Université de Bretagne Occidentale

MASTER SML

SCIENCES DE LA MER ET DU LITTORAL

MENTION

Géosciences Océan

SPECIALITE

Marges et Dorsales

Gabriel PORTZER

Interprétations morpho-sédimentaire et paléo-environnementale à partir de reconstruction 3D des dalles à rides du Corréjou, Formation du Grès armoricain en presqu'île de Crozon.

Mémoire de stage de Master 1

Année universitaire **2020-2021**

Structure d'accueil : **IUEM, Laboratoire Géosciences Océan**

Tuteur universitaire : **Marion JAUD**

Maîtres de stage : **Nathalie BABONNEAU**

Muriel VIDAL

REMERCIEMENTS :

Je voudrais commencer par adresser mes remerciements à mes trois responsables de stages : Nathalie BABONNEAU, Marion JAUD et Muriel VIDAL qui m'ont proposé ce sujet et qui m'ont accompagné avec bienveillance tout au long de mon stage. Merci à Nathalie BABONNEAU et Muriel VIDAL pour m'avoir accompagné sur le terrain et pour m'avoir guidé dans la réalisation des Logs stratigraphiques. S'ajoute à tout cela le suivi minutieux de mon avancement dans les interprétations et la mise à ma disposition d'une bibliographie très riche sur le sujet. Un grand merci également à Marion JAUD pour son aide sur toute la partie modélisation et reconstruction 3D. Ses Tutoriels (vidéos et papiers) de très grande qualité m'ont énormément aidé pour la prise en main des logiciels « Agisoft Metashape » et « Cloud Compare ». Sa disponibilité m'a permis d'avancer très vite avec peu de difficulté sur toute cette partie pourtant très complexe. Encore merci pour m'avoir accompagné sur le terrain et m'avoir appris à mettre en place une acquisition photogrammétrique terrestre.

Je souhaiterais ensuite remercier Jérôme AMMANN pour nous avoir donné de son temps et accompagné sur la plage du Letty. Sa participation a permis l'acquisition de levés photogrammétrique depuis son drone : une partie essentielle de ce stage pour la compréhension et l'observation de la mise en place de structures morpho-sédimentaires dans un contexte environnemental particulier.

Merci à la Réserve Naturelle géologique de la presqu'île de Crozon à l'initiative de ce stage pour l'aide apportée sur le terrain.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce rapport que ce soit par des conseils, des propositions de lectures complémentaires ou encore la relecture de celui-ci.

Résumé :

Les Dalles à rides du Corréjou sont des objets géologiques uniques révélant les vestiges d'estrans fossiles datés de l'Ordovicien Inférieur et localisés au sein de la Réserve Naturelle Régionale (RNR) des sites d'intérêt géologique de la Presqu'île de Crozon. Rendues visibles par l'érosion des couches sédimentaires qui les recouvraient, elles subissent depuis ces mêmes phénomènes d'érosion. C'est la Suite de la constatation de l'éboulement d'une partie d'une des dalles, que la Réserve Naturelle Régionale de la presqu'île de Crozon lance un projet visant à leur étude et à leur conservation. Les informations récoltées par cette étude apportent des renseignements sur les milieux de dépôts permettant la mise en place de tels objets. L'acquisition par des méthodes de photogrammétrie terrestre et aérienne sont déployées et permettent de générer des modèles numériques 3D à haute résolution (d'une précision millimétrique). La comparaison des modèles 3D générés à partir des dalles du Corréjou avec des modèles 3D de plages actuelles sur le Site du Letty permettent une meilleure compréhension de l'environnement de dépôt lors de la formation de ces dalles à rides.

Mots clés : Dalles à rides, Mégarides, Rides de courant, Corréjou, Photogrammétrie, Modélisation

Abstract :

The slabs with ripples and megaripples of Corréjou are unique geological objects revealing the remains of a fossil intertidal zone dated from the Lower Ordovician and located within the « Réserve Naturelle Régionale géologique de la Presqu'île de Crozon (RNR) ». Made visible by the erosion of the sedimentary layers that covered them, they are still subjected to the same erosion phenomena. Following the observation of the collapse of a part of one of them, the RNR launches a project aiming for the conservation and the study of these slabs. The information collected by this study brings informations on the deposit environment allowing the installation of such objects. The acquisition by terrestrial and aerial photogrammetry methods are deployed and allow the generation of 3D digital models at high resolutions, at millimeter scale. The comparison of the 3D models generated from the Corréjou slabs with 3D models of actual beaches on the Letty site allow a better understanding of the depositional environment during the formation of these wrinkle slabs.

Keywords : Ripple slabs, Megarids, Ripples marks, Correjou, Photogrammetry, Modeling

Sommaire :

Introduction 6

Chapitre 1 : Contexte géologique et temporel 8

Chapitre 2 : Matériel et méthodes 11

2.1) Le site du Corréjou. 11

2.2) Le site de la plage du Letty. 14

2.3) Analyse des données 3D. 15

Chapitre 3 : Les Résultats 16

3.1) Caractérisation sédimentologique et calage stratigraphique des dalles ... 16

3.2) Interprétation du modèle 3D de la dalle 1 du Corréjou 17

3.3) Interprétation du modèle 3D de la dalle 2 du Corréjou 19

3.4) Interprétation du modèle 3D du Letty 21

Chapitre 4 : Discussion 23

4.1) Apports des modèles 3D d'affleurement pour reconstituer un environnement sédimentaire ancien : 23

4.2) Apports des modèles 3D pour la conservation patrimoniale 25

Conclusion et Perspectives 27

Bibliographie 28

Annexes : 29

Table des Figures :

Figure 1 : Localisation du site du Corréjou sur la presqu'île de Crozon 6
Figure 2 : Carte géologique de la presqu'île de Crozon (source : Y. Plusquellec 2008) ... 9
Figure 3 : (A) Localisation de la Presqu'île de Crozons dans le Massif armoricain. (B) Contexte lithostratigraphique (l'axe des abscisses représentant la granulométrie du mudstone au conglomérat) de l'Ordovicien. (Source : Dabard et al. 2015) 10
Figure 4 : Répartitions des acquisitions de LOG stratigraphiques sur le site du Corréjou. 12
Figure 5 : Calage des Logs stratigraphiques au niveau des Dalles à rides du Corréjou. .. 16
Figure 6 : Modèle numérique interprété de la Dalle1 du Corréjou 17
Figure 7 : Modèle numérique interprété de la Dalle1 du Corréjou indiquant la position des coupes 18
Figure 8 : Modèle numérique interprété de la Dalle21 du Corréjou indiquant la position des coupes..... 20
Figure 9 : Modèle numérique interprété des pistes de la Dalle2 du Corréjou indiquant la position des coupes 20
Figure 10 : MNT interprété de la plage du Letty indiquant la position des coupes..... 22
Figure 11 : représentation schématique des relations entre granulométrie et puissance d'écoulement (source : I. Cojan 2013) 23
Figure 12 : Zoom sur les pistes de la Dalle 2 du Corréjou..... 24

Table des Tableaux :

Tableau 1 : Chronologie et synthèse des différentes acquisitions effectuées 11
Tableau 2 : Paramètres internes des dispositifs d'acquisitions photogrammétrique terrestre 13
Tableau 3 : Paramètres internes du dispositif d'acquisition photogrammétrique aérienne 14
Tableau 4 : Synthèse des mesures relevées sur le modèle 3D de la Dalle1..... 19
Tableau 5 : Synthèse des mesures relevées sur le modèle 3D de la Dalle2..... 21
Tableau 6 : Synthèse des mesures relevées sur le modèle 3D de la plage du Letty..... 22

Introduction

Ce stage s'inscrit dans la continuité de nombreuses études réalisées sur les Dalles du Corréjou (J. Durand 1985, Dabard et al. 2015) ; deux objets géologiques remarquables situés entre le port de Camaret et la pointe du Toulinguet en presqu'île de Crozon (Figure1). Ces dalles de Grès armoricain révèlent des structures identifiées actuellement comme les traces d'une figure de jusant de marée datée de l'Ordovicien (Dabard et al. 2015). Ces structures sont encore actuellement dans un état de conservation exceptionnel malgré l'action des nombreux mécanismes d'érosion qui les ont révélées par le passé.

Figure 1 : Localisation du site du Corréjou sur la presqu'île de Crozon

La constatation de l'éboulement d'une partie de la première dalle par la réserve naturelle géologique de la presqu'île de Crozon est le point de départ d'un projet visant à la conservation des dalles pour permettre de continuer leur étude dans les meilleures conditions. Depuis les années 2010, les techniques d'acquisition par photogrammétrie aérienne et terrestre se perfectionnent et se démocratisent (cas de la méthode SfM). Les nombreuses innovations en termes de traitement de données numériques ou traitement d'images avec des logiciels de plus en plus performants et en termes de précision des capteurs, permettent d'obtenir des modélisations 3D de haute résolution tout en déployant des moyens logistiques très limités. Les résultats de telles acquisitions permettent de conserver une modélisation numérique des structures soumises à l'érosion tout en permettant un travail de recherche de précision sur le support numérique à haute résolution ainsi généré. Cette étude fera également l'objet d'une valorisation par la réserve naturelle géologique de la presqu'île de Crozon pour permettre une

communication au grand publique autour de ces objets géologiques exceptionnels que sont les Dalles à rides du site du Corréjou.

Les objectifs de cette étude sont doubles : d'une part de produire des modèles numériques en 3D de ces objets géologiques uniques qui sont actuellement soumis à des phénomènes d'érosion en continue dans le but de les conserver. Cela permettra par la suite de réaliser un suivi de leur évolution (dégradation ou mise à jour).D'autre part, cela permettra de décrire et de quantifier les caractéristiques morphologiques des structures sédimentaires et de s'appuyer sur ces reconstitutions 3D afin de proposer des interprétations morpho-sédimentaire et paléo-environnementales des dalles à rides du Corréjou de la presqu'île de Crozon.

Chapitre 1 : Contexte géologique et temporel

Le « Grès armoricain » désigne une formation sédimentaire englobant des quartzites et des grès quartzitiques identifiée à l'échelle du Domaine Ibéro-Armoricain. Ces roches sédimentaires détritiques ayant subi des processus diagenétiques sont remarquables par leur couleur avoisinant les gris clairs et leur grande résistance à l'érosion en raison de leur forte teneur en quartz (minérale de dureté sept sur dix sur l'échelle de Mohs).

Le Grès armoricain est un élément important de la mégaséquence détritique terrigène Paléozoïque (de −541 Ma à −252,2 Ma) qui repose en discordance sur les dépôts du Briovérien ou par l'intermédiaire des séries rouges dans le Finistère. L'épaisseur de cette formation gréseuse est très variable en fonction de la zone géographique étudiée passant de quelques dizaines de mètres dans le Nord Cotentin à plusieurs centaines de mètres dans la Presqu'île de Crozon (Plusquellec 2008). Cet ensemble du Grès armoricain regroupe de nombreux lithofaciès. Les faciès homolithiques arénacés (quartzites), les faciès hétérolithiques à dominante arénacée ou pélitique (alternances gréso-pélitiques) et les faciès homolithiques pélitiques. L'observation du développement d'unités hétérolithiques insérées entre deux unités inférieures et supérieurs à dominante arénacée amène à distinguer trois séquences : le Grès armoricain inférieur, le Grès armoricain moyen et le Grès armoricain supérieur (Durand 1985). Les formations gréseuses contiennent par endroit les traces d'une importante activité biologique (présences d'ichnofossiles et de bioturbations) ou encore de nombreuses structures sédimentaires. Le Grès armoricain constitue l'ossature de la presqu'île de Crozon.

La carte géologique de la presqu'île de Crozon (Figure 2, Plusquellec 2008) met en évidence l'importance de deux formations résistantes à l'érosion constituant son ossature géologique, la Formation du Grès armoricain à l'Ouest et au Sud (en jaune) et la Formation des schistes et Quartzites de Plougastel au Nord (ici en rouge). 'est au nord de la presqu'île de Crozon que se situe le site des Dalles à rides du Corréjou sur lequel porte cette étude.

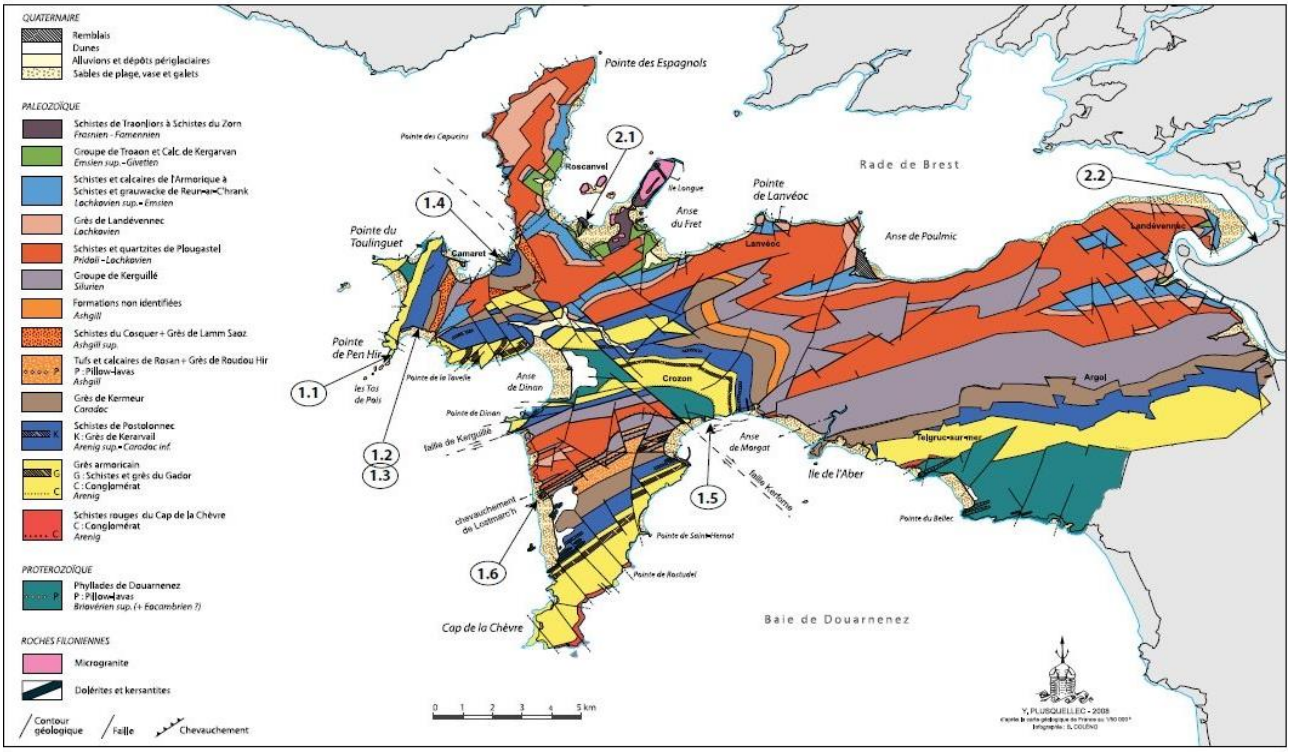


Figure 2 : Carte géologique de la presqu'île de Crozon (source : Y. Plusquellec 2008)

Ces deux grandes dalles remarquables sur le site du Corréjou sont des objets géologiques exceptionnels révélant des traces de rides et de mégarides de courant préservées dans le Grès armoricain supérieur et dont la formation est datée à l'Ordovicien Inférieur (biozone à Eremochitina brevis (Paris, 1990). Ces dalles présentent également de nombreuses traces d'activité animale laissées par des Invertébrés, que ce soit des terriers verticaux et horizontaux ou des pistes (Durand, 1985). Ces traces d'activité biologique sont très caractéristiques dans le cas du grès armoricain. Tous ces éléments sont donc à prendre en compte lors de l'étude de ce patrimoine géologique.

Les roches de la presqu'île de Crozon s'inscrivent également dans une série sédimentaire s'étalant de l'Ordovicien jusqu'au Dévonien, avec une succession de dépôts essentiellement marins dans un contexte de plateforme détritique (plateforme du Gondwana, avant la collision hercynienne…). Lors de la collision hercynienne, ces séries sédimentaires sont déformées, plissées et faillées. Cet élément important explique ainsi pourquoi les bancs sont aujourd'hui redressés (pendage à 50-60 degrés) dans la zone d'étude des dalles à rides du site du Corréjou. Ces informations sont synthétisées sur la figure suivante tirée des recherches de Dabard et al. 2015. (figure 3).

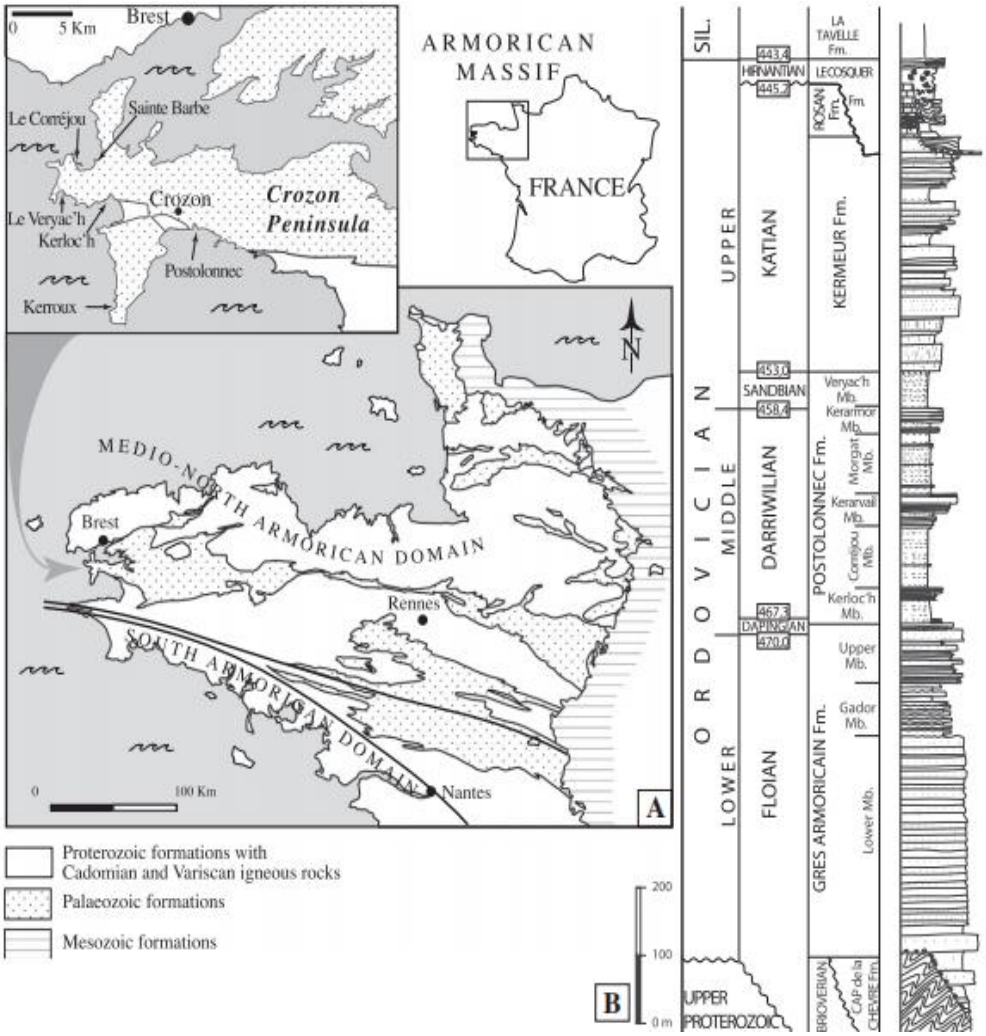


Figure 3 : (A) Localisation de la Presqu'île de Crozons dans le Massif armoricain. (B) Contexte lithostratigraphique (l'axe des abscisses représentant la granulométrie du mudstone au conglomérat) de l'Ordovicien. (Source : Dabard et al. 2015)

Chapitre 2 : Matériel et méthodes

Dans le cadre de cette étude, plusieurs acquisitions de données ont été réalisées (Tableau 1). L'objectif de ce second chapitre est de présenter le matériel et les méthodes qui ont été employées tout au long de la réalisation de cette étude. Quatre acquisitions principales ont été réalisées sur le site des dalles du Corréjou ; deux acquisitions photogrammétriques terrestres et deux levés de LOG stratigraphique. Sur le site du Letty, trois acquisitions photogrammétriques aériennes ont été réalisées à partir d'un appareil photo embarqué sur un drone.

Lieu des acquisitions	Types d'acquisitions	Dates des Acquisitions
Corréjou (Dalle1)	Photogrammétrie terrestre	13/04/2021
Corréjou (Dalle2)	Photogrammétrie terrestre	13/04/2021
Corréjou	Levé de LOG stratigraphique	13/04/2021
Corréjou	Levé de LOG stratigraphique	26/04/2021
Plage du Letty (vol complet)	Photogrammétrie aérienne	27/04/2021
Plage du Letty (zoom 1)	Photogrammétrie aérienne	27/04/2021
Plage du Letty (zoom 2)	Photogrammétrie aérienne	27/04/2021

Tableau 1 : Chronologie et synthèse des différentes acquisitions effectuées

2.1) Le site du Corréjou.

Le site du Corréjou présente un intérêt majeur en raison de la présence des deux dalles à rides révélées par l'érosion et régulièrement nettoyées par les marées arrivant au pied des falaises. Cette spécificité géographique du site implique donc une approche par la plage à marée basse. Les journées d'acquisitions de données ont été soigneusement préparées en fonction de la météo (ensoleillement propice à la prise de photos) et des grands coefficients de marée (permettant de rester le plus longtemps possible sur le site). Dans un premier temps, levé sédimentologique et stratigraphique (Log) de la coupe du Corréjou (Figure 4) a été mis en place dans le but de resituer les deux Dalles à rides dans leur contexte stratigraphique au sommet de la Formation du Grès armoricain. Cette méthode d'acquisition consiste à identifier les différentes couches géologiques observables sur le terrain, à mesurer leurs épaisseurs afin de produire une représentation schématique de la succession stratigraphique.

Un tel levé nécessite peu de matériel : un mètre pliant, un critérium et un carnet pour prendre en note. Il est cependant très important de décrire très précisément tous les indices notables (nature de la roche, texture, présence de fossiles, structures sédimentaires remarquables, granulométrie) dans le but 1) de faire correspondre les couches, en cherchant des bancs-repères, pour raccorder les LOG stratigraphiques entre eux afin d'obtenir un modèle stratigraphique le plus juste possible et 2) d'interpréter les milieux de dépôts à partir des faciès sédimentaires.

Une fois le site du Corréjou replacé dans un contexte géologique, une acquisition photogrammétrique terrestre est déployée dans le but d'obtenir, après traitement informatique, un modèle 3D des objets étudiés (dalles à rides et pistes).

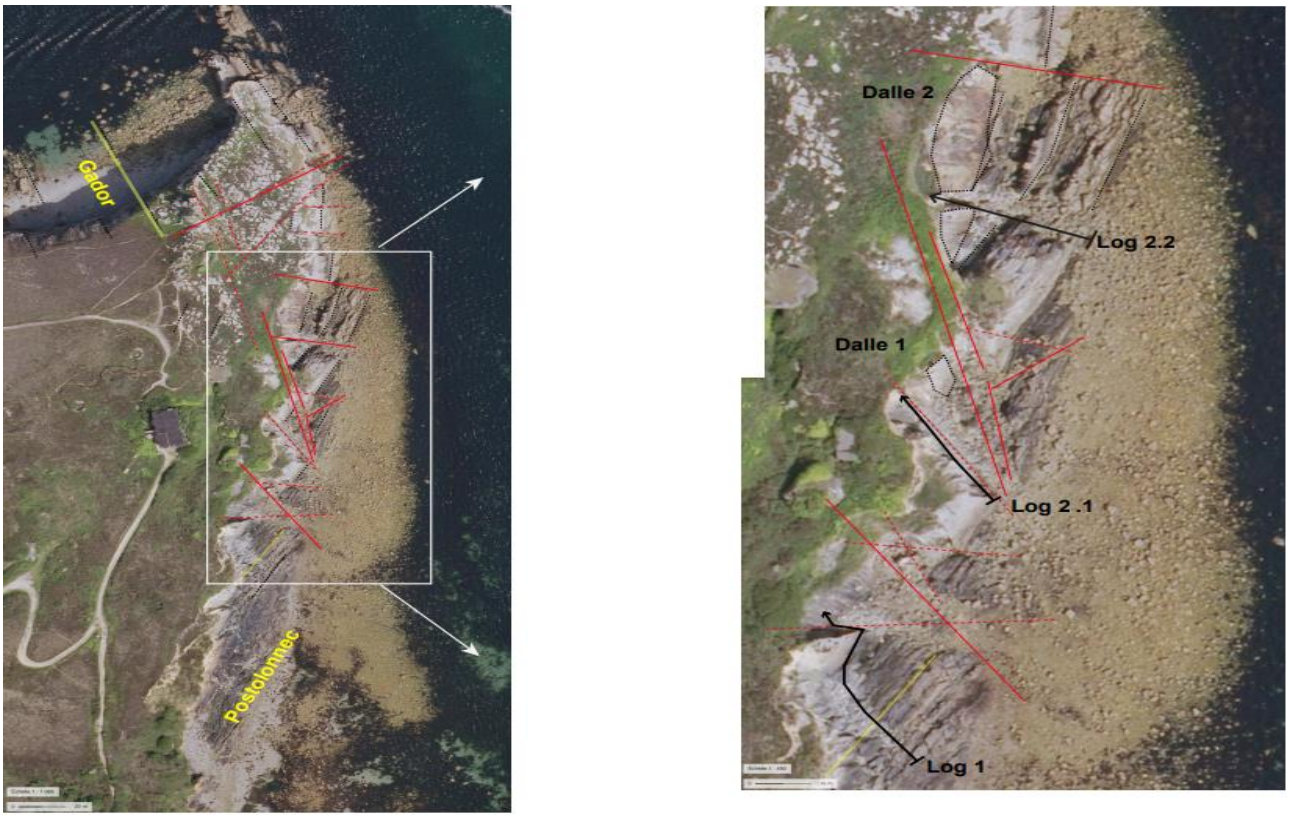


Figure 4 : Répartitions des acquisitions de LOG stratigraphiques sur le site du Corréjou.

La photogrammétrie est une technique s'appuyant sur le principe de la stéréoscopie qui permet, à partir de la vision d'un objet sous différents angles et points de vue, d'estimer le relief de celui-ci et de le restituer dans un modèle en 3D. En effet, il est possible en combinant plusieurs clichés d'un objet acquis selon des points de vue différents, et avec un recouvrement suffisant, de retrouver les points homologues d'une photo à une autre et de les replacer dans l'espace.

Agisoft Metashape est le nom du logiciel de traitement utilisé dans le cadre de cette étude. Celui-ci fonctionne à partir d'un paramétrage en deux parties s'optimisant continuellement au fur et à mesure de l'avancement de la chaîne de traitement. D'abord, le logiciel intègre les paramètres internes au dispositif d'acquisition à savoir, la résolution, la distance de la focale et la taille du pixel (Tableau 2).

Modèle de caméra	Résolution	Longueur focale	Taille de pixel	Précalibré
COOLPIX P500 (4mm)	4000 x 3000	4 mm	1.5 x 1.5 µm	Non
NIKON D800 (20mm)	7360 x 4912	20 mm	4.89 x 4.89 µm	Non

Tableau 2 : Paramètres internes des dispositifs d'acquisitions photogrammétrique terrestre

Ensuite, le logiciel doit calibrer les paramètres externes des dispositifs d'acquisitions photogrammétriques : l'orientation et les positions des appareils photos dans l'espace. Les informations de positions sont transmises manuellement au logiciel et doivent être relevées au cours de l'acquisition. Ces données sont alors obtenues en couplant le dispositif d'acquisition photogrammétrique avec un système de géoréférencement de type RTK-GPS. L'intérêt de ce dispositif est que chaque station d'acquisition est directement reliée à une position GPS, permettant ainsi de géoréférencer les photos et par extension, chaque pixel présent sur les clichés et d'améliorer l'optimisation des autres paramètres internes et externes.

Afin d'obtenir un modèle 3D de précision millimétrique, les acquisitions sont menées en deux temps par deux appareils photo différents, un réflexe et un hybride, (Tableau 2). D'abord, un premier appareil photo (le Coolpix P500) prend des clichés avec un recouvrement relatif d'environ 80% entre chaque photo, à des points de vue dont la localisation géographique est connue à moins de 5cm près à partir d'une base mobile GPS-RTK (Real Time Kinematic) fixé à l'aplomb de l'appareil l'aide d'un cadre le maintenant à un écartement constant. Chacune des photos prises par ce premier appareil est alors géoréférencée. Ce jeu de photo sert alors de « cadre » pour le logiciel puisque l'objet d'étude est présent dans sa globalité sous différents points de vue. Un second appareil photo (le Nikon D800) est déployé pour compléter les clichés du premier appareil en s'approchant beaucoup plus prêt de l'objet d'étude. Les photos ainsi obtenues sont de meilleure résolution et offrent la capacité de faire apparaitre des structures et des éléments morpho-sédimentaires d'ordre de grandeur millimétrique. Les photos du second appareil n'ont pas le besoin d'être géoréférencés, le logiciel de traitement les positionne lui-même à condition que le nombre de point de prises de vu du premier appareil soit

suffisant (environ une douzaine dans le cas des dalles du Corréjou) et que des éléments soient reconnaissables entre les deux jeux de photographies. Ainsi, les photos du premier appareil permettent au logiciel de former un support sur lequel se superposent les clichés à hautes résolutions pris par le second appareil.

2.2) Le site de la plage du Letty.

Située dans le Sud du Finistère, la plage du Letty est un environnement très intéressant dans le cadre de cette étude. En effet, cette plage présente des structures morpho-sédimentaires actuelles qui sont similaires à celles datant de l'Ordovicien et observables sur les dalles à rides du Corréjou. Dans un objectif de relever ces structures pour les comparer avec celles déjà observées sur le site du Corréjou, une acquisition photogrammétrique est mise en place. Dans le cas de la plage du Letty, la surface d'acquisition à couvrir est à la fois beaucoup plus vaste et accessible (en position horizontale car dans la sédimentation actuelle) que celle du site du Corréjou. Cette spécificité du site permet le déploiement d'un drone et donc d'une acquisition photogrammétrique aérienne.

Cette technique d'acquisition repose sur les mêmes principes de stéréoscopie évoqués précédemment. Cependant, cette méthode diffère de l'acquisition photogrammétrique terrestre de par sa mise en place et de par le traitement à posteriori et les corrections des données obtenues. La méthode aérienne ne nécessite le déploiement que d'un seul appareil photo. A partir d'un GPS embarqué, le drone suit son plan de vol comprenant la zone imagée. Les paramètres internes (Tableau 3) sont donc connus tant dis que les paramètres externes sont optimisés au cours du traitement par le logiciel.

Modèle de caméra	Résolution	Longueur focale	Taille de pixel	Précalibré
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 µm	Oui

Tableau 3 : Paramètres internes du dispositif d'acquisition photogrammétrique aérienne

Cependant, les positions GPS relevées par le drone sont beaucoup moins précises que celles obtenues par le dispositif GPS-RTK terrestre. La plus grande partie de ces imprécisions sont directement corrigées à posteriori par le logiciel qui optimise les paramètres régulièrement au cours du traitement. Mais pour obtenir des résultats d'une plus grande précision, le déploiement d'un dispositif de cibles est nécessaire. Ces cibles sont des disques de couleur vive mesurant une trentaine de centimètres de diamètre.

Disséminées homogènement dans le paysage, elles sont géoréférencées de manière très précise à l'aide du dispositif GPS-RTK lors de leur pose. Ces cibles apparaissent donc sur les photos et une étape de pointage de celles-ci lors du traitement par le logiciel permet d'estimer plus finement les paramètres internes et externes et de géoréférencer précisément le résultat.

2.3) Analyse des données 3D.

Une fois toutes ces acquisitions de données de terrain effectuées et renseignées, le logiciel de photogrammétrie Agisoft Metashape procède au traitement en quatre étapes. Pour commencer, le logiciel aligne les photos en se basant sur les paramètres internes et externes renseignés. Par la suite, le logiciel optimise l'alignement des photos en ajustant les paramètres internes (en se servant des cibles dans le cas de la photogrammétrie aérienne). Ensuite, le logiciel de traitement calcule la position relative de chaque pixel dans l'espace afin de construire un nuage de point dense. Ce nuage de point sert de base pour la quatrième étape du traitement. Une fois le nuage de point dense obtenu, le logiciel peut alors générer un maillage 3D des objets étudiés. Ce maillage est le résultat final de la modélisation et selon la précision des données et du traitement, une étude structures millimétriques visibles sur l'objet est possible. Dans le cas de la plage du Letty, le maillage ainsi généré permet la création d'un modèle numérique de terrain affichant en plus des informations sur la topographie de la zone.

Une fois la modélisation 3D effectuée, un second logiciel « Cloud Compare » permet de manipuler les objets générés à partir d'outils d'analyse divers. Le premier outil utilisé est celui de mesure de distance qui permet de calculer la distance relative entre plusieurs points dans l'espaces en fonction des coordonnées géographiques des pixels auxquels ils sont identifiés. Un second outil utilisé est celui nommé : « Extract Cloud sections along a polyline ». Il permet d'effectuer des coupes dans l'objet 3D le long d'une ligne définie manuellement. Cet outil, couplé à l'outil de mesure de distance, permet de récolter un grand nombre d'informations permettant la quantification des structures morpho-sédimentaires observables sur les zones d'études.

Chapitre 3 : Les Résultats

3.1) Caractérisation sédimentologique et calage stratigraphique des dalles

Les Logs stratigraphiques relevés à partir des observations menées sur le terrain sont les suivants (Annexe). Les compositions et épaisseurs des couches successives ainsi que les structures observées y sont détaillées. Les couches stratigraphiques décrites au-dessus des dalles sont identifiées comme un empilement de schistes intercalés de couches gréseuses de faible granulométrie. Des structures remarquables y sont relevées comme des rides de courants, des lentilles de grès, des conglomérats de rares lits coquillés ou des brioches constituant des éléments permettant de décrire les faciès de dépôts.

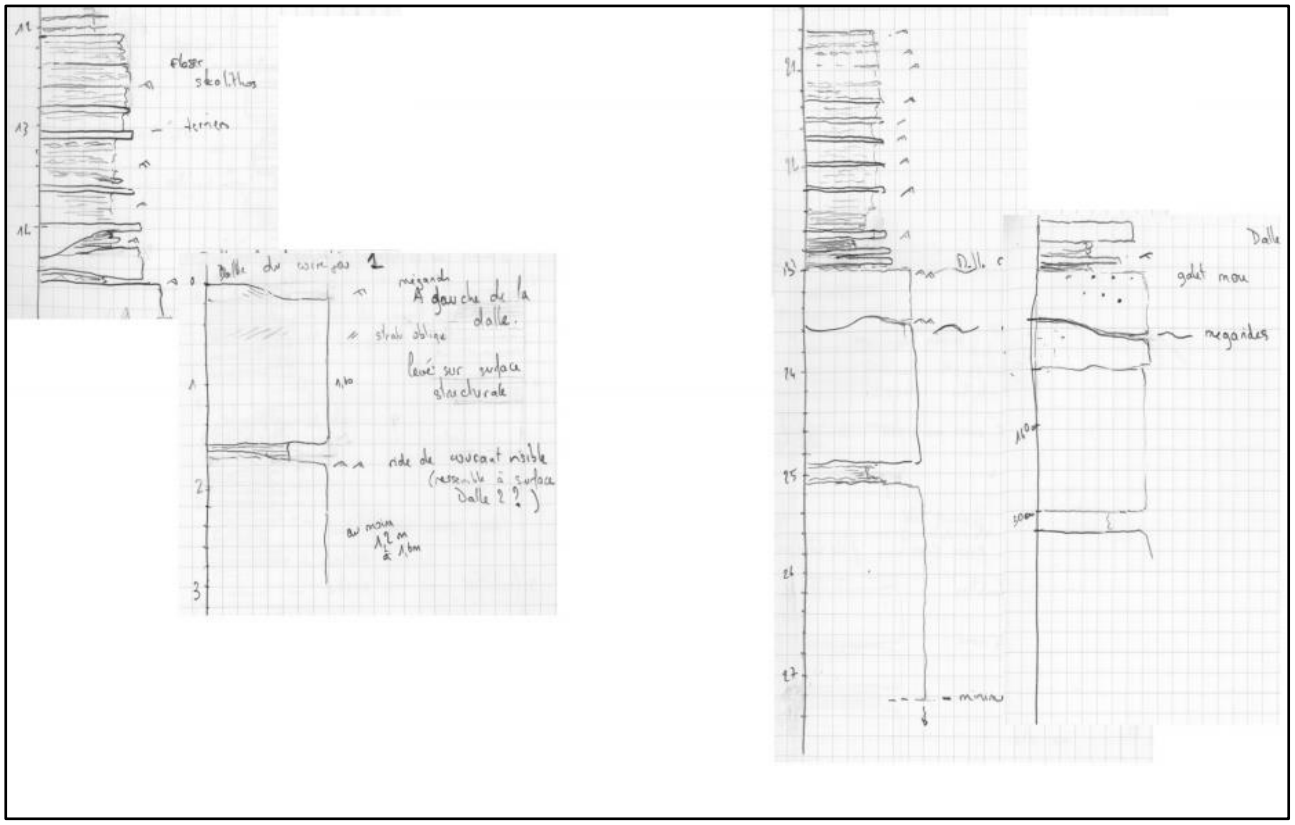


Figure 5 : Calage des Logs stratigraphiques au niveau des Dalles à rides du Corréjou.

Ces Logs stratigraphiques apportent des renseignements sur le positionnement relatif des deux dalles à rides dans l'empilement stratigraphique. Il est possible de distinguer sur la figure le calage des deux Logs stratigraphique au niveau des deux dalles (Figure 5). Celles-ci semblent appartenir, après calage, deux niveaux stratigraphiques différents, très proches l'un de l'autre. En effet l'observation de l'alignement et des similitudes dans la constitution des couches sédimentaires supérieures confirment ce modèle.

3.2) Interprétation du modèle 3D de la dalle 1 du Corréjou

A partir des données photogrammétriques terrestres acquises sur le terrain, le Logiciel Agisoft Metashape, permet la génération d'un modèle numérique en 3D de la première dalle du Corréjou (Annexe). Le logiciel génère également un nuage de points dense de très haute résolution qui, une fois exporté dans le second logiciel « Cloud Compare », peut être manipulé afin d'extraire les indices géologiques. A partir de ces modèles de la dalle 1, il est possible dans un premier temps d'identifier les différentes structures remarquables sur la dalle. Ainsi, le calque interprétatif (Figure 6) permet de visualiser très distinctement quatre zones sur la première dalle à ride. D'abord le sommet de la dalle, présente des rides de courants linguoïdes dont l'orientation générale permet de déterminer le sens du courant au moment de leur formation. Ensuite, une zone marquant le front de la mégaride identifiable par des sillons ou rills parfaitement linéaires marquant des incisions dans la dalle. Juste en dessous de cette dernière, se distingue une zone présentant des rides de courant en éventail traduisant un sens d'écoulement perpendiculaire à celui vu plus haut. Enfin, le bas de cette première dalle révèle une zone à rides linguoïdes de même orientation et indiquant un même sens de courant.

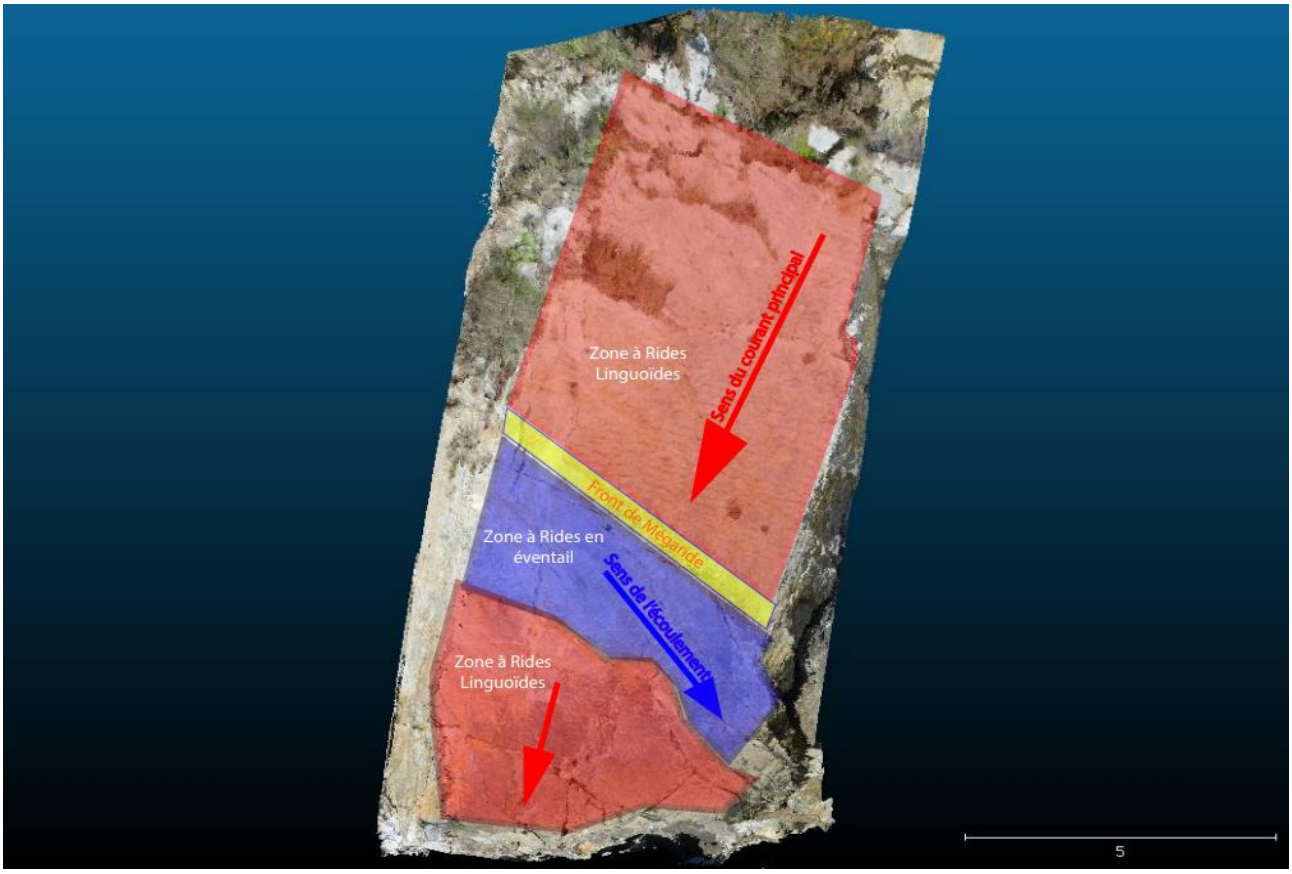


Figure 6 : Modèle numérique interprété de la Dalle1 du Corréjou

Dans un second temps, il est également possible de quantifier les structures géologiques relevées sur la première dalle. A partir de l'outils d'analyse « Extract Cloud sections along a polyline » du logiciel « Cloud Compare », les coupes numériques suivantes au sein de la dalle sont obtenues (Figure 7).

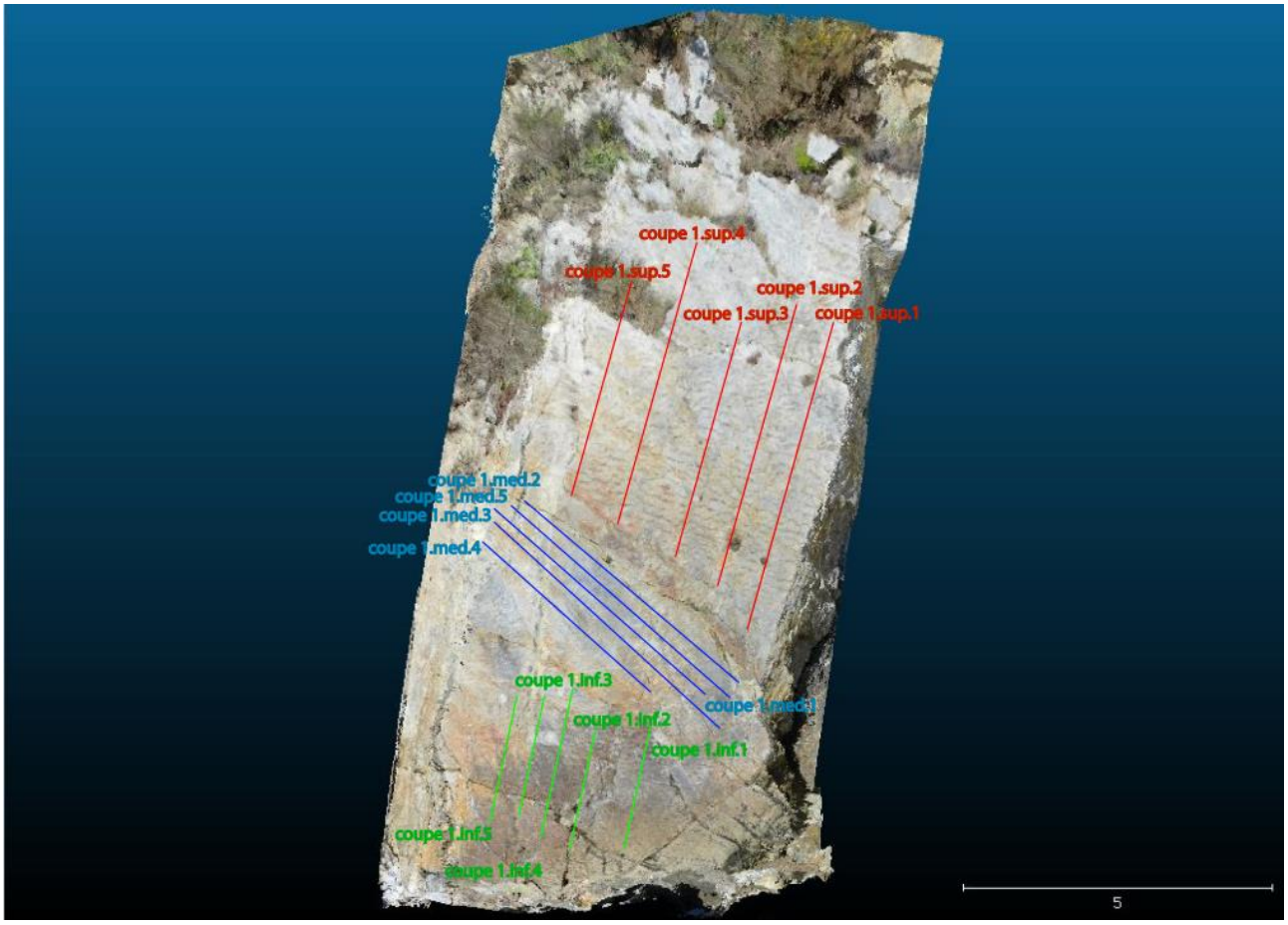


Figure 7 : Modèle numérique interprété de la Dalle1 du Corréjou indiquant la position des coupes

Les différentes données récoltées à la suite de ces manipulations sont répertoriées dans un tableau récapitulatif (Tableau 4). Ainsi sont conservées les données relatives à la longueur d'onde moyenne des rides observées et les amplitudes moyennes de ces rides de courant. Soit une longueur d'onde moyenne de 25,2 cm pour une amplitude moyenne de 2,0 cm sur la partie supérieure. Une longueur d'onde et une amplitude moyenne de respectivement 10,8 cm et 1,8 cm sur la zone charnière de la mégaride. Et une longueur d'onde et une amplitude moyenne de respectivement 10,4 cm et 1,9 cm sur la partie inférieure.

Coupe	Longueur de la coupe (en m)	Nombre de rides observées	Longueur d'onde des rides (en m)	Amplitude moyenne des rides (m)
Dalle 1 Partie suppérieure (haut de mégaride)				
coupe 1.sup.1	4,2	17	0,247	0,017
coupe1.sup.2	4,1	15	0,2733	0,02
coupe1.sup.3	3,9	16	0,243	0,021
coupe1.sup.4	4,1	16	0,256	0,019
coupe 1.sup.5	3,9	16	0,243	0,021
Dalle 1 Partie médium (charnière de la mégaride)				
coupe 1.med.1	4,55	42	0,108	0,017
coupe1.med.2	4,39	39	0,112	0,018
coupe1.med.3	4,6	47	0,097	0,018
coupe1.med.4	3,98	32	0,124	0,019
coupe 1.med.5	4,6	47	0,097	0,018
Dalle 1 Partie inférieure (bas de la mégaride)				
coupe 1.inf.1	1,21	11	0,11	0,017
coupe1.inf.2	1,25	13	0,096	0,021
coupe1.inf.3	1,39	15	0,098	0,019
coupe1.inf.4	1,18	10	0,118	0,02
coupe 1.inf.5	1,38	15	0,098	0,018

Tableau 4 : Synthèse des mesures relevées sur le modèle 3D de la Dalle1.

3.3) Interprétation du modèle 3D de la dalle 2 du Corréjou

En adoptant une démarche similaire avec les données photogrammétriques terrestres de la seconde dalle, Le logiciel Agisoft Metashape permet la modélisation numérique de la dalle 2 du Corréjou (Annexe). Le nuage de points dense ainsi acquis est exporté dans le second logiciel Cloud Compare afin de relever et quantifier les structures sédimentaires observables. Comme pour la première dalle, le modèle numérique 3D de la seconde dalle révèle la présence de mégarides de courant sur lesquels sont identifiables des plus petites rides de courant. Sur cette seconde dalle, des structures liées à une activité biologique sont clairement identifiables. Elles sont relevées sous le terme de pistes et une étude plus approfondie a été effectuée sur cette zone de la partie droite de la dalle 2 du Corréjou.

A partir de l'outils d'analyse « Extract Cloud sections along a polyline » du logiciel « Cloud Compare », les coupes numériques suivantes au sein de la dalle2 sont obtenues (Figure 8). Elles sont effectuées à la fois sur le modèle global de la dalle 2 et sur le zoom concernant les pistes (Figure 9).

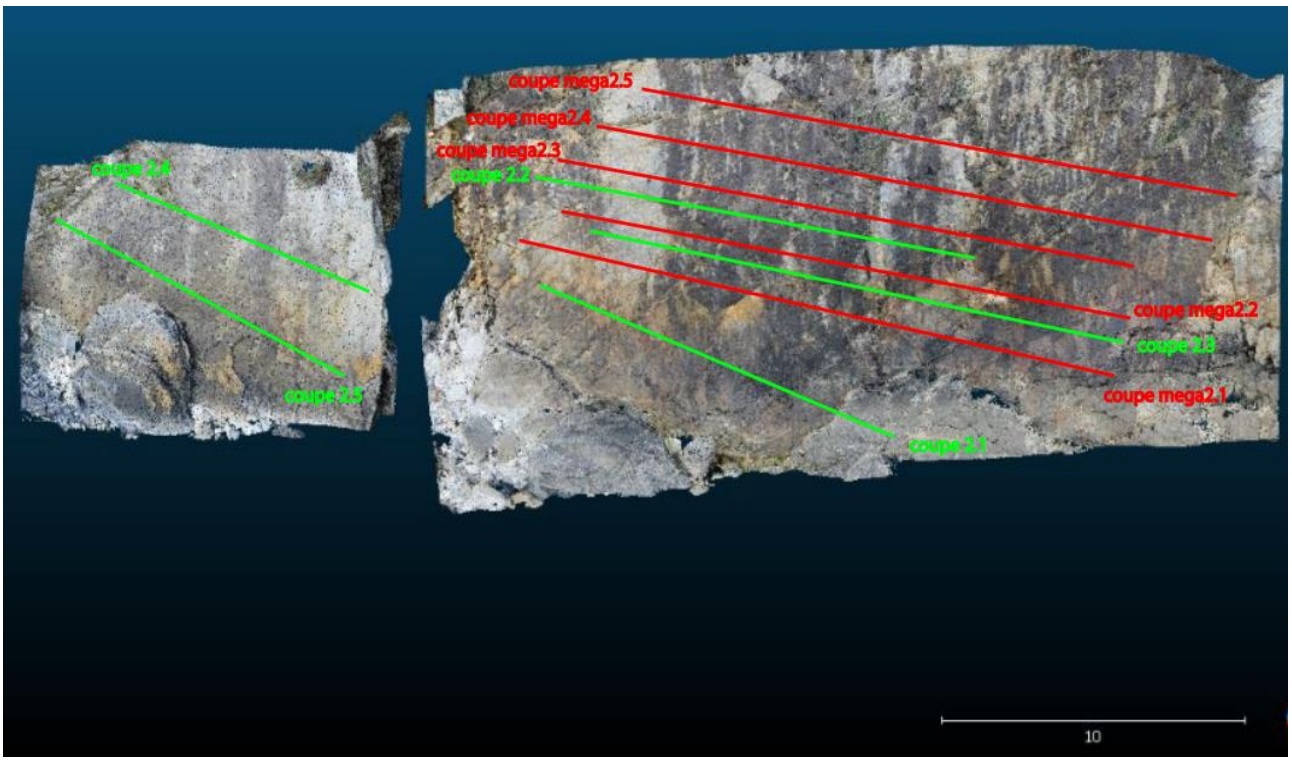


Figure 8 : Modèle numérique interprété de la Dalle21 du Corréjou indiquant la position des coupes

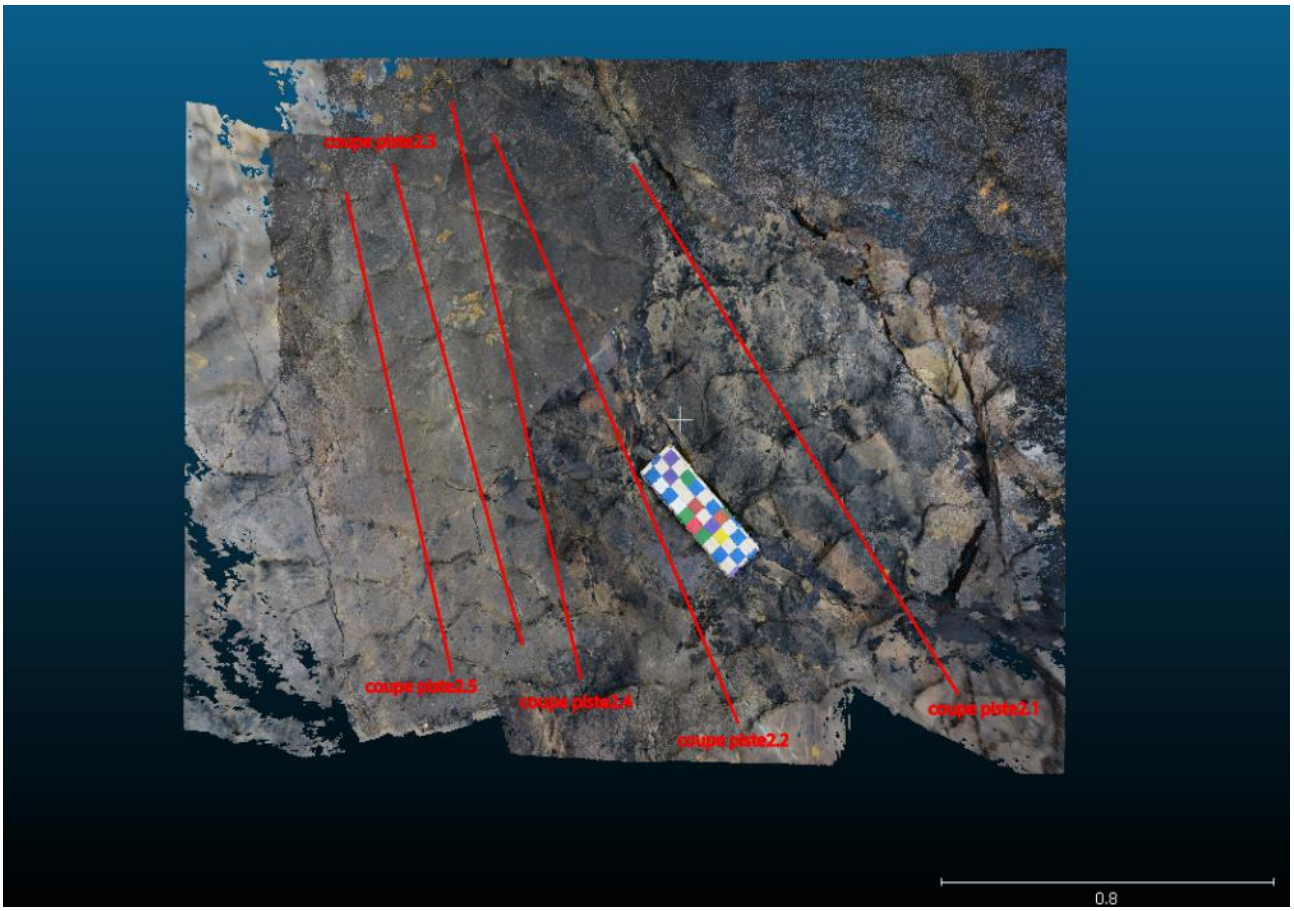


Figure 9 : Modèle numérique interprété des pistes de la Dalle2 du Corréjou indiquant la position des coupes

Les différentes données récoltées à la suite de ces manipulations sont répertoriées dans un tableau récapitulatif (Tableau 5). Ainsi sont conservées les données relatives à la longueur d'onde moyenne des rides observées et les amplitudes moyenne de ces rides de courant. Soit une longueur d'onde moyenne de 12,4 cm pour une amplitude moyenne de 1,3 cm pour les rides de courant. Une longueur d'onde et une amplitude moyenne de respectivement 5.46 m et 13,6 cm pour les mégarides. Et une longueur d'onde et une amplitude moyenne de respectivement 14.4 cm et 1,3 cm sur la partie inférieure comprenant les pistes.

Coupe	Longueur de la coupe (en m)	Nombre de rides observées	Longueur d'onde des rides (en m)	Amplitude moyenne des rides (m)
Dalle 2 (rides de courants)				
coupe 2.1	15,38	123	0,125	0,009
coupe 2.2	13,52	109	0,123	0,012
coupe 2.3	21,94	192	0,114	0,011
coupe 2.4	9,62	72	0,132	0,016
coupe 2.5	12,33	95	0,129	0,019
Dalle 2 (mégarides)				
coupe mega2.1	22,3	3	5,47	0,16
coupe mega2.2	21,9	2	5,58	0,14
coupe mega2.3	22,7	3	5,39	0,11
coupe mega2.4	23,5	3	5,42	0,12
coupe mega2.5	22,5	2	5,48	0,15
Dalle 2 (pistes)				
coupe piste2.1	1,04	7	0,149	0,015
coupe piste2.2	1,06	8	0,132	0,012
coupe piste2.3	1,03	7	0,147	0,013
coupe piste2.4	1,04	7	0,149	0,012
coupe piste2.5	1,03	8	0,147	0,014

Tableau 5 : Synthèse des mesures relevées sur le modèle 3D de la Dalle2.

3.4) Interprétation du modèle 3D du Letty

Une fois la mise en place de la photogrammétrie aérienne effectuée sur la plage du Letty et les données traitées, le logiciel Agisoft Metashape permet la modélisation d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) du site du Letty (Annexe). Ce modèle est ensuite exporté dans le second logiciel Cloud Compare afin d'identifier et quantifier les structures sédimentaires actuelles observables. Dans ce contexte de dépôt sédimentaire actuel, il est possible d'observer des structures de rides de courant similaires à celles présentes sur les dalles à rides du site du Corréjou.

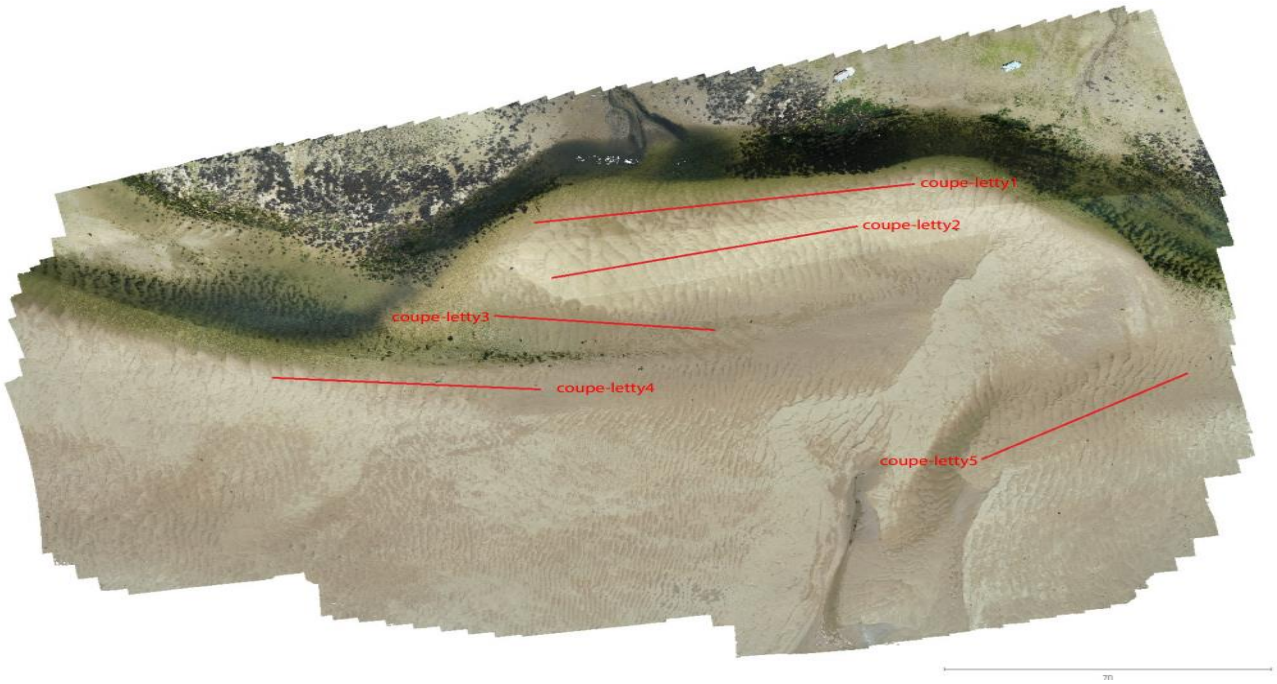


Figure 10 : MNT interprété de la plage du Letty indiquant la position des coupes.

A partir de l'outils d'analyse « Extract Cloud sections along a polyline » du logiciel « Cloud Compare », les coupes numériques suivantes au sein de la plage du Letty sont obtenues (Figure 10). Une fois encore, les données récoltées à la suite de ces manipulations sont répertoriées dans un tableau récapitulatif (Tableau 6). Les données relatives à la longueur d'onde moyenne des rides observées et les amplitudes moyenne de ces rides de courant sont ainsi conservées. Soit une longueur d'onde moyenne de 4.72 m pour une amplitude moyenne de 1,2 m pour les mégarides de courants observés.

Coupe	Longueur de la coupe (en m)	Nombre de rides observées	Longueur d'onde des rides (en m)	Amplitude moyenne des rides (m)
Letty (rides de courants)				
coupe-letty1	92,5	20	4,5	1,23
coupe-letty2	68,7	14	4,7	1,32
coupe-letty3	49,2	12	4,2	1,12
coupe-letty4	53,4	10	5,3	1,18
coupe-letty5	55,6	11	4,9	1,14

Tableau 6 : Synthèse des mesures relevées sur le modèle 3D de la plage du Letty

Chapitre 4 : Discussion

4.1) Apports des modèles 3D d'affleurement pour reconstituer un environnement sédimentaire ancien :

Les modèles d'affleurements 3D générés à partir des données acquises sur le terrain permettent à la fois d'identifier des figures et structures sédimentaires, effectuer des mesures sur les objets d'étude (épaisseur et géométrie des bancs, tailles des corps sédimentaires et des structures), et donc de mieux quantifier les dimensions des objets indicateurs sur l'environnement de dépôt.

Tout d'abord, les modèles numériques 3D permettent de parfaitement imager les structures morpho-sédimentaires caractéristiques d'environnement côtier (Cojan 2013) en particulier des milieux tidaux (mégarides, rides, de courants, sillon d'érosion). La résolution du modèle restitue parfaitement les objets de taille supérieurs au centimètre. Il est ainsi possible de quantifier la taille des mégarides recouverts de rides linguoïdes au niveau du versant amont (Stoss face) et de rides en éventail au niveau du versant aval (Lee face). Ces structures sédimentaires sont les marqueurs caractéristiques des vitesses d'écoulement. Sachant que ces rides de courants sont constituées de sable de granulométrique plutôt fine (100-200 cm), on peut estimer des vitesses ou puissance de

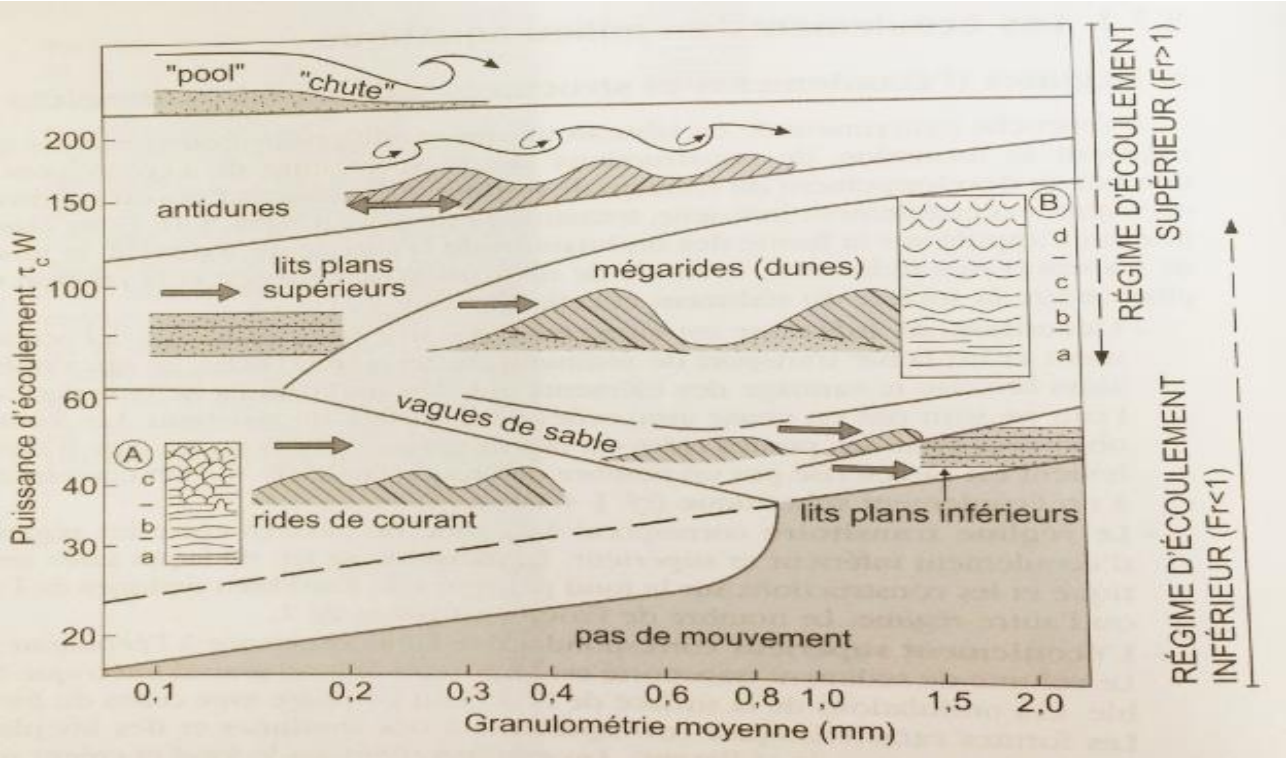


Figure 11 : représentation schématique des relations entre granulométrie et puissance d'écoulement (source : I. Cojan 2013)

courant modérées (20-60 W sur le diagramme figure 11). Pour l'obtention de mégarides (tel qu'elles sont observées sur la dalle), la puissance du courant devra dépasser 50-60 W dans cette gamme granulométrique (Figure11) Ce type de structure des marquages caractéristiques des vitesses de courant de marées dans des conditions macrotidales (fort marnage) dans les environnements actuels et notamment notamment dans les estuairess ou les courants de marées sont fortement canalisées dans les chenaux

Ensuite, une étude plus précise (plus haute-résolution) peut être réalisée sur le modèle numérique 3D de la seconde dalle à ride du Corréjou avec l'analyse morphologique de pistes d'organisme sur la dalle (Figure 12).

Figure 12 : Zoom sur les pistes de la Dalle 2 du Corréjou

La précision millimétrique du modèle 3D générée à partir des levés photogrammétriques effectués sur la dalle 2 permet l'observation de ces fines structures dans le sédiment sous différentes formes : simple piste bi-lobée ou pistes comportant des petits sillons latéraux comme des « traces de petites griffes ». Ces structures sont identifiées dans la littérature comme étant des pistes laissées par le passage d'un animal au cours de l'Ordovicien Inférieur. Leur diversité et leurs morphologies ne sont pas toutes décrites dans le détail dans la littérature et les modèles numériques 3D permettraient de les étudier de manière plus détaillée sans avoir besoin de les prélever.

Disposant de plusieurs paires de pattes, il s'agirait vraisemblablement d'un arthropode ou un organisme métamérisé à appendices multiples. Ces traces présentes sur la dalle sont un indice confirmant la présence d'organismes à cette période alors qu'aucun fossile d'arthropode et notamment de trilobites n'a été signalé dans ces niveaux en Presqu'île de Crozon (alors qu'ils sont nombreux dans les Schistes de Postolonnec, sus-jacents). Cette piste n'a pas encore été figurée malgré les nombreuses traces fossiles étudiées par Durand (1985) dans la Formation du Grès armoricain.

Tous les indices ainsi relevés et quantifiés sur les modélisations numériques générés concordent avec le contexte paléo-environnemental décrit par les modèles proposés. Ainsi, les résultats de cette étude s'inscrivent dans la continuité de celles déjà réalisées sur l'étude de paléoenvironnements lors de la mise en place du Grès armoricain à l'Ordovicien Inférieur.

4.2) Apports des modèles 3D pour la conservation patrimoniale

Les modélisations numériques obtenues à partir des différentes acquisitions photogrammétriques au cours de cette étude sont d'une grande précision. En effet il est possible d'y observer des structures à des échelles millimétriques comme des pistes et le référencement géographique des sites d'étude est précis au centimètre. Cette haute résolution est un apport important pour les études à venir puisqu'elle garantit une fiabilité des résultats obtenus permettant une conservation fidèle des sites en format numérique. Ces modèles sont ainsi utilisables dans le cas où une partie des dalles serait amené à disparaitre à cause de l'érosion ou d'un éboulement gravitaire (comme c'est déjà arrivé par le passé avec l'éboulement de la partie inférieure droite de la première dalle à ride).

Ensuite, le géoréférencement des modèles en chaque point est également un argument important quant à la conservation du patrimoine géologique que sont les dalles à rides du Corréjou. Ceci ouvre la possibilité d'un suivi très minutieux de l'évolution de ces objets géologiques dans le temps. Ainsi, des études menées à posteriori appliquant des acquisitions similaires peuvent permettre de révéler des dynamiques d'érosion avec l'apparition éventuelle de zone exposées d'avantage aux aléas et susceptibles d'engendrer des effondrements. Ces études permettraient également de dresser des bilans sédimentaires approximatifs à partir de l'évolution des volumes des objets géologiques traduisant ainsi d'une tendance dans les dynamiques sédimentaires des différents sites.

Enfin, ces modèles 3D constituent un apport non négligeable pour la diffusion scientifique vers le grand public. Les méthodes de communications se tournant actuellement vers le numérique, il est très facile d'imaginer les applications de ces modèles numériques 3D dans un but de valoriser et de rendre plus accessible le patrimoine géologique. A travers la création de vidéos, de visite virtuelle en 3D avec interprétation géologique basées sur ces modèles, la réserve géologique peut mettre à disposition l'ensemble de ces informations directement à partir de son site web ou à travers des ateliers interactifs.

Conclusion et Perspectives

La création de modèles numériques 3D à partir des données photogrammétriques acquises sur le terrain est une réelle plus-value pour l'études d'objets soumis continuellement à l'érosion. Les acquisitions par les méthodes de photogrammétries terrestre et aérienne se sont révélées particulièrement adaptées pour cette étude en permettant la création de modèles numériques de grande précision tout en nécessitant assez peu de logistique dans l'acquisition comme dans le traitement des données. La mise en place très rapide de ces méthodes d'acquisition permet une modélisation complète des différents objets étudiés dans un temps relativement court (quelques heures seulement pour acquérir toutes les photos avec le géoréférencement des stations de prises de vue).

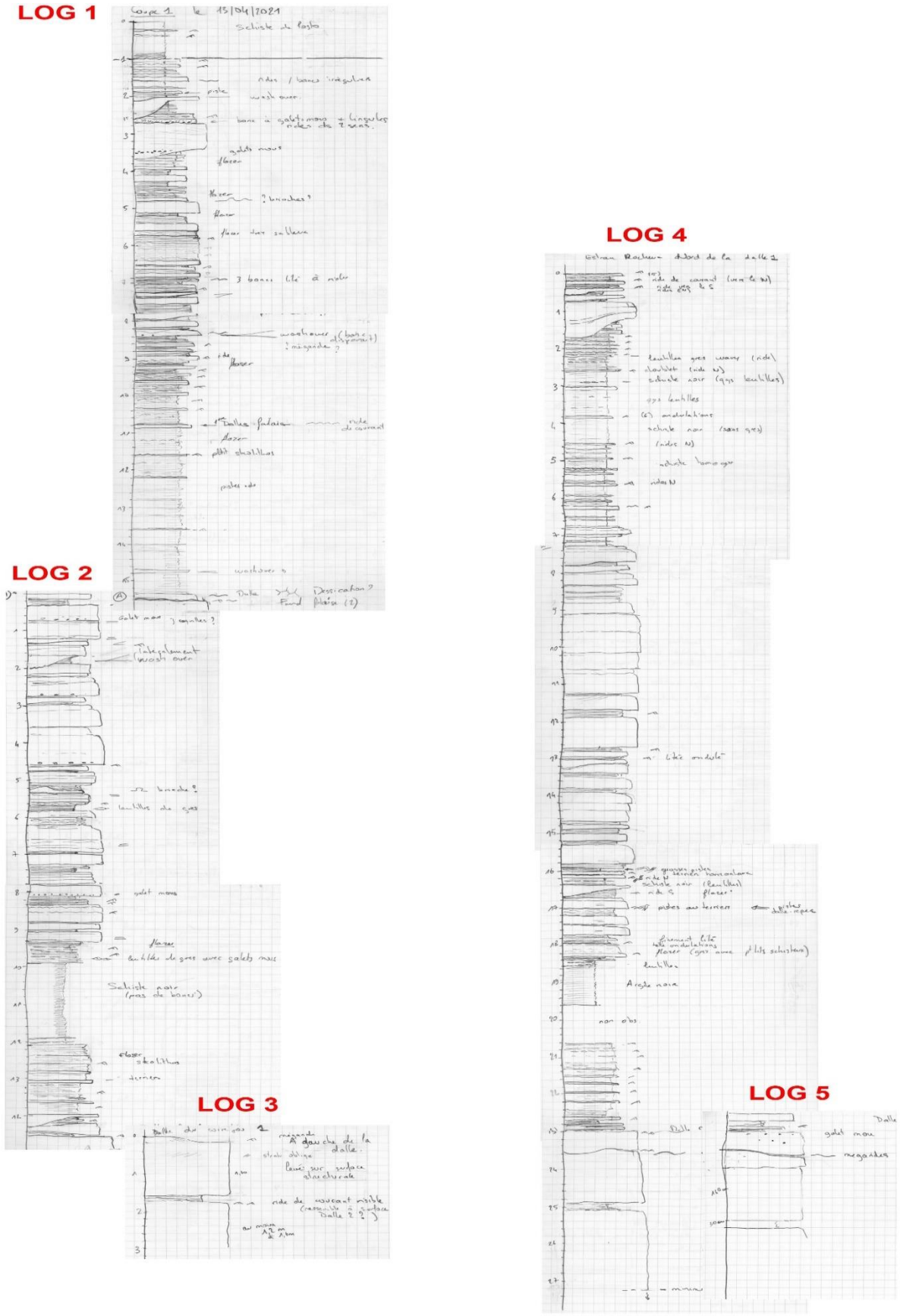
Les modèles numériques 3D ainsi générés apportent une réponse à l'étude qui est double. Dans un premier temps, ces modèles sont utilisables pour la conservation de ses objets géologiques en permettant une communication sur ce patrimoine géologique à travers l'outil numérique ou encore en permettant la création d'outils interactifs destinés au grand public. La précision millimétrique des résultats ouvre également des possibilités de reconstructions matériel des objets par des méthodes de moulage ou d'impression 3D. Cet aspect est particulièrement intéressant pour la conservation et l'études des pistes observables sur la dalle 2. Dans un second temps, les différentes manipulations numériques effectuées sur les modèles ont permis d'extraire des quantifications pour les structures sédimentaires relevées (avec la mesure des amplitudes et des longueurs d'ondes moyennes des rides). Ces résultats exploités sur les dalles à rides sont comparés à ceux obtenus sur une plage actuelle et permettent ainsi de caractériser des similarités dans les dynamiques de dépôt. Toutes ces observations apportent donc des informations sur le paléoenvironnement lors de la formation des dalles à rides du Corréjou au cours de l'Ordovicien.

En Conclusion, ce travail témoigne de l'intérêt et de l'efficacité de l'utilisation des techniques de photogrammétrie dans le domaine la conservation conjointe à l'étude d'objets géologiques. Il ouvre ainsi des perspectives sur l'utilisation de cette méthode dans un but cette fois-ci de surveillance et de suivi sur l'évolution dans le temps de ces sites géologiques exceptionnels.

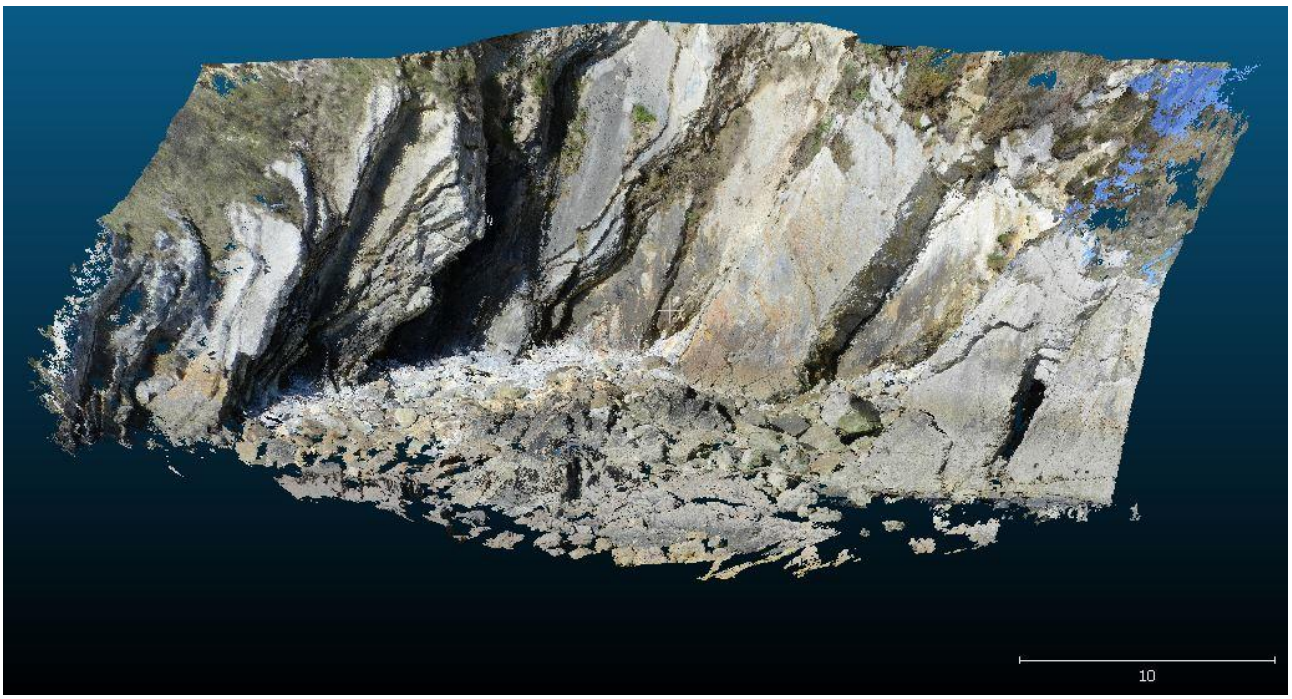
Bibliographie

- J.R.L Allen. 1985, Principles of Physical Sedimentology
- I. Cojan et M. Renard. 2013, / sédimentologie (3e édition), DUNOD
- M.P. Dabard et al. / Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 436 (2015) 96–111
- J. Durand. / Le Grès Armoricain. Sédimentologie - Traces fossiles. Milieux de dépôt. Géologie appliquée. Université Rennes 1, 1985
- S.G. Longhitano et al. / Sedimentary Geology 279 (2012) 2–2
- Y. Plusquellec. / Carte géologique de la presqu'île de Crozon (2008)

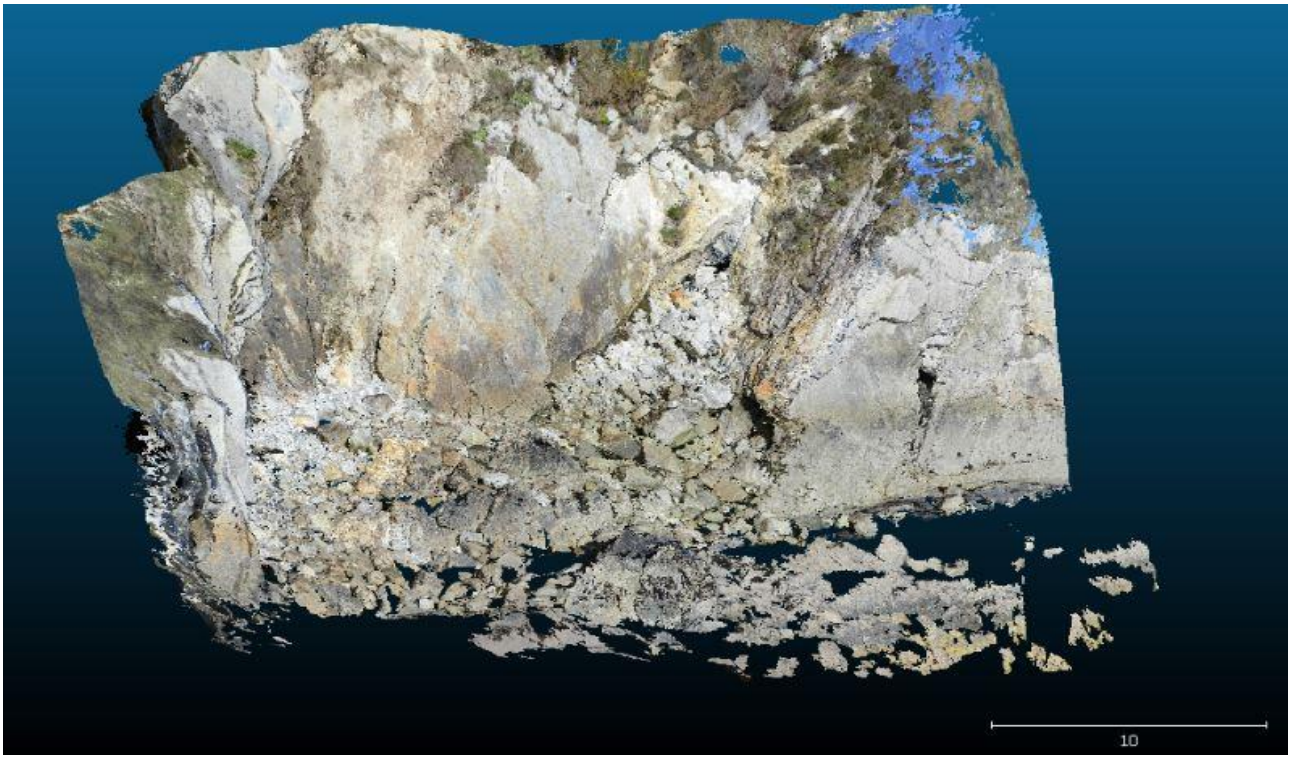
Annexes :



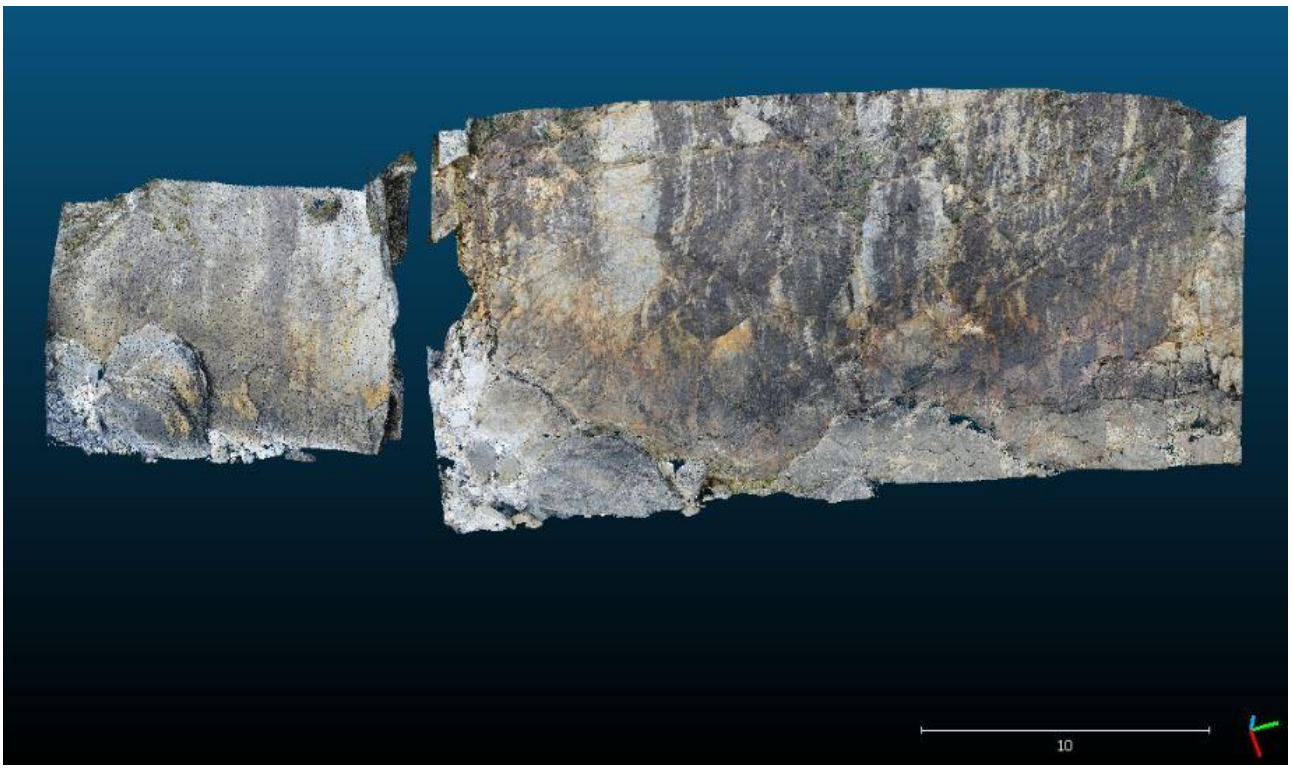
Annexe 1 : Synthèse des Logs stratigraphiques levés sur le site du Corréjou.



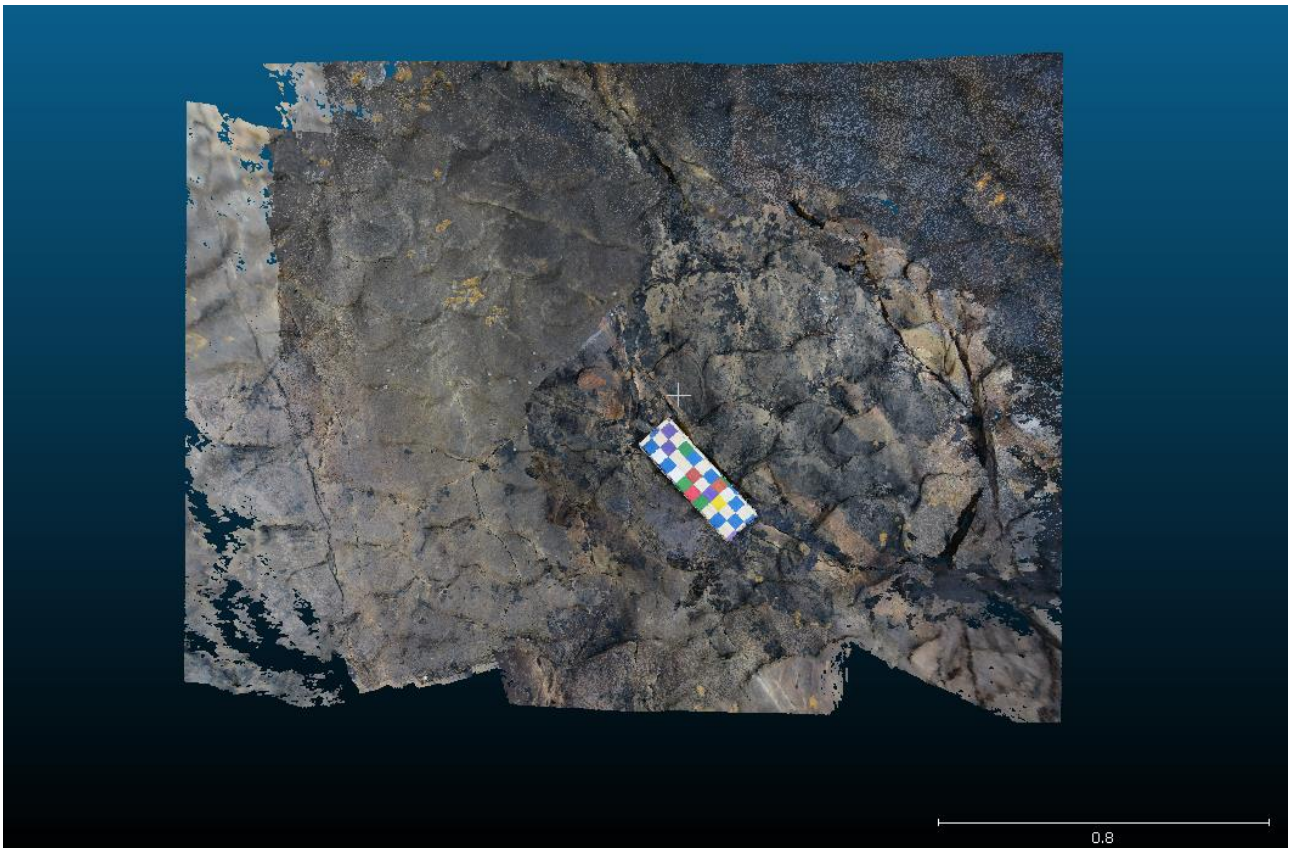
Annexe 2 : Capture d'écran du nuage de point dense de la Dalle 1 du Corréjou.



Annexe 3 : Capture d'écran du nuage de point dense de la Dalle 1 du Corréjou



Annexe 4 : Capture d'écran du nuage de point dense de la Dalle 2 du Corréjou



Annexe 5 : Capture d'écran du nuage de point dense des pistes observables sur la Dalle 2 du Corréjou

Annexe 6 : Zoom sur le nuage de point dense des pistes observables sur la Dalle 2 du Corréjou