MASTER SML

SCIENCES DE LA MER ET DU LITTORAL

MENTION

Sciences de la Terre, des Planètes et de l'Environnement – Géosciences Océan

SPÉCIALITÉ

Sédimentologie et Paléoenvironnement

DELSOL Simon

Suivi de l'érosion des falaises de Porzh Koubou et de Tromel (Bretagne) à partir de données multi-outils

Mémoire de stage de Master 1

Année Universitaire **2021-2022**

Structure d'accueil : **IUEM- UBO (Géo-Océan)**

Tuteur universitaire : **PENAUD Aurélie**

Maître de stage : **JAUD Marion**

Remerciements

Je tiens à remercier Marion JAUD et Nicolas LE DANTEC pour leur bienveillance et leur présence tout au long du stage, quelque soit le questionnement que je pouvais avoir. Et je les remercie encore plus pour le temps qu'ils ont pris lors de leurs vacances pour maintenir cet encadrement.

Je tiens également à remercier Emmanuel AUGEREAU, qui nous a accompagnés sur le terrain, et qui m'a renseigné sur les méthodes de suivis en temps réel par caméra.

Merci à Alain HENAFF pour m'avoir accordé un entretien et m'avoir fourni les données Cerema.

Un merci tout particulier à Bernard LE GALL qui a réalisé l'étude géologique de terrain à mes côtés. Nos échanges ont été fructueux et m'ont grandement aidé par la suite.

Enfin merci à tout lecteur qui prendra de son temps pour lire le rapport suivant.

Résumé

Le suivi de l'érosion des falaises de Porzh Koubou et de Tromel, situées à Crozon, a été initié depuis 2 années maintenant. Ce suivi s'effectue dans le cadre du Service National d'Observation DYNALIT. Il est axé sur des acquisitions en photogrammétrie « *Structure-from-Motion* » des fronts de falaise. L'étude menée ici a reposé sur une nouvelle acquisition photogrammétrique et des comparaisons sur *CloudCompare* entre les nuages de points des différentes périodes. Cette approche a été complétée par un suivi géomatique de photographies aériennes d'archives de 1952 à 2018 pour explorer la cinématique d'évolution de cette section de falaise sur une échelle pluri-décennale, ainsi que la réalisation de coupes géologiques des fronts de falaises. Le recoupement des informations acquises indique que les sites de Porzh Koubou et Tromel évoluent différemment et que les forçages dominant l'érosion varient également entre les deux sites. L'étude a démontré la complémentarité des approches, et l'intérêt des suivis multi-outils. D'autres méthodes sont à déployer dans le futur pour améliorer la compréhension de la dynamique de recul de ces deux sites.

Mot-clés : falaise, érosion, photogrammétrie SfM, géomatique, DYNALIT, Crozon, CloudCompare.

Abstract

The monitoring of the erosion of the cliffs of Porzh Koubou and Tromel, located in Crozon, has been ongoing for 2 years now. This monitoring is carried out within the framework of the National Observation Service DYNALIT. It is focused on photogrammetric acquisitions "Structure-from-Motion" of cliff faces. The study conducted here was based on a new photogrammetric acquisition and CloudCompare comparisons between point clouds from different time periods. This approach was supplemented by a geomatic survey of archival aerial photographs from 1952 to 2018 to explore the cinematic evolution of this cliff section on a multi-decadal scale, as well as the realization of geological sections of the cliff faces. Cross-checking the acquired information indicates that the Porzh Koubou and Tromel sites evolve differently and that the forcings dominating erosion also differ between the two sites. The study demonstrated the complementarity of the approaches, and the interest of multi-tool monitoring. Other methods are to be implemented in the future to improve the understanding of the retreat dynamics of these two sites.

Key words : cliff, erosion, SfM photogrammetry, geomatics, DYNALIT, Crozon, CloudCompare.

Table des matières

I. INTRODUCTION …… 6

II. CONTEXTE DE L'ÉTUDE …… 7

A) Contexte général de la Presqu'île de Crozon …… 7

B) Contexte géologique, géodynamique et géomorphologique ……. 8

C) Contexte scientifique : le SNO DYNALIT ……. 10

III. MATÉRIEL ET MÉTHODE ……. 11

A) Travail de terrain et acquisition photogrammétrique ……. 11

1 – Étude géologique des sites ……. 11

2 – Acquisition photogrammétrique ……. 12

B) Géomatique ……. 14

C) Traitement des données par ordinateur ……. 16

IV. RÉSULTATS ……. 18

A) Mesures de terrain ……. 18

1 – Porzh Koubou ……. 18

2 – Tromel ……. 19

B) Analyse long-terme issue des photos d'archives ……. 19

C) Suivi 3D des falaises ……. 22

1 – Porzh Koubou : un site stable sur la période de suivi ……... 22

2 – Tromel : un site évolutif sur la période de suivi ……... 24

D) Partie expérimentale : calculs de volumes érodés ……... 29

V. DISCUSSIONS …… 29

A) Analyse des résultats et interprétation ……. 29

B) Erreurs associées ……. 31

1 – Les limites de l'utilisation des outils géomatiques …….. 31

2 – Erreurs sur les calculs des volumes érodés ……. 32

VI. CONCLUSION ……. 33

Liste des figures

Figure 1 : Carte de situation de la presqu'île de Crozon …… 7

Figure 2 : Carte géologique de la presqu'île de Crozon ……. 8

Figure 3 : Sites d'étude ……. 11

Figure 4 : Instruments et manipulations sur le terrain ……. 12

Figure 5 : Cartes des stations de prise de vues à Porzh Koubou et à Tromel ……... 13

Figure 6 : Coupe géologique de Porzh Koubou ……. 18

Figure 7 : Coupe géologique de Tromel ……. 19

Figure 8 : Cartes des traits de côte du Cerema et de ceux vectorisés durant le stage …… 20

Figure 9 : Carte zoomée des zones d'érosion de Porzh Koubou …… 20

Figure 10 : Calcul des aires des zones d'érosion de Porzh Koubou …… 21

Figure 11 : Orthophotographies pour le suivi de l'érosion à Porzh Koubou ……..……. 21

Figure 12 : Nuages de points de Porzh Koubou ……..……. 22

Figure 13 : Résultats de la comparaison C2C à Porzh Koubou ……. 23

Figure 14 : Résultats de la comparaison M3C2 à Porzh Koubou ……. 23

Figure 15 : Nuages de points de Tromel …… 24

Figure 16 : Délinéation de la zone d'intérêt sur Tromel par C2C pour janvier 2021 ……. 24

Figure 17 : Résultats de la comparaison C2M et de celle M3C2 pour janvier 2021 à Tromel 26

Figure 18 : Délinéation de la zone d'intérêt sur Tromel par C2C pour avril 2021 ……. 27

Figure 19 : Résultats de la comparaison C2M et de celle M3C2 pour avril 2021 à Tromel 28

Liste des tableaux

Tableau 1 : Dates des anciennes acquisitions photogrammétriques …… 7

Tableau 2 : Dates des orthophotographies récupérées sur le site IGN …… 14

Tableau 3 : Résultats des calculs de volumes d'érosion à Tromel …… 29

Tableau 4 : Tableau de comparaison des erreurs relatives des méthodes de calcul des volumes d'érosion …… 33

I. INTRODUCTION

Les escarpements rocheux, ou falaises, représentent 52% des façades littorales mondiales (***Young et Carilli, 2018***). Or ces falaises, au même titre que les autres littoraux, subissent un phénomène d'urbanisation et d'occupation des sols par les activités humaines. Cette littoralisation couplée à la mobilité intrinsèque des côtes tend à accroître la vulnérabilité des territoires côtiers (***Meur Ferec et al, 2020***). Cet état de fait est amplifié par le changement climatique et la montée du niveau marin, ce qui accroît l'aléa érosion et l'exposition aux risques associés. Or ce risque érosion concerne à l'heure actuelle un quart du littoral français (côtes rocheuses et sableuses confondues), ce qui nécessite la mise en place de nouvelles stratégies de gestion et le renforcement des observatoires côtiers (***Bazin et Olivry, 2017***)

Historiquement, le suivi du littoral s'effectuait par photographies aériennes et relevés de terrain par tachéomètre. Puis, l'avènement du GPS différentiel (***Brasington et al, 2000***) et l'essor de l'informatique ont permis le passage aux orthophotographies et aux MNT (***Lane et al, 2000*** ; ***Brasington et Smart, 2003***). Tandis que les plages forment des systèmes sans relief marqué, modélisables en MNT (Modèle Numérique de Terrain) 2,5D (une seule valeur d'altitude Z attribuée par coordonnée XY), les côtes rocheuses et autres escarpements nécessitent des approches qui permettent un rendu en 3D. Différentes méthodes de stéréo-photogrammétrie ont été développées pour obtenir ces résultats en 3D : le lidar (J***ones et al, 2007***, ***Young et al, 2010***), puis le *Terrestrial Laser Scanner*, une "amélioration" du système Lidar (***Kuhn et al, 2014*** ; ***Letortu et al, 2015***), récemment l'emploi de drones UAV (Unmanned Aerial Vehicle) à capteurs photographiques embarqués (***Lejot et al, 2007*** ; ***Letortu et al, 2017***). Mais ces méthodes impliquent des coûts élevés, liés à l'achat et à l'entretien du matériel spécifique, et représentent un encombrement sur le terrain. Depuis longtemps il existe une méthode peu coûteuse et facile à transporter : la photogrammétrie « *Structure-from-Motion* » (SfM, ***Westoby et al, 2012***). Cependant jusqu'à récemment, la puissance de cette méthode « haute résolution » n'était pas pleinement exploitée. Elle connaît désormais un essor grâce à l'optimisation de la méthode, telle que proposée par ***Jaud et al, 2020***.

Les sites de Porzh Koubou et de Tromel sont situés à Crozon. Ils présentent des difficultés intrinsèques au déploiement des méthodes classiques : la zone est interdite au survol par drone du fait de la proximité des zones militaires - notamment la base de l'Île Longue - et chaque vol nécessite des autorisations spéciales. Les sites sont également difficilement accessibles avec un TLS, qui est un appareil encombrant au transport et au déploiement en pied de falaise. Pour ces raisons, l'usage de la photogrammétrie SfM est pertinent et optimal, simple à transporter et à déployer.

Les fronts de falaise de Porzh Koubou et de Tromel sont observés depuis maintenant 2 ans (à partir de septembre 2020 pour le suivi photogrammétrique, *tableau 1*). Un suivi en temps réel est

également opéré à Porzh Koubou, avec une caméra qui enregistre 15 minutes de vidéo toutes les 20 minutes, et un sismomètre pour l'étude des mouvements micrométriques du sommet de la falaise. Le stage réalisé présentement aborde exclusivement les suivis photogrammétriques et historiques par photographies d'archive. L'étude de ces sites va également permettre de déterminer la résolution offrant le meilleur compromis entre le contrôle nécessaire sur les volumes de stockage des données générées par ce type de méthode de suivi dans le cadre d'observations à long terme, d'une part, et l'exactitude des calculs de différence de volumes effectués entre 2 nuages de points, d'autre part. Au cours de stage, le choix des résolutions à expérimenter fut de 10cm, 5cm, 3cm et enfin 1cm. Le but de ce stage est donc de réaliser une analyse de la dynamique de recul à l'échelle saisonnière et pluri-annuelle et à l'échelle pluri-décennale sur ces sites où les suivis « haute résolution » ont commencé très récemment, en expérimentant avec les méthodes de calcul de distances entre les différents nuages de points.

Tableau 1. Dates des acquisitions photogrammétriques préexistantes pour les falaises de Porzh Koubou et de Tromel. Ces acquisitions ont été réalisées par le Pôle Image et Instrumentation de l'IUEM (Marion JAUD, Emmanuel AUGEREAU, Nicolas LE DANTEC).

17/09/2020	14/01/2021	27/04/2021	07/10/2021	20/01/2022

II. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

A) Contexte général de la Presqu'île de Crozon

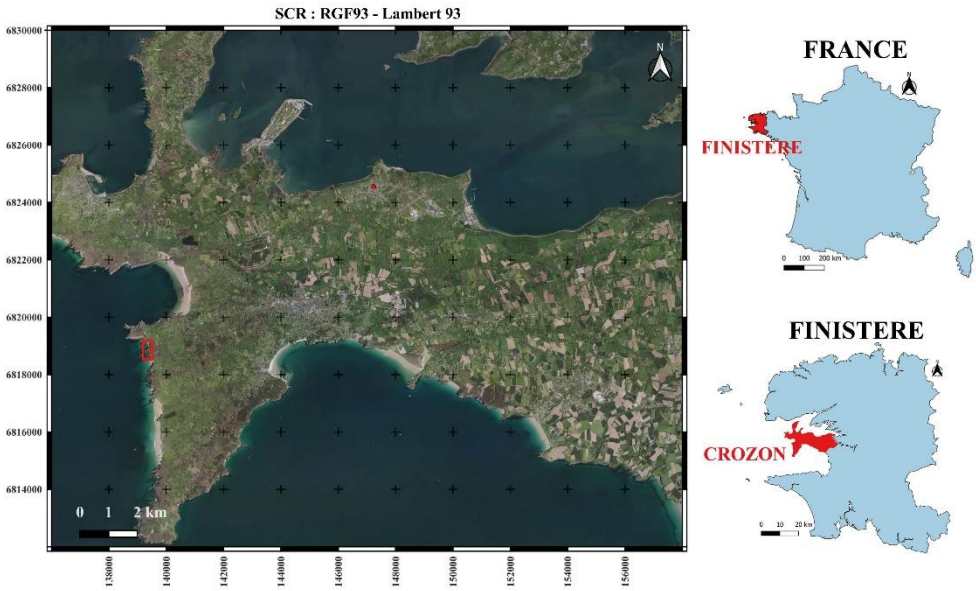


Figure 1. Carte de situation de la presqu'île de Crozon, élaborée depuis l'orthophotographie récupérée en 2018 par l'IGN. Le rectangle rouge sert à délimiter la zone d'étude au Sud de la Pointe de Dinan), qui comprend les anses de Porzh Koubou et de Tromel. Le point rouge situe la ville de Lanvéoc.

Une presqu'île est une surface continentale rattachée par une mince bande de terre au continent à proprement dit. La Presqu'île de Crozon est située dans le département du Finistère (*figure 1*), à l'extrême ouest de la péninsule armoricaine. Elle départage la rade de Brest au Nord et la baie de Douarnenez au Sud. Par la morphologie de son littoral, elle forme un ensemble géographique distinctif, relié au continent par le massif des Montagnes Noires. Dans la partie occidentale de la Presqu'île, c'est-à-dire celle où est localisée la zone d'étude (symbolisée par le rectangle de la *figure 1*), le littoral est composé de falaises rocheuses en alternance avec des anses de plages sableuses à dunes. De nombreux cordons de galets ont tendance à jalonner les bases de ces escarpements rocheux et se retrouvent aussi sous les dunes.

D'après le ***Document d'objectifs du site FR5300019 "Presqu'île de Crozon", 2006*** réalisé pour les besoins des sites Natura 2000, la Presqu'île de Crozon est, du fait de sa position géographique, sous l'influence d'un climat océanique. Il se distingue par des hivers doux (11,4°C à Lanvéoc, voir le point rouge sur la *figure 1)* mais très humides (pluies intermittentes et bruine sont caractéristiques du pays breton). En été, le climat est plus sec mais reste toujours frais (pas plus de 23 °C en moyenne). Les précipitations y sont régulières, notamment en hiver : 191 jours de pluie par an à Lanvéoc. Le régime des vents est dominé par les vents d'ouest et de sud-ouest, dont les intensités en hiver en font une côte tempétueuse.

B) Contexte géodynamique, géologique et géomorphologique

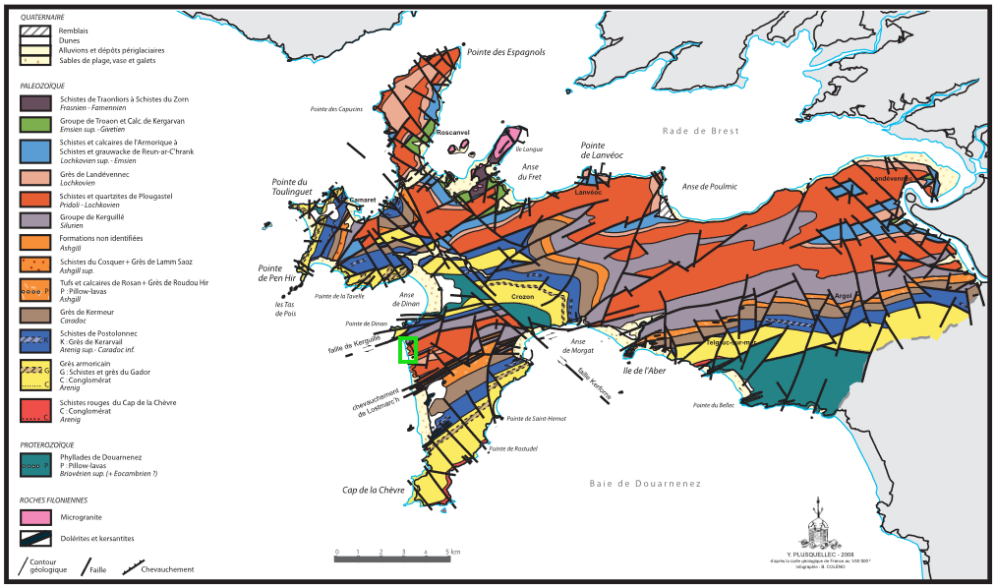


Figure 2. Carte géologique de la presqu'île de Crozon, réalisée par ***Plusquellec et al, 2010***. Le rectangle vert sert à délimiter la zone d'étude, au Sud de la Pointe de Dinan. Elle contient dans son extrémité nord des roches du groupe de Kerguillé, et au Sud les schistes et quartzites de Plougastel. La zone est également recoupée par 2 failles d'orientation NE-SW.

Le Massif armoricain représente le segment occidental de la chaîne varisque. Ce massif est caractérisé par un socle Protérozoïque sur lequel s'est déposé une couverture Paléozoïque. Le Massif

armoricain se remarque par l'absence des séries Mésozoïque (***Vidal et al, 2010***). Il fut façonné par 2 orogenèses : cadomienne (750 - 540 Ma) et hercynienne (420 - 200 Ma) (***Vidal et al, 2010***). Le massif se subdivise en 2 domaines : le Domaine Médio-Nord Armoricain (DMNA) et le Domaine Sud-Armoricain (DSA). La Presqu'île de Crozon se situe à l'Ouest du DMNA et s'inscrit dans des séries sédimentaires métamorphiques Paléozoïque reposant en discordance sur le socle briovérien (***Vidal et al, 2010*** ; ***Mercier et al, 2013***).

Les formations Paléozoïque composant la Presqu'île de Crozon s'étendent du début de l'Ordovicien (Arenig) à la fin du Dévonien (Famennien) (***Vidal et al, 2010***). S'y retrouvent dans l'ordre des dépôts (***Plusquellec et al, 2010***) : les schistes rouges du Cap de la Chèvre, les grès armoricains, les schistes de Postolonnec, les grès de Kermeur, les tufs et calcaires de Rosan, les schistes du Cosquer, une formation non-identifiée, le groupe de Kerguillé, les schistes et quartzites de Plougastel, les grès de Landévennec, les schistes et calcaires de l'Armorique à schistes et grauwacke de Reun-ar-C'hrank, le groupe de Traon et les schistes de Traonliors à schistes du Zorn.

La faille de Kerguillé délimite la zone d'étude au Nord (*figure 2*). Elle marque la séparation entre la falaise de Porzh Koubou, une des entités étudiées, et la pointe de Dinan. La zone est recoupée par 2 failles d'orientation NE-SW (*figure 2)*, induite par la direction générale de la tectonique de compression N-S de l'orogenèse hercynienne. La zone d'étude se situe dans les formations géologiques siluriennes que sont le groupe de Kerguillé et les Schistes et Quartzites de Plougastel (*figure 2*). Le groupe de Kerguillé comprend successivement deux ensembles géologiques : les formations de La Tavelle et de Lostmarc'h (***Plusquellec et al, 2010*** ; ***Vidal et al,*** **2010**). Du point de la lithologie, cela se traduit par un enchaînement de bancs gréseux micacés, d'ampélites pyriteuses très fossilifières, d'ampélites à nodules siliceux renfermant des bancs gréseux centimétriques, des schistes noirs à nombreuses intercalations de bancs de quartzites noires décimétriques et enfin les schistes de Lotsmarc'h (***Vidal et al, 2010***). Les schistes et quartzites de Plougastel forment l'ossature de nombreuses pointes sur la Presqu'île (***Vidal et al, 2010***). Au niveau lithologique, ce faciès correspond à une alternance de niveaux de schistes sombres et de bancs de quartzites à ciment chloriteux pouvant mesurer plusieurs mètres d'épaisseur. Dans les zones fortement exposées aux effets météorologiques, ces schistes tendent à lentement s'altérer en altérite en surface (***Vidal et, 2010***).

Concernant le site spécifique de l'anse de Porzh Koubon, les informations sont rares. Néanmoins, il est possible de se renseigner sur le site de la Réserve Naturelle Géologique de la Presqu'île de Crozon (https://www.reservepresquiledecrozon.bzh/). Il y est expliqué que le cordon de galets est majoritairement originaire de l'érosion de la pointe de Dinan attenante. Le platier rocheux est très étendu et n'est ni plus ni moins que la continuité de la falaise qui a été ravinée au cours du temps. Il faut noter la présence d'encroûtements d'oxydes de fer, définis comme étant les reliquats

d'une plage ancienne de haut niveau marin, dont la date est incertaine (placée de 125 000 ans à quelques millions d'années). Les masses effondrées d'altérites sont à relier à la dernière déglaciation. Le dégel du sol a fracturé les altérites et fragilisé les pentes, ce qui a abouti à leur effondrement.

C) Contexte scientifique : le SNO DYNALIT

DYNALIT (https://www.dynalit.fr/) est un Service National d'Observation (SNO), labellisé par le CNRS INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) en 2014. Il regroupe 120 chercheurs répartis dans 10 Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU), 22 Universités, 20 laboratoires et assure un partenariat avec le BRGM, le Cerema et le SHOM. Cela forme un réseau d'observation pour l'acquisition, la collecte, la mise en cohérence et le stockage de données métrologiques qualitatives sur l'hydro-morphodynamisme du littoral français, en métropole et dans les DOM-TOM. Et ce dans l'objectif de comprendre scientifiquement l'évolution du trait de côte, afin de prévoir les moyens techniques à mettre en œuvre pour limiter les impacts sociétaux liés à cette dynamique du littoral.

Sur les 36 sites suivis par DYNALIT, seulement 5 en sont des falaises (tandis que les falaises ou côtes rocheuses représentent 41% des 5853 km du littoral français). Ce sont les sites de Dieppe – Cap d'Ailly, Pénestin, Senneville-sur-Fécamp, Socoa et le site des Vaches Noires. Or toutes ces falaises sont sédimentaires (flysch, argilo-sableuses, marno-calcaires ou crayeuses). Cela soulève un questionnement : il n'y a aucune falaise ayant une pétrologie associée au socle (roches plutoniques ou métamorphiques) qui n'ait été à l'heure recensée et suivie par DYNALIT, donc il y a absence de représentation de ces dernières. Pour intégrer ce réseau, il suffit d'assurer un levé-3D photogrammétrique par an (dont la fréquence peut être modifiée selon la vitesse d'évolution du site), de renseigner la problématique et le contexte associés à la falaise, spécifiques au site, ainsi que de mettre à disposition les jeux de données.

L'intégration du jeu de données dans l'infrastructure de données géographiques Indigeo nécessite de réfléchir à la question de la taille des fichiers de nuages de points qui y seront déposés. Il s'agit généralement de fichiers très volumineux à l'état brut (plusieurs Gigaoctets). Cela requiert des serveurs de stockages conséquents pour maintenir la base de données. Pour éviter d'être confronté au choix de savoir s'il faut ou non conserver tel ou tel jeu de données afin de libérer de l'espace, il est possible de gérer le problème en optimisant la résolution des nuages de points de sorte à conserver un degré d'exactitude satisfaisant pour les différentiels de nuages de points. La taille des fichiers est déterminée par la résolution des nuages de points : il faut donc résoudre cette problématique. Faut-il travailler à l'état brut (résolution millimétrique), ou des résolutions plus faibles permettent-elles un suivi adapté ? Et un autre avantage se répercute à avoir des résolutions moindres : une optimisation des temps de traitement sur les différents logiciels.

L'intérêt du suivi des sites de Porzh Koubou et de Tromel réside dans le fait d'inclure enfin à DYNALIT un site d'étude de falaises métamorphiques. En effet, les sites de Tromel et Porzh Koubou présentent des strates verticalisées de schistes avec intercalation de bancs de quartzites. Le comportement mécanique de ces roches diffère de celle des roches sédimentaires composant les 5 autres falaises suivies par DYNALIT.

III. MATÉRIEL ET MÉTHODE

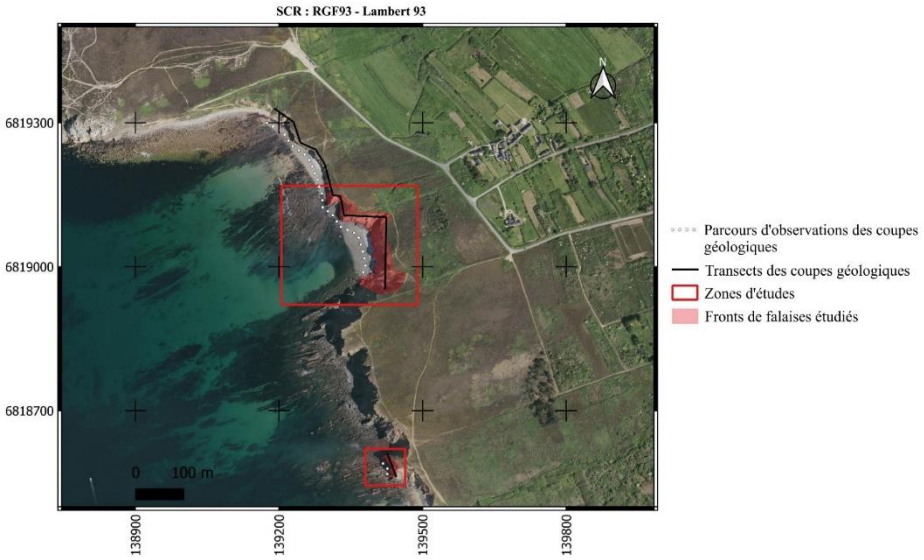


Figure 3. Zoom sur la zone d'étude (rectangle rouge de la *figure 1* et rectangle vert de la *figure 2*). La carte est toujours issue de l'orthographie 2018. Le site de Porzh Koubou se situe au Nord (coordonnées qui délimitent N/S et E/W). Le site de Tromel est plus au Sud. En noir sont représentés les flancs de falaises qui ont été croqués pour la coupe géologique.

A) Travail de terrain et acquisition photogrammétrique

1 – Étude géologique des sites

Une première sortie de terrain s'est déroulée le 02/06/2022 en compagnie de Bernard LE GALL (chercheur-émérite au CNRS et exerçant ses fonctions à l'IUEM). Elle s'est focalisée sur le site de Porzh Koubou. Le jour fut spécifiquement choisi pour avoir une météo clémente et une marée basse à mi-journée (13h30) en période de vives-eaux (c'est-à-dire aux plus fortes amplitudes de marée), afin de maximiser et d'optimiser le temps sur le terrain. Un travail classique de géologue de terrain a été effectué, avec esquisse de coupes géologiques (voir *figure 6*), mesures de pendages et d'orientation de failles, ainsi que la prise de photos de certaines identités géologiques remarquables. Dès lors, le matériel utilisé fut classique : carnets de terrain, boussole, marteau de géologie, ainsi qu'appareil GNSS RTK (*Global Navigation Satellite System Real Time Kinematic*) Centipède et le module Sparkfun RTK Surveyor (*figure 4 (b)*) pour mesurer les positions des entités remarquables (au plus près de la falaise possible). La coupe géologique a été réalisée sur la totalité de la falaise de l'anse de Koubou, afin de permettre une meilleure compréhension du site dans son ensemble.

Techniquement, seule une des sections (section D de la *figure 6*) de la coupe géologique relève du flanc de falaise étudié (*figure 3*).

Une seconde sortie réalisée à l'occasion des acquisitions photogrammétriques s'est tenue le 16.06.2022. Ce jour-là, l'étude géologique ne s'est axée que sur le front de falaise à Tromel (*figure 3*). La coupe géologique (*figure 7*) a cette fois été croquée par moi-même, à l'aide du même matériel, mais en l'absence de l'expertise de Bernard LE GALL.

2 – Acquisition photogrammétrique SfM

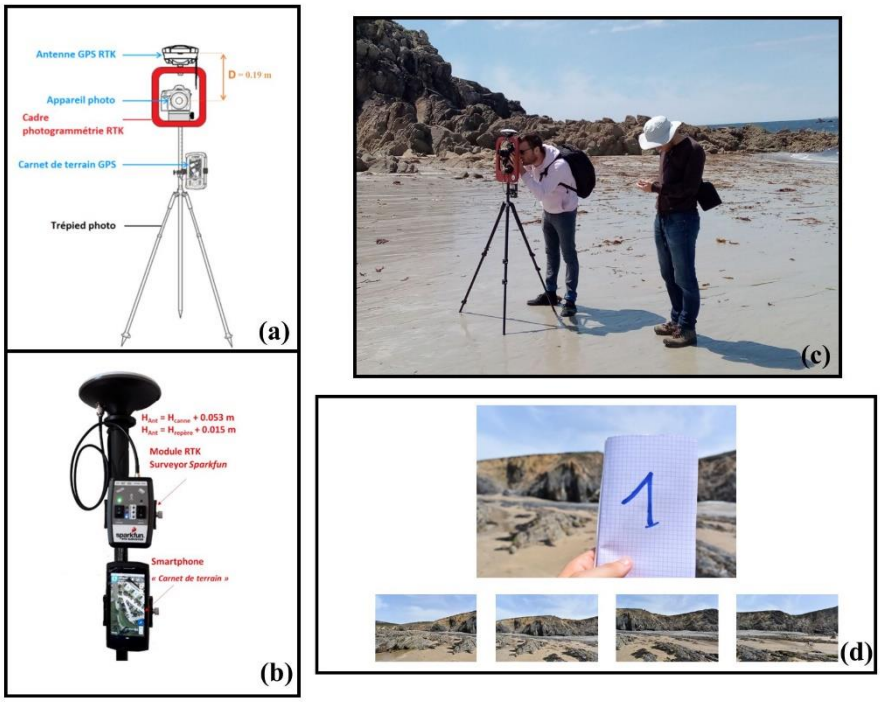


Figure 4. Schéma du système utilisé pour les relevés photogrammétriques (Marion *Jaud, Protocole pour la photogrammétrie terrestre RTK, avril 2022*) (a) ; photographie du système GNSS RTK Centipède et du module Sparkfun RTK Surveyor (Marion Jaud, GNSS RTK Centipède + RTK Surveyor, janvier 2022) (b) ; photographie d'un exemple de prise de vue sur station (c) : Nicolas Le Dantec enregistre les coordonnées GPS à l'aide du Smartphone tandis que j'acquiers les photos ; exemple de la première photographie prise au début de chaque station et des photographies suivantes (d).

La méthode de photogrammétrie "*Structure-from-Motion*" (SfM) s'appuie sur les mêmes principes de base que la photogrammétrie stéréoscopique, à savoir que la structure 3D de l'objet imagé peut être reconstruite à partir d'une série d'images superposées (***Westoby et al, 2012***). Elle diverge toutefois de la photogrammétrie conventionnelle, en ce sens que la géométrie de la scène, la position et l'orientation de la caméra sont résolues automatiquement par procédure itérative lors du traitement sur ordinateur. Ainsi ces paramètres n'ont pas à être mesurés *a priori*. L'approche dépend de deux facteurs majeurs : (1). Elle requiert d'acquérir un ensemble de photographies à haut degré de recouvrement (au moins 80%) et (2) elle nécessite de multiplier les points de prises de vues pour optimiser la couverture de la structure tridimensionnelle de l'objet étudié. Comme le nom le suggère,

cela signifie que les captures d'images sont réalisées à l'aide d'un capteur en mouvement. L'atout sous-jacent à pratiquer une méthode de photogrammétrie SfM terrestre assistée par RTK GNSS est d'enregistrer les positions des caméras avec une précision centimétrique lors du déplacement du capteur d'un point de prise à un autre (***Jaud et al, 2020***). La connaissance précise de ces coordonnées (X, Y, Z) simplifie les équations de colinéarité lors du traitement, et diminue considérablement les erreurs de géoréférencement.

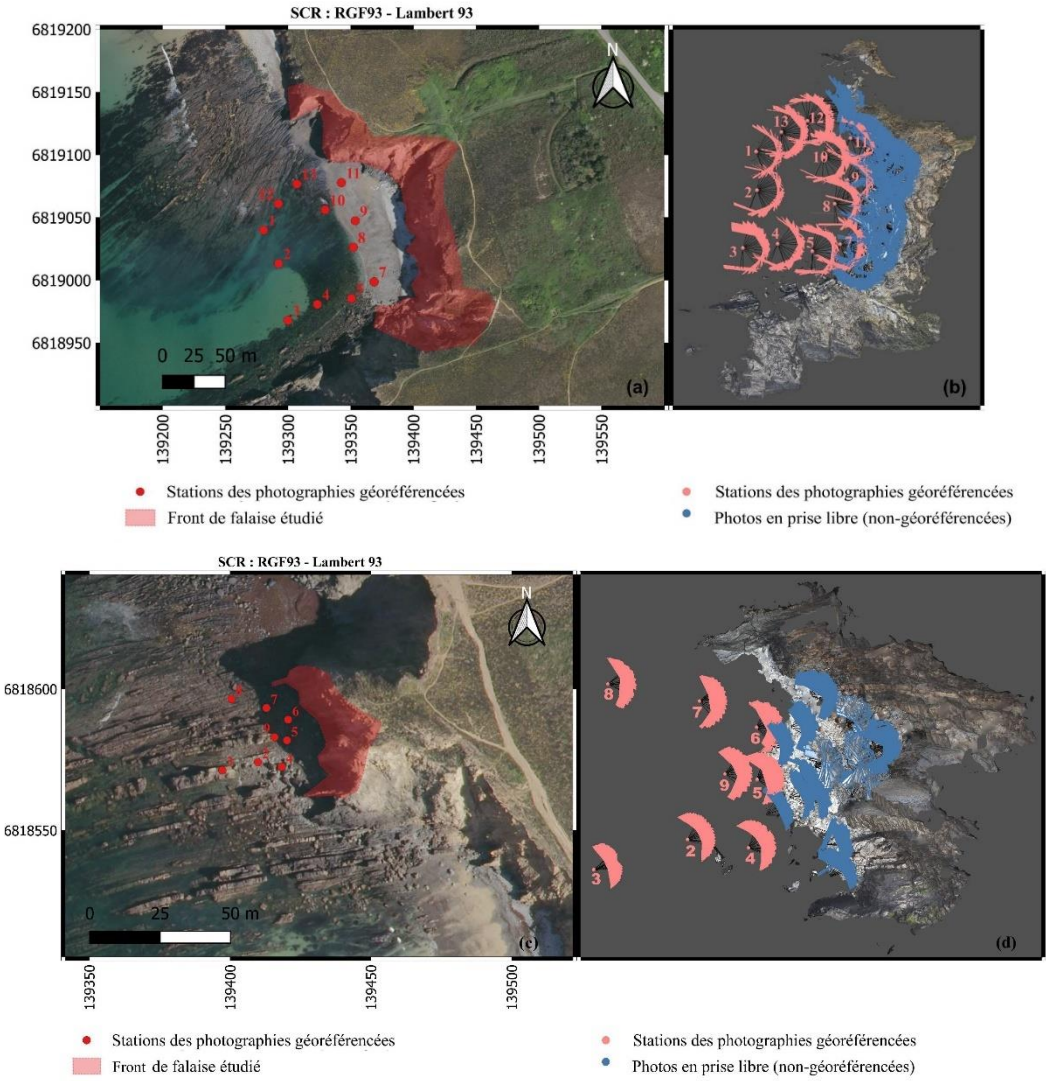


Figure 5. Carte des stations de prises de photographie pour le site de Porzh Koubou (a) et de Tromel (c), et représentation des falaises sous *Agisoft Metashape* en vue du dessus (b) et (d). En rose, l'emplacement des stations de photographies géoréférencées ; en bleu, les photographies en prise libre affichées sur les positions estimées par le logiciel.

Le relevé a été effectué le 16/06/2022 avec le système conçu par le Pôle Image et Instrumentation de l'IUEM (***Jaud et al, 2020***). Un appareil Nikon D3500 a été utilisé, avec une longueur focale réglée à 18 mm pour Tromel et 27 mm pour Porzh Koubou. Les coordonnées GPS des stations de prises de vues ont été enregistrées grâce au système GNSS RTK Centipède. Le module Sparkfun RTK Surveyor et le smartphone relié en bluetooth à ce dernier ont permis de recevoir les

corrections RTK de la base GNSS de l'IUEM pour le positionnement centimétrique des mesures. Les coordonnées des stations furent enregistrées dans le système de coordonnées géographiques WGS84, puis converties en RGF 93 - Lambert 93 grâce au logiciel Circé. Les enregistrements de ces coordonnées furent consignés uniquement lorsque le module Sparkfun affichait une précision centimétrique pour les coordonnées. Un taux de recouvrement d'au moins 80% a été assuré entre chaque photo. La répartition des stations fut organisée de façon à assurer une couverture optimale (alternance entre prises de vue proches et lointaines du front de falaise). Cette couverture fut satisfaisante avec 12 stations fixes à Porzh Koubou (*figure 5 (a)*) et 8 stations fixes à Tromel (*figure 5 (c)*). A noter que sur les figures 5 (a) et (c), les numéros de stations sont décalés, suite respectivement à un essai du système GPS à Tromel (qui a eu lieu pour la première mesure) et un doublon dans le relevé des coordonnées sur la station numéro 5 à Porzh Koubou. A Porzh Koubou, 979 clichés ont été saisis : 250 photographies géoréférencées pour 729 photographies en prise libre (non géoréréférencées). A Tromel, 424 clichés ont été capturés : 197 photographies géoréférencées pour 227 photographies en prise libre.

B) Géomatique

Afin de visualiser la dynamique d'évolution sur le temps long des 2 falaises étudiées, un suivi historique du trait de côte a été effectué sur le logiciel QGIS à partir de photographies aériennes d'archive. Les traits de côte sont vectorisés sous QGIS sous la forme de polylignes Shapefile (format .shp), un format classique pour les formes sous SIG. Pour ce faire, il a fallu sélectionner les photos pour obtenir un échantillonnage temporel suffisant. Trois années de références ont été déterminées : 1952 (la plus ancienne disponible et correctement exploitable dans la zone), 2000 (avènement des appareils photos numériques) et 2018 (la plus récente à disposition dans la zone). Idéalement, un écart continu conditionné à 10 ± 2 ans avait été envisagé pour maintenir une échelle temporelle constante.

Tableau 2. Tableau recensant les années dont les photographies aériennes ont été récupérées pour les besoins du stage. Les cases en orange correspondent aux BD ORTHO®, c'est-à-dire les années dont les photographies aériennes ont été orthorectifiées et géoréférencées en RGF93 par l'IGN (elles sont alors qualifiées d'orthophotographies). Les cases en vert correspondent aux photographies aériennes non-orthorectifiées, et qui ont demandé la réalisation de ce processus de géoréférencement durant le stage. Les dates en gras sont les 3 années de référence.

1952	1966	1976	1993	**2000**	2009	**2018**

Dans la pratique, entre 2000 et 2018, cet écart fut respecté : l'année médiane de 2009 (± 9 ans par rapport aux deux autres années-bornes) a été conservée. *A contrario*, la disponibilité et la qualité des photographies n'ont pas permis pas de respecter cette variation sur la période 1952-2000. Ainsi, le suivi sur cet intervalle n'a pu s'effectuer que sur les années 1966 (+ 14 par rapport à la date

précédente), 1976 (+ 10 ans par rapport à la date précédente) et 1993 (+ 17 ans par rapport à la date précédente). Toutes ces dates se retrouvent dans le *tableau 2* .

Ces photographies historiques sont accessibles sur le site IGN (https://remonterletemps.ign.fr/), les orthophotographies ont été récupérées directement sur OBSERV-PROD (à savoir les 1952, 2000, 2009, 2018), le serveur de l'IUEM. Or seules 4 des 7 photographies historiques sont des orthophotographies, issues de l'initiative BD ORTHO® (*tableau 2*). Les photographies aériennes des années 1993, 1976 et 1966 ont conséquemment dû être géoréférencées via l'outil « Géoréférencer » mis à disposition sur QGIS. Pour cela, il est nécessaire de sélectionner des points remarquables identiques entre l'objet que l'on souhaite géoréférencer et un objet dont les coordonnées géographiques sont déjà recensées dans un système de coordonnées de référence. Dans le cas présent, les références sont les BD ORTHO® associées au RGF93-Lambert 93. Il s'agit du Système de Coordonnées de Référence (SCR) pour toute production SIG centrée sur la France métropolitaine. C'est donc lui qui est appliqué tout au long du projet. Les points remarquables constituent le plus souvent des croisements de routes ou des bâtis existant sur les 2 périodes. Il a été estimé que le géoréférencement doit s'effectuer entre des périodes ayant connu une évolution anthropique minimale. En conséquence, 1966 et 1976 furent géoréférencées depuis 1952, là où 1993 fut géoréférencée par rapport à 2000.

L'étude de la dynamique du trait de côte nécessite de pouvoir tracer ce dernier sur QGIS. Pour cela, il faut discriminer des marqueurs cohérents et constants. Ces derniers sont bien établis par les différents observatoires locaux et les études menées dans chaque département concerné (***Cerema, 2022***). C'est notamment le cas pour les littoraux sableux, avec des marqueurs tels que la limite de jet de rive, les crêtes de bermes, les pieds de dunes ou hauts de « falaise » dunaire et les limites côté-mer de végétation dunaire (***Cerema, 2022***). Les marqueurs reconnus pour le suivi de falaise sont plus limités : ils se cantonnent aux limites de végétation, pieds de falaise ou haut de falaise (***Cerema, 2022***). Un trait de côte pour le pourtour complet du littoral français a été digitalisé sous QGIS par le Cerema à une échelle 1/2500. Cette échelle de numérisation a été définie afin de permettre une harmonisation des bases de données à l'échelle nationale pour leur bancarisation. Ce trait de côte naturel fut fourni pour le stage par Alain HENAFF (enseignant-chercheur à l'IUEM).

Cependant, il apparaît rapidement que ce trait de côte n'est pas adapté pour le suivi de falaise (voir *figure 8*) qui est ici mis en place. L'échelle 1/2500 manque de précision dans la définition du trait de côte sur les zones étudiées, qui ne mesurent que 250 m à Porzh Koubou et 75 m à Tromel. De plus, la délinéation du trait de côte est contestable : ils varient en permanence entre le pied de falaise et la crête. Il a été décidé de vectoriser *a mano* les traits de côte (voir *figure 8*). Une échelle de 1/500 a été appliquée en 2018, et une échelle de 1/1000 aux autres années. Cela en accord avec les résolutions des photographies utilisées, qui, passées l'échelle 1/1000 pour les dates autres que 2018,

ont un rendu trop pixelisé pour permettre une observation probante. Les marqueurs qui sont employés découlent de ceux reconnus par le Cerema. La limite de végétation reste la méthode prépondérante. Mais lorsque ce marqueur est incertain, alors le trait de côte est reproduit par le haut ou crête de falaise en zone correctement éclairée, ou alors le proxy des limites d'ombre projetée par les crêtes de falaise dans les zones où cela peut s'appliquer.

In fine, la vectorisation de ces traits de côte sur ces 7 années va permettre de suivre l'évolution du trait de côte. Les écarts entre ces traits de côte vont permettre d'établir les zones d'érosion qui ont pris place dans les zones d'études. Les aires de ces zones seront établies grâce à l'outil « Mesurer une aire ».

C) Traitement des données par ordinateur

Agisoft Metashape est le logiciel de traitement dédié à la génération de modèles 3D texturés depuis des relevés photogrammétriques. Avant tout traitement, il convient d'attribuer les coordonnées GPS (converties en RGF 93 - Lambert 93 avec Circé) des stations géoréférencées aux photos correspondantes. Des masques sont délimités sur chaque photographie afin de retirer le ciel et la végétation. Une fois cela fait, 4 étapes de traitement ont été appliquées : (1) l'alignement des photos ; (2) l'optimisation de l'alignement ; (3) la construction du nuage de points dense ; (4) et la génération d'un rapport et l'export des résultats. Lors de l'alignement (1), grâce au détecteur SIFT (***Lowe et al, 2004***), *Metashape* estime par procédure itérative les paramètres internes et externes de la caméra, détecte et assemble les points homologues sur l'ensemble des photographies, et calcule leurs positions relatives, puis génère un nuage de points clairsemé ainsi que les positions des images. L'optimisation de l'alignement (2) a pour but de limiter les déformations non linéaires et les erreurs d'estimations de positions des photographies en optimisant les paramètres de caméra à l'aide de coordonnées de référence. La construction du nuage de points dense (3) s'effectue sur la base des positions estimées des caméras et en effectuant un filtrage des profondeurs pour chaque photographie.

CloudCompare est un logiciel libre de droit créé spécifiquement pour l'analyse de nuages de points dense, dans le but d'en extraire les différences. Sur *CloudCompare*, les nuages de points denses des acquisitions photogrammétriques préexistantes à ce stage ont été également utilisés (voir *tableau 1* pour ces dates).

Le logiciel *CloudCompare* permet également de travailler sur les résolutions. Il existe en effet un outil « Sous-échantillonnage ». Le logiciel reconstruit alors un nouveau nuage à partir d'une distance moyenne inter-point maximale pour respecter la densité recherchée par l'opérateur. La distance moyenne est considérée comme synonyme à la résolution. Pour les besoins du stage, les sous-échantillonnages ont été effectués à 10 cm, 5 cm, 3 cm et 1 cm. Après consultation avec Marion JAUD, un consensus a été retenu sur la résolution de 10 cm : cette dernière est suffisante pour conserver l'intégrité du nuage de points, tout en minimisant la taille du fichier (de l'ordre de quelques

dizaines de méga-octets contre plusieurs giga-octets pour le nuage “pur” non sous-échantillonné). Cela réduit grandement les questionnements liés au stockage des données. Toutes les applications sur *CloudCompare* sont par la suite effectuées sur les nuages sous-échantillonnés à 10 cm (0.1 m).

Enfin, sur *CloudCompare*, 3 procédures différentes sont mises en place pour le calcul des différences entre les nuages de points. La première correspond à une estimation des distances entre 2 nuages de points : c’est le *Cloud-to-Cloud* ou C2C. Le logiciel fonctionne en calculant les distances approximatives (minimale, moyenne et maximale) entre un nuage de référence, et le nuage dont les écarts de distance par rapport à la référence sont recherchés. Le résultat s’exprime sous la forme d’un champ scalaire appliqué au second nuage. Cependant, le calcul des distances entre les nuages s’effectue sans tenir compte de l’orientation des normales (vecteurs qui permettent de suivre les orientations en 3D), et le résultat s’exprime toujours en distances absolues. Le C2C ne permet donc pas de discriminer l’érosion ou l’accumulation. Mais il met en exergue des zones significatives (celles où il y a eu du mouvement sur le front de falaise). Ces zones peuvent ensuite être isolées avec l'outil Segmentation.

Une fois isolées, ces zones peuvent être analysées avec la fonction *Cloud-to-Mesh* (C2M), qui tient compte des normales propres à chaque nuage, afin d’obtenir des distances signées. Ces distances signées sont positives ou négatives, ce qui permet de distinguer les zones d’érosion (valeurs négatives) des zones d’accumulation (valeurs positives). Le *Cloud-to-Mesh* nécessite de mailler le nuage de référence. Le maillage s’effectue par la création de triangle entre les différents points. Les points deviennent des sommets et les triangles des facettes. Différentes méthodes sont disponibles. Celle appliquée ici fut la plus courante, à savoir le maillage Delaunay 2D. Le C2M calcule ensuite la différence entre le nuage de points dense à comparer et les sommets des triangles du maillage de référence, et ressort le résultat sous la forme d’un champ scalaire de distance signée.

Il existe une autre méthode développée par ***Lague et al, 2013***, qui permet d’éviter l’étape de maillage, et d’effectuer directement un calcul de distances signées entre 2 nuages de points. Cette méthode est le *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* ou M3C2, développée initialement pour le Scanner Laser Terrestre. Cette méthode nécessite d’entrer un certain nombre de paramètres avant le calcul, dont les normales, les projections de profondeur et la résolution (après sous-échantillonnage) du nuage de points auxquels les normales sont appliquées. Ces paramètres ont été déterminés par Marion JAUD. Le logiciel effectue ensuite une série d'opérations entre le nuage de référence et celui à comparer. Puis il projette les résultats en champ scalaire avec les distances signées.

IV. RÉSULTATS

A) Étude géologique de terrain

1 – Porzh Koubou

Seules deux des quatre sections de la coupe de Porzh Koubou sont représentées. La section D correspond à la section du front de falaise étudié. La section A comporte le plus bel exemple d'un paramètre essentiel : le système de ailles conjuguées. Elle a donc été considérée comme significative.

La falaise est structurée par des strates schisteuses, mesurant chacune 2 à 10 cm d'épaisseur, avec des intercalations de bancs quartzitiques centimétriques à plurimétriques (le plus massif mesure 4m d'épaisseur). Ces bancs sont moins érodés que les séries de schistes sombres. Cela est dû à une résistance plus importante des quartzites face à l'altération. Toutes ces couches sont verticalisées : les pendages oscillent entre N72 et N86, et sont orientées N135. Tout au long de la falaise, les différentes mesures de schistosité S_1 sont en correspondance avec les mesures des plans de stratifications S_0. La schistosité n'induit donc pas de plan de fracture autre que les clivages préexistant dans la stratification des schistes. Des effets locaux de boudinages et de déformation marquant les épisodes compressifs N-S de l'orogenèse hercynienne sont également visibles. De nombreuses fractures ne générant aucun décalage dans les strates sont également identifiables : ce sont des diaclases qui marquent également les contraintes tectoniques qu'ont subi les structures.

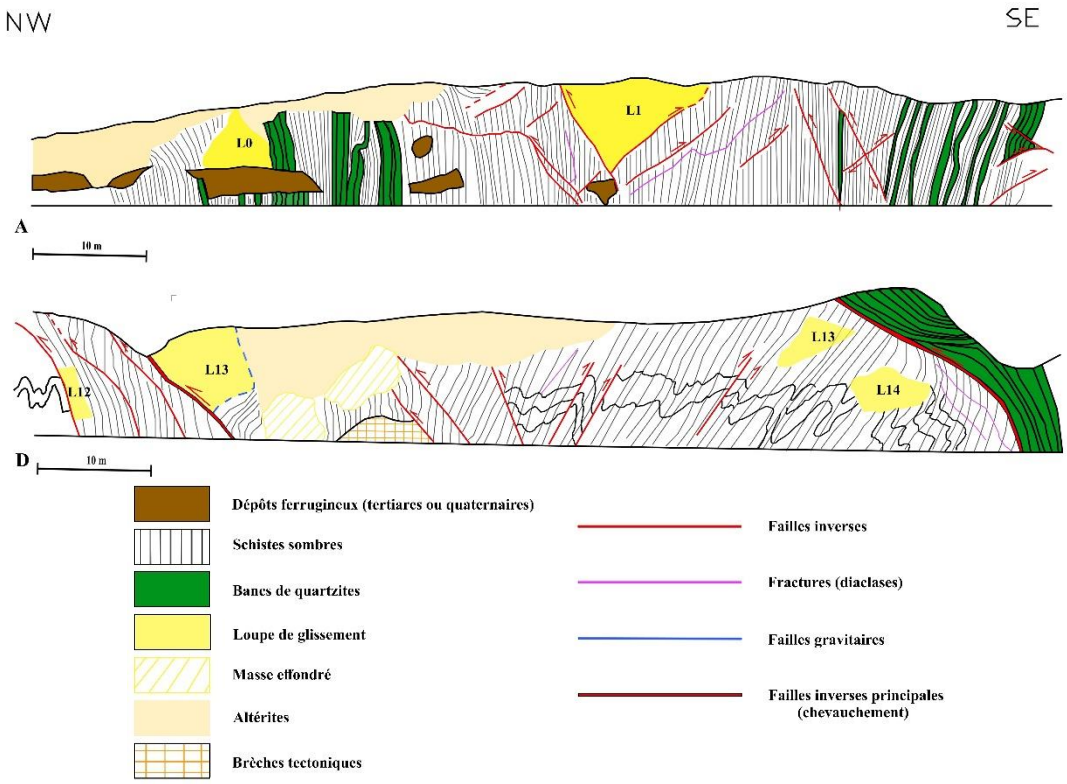


Figure 6. Coupe géologique du front de falaise à Porzh Koubou réalisée par Bernard LE GALL. Seules les sections A et D de la coupe sont ici présentées. L'ensemble de la coupe se trouve en annexe 8.

De nombreuses failles inverses et gravitaires sont observables. Elles forment régulièrement des systèmes de failles conjuguées. Ces mêmes systèmes se retrouvent en limite de loupe de

glissement (***ex*** : la loupe de glissement L1 de la section A de la *figure 6*). Ces zones offrent des plans de moindre résistance qui favoriseraient les effondrements lorsque la falaise est déstabilisée.

2 – Tromel

A l'opposé de Porzh Koubou, la coupe géologique de Tromel (*figure 7*) ne met en exergue aucune loupe de glissement, ni système de failles conjuguées les délimitant. Seule une faille inverse est présente sur le flanc Sud. Toutes les strates sont orientées dans la direction N135. Au nord, la plupart des strates sont verticalisées (pendages des strates de N70 à N85) : la falaise est en structure monoclinale dans ce secteur. La schistosité S_0 est également en accord avec les plans de stratifications S_1. En direction du sud, l'inclinaison des strates en sommet de falaise laisse entrevoir une potentielle charnière de pli. En ce sens, le pli serait alors d'axe E-W, et donc issu de la compression N-S. Il est possible de distinguer de nombreuses microfractures au sein des formations géologiques. En outre, un renfoncement creusé dans la paroi de la falaise est observable (cavité de la *figure 7*). Un phénomène de boudinage (pendage N85) est à relever au pied de la falaise, proche du cordon de galet. Il s'agit d'un autre marqueur de la compression N-S à l'origine de raccourcissement extrême, et antérieur à la mise en surface de la falaise.

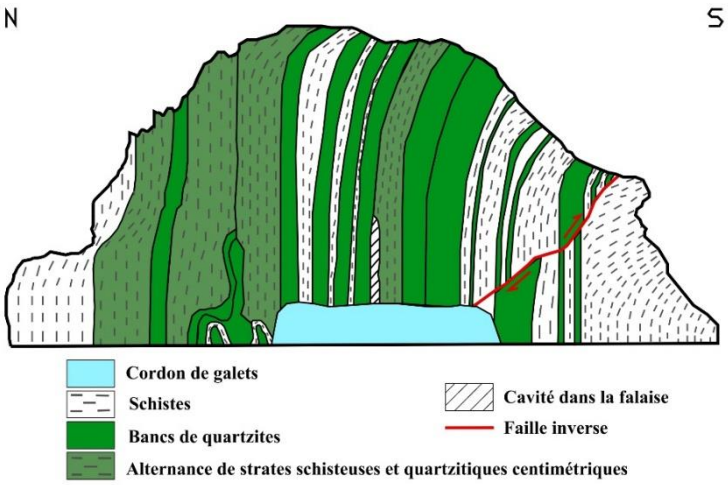


Figure 7. Coupe géologique du front de falaise à Tromel réalisée par moi-même.

B) Analyse long-terme issue des photos d'archives

La *figure 8*(a) présente le trait de côte naturel 2018 déterminé par le Cerema à 1/2500 et celui 2018 tracé durant le stage sur QGIS à 1/500. Bien que le trait de côte du Cerema suive relativement bien le tracé du sommet des falaises, de nombreuses zones erronées se distinguent. La falaise est soudainement délimitée par son pied et non plus son sommet dans ces zones, ce qui retire une cohérence à la méthode. De surcroît, l'échelle 1/2500 diminue nettement la précision du tracé. Cela est source d'erreur lors de la comparaison temporelle. Cela confirme que le tracé *réalisé durant le*

stage lui est préférable. Les corrélations de la comparaison temporelle sont de fait plus cohérentes. La superposition des traits de côte des périodes de référence (*figure 8(b)*) permet de visualiser l'évolution du front de falaise. Malgré des zones stables, et des incohérences en certains endroits (par exemple, il arrive que le trait de côte 2000 soit plus avancé que celui de 1952, or une falaise est dans l'impossibilité de prograder), la tendance générale de recul du littoral sur les dernières 66 années est visible à premier ordre.

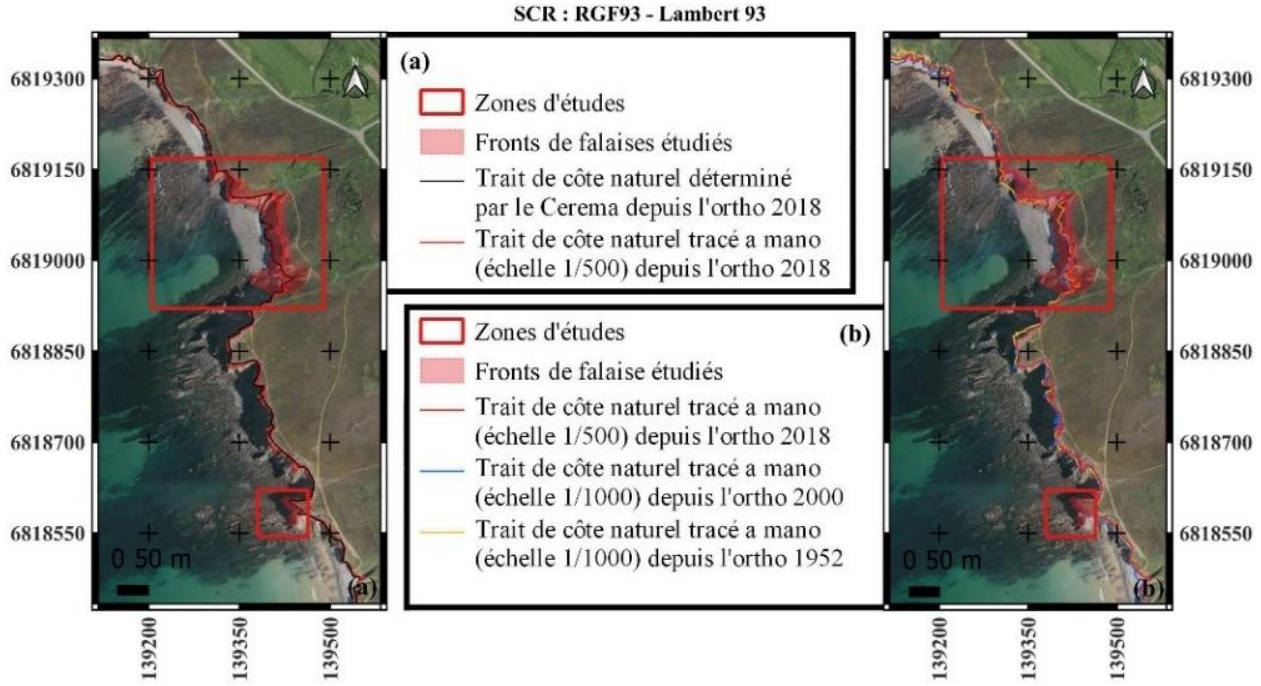


Figure 8. Carte de comparaison entre le tracé du trait de côte établi par le Cerema et celui tracé durant le stage pour la période 2018 (a). Carte de comparaison des traits de côtes des 3 périodes de référence (1952, 2000 et 2018) tracés *a mano* (b).

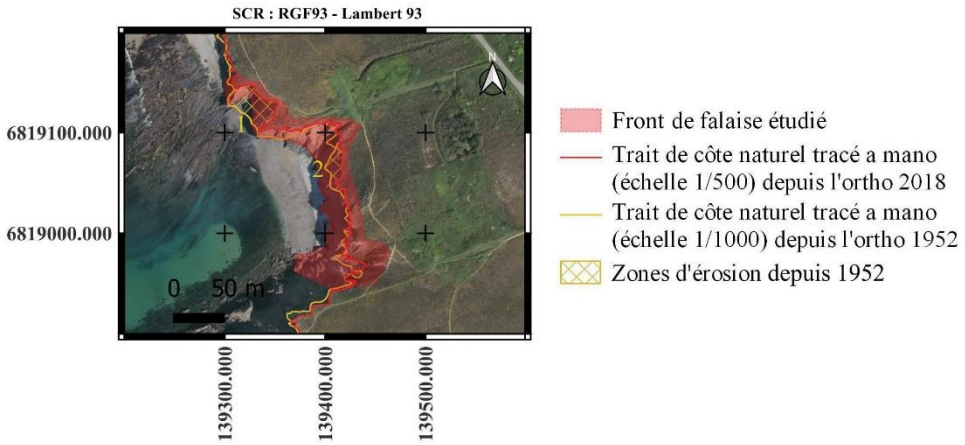


Figure 9. Carte des zones d'érosions visibles sur le site Porzh Koubou sur les derniers 66 ans, déterminées par différence entre les traits de côte naturel tracés durant le stage de 2018 et 1952.

En zoomant, l'analyse des différences de traits de côte a permis d'établir qu'il n'existe pas de concrète zone d'ablation visible à Tromel (le seul écart visible entre les traits de côte 1952 et 2018 relève d'une erreur de délimitation du sommet de falaise pour la période 1952). Le site semble peu

affecté par l'érosion. *A contrario*, les différences de traits de côtes sont sensiblement plus visibles à Porzh Koubou. Cela permet de sectoriser deux zones d'érosion à Porzh Koubou entre 1952 et 2018 (*figure 9*).

La segmentation des zones d'érosion ayant permis d'appliquer l'outil "Mesurer une aire", les résultats suivants sont obtenus : la zone d'érosion n°1 (*figure 9*) a vu s'éroder une surface de 1205.089 m² depuis 1952 ; la zone d'érosion n°2 (*figure 9*) a vu s'éroder une surface de 501.697 m² depuis 1952. Tout cela est représenté dans la *figure 10*. Ces zones représentent des surfaces importantes. En considérant ces zones comme des prismes, il est possible d'estimer des volumes érodés. En multipliant les surfaces concernées par la hauteur de la falaise (30 m), cela donne des volumes respectifs de 36 152.67 m^3 et de 15 050.91 m^3. Les effondrements gravitaires se produisant à Porzh Koubou sont considérables.

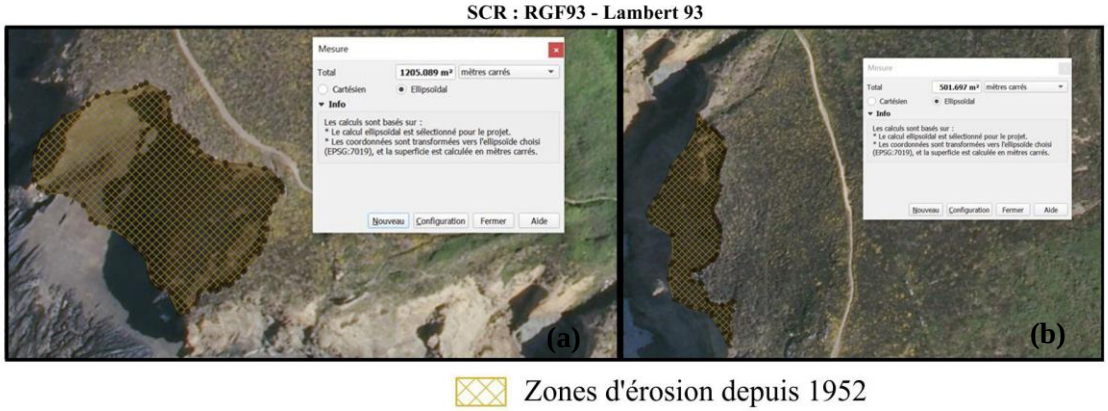


Figure 10. Résultats des calculs d'aire des zones érodées obtenus à l'aide de l'outil Mesurer une aire sur QGIS. La figure (a) correspond à la zone d'érosion n°1 (aire de 1205.089 m²) de la *figure 9*. La figure (b) correspond à la zone d'érosion n°2 (aire de 501.697 m²) de la *figure 9*.

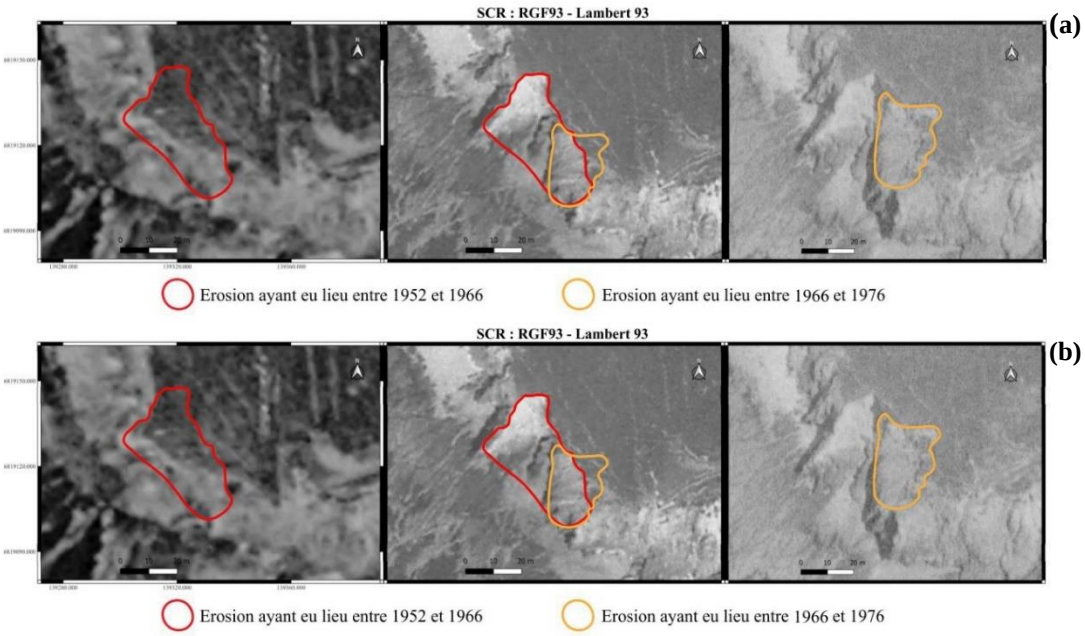


Figure 11. Suivi des zones d'érosion n°1 (a) et n°2 (b) de la *figure 9*. Cela a permis de discriminer les dates des effondrements des pans du front de falaise au cours du temps.

Le suivi des photographies aériennes et des traits de côte par comparaison entre chaque période a permis d'assigner des bornes temporelles aux évènements de glissements de terrain, qui se retrouvent dans la *figure 11*. Ainsi, bien que considérable, la zone d'érosion n°1 (*figure 9*) n'a connu que 2 épisodes d'ablation de son front de falaise : un premier entre 1952 et 1966 ; un second qui a eu lieu entre 1966 et 1976. Elle semble stable depuis. La zone d'érosion n°2 (*figure 9*) a connu des périodes d'effondrement plus récentes : une première entre 1976 et 2000 ; une seconde entre 2009 et 2018. Une meilleure précision n'a pu être obtenue faute de la disponibilité des photographies aériennes, ou des distorsions géométriques liées à ces dernières (notamment pour 1993).

C) Suivi 3D des falaises

1 – Porzh Koubou, un site stable sur la période de suivi

L'analyse du front de falaise de Porzh Koubou (*figure 12*) n'est représentée dans les résultats que par un exemple : celui du 16/06/2022. En effet, les nuages de points des autres périodes présentent exactement la même morphologie. Pour des questions de lisibilité, ils ne sont pas présentés pour éviter un encombrement du rapport.

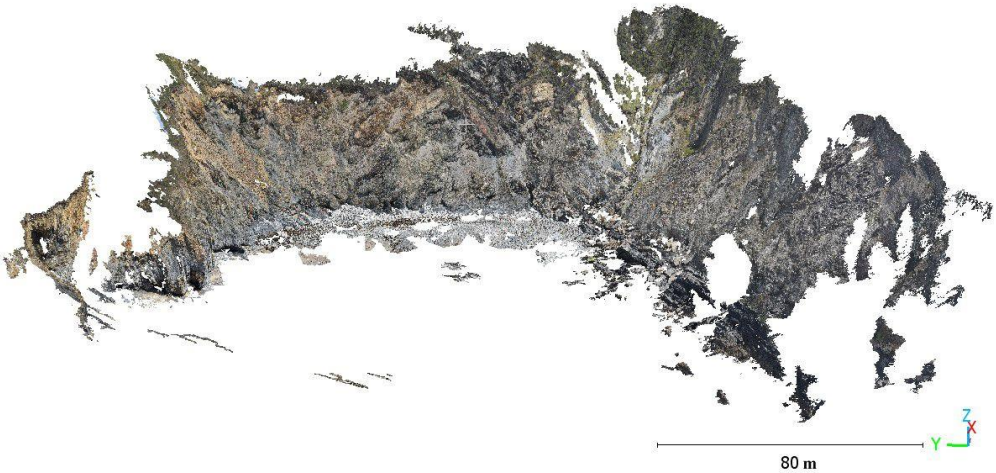


Figure 12. Nuage de points dense de Porzh Koubou issu des acquisitions photogrammétriques du 16/06/2022 et obtenu après traitement *Metashape* et visualisé sur *CloudCompare* en filtre RGB (tel que visible sur le terrain).

La méthode C2C donne un champ scalaire (*figure 13*) allant de 0,001 m à 53,875 m. Les valeurs extrêmes se trouvent toutes en périphérie du nuage de points. Cela est simplement dû au fait que les zones en question sont absentes sur le nuage de référence, mais pas celui dont il est discuté ici. En ce sens, cela augmente la distance pour les points du nuage comparé vis-à-vis du nuage de référence, aboutissant à ces fortes disparités de distances absolues. Ces valeurs peuvent être considérées comme non-significatives. Le reste du front de falaise présente une couleur bleue

électrique vive, appliquée aux distances proches de celle minimale (0,001 m). Les distances des points du front de falaise gravitent proche de ce minima. Il est d'en conclure que d'après l'approche C2C, la falaise de Porzh Koubou est stable sur la période des suivis.

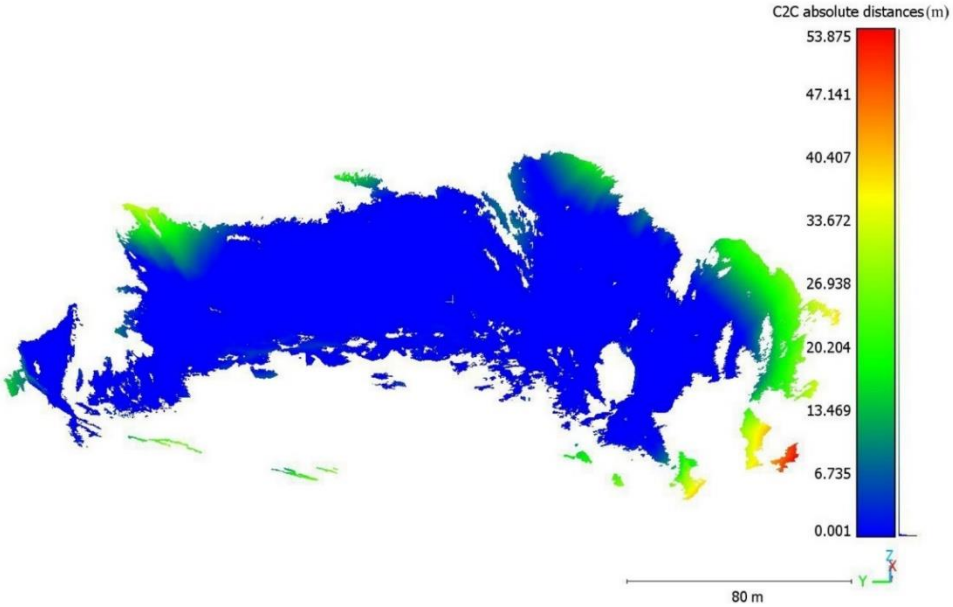


Figure 13. Résultats en champ scalaire de la méthode C2C *Cloud-to-Cloud* au nuage de points dense de Porzh Koubou du 16/06/2022, sous-échantillonné à 10 cm, et comparé au nuage précédent (20/01/2022), également sous-échantillonné à 10 cm.

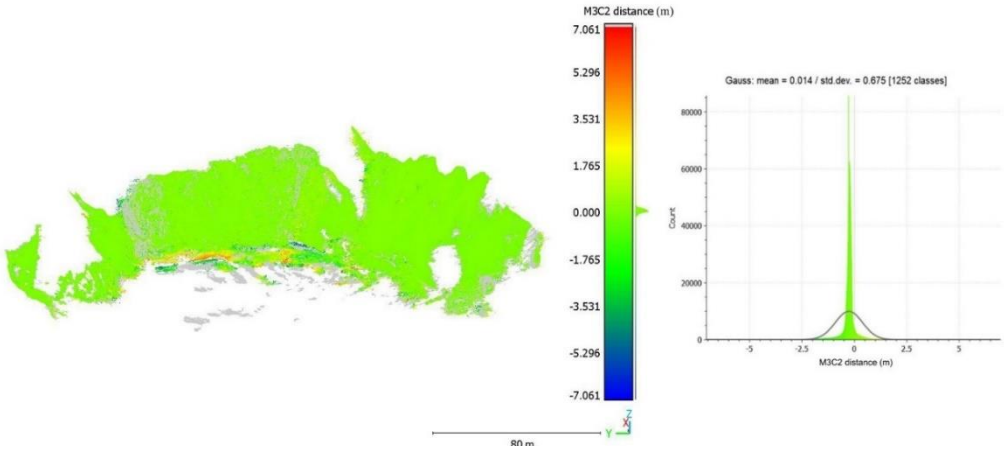


Figure 14. Résultats de l'application de la méthode M3C2 *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* au nuage de points dense de Porzh Koubou du 16/06/2022, sous-échantillonné à 10 cm et comparé au nuage précédent (20/01/2022), également sous-échantillonné à 10 cm.

La méthode M3C2 (*figure 14*) offre des résultats semblables à ceux de la méthode C2C. L'ensemble des points se condense autour de la valeur 0 pour le front de falaise. La distribution renforce cette idée avec un résultat de la distance moyenne à 0.014 m pour un écart-type de 0.675 m. Des groupes épars de points ayant des distances signées positives plus élevées (> 1.765 m) sont visibles dans la zone qui correspond au cordon de galet, observable sur la *figure 12* en pied de falaise. Ils correspondent à de l'accumulation du cordon de galet. Le raisonnement inverse (espace de

déblaiement pour le cordon de galets) est applicable pour les quelques groupes avec de fortes distances signées négatives (-3.511 m et moins). Le modèle M3C2 vient confirmer que le front de falaise est stable, mais apporte une information nouvelle quant au cordon de galets.

2 – Tromel : un site évolutif sur la période de suivi

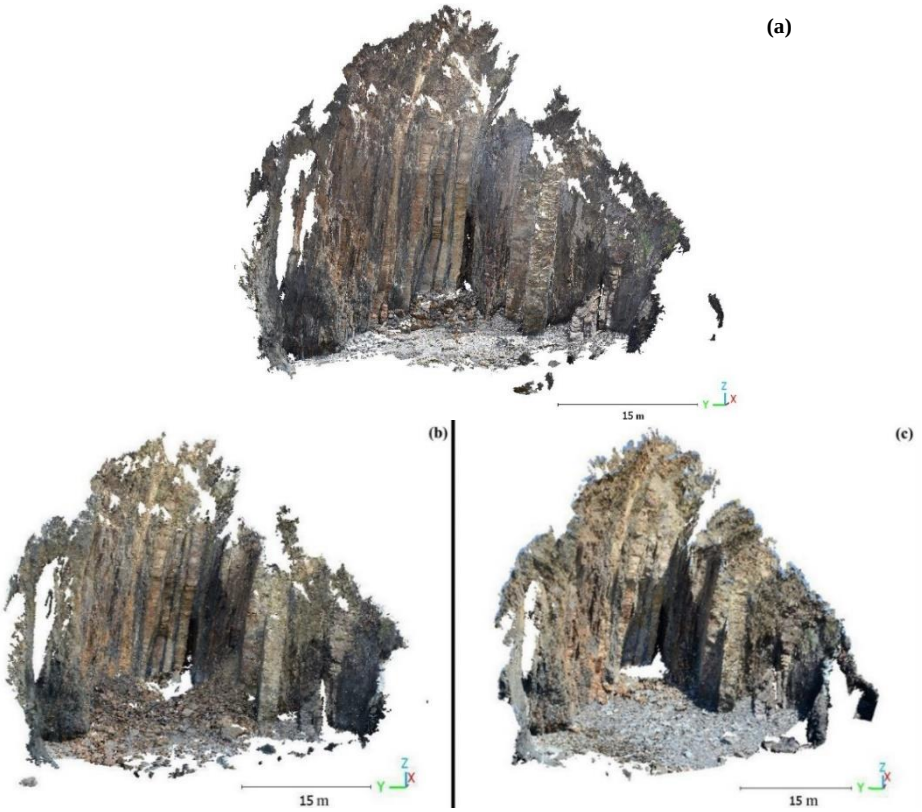


Figure 15. Nuage de points dense de Tromel (a) issu des acquisitions photogrammétriques du 16/06/2022 et obtenu après traitement *Metashape* et visualisé sur *CloudCompare* en filtre RGB (visible tel que sur le terrain). En-dessous sont affichés en filtre RGB les nuages de points denses à 10 cm de résolution pour les 2 dates significatives : 14/01/2022 (b), 27/04/2021 (c).

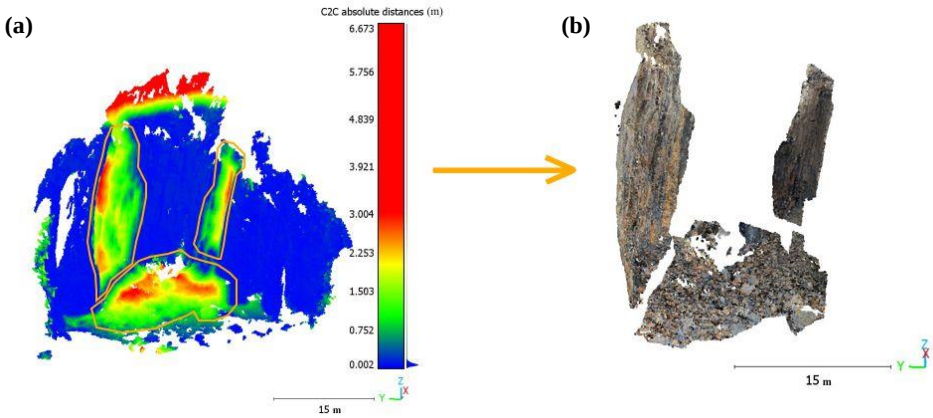


Figure 16. Discrimination des zones d'intérêt pour la date du 14/01/2021 par comparaison C2C *Cloud-to-Cloud* entre le nuage en question et celui du 20/09/2020, tous deux sous-échantillonnés à 10 cm (a). Zones d'intérêt en filtre RGB (visible tel que sur le terrain) après délinéation par l'outil Segmentation (b).

La *figure 15(a)* correspond au nuage de points acquis à Tromel le 16/06/2022. Chaque période a été analysée avec la méthode C2C. Cela a permis de révéler que seulement deux des six périodes ont connu un changement significatif du front de falaise. A l'instar de Porzh Koubou, il a été choisi de ne pas présenter les quatre autres nuages ne présentant pas d'évolution par rapport aux nuages précédents, et ce à travers toutes les comparaisons (C2C, C2M et M3C2). Sont présentés par la suite les résultats pour les 2 dates significatives : le 14/01/2021 (*figure 15(b)*) et le 27/04/2021 (*figure 15(c)*).

La méthode C2C sur le nuage du 14/01/2021 résulte en un champ scalaire (figure 16 (a)) avec un minimum 0.002 m et un maximum 6.673 m en distances absolues. A l'instar de Porzh Koubou, les valeurs extrêmes en périphérie du nuage correspondent à une zone absente du nuage de référence. Cette zone est alors considérée comme non-significative. Une fois celle-ci exclue, on constate que la répartition de ces distances est hétérogène. La falaise dans son ensemble est représentée par la couleur liée à une distance de 0.002 m. Toutefois, il existe trois enclaves présentant des valeurs de champ scalaire supérieures à 0.752 m. Ce sont des zones d'intérêt où des mouvements du front de falaise se sont produits. Ce sont ces zones après délinéation (figure 16 (b)) qui sont ensuite comparées avec les méthodes C2M et M3C2.

La comparaison C2M (*figure 17 (a)*) résulte en un champ scalaire de gamme - 4.098 m à 3.489 m. La répartition de champ scalaire sur le nuage de points distingue 2 espaces : (1) les pans du front de falaise et (2) le pied de falaise. Les pans du front de falaise (1) sont majoritairement de couleur verte à bleue, soit des valeurs inférieures ou égales à 0 m : ce sont les zones d'érosion. Quelques espaces jaunes et orange sont présents sur le front de falaise, mais ils ne sont pas représentatifs de la réalité. Il s'agit de reliquats issus de l'interpolation en maillage qui tronque les normales. Le pied de falaise (2) est majoritairement représenté par des couleur jaune et orange, soit des distances supérieures à 0.872 m : il s'agit d'une zone d'accumulation. La distribution associée renforce cette idée. La détermination graphique distingue ces deux pôles : (1) un premier pôle négatif qui correspond aux zones d'érosion, présentant un maximum de 800 points dénombrés pour la simple valeur de -1.8m ; (2) un second pôle positif qui correspond à la zone d'accumulation, présentant un maximum de 420 points attribués à la distance 1.8 m. La distribution des distances signées négatives est plus étendue : le site présente une tendance à l'érosion. La distance moyenne calculée est de -0.102 m, ce qui appuie la tendance à l'érosion pour un écart-type calculé de 1.603 m, montrant la vaste répartition des valeurs.

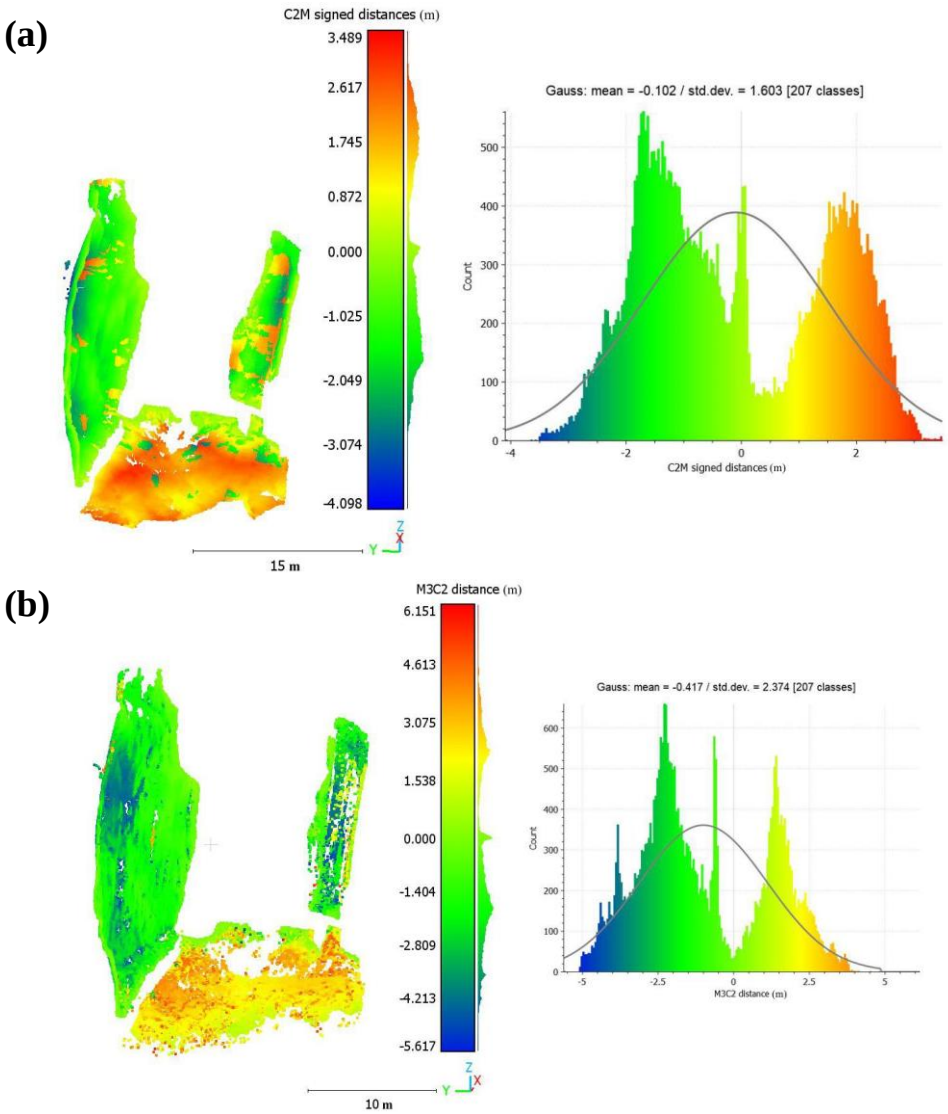


Figure 17. Résultats sous formes de champs scalaires et de graphique de distribution des méthodes C2M *Cloud-to-Mesh* (a) et M3C2 *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* (b) pour l'acquisition du 14/01/202, sous-échantillonnée à 10 cm, et comparée au relevé précédent du 20/09/2020, également sous-échantillonné à 10 cm.

La comparaison M3C2 (*figure 17 (b)*) aboutit à un champ scalaire plus étendu allant de - 5.617 m à 6.151 m. Tout comme pour le C2M, la répartition du champ scalaire sur le nuage de points distingue 2 espaces : (1) les pans du front de falaise et (2) le pied de falaise. Les pans du front de falaise (1) sont presque intégralement de couleur verte à bleue, soit des valeurs allant de 0 m à -5.617 m, avec un pic entre -1.404 et -2.809 m : ce sont les zones d'érosion. Le pied de falaise (2) est exclusivement représenté par des couleur jaune et orange, soit des distances supérieures à 1.538 m avec la plus grande répartition en nombre de points entre 1.538 et 3.075 m: il s'agit d'une zone d'accumulation. La représentation graphique distingue ces deux pôles : (1) un premier pôle négatif qui correspond aux zones d'érosion, présentant un maximum de 660 points dénombrés pour la distance de -2.1m ; (2) un second pôle positif, présentant un maximum de 520 points attribués à la distance 1.5 m. La distribution des distances signées négatives est plus étendue : le site présente une tendance à l'érosion. La distance moyenne calculée est de -0.417 m, ce qui appuie la tendance à

l'érosion pour un écart-type calculé de 2.374 m, montrant la vaste répartition des valeurs. La méthode M3C2 semble toutefois plus cohérente : elle n'affiche pas de couleur associée à des distances signées positives sur les pans de falaise. Cela est en meilleure adéquation avec la réalité d'un front de falaise qui ne peut accréter ou avancer.

Bien que la comparaison M3C2 (*figure 17 (b)*) présente des valeurs plus importantes que la C2M (figure 16), l'ordre de grandeur reste le même (ici métrique). Les 2 comparaisons aboutissent globalement à la même discrimination des trois zones : (1) les deux pans de falaise sont des zones d'érosion, (2) tandis que l'espace situé en pied de falaise est une zone d'accumulation du matériel érodé.

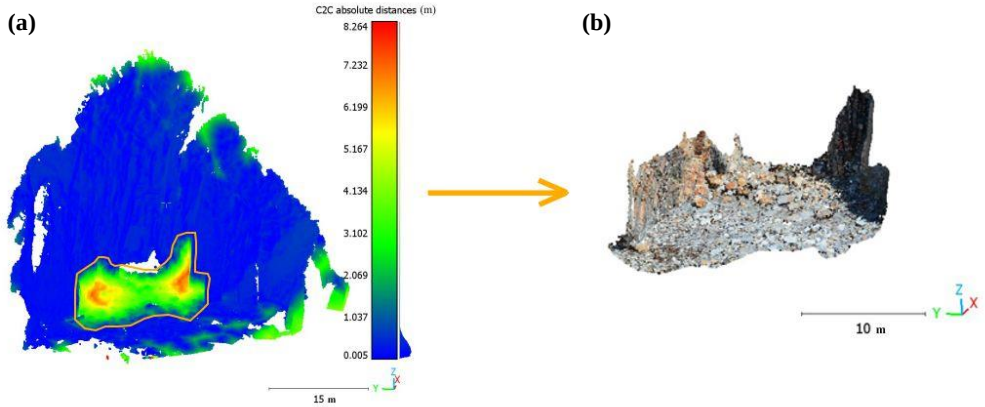


Figure 18. Discrimination des zones d'intérêt pour la date du 27/04/2021 par comparaison C2C *Cloud-to-Cloud* entre le nuage en question et celui du 14/01/2021, tous deux sous-échantillonnés à 10 cm (a). Zone d'intérêt en filtre RGB (visible tel que sur le terrain) après délinéation par l'outil Segmentation (b).

La méthode C2C sur le nuage du 27/04/2021 résulte en un champ scalaire (figure 18 (a)) s'étendant de 0.005 m à 8.264 m de distances absolues. *A contrario* des instances précédentes, les valeurs en périphérie sont moins extrêmes, et moins nombreuses. Mais elles restent toujours non significatives. Le front de falaise est représenté de façon homogène en bleu électrique. Cela correspond aux valeurs qui oscillent proches du minimum de ce champ scalaire (0.005 m). Le pied de falaise présente lui une hétérogénéité du champ scalaire, transitant du bleu-vert, soit 1.017 m de distance absolue, à l'orange, soit 7.232 m de distance absolue. Cette zone a donc bougé par rapport à la période précédente. Or en observant finement les *figures 15 (b)* et (c), un constat est à établir : au 14/01/2021 les débris issus de l'érosion de la falaise forment un relief en pied de falaise, qui est absent au 27/04/2021. Ce matériel érodé a été déplacé en l'espace de 3 mois. *In fine*, deux résultats se présentent pour cette période : le front de falaise est stable (1), tandis qu'il y a eu un déblaiement des débris jalonnant le pied de falaise (2).

Les analyses C2M (figure 18 (a)) et M3C2 (figure 19 (b)) fournissent des champs scalaires couvrant des gammes respectives de -3.586 m à 3.572 m et de - 5.988 m à 5.062 m. Dans les deux cas, le champ scalaire est représenté majoritairement dans les gammes de couleur verte et bleue, ce

qui équivaut aux gammes de distance inférieures à 0 m. Le champ scalaire C2M présente toutefois quelques zones de couleurs liées aux distances positives. Tout comme pour la période du 14/01/2021, ces zones résultent de l'interpolation en maillage dont les facettes tronquent les normales. Le champ scalaire M3C2 est presque intégralement dans les valeurs négatives. Les quelques points positifs qui sortent du lot sont éparses et situés en périphérie des trous dans le nuage de points. Il s'agit probablement de points présents sur le nuage comparé reconstruit le 27/04/2021 mais absent dans le nuage de référence généré au 14/01/2021. Les distances moyennes calculées sur la distribution sont respectivement de - 0.811 m et - 1.784 m pour le C2M et le M3C2, avec des écarts-types respectifs de 1.301 m et 1.447 m. La distribution du C2M présente un fort bloc dans les valeurs négatives : toutes les valeurs comprises entre -3 m et 0 m ont plus de 100 points dénombrés. Il faut cependant

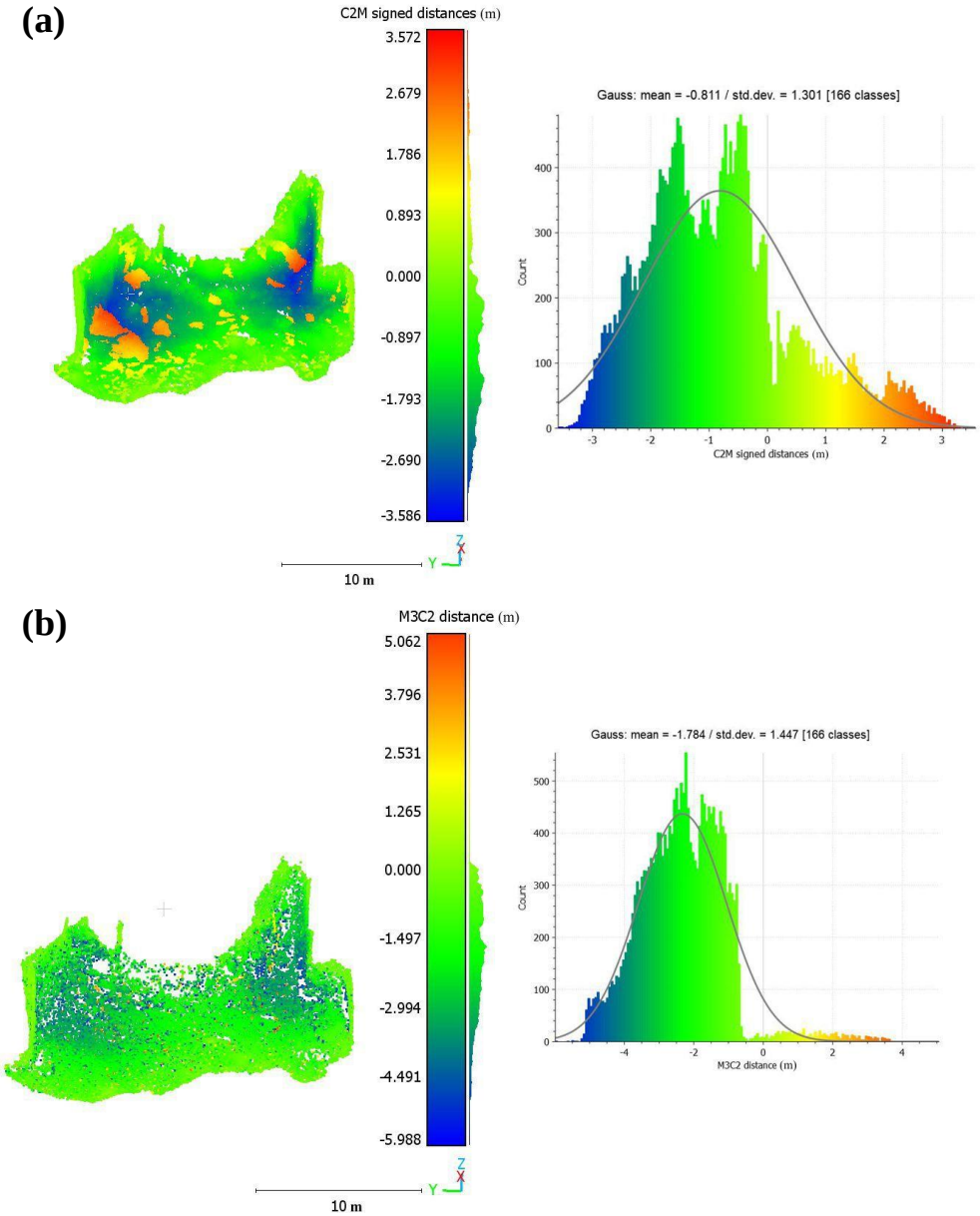


Figure 19. Résultats sous formes de champs scalaires et de graphique de distribution des méthodes C2M *Cloud-to-Mesh* (a) et M3C2 *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* (b) pour l'acquisition du 27/04/2021 sous-échantillonnée à 10 cm, et comparée au relevé précédent du 14/01/2021, également sous-échantillonné à 10 cm.

noter la présence des valeurs positives en relation avec les effets du maillage discutés précédemment. La distribution du M3C2 donne une répartition quasi intégrale du côté des distances signées négatives. Chacune des distances signées positives ne dépasse jamais la vingtaine de points dénombrés. Tout cela fait bien ressortir l'idée que la zone discriminée (figure 18 (b)) est une zone d'érosion, liée au déblaiement du matériel érodé.

D) Partie expérimentale : calculs des volumes érodés

Dans le but de compléter cette étude et d'avoir un aperçu des volumes érodés à Tromel sur les 2 périodes significatives, un procédé expérimental a été mis en place. Le postulat est que le volume érodé peut être retrouvé manuellement par la multiplication de la surface des facettes composant le maillages (*figure 16(b)* et *figure 18(b)*) par la distance moyenne entre les points de ce nuage. Cette approche sert d'estimation de premier ordre.

Tableau 3 : Tableau des résultats obtenus en m^3 pour les calculs des volumes d'érosion sous Matlab, selon la méthode de comparaison et le champ scalaire utilisés (densité surfacique ou densité volumique).
d = distance moyenne entre les points estimée par *CloudCompare*
s = surface estimée par *CloudCompare* de la zone délinéée

Méthode utilisée	09/2020 – 01/2021	01/2021 – 04/202)
C2M_Surfacique	-34.75	-287.69
C2M_Volumique	-29.74	-235.66
M3C2_Surfacique	-76.48	-582.30
M3C2_Volumique	-63.83	-499.05
Volume V = d × s (estimation de 1er ordre)	-71.77	-386.23

Les 2 autres méthodes appliquées ont requis un court code Matlab. Elles se basent sur la simple somme des différents volumes élémentaires (positif ou négatif) associés à chaque point du nuage. Le volume de chaque point a été retrouvé de 2 manières distinctes : (1) en divisant les champs scalaires des distance C2M et M3C2 par le champ scalaire de la densité surfacique (nombre points dans un cercle de $1m^2$ de rayon R = 0.564m) ; (2) en divisant les champs scalaires des distances C2M et M3C2 par le champ scalaire de la densité volumique (nombre de points dans une sphère de $1m^3$ de rayon R = 0.64 m) . Les résultats de ces calculs sont résumés dans le *tableau 3*.

V. DISCUSSIONS

A) Analyse des résultats et interprétation

À la suite des discussions s'étant déroulées avec Bernard LE GALL sur le terrain, puis Marion JAUD à l'IUEM, il est proposé qu'il existe un fonctionnement différentiel des fronts de falaise de

Porzh Koubou et de Tromel. Le système de Porzh Koubou est stable sur le temps court (depuis 2020), mais présente des épisodes sporadiques de glissements massifs sur le temps long (depuis 1952). *A contrario*, le système de Tromel ne présente pas d'épisode d'effondrement massif du front de falaise depuis 1952. Il subit quelques événements d'érosion de faible ampleur au moins depuis le début du suivi. Ce fonctionnement différentiel suppose une hétérogénéité dans les régimes de forçage contraignant l'érosion entre les 2 sites.

Pour Porzh Koubou, les mouvements gravitaires sont déterminés par les failles et les fractures dans le front de l'escarpement rocheux. Les loupes de glissement correspondent à des blocs délimités par les jeux de failles (inverses ou gravitaires) conjuguées. Le système est donc sous contrôle d'un héritage structural. Dans ce cas, les forçages continentaux (à savoir les forçages tectoniques, météorologiques et hydrogéologiques) prédominent. Ces forçages continentaux correspondent à l'altération du front de falaise par les précipitations, mais également à l'érosion mécanique, qui procède de l'infiltration et de la circulation de la nappe phréatique dans les microfractures. Cela vient augmenter la pression hydrostatique dans la roche et la conduit à terme à rompre (***Letortu et al, 2017***). Dans le cas des côtes d'ablation comme celle de Porzh Koubou, la mer ne serait alors qu'un agent de déblaiement du matériel effondré (***Pierre et Lahouse, 2006***).

A contrario, le site de Tromel est contrôlé par les forçages marins, et principalement l'impact de la houle. Ce processus est modélisé depuis les années 80 (***Emery et Kuhn, 1982*** ; ***Sunamura, 1982***) et a été démontré grâce à des suivis sismiques par ***Adams et al, 2002*** ainsi que ***Young et al, 2012***. Il y a une érosion mécanique au pied de l'escarpement rocheux, générée par l'énergie incidente libérée lors des impacts des vagues sur le pied de falaise. En parallèle, la houle et les ondes infragravitaires (par effet de levier) viennent créer localement des surcharges de pression, qui déstabilisent la falaise provoquant ainsi des mouvements micrométriques de cette dernière en réponse (***Young et al, 2012***). La répétition de cette sollicitation mécanique sur le temps long fragilise continuellement le front de falaise, ce qui conduit à son effritement progressif. Ces effets sont amplifiés lors des périodes de tempêtes. Ceci pourrait expliquer que les zones d'érosions déterminées sur *CloudCompare* correspondent à des périodes "hivernales" (entre octobre à avril), saison la plus propice aux tempêtes en Bretagne.

La réalité se rapproche toutefois plus d'un probable couplage des forçages continentaux et marins : ce paradigme tend de plus en plus à dominer pour la plupart des falaises ou côtes d'ablation (***Costa, 2005, Letortu et al, 2015b***). En effet, à Tromel, ce sont des strates géologiques qui partent dans l'axe des stratifications : le facteur géologique serait donc également prépondérant. Pour Porzh Koubou, la pétrologie d'une partie des galets du cordon ne présente aucune similitude avec les falaises de schistes et de quartzites du site : il s'agit de gneiss, granite d'anatexie et leucogranite en provenance de la Pointe du Raz (située 25 km plus au Sud). Si ces observations s'avèrent vérifiées, alors le

déplacement de ces galets implique des vitesses de courant très élevées (en lien avec le diagramme d'Hjulström), et donc une potentielle incidence des forçages marins sur le site. De surcroît, en sommet de falaise sur le site de Tromel, il est possible d'observer des fentes et terriers dans lesquels les précipitations peuvent s'infiltrer et circuler à travers les microfractures de la falaise. Si cela venait à être confirmé, il faudrait imputer une part de responsabilité de l'érosion aux forçages continentaux (au moins les forçages météorologiques et hydrogéologiques).

Comme sur toutes les falaises, il est difficile de discriminer exactement les facteurs déclencheurs car (1) les données à haute résolution couvrant des périodes longues (sur plusieurs années) sont rares ; (2) les relations entre les différents facteurs et les effondrements gravitaires ne sont pas linéaires dans le temps et l'espace :il existe une multitude de combinaisons possibles et des effets de retard ; (3) chaque site présente des spécificités morphostructurales et environnementales qui complexifient les transpositions de modèle d'un site à un autre. Mais des approches existent désormais pour permettre d'étudier tous ces facteurs : le suivi multiparamètre développé par ***Letortu et al, 2017***.

B) Limites et erreurs

1 – Les limites de l'utilisation des outils géomatiques

Les outils géomatiques sont performants pour le suivi des littoraux peu escarpés, tels que des plages sableuses. Cependant, pour un système en relief quasi vertical tel que les falaises, la géomatique présente un certain nombre de lacunes qui limitent la précision de la méthode. Ces erreurs peuvent notamment être liées à l'interprétation de l'opérateur (***Cerema, 2022***) qui intègre nécessairement la subjectivité, notamment pour les délinéations assujetties aux limites de végétation (encore plus si celle-ci est clairsemée).

Il existe la question de la qualité des clichés originaux (***Cerema, 2022***). Cela comprend des variations de colorimétrie entre les clichés de plusieurs époques. Ainsi, un même marqueur peut avoir un signal colorimétrique différencié entre 2 images, qu'il est possible d'interpréter de façon erronée. Ces effets peuvent souvent découler d'un ombrage changeant selon l'heure ou la saison de prise du cliché. S'ajoute donc là un paramètre naturel qu'il est difficile à maîtriser. Il faut aussi prendre en compte l'évolution technique continue des appareils photos qui implique une amélioration dans la netteté et le contraste des images modernes, qui sont dès lors sans commune comparaison avec des photographies aériennes anciennes.

Une autre source d'imprécision est à rattacher au processus de géoréférencement. Chaque pixel ayant des coordonnées propres, il suffit d'une différence de résolution (c'est-à-dire d'un nombre de pixels différents) entre 2 photographies d'archive pour entraîner des décalages entre les 2 images,

décalages simplement issus de ces écarts de coordonnées. Cela peut donc entraîner des décalages, qui n'ont a fortiori aucune corrélation avec une érosion quelconque.

Même si les photos sont géoréférencées, certaines (celles qui ne sont pas issues de la BD Ortho) ne sont pas orthorectifiées : c'est-à-dire qu'elles ne sont pas corrigées des déformations associées aux effets de prises de vues ou de relief. De plus, l'orthorectification présente des incertitudes intégrées qui proviennent de nombreux paramètres tels que le relief lui-même ou l'angle de prise de vue qui induisent des déformations. Cela conduit à des irrégularités dans la qualité géométrique d'un cliché à l'autre, mais également au sein même d'un cliché.

In fine, l'un des défis majeurs associé à la géomatique est le fait que toutes ces erreurs sont difficilement quantifiables (bien que qualifiables). Il est donc compliqué d'en établir un suivi pertinent à travers différentes campagnes d'acquisition. Chaque paramètre qui change implique à son tour une modification des erreurs. De surcroît, il y a une conjonction entre toutes ces incertitudes en tout point de l'image étudiée.

3 – Erreurs sur les calculs de volume érodés

Ces procédés restent encore expérimentaux et en cours de développement. Subséquemment ils sont peu ou prou renseignés dans la littérature. La compréhension et l'intégration des variables et des outils mathématiques en 3D à déployer pour l'analyse de ces volumes demeurent à l'heure actuelle très incertaines. Sans compter qu'aux erreurs potentielles associées aux calculs, il faut également ajouter les erreurs intrinsèques au logiciel *CloudCompare* et à l'utilisateur (comme par exemple, le détourage pour la méthode du C2M). Néanmoins, les erreurs relatives $\frac{(valeur\ mesurée - valeur\ de\ référence}{valeur\ de\ référence} \times 100$ pour ces périodes ont été calculées. Celles pour le différentiel entre l'acquisition du 20/09/2020 et du 14/01/2021 sont présentée dans le *tableau 3*.

Tableau 4 : Estimation et comparaison des erreurs relatives entre les différentes méthodes de calcul de volumes érodés pour la période entre le 14/01/2021 et le 20/09/2020.
Les cases orange correspondent aux valeurs de références.
Les cases bleues correspondent aux valeurs mesurées.

Erreur relative (%)	C2M_Surface	C2M_Volume	M3C2_Surface	M3C2_Volume
C2M_Surfacique	/	-14.40	120.10	83.67
C2M_Volumique	16.82	/	157.12	114.59
M3C2_Surfacique	-54.57	-61.11	/	-16.54
M3C2_Volumique	-45.56	-53.40	19.82	/
Volume V	-51.59	-58.57	6.56	-11.07

La plupart de ces erreurs sont bien trop élevées. Les résultats liés au C2M semblent sous-évalués par rapport aux autres, tandis que les résultats associés au M3C2 semblent surévalués. Seules les méthodes M3C2 et Volume V présentent une erreur proche, mais toujours supérieure à ± 5%. Sur la base de ces résultats des calculs d'erreur (*tableaux 4*), il est difficile d'affirmer qu'une méthode est préférable à l'autre. D'autant plus que l'on ignore quelle pourrait être la méthode de référence standard pour ces estimations. En effet, chaque méthode est soumise à des approximations et des simplifications. En ce sens, convient-il sûrement de ne considérer présentement ces résultats que comme informatifs au premier ordre, sans réelle précision.

VI. Conclusion

Le suivi à partir de données multi-outils a permis d'améliorer la compréhension de la dynamique de recul des falaises de Porzh Koubou et de Tromel. Ainsi, l'étude géologique de terrain a-t-elle permis d'avancer sur la notion des facteurs déclencheurs et les forçages contrôlant l'érosion des deux sites. Pour Porzh Koubou, de prime abord, les forçages apparaissent comme étant continentaux : l'héritage structural (failles conjuguées inverses et gravitaires) délimite les loupes de glissement. Les plans de fractures offrent des zones de moindre résistance de la roche, ainsi que des voies d'infiltration pour l'eau. A Tromel, les forçages marins prédominent, mais il y aurait aussi un rôle non négligeable du plan de stratification des strates. Le suivi géomatique par photographies aériennes d'archive a permis de suivre l'évolution du trait de côte à échelle pluri-décennale. Cela a amené au constat que le site de Porzh Koubou avait reculé par épisodes sporadiques d'effondrements massifs, tandis que le site de Tromel est peu affecté par l'érosion. Le suivi « haute résolution » par photogrammétrie SfM a permis d'obtenir des modèles 3D en nuage de points pour une comparaison à l'échelle saisonnière et pluri-annuelle. Différentes méthodes de comparaison ont été utilisées pour les calculs de distance entre les nuages de points. La méthode du Multiscale Model to Model Cloud Comparison apparaît comme plus précise. Cependant, quelle que soit la méthode, les résultats des calculs font arriver à l'inverse du constat pluri-décennal précédent : le site de Tromel a évolué sur les 2 dernières années, principalement pendant la saison hivernale avec l'action des tempêtes tandis que Porzh Koubou est stable. Il est donc essentiel de travailler à différentes échelles temporelles pour une meilleure compréhension de la dynamique de recul des falaises. Il paraît également nécessaire de poursuivre le développement et les tests sur les méthodes encore expérimentales de calcul de volumes érodés à partir des modèles 3D de nuages de points. La photogrammétrie SfM est un outil très puissant et présente un potentiel énorme : il est possible de la mettre en place à l'aide d'un Smartphone (***Jaud et al, 2019***), évitant les coûts élevés liés à l'achat d'appareil photographique. *In fine*, chaque outil apporte des connaissances supplémentaires et met en lumière un nouvel aspect, non détectables par

les autres méthodes. Cela prouve la complémentarité des approches, mais également l'intérêt d' appliquer ce suivi multi-temporel pour approcher le plus finement possible la réalité.

En parallèle, l'acquisition des données réalisées le 16/06/2022 est venue compléter le jeu de données existant. Les informations supplémentaires acquises par les différentes méthodes de suivis durant ce stage viennent étayer le dossier d'intégration à DYNALIT. À la suite de ce stage, le cahier des charges pour les données requises par DYNALIT est désormais rempli. Le dossier est dans la phase de mise en forme. La demande sera déposée pour l'automne 2022.

Cependant, il faut garder à l'esprit les incertitudes liées à chaque outil. Aucun modèle n'est parfait. Pour parachever le modèle, de nombreuses opportunités d'études sont à disposition. Certaines d'entre elles sont déjà en œuvre. Un suivi de la microsismicité et un suivi caméra en temps réel sont assurés par une station permanente et autonome en sommet de falaise à Porzh Koubou, sous la supervision d'Emmanuel AUGEREAU et de Nicolas LE DANTEC. Les données acquises par ce système n'ont cependant pas encore été exploitées. Si le stage s'était poursuivi dans la durée, alors l'analyse de ces données eût été le prochain objectif. D'autres pistes ont été proposées : les cordons de galets qui jalonnent ces falaises et les plages voisines ont une dynamique qui leur est propre. Il serait intéressant de l'étudier. Il y a aussi la question des platiers rocheux. Leurs morphologies respectives diffèrent entre les deux sites. Un suivi de ces derniers permettrait éventuellement de mieux comprendre les processus hydrodynamiques en action. Enfin Bernard LE GALL a émis l'idée qu'il serait intéressant de réaliser une étude géologique de terrain sur la falaise de Postolonnec (coupe de Veryach à Camaret) qui s'est effondrée le 18/10/2020. Et ce dans le but de croiser les observations avec celles de Porzh Koubou et de Tromel. Il est possible que la mise en lumière de ces sites grâce à DYNALIT convainque d'autres personnes de mener à bien ces études.

Pour conclure, tout ce qui a été réalisé au cours de stage a vocation à être déployé sur d'autres sites en Bretagne, comme par exemple les falaises de Rusucumunoc et des Blancs-Sablons. J'ai participé le 01/06/2022 à une acquisition photogrammétrique sur ces deux sites, avec la même méthodologie que celle présentée dans ce rapport, et en compagnie de Marion JAUD et Nicolas LE DANTEC. A terme, ces données seront amenées à être comparées avec le précédent relevé de 2018, et de nouveaux relevés dans le futur.

Bibliographie

P. N. Adams, S. A. Robert, et J. Revenaugh, « Microseismic measurement of wave-energy delivery to a rocky coast | Geology | GeoScienceWorld ». https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article-abstract/30/10/895/192273/Microseismic-measurement-of-wave-energy-delivery (consulté le 30 juillet 2022).

P. Bazin et D. Olivry, « Le Conservatoire du littoral : un acteur face au changement climatique », *Sciences Eaux & Territoires*, vol. Numéro 24, nº 3, p. 50-53, 2017, doi: 10.3917/set.024.0050.

J. Brasington, B. T. Rumsby, et R. A. McVey, « Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 25, nº 9, p. 973-990, 2000, doi: 10.1002/1096-9837(200008)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y.

J. Brasington et R. M. A. Smart, « Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 28, nº 3, p. 231-247, 2003, doi: 10.1002/esp.480.

S. Costa, « Falaises à recul rapide et plages de galets : de la quantification des dynamiques d'un sytsème complexe à la caractérisation des risques induits. », Université de Bretagne Occidentale, Brest, 2005.

P. D. Crozon, « Document d'Objectifs Site NATURA 2000 n° FR5300019 », p. 175, 2006.

K. O. EMERY et G. G. KUHN, « Sea cliffs: Their processes, profiles, and classification », *GSA Bulletin*, vol. 93, nº 7, p. 644-654, juill. 1982, doi: 10.1130/0016-7606(1982)93<644:SCTPPA>2.0.CO;2.

F. Hédou, « Mise à jour de l'indicateur national de l'érosion côtière : Proposition d'une méthodologie », Cerema, Plouzané, Rapport d'étude, juin 2022.

M. Jaud, S. Bertin, M. Beauverger, E. Augereau, et C. Delacourt, « RTK GNSS-Assisted Terrestrial SfM Photogrammetry without GCP: Application to Coastal Morphodynamics Monitoring », *Remote Sensing*, vol. 12, nº 11, Art. nº 11, janv. 2020, doi: 10.3390/rs12111889.

M. Jaud, M. Kervot, C. Delacourt, et S. Bertin, « Potential of Smartphone SfM Photogrammetry to Measure Coastal Morphodynamics », *Remote Sensing*, vol. 11, nº 19, Art. nº 19, janv. 2019, doi: 10.3390/rs11192242.

A. F. Jones, P. A. Brewer, E. Johnstone, et M. G. Macklin, « High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, nº 10, p. 1574-1592, 2007, doi: 10.1002/esp.1505.

D. Kuhn et S. Prüfer, « Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany », *Geomorphology*, vol. 213, p. 153-165, mai 2014, doi: 10.1016/j.geomorph.2014.01.005.

D. Lague, N. Brodu, et J. Leroux, « Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z) », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 82, p. 10-26, août 2013, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.

S. N. Lane, T. D. James, et M. D. Crowell, « Application of Digital Photogrammetry to Complex Topography for Geomorphological Research », *The Photogrammetric Record*, vol. 16, nº 95, p. 793-821, 2000, doi: 10.1111/0031-868X.00152.

J. Lejot, C. Delacourt, H. Piégay, T. Fournier, M.-L. Trémélo, et P. Allemand, « Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled

platform », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, nº 11, p. 1705-1725, 2007, doi: 10.1002/esp.1595.

P. Letortu, S. Costa, J.-M. Cador, C. Coinaud, et O. Cantat, « Statistical and empirical analyses of the triggers of coastal chalk cliff failure », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 40, nº 10, p. 1371-1386, 2015b, doi: 10.1002/esp.3741.

P. Letortu *et al.*, « Retreat rates, modalities and agents responsible for erosion along the coastal chalk cliffs of Upper Normandy: The contribution of terrestrial laser scanning », *Geomorphology*, vol. 245, p. 3-14, sept. 2015, doi: 10.1016/j.geomorph.2015.05.007.

P. Letortu *et al.*, « Examining high-resolution survey methods for monitoring cliff erosion at an operational scale », *GIScience & Remote Sensing*, vol. 55, nº 4, p. 457-476, 2017, doi: 10.1080/15481603.2017.1408931.

P. Letortu *et al.*, « Impacts des vagues et de la circulation d'eau sur la microfracturation des falaises rocheuses. Mise en place d'un suivi multiparamètre en Bretagne », *edyte*, vol. 19, nº 1, p. 251-256, 2017b, doi: 10.3406/edyte.2017.1392.

D. G. Lowe, « Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints », *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, nº 2, p. 91-110, nov. 2004, doi: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.

D. Mercier, *Géomorphologie de la France*. Paris: Dunod, 2013.

C. Meur-Ferec *et al.*, « Une méthode de suivi de la vulnérabilité systémique à l'érosion et la submersion marines », *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, nº Vol. 11, n°1, Art. nº Vol. 11, n°1, avr. 2020, doi: 10.4000/developpementdurable.16731.

G. Pierre et P. Lahousse, « The role of groundwater in cliff instability: an example at Cape Blanc-Nez (Pas-de-Calais, France) », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 31, nº 1, p. 31-45, 2006, doi: 10.1002/esp.1229.

Y. Plusquellec *et al.*, *Curiosités géologiques de la Presqu'île de Crozon*. BRGM éditions, 2010.

T. Sunamura, « A Predictive Model for Wave-Induced Cliff Erosion, with Application to Pacific Coasts of Japan | The Journal of Geology: Vol 90, No 2 », 1982. https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/628661 (consulté le 30 juillet 2022).

M. Vidal *et al.*, « Le Paléozoïque de la Presqu'île de Crozon, Massif Armoricain (France) », *Géologie de la France*, nº 1, p. 3-45, 2011.

M. J. Westoby, J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey, et J. M. Reynolds, « 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications », *Geomorphology*, vol. 179, p. 300-314, déc. 2012, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

A. Young et J. Carilli, « Global distribution of coastal cliffs and retreat rates », vol. 2018, p. EP23C-2336, déc. 2018.

A. P. Young, R. T. Guza, P. N. Adams, W. C. O'Reilly, et R. E. Flick, « Cross-shore decay of cliff top ground motions driven by local ocean swell and infragravity waves », *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 117, nº C6, 2012, doi: 10.1029/2012JC007908.

A. P. Young *et al.*, « Comparison of Airborne and Terrestrial Lidar Estimates of Seacliff Erosion in Southern California », *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 76, nº 4, p. 421-427, avr. 2010, doi: 10.14358/PERS.76.4.421.

Liste des annexes :

Annexe 1 : Lexique ……. 38

Annexe 2 : Tableau des coordonnées de prises de vue à Porzh Koubou ……. 39

Annexe 3 : Tableau des coordonnées de prises de vue à Tromel ……. 40

Annexe 4 : Tutoriel de manipulation du système RTK ……. 41

Annexe 5 : Ensemble de la coupe géologique de Porzh Koubou …… 42

Annexe 6 : Code Matlab …….. 43

Annexe 7 : Tableaux des erreurs relatives des calculs de volumes pour les 2 périodes d'intérêts 44

Annexe 1 : **Lexique**

Normale : vecteur directeur de la droite perpendiculaire au plan tangent du point.

C2C : *Cloud-to-Cloud*. Comparaison sur *CloudCompare* des distances entre deux nuages de points. S'exprime en distance absolue.

C2M : *Cloud-to-Mesh*. Comparaison sur *CloudCompare* des distances entre un nuage de points et un maillage, prenant en compte les orientations des normales. S'exprime en distance signée.

GNSS : *Global Navigation Satellite System*. Système de géopositionnement par triangulation satellitaire. Offre une précision métrique aux coordonnées géographiques.

M3C2 : *Multiscale Model to Model Cloud-Comparison*. Comparaison à paramètres multiples sur *CloudCompare* des distances entre deux nuages de points. S'exprime en distance signée.

Filtre RGB : bande « Red-Green-Blue » (Rouge-Vert-Bleu) correspondant aux couleurs du spectre de la lumière perceptibles par l'œil humain.

RTK : *Real-Time Kinematic*. Correction en temps réel appliquée aux coordonnées géographiques XYZ à enregistrer par rapport à une base dont les coordonnées GPS exactes sont connues. Offre une précision centimétrique aux coordonnées géographiques.

SCR : Système de Coordonnées Géographiques qui détermine la projection et le format des coordonnées géographiques d'un objet.

SfM : *Structure-from-Motion*. Méthode de photogrammétrie dédiée à la reconstruction de modèle 3D (depuis des nuages de points denses) géoréférencés à partir de capteurs se déplaçant de station en station.

TLS : *Terrestrial Laser Scanner*. Appareil d'imagerie 3D mesurant les coordonnées XYZ d'une cible et de sa distance à l'appareil par balayage laser. Permet de recréer des nuages de points, pouvant être convertis en modèle 3D et en modèle numérique de terrain.

Annexe 2 : **Tableau des coordonnées de prises de vue à Porzh Koubou après conversion sur Circé (RGF93 – Lambert 93)**

ID	E (Est)	N (Nord)	H (Altitude)
1	139280.545	6819040.029	0.204
2	139292.480	6819013.189	0.119
3	139299.881	6818968.005	0.312
4	139323.325	6818980.796	0.626
5	139350.567	6818985.506	1.690
7	139368.680	6818998.751	2.129
8	139352.068	6819026.354	1.000
9	139353.631	6819047.436	2.521
10	139329.593	6819056.136	1.403
11	139342.586	6819077.815	3.151
12	139292.253	6819061.072	0.874
13	139307.028	6819076.799	1.438

Annexe 3 : **Tableau des coordonnées de prises de vue à Tromel après conversion sur Circé (RGF93 – Lambert 93)**

ID	E (Est)	N (Nord)	H (Altitude)
2	139409.927	6818574.144	2.607
3	139397.239	6818571.267	4.680
4	139418.336	6818572.495	4.306
5	139420.187	6818581.862	3.475
6	139420.603	6818589.183	3.775
7	139412.927	6818593.340	3.456
8	139400.473	6818596.521	2.651
9	139415.775	6818582.982	4.232

Annexe 4 : **Tutoriel de manipulation du système RTK**

Marion Jaud (IUEM) *Janv. 2022*

GNSS RTK Centipède + RTK Surveyor

$H_{Ant} = H_{canne} + 0.053$ m

$H_{Ant} = H_{repère} + 0.015$ m

→ Allumer le rover *RTK Surveyor* grâce au bouton de gauche (le bouton de droite doit être placé sur *Rover*).

→ Allumer le Smartphone et activer la 4G et le Bluetooth.

→ Ouvrir l'application *SW Maps* et créer/ouvrir un projet.

→ Paramétrer le choix du géoïde => *Settings* > *Geoid File* > choisir le RAF20.

→ Associer le Rover RTK Surveyor => *Menu* > *Bluetooth GNSS*

> *Devices* > sélectionner *Surveyor Rover-XXXX* (n° de série)

> *Instrument Model* > sélectionner *Sparkfun RTK Surveyor*

> *Instrument Height (m)* > entrer la hauteur (en mètres) de l'antenne

> Cliquer sur *Connect*

→ *Menu* > *NTRIP Connection*.

> Address : *caster.centipede.fr* > Port : *2101*

> Mount point : choisir la base Centipède (ex : IUEM)

> Cocher *Send NMEA GGA to NTRIP Caster*

> Cliquer sur *Connect*

→ Allumage des diodes RTK et Horizontal Accuracy 1cm

→ Ouvrir le volet *Enregistrement* peut être ouvert depuis l'icône *REC*

> Créer un nouveau « Layer », avec une géométrie « Point »

> S'assurer que *Fix Type* a la valeur RTK fix

> Cocher *Averaging* (1) afin de moyenner la position pendant qq. secondes

> Positionner la canne sur le point à lever et maintenir le niveau à bulle horizontal.

> Cliquer sur (3) pour réinitialiser et lancer un nouveau moyennage (maintenir « bullé » ~10s).

> Cliquer sur (2) pour enregistrer la mesure de la position moyenne. => vibration

> Cliquer sur (3) afin de réinitialiser la moyenne avant de commencer la mesure suivante.

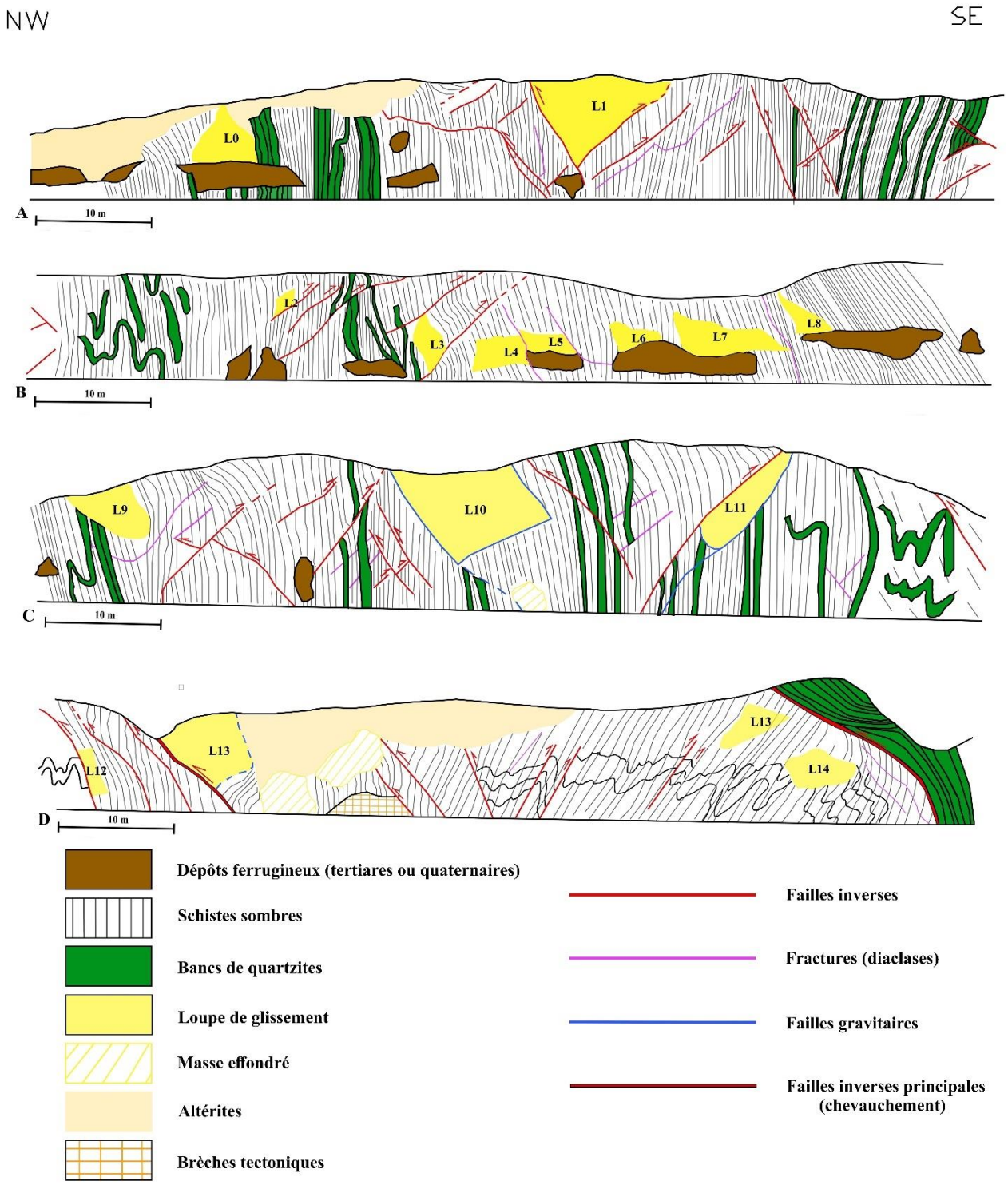
→ *Menu* > *Export* => export en XLS/ODS (ou SHP).

→ Eteindre le *RTK Surveyor* (bouton On/Off de l'alimentation).

→ Données enregistrées en local, sur le téléphone => répertoire *\SW_Maps\Export*.

1

Annexe 5 : **Ensemble de la coupe géologique de Porzh Koubou**



Annexe 6 : **Code Matlab**

```
PtCl_1 = load('20210114_Tromel_PointCloud_Lb93_volumes.txt')
BilanVolume_1 = sum(PtCl_1(:,11))

PtCl_2 = load('20210427_PointCloud_Tromel_Lb93_volumes.txt')
BilanVolume_2 = sum(PtCl_2(:,11))

PtCl_3 = load('Tromel_20220120_PtCloud_Lb93_volumes.txt')
BilanVolume_3 = sum(PtCl_3(:,10))
%Volume_density
PtCl_VD1 = load('20210114_Tromel_PointCloud_Lb93_VD.txt')
BilanVolume_VD1 = sum(PtCl_VD1(:,13))

PtCl_VD2 = load('20210427_PointCloud_Tromel_Lb93_VD.txt')
BilanVolume_VD2 = sum(PtCl_VD2(:,13))

PtCl_VD3 = load('Tromel_20220120_PtCloud_Lb93_VD.txt')
BilanVolume_VD3 = sum(PtCl_VD3(:,12))
```

Code exécuté pour le calcul du volume érodé total pour le *Cloud-to-Mesh*. Les nombres « 10 », »11 », « 12 » et « 13 » correspondent aux colonnes du fichier où sont enregistrées les volumes calculés par la division du champ scalaire M3C2 par ceux des densités de points obtenus soit par calcul de la densité par échantillonnage d'une surface, soit par calcul de la densité par échantillonnage d'un volume.

```
PtCl_01 = load('M3C2_202009_202101_output_volume.txt')
BilanVolume_01 = sum(PtCl_01(:,13))

PtCl_02 = load('M3C2_202101_202104_output_volume.txt')
BilanVolume_02 = sum(PtCl_02(:,13))

PtCl_03 = load('M3C2_202110_202201_output_volume.txt')
BilanVolume_03 = sum(PtCl_03(:,13))
%Volume_density
PtCl_VD01 = load('M3C2_202009_202101_output_VD.txt')
BilanVolume_VD01 = sum(PtCl_VD01(:,14))

PtCl_VD02 = load('M3C2_202101_202104_output_VD.txt')
BilanVolume_VD02 = sum(PtCl_VD02(:,14))

PtCl_VD03 = load('M3C2_202110_202201_output_VD.txt')
BilanVolume_VD03 = sum(PtCl_VD03(:,14))
```

Code exécuté pour le calcul du volume d'érosion total pour le *Multiscale Model to Model Cloud Comparison*. Les nombres « 13 » et « 14 » correspondent aux colonnes du fichier où sont enregistrées les volumes calculés par la division du champ scalaire M3C2 par ceux des densités de points obtenus soit par calcul de la densité par échantillonnage d'une surface, soit par calcul de la densité par échantillonnage d'un volume.

Annexe 7 : **Tableaux des erreurs relatives des calculs de volumes pour les 2 périodes d'intérêts**

Tableau A : Tableau de comparaison des erreurs relatives (en %) entre les différentes méthodes de calcul de volumes érodés pour la période entre le 14/01/2021 et le 20/09/2020.
Les cases orange correspondent aux valeurs de références.
Les cases bleues correspondent aux valeurs mesurées.

Erreur relative (%)	C2M_Surface	C2M_Volume	M3C2_Surface	M3C2_Volume
C2M_Surfacique	/	-14.40	120.10	83.67
C2M_Volumique	16.82	/	157.12	114.59
M3C2_Surfacique	-54.57	-61.11	/	-16.54
M3C2_Volumique	-45.56	-53.40	19.82	/
Volume V	-51.59	-58.57	6.56	-11.07

Tableau B : Tableau de comparaison des erreurs relatives (en %) entre les différentes méthodes de calcul de volumes érodés pour la période entre le 27/04/2021 et le 14/01/2021.
Les cases orange correspondent aux valeurs de références.
Les cases bleues correspondent aux valeurs mesurées.

Erreur relative (%)	C2M_Surface	C2M_Volume	M3C2_Surface	M3C2_Volume
C2M_Surfacique	/	18.08	102.41	73.47
C2M_Volumique	22.08	/	147.10	111.77
M3C2_Surfacique	-50.59	-59.53	/	-14.30
M3C2_Volumique	-42.35	-52.78	16.68	/
Volume V	-25.51	-38.98	50.77	29.21