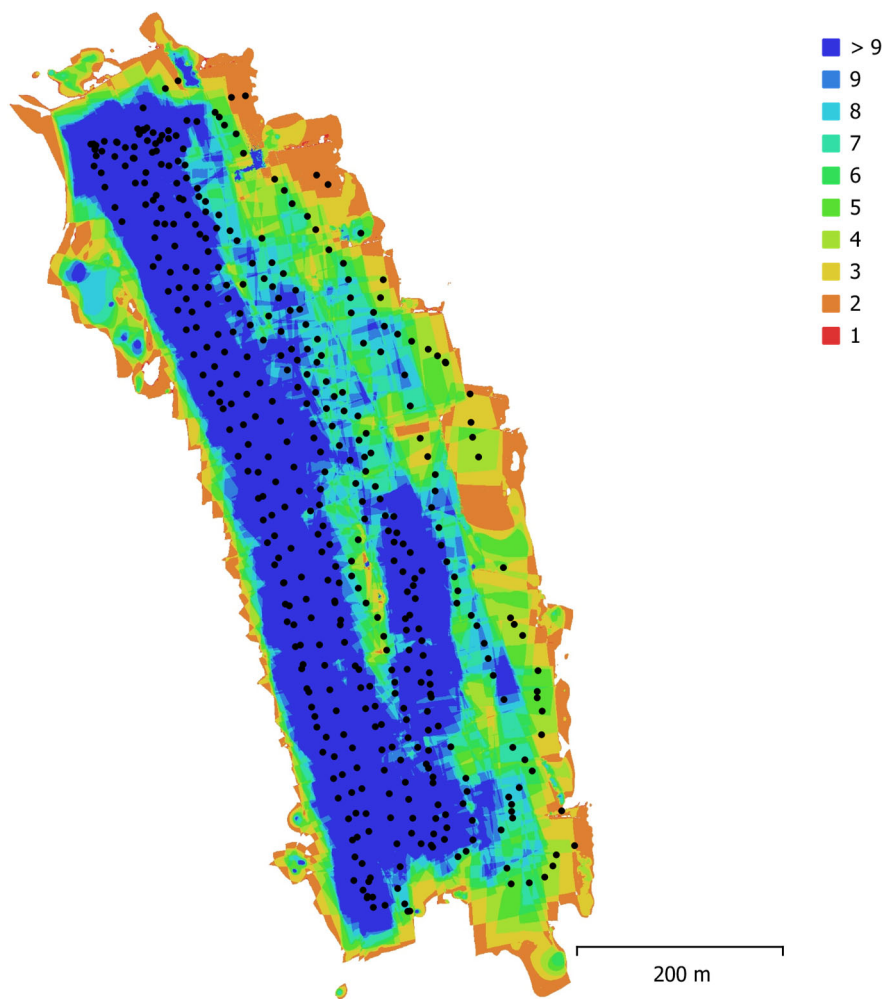


Fig. 1. Emplacements des caméras et chevauchement des images.

Nombre d'images:	424	Stations de caméras:	424
Altitude de vol:	68.3 m	Points de liaison:	501,106
Résolution au sol:	1.66 cm/px	Projections:	1,501,609
Zone de couverture:	0.254 km ²	Erreur de reprojection:	0.462 px

Modèle de caméra	Résolution	Longueur focale	Taille de pixel	Précalibré
GR, GR LENS (18.3mm)	4928 x 3264	18.3 mm	4.78 x 4.78 µm	Non

Tableau 1. Caméras.

Calibration de la caméra

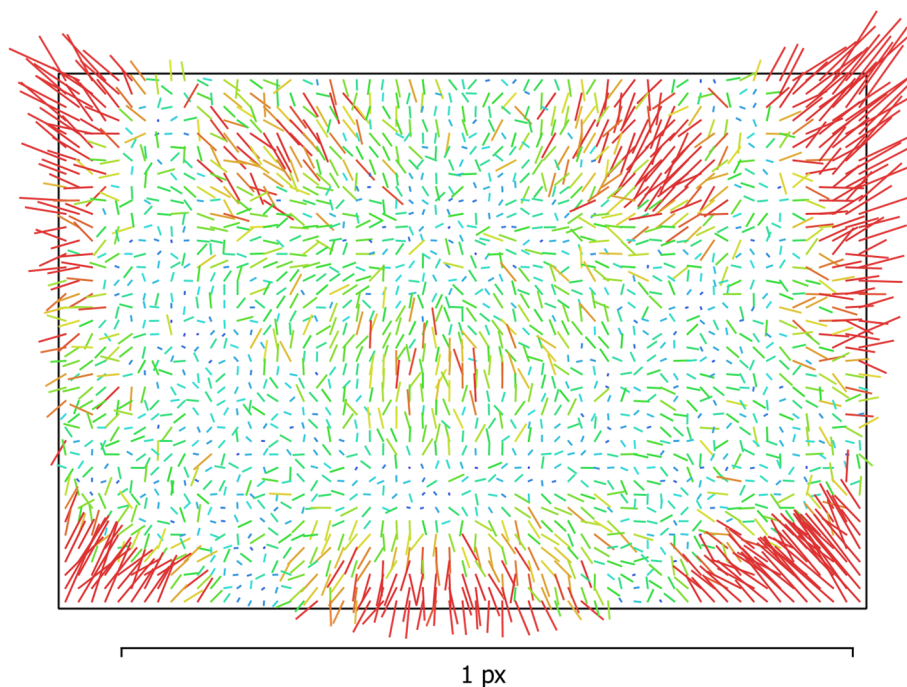


Fig. 2. Résiduelles des points de liaison pour GR, GR LENS (18.3mm).

GR, GR LENS (18.3mm)

424 images

Type
Cadre

Résolution
4928 x 3264

Longueur focale
18.3 mm

Taille de pixel
4.78 x 4.78
 μm

	Valeur	Erreur	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3844	0.049	1.00	0.14	0.44	-0.17	0.14	-0.08	-0.00	-0.11
Cx	-40.8802	0.021		1.00	0.09	0.01	-0.02	0.04	0.62	-0.01
Cy	-6.60516	0.021			1.00	-0.05	0.03	-0.01	0.00	0.29
K1	-0.0721294	1.7e-05				1.00	-0.97	0.91	0.01	0.00
K2	0.0891663	6.9e-05					1.00	-0.98	-0.01	0.00
K3	-0.0194283	8.2e-05						1.00	0.02	-0.00
P1	8.21653e-05	1.2e-06							1.00	0.02
P2	3.32055e-06	8.3e-07								1.00

Tableau 2. Coefficients de calibration et matrice de corrélation.

Points de contrôle au sol

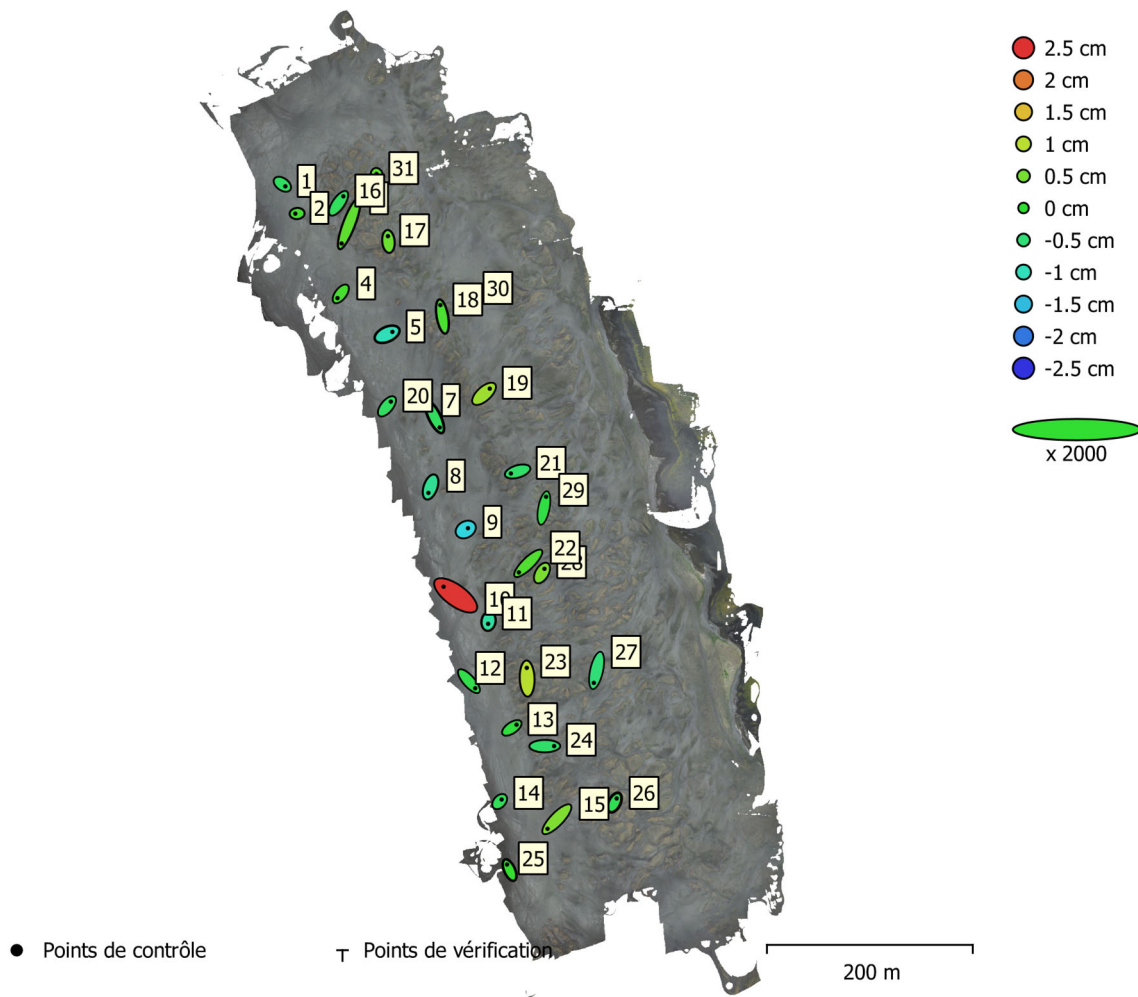


Fig. 3. Emplacements des points de contrôle au sol et estimations d'erreur.

L'erreur Z est représentée

par la couleur de l'ellipse. Les erreurs X et Y sont représentées par la forme de l'ellipse.

Les emplacements estimés des points de contrôle au sol sont marqués d'un point ou d'une croix.

Nombre	Erreur X (cm)	Erreur Y (cm)	Erreur Z (cm)	Erreur XY (cm)	Total (cm)
30	0.49229	0.714796	0.681499	0.867918	1.1035

Tableau 3. Points de contrôle RMSE.

X - Est, Y - Nord, Z - Altitude.

Etiquette	Erreur X (cm)	Erreur Y (cm)	Erreur Z (cm)	Total (cm)	Image (px)
-----------	---------------	---------------	---------------	------------	------------

1	0.288413	-0.202843	-0.3508	0.497382	0.219 (19)
2	-0.177018	-0.0122568	0.142952	0.227861	0.263 (9)
3	-0.734454	-1.92869	0.331163	2.0902	0.571 (21)
4	-0.318731	-0.413434	0.156825	0.545079	0.338 (10)
5	0.517014	0.234265	-0.966983	1.12127	0.254 (19)
20	0.379042	0.460636	-0.337324	0.685308	0.277 (10)
7	0.493418	-1.00598	-0.308896	1.16227	0.275 (12)
8	-0.204662	-0.573542	-0.713869	0.938321	0.397 (12)
9	0.213923	0.126347	-1.31351	1.3368	0.344 (17)
10	-1.17269	0.846421	2.4767	2.86804	2.373 (6)
11	-0.0404738	-0.248403	-0.803801	0.842281	0.225 (21)
12	0.612193	-0.686944	-0.183105	0.93819	0.387 (11)
13	0.456252	0.309183	-0.096211	0.559479	0.188 (20)
14	0.188228	0.200955	-0.289785	0.399734	0.596 (9)
15	-0.899346	-0.932231	0.566284	1.4137	0.207 (19)
25	-0.245602	0.54542	0.0361655	0.599259	0.360 (4)
16	0.470282	0.679417	-0.316023	0.884671	0.233 (17)
17	-0.0480975	0.514029	0.414984	0.662382	0.275 (15)
18	-0.200791	1.11627	0.185836	1.14931	0.387 (8)
30	0.216734	-0.329401	0.192597	0.438831	0.380 (11)
19	0.555823	0.50097	0.788263	1.08686	0.396 (10)
21	-0.653997	-0.194789	-0.398603	0.790278	0.608 (8)
29	0.210928	1.0914	-0.143142	1.12077	0.290 (7)
28	0.240539	0.407585	0.54751	0.723707	0.461 (6)
22	-0.90845	-0.879811	0.231942	1.28575	0.287 (13)

23	-0.0356158	1.03711	0.975917	1.42453	0.476 (10)
24	0.904807	0.0053009	-0.408106	0.9926	0.265 (16)
27	-0.267657	-1.20847	-0.50555	1.33702	0.447 (14)
26	0.200545	0.405133	-0.248059	0.51564	0.335 (14)
31	-0.0405622	0.136358	0.336628	0.365454	0.304 (10)
Total	0.49229	0.714796	0.681499	1.1035	0.457

Tableau 4. Points de contrôle.

X - Est, Y - Nord, Z - Altitude.

Modèle Numérique d'élévation

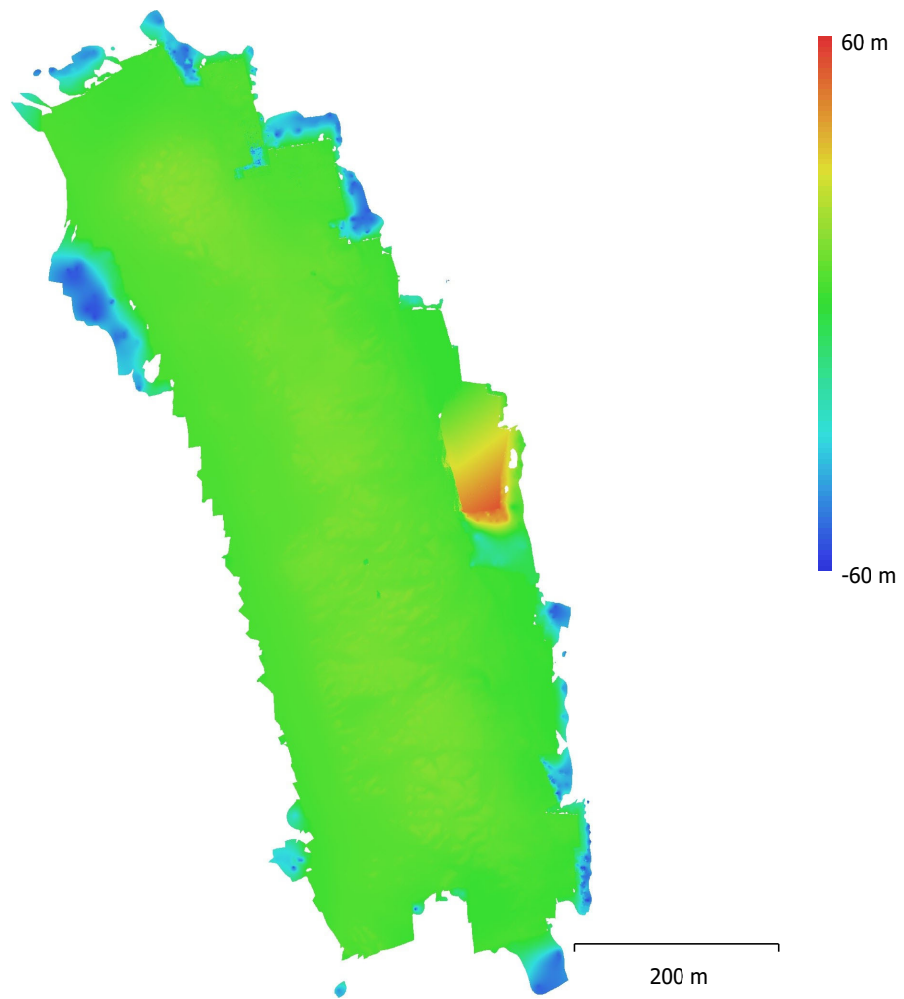


Fig. 4. Modèle numérique d'élévation reconstruit.

Résolution: 1.66 cm/px

Densité des points: 0.364 points/cm²

Paramètres de traitement

Général

Caméras	424
Caméras alignées	424
Repères	30
Système de coordonnées	ISN93 / Lambert 1993 (EPSG::3057) Lacet, Tangage, Roulis

Angles de rotation

Nuage de point

Points	501,106 de 555,012
Erreur RMS de reprojection	0.158661 (0.461617 px)
Erreur Max de reprojection	0.633619 (21.6295 px)
Taille moyenne de point	2.79507 px
Couleurs des points	3 bandes, uint8
Points-clé	Non 3.1001

Multiplicité moyenne des points de liaison

Paramètres d'alignement

Précision	La plus haute
Présélection générique	Oui
Présélection par références	Non
Limite de points	40,000
Limite de points de liaison	4,000
Exclure les points de liaison fixes	Oui
Correspondance d'images guidée	Non
Ajustement progressif du modèle de la caméra	Non
Temps de concordance	6 minutes 7 secondes
Utilisation de la mémoire de correspondance	245.45 MB
Temps d'alignement	3 minutes 40 secondes 163.92 MB

Utilisation de la mémoire d'alignement

Paramètres d'optimisation

Paramètres	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajustement progressif du modèle de la caméra	Non
Durée d'optimisation	6 secondes
Date created	2021:04:16 08:33:20
Version du programme	1.7.2.12070 39.37 MB

Taille du fichier

Cartes de profondeur

424

Nombre

Paramètres de génération des cartes de profondeur

Qualité	Ultra haute
Mode de filtrage	Léger
Temps de traitement	6 heures 20 minutes
Utilisation de la mémoire	3.98 GB
Date created	2021:04:19 13:01:17
Version du programme	1.7.2.12070 10.10 GB

Taille du fichier

Nuage de points dense

Points	936,170,520 3 bandes, uint8
--------	--------------------------------

Couleurs des points

Paramètres de génération des cartes de profondeur

Qualité	Ultra haute
Mode de filtrage	Léger

Temps de traitement	6 heures 20 minutes
Utilisation de la mémoire	3.98 GB
Paramètres de génération du nuage de points dense	
Temps de traitement	8 heures 16 minutes
Utilisation de la mémoire	13.11 GB
Date created	2021:04:19 21:18:04
Version du programme	1.7.2.12070
Taille du fichier	12.09 GB
MNE	
Taille	49,647 x 76,875
Système de coordonnées	ISN93 / Lambert 1993 (EPSG::3057)
Paramètres de reconstruction	
Données source	Nuage dense
Interpolation	Activé
Temps de traitement	40 minutes 17 secondes
Utilisation de la mémoire	329.91 MB
Date created	2021:04:20 18:42:27
Version du programme	1.7.2.12070
Taille du fichier	4.12 GB
Orthomosaique	
Taille	34,311 x 57,921
Système de coordonnées	ISN93 / Lambert 1993 (EPSG::3057)
Couleurs	3 bandes, uint8
Paramètres de reconstruction	
Mode de fusion	Mosaïque
Surface	MNE
Activer le remplissage des trous	Oui
Activer le filtre fantôme	Non
Temps de traitement	18 minutes 46 secondes
Utilisation de la mémoire	4.68 GB
Date created	2021:04:21 10:35:00
Version du programme	1.7.2.12070

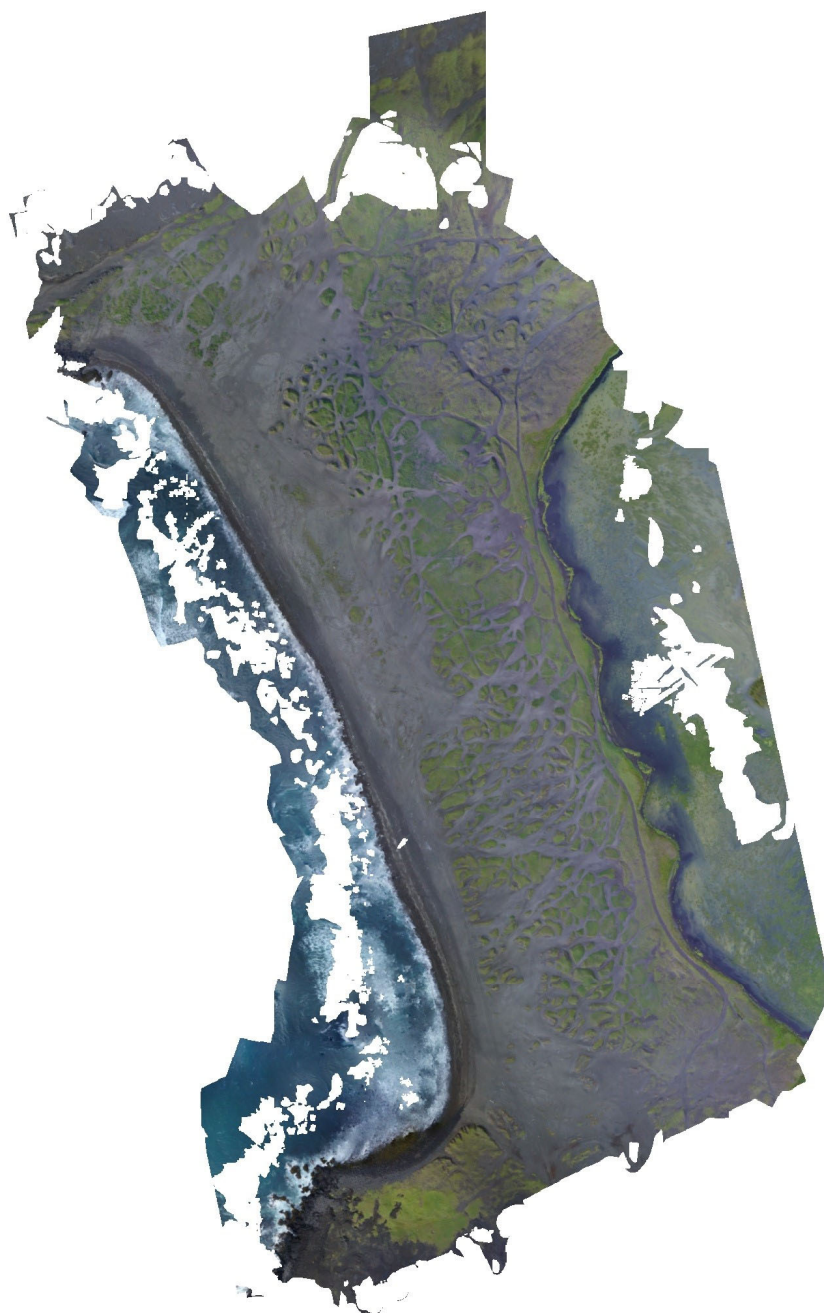
Taille du fichier	5.43 GB
Système	
Nom du programme	Agisoft Metashape Professional
Version du programme	1.7.3 build 12248
Système d'exploitation	Windows 64 bit
RAM	15.87 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz
GPU(s)	Intel(R) UHD Graphics
	NVIDIA GeForce RTX 2060

Rapport Metashape campagne 2017

Plage de Sandvík (30/08/2017)

Rapport de traitement Metashape

05 May 2021



Données du levé

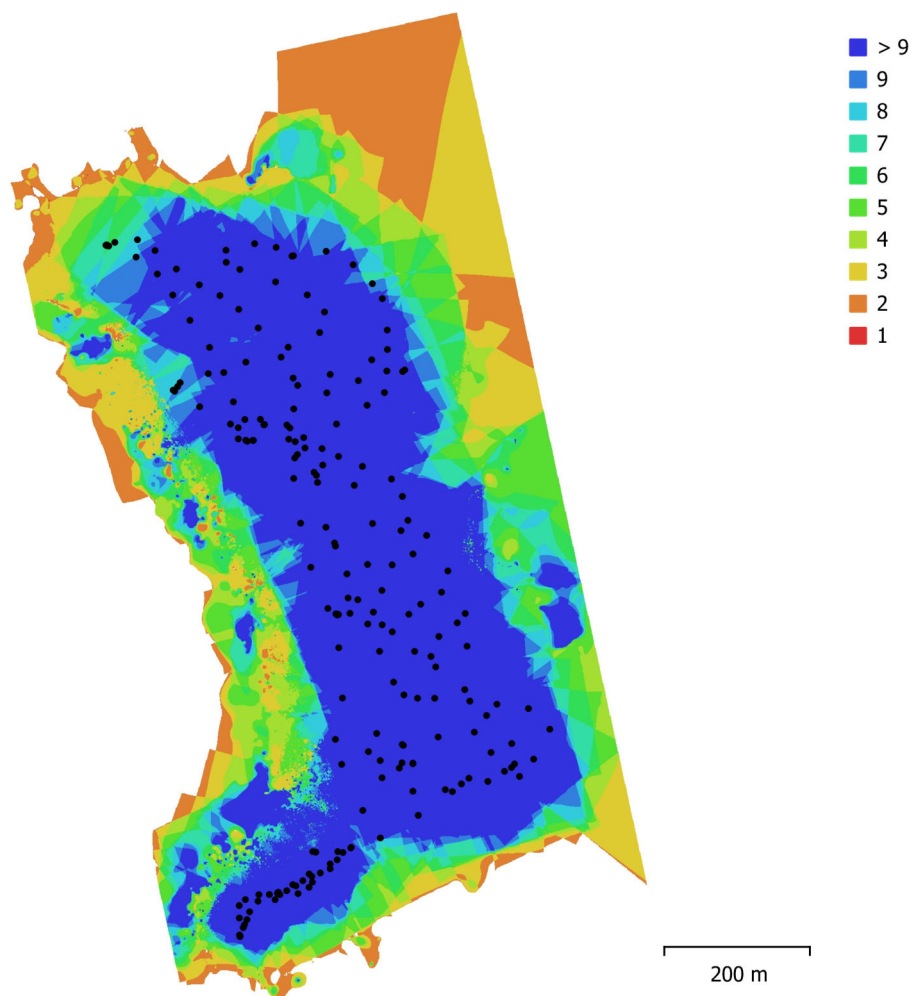


Fig. 1. Emplacements des caméras et chevauchement des images.

Nombre d'images:	210	Stations de caméras:	210
Altitude de vol:	117 m	Points de liaison:	208,999
Résolution au sol:	4.43 cm/px	Projections:	710,680
Zone de couverture:	0.674 km ²	Erreur de reprojection:	1.35 px

Modèle caméra	de	Résolution	Longueur focale	Taille de pixel	Précalibré
FC300X (3.61mm)		4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μm	Non

Tableau 1. Caméras.

Calibration de la caméra

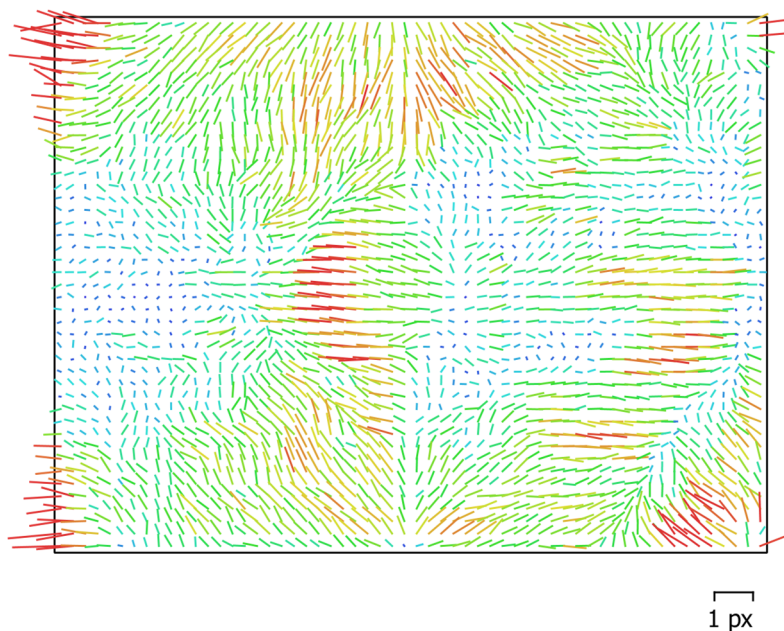


Fig. 2. Résiduelles des points de liaison pour FC300X (3.61mm).

FC300X (3.61mm)

210 images

Type
Cadre

Résolution
4000 x 3000

Longueur focale
3.61 mm

Taille de pixel
1.56 x 1.56 μm

	Valeur	Erreur	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	2318.13	0.29	1.00	- 0.09	- 0.25	- 0.03	0.03	0.05	- 0.02	0.03
Cx	-21.3687	0.08		1.00	0.01	- 0.01	- 0.00	0.00	0.36	0.01
Cy	1.84429	0.08			1.00	- 0.02	0.03	- 0.05	0.00	0.23
K1	-0.00671119	6.7e-05				1.00	- 0.95	0.89	- 0.00	- 0.02
K2	-0.000367745	0.00013					1.00	- 0.98	- 0.00	0.03
K3	0.00985226	8.4e-05						1.00	- 0.01	- 0.02
P1	-0.000538615	4.7e-06							1.00	- 0.00
P2	-0.000237355	4.1e-06								1.00

Tableau 2. Coefficients de calibration et matrice de corrélation.

Points de contrôle au sol

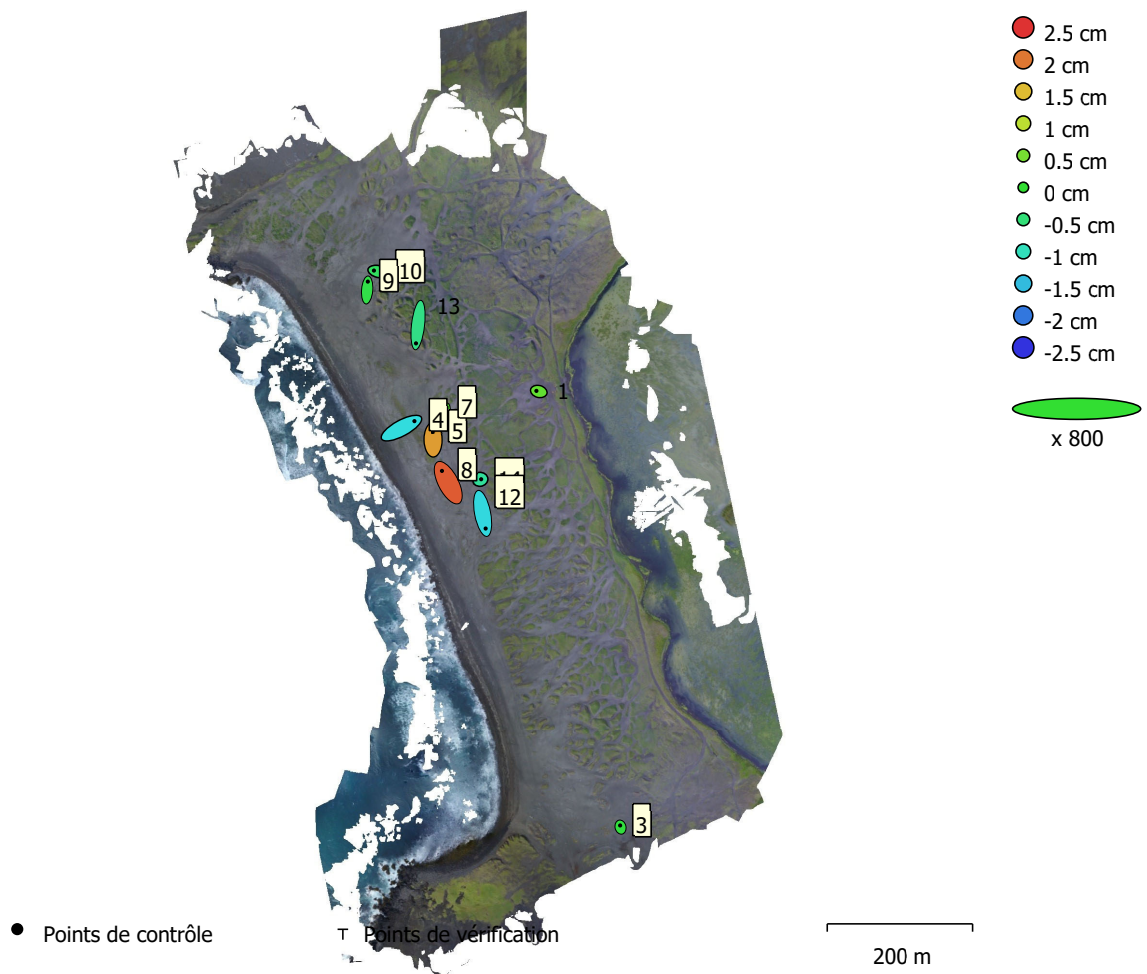


Fig. 3. Emplacements des points de contrôle au sol et estimations d'erreur.

L'erreur Z est représentée

par la couleur de l'ellipse. Les erreurs X et Y sont représentées par la forme de l'ellipse.

Les emplacements estimés des points de contrôle au sol sont marqués d'un point ou d'une croix.

Nombre	Erreur X (cm)	Erreur Y (cm)	Erreur Z (cm)	Erreur XY (cm)	Total (cm)
11	1.64042	3.1517	1.05846	3.55305	3.70736

Tableau 3. Points de contrôle RMSE.

X - Est, Y - Nord, Z - Altitude.

Etiquette	Erreur X (cm)	Erreur Y (cm)	Erreur Z (cm)	Total (cm)	Image (px)
10	-1.61739	0.340981	-0.324428	1.68448	1.018 (10)

9	0.225625	2.86906	-0.164322	2.8826	2.346 (12)
13	-0.723477	-6.29706	-0.600553	6.36687	6.938 (14)
4	4.43812	2.40422	-1.25925	5.2022	2.194 (25)
5	-0.0481214	2.8476	1.73025	3.3324	2.207 (27)
8	-2.12381	4.07078	2.20086	5.09172	5.420 (20)
14	0.377922	0.0372583	-0.754109	0.84433	1.306 (17)
12	1.01164	-5.18241	-1.29229	5.43606	3.017 (14)
3	-0.130587	0.576461	-0.0869683	0.597431	1.216 (7)
1	-0.812989	0.221085	0.344711	0.910305	6.493 (20)
7	-0.596928	-1.88798	0.206094	1.99079	2.784 (24)
Total	1.64042	3.1517	1.05846	3.70736	3.829

Tableau 4. Points de contrôle.

X - Est, Y - Nord, Z - Altitude.

Modèle Numérique d'élévation

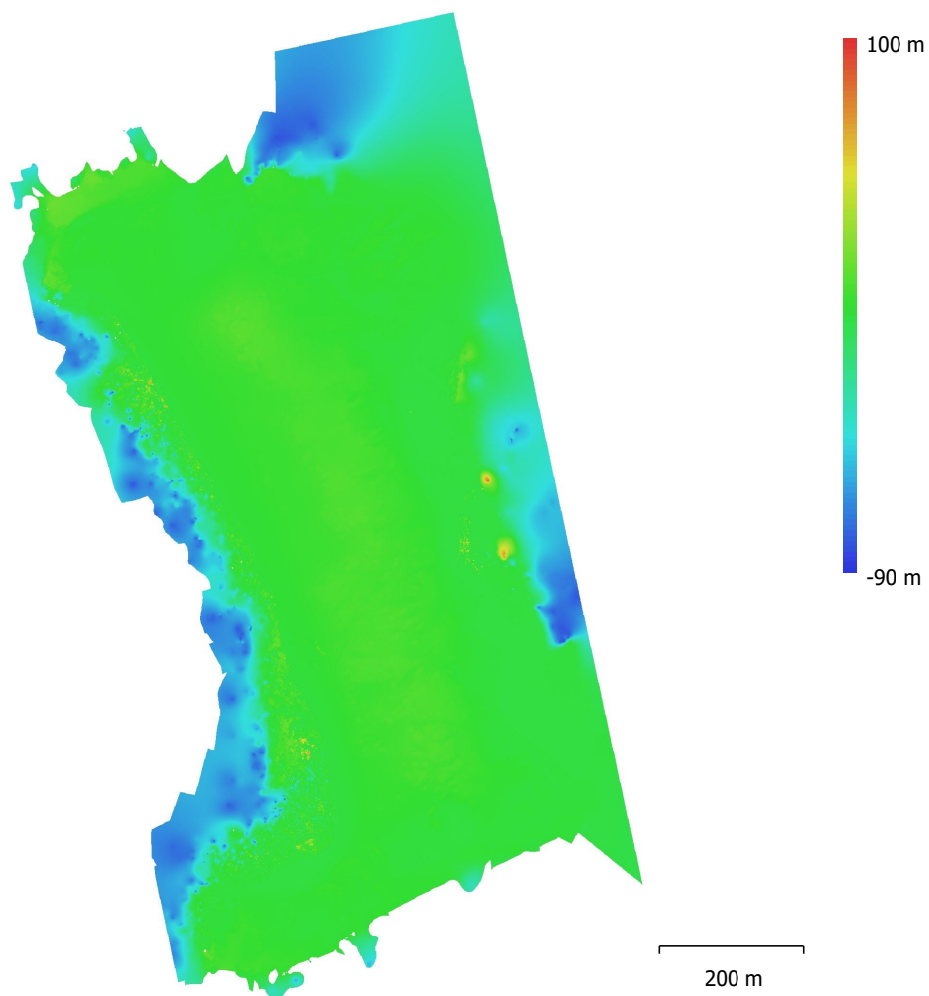


Fig. 4. Modèle numérique d'élévation reconstruit.

Résolution: 4.43 cm/px

Densité des points: 510 points/m²

Paramètres de traitement

Général

Caméras	210
Caméras alignées	210
Repères	11
Système de coordonnées	ISN93 / Lambert 1993 (EPSG::3057) Lacet, Tangage, Roulis
Angles de rotation	
Nuage de point	
Points	208,999 de 239,128
Erreur RMS de reprojection	0.523346 (1.34529 px)
Erreur Max de reprojection	2.89877 (33.222 px)
Taille moyenne de point	2.94729 px
Couleurs des points	3 bandes, uint8
Points-clé	Non 3.58295
Multiplicité moyenne des points de liaison	
Paramètres d'alignement	
Précision	La plus haute
Présélection générique	Oui
Présélection par références	Source
Limite de points	40,000
Limite de points de liaison	4,000
Exclure les points de liaison fixes	Oui
Correspondance d'images guidée	Non
Ajustement progressif du modèle de la caméra	Non
Temps de concordance	2 minutes 16 secondes
Utilisation de la mémoire de correspondance	2.65 GB
Temps d'alignement	3 minutes 33 secondes 57.46 MB
Utilisation de la mémoire d'alignement	
Paramètres d'optimisation	
Paramètres	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajustement progressif du modèle de la caméra	Non
Durée d'optimisation	7 secondes
Date created	2021:04:28 11:38:36
Version du programme	1.7.3.12248 18.57 MB
Taille du fichier	
Cartes de profondeur	
Nombre	210
Paramètres de génération des cartes de profondeur	
Qualité	Ultra haute
Mode de filtrage	Léger
Temps de traitement	1 heure 25 minutes
Utilisation de la mémoire	4.49 GB
Date created	2021:05:05 15:29:25
Version du programme	1.7.3.12248 3.22 GB
Taille du fichier	
Nuage de points dense	
Points	292,862,568 3 bandes, uint8
Couleurs des points	
Paramètres de génération des cartes de profondeur	
Qualité	Ultra haute
Mode de filtrage	Léger

Temps de traitement	1 heure 25 minutes
Utilisation de la mémoire	4.49 GB
Paramètres de génération du nuage de points dense	
Temps de traitement	1 heure 40 minutes
Utilisation de la mémoire	12.64 GB
Date created	2021:05:05 17:09:31
Version du programme	1.7.3.12248
Taille du fichier	3.79 GB
MNE	
Taille	21,468 x 35,107
Système de coordonnées	ISN93 / Lambert 1993 (EPSG::3057)
Paramètres de reconstruction	
Données source	Nuage dense
Interpolation	Activé
Temps de traitement	10 minutes 37 secondes
Utilisation de la mémoire	360.18 MB
Date created	2021:05:05 18:01:20
Version du programme	1.7.3.12248
Taille du fichier	1.66 GB
Orthomosaique	
Taille	19,778 x 30,654
Système de coordonnées	ISN93 / Lambert 1993 (EPSG::3057)
Couleurs	3 bandes, uint8
Paramètres de reconstruction	
Mode de fusion	Mosaïque
Surface	MNE
Activer le remplissage des trous	Oui
Activer le filtre fantôme	Non
Temps de traitement	12 minutes 18 secondes
Utilisation de la mémoire	4.04 GB
Date created	2021:05:05 18:24:38
Version du programme	1.7.3.12248

Taille du fichier 2.32 GB

Système

Nom du programme Agisoft Metashape Professional

Version du programme 1.7.3 build 12248

Système d'exploitation Windows 64 bit

RAM 15.87 GB

CPU Intel(R) Core(TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz

GPU(s) Intel(R) UHD Graphics

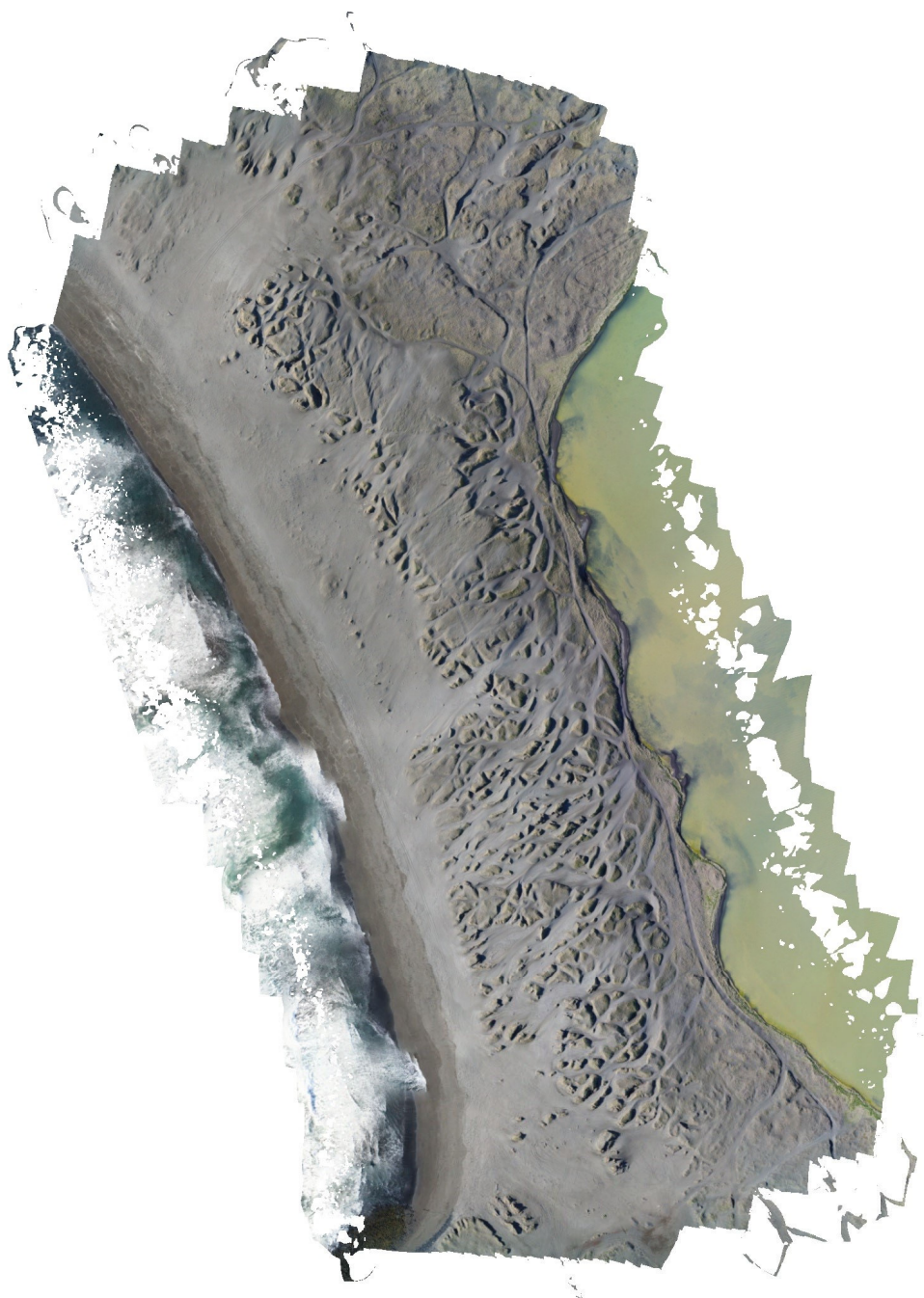
NVIDIA GeForce RTX 2060

Rapport Metashape campagne 2018

Plage de Sandvík (23/05/2018)

Rapport de traitement Metashape

28 April 2021



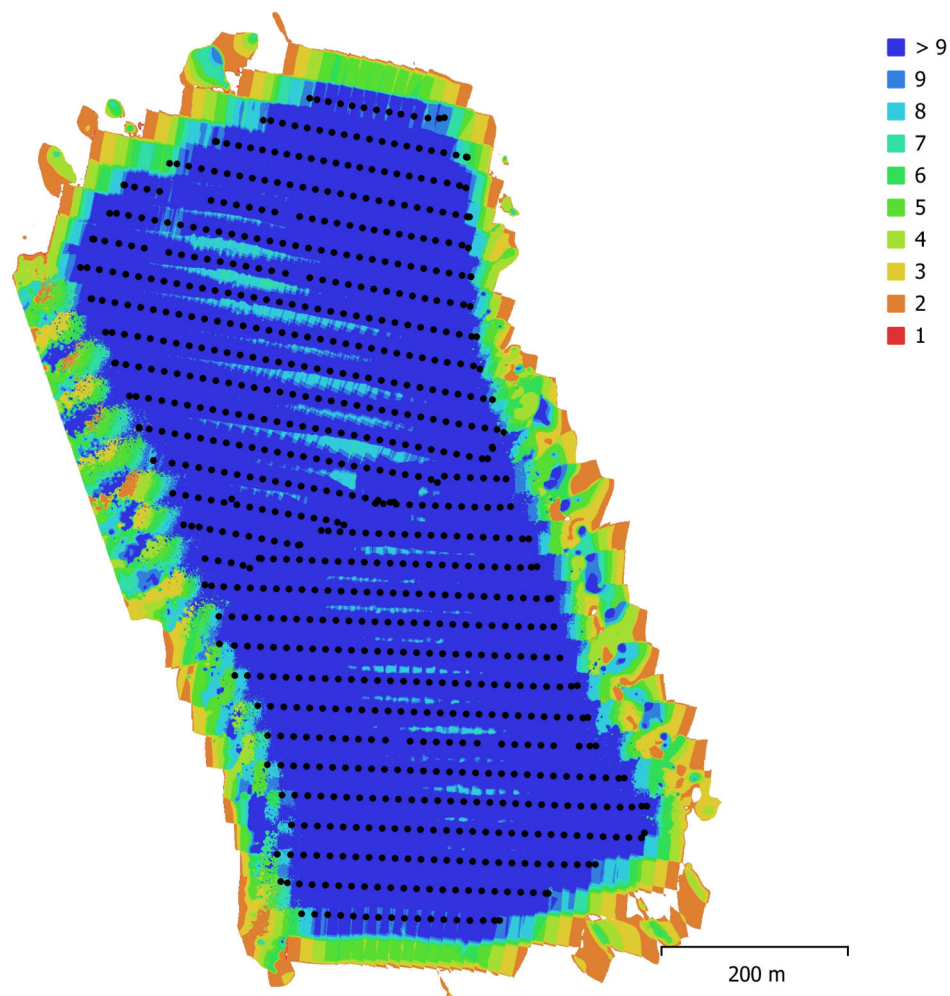


Fig. 1. Emplacements des caméras et chevauchement des images.

Nombre d'images:	788	Stations de caméras:	788
Altitude de vol:	70.7 m	Points de liaison:	680,870
Résolution au sol:	1.72 cm/px	Projections:	2,823,819
Zone de couverture:	0.489 km ²	Erreur de reprojection:	0.509 px

Modèle caméra	de	Résolution	Longueur focale	Taille de pixel	Précalibré
FC6310 (8.8mm)		5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μ m	Non

Tableau 1. Caméras.

Calibration de la caméra

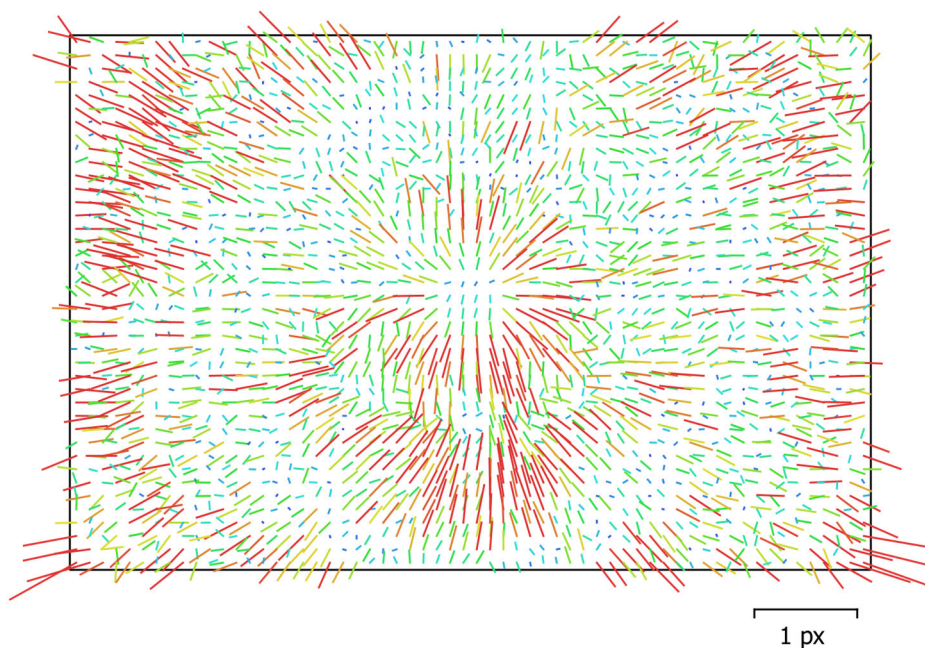


Fig. 2. Résiduelles des points de liaison pour FC6310 (8.8mm).

FC6310 (8.8mm)

788 images

Type
Cadre

Résolution
5472 x 3648

Longueur focale
8.8 mm

Taille de pixel
2.41 x 2.41
 μm

	Valeur	Erreur	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3682.12	0.33	1.00	0.15	-0.78	0.02	-0.09	0.17	-0.11	-0.14
Cx	-5.32215	0.055		1.00	-0.06	0.01	-0.02	0.04	0.10	0.04
Cy	5.71212	0.087			1.00	-0.02	0.07	-0.13	0.11	0.27
K1	0.00483465	1.2e-05				1.00	-0.96	0.90	0.01	-0.01
K2	-0.0116292	3.5e-05					1.00	-0.98	0.00	0.01
K3	0.0115694	3.2e-05						1.00	-0.01	-0.02
P1	-0.00082814	9.4e-07							1.00	-0.01
P2	-0.000822074	7.5e-07								1.00

Tableau 2. Coefficients de calibration et matrice de corrélation.

Points de contrôle au sol

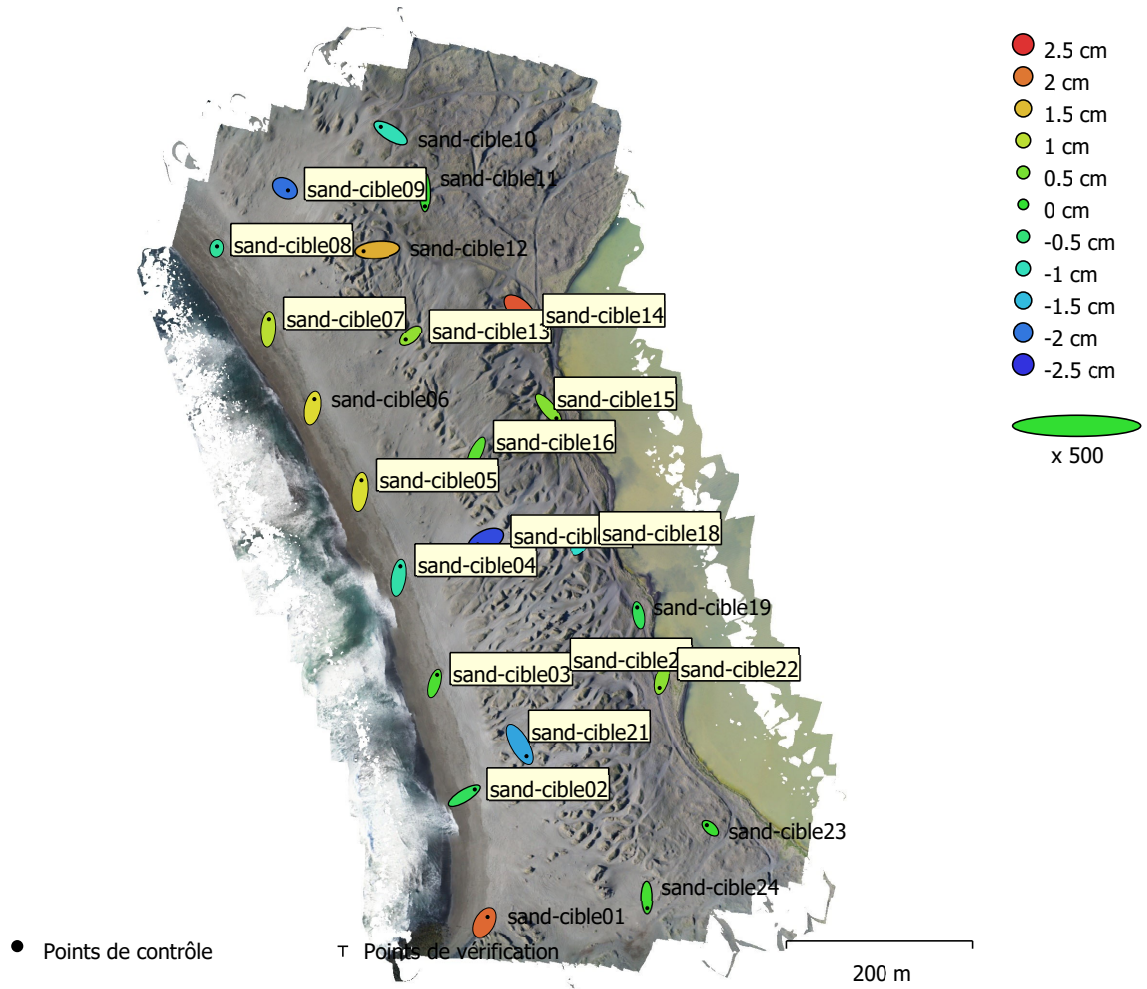


Fig. 3. Emplacements des points de contrôle au sol et estimations d'erreur.

L'erreur Z est représentée

par la couleur de l'ellipse. Les erreurs X et Y sont représentées par la forme de l'ellipse.

Les emplacements estimés des points de contrôle au sol sont marqués d'un point ou d'une croix.

Nombre	Erreur X (cm)	Erreur Y (cm)	Erreur Z (cm)	Erreur XY (cm)	Total (cm)
24	2.4392	3.48432	1.20545	4.25325	4.42078

Tableau 3. Points de contrôle RMSE.

X - Est, Y - Nord, Z - Altitude.

Etiquette	Erreur X (cm)	Erreur Y (cm)	Erreur Z (cm)	Total (cm)	Image (px)
sand-cible08	0.148631	0.88453	-0.756169	1.17315	0.276 (16)

sand-cible07	0.309497	4.42633	0.98154	4.54441	0.650 (14)
sand-cible06	0.780856	3.8363	1.27979	4.11883	0.798 (13)
sand-cible05	0.621806	5.01047	1.21838	5.19383	0.937 (10)
sand-cible04	0.758353	4.93926	-0.85697	5.07009	0.780 (14)
sand-cible03	1.11411	3.73188	0.189527	3.89924	0.530 (14)
sand-cible02	4.53117	2.74877	-0.300038	5.30823	0.670 (15)
sand-cible01	1.3727	2.45634	2.10733	3.5155	1.514 (10)
sand-cible09	1.33471	-0.81641	-2.0476	2.57695	0.700 (11)
sand-cible10	-4.29525	2.65774	-0.957739	5.14101	1.327 (10)
sand-cible11	0.0811811	-6.09655	0.0651579	6.09744	0.998 (13)
sand-cible12	-6.04746	-0.47212	1.6035	6.27422	1.139 (10)
sand-cible13	-2.04901	-1.72451	0.69952	2.76798	0.631 (8)
sand-cible14	2.93785	-2.67561	2.24954	4.56621	0.977 (13)
sand-cible15	3.40031	-4.06482	0.590741	5.33234	1.234 (13)
sand-cible16	-2.17548	-4.43965	0.30671	4.95351	0.823 (9)
sand-cible17	-3.42351	-1.64616	-2.32945	4.45607	0.762 (12)
sand-cible18	1.68134	2.92644	-1.11792	3.55538	0.630 (13)
sand-cible19	-0.64132	3.4122	-0.264835	3.48203	0.570 (18)
sand-cible20	-2.22184	-1.00167	-1.11799	2.68138	0.764 (8)
sand-cible21	2.91255	-5.06385	-1.67396	6.07681	0.903 (12)
sand-cible22	-1.01462	-3.94257	0.645927	4.12196	0.654 (14)
sand-cible24	-0.0355225	-4.57388	0.137139	4.57608	1.009 (11)
sand-cible23	-1.4506	1.32196	0.0578376	1.96346	0.349 (14)
Total	2.4392	3.48432	1.20545	4.42078	0.840

Tableau 4. Points de contrôle.

X - Est, Y - Nord, Z - Altitude.

Modèle Numérique d'élévation

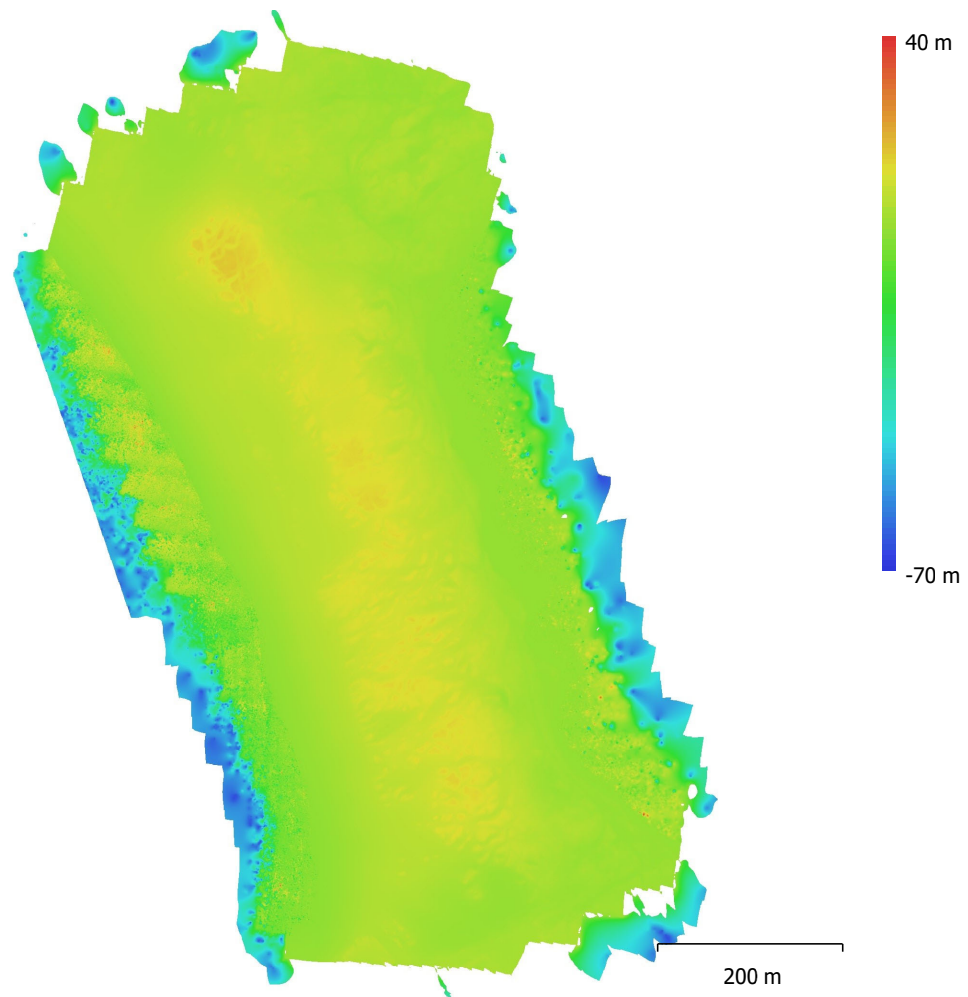


Fig. 4. Modèle numérique d'élévation reconstruit.

Résolution: 1.72 cm/px

Densité des points: 0.338 points/cm²

Paramètres de traitement

Général

Caméras	788
Caméras alignées	788
Repères	24
Système de coordonnées	ISN93 / Lambert 1993 (EPSG::3057) Lacet, Tangage, Roulis
Angles de rotation	
Nuage de point	
Points	680,870 de 725,354
Erreur RMS de reprojection	0.283662 (0.509366 px)
Erreur Max de reprojection	1.10846 (23.1891 px)
Taille moyenne de point	1.83335 px
Couleurs des points	3 bandes, uint8
Points-clé	Non 4.24927
Multiplicité moyenne des points de liaison	
Paramètres d'alignement	
Précision	La plus haute
Présélection générique	Oui
Présélection par références	Non
Limite de points	40,000
Limite de points de liaison	4,000
Exclure les points de liaison fixes	Oui
Correspondance d'images guidée	Non
Ajustement progressif du modèle de la caméra	Non
Temps de concordance	23 minutes 5 secondes
Utilisation de la mémoire de correspondance	3.05 GB
Temps d'alignement	10 minutes 23 secondes 264.14 MB
Utilisation de la mémoire d'alignement	
Paramètres d'optimisation	
Paramètres	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajustement progressif du modèle de la caméra	Non
Durée d'optimisation	35 secondes
Date created	2021:04:26 14:47:49
Version du programme	1.7.3.12248 64.79 MB
Taille du fichier	
Cartes de profondeur	
Nombre	781
Paramètres de génération des cartes de profondeur	
Qualité	Ultra haute
Mode de filtrage	Léger
Temps de traitement	3 heures 3 minutes
Utilisation de la mémoire	9.00 GB
Date created	2021:04:27 13:37:37
Version du programme	1.7.3.12248 20.52 GB
Taille du fichier	
Nuage de points dense	
Points	1,348,425,947 3 bandes, uint8
Couleurs des points	
Paramètres de génération des cartes de profondeur	
Qualité	Ultra haute
Mode de filtrage	Léger

Temps de traitement	3 heures 3 minutes
Utilisation de la mémoire	9.00 GB
Paramètres de génération du nuage de points dense	
Temps de traitement	12 heures 9 minutes
Utilisation de la mémoire	13.24 GB
Date created	2021:04:28 01:46:41
Version du programme	1.7.3.12248
Taille du fichier	17.43 GB
MNE	
Taille	54,399 x 80,978
Système de coordonnées	ISN93 / Lambert 1993 (EPSG::3057)
Paramètres de reconstruction	
Données source	Nuage dense
Interpolation	Activé
Temps de traitement	48 minutes 51 secondes
Utilisation de la mémoire	558.34 MB
Date created	2021:04:28 08:12:12
Version du programme	1.7.3.12248
Taille du fichier	7.78 GB
Orthomosaique	
Taille	44,250 x 61,651
Système de coordonnées	ISN93 / Lambert 1993 (EPSG::3057)
Couleurs	3 bandes, uint8
Paramètres de reconstruction	
Mode de fusion	Mosaïque
Surface	MNE
Activer le remplissage des trous	Oui
Activer le filtre fantôme	Non
Temps de traitement	52 minutes 3 secondes
Utilisation de la mémoire	6.05 GB
Date created	2021:04:28 09:29:20
Version du programme	1.7.3.12248

Taille du fichier 16.19 GB

Système

Nom du programme Agisoft Metashape Professional

Version du programme 1.7.3 build 12248

Système d'exploitation Windows 64 bit

RAM 15.87 GB

CPU Intel(R) Core(TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz

GPU(s) Intel(R) UHD Graphics

NVIDIA GeForce RTX 2060

