

SISTER

Surface Imaging Solutions for Temperate Reefs

Guides d'acquisition et d'analyse pour la
cartographie surfacique et volumique par
drone aérien des formations récifales à
Sabellaria alveolata

Fiche documentaire

Titre du rapport : SISTER - Surface Imaging Solutions for Temperate Reefs : Guides d'acquisition et d'analyse pour la cartographie surfacique et volumique par drone aérien des formations récifales à <i>Sabellaria alveolata</i> .	
Référence interne : NA Diffusion : libre (internet)	Date de publication : 2025 02 01 Version : 1.0.0 Référence de l'illustration de couverture : S. Dubois 2022 – prise de vue aérienne modifiée d'un estran de l'île de Ré. Langue(s) : français
<p>Résumé : Les formations récifales à <i>Sabellaria alveolata</i> (ou récifs d'hermelles) jouent des rôles écologiques essentiels dans les écosystèmes où elles se développent. Cet habitat fait donc l'objet d'attentions particulières par les gestionnaires d'environnements côtiers et d'espaces protégés. L'objet de ce document est de présenter un protocole standardisé - et donc transférable - permettant de fournir une mesure quantitative surfacique des formations récifales à <i>S. alveolata</i>, pour répondre à des besoins d'évaluation sur la dynamique de cet habitat. Dans le cadre du projet SISTER (Surface Imaging Solutions for Temperate Reefs), ce document fournit, pour des sites destinés à faire l'objet d'un suivi surfacique (1) un guide pratique d'acquisition d'images à l'aide de drones aériens, (2) un guide logiciel de traitement et d'analyse des images collectées, notamment à l'aide d'une solution-logiciel SISTER permettant de produire des cartes et des métriques relatives à la distribution des récifs et (3) un guide d'analyse des données sur trois sites tests du Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis, afin de valider le protocole et d'aider à l'interprétation.</p> <p>Abstract: <i>Sabellaria alveolata</i> reefs (or honeycombworm reefs) play essential ecological roles in ecosystems in which they develop. Stakeholders of coastal environments and protected areas therefore pay particular attention to this habitat. The aim of this document is to present a standardized - and therefore transferable - protocol for measuring the surface area of <i>S. alveolata</i> reef formations, in order to assess the dynamics of this habitat. As part of the SISTER (Surface Imaging Solutions for Temperate Reefs) project, this document provides, for sites intended for surface monitoring (1) a practical guide to image acquisition using aerial drones, (2) a software guide for processing and analyzing the images collected, in particular using a SISTER software solution to produce maps and metrics on the distribution of reef formations, and (3) a data analysis guide for three test sites in the Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis, to validate the protocol and help with interpretation.</p>	

Comment citer ce document : Alvarez E., Dubois S.F., Liabot P.O., Collin A., James D., Bajjouk T. (2024). SISTER - Surface Imaging Solutions for Temperate Reefs : Guides d'acquisition et d'analyse pour la cartographie surfacique et volumique par drone aérien des formations récifales à *Sabellaria alveolata*. Rapport Ifremer et Office Français de la Biodiversité, 95 pages.

Contribution des auteurs : Montage, portage et animation du projet SD – Rédaction initiale et finale EA et SD – Acquisition des données EA, SD, POL, AC, DJ, TB – Analyse des données EA et SD – Relecture et commentaires EA, SD, POL, AC, DJ, TB

Disponibilité des données : les données qui ont servi aux analyses et les codes sources du logiciel SISTER créés dans le cadre de ce projet seront rendus publiques via des espaces publics et sécurités de stockage. Elles sont donc accessibles par simple requête.

DOI : **XXX**

Commanditaire du rapport : Office Français de la Biodiversité et Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis

Nom / référence du contrat : OFB.21.1054 et avenant OFB.21.1887 – contrat IFREMER 21/1002186

Financements - Le projet SISTER (Surface Imaging Solutions for Temperate Reefs) est un projet financé par l'Office Français pour la Biodiversité et piloté par l'IFREMER. Il fait l'objet de collaborations avec le Centre de GéoEcologie Littorale de l'Ecole Pratique des Hautes Études (EPHE) et le Centre Européen de Réalité Virtuelle (ENIB-CERV).

Auteur (s) correspondant (s) / adresse (s) électronique (s)

Affiliation / Direction / Service, laboratoire

Stanislas Dubois / sdubois@ifremer.fr

Ifremer – ODE/DYNECO/LEBCO

Encadrement(s) du projet : Stanislas Dubois (Ifremer)

Destinataire : Aurélie Dessier (aurelie.dessier@ofb.gouv.fr)

Vérifié par : Aurélie Dessier (OFB) / Sophie Beauvais (OFB) et Karine Dedieu (OFB) et **validé par** : Stanislas Dubois (Ifremer)

Table des matières

Table des matières.....	3
Introduction générale	5
1. Les formations récifales à <i>Sabellaria alveolata</i>	6
2. Les formations récifales et les directives européennes.....	7
3. L'imagerie par drone comme outil central en écologie spatiale.....	8
4. Objectifs généraux du projet SISTER.....	9
Partie 1	12
Guide terrain de relevé par drone aérien	12
1. Introduction.....	13
2. Matériel préconisé.....	13
2.1. Drone compact avec capteur multispectral intégré.....	13
2.2. Récepteur GNSS mobile et Points de Contrôle au Sol.....	16
2.3. Positionnement RTK.....	16
2.4. Matériel de sécurité.....	18
3. Protocole de levé par drone.....	18
3.1. Principes généraux.....	18
3.2. Relevé photogrammétrique.....	20
3.3. Relevés de photo-quadrats.....	23
4. Recommandations.....	25
4.1. Avant la mission.....	25
Rappels de la réglementation sur l'exploitation de drones aériens.....	25
Choix de la date de vol.....	26
Matériel.....	26
4.2. Pendant la mission.....	27
Sécurité pour les tierces personnes et le matériel.....	27
Qualité des levés.....	27
4.3. Après la mission.....	28
Partie 2	29
Guide logiciel de traitement des données drone	29
1. Introduction.....	30
2. Description des chaînes de traitement.....	31
2.1. Principes de la photogrammétrie par SfM.....	31
2.2. L'intelligence artificielle pour la détection automatique des récifs à <i>Sabellaria alveolata</i>	33
Etape 1 - Données d'entrée et pré-traitements.....	34
Etape 2 - Architecture du modèle CNN.....	34
Etape 3 - Stratégie d'apprentissage.....	35
Etape 4 - Evaluation des performances du modèle.....	36
2.3. Validation.....	37
2.4. Géo-positionnement des photo-quadrats.....	38
3. Guides logiciels « pas à pas ».....	39
3.1. Configuration matérielle.....	39
3.2. Réalisation de la photogrammétrie par SfM <i>via</i> Metashape.....	39

Metashape étape 1 - Incorporation des photos réalisées par le drone	40
Metashape étape 2 - Réaliser la calibration en réflectance	42
Metashape étape 3 - Alignement des photos réalisées par le drone	46
Metashape étape 4 - Importer les Points de Contrôle au Sol (PCS)	47
Metashape étape 5 - Transformer le système de coordonnées	49
Metashape étape 6 - Optimiser l'alignement des caméras	50
Metashape étape 7 - Construire et exporter le MNS et l'orthomosaique.....	51
3.3. Production de cartes et calculs de métriques via l'application-logiciel open-source SISTER	53
Installation	53
Fonctionnalités	54
Description de l'interface	54
Description des onglets du panneau principal	55
Onglet 0 du panneau principal - Module <i>KML conversion</i>	55
Onglet 1 du panneau principal - Module <i>Mapping</i>	56
Onglet 2.1 du panneau principal - Module <i>Orthophoto</i>	57
Onglet 2.2 du panneau principal - Module <i>Validation</i>	58
Onglet 3 du panneau principal - Module <i>Monitoring</i>	59
Partie 3	61
Guide d'analyse des données.....	61
1. Introduction	62
2. Interprétation des métriques paysagères et morphologiques	62
3. Description et localisation des sites d'étude.....	65
3.1. Site des Grenettes (île de Ré – commune de Sainte-Marie de Ré)	66
3.2. Site de Oléron (île d'Oléron - commune de Domino)	68
3.3. Site de Vallières (commune de Saint-Georges-de-Didonne).....	69
4. Résultat des survols drones et acquisition des données.....	71
5. Carte de distribution des récifs à <i>Sabellaria alveolata</i> et métriques paysagères.....	74
5.1. Site de l'île de Ré - Grenettes	75
5.2. Site de l'île d'Oléron - Domino.....	78
5.3. Site de Vallières	81
Discussion	84
& Perspectives.....	84
1. Synthèse des outils fournis	85
2. Limites actuelles et perspectives de développements du protocole SISTER	88
Références	91
Abréviations	94

Introduction générale

Cadre scientifique et objectifs
généraux du projet SISTER



1. Les formations récifales à *Sabellaria alveolata*

Parmi les habitats benthiques, ceux structurés par des espèces ingénieurs ou fondatrices jouent des rôles écologiques majeurs et assurent des fonctions centrales dans les dynamiques écologiques des milieux côtiers. Les espèces ingénieurs les plus emblématiques des milieux marins tempérés sont les plantes (zostères), les macroalgues (laminaires et fuciales) et les mollusques bivalves (huîtres et moules). Ces habitats hébergent une macrofaune souvent abondante et diversifiée, et assurent des fonctions de nourricerie ou de nurserie pour un grand nombre d'espèces (Goldberg 2013).

Il existe beaucoup d'autres espèces fondatrices et l'une des plus fréquentes est l'hermelle (*Sabellaria alveolata*). Ce polychète construit des tubes de sable en capturant des particules minérales et des bioclastes qu'il colle avec un ciment biologique (Le Cam et al. 2011, Lisco et al. 2017). L'accumulation et les enchevêtrements de tubes conduisent à la production de bioconstructions récifales dont la dynamique spatiale et temporelle est très variable (Gruet 1986). Ces bioconstructions – ou récifs biogéniques – peuvent prendre plusieurs types (*sensu* Curd et al. 2019) : (i) des formations plaquées à la roche, peu épaisses couvrant généralement des surfaces continues de l'ordre du mètre carré ; (ii) des formations plus hautes (plusieurs dizaines de cm) sous la forme de boules ou de monticules couvrant souvent plusieurs dizaines de mètres carrés et (iii) des structures tabulaires dépassant le mètre de hauteur et couvrant plusieurs centaines de mètres carrés. Tous ces types de bioconstructions présentent souvent des phases de progradation (i.e. développement ou croissance) et de rétrogradation (i.e. érosion ou régression), parfois de façon simultanée. Un récif est ainsi la mosaïque résultant de ce mélange de types de bioconstructions et de phases d'évolution.

Les bioconstructions à *Sabellaria alveolata* forment des habitats récifaux d'importance variable, sur les côtes européennes en général, et en particulier sur les côtes françaises (Firth et al. 2021a, Curd et al. 2023). Si l'espèce se rencontre très fréquemment partout du nord de l'Europe en Ecosse au nord de l'Afrique au Maroc, c'est en France que se situe le centre de son aire de distribution (Curd et al. 2020, Firth et al. 2021b). Les bioconstructions se situent généralement juste au-dessous de la mi-marée dans les milieux intertidaux macrotidaux. Localement, les récifs peuvent s'étendre sur des surfaces de plusieurs dizaines - voire centaines - d'hectares comme en baie du Mont-Saint-Michel (Collin et al. 2018) ou en baie de Bourgneuf (Brunier et al. 2022). Plus les surfaces couvertes par ces bioconstructions sont importantes, plus les fonctions écologiques assurées par cet habitat sont structurantes dans les environnements colonisés par l'espèce, et notamment :

(1) la fonction de refuge pour la biodiversité. Ces structures récifales tridimensionnelles présentent une richesse spécifique environ 10 fois supérieure à celle des sédiments meubles avoisinants (Dubois et al. 2003, 2006, Plicanti et al. 2017, Jones et al. 2018, Muller et al. 2021). Les assemblages d'espèces sont uniques en rassemblant sur le même habitat des espèces classiquement inféodées aux substrats durs et aux substrats meubles, ainsi que des espèces intertidales et subtidales (Dubois et al. 2003, Muller et al. 2021) ;

(2) la fonction de filtre biologique et de piégeage des particules fines. Cette espèce est un suspensivore dont le taux de filtration standardisé par gramme de matière sèche s'approche de celui des huitres ou des moules (Dubois et al. 2005, 2009), créant ainsi d'importantes zones de filtration biologique. L'activité d'alimentation de l'espèce contribue alors au couplage benthopélagique et à la production locale du microphytobenthos (Jones et al. 2021) ;

(3) la fonction de protection contre l'érosion côtière, même si celle-ci reste moins documentée. Les récifs piègent sur le long-terme une quantité de sables minéraux et bioclastiques par les constructions elles-mêmes (Lisco et al. 2017) et les mouvements de sédiments meubles sont également freinés en arrière des récifs ou des accumulations de sédiments persistents (Noernberg et al. 2010, Desroy et al. 2011) grâce à une absorption de l'énergie des vagues dans la zone de déferlement et une limitation de l'effet d'érosion des courants de dérive.

Il existe donc aujourd'hui un consensus pour reconnaître les rôles écologiques assurés par les habitats à *Sabellaria alveolata*. Les fonctions assurées dépendent de la taille des structures récifales et de leurs couvertures : des récifs peu développés plaqués à la roche n'auront pas le même impact sur le fonctionnement de l'écosystème que des formations de plus d'un mètre de haut s'étendant sur plusieurs hectares. La dimension surfacique - et plus globalement les changements spatio-temporels dans ces structures récifales - sont donc des éléments majeurs à considérer.

2. Les formations récifales et les directives européennes

Comme de nombreux habitats marins d'intérêt écologique, les récifs à *S. alveolata* sont couverts par un certain nombre de cadres réglementaires aux niveaux européen, national et même régional ou local. Ce sont bien les bioconstructions comme les récifs qui sont concernés par un éventuel cadre administrato-juridique et non l'espèce *Sabellaria alveolata*. Les deux sont bien sûr liés, mais cette nuance est importante car implicitement, ce ne sont pas les individus qui sont l'objet d'attention, mais seulement leur production, en l'occurrence leurs constructions. La directive "Habitats" concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages (directive 92/43/CEE du Conseil), adoptée en 1992, a établi une liste d'habitats, dont l'habitat "récifs" (code 1170). Cet accord européen prévoit un certain nombre d'actions, notamment la désignation de zones spéciales de conservation (ZSC) pour soutenir ces habitats. Dans le Manuel d'interprétation des habitats de l'Union européenne (CCE, 1999), qui fournit des définitions des habitats, un "récif" est défini comme "submarine or exposed at low tide, rocky substrates and biogenic concretions, which arise from the sea floor in the sublittoral zone where there is an interrupted zonation of plant and animal communities". Les termes "biogenic concretions", qui font explicitement référence à des bioconstructions telles que celles à *Sabellaria alveolata*, ont été définis comme "concretions, encrustations, corallogenic concretions and bivalve

mussel beds originating from dead or living animals, i.e. biogenic hard bottoms which supply habitats for epibiotic species" (CCE, 2007).

Ces critères ne mentionnent pas de surface ou de hauteur minimale pour que ces concrétions soient qualifiées de récifs. Mais selon l'initiative de la Directive européenne Habitats, dans le cadre du projet United Kingdom Marine SAC, Holt et al. (1988) ont fourni des critères pour qu'un récif biogénique soit classé comme un habitat "récifal" de l'annexe 1. Selon ces auteurs, un récif "should be substantial in size (generally in the order of a metre or two across as a minimum, and somewhat raised) [and] should create a substratum which is reasonably discrete and substantially different to the underlying or surrounding substratum, usually with much more hard surfaces and crevices on and in which other flora and fauna can grow". Cette définition apporte des éléments quantitatifs sur la taille des structures biogéniques construites mais par sur les surfaces couvertures dans les écosystèmes.

Les travaux conduits dans le cadre de la Directive OSPAR pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est, et plus particulièrement dans le cadre de la description des habitats listés par cette convention, il est stipulé qu'un habitat doit s'étendre sur une surface minimale de 25 m² pour être effectivement listé comme un habitat (https://inpn.mnhn.fr/docs/ref_habitats/TYPO_OSPAR_HAB_PDF.pdf). Cette quantification n'est pas reprise dans un effort de définition des habitats subtidaux à *S. spinulosa* (Hendrick and Foster-Smith 2006) où la dimension surfacique reste néanmoins un critère clé de la définition d'un récif, renforçant ainsi le besoin de disposer d'une mesure surfacique pour le suivi des formations récifales à *Sabellaria alveolata* et leur évaluation au titre des directives européennes.

Disposer d'éléments quantitatifs surfaciques est donc central pour répondre aux objectifs environnementaux sur les habitats marins en général, et sur les formations récifales à *Sabellaria alveolata* en particulier. Parmi ces éléments, être capable de dire si la surface couverte par les hermelles augmente ou régresse, et dans quelle mesure, contribue donc à renseigner sur l'état écologique et la dynamique de cet habitat présent sur toutes les façades métropolitaines.

3. L'imagerie par drone comme outil central en écologie spatiale

Traditionnellement, un habitat est caractérisé par des critères biocénotiques (i.e. la composition des espèces que l'on y trouve) et des critères abiotiques, comme l'extension surfacique. Cette dernière est évaluée à l'aide d'images obtenues classiquement par satellite ou vol habité (avion). Ces outils sont souvent pertinents car ils couvrent de vastes surfaces mais ils possèdent certaines contraintes fortes et notamment : (1) la résolution spatiale des images satellites qui peut être limitante pour extraire l'information recherchée, (2) le coût d'un levé en avion qui est élevé, ce qui limite l'emprise et la fréquence d'acquisition (faible résolution temporelle), et (3) les fortes contraintes météorologiques qui affectent le signal et son traitement, obligeant un report fréquent et des contraintes logistiques fortes pour les équipes au sol. En

milieu côtier, les images satellites - aujourd'hui souvent gratuites à l'accès - s'avèrent précieuses mais en fonction des orbites de passage des satellites, toutes les côtes françaises ne peuvent pas bénéficier d'un passage pendant la basse mer. Des programmations de satellites peuvent être réalisées pour un calage sur les horaires de marées, mais dans ce cas, à des coûts souvent élevés.

Aujourd'hui l'utilisation d'UAV (Unmanned Aerial Vehicles) – aussi appelés vulgairement drones aériens – permet de pallier un certain nombre de contraintes car (1) les UAV sont de moins en moins coûteux, (2) ils sont mobilisables avec des contraintes d'utilisation moins importantes quant aux conditions météorologiques (variations de l'ombrage des nuages et de la réflexion spéculaire), permettant ainsi un retour sur le terrain et une fréquence d'acquisition plus élevée, et (3) ils possèdent des résolutions optiques très performantes ainsi que des hauteurs de vol permettant des couvertures spatiales adaptées à de nombreux habitats marins, et en particulier les « récifs d'hermelles ».

4. Objectifs généraux du projet SISTER

Le projet SISTER (Surface Imaging Solution for Temperate Reefs) propose de compléter la mise en place d'un protocole national de suivi des formations récifales à *S. alveolata* sur les côtes françaises (i.e. REEHAB ; www.hermelles.fr). Pour rappel, ce protocole national REEHAB retenu dans le cadre de la DCSMM propose - par exemple aux gestionnaires qui ont inscrit cet habitat dans leur plan de suivi - de suivre l'évolution de ces bioconstructions par l'intermédiaire de grands quadrats fixes de 25 m² dans lesquels plusieurs mesures semi-quantitatives sont réalisées, et notamment les couvertures de l'habitat récifal et sa hauteur, ainsi que la colonisation par d'autres épibiontes qui entrent en compétition avec les hermelles pour l'espace ou la nourriture. Cette approche considère comme unité de mesure le mètre carré et le quadrat (25 m²) mais ne tient pas compte de la couverture globale des formations récifales sur l'ensemble de la zone d'étude, traditionnellement une plage, une baie, ou une portion de l'estran. En somme, le même effort d'échantillonnage est réalisé pour des récifs de plusieurs dizaines d'hectares ou des récifs de quelques centaines de mètres carrés, pour des récifs très fragmentés ou des récifs présentant une colonisation continue de l'estran. Ainsi, un projet a été imaginé afin de se placer à une échelle spatiale plus représentative de la dynamique locale d'une communauté à *S. alveolata* et des bioconstructions associées, et de proposer une méthode d'évaluation complémentaire au protocole REEHAB. Le projet SISTER a donc été imaginé.

Le projet SISTER - pour Surface Imaging Solutions for TEMperate Reefs - a pour objectif principal l'élaboration d'un protocole d'évaluation à long-terme des évolutions de la surface couverte par habitats récifaux à *S. alveolata* (ou hermelles). Ce protocole doit fournir (1) une méthode d'acquisition de données spatialisées et (2) une méthode de traitement de cette donnée afin de produire *in fine* une cartographie de la couverture des formations récifales et un ensemble de mesures quantitatives dont l'interprétation

doit renseigner sur la dynamique de l'habitat récifal. Le protocole proposé doit être opérationnellement pertinent, c'est à dire qu'il doit être facile à mettre en œuvre et peu coûteux, deux contraintes souvent liées à l'efficacité des protocoles de suivi sur le long terme. Il doit aussi être transférable à tous les estrans où cette espèce fondatrice se développe, de façon à obtenir des données standardisées et comparables.

Disposer d'un protocole comme SISTER permettant de fournir des éléments surfaciques quantitatifs permet également d'alimenter les descripteurs du bon état écologique de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM). Ce protocole vient donc compléter les autres métriques quantitatives sur les habitats récifaux à *Sabellaria alveolata*.

Le projet SISTER a été développé en collaboration avec le Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis (PNMEGMP), dans lequel des sites d'étude ont été sélectionnés, sur la base d'analyses cartographiques, afin de mettre en place puis de tester le protocole proposé. En substance, le protocole SISTER propose de suivre sur un site d'étude - i.e. typiquement un linéaire de l'estran de plusieurs centaines de mètres - plusieurs quadrats virtuels d'un hectare, à l'intérieur desquels une série d'images acquises par drone et analysée par une chaîne de traitement dédiée permettra de mettre en évidence la surface recouverte par les formations récifales à *S. alveolata*. Le retour sur ces mêmes quadrats virtuels permet d'appréhender les dynamiques spatiales et temporelles des couvertures récifales. La construction du protocole se base sur trois missions de test et d'acquisition d'images entre les printemps 2022 et 2023. Ce document se présente sous la forme de 3 grandes parties (ou guides) complémentaires (Fig. 0.1.) :

- (1) **Partie 1 - Un guide de terrain** qui détaille la méthode d'acquisition des données. Il est ainsi discuté le choix des outils qui sont recommandés en pratique, afin d'obtenir les images de l'estran ;
- (2) **Partie 2 - Un guide logiciel** de traitement des données qui vient expliquer la chaîne de traitement des images acquises, de la production de la mosaïque d'images à l'évaluation automatique de la couverture récifale. Ce guide explique en détail l'utilisation du logiciel SISTER dédié à la production de cartes et de métriques ;
- (3) **Partie 3 - Un guide d'analyse** qui utilise les données acquises et teste la chaîne de traitement sur plusieurs sites jusqu'à la production d'une analyse écologique site-spécifique.

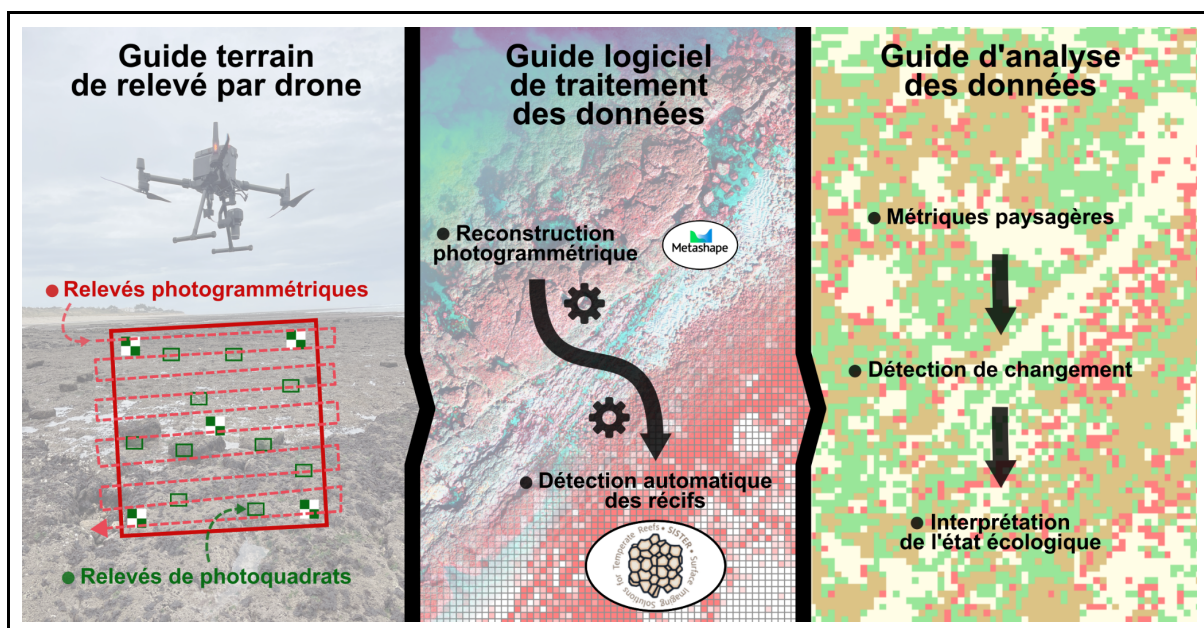


Fig. 0.1. Schéma récapitulatif général du protocole SISTER. Les données sont acquises par des drones selon des plans de vol reproductibles et complétés par des photo-quadrats. Après reconstruction de l'orthomosaique produite par les images drones, une application génère une carte de probabilité de présence des formations récifales et calcul un ensemble de métriques paysagères. Ces éléments quantitatifs sont comparés entre dates de suivi afin de détecter des variations et des changements qui correspondent à des réponses écologiques des habitats récifaux.

Partie 1

Guide terrain de relevé par drone aérien

Acquisition de données dans
le cadre du projet SISTER



1. Introduction

Le protocole SISTER est basé sur des relevés réalisés par des drones aériens. Ces nouveaux outils d'imagerie de surface offrent un nouveau point de vue sur l'estran et fournissent des informations surfaciques et volumiques complémentaires aux observations au sol (typiquement celles réalisées dans le cadre du protocole REEHAB). Au fur et à mesure du développement de la technologie drone, cet outil devient de plus en plus accessible et exploitable pour de nombreuses applications. La facilité d'utilisation pour les acquisitions d'images et la possibilité de planifier des vols automatiques sur des zones d'intérêts rendent le drone particulièrement adapté pour des protocoles de suivi à l'échelle des paysages et des habitats marins. L'automatisation des plans de vol permet une répétabilité des acquisitions dans le temps et assure ainsi des suivis standardisés. La personnalisation des paramètres de plan de vol (e.g. hauteur de vol ou surface couverte) permet de construire un protocole spécifique à un objet d'étude. Pour le suivi des habitats benthiques en zone intertidale, la flexibilité d'utilisation du drone est intéressante car elle permet de s'adapter aux conditions particulières du milieu telles que les contraintes de marée (et donc des fenêtres d'acquisition réduites) et de trouver les paramètres optimaux pour assurer un suivi. L'objectif de ce guide terrain est de fournir un outil pas à pas pour l'acquisition d'images qui seront traitées dans un second temps par une suite logiciel dédiée. Ce guide informe donc les opérateurs terrain sur la méthodologie employée et les outils déployés, les spécificités techniques comme les points d'attention et les difficultés. Il décrit ainsi une méthode qui doit permettre de fournir (1) les images drones nécessaires pour générer une orthomosaïque multispectrale et un Modèle Numérique de Surface (MNS) des zones d'intérêts (i.e. une sélection *a priori* d'une portion de l'estran où auront lieu les suivis des formations récifales) et (2) des photos-quadrats qui seront utilisés comme vérité terrain pour valider la détection des récifs. Cet ensemble de données sera dans un second temps traité par le logiciel SISTER pour l'estimation surfacique et volumique des récifs à *Sabellaria alveolata* (cf partie 2 - guide logiciel). Ce guide de relevé terrain est composé de trois parties qui décrivent : (i) le matériel nécessaire à la réalisation du protocole, (ii) la mise en application détaillée du protocole, et (iii) les préconisations avant, pendant et après la mission terrain.

2. Matériel préconisé

2.1. Drone compact avec capteur multispectral intégré

Dans le but de construire un protocole à faible coût, le choix du drone s'est porté sur des modèles de petite taille et disponibles facilement auprès de revendeurs spécialisés. La démocratisation de ces outils rend leur coût très abordable pour des capacités toujours supérieures. L'inconvénient est le coût écologique ainsi que la dépendance technique du hardware et du software par rapport à la construction *ex-*

nihilo ou à l'assemblage d'un drone, qui nécessite par ailleurs beaucoup de compétences techniques et de temps de mise au point. Un autre inconvénient des drones du commerce est la fréquence à laquelle les versions et les modèles évoluent, rendant un protocole technique obsolète après quelques années, sauf à anticiper des révisions techniques régulières.

Le développement du protocole SISTER a été réalisé avec le *Phantom 4 RTK Multispectral* (marque chinoise DJI aujourd'hui leader mondial dans les drones aériens). Comme une illustration de la limite évoquée quelques lignes plus haut, pendant la phase d'acquisitions de ce projet, la production de ce modèle s'est arrêtée, nous obligeant à nous orienter vers son successeur, dans la gamme des drones dédiés à l'agriculture et l'environnement de la même marque DJI : le *Mavic 3M RTK* (Fig. 1.1.). Ce dernier est plus performant sur les caractéristiques de vol et possède une caméra RGB mieux résolue. Cependant quelques différences au niveau des bandes spectrales de la caméra multispectrale ont nécessité d'adapter le modèle de détection automatique à ces nouvelles caractéristiques. Le *Mavic 3M* est conforme à la classe C2 européenne le rendant opérable en catégorie spécifique et ouverte pour les sous-catégories A2 et A3. Ce drone compact assure un temps de vol de 35-40 min pour une décharge de la batterie de 100% jusqu'à 15% en condition de vent faible (2-5 m/s). Il est équipé d'un capteur multispectral intégré (Table 1.) qui effectue des mesures radiométriques à la fois dans le domaine du visible et de l'infrarouge, augmentant ainsi l'information utile pour la caractérisation de surface. La mesure radiométrique est corrigée de l'ensoleillement ambiant à l'aide d'un pyranomètre installé sur le dessus du drone et calibrée via l'utilisation d'une cible radiométrique - cible de calibration de la réflectance diffuse MAPIR - lors de chaque vol. Ce drone possède une antenne GNSS (Global Navigation Satellite System) pour un positionnement en temps réel, ainsi qu'un module RTK (Real Time Kinematic) monté sur le dessus du drone, qui assure un positionnement centimétrique de l'appareil. Le drone est téléopéré via une radiocommande par connexion Wi-Fi qui dispose de l'application DJI Pilot 2 pour la planification de vol.



Fig. 1.1. Mavic 3M RTK et ses accessoires, tel que vendu dans ses versions les plus courantes.

Table 1. Spécificités techniques du capteur multispectral.	
Capteur	CMOS 1/2,8 pouces
Pixels effectifs	5 MP (2592×1944)
FOV	73,91° (61,2° x 48,10°)
Longueur focale équivalente	25 mm
Ouverture	f/2.0
Mise au point	Mise au point fixe
Vitesse d'obturation (électronique)	1/30~1/12800 s
Bandes multispectrales	
Vert	560 ± 16 nm
Rouge	650 ± 16 nm
Red Edge	730 ± 16 nm
Proche Infrarouge	860 ± 26 nm

2.2. Récepteur GNSS mobile et Points de Contrôle au Sol

Le récepteur GNSS mobile est une antenne permettant de capter les signaux des différents satellites de positionnement (e.g. GPS, Galileo, GLONASS). Ce système permet un positionnement décimétrique lorsqu'il est utilisé seul et centimétrique *via* des corrections transmises en direct (RTK) ou en post-traitement (PPK). Dans le cadre de ce protocole de suivi par drone, le récepteur GNSS est utilisé pour le positionnement de cibles qui servent de points de contrôle au sol (PCS) pour assurer une précision centimétrique du positionnement de la reconstruction photogrammétrique. Les antennes multi-

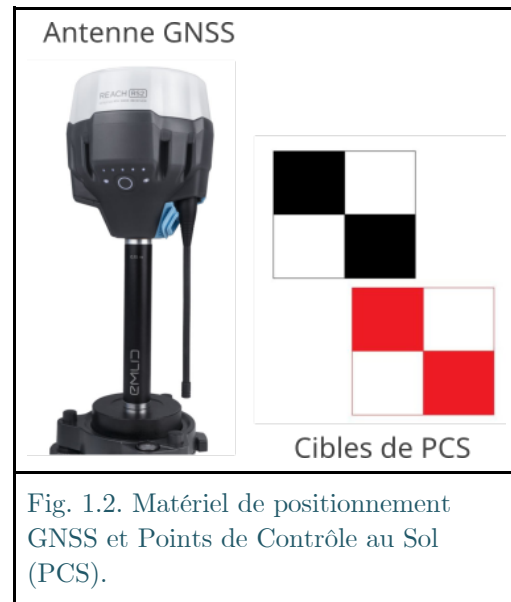


Fig. 1.2. Matériel de positionnement GNSS et Points de Contrôle au Sol (PCS).

bandes GNSS RTK Emlid RS2 (Fig. 1.2.) sont des récepteurs à prix abordable qui sont fournis avec l'application Emlid Flow pour Android ou iOS permettant de gérer la collecte de données et la connexion RTK. L'application Emlid Studio permet également de gérer les post-traitements PPK.

Les PCS peuvent prendre différentes formes, à la condition qu'ils soient bien identifiables sur les images drone et qu'ils ne bougent pas pendant le déroulé de la mission. Par exemple, on peut utiliser des cibles à ancrer au sol (Fig. 1.2.) ou bien dessiner directement sur le sol un motif précis et identifiable (e.g. croix, damier ou cercles concentriques) avec une bombe de peinture (biodégradable et neutre pour l'environnement) pour un marquage éphémère qui aura l'avantage de ne pas avoir à revenir chercher les cibles à la fin de l'acquisition.

2.3. Positionnement RTK

La cinématique temps réel (Real Time Kinematic en anglais, ou RTK) est une technique de positionnement par satellite basée sur l'utilisation de mesures de la phase des ondes porteuses des signaux émis par les systèmes GPS, GLONASS ou Galileo (Fig. 1.3.). Une station de référence fournit des corrections en temps réel permettant d'atteindre une précision de l'ordre du centimètre. En pratique, les systèmes RTK utilisent un récepteur fixe (station de base dont la position est connue précisément) et un certain nombre de récepteurs mobiles. La station de base compare la position calculée à partir du signal GPS et la position réelle, puis réémet les corrections à apporter vers les récepteurs mobiles. Cela permet aux unités mobiles de calculer leur position relative avec une précision de quelques millimètres, bien que leur position absolue soit aussi précise que la position de la station de base. La précision nominale

typique pour ces systèmes est de 1 cm horizontalement et 2 cm verticalement¹. Atteindre une précision centimétrique de positionnement des données est essentielle dans ce suivi qui a vocation à être répété dans le temps car cela assure la qualité de la reconstruction photogrammétrique et permet de minimiser considérablement les erreurs de détection de changement surfacique et volumique des récifs. En effet, les hermines se présentent sous la forme d'un habitat discontinu et fragmenté et un déplacement de quelques dizaines de centimètres sur le terrain pourrait faire varier fortement les résultats de présence/absence des récifs.

Plusieurs solutions permettent la mise en application de cette technique de positionnement. Il est possible d'utiliser une base d'un réseau RTK existant, ou d'installer une base temporaire sur une localisation connue. La première solution consiste à récupérer un fichier de correction RTK standard (RTCM3) de la base la plus proche via un protocole internet (NTRIP) ce qui implique donc d'avoir une connexion internet via un mobile ou un dongle 3G avec une carte SIM sur le terrain. Il existe des réseaux RTK privés et payants tel que Orpheon, et depuis 2019 un réseau libre, collaboratif et donc gratuit s'est développé sur le territoire métropolitain : le réseau Centipède RTK qui collabore avec le Réseau National GNSS Permanent de l'IGN. La distance entre le rover (récepteur GNSS mobile) et la base de correction est importante à prendre en compte car plus le rover est loin de la base, moins la mesure sera précise. Il est conseillé d'avoir une base à moins de 60 km du lieu de mesure. La seconde solution consiste à installer sa propre base - appelée D-RTK 2 pour la marque DJI ou Emlid Reach 2² comme marque alternative - qui sont compatibles avec les drones RTK de DJI. Cela permet d'assurer une proximité avec le rover et de ne pas être dépendant d'une connexion internet incertaine sur l'estran, mais cela implique de placer la base sur une localisation connue (e.g. une référence géodésique de l'IGN).

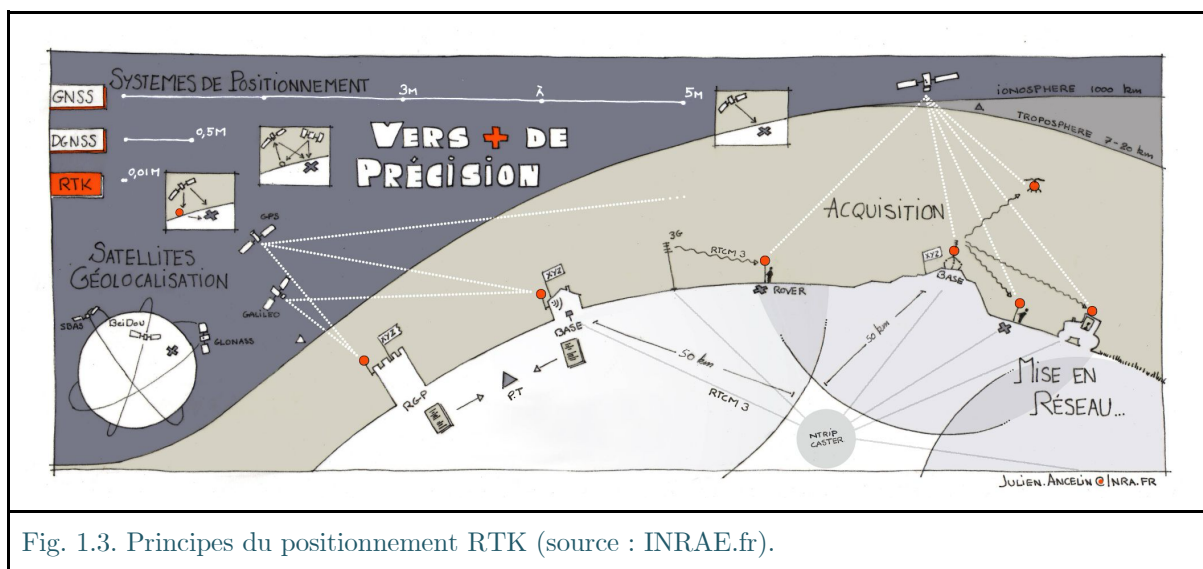


Fig. 1.3. Principes du positionnement RTK (source : INRAE.fr).

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Cinématique_temps_réel

² <https://escadrone.com/publication/utiliser-canne-emlid-drone-dji/>

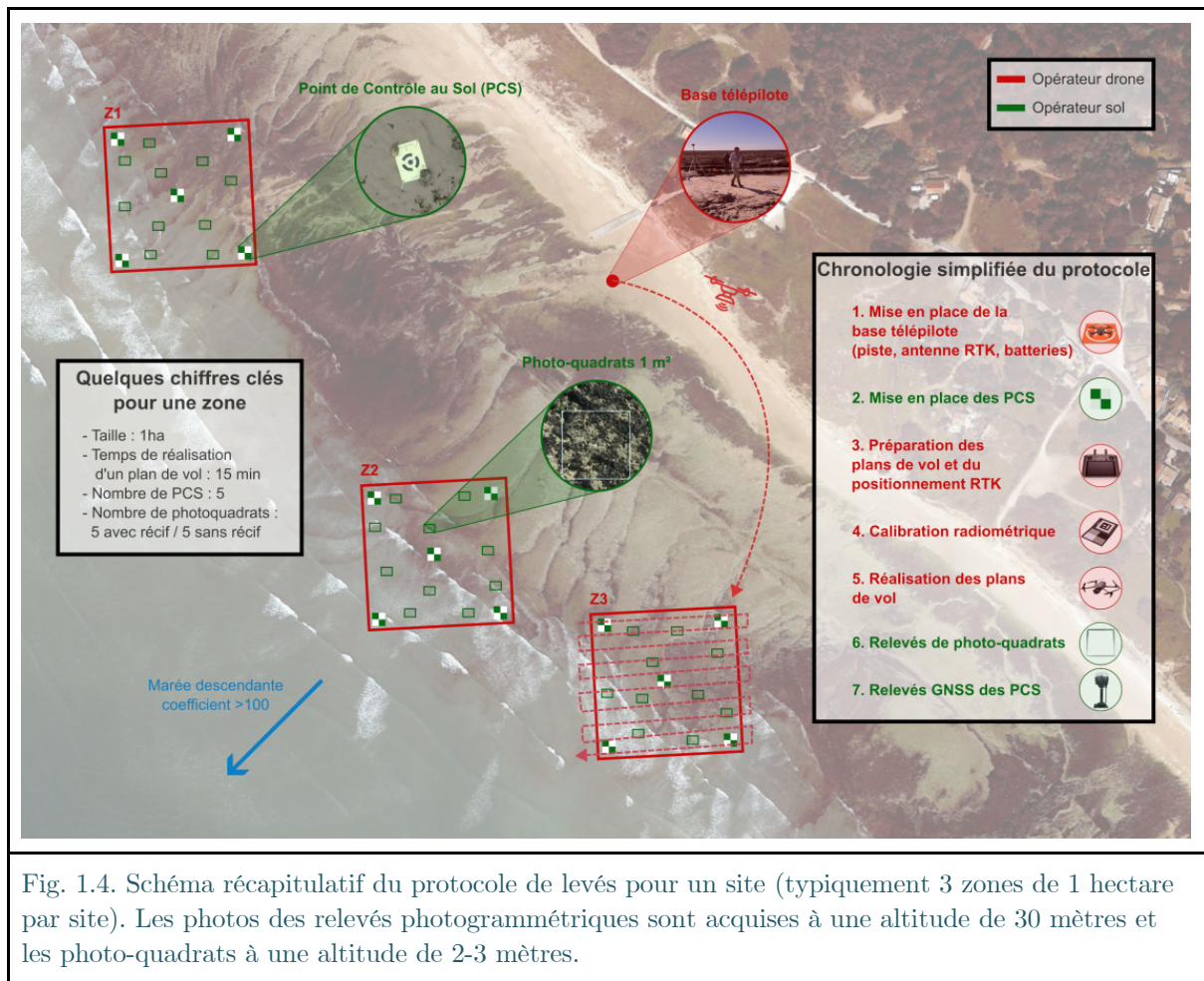
2.4. Matériel de sécurité

Il est important de s'équiper pour assurer la sécurité des personnes qui réalisent la mission, des tiers et du matériel. Les missions de relevé par drone impliquent de se déplacer sur le terrain et donc d'être équipé en conséquence en fonction de la météo ou de la saison (i.e. bottes, casquettes, et autres équipements de protection individuelle). Le matériel utilisé est compact mais peut être lourd à transporter sur le temps d'une mission, il est important de prévoir des sacs à dos adaptés en termes de volumes mais aussi imperméables pour ne pas abîmer le matériel lors du transport sur le terrain. Prévoir une piste de décollage et d'atterrissage pour le drone qui est facilement transportable (e.g. PVC souple et repliable) permet d'éviter de potentiels dégâts ou poussières sur les capteurs du drone. Enfin, il est important de se rendre visible pour avertir les usagers tiers de l'étranger qu'un vol drone est en cours ; cela peut se faire par le port de gilet jaune et la matérialisation de la piste de décollage avec de petits cônes de signalisation.

3. Protocole de levé par drone

3.1. Principes généraux

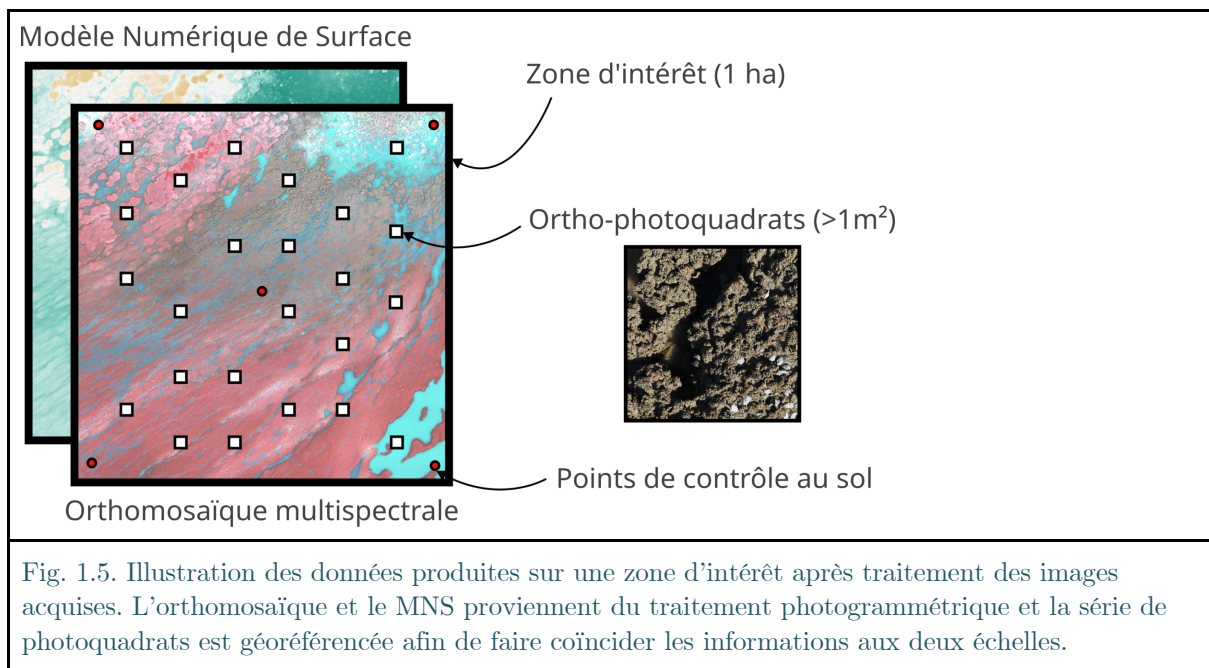
Ce protocole de suivi des récifs à *Sabellaria alveolata* par drone prévoit une acquisition annuelle en fin d'hiver (de mi-février à mi-avril). Un suivi annuel est la fréquence la moins élevée envisageable pour cet habitat très dynamique, dépendant des apports larvaires souvent massifs (entre mi-Avril et mi-Mai) et des événements météorologiques ponctuels tels que les tempêtes (octobre - janvier). Ainsi, la période de fin d'hiver - début du printemps a été identifiée comme favorable pour deux raisons. Tout d'abord, les formations récifales présentent un état post-hivernal qui rend compte du bilan des événements météorologiques et les structures sont mieux visibles car potentiellement moins colonisées par les macroalgues. Les macroalgues (i.e. algues brunes et surtout algues vertes) croissent très rapidement dès le printemps et gênent considérablement l'observation des récifs en vue nadirale. Ce résultat est développé dans la dernière partie du rapport. Dans un second temps, les grandes marées de vives-eaux sous nos latitudes se situent entre mi-février et mi-mars, permettant un temps de vol et d'acquisition plus long et une fréquentation humaine bien moindre par rapport aux grandes marées estivales. D'un point de vue bathymétrique, les récifs se situent globalement autour de la mi-marée : des coefficients de marée de 90 permettent un découvrément complet des structures récifales mais le temps de survol pourrait être juste, en particulier en conditions dépressionnaires ou avec des vents orientés vers la côte. Il est donc recommandé de cibler prioritairement les grandes marées avec des coefficients supérieurs à 100.



Un site est défini comme une zone de l'estran où la présence de récifs à *S. alveolata* doit faire l'objet d'un suivi. Sur ce site - qui s'étend typiquement sur plusieurs centaines de mètres linéaires côtier - 3 zones de 1 ha (1 ha = 100 x 100 mètres) feront l'objet d'un survol. Cette méthodologie a été choisie pour plusieurs raisons. Positionner plusieurs zones (ou super-quadrats) permet de couvrir des sites potentiellement hétérogènes et d'appréhender toute l'hétérogénéité spatiale. Un nombre de 3 zones de 1 ha à survoler est possible le temps d'une marée, typiquement en 1 heure autour de la basse mer. Il faut environ 45 minutes de temps de vol pour les couvrir, sans compter les changements de batterie, et autres opérations annexes. Enfin, le fait de choisir plusieurs zones permet d'obtenir une quantification de la variance inter-zones par site (et donc de calculer une moyenne et une erreur standard par site). Un tel protocole peut être réalisé par un télépilote accompagné d'une personne au minimum. Le nombre de zones et la surface totale couverte est donc un compromis entre le besoin de répétition de la mesure et une surface totale maximale. Il pourrait fonctionner avec plus de zones, éventuellement plus petites, voire moins de zones dans le cas de sites restreints ou difficiles d'accès pour les drones, au risque de limiter la comparaison inter-site.

Le protocole se divise en 2 phases, une première de relevés photogrammétriques et une seconde de photo-quadrats (Fig. 1.4.). La première phase consiste à acquérir avec le drone une série de photos suivant un plan de vol pour la reconstruction photogrammétrique d'une orthomosaïque multispectrale avec les canaux rouge, vert, bleu, red-edge et proche infra-rouge (R-V-B-RE-PIR) et d'un modèle numérique de surface (MNS) sur l'ensemble d'une zone d'intérêt (ZI) de 1 ha. Ces données constituent l'information brute qui sera traitée par l'application-logiciel SISTER pour l'estimation surfacique et volumique des formations récifales. La seconde phase consiste à acquérir avec le même drone (ou avec un autre drone si les équipements des opérateurs le permettent) une série de photo-quadrats, cette fois-ci à proximité du sol, afin de produire une vérité terrain photo-interprétable qui servira de validation des prédictions du logiciel.

Ci-dessous le protocole des relevés (Fig. 1.5.) est détaillé à l'échelle d'une zone et doit donc être répété plusieurs fois pour couvrir un site.



3.2. Relevé photogrammétrique

Le relevé photogrammétrique consiste à réaliser une série de photographies aériennes pour observer une ZI sous différents angles de vue afin de déterminer la forme, les dimensions et la position des récifs qui la composent. Le relevé par drone aérien s'effectue en 5 étapes : (étape 1) la planification du vol, (étape 2) la connexion au réseau RTK, (étape 3) le positionnement des PCS, (étape 4) la calibration

radiométrique, et (étape 5) la réalisation du plan de vol. Ces étapes sont décrites ci-après :

(étape 1) *Planification* - Le plan de vol doit être adapté à un relevé photogrammétrique, c'est-à-dire que les images acquises doivent couvrir l'ensemble de la ZI et surtout se superposer - au sein d'une ligne de vol et entre 2 lignes de vol adjacentes - pour garantir que plusieurs angles de vue d'un même point sont disponibles. Le logiciel DJI Pilot 2, intégré à la radiocommande, permet de planifier ce type de vol via l'onglet "Import KMZ" (qui permet d'importer la ZI au format .KMZ ou .KML - cf Encadré 1 pour la création d'un nouveau fichier - puis via l'onglet "Mapping". Les paramètres du plan de vol à renseigner sont dans la Table 2. Il est important de paramétrer une valeur de vitesse d'obturation supérieure à 1/500 s pour éviter les flous de bouger lors de l'acquisition des images ;

(étape 2) *Positionnement RTK* - Deux options sont possibles pour que le drone bénéficie de corrections de positionnement en temps réel. (option 1) Une antenne communiquant avec le drone peut être utilisée (par exemple l'antenne EMLID RS2). Elle doit alors être positionnée sur un emplacement connu comme un repère géodésique³. Elle doit par ailleurs être suffisamment proche du drone pour communiquer avec lui pendant toute la durée du vol. (option 2) Les corrections de positionnement peuvent être transmises par un réseau de stations au sol *via* une connexion internet. Il existe des réseaux payants comme Orpheon⁴ ou Teria⁵ et il existe également en France métropolitaine un réseau gratuit nommé Centipede⁶. Ce dernier ne garantit pas la fiabilité des corrections envoyées mais les retours de ses utilisateurs sont excellents. La connexion internet se fait alors soit directement dans la radiocommande via un Dongle 3G, soit *via* un appareil mobile compatible 3G et pouvant partager sa connexion par Wi-Fi (e.g. un téléphone portable) ;

(étape 3) *Positionnement des PCS* - Avant le survol par le drone, les cibles (Fig. 1.2.) qui serviront de PCS doivent être réparties pour couvrir l'amplitude spatiale en latitude, longitude et altitude au sein de la ZI. Il est conseillé de répartir au moins 5 cibles, une proche de chaque coin de la ZI et une au centre (Fig. 1.5.). Si l'amplitude en altitude de la zone n'est pas bien représentée par ces PCS, comme dans le cas d'un fort relief ou d'une pente marquée, il peut être nécessaire de rajouter 1 ou 2 cibles au niveau du point le plus bas et du point le plus haut. Ces cibles ne doivent pas bouger pendant le temps de la mission, il est donc nécessaire de les fixer au mieux au substrat sous-jacent soit en utilisant des piquets si le substrat le permet, soit en posant des objets lourds (e.g. galets) sur les coins de la cible, soit en marquant des cibles éphémères directement au sol à l'aide d'une bombe de peinture biodégradable. Le relevé des positions des PCS se fait avec le récepteur GNSS au sol avec un système de coordonnées paramétré en WGS84 (EPSG:4326). De préférence, ces relevés sont faits avant ou après

³ <https://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=visuigeod>

⁴ <https://reseau-orpheon.fr>

⁵ <https://www.reseau-teria.com>

⁶ <https://docs.centipede.fr>

le vol. Si les relevés sont effectués par un opérateur pendant le survol par le drone, il faut faire attention à ne pas cacher la cible lors du passage du drone ;

(étape 4) Calibration radiométrique - Lorsque le drone est prêt et que les PCS sont positionnés, le drone peut décoller. Avant de l'envoyer effectuer sa mission, une première acquisition manuelle doit être effectuée au-dessus de la cible de calibration radiométrique (ou MAPIR - Fig. 1.1.). Celle-ci doit être parfaitement propre, éclairée par la lumière naturelle ambiante et ne pas se situer dans l'ombre portée d'un objet environnant (*cf.* le protocole décrit sur le site de MAPIR⁷) ;

(étape 5) Réalisation du plan de vol - Après la calibration radiométrique, la mission peut être envoyée au drone *via* la radiocommande. Le drone va donc suivre les lignes du plan de vol et réaliser le survol de la ZI (1 ha) en 15 minutes environ. Si les conditions de vent sont bonnes, la mission peut être réalisée avec une unique batterie. Dans le cas de vents défavorables, et/ou de températures très basses, la durée de vol disponible pour une batterie sera réduite. Il faudra donc mettre la mission en pause et ramener le drone avant de dépasser le seuil critique de 30% (recommandé) de charge de la batterie pour un changement de batterie. Le drone doit être éteint pour un changement de la batterie, avant de le refaire décoller et lui faire reprendre sa mission. Il peut être nécessaire de refaire un calibrage radiométrique, notamment si les conditions météorologiques ont évolué au cours du vol.

Une fois la mission finie, les données acquises sont stockées sur la carte microSD du drone. Ces données seront utilisées pour réaliser le traitement photogrammétrique (*cf.* [Photogrammétrique par SfM : Metashape](#)).

Il existe différents formats de données avec la même extension .KML. Les logiciels QGIS et ArcGIS, par exemple, exportent un format .KML qui n'est pas toujours compatible avec le logiciel DJI Pilot 2 de la radiocommande. C'est pourquoi nous recommandons pour la création d'une nouvelle zone d'intérêt de numériser un polygone sous SIG, de l'enregistrer dans un format vecteur classique (.geojson ou .shp) avant de le convertir au format .KML grâce au module *KML conversion* du logiciel SISTER (*cf.* [Module "KML conversion"](#)). Vérifiez ensuite sur un SIG ou sur Google Earth Pro que le polygone s'affiche à la localisation exacte.

Encadré 1. Créer une nouvelle zone d'intérêt au format .KML

⁷ <https://www.mapir.camera/pages/calibration-target-t3-capture-procedure>

Table 2. Paramètres du plan de vol sur une zone d'intérêt pour un relevé photogrammétrique. Vérifier que ces paramètres sont bien ceux indiqués pour le drone avant le survol de la zone.	
Paramètre DJI Pilot 2	Valeur
Select Camera	DJI Mavic 3M
ASL/ALT	Relative to Takeoff Point (ALT)
Flight Route Altitude	30 m
Speed	2.6 m/s maximum
Side Overlap Ratio	70%
Frontal Overlap Ratio	80%
Margin	0
Photo Mode	Timed Interval Shot
Shutter Speed	> 1/500 s

3.3. Relevés de photo-quadrats

Cette seconde phase de relevé de vérité terrain consiste à réaliser des photo-quadrats géoréférencés de 1m^2 . Ces relevés sont des vérités-terrain qui serviront à la validation des modèles qui produiront les cartes de distribution.

Combien de photo-quadrats sont nécessaires ? Il est difficile de définir un nombre statistique qui sera par définition lié à la variabilité (erreur standard) de la variable mesurée, ici la présence ou l'absence de formations récifales, que l'on ne mesure pas directement mais que l'on prédit. Plus la taille de l'échantillon est importante et plus la validation des modèles produits sera robuste. Mais comme toute acquisition de terrain, l'effort doit également être dimensionné en pratique. Il est recommandé, d'après nos expériences sur des sites tests, de réaliser au minimum 30 observations par site, soit 10 par ZI (si le site comporte 3 ZI comme le décrit le protocole). Il est également demandé de répartir les observations dans toute la surface de la ZI et d'avoir autant d'observations d'absence que de présence de récifs. En résumé, il faut au minimum 5 observations de présence et 5 observations d'absence de structures récifales dans chacune des ZI de 1 ha.

Ces photo-quadrats peuvent être réalisées de 2 manières :

(option 1) Par un opérateur qui réalise des observations au sol, à l'aide d'un quadrat d'1m², d'un appareil photo de terrain (éventuellement sur une perche) et d'un récepteur GNSS mobile. Suivant un échantillonnage (type quadrillage) qui couvre l'intégralité de la ZI, chaque relevé consiste simplement à observer et noter sur une fiche la présence ou l'absence de récif d'hermelles selon la définition adaptée d'un récif pour ce protocole (cf. Encadré 2). Chaque observation et photo-quadrat doivent être accompagnés d'un identifiant (e.g. 2023-02-OLE-Z2-08 pour le photo-quadrat 08 de la zone 2 du site d'Oléron en février 2023). La photo est prise en vue nadir sans ombre portée, et la position du centre du quadrat est prise à l'aide du GNSS sur lequel sera renseigné le même identifiant afin de faire la correspondance à l'aide d'un SIG après la mission. Un opérateur dédié à ces relevés est nécessaire si les contraintes de temps imposent que le suivi du site soit réalisé sur une marée ;

(option 2) Par un drone (pilote par le même opérateur drone qui a fait le survol des zones ou par un second pilote si les moyens techniques et humains sont disponibles) qui a l'avantage de pouvoir réaliser des photo-quadrats avec un positionnement précis. Le drone est dans ce cas piloté manuellement et les acquisitions sont faites à 2 ou 3 mètres au-dessus du substrat, en vue nadir et avec le positionnement RTK activé. Cette approche a l'avantage d'être très efficace au niveau du temps d'acquisition sur le terrain mais requiert de photo-interpréter les photo-quadrats après la mission (ce qui reste rapide puisque seule l'information de présence ou d'absence de récif est nécessaire). Les photo-quadrats acquis par le drone pourront être traités sur le logiciel SISTER pour générer des orthophotos (cf. [Géo-positionnement](#) de l'application) qui seront exploitables sur un système d'information géographique (SIG) pour créer un jeu de données de validation (cf. [Validation](#) de l'application). La fonctionnalité de cette application-logiciel plaide pour une acquisition de photo-quadrats à l'aide d'un drone.

Le protocole SISTER définit comme une formation récifale à *Sabellaria alveolata* dans un photo-quadrat la présence d'une association de tubes qui semblent récemment construits (et donc contenant des organismes vivants et actifs) formant une structure distincte du substrat **sur plus de 25% de la surface échantillonnée** (ici 1m²). Ces tubes présentent une couleur jaune-sable observée au niveau de l'ouverture, preuve d'une activité de construction récente et typique des récifs en développement ou en progradation (Curd et al. 2019). Le terme « structure » désigne ici tous les types de récifs, des formes coalescentes en placages où tous les tubes présentent des orientations qui semblent aléatoires, aux formes arrondies qui se détachent du substrat et dont les tubes présentent un redressement et une orientation souvent homogène.

Encadré 2. Définition d'un récif à *Sabellaria alveolata* selon des critères visuels

4. Recommandations

4.1. Avant la mission

Rappels de la réglementation sur l'exploitation de drones aériens

Ce protocole a été conçu pour être facilement réalisable du point de vue administratif. Les vols prévus par drone sont inclus dans la catégorie *Ouverte* de la nouvelle réglementation européenne qui entrera en vigueur à partir du 1er janvier 2026. Cette catégorie ne nécessite pas de déclaration ou d'autorisation pour chaque vol. Il faut néanmoins s'enregistrer en tant qu'exploitant européen sur le portail AlphaTango. Par ailleurs, l'aéronef doit être en vue du télépilote, à une hauteur maximale de 120 m, et ne jamais survoler de rassemblement de personnes. Le Mavic 3M est un drone homologué S1-S2-S3 et est conforme à la classe C2 selon la nouvelle réglementation⁸. Les drones de classe C2 sont autorisés dans la sous-catégorie A2 (Table 3.).

Sous-catégorie	Distance des tiers	Classe du drone	Fonctionnalités particulières : identification directe à distance et géovigilance	Formation / examen
A2	À distance des personnes : 30m ou 5m autorisé si fonction basse vitesse disponible et enclenchée sur l'aéronef	C2 (m<4kg)	Oui	Prendre connaissance du manuel d'utilisation fourni par le fabricant de l'aéronef sans équipage à bord Obligatoire : Examen théorique pour la catégorie Ouverte + autoformation pratique (déclarative) + examen théorique complémentaire et délivrance du « brevet d'aptitude de pilote à distance »

Il faut également noter que ces spécificités de vol concernent les zones hors restrictions (voir carte Geoportail⁹). De nombreuses zones (e.g. zones CTR, zones militaire) peuvent restreindre la hauteur de vol ou nécessiter des demandes de dérogation ou d'autorisation. Les zones littorales en France sont particulièrement concernées par ces restrictions, qu'il faut anticiper. Il est important de prendre connaissance en avance de ces contraintes car certaines démarches comme la demande de vol dans les zones aériennes gérées par la Marine Nationale¹⁰ peuvent durer plusieurs mois.

⁸ Guide. Usages de loisir et professionnels simplifiés des aéronefs sans équipage à bord. Catégorie Ouverte. Édition 1, Version 1.5, 1er février 2023.

⁹ <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/restrictions-uas-categorie-ouverte-et-aeromodelisme>

¹⁰ <https://www.premar-atlantique.gouv.fr/page/vols-drones-civils-dans-les-zones-aeriennes-gerees-par-la-marine-nationale>

Choix de la date de vol

Il est préconisé d'appliquer ce protocole pendant les grands coefficients de marées entre mi-février et mi-avril, afin d'assurer une couverture algale minimale et des conditions de marée favorables. Cette période laisse une fenêtre d'une semaine de grande marée par mois pour de potentielles missions drone avec de bonnes conditions météorologiques. Février est également le mois de l'année avec le moins de précipitations selon les données historiques de Météo France.

Certains sites présentent une couverture algale permanente, composée d'algues rouges comme *Osmundea pinnatifida* ou *Chondrus crispus*. Ces algues gazonnantes présentent des dynamiques rapides de colonisation et sont parfois très dominantes dans certains sites. Elles représentent une limite bien identifiée dans l'estimation surfacique et volumique des récifs par imagerie drone. D'autres algues telles que les algues vertes du genre *Ulva* sont saisonnières et seront d'autant moins développées que le survol aura lieu tôt, avant le printemps et le réchauffement de l'eau.

Les conditions de marée peuvent être vérifiées via les données du SHOM, par exemple sur le site « maree.info ». Il ne faut pas oublier que ces prévisions n'incluent pas les phénomènes météorologiques et notamment la pression atmosphérique. En cas de dépression, le niveau de l'eau sera plus élevé que celui attendu en théorie, donc la mer se retirera moins loin, laissant potentiellement moins de temps pour la couverture de la zone d'intérêt. Sur le site maree.info, il est possible d'afficher la surcote, la décote et les conditions météorologiques 3 jours en amont via l'onglet "options".

Les conditions météorologiques peuvent être anticipées via les prévisions de différents modèles locaux ou globaux, tels que AROME ou ARPEGE, respectivement. Ces prévisions sont mises à disposition par Météo France en Open Data, et différents visualiseurs sont disponibles sur le web (e.g. meteociel.fr/modeles) qui permettent d'anticiper l'état du vent (vitesse, orientation), la nébulosité, ou les précipitations.

Matériel

L'utilisation de matériel drone et de positionnement nécessite potentiellement de gérer des problèmes techniques de différentes natures qui peuvent prendre du temps à résoudre. Il est donc essentiel : (1) de choisir un fournisseur avec un Service-Après-Vente compétent, (2) de connaître son matériel et l'avoir testé avant la mission et (3) de ne pas faire de mise à jour entre une phase de test réussie et une mission à venir.

Des oublis courants juste avant une mission peuvent concerner la charge des batteries de tous les appareils (par exemple la télécommande) ou encore de vérifier l'espace disque disponible sur les cartes de stockage pour enregistrer les données.

4.2. Pendant la mission

Le protocole est réalisable par un télépilote accompagné d'au moins une personne. Il est essentiel d'être plusieurs sur le terrain pour assurer la sécurité et la qualité de la mission. L'aide apportée par au moins un agent supplémentaire pour les relevés au sol permet de couvrir les 3 zones sur le temps d'une marée. Une troisième personne peut être une aide précieuse dans le cas de sites fréquentés par les usagers. Elle permet notamment au télépilote de conserver sa concentration en répondant aux questions des tiers et en limitant leur éventuelle intrusion dans la zone de décollage/atterrissage.

Sécurité des tierces personnes et du matériel

L'utilisation de drones dans un espace potentiellement fréquenté tel que le littoral implique certaines règles de sécurité et une vigilance accrue. Avant le décollage, un contrôle du matériel drone, notamment des rotors, peut permettre d'éviter un dégât matériel, voire un accident avec une personne. Afin d'avertir les personnes tierces qu'un vol drone est en cours, il est nécessaire de se rendre visible *via* le port de gilet jaune pour identifier les personnes en lien avec la mission et la matérialisation de la zone d'atterrissage (e.g. piste d'atterrissage et plots). Il peut être nécessaire d'avertir directement les personnes rentrant dans la zone de survol potentiel. Lors de relevé de photo-quadrats par drone à proximité du sol, le risque de collision avec des personnes est d'autant plus important. La réglementation autorise pour un drone de catégorie C2 un vol à une distance de 5m des personnes, à condition d'activer la fonction basse vitesse de l'appareil. Quel que soit le type de relevé, le drone doit toujours être en visuel et le paramètre *Return To Home* (RTH) doit être défini en fonction des potentiels obstacles environnant des drones volant en simultanément. Au retour de l'appareil, s'il y a des difficultés pour trouver une zone d'atterrissage sans risque, nous déconseillons d'essayer d'attraper le drone directement en vol pour le stopper. Il est préférable d'anticiper la situation et d'apporter une piste d'atterrissage amovible.

Qualité des levés

La qualité des données acquises pendant les levés peut être affectée par 3 paramètres : l'objet d'étude, la géométrie de la zone et la radiométrie. Il est préférable d'éviter au maximum la présence de matériel ou de personne qui obstrueraient la vue sur l'objet d'étude sur la ZI en cours d'observation car ces éléments peuvent par la suite entraîner des biais lors du traitement des données (et notamment la reconstruction). Si la connexion au réseau RTK n'est pas faisable lors de la mission, il est recommandé de reporter la mission à moins que des post-traitements PPK soient réalisables au retour de mission (voir [Après la mission](#) dans l'application). Enfin, il est important de s'assurer que la calibration radiométrique est bien faite en vérifiant le bon état de la cible radiométrique et du pyranomètre avant le vol.

4.3. Après la mission

Le premier réflexe au retour et avant la prochaine mission, doit être la sauvegarde de l'ensemble des données acquises. Si plusieurs missions s'enchaînent sur une semaine, il est nécessaire d'effectuer une sauvegarde quotidienne pour éviter qu'une éventuelle perte du drone n'entraîne également une perte des données acquises les jours précédents.

Lors de la mission, si un rapprochement dangereux entre votre appareil et un autre aéronef a eu lieu, il est important de signaler à la DGAC un airprox, c'est-à-dire un rapport d'incident qui servira à l'amélioration de la sécurité des vols.

Si la mission a été réalisée sans connexion à un réseau RTK, il sera nécessaire de faire les post-traitements PPK pour les données de positionnement de l'antenne au sol et des images du drone. Pour ces post-traitements, il faut récupérer les données de correction de la base du Réseau GNSS Permanent (RGP) la plus proche du site de la mission. Ces données sont gratuitement accessibles sur le site de l'IGN (<https://rgp.ign.fr/DONNEES/diffusion/>). Il existe ensuite différentes solutions logicielles pour effectuer les corrections de positionnements, soit directement sur un fichier de positions enregistrées (e.g. Emlid Studio), soit sur les positions enregistrées dans les métadonnées des images acquises par le drone (e.g. RedToolBox).

Partie 2

An aerial photograph of a beach. The sand is covered in intricate, wavy ripples. In the upper right, there is a rocky area with dark, wet rocks. A person is standing on the sand near the water's edge, casting a shadow. The overall scene is captured from a high angle, showing the texture of the sand and the layout of the beach.

Guide logiciel de traitement des données drone

Traitement des images
acquises dans le
protocole SISTER

1. Introduction

Le drone aérien fait partie des nouveaux vecteurs qui contribuent à une partie émergente du Big Data de l'Observation de la Terre. La désormais grande accessibilité des drones facilite la production en masse de données spatialisées mais le traitement, l'interprétation et l'analyse de celles-ci nécessitent des compétences expertes en traitement d'image, en géomatique et en écologie spatiale plus généralement. Certaines avancées techniques de traitement d'image par intelligence artificielle (IA), tels que la *Structure from Motion* (SfM) et les Réseaux de Neurones Convolutifs (*Convolutional Neural Networks* ou CNN), rendent possible l'automatisation d'une chaîne de traitement efficace pour l'extraction d'informations pertinentes.

L'objectif de ce guide logiciel est de fournir un outil pas à pas, destiné au traitement des images acquises par drone aérien, selon le protocole d'acquisition décrit dans la première partie (i.e. guide terrain de relevé par drone aérien). Ce guide renseigne ainsi sur la chaîne de traitement développée (Fig. 2.1.) pour permettre le suivi de l'état surfacique et volumique des récifs à *Sabellaria alveolata*. Plus spécifiquement, ce guide détaille et fournit :

- (1) Les principes de la chaîne de traitements de photogrammétrie des images drones pour générer les Modèles Numériques de Surface (MNS) et les orthomosaïques multispectrales, ainsi que la méthode de détection automatique des récifs d'hermelles à travers une grille d'échantillonnage ;
- (2) Un tutoriel « pas à pas » de la suite logiciel choisie et utilisée, à savoir (a) le logiciel Metashape pour construire et exporter les MNS et les orthomosaïques, et (b) l'application-logiciel SISTER créé dans le cadre de ce projet, qui produit les métriques et les résultats cartographiques de la distribution des récifs sur les zones survolées par les drones.

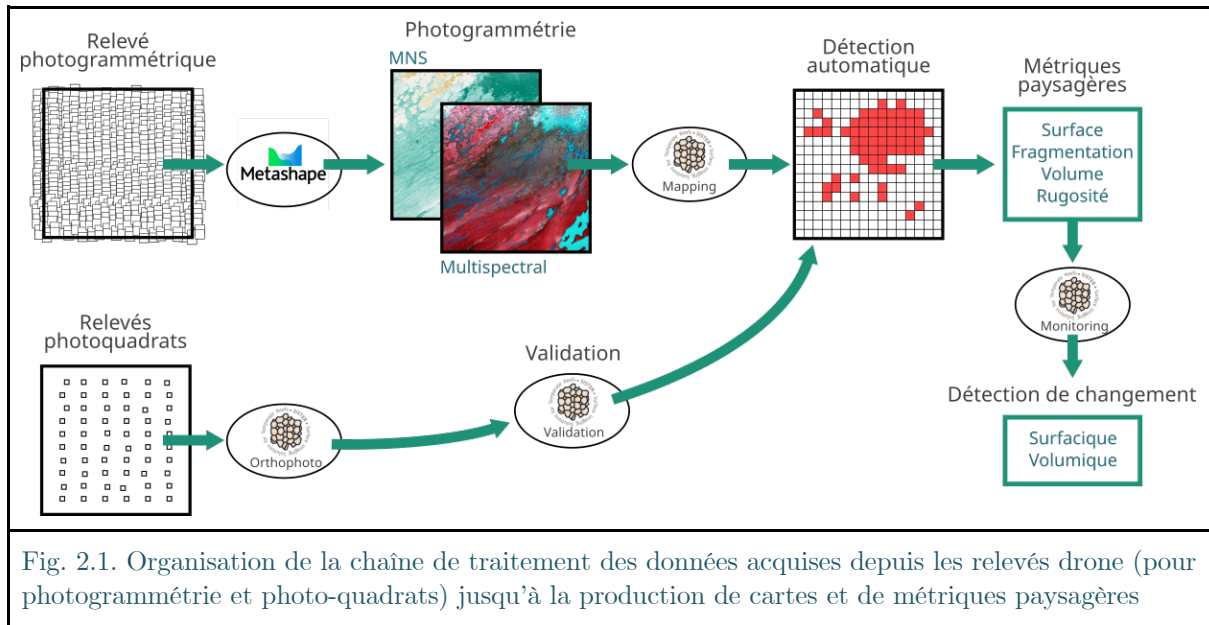


Fig. 2.1. Organisation de la chaîne de traitement des données acquises depuis les relevés drone (pour photogrammétrie et photo-quadrats) jusqu'à la production de cartes et de métriques paysagères

2. Description des chaînes de traitement

2.1. Principes de la photogrammétrie par SfM

Structure from motion (SfM ou « Structure acquise à partir d'un mouvement » selon la traduction consacrée) est une technique de photogrammétrie destinée à estimer la structure 3D d'un objet en exploitant la parallaxe entre des images 2D, c'est-à-dire le chevauchement de plusieurs prises de vue sur un objet. En d'autres termes, la SfM est capable de reconstruire un modèle 3D d'une zone à partir de plusieurs images superposées prises avec la même caméra sous différents angles. Comme en vision stéréoscopique, la reconstruction en 3D de l'objet est faite à l'aide des relations géométriques, dites épipolaires, des différents points de vue sur un objet. Mais la SfM - contrairement à la stéréoscopie classique - n'a pas besoin d'un calibrage très précis des paramètres de la caméra. Cette technique a l'avantage de pouvoir estimer les paramètres internes (e.g. la focale et les caractéristiques optiques) et externes (e.g. la position) de la caméra par la mise en correspondance des images. Cette avancée a été particulièrement significative en photogrammétrie par télédétection, rendant le vecteur drone particulièrement adapté à l'acquisition de séries d'images qui, bien qu'approximatives dans leur géométrie, sont largement exploitables dans un flux de travail SfM.

Les principes clés de la photogrammétrie numérique par SfM sont : **principe 1** - la mise en correspondance entre les images, **principe 2** - l'ajustement des faisceaux, c'est-à-dire

l'estimation des paramètres internes et externes de la caméra, et **principe 3** - la reconstruction stéréoscopique multi-vue.

Principe 1 - La mise en correspondance entre les images passe par l'identification de caractéristiques qui se distinguent de leur environnement, comme les coins ou les bords, ou les objets qui sont plus sombres ou plus clairs que leur environnement. Des détecteurs de caractéristiques tels que l'algorithme Scale-Invariant Feature Transform ou SIFT (Lowe 2004) sont particulièrement adaptés à cette tâche car ils sont peu sensibles aux différences de prise de vue liées à l'angle de vue, l'éclairage, la distance. Les caractéristiques identifiées, nommées points clés homologues, sont suivies et mises en correspondance entre chaque images (Fig. 2.2.). Parfois, certains points ne sont pas correctement associés, c'est pourquoi les correspondances doivent être filtrées. Le RANSAC (RANdom SAMple Consensus) est l'algorithme généralement utilisé pour supprimer les correspondances aberrantes.

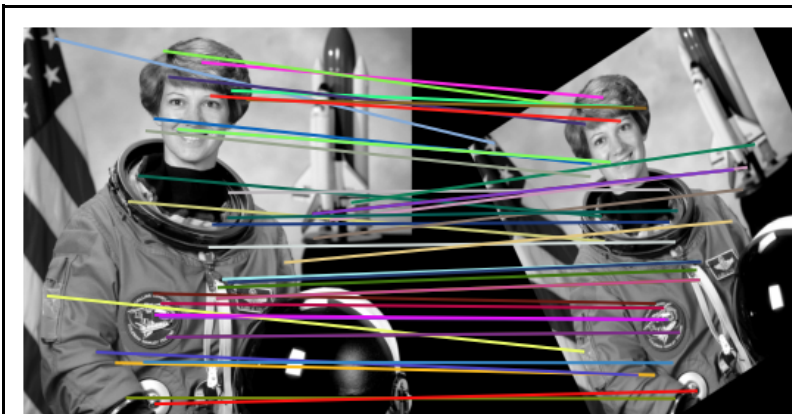
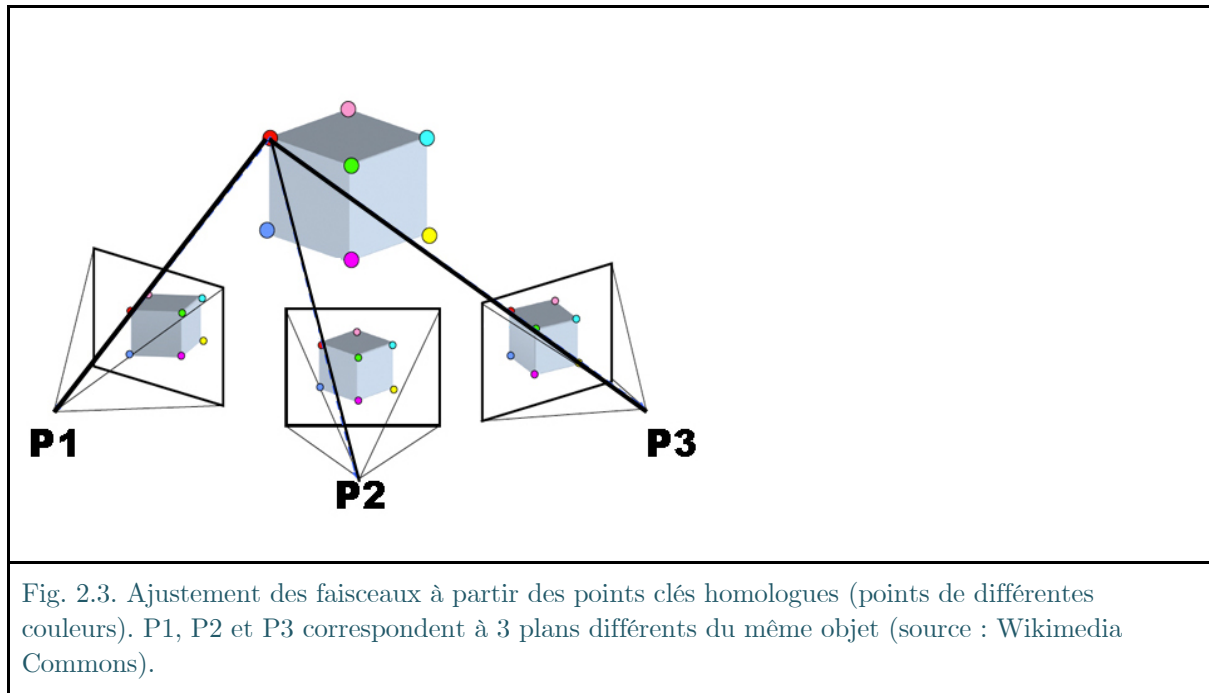


Fig. 2.2. Exemple de mise en correspondance de points clés homologues par l'algorithme SIFT (source: scikit-image). Les détecteurs de caractéristiques sont peu sensibles aux différences de prise de vue liées à l'angle de vue, l'éclairage, la distance. Sur cet exemple, les points clés homologues sont illustrés par des lignes de couleur qui réalisent les correspondances entre chaque image (ici uniquement 2 images).

Principe 2 - L'ajustement des faisceaux utilise les points clés homologues identifiés précédemment pour dériver les paramètres internes et externes de la caméra ainsi que la position 3D relative de ces points (Fig. 2.3.). La résolution d'un ensemble d'équations permet de minimiser l'erreur de position relative globale des points dans toutes les images. Le résultat de ce processus est donc le positionnement relatif de tous les points sous la forme d'un nuage éparsé et des caméras dans un système de coordonnées arbitraires. Afin de passer dans un système de coordonnées géographiques - comme la latitude et la longitude - des informations supplémentaires sur la géolocalisation sont nécessaires. La transformation des coordonnées est définie à l'aide de positions préalablement connues des caméras et/ou de points clés identifiés à partir de mesures GNSS, et passe par la comparaison de ces positions réelles et absolues aux positions relatives estimées dans le système arbitraire. Pour les besoins de la télédétection, au moins l'une des deux sources d'informations de géolocalisation - caméra ou PCS - est nécessaire pour que le produit résultant soit géoréférencé.



Principe 3 - La reconstruction stéréoscopique multi-vues consiste à créer une représentation 3D complète de l'objet d'étude. Cette reconstruction passe d'abord par la génération de cartes de profondeur qui représentent la distance de l'objet à la caméra dont la position est désormais connue de manière précise. La fusion des multiples cartes de profondeurs permet de générer différentes représentations de l'objet en 3D (nuage de points ou maillage) ou en 2.5D (MNS). Ces représentations sont finalement utilisées pour projeter l'ensemble des pixels des différentes images sur une orthomosaique géoréférencée.

2.2. L'intelligence artificielle pour la détection automatique des récifs à *Sabellaria alveolata*

La détection automatique pour la cartographie des récifs à *Sabellaria alveolata* intégrée dans le module "Mapping" de l'application-logiciel SISTER (*cf.* suite logicielle) est basée sur un modèle d'apprentissage profond (ou "deep learning" - un sous-domaine de l'intelligence artificielle). Il s'agit d'un réseau de neurones convolutif (« Convolutional Neural Network » ou CNN). Les CNN sont des modèles provenant à la fois du domaine de l'apprentissage machine et de la vision par ordinateur. Ces architectures utilisent des filtres de convolution - une opération élémentaire consistant à modifier la valeur d'un pixel en fonction de celle de ses voisins - dont les paramètres sont définis lors de l'apprentissage pour obtenir une représentation des données qui permettra de répondre au mieux au problème posé (LeCun et al. 2015), la classification d'images dans notre cas. Le modèle n'a donc pas seulement appris à classer les images mais aussi à les décrire en amont, on parle alors d'apprentissage des descripteurs (ou « features learning »).

La méthodologie appliquée au modèle de détection automatique qui traite les images drones dans l'application-logiciel SISTER comprend quatre étapes : **étape 1** – le pré-traitement des données d'entrée, **étape 2** - l'architecture du modèle CNN, **étape 3** - la stratégie d'apprentissage, et **étape 4** - l'évaluation des performances du modèle.

Ces étapes - qui impliquent des choix méthodologiques qui se répercutent sur les résultats - sont décrites dans les paragraphes suivants.

Étape 1 - Données d'entrée et leurs pré-traitements

Pour effectuer la détection automatique, le modèle CNN traite les données issues des images drone : l'orthomosaïque multispectrale (4 bandes) et le MNS (1 bande). Il a été décidé de réaliser la détection des récifs d'hermelles *via* une grille d'échantillonnage de 1m^2 et non *via* une approche pixel-centrée. Ce choix a été gouverné par des contraintes opérationnelles et techniques. Tout d'abord, la grande hétérogénéité spatiale des récifs à micro-échelle (centimétrique) et la dimension architecturale tridimensionnelle de ces bioconstructions pousse à une vision intégrée de l'espace et il semble plus intuitif de classer 1m^2 en "présence" ou "absence" de récif qu'un pixel. Ce compromis sur la résolution spatiale permet également un lissage des incertitudes liées à la détection automatique. Ensuite, la surface d' 1m^2 fait référence au protocole REEHAB dont l'unité de mesure et de collecte d'information est le m^2 . Même si les deux protocoles peuvent être opérés de façon indépendante, ils apportent des informations complémentaires aux questionnaires qui les déploient.

Dans la pratique, une grille d'échantillonnage subdivise la zone d'intérêt (1 ha) en quadrat de 1m^2 (soit $10\,000\text{m}^2$), mais les données d'entrée du modèle sont en fait des tuiles plus larges (de 4m^2) car les tests ont montré qu'échantillonner plus largement le voisinage spatial améliore significativement la détection des récifs bien que le grain de la cartographie résultante (et les calculs des métriques associées) reste à 1m^2 .

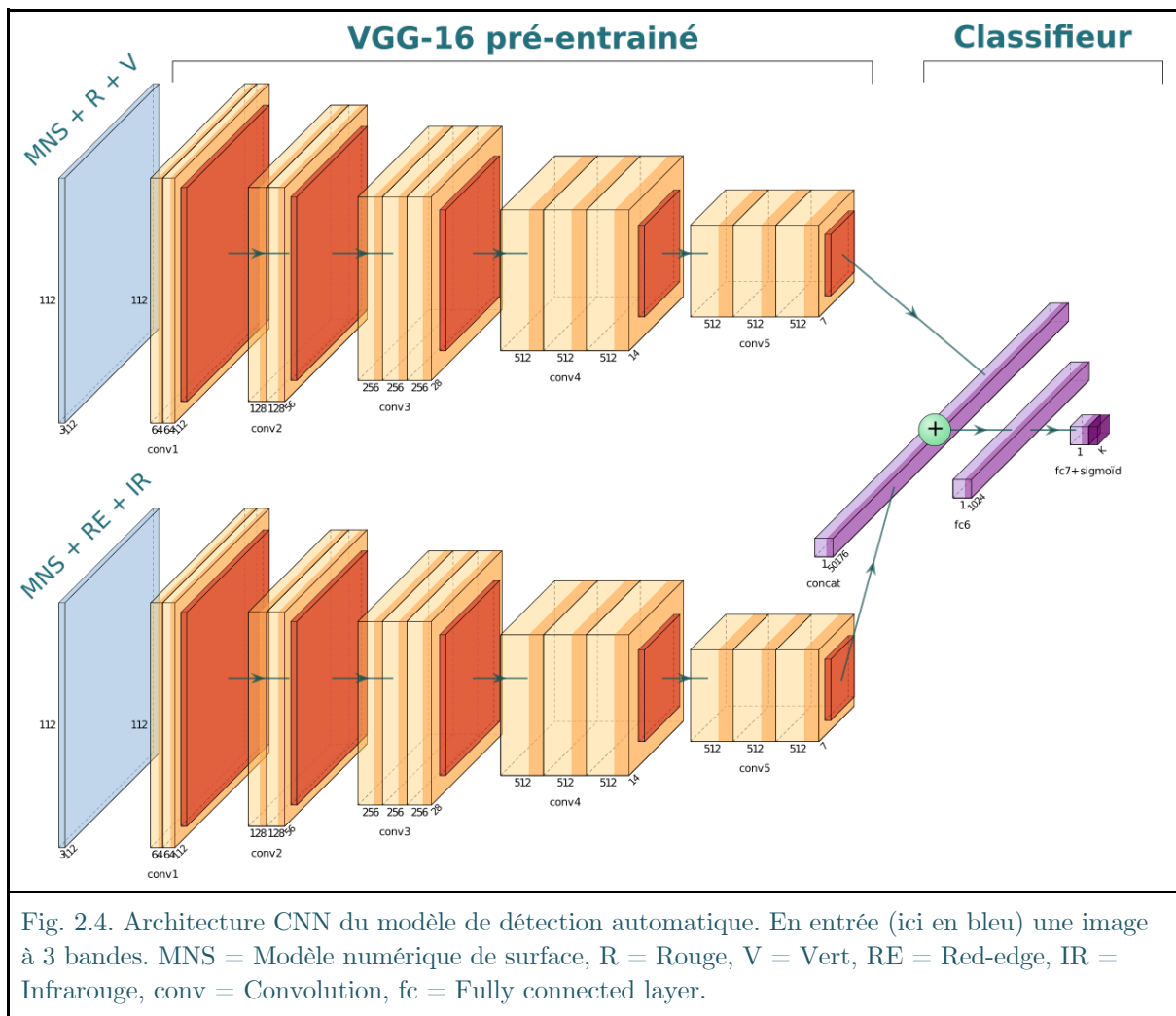
Ces données d'entrée sont normalisées avant d'être envoyées au modèle. Les valeurs d'altitude du MNS sont transformées en valeur d'élévation relative au point le plus bas au sein de la surface sous-échantillonnée ce qui permet au modèle d'être robuste aux potentiels biais de positionnement absolue. Les données sont ensuite centrées-réduites sur un ensemble de valeurs prédéfinies lors de l'apprentissage.

Étape 2 - Architecture du modèle CNN

Le modèle de détection automatique est basé sur l'architecture VGG-16 (Simonyan et Zisserman 2015), bien connue en vision par ordinateur. Cette architecture repose sur un descripteur et un classifieur. Le descripteur est composé d'une séquence de blocs de filtres de convolution associés à des filtres de sous-échantillonnage ("max-pooling") qui permettent d'extraire un ensemble de caractéristiques abstraites à partir des images. Ces caractéristiques sont multi-échelles et robustes au positionnement des objets. L'architecture comprend en entrée une image à 3 bandes et réduit l'information à un tenseur de 512 caractéristiques qui sera traité dans la seconde partie. Le classifieur est une couche "fully connected" (FC) qui a pour tâche de réduire l'information à un

vecteur de taille correspondant aux nombres de classes d'intérêts - dans notre cas une seule, i.e. les récifs à *Sabellaria alveolata*. Ce vecteur de sortie représente un score d'appartenance aux différentes classes avec des valeurs entre 0 et 1 indiquant respectivement l'absence ou la présence de la classe « récifs à *Sabellaria alveolata* ». Il est nommé « score IA » dans la suite du texte. Un seuil de ce score est ensuite déterminé en fonction des résultats sur un jeu de données d'évaluation.

Notre modèle (Fig. 2.4.) reprend cette architecture et la modifie en intégrant 2 branches de descripteur qui sont concaténées avant d'être traitées dans le classifieur afin de s'adapter à la contrainte du nombre de bandes (4 multispectrales et 1 MNS) qui est supérieur aux 3 de l'architecture originale. Une première branche permet donc de traiter un bloc constitué du MNS et des canaux rouge et vert tandis qu'une seconde branche traite un bloc constitué du MNS et des canaux red-edge et proche infrarouge. Cette structure nous semble – après plusieurs tests – la plus optimale.



Étape 3 - Stratégie d'apprentissage

Les paramètres du modèle sont déterminés par apprentissage sur un jeu de données labellisé qui constitue la base d'apprentissage. Celle-ci a été créée par photo-interprétation d'orthomosaïques et de photo-quadrats sur 3 sites du parc naturel marin

estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis (PNMEGMP, cf. [Description et localisation des sites d'étude](#)) générant ainsi 8000 échantillons divisés en 75 et 25%, respectivement pour un jeu d'entraînement et de validation. Cette base d'apprentissage n'étant pas assez conséquente pour générer des descripteurs de haut niveau d'abstraction, il a été nécessaire d'utiliser une approche d'apprentissage par transfert (ou "transfer learning") qui consiste à utiliser un modèle pré-entraîné sur une base de données importante, ImageNet (Deng et al. 2009), pour le passer à un nouveau domaine d'application. Cette approche consiste à affiner la détermination des paramètres par réapprentissage d'une partie ou de la totalité du modèle pré-entraîné ("fine tuning"). Les expérimentations ont montré que faire du fine-tuning sur la partie descripteur et repartir de zéro pour la partie classifieur est une stratégie d'apprentissage efficace.

Étape 4 - Évaluation des performances du modèle

Un jeu de données expert, indépendant des jeux d'apprentissage et de validation, a été créé pour évaluer les performances du modèle de détection automatique. Ce jeu d'évaluation a été créé sur la base de la photo-interprétation de 2000 photo-quadrats répartis sur les 3 sites pilotes du PNMEGMP. Les photo-quadrats ont été labellisés selon une sémantique qui détaille les taux de recouvrement du substrat des récifs à *Sabellaria alveolata*, le taux de couverture des macroalgues, des Ostreidae (essentiellement l'huitre creuse *Crassostrea gigas*), des Mytilidae (essentiellement les moules du genre *Mytilus* spp.) et du substrat non biologique (e.g. roche mère, sable). Ce jeu de données indépendant a d'abord permis la détermination d'un seuil sur le score IA pour déterminer les prédictions de présence et d'absence de récif, et une zone d'incertitude intermédiaire (Fig. 2.5.).

La détermination des seuils d'incertitude est basée sur les scores du classifieur (score IA) et les changements dans les proportions effectives observées entre présence et absence de récifs. Le seuil inférieur (0.3) a été fixé au niveau où la proportion observée de récifs dans les mailles classées par le modèle comme "absence de récif" augmente, donc au moment où le risque de sous-détection des récifs est plus important. Inversement pour le seuil supérieur de 0.7. Définir les seuils est un compromis, car plus l'intervalle inter-seuils est grand, plus le nombre de mailles incertaines sera grand. Dans notre cas d'étude, approximativement $\frac{1}{4}$ des mailles (ca. 300) possèdent un score compris entre 0.3 et 0.7.

Il est alors possible d'analyser les images qui se trouvent dans cette zone d'incertitude. Cet examen a montré que le taux de recouvrement des récifs a une influence sur la qualité de la détection automatique. En dessous de 25% de couverture récifale, la détection est incertaine. C'est la raison pour laquelle le protocole SISTER définit comme une formation récifale à *Sabellaria alveolata* dans un photo-quadrate la présence d'une association de tubes vivants formant une structure distincte du substrat sur plus de 25% de la surface échantillonnée (1m²). En d'autres termes, si l'opérateur indique la présence de récifs alors que celui-ci couvre moins de 25% du quadrat d'1m², il y a de fortes chances que le modèle classe le quadrat comme "absence".

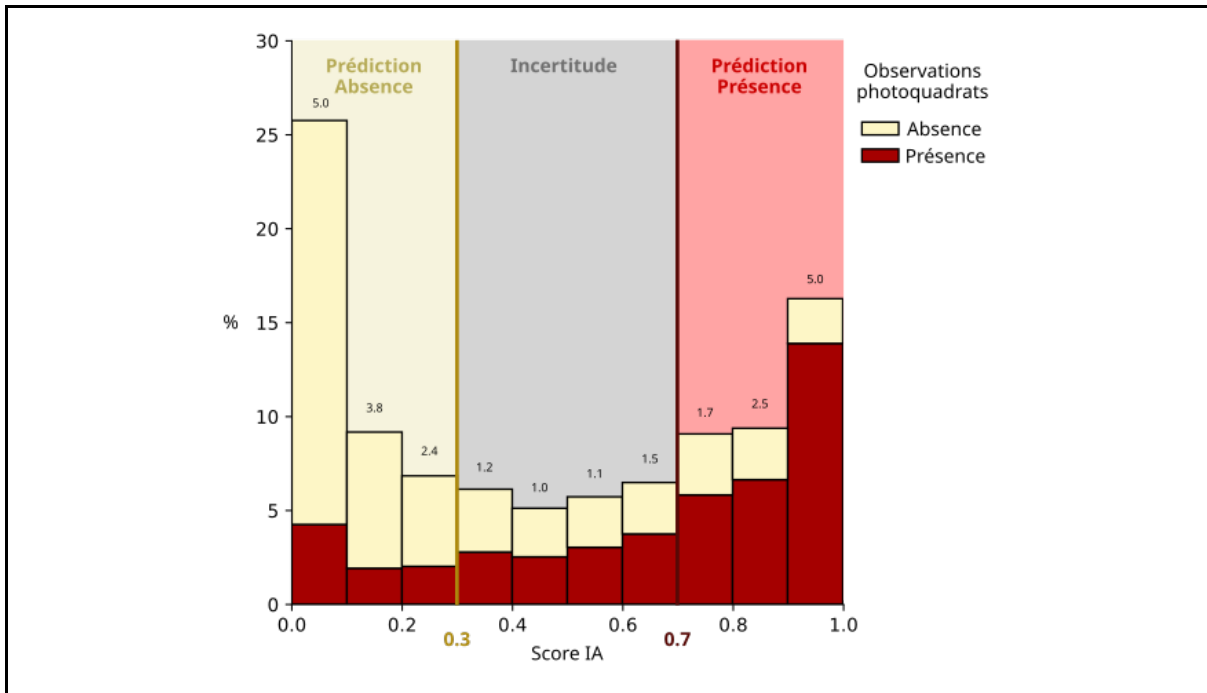


Fig. 2.5. Distribution des scores du modèle d’IA sur le jeu de données expert et détermination des seuils de prédiction à partir de la distribution des classes de fréquence des scores. En deçà du seuil de score IA de 0.3, qui prédit une absence de récif, la grande majorité des vérités terrain (photo-quadrats) révèlent effectivement une absence de récif. Inversement, au-delà d’un seuil de score IA de 0.7, les vérités terrain (photo-quadrats) révèlent que le modèle prédit correctement la présence de récifs. Entre ces deux valeurs seuils, fixées de façon assez conservatrice selon notre expertise, se trouve une zone d’incertitude où le modèle se trompe plus fréquemment. Au-dessus de chaque histogramme de score IA, le ratio $\frac{\text{Classe majoritaire}}{\text{Classe minoritaire}}$ est renseigné, il est indicateur du taux de confusion par classe de score IA.

2.3. Validation

La validation du modèle est quantifiée par une métrique : le F1-score. Le module “Validation” de l’application-logiciel SISTER (*cf.* Guide logiciel) permet de calculer cette métrique. Ce score correspond à la moyenne harmonique de la précision et du rappel qui indiquent le nombre de détections pertinentes sur respectivement l’ensemble des prédictions et sur l’ensemble des détections, de telle sorte que :

$$F1\ score = \frac{2}{\frac{1}{Précision} + \frac{1}{Rappel}}$$

$$Précision = \frac{VP}{VP + FP}$$

$$Rappel = \frac{VP}{VP + FN}$$

avec VP, FP et FN respectivement pour Vrai Positif (maille classée “présence” et contenant effectivement une structure récifale), Faux Positif (maille classée “présence”

mais ne contenant pas de structure récifale selon les vérités terrain) et Faux Négatifs (maille classée “absence” mais contenant une structure récifale selon les vérités terrain). Plus la taille de l'échantillonnage de « vérité terrain » utilisé dans le module « Validation » sera importante, plus le calcul du F1-score sera représentatif pour évaluer les prédictions du modèle.

Ce calcul du F1-score a également permis de montrer qu'il existe une différence significative de performances entre les sites d'étude (Fig. 2.6.) : le site d'Oléron (OLE) a les moins bonnes performances car c'est un site très colonisé par plusieurs communautés de macroalgues (temporaires et permanentes), contrairement aux deux autres sites. Entre les sites de Vallières (VAL) et de Grenettes (GRE), on constate de meilleurs résultats pour le premier site où la morphologie des structures récifales se détache nettement du substrat constitué d'un récif d'huîtres assez homogène. Les récifs d'hermelles sont également assez hauts sur ce site (VAL) et se détectent bien, notamment grâce au MNS, alors que les récifs sur le second site (GRE) sont majoritairement sous la forme de placages peu épais, donc présentant peu de relief par rapport à la roche environnante.

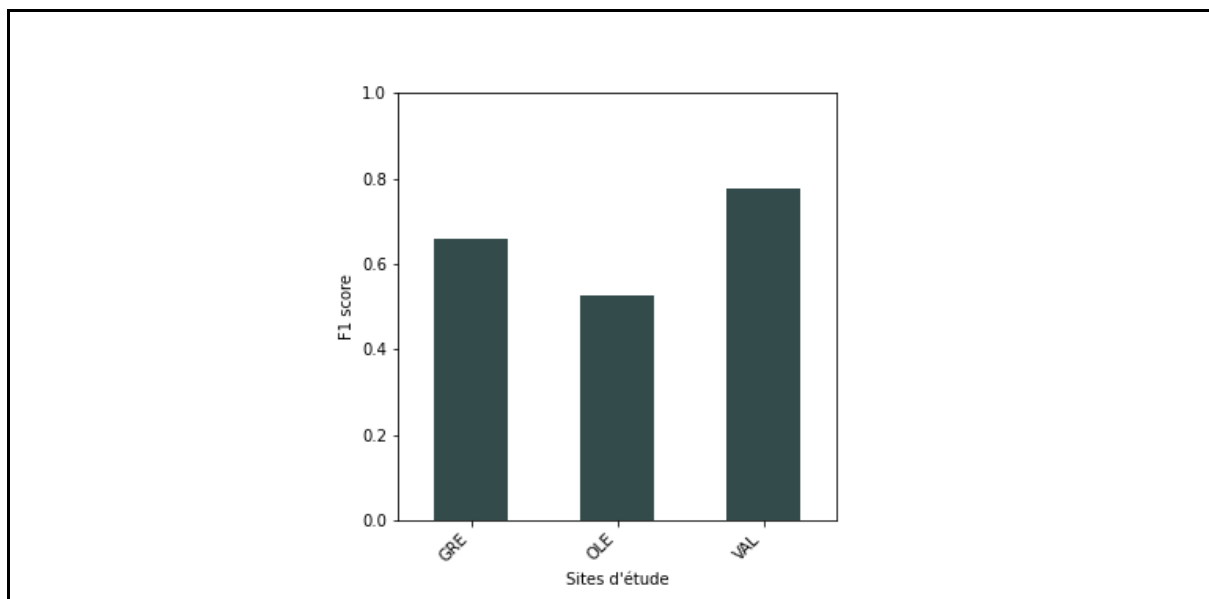


Fig. 2.6. Comparaison de la métrique d'évaluation de la qualité du modèle (F1-score) entre les sites d'étude de Grenettes (GRE), d'Oléron (OLE), et de Vallières (VAL) du Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis.

2.4. Géo-positionnement des photo-quadrats

Les vérités terrain que constituent les photo-quadrats jouent un rôle important dans la validation du modèle. Le module « Orthophoto » de l'application-logiciel SISTER (*cf.* Guide logiciel) permet – de façon très pratique – le géo-positionnement des photo-quadrats de validation. Il génère un fichier de position géographique à partir des

métadonnées des images des drones DJI¹¹ rendant possible la projection des orthophotos dans un SIG. Cet algorithme détermine la position de tous les pixels de l'image par simple géométrie à partir des paramètres suivants : position absolue du capteur, hauteur relative au sol, orientation de la caméra en lacet, taille du capteur, taille de l'image et distance focale de l'objectif. Il est basé sur l'hypothèse que les images ont été acquises au nadir et a une erreur de positionnement des photo-quadrats de l'ordre de 10 cm.

3. Guides logiciels « pas à pas »

3.1. Configuration matérielle

La configuration matérielle recommandée suit celle du logiciel Agisoft Metashape¹² car c'est la partie dans la chaîne de traitement qui requiert le plus de puissance de calcul.

Configuration minimale :

- *Système* - Windows 7 SP1 ou plus récent (64 bit), Windows Server 2008 R2 ou plus récent (64 bit), macOS High Sierra ou plus récent, Debian/Ubuntu with GLIBC 2.19+ (64 bit)
- *Processeur* - Intel Core 2 Duo processor ou équivalent
- *Mémoire vive* - 8 GB de RAM

Configuration recommandée :

- *Système* - Windows 7 SP1 ou plus récent (64 bit), Windows Server 2008 R2 ou plus récent (64 bit), macOS Mojave ou plus récent, Debian/Ubuntu with GLIBC 2.19+ (64 bit)
- *Processeur* - Intel Core i7 ou AMD Ryzen 7 processor
- *Carte graphique* - Discrete NVIDIA ou AMD GPU (4+ GB VRAM)
- *Mémoire vive* - 32 GB de RAM

Le nombre de photos pouvant être traitées par Metashape dépend de la mémoire vive disponible et des paramètres de reconstruction utilisés. Pour un projet d'environ 400 photos de 2MPix tel que recommandé pour le suivi photogrammétrique SISTER, entre 8 et 16Go de RAM suffisent pour réaliser un modèle.

3.2. Réalisation de la photogrammétrie par SfM *via* Metashape

Il existe de nombreuses solutions de photogrammétrie par SfM. Plusieurs de ces solutions ont été testées lors de ce projet et nous préconisons l'utilisation de Agisoft Metashape. Ce logiciel est facile d'utilisation et fournit tous les outils nécessaires pour

¹¹ Mavic 3M Image Processing Guide :

https://dl.djiicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Enterprise/20230829/Mavic_3M_Image_Processing_Guide_EN.pdf

¹² <https://www.agisoft.com/downloads/system-requirements/>

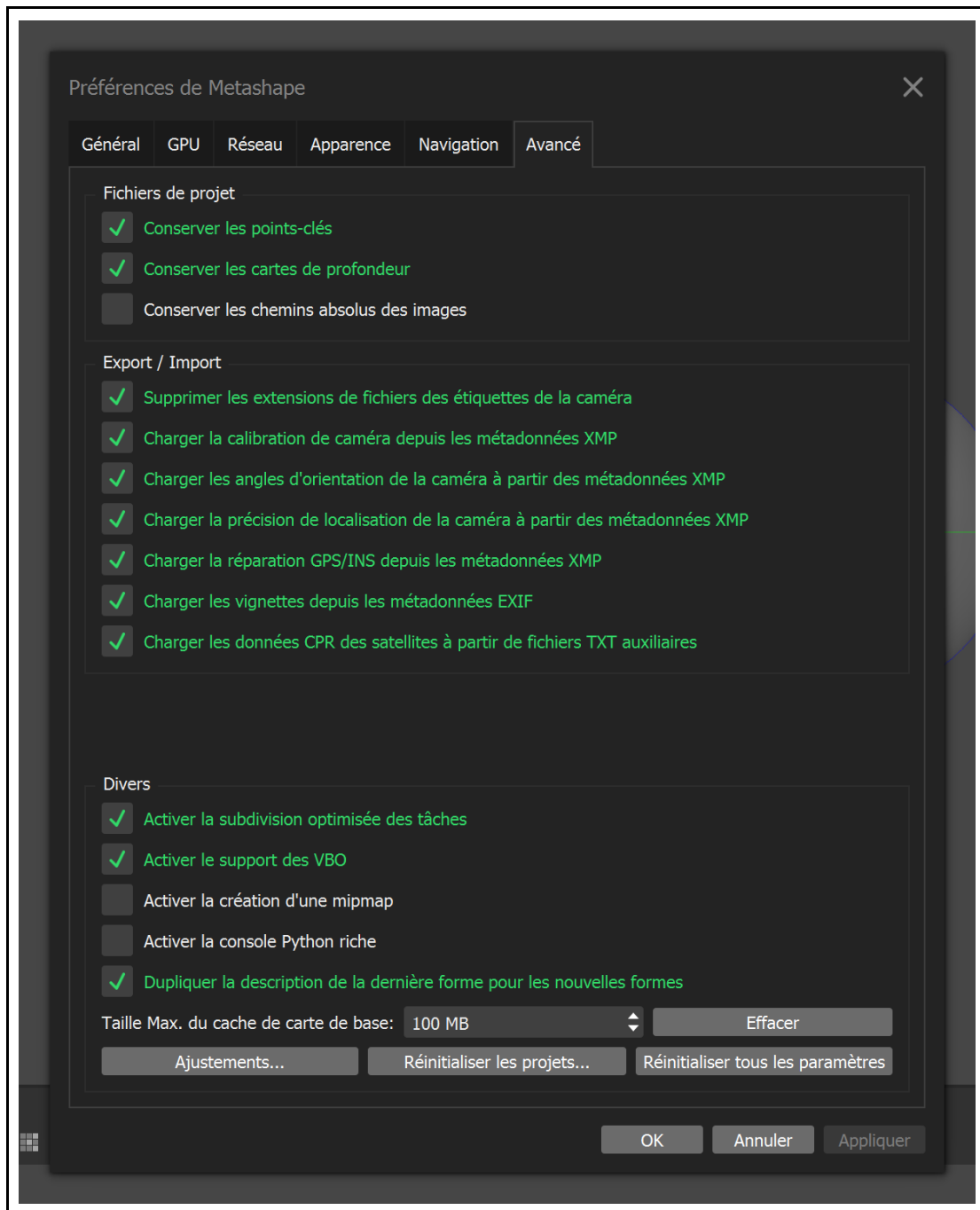
le traitement de qualité des photos drone. Il a comme seul inconvénient d'être payant (développeur Agisoft LLC). Il est disponible en licence locale ou flottante, et peut être installé sur un serveur pour de gros besoins de calculs. Quel que soit le logiciel choisi *in fine*, il est recommandé d'utiliser un seul logiciel comme standard pour effectuer le suivi des zones d'étude et des récifs dans le temps car les algorithmes de traitement entre les logiciels ne sont pas les mêmes et ne génèrent donc pas les mêmes types d'artefacts (Pell, Li, et Joyce 2022).

Afin de respecter un certain format des données en sortie du logiciel Agisoft Metashape, nous fournissons une chaîne de traitement à respecter, basée sur les tutoriels de traitement des données multispectrales de Agisoft¹³. Pour toutes autres questions concernant l'utilisation de ce logiciel, il est conseillé de se référer au manuel d'utilisation : Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.0 (Agisoft LLC 2023).

Metashape étape 1 - Incorporation des photos réalisées par le drone

Avant d'ajouter des photos au projet, il est conseillé d'activer les options suivantes dans l'onglet *Advanced* de la boîte de dialogue *Preferences* (sélectionnez *Tools > Preferences...*) : *Load camera orientation angles from XMP metadata* et *Load camera location accuracy from XMP metadata*. Notez par la suite que les informations relatives aux boîtes de dialogues sont indiquées en anglais mais qu'un paramétrage de la langue en français est possible (comme le montre les captures d'écran).

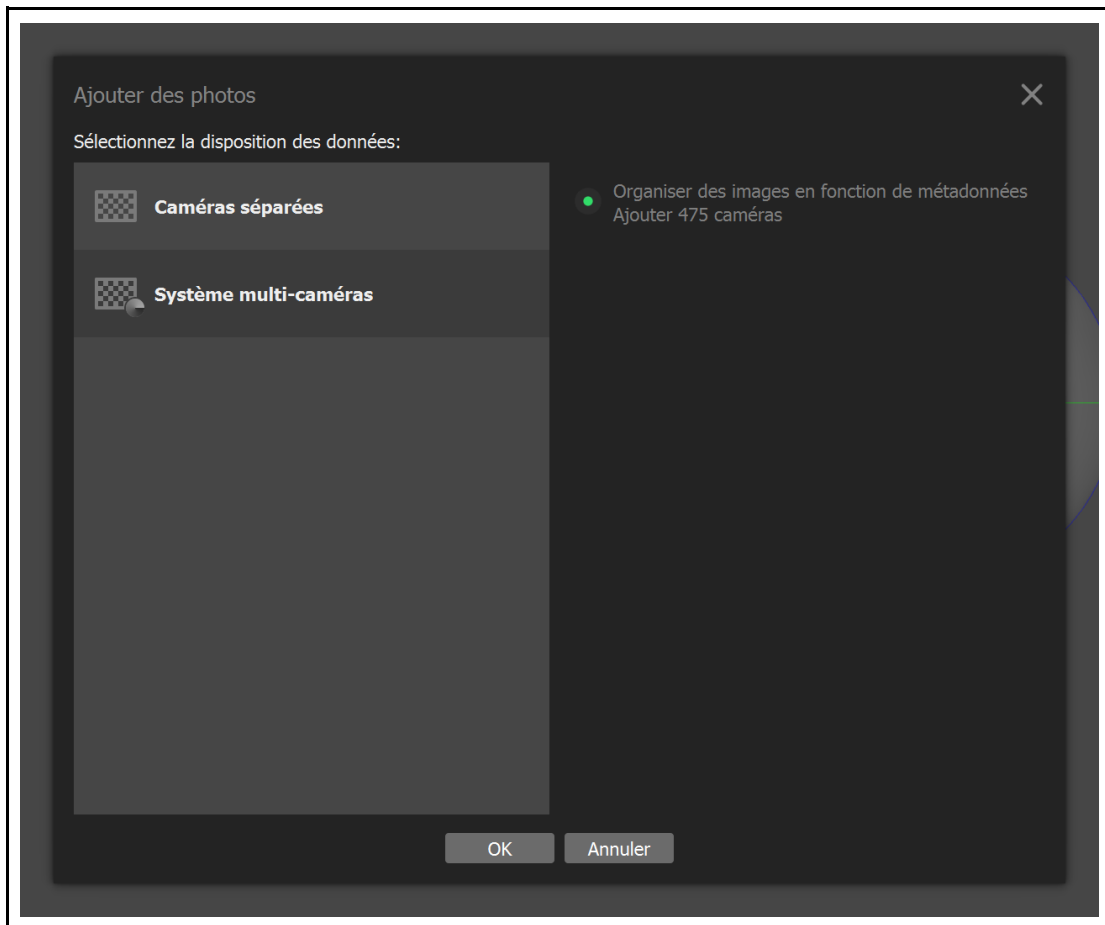
¹³ <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/folders/31000120114>



Pour ajouter des photos, sélectionnez la commande *Add Folder...* dans le menu *Workflow*. Dans la boîte de dialogue *Add Photos*, parcourez le dossier source et sélectionnez les fichiers à traiter. Sélectionnez *Multi-camera system* dans la boîte de dialogue *Add Photos* - ainsi Metashape arrangera automatiquement les bandes en fonction des informations contenues dans les métadonnées des photos. Si les photos sont stockées dans plusieurs dossiers, la même opération doit être répétée pour chaque dossier.

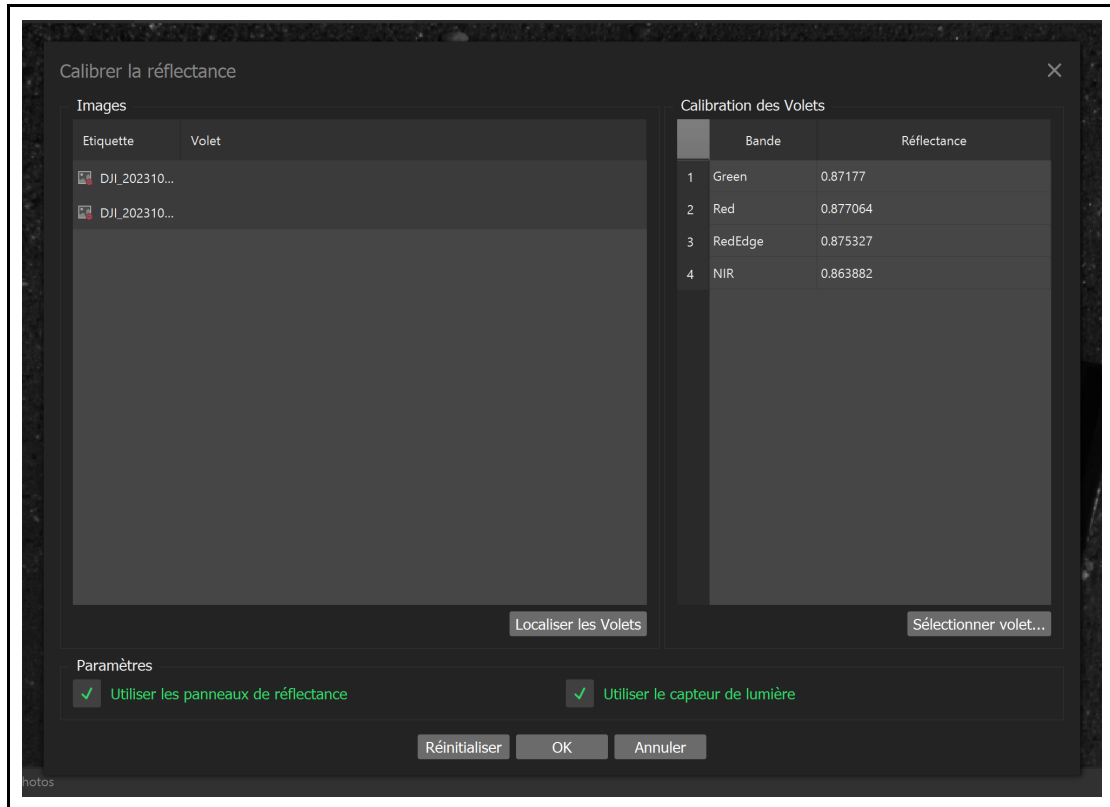
Les informations de coordonnées seront automatiquement chargées avec les métadonnées de la photo dans le volet *Reference*.

Ajoutez au projet uniquement des photos au format TIFF (toutes sélectionnées en même temps). N'ajoutez pas les fichiers JPG de l'appareil photo RVB qui peuvent également être présents dans le dossier. Ne pas oublier d'ajouter les photos de calibration de la réflectance



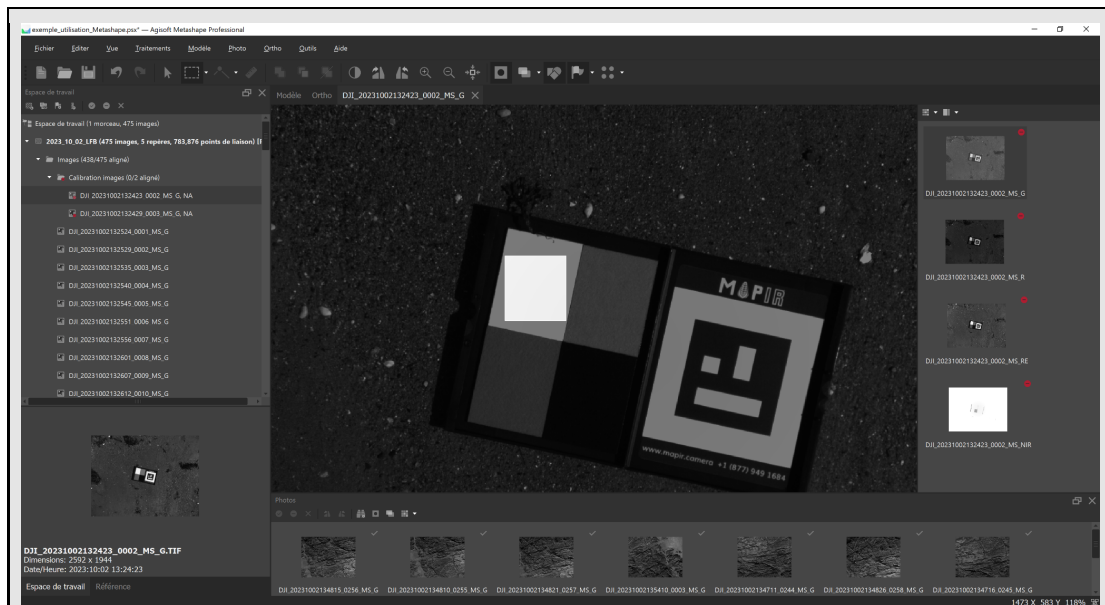
Metashape étape 2 - Réaliser la calibration en réflectance

Ouvrez le menu *Tools* et choisissez l'option *Calibrate Reflectance*. Appuyez sur le bouton *Locate panels* :

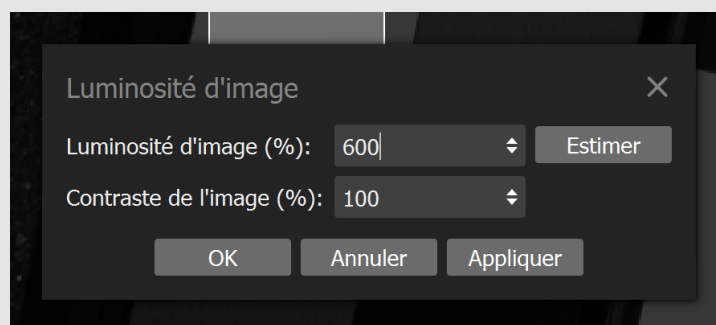


Par conséquent, les photos contenant les cibles de référence seront déplacées dans un dossier distinct et les masques seront appliqués de manière à masquer tout ce qui se trouve sur les photos, à l'exception de la cible elle-même. Si les cibles ne sont pas localisées automatiquement, utilisez une approche manuelle (cf. Encadré 3.).

Que faire si les cibles ne sont pas détectées automatiquement et que le dossier *Calibration images* n'est pas créé ? Il faut créer manuellement le groupe de caméras dans l'espace de travail et le nommer « *Calibration images* », puis y placer les caméras de calibration et les désactiver. Pour créer un nouveau dossier dans le volet *Workspace*, sélectionnez les photos qui contiennent la cible de calibration, cliquez avec le bouton droit de la souris sur la sélection et choisissez l'option *Move cameras → New camera group*, puis cliquez avec le bouton droit de la souris sur le dossier nouvellement créé et nommez-le « *Calibration images* ». Dans le cas d'une approche manuelle, il s'agit d'appliquer manuellement des masques aux photos de calibration. Pour chaque photo de calibration (chaque caméra dans le dossier *Calibration images* du *chunk* actif), on crée un masque de tout ce qui n'est pas lié à la cible de calibration (clique-droit → *Inverser le masque*).



Ainsi, seule la partie de la cible est démasquée et tout le reste est masqué. Il est nécessaire d'appliquer des masques pour chaque photo de calibration et pour chaque bande. Pour passer d'une bande à l'autre, utilisez *Set Primary Channel* dans le menu contextuel après avoir cliqué avec le bouton droit de la souris sur le nom du *chunk* dans le volet *Workspace*. Si la photo est trop sombre ou trop claire, il est possible de régler la luminosité avec l'outil *Set Brightness* dans le menu *Tools*.



Encadré 3. Comment masquer manuellement des photos de calibration.

Si vous utilisez la cible pour la première fois et que sa calibration n'est pas encore ajoutée à la base de données interne de Metashape, vous serez invité à charger un étalonnage à partir d'un fichier CSV (cf. Encadré 4.). Ce fichier pour la cible MAPIR (cible de calibration de la réflectance diffuse utilisée lors de chaque vol comme recommandée dans le guide terrain de relevés par drone) est disponible en téléchargement sur le site www.hermelles.fr (onglet Medias puis Suivi-scientifique cliquez sur « télécharger » sous le texte « SISTER – Fichier MAPIR de calibration de la reflectance » et obtenez ainsi le fichier `MAPIR_white_panel_reflectance.csv`)

Cochez les options *Use reflectance panels* et *Use sun sensor* dans la boîte de dialogue *Calibrate Reflectance* pour effectuer une calibration basée sur les données des cibles et les métadonnées de la photo. Cliquez sur *OK* pour lancer le processus de calibration.

Comment charger un étalonnage sous Agisoft Metashape ? Metashape stocke les informations sur les cibles de réflectance utilisées. Ainsi, lorsque des photos de calibration de la même cible sont détectées, Metashape suggère automatiquement les valeurs de réflectance à partir d'une base de données interne. La base de données des cibles de réflectance peut être éditée *via* la boîte de dialogue *Select Reflectance Panel* accessible en cliquant sur le bouton *Select panel* dans la boîte de dialogue *Calibrate Reflectance*.

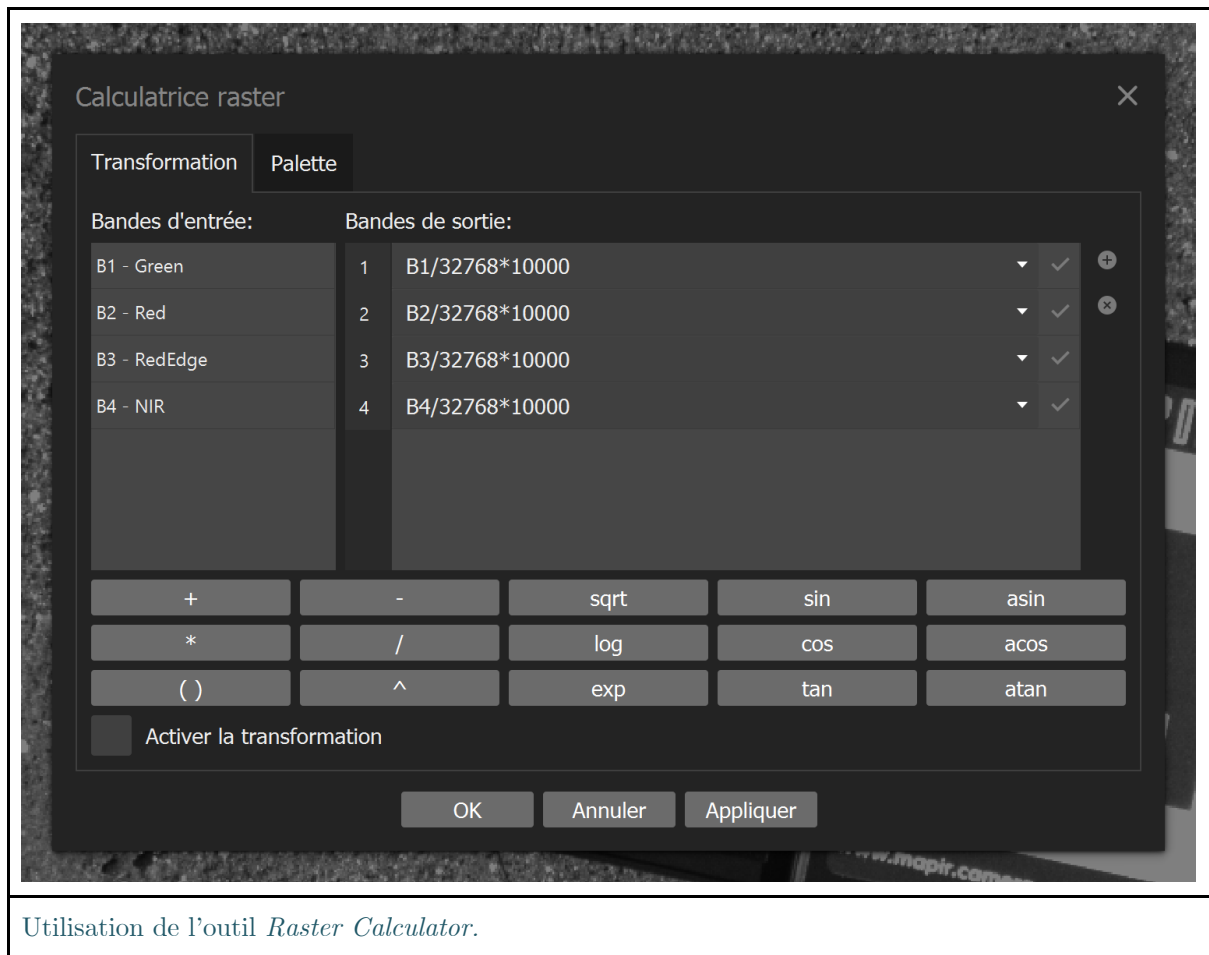
Dans la boîte de dialogue *Select Reflectance Panel*, il est ainsi possible de :

- charger les informations de réflectance à partir d'un fichier CSV ;
- de sauvegarder le tableau actuel (longueur d'onde / facteur de réflectance) ;
- de modifier le nom d'un panneau dans la base de données (le nom est utilisé dans la boîte de dialogue *Calibrate Reflectance*) ;
- de supprimer les informations relatives au panneau de la base de données.

Le fichier CSV dont vous aurez besoin pour charger les informations de votre cible de réflectance est disponible sur le site www.hermelles.fr/Medias/Suivi-scientifique

Encadré 4. Accéder et modifier la base de données des cibles de réflectance.

La gamme des valeurs de réflectance est automatiquement rapportée entre 0 et 32768. Pour un souci de compatibilité avec le logiciel *SISTER*, une transformation doit être effectuée pour obtenir une gamme entre 0 et 10000. Cette transformation est faite via l'outil *Raster Calculator* dans le menu *Tools*, pour chaque bande B la formule suivante doit être renseignée : $B/32768*10000$.

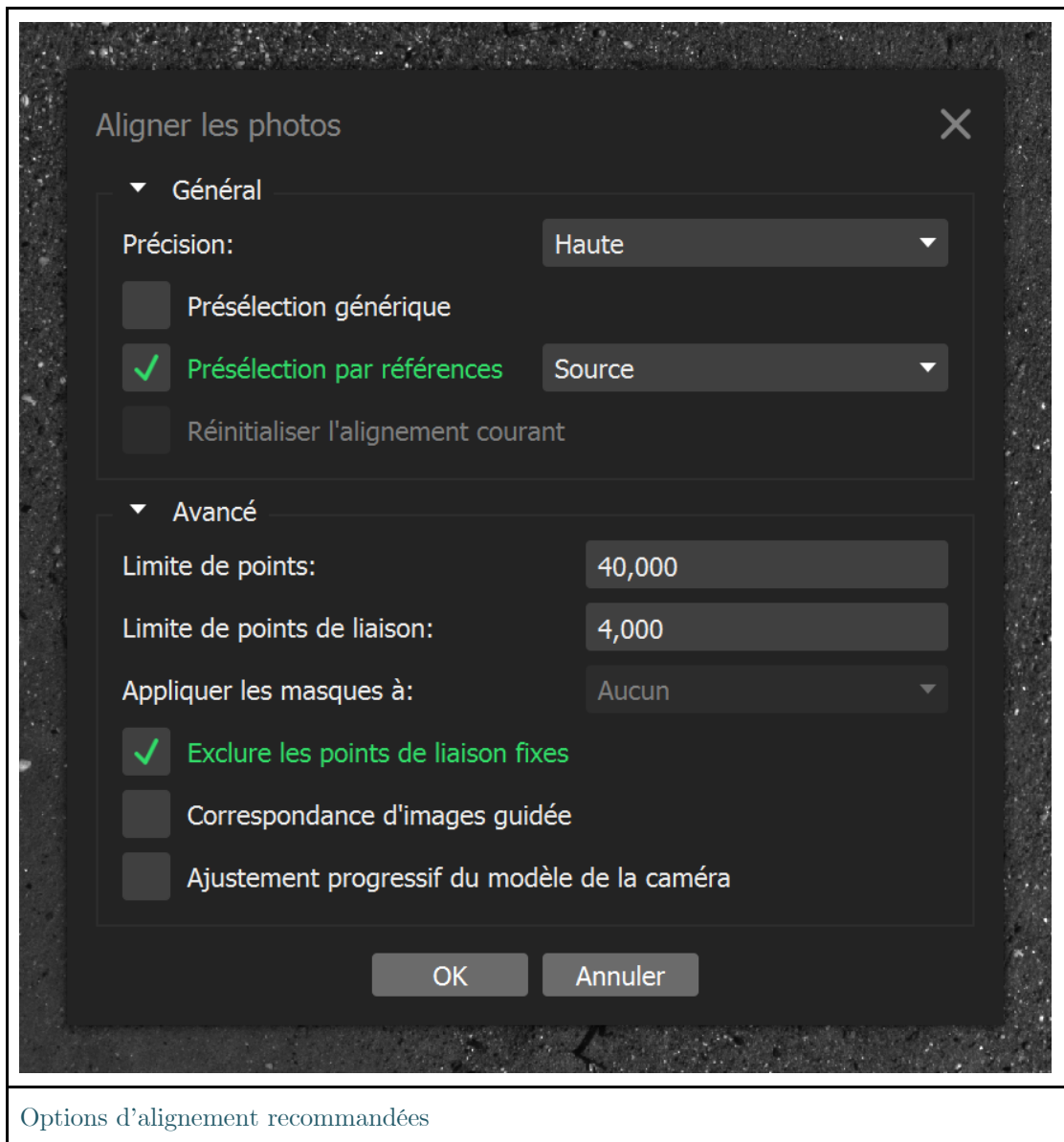


Utilisation de l'outil *Raster Calculator*.

Metashape étape 3 - Alignement des photos réalisées par le drone

Une fois les photos chargées dans Metashape, elles doivent être alignées. À ce stade, Metashape estime la position et l'orientation de l'appareil photo pour chaque photo et génère un nuage de points d'ancrage :

- Sélectionnez la commande *Align Photos...* dans le menu *Workflow*.
- Dans la boîte de dialogue *Align Photos*, sélectionnez les options d'alignement souhaitées.
- Cliquez sur le bouton OK.
- L'alignement étant terminé, les positions calculées de la caméra et un nuage de points de rattachement s'affichent.



Options d'alignement recommandées

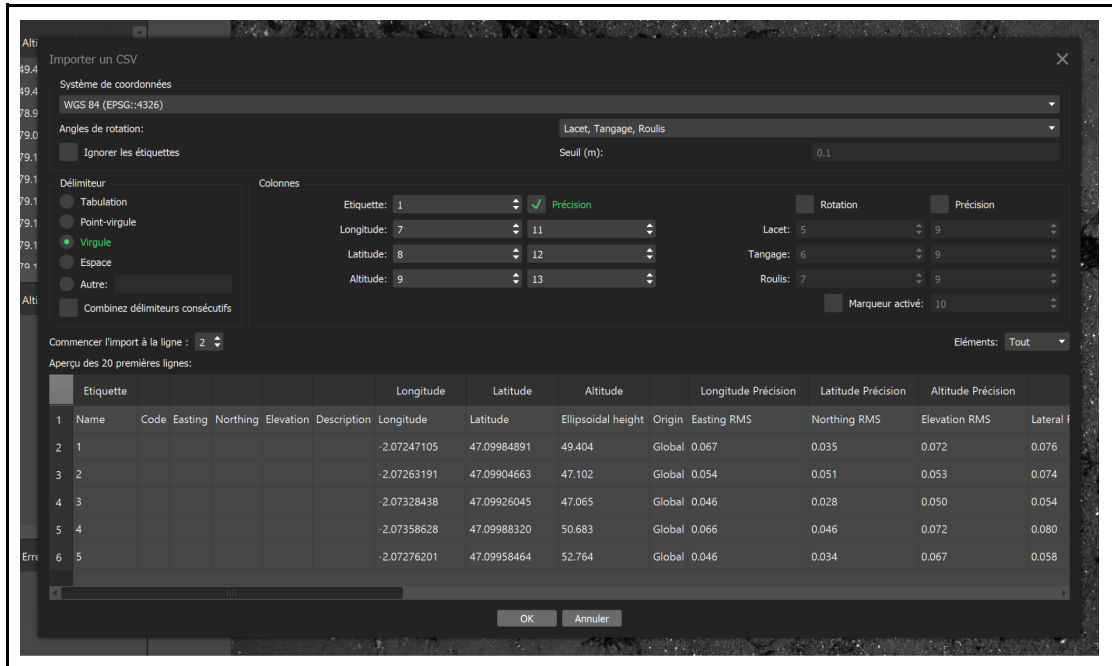
Vous pouvez inspecter les résultats de l'alignement et supprimer les photos mal positionnées, le cas échéant. Pour voir les correspondances entre deux photos, utilisez la commande *View Matches...* du menu contextuel (clique-droit) d'une photo dans le volet *Photos*.

Metashape étape 4 - Importer les Points de Contrôle au Sol (PCS)

Les PCS (ou *markers*) sont utilisés pour optimiser l'alignement des photos. Ils peuvent être spécifiés soit manuellement dans le volet *Reference*, soit en important un fichier texte délimité (en utilisant le format des valeurs délimitées par des caractères) :

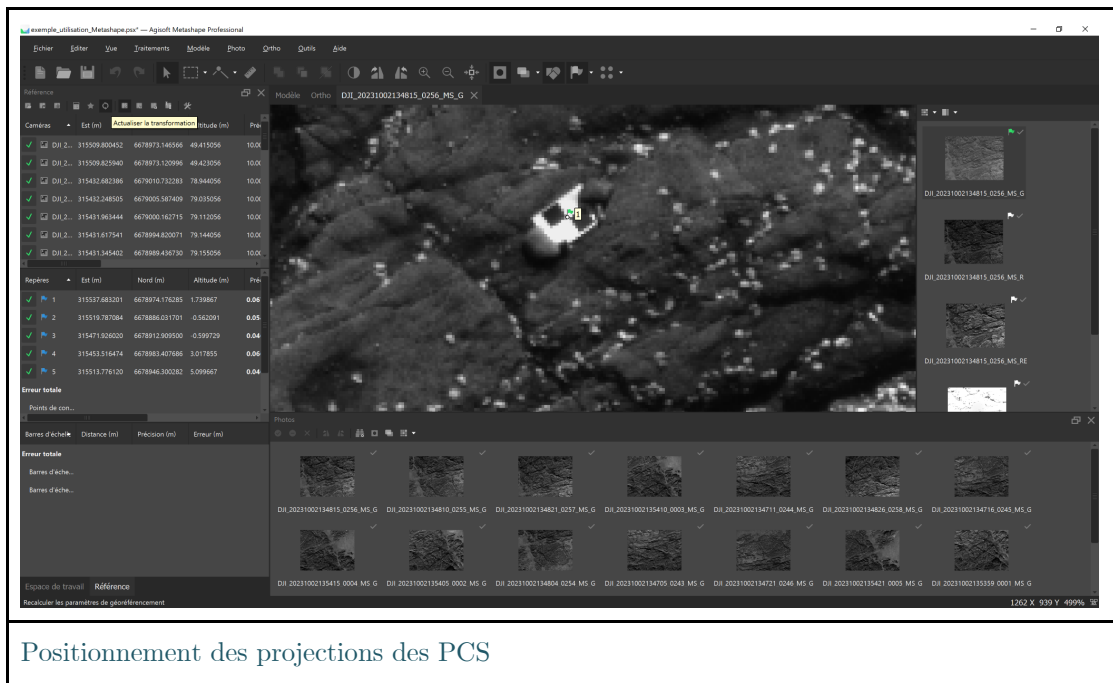
- Cliquez sur le bouton *Import* de la barre d'outils du volet *Reference*. Naviguez jusqu'au fichier contenant les PCS et les coordonnées, puis cliquez sur le bouton *Open*.

- Dans la boîte de dialogue *Import CSV*, définissez le système de coordonnées géographiques.
- Sélectionnez le délimiteur et indiquez le numéro de la colonne de données pour chaque coordonnée.
- Cliquez sur le bouton *OK*.



La projection des PCS sur les photos doit être définie manuellement :

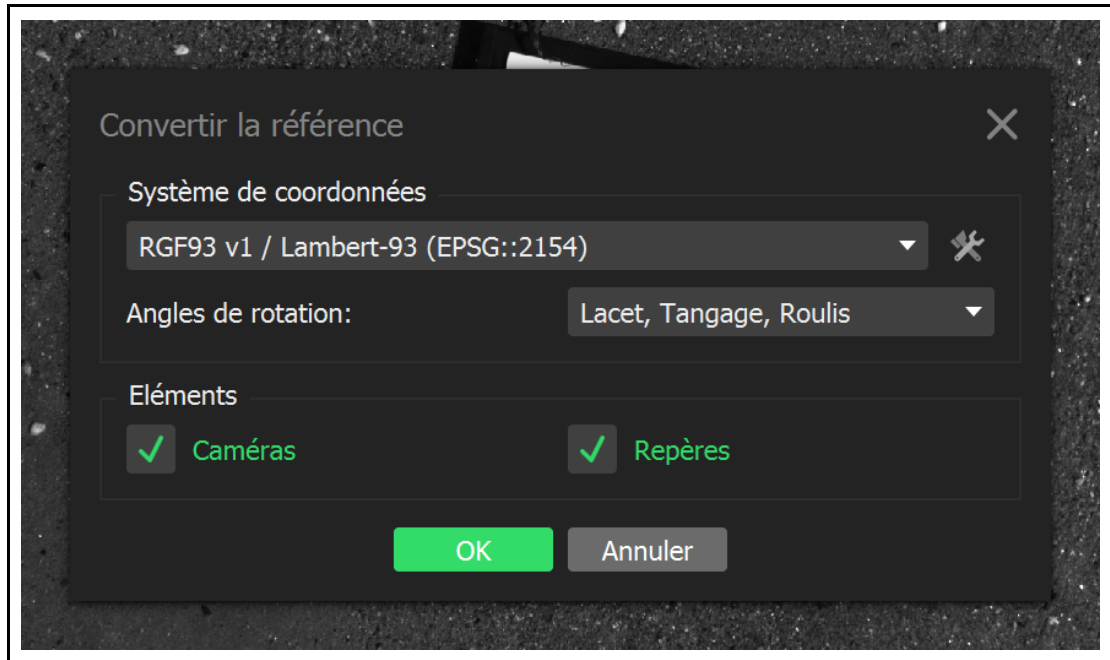
- Filtrez les photos par PCS avec la commande *Filter Photos by Markers* du menu contextuel (clique-droit) de la vue 3D.
- Passez en mode d'édition des PCS en utilisant le bouton *Edit Markers* de la barre d'outils.
- Déplacez la projection du PCS à l'endroit souhaité en la faisant glisser à l'aide du bouton gauche de la souris.
- Assurez-vous que le PCS sélectionné soit projeté sur l'ensemble des photos où la cible est correctement visible.
- Les erreurs des PCS peuvent être inspectées dans l'onglet *Errors Values*.



Metashape étape 5 - Transformer le système de coordonnées

Metashape permet de convertir les coordonnées des PCS (*markers*) et/ou de la caméra vers un nouveau système de coordonnées. Ces données ont été acquises en WGS84 (EPSG:4326) et elles sont converties dans la projection nationale française en Lambert 93 (EPSG:2154). Dans le panneau *Reference*, cliquez sur le bouton *Convertir* et définissez le système de coordonnées à RGF93 / Lambert-93 (EPSG:2154). Cochez les cases *Cameras* et *Markers*.

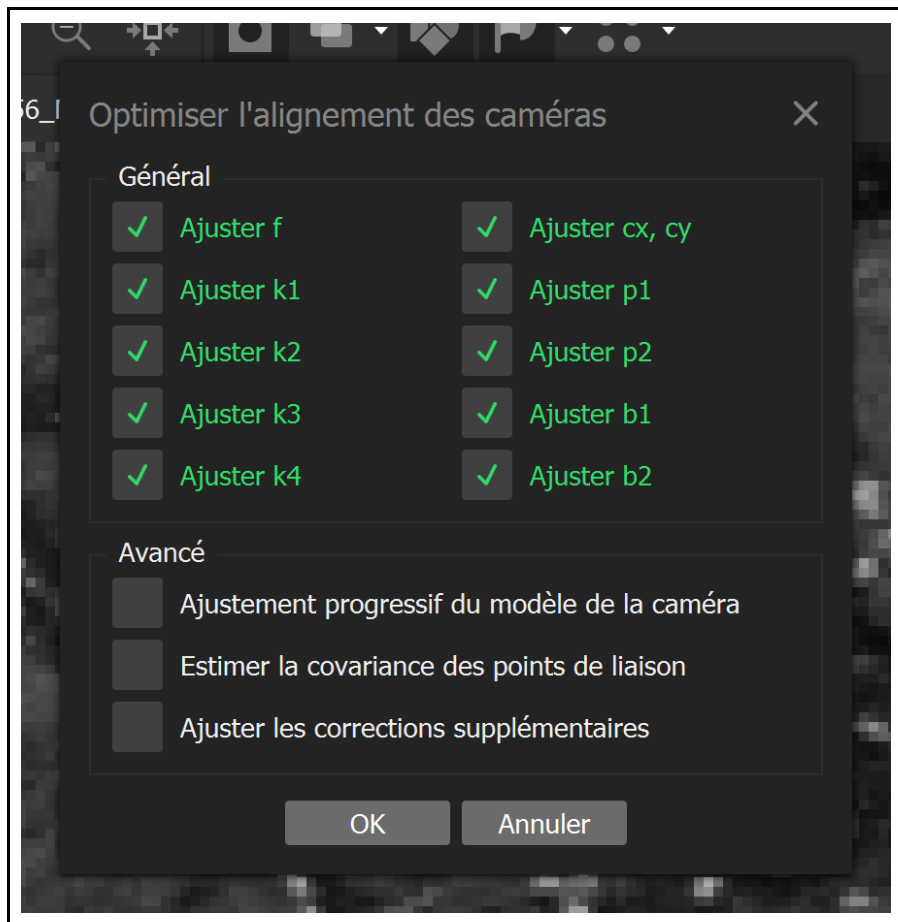




Pour vérifier que le système de coordonnées a bien été transformé, cliquez sur le bouton *Settings* du volet *Reference*. Dans *Reference Settings*, assurez-vous que les systèmes de coordonnées associées à la caméra et aux PCS sont corrects.

Metashape étape 6 - Optimiser l'alignement des caméras

Metashape estime les paramètres d'orientation internes et externes pendant l'alignement des photos. Les éventuelles déformations non linéaires du modèle peuvent être éliminées en optimisant le nuage de points estimé et les paramètres de la caméra sur la base des coordonnées connues des PCS. Au cours de cette optimisation, Metashape ajuste les coordonnées estimées des points et les paramètres de la caméra en minimisant la somme de l'erreur de reprojection et de l'erreur de désalignement des coordonnées des PCS.



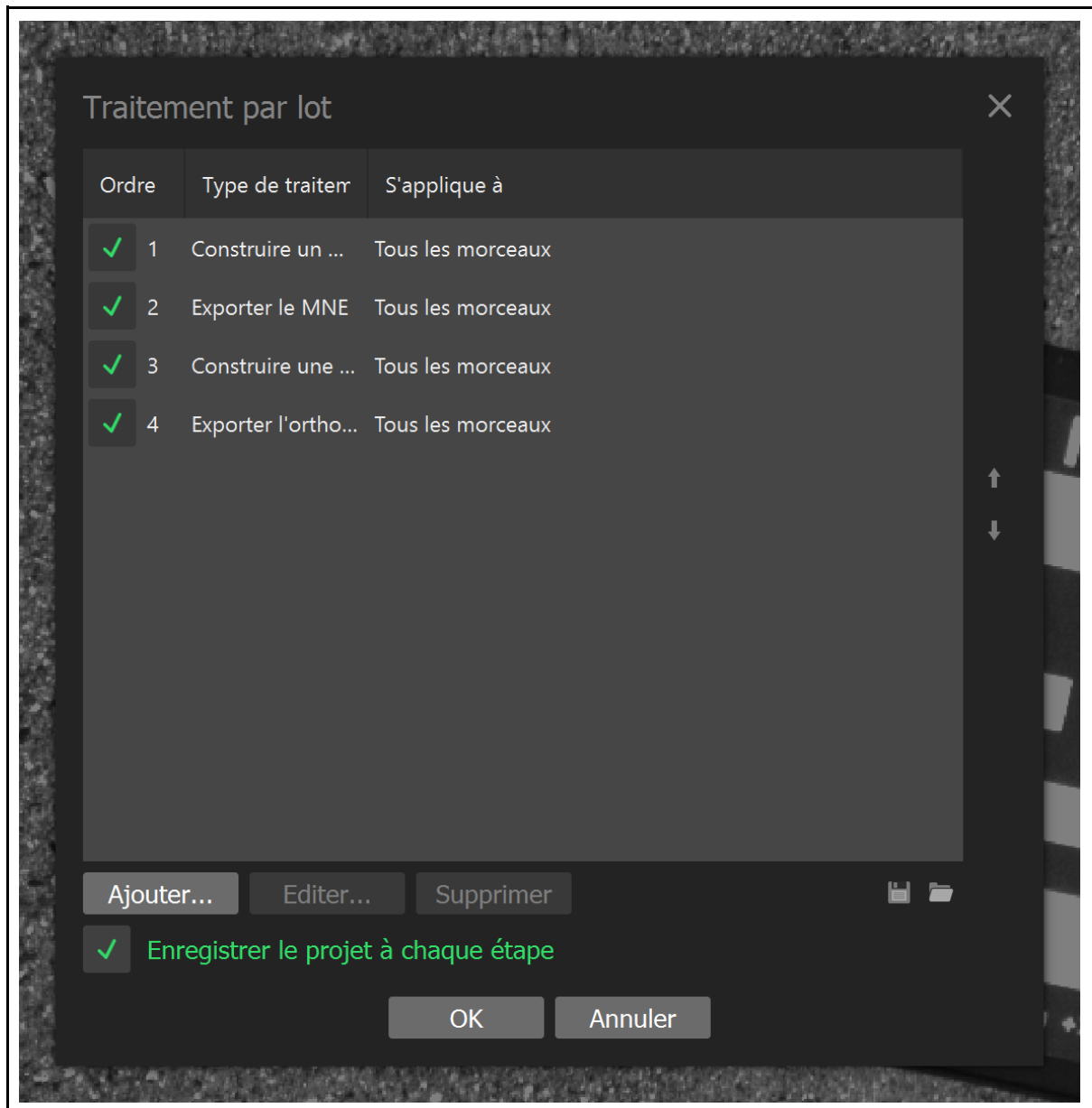
Metashape étape 7 - Construire et exporter le MNS et l'orthomosaïque

Cette dernière étape génère les données de MNS et d'orthomosaïque à partir des photos et du modèle d'alignement des caméras établi précédemment. A travers un traitement par lot, 4 sous-étapes se succèdent :

- *Sous-étape 1 - Construire un MNE.* Metashape permet de générer et de visualiser un MNS, dénommé modèle numérique d'élévation (MNE) dans le logiciel. Un MNS représente un modèle de surface sous la forme d'une grille régulière de valeurs d'altitude. Le MNS est rastérisé à partir des cartes de profondeur ;
- *Sous-étape 2 - Exporter le MNE.* Exportation du fichier au format TIFF vers le chemin suivant : {nom_du_projet}/{label_du_chunk}_MNE.tif ;
- *Sous-étape 3 - Construire une orthomosaïque.* Metashape permet de générer et de visualiser l'orthomosaïque à partir du MNS et des photos calibrées radiométriquement ;
- *Sous-étape 4 - Exporter l'orthomosaïque.* Exportation du fichier au format TIFF vers le chemin suivant : {nom_du_projet}/{label_du_chunk}_ortho.tif

Pour lancer le traitement par lot :

- Sélectionnez la commande *Traitement par lot...* dans le menu *Traitement* ;
- Cliquez sur le bouton *Charger* en bas à droite ;
- Sélectionnez le fichier *traitement_par_lot.xml* ;
- Cochez *Enregistrer le projet à chaque étape* ;
- Cliquez sur le bouton *OK*.

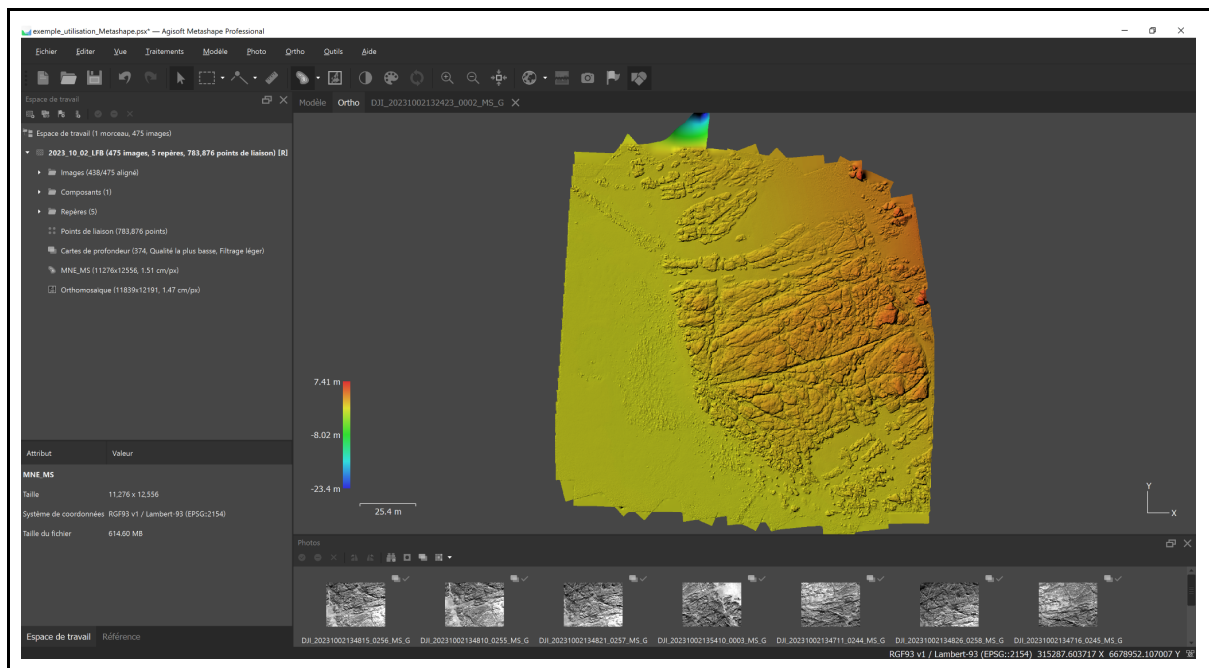


Les produits finaux d'orthomosaique et de MNS sont générés et enregistrés. Il reste à vérifier que ces données sont enregistrées dans un format correct car l'application-logicielle SISTER ne détectera pas les erreurs liées au format des données. Le format à respecter est le suivant :

- Source de données Geospatial Data Abstraction Library (GDAL), tel que TIFF ;
- Valeurs de réflectance entre 0 et 10000 ;

- No-data de l'orthomosaïque : -32767 ;
- No-data du MNS : -32767 ;
- EPSG:2154 ;
- Ordre des bandes de l'orthomosaïque : Vert, Rouge, Red-Edge, Infrarouge.

Il est important également de s'assurer de la cohérence des données en termes de géométrie (positionnement en x, y et z) et de radiométrie, c'est-à-dire retrouver des morphologies et des signatures spectrales cohérentes entre les différents éléments (algues, eau, roche, etc.) qui composent la scène. Les données peuvent être visualisées directement dans Metashape ou via un Système d'Information Géographique (e.g. ArcGIS ou QGIS).



3.3. Production de cartes et calculs de métriques via l'application-logiciel open-source SISTER

Installation

Le logiciel SISTER est développé sous python 3.10.12. Il est compatible avec Windows 10 (64 bits) ou versions plus récentes. Les utilisateurs d'autres OS (Mac notamment) doivent utiliser un émulateur Windows ou une autre application permettant d'avoir une partition du disque dur qui fonctionne sous le système Windows. L'application-logiciel peut être téléchargée et utilisée gratuitement. Elle ne nécessite pas l'installation de Python et fonctionne en mode 'presse-boutons'. Un fichier d'installation compressé

est disponible gratuitement sur le site www.hermelles.fr (onglet « Medias » puis « Suivi-scientifique »).

Il suffit de décompresser le fichier *appsister.zip* puis de double-cliquer sur l'exécuteur *appsister.bat*. A ce fichier est associé un dossier *./dist* qui doit toujours se situer dans le dossier parent.

Le code source est disponible ici : <https://gitlab.com/sister-how>. Ce lien donne accès à l'ensemble des codes utilisés dans le projet (et pas seulement ceux de l'application-logiciel). Attention, ce lien informe simplement sur les codes mais ne conduit pas vers l'application.

Fonctionnalités

Il existe un temps de latence au lancement du logiciel. Il faut donc attendre quelques secondes avant de voir les boîtes de dialogue apparaître. Ce logiciel peut également être ouvert et lancé plusieurs fois simultanément si l'utilisateur souhaite faire des traitements en parallèle.

Description de l'interface

L'interface du logiciel SISTER (Fig. 2.7.) est composée de 3 éléments superposés :

Élément 1 - Un panneau principal donne accès aux 5 modules (sous forme d'onglets) : *KML conversion*, *Mapping*, *Orthophoto*, *Validation* et *Monitoring*. Chaque module possède un bouton *Run* qui lance le traitement en question et un bouton *Cancel* qui annule le traitement en cours. Il faut noter que l'annulation d'un traitement par la fonction *Cancel* nécessite un certain temps de traitement selon le moment du calcul en cours. Le voyant en bas à gauche (dans le cadre Logs) se grise lorsque le lancement d'un nouveau traitement est possible.

Élément 2 - Le cadre *Logs* renseigne sur l'avancement du traitement en cours avec une barre de progression, un champ de texte qui affiche les logs, et un voyant qui indique si un traitement est en cours (vert) ou non (gris). Si un traitement est annulé, le voyant passe au rouge le temps que la boucle de calcul se termine, avant de passer au gris pour indiquer qu'un nouveau calcul peut être lancé.

Élément 3 - Un onglet *Debug* permet d'afficher une console pour interpréter des messages d'erreurs en cas de bug (pour utilisateurs avertis uniquement).

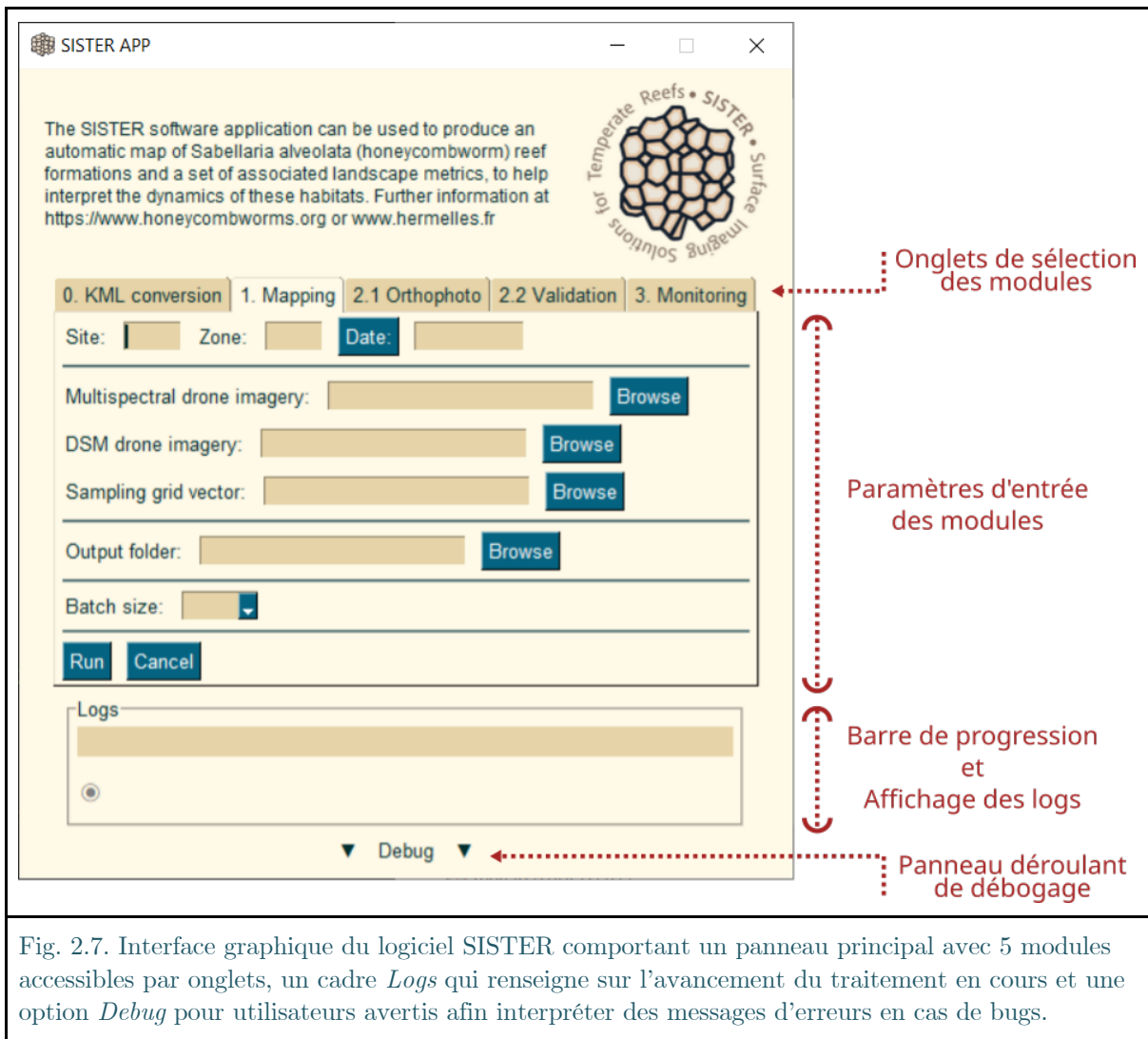


Fig. 2.7. Interface graphique du logiciel SISTER comportant un panneau principal avec 5 modules accessibles par onglets, un cadre *Logs* qui renseigne sur l'avancement du traitement en cours et une option *Debug* pour utilisateurs avertis afin interpréter des messages d'erreurs en cas de bugs.

Description des onglets du panneau principal

Onglet 0 du panneau principal - Module *KML conversion*

Ce module aide à la préparation du plan de vol pour l'acquisition des images par drone sur le terrain. Il permet de convertir n'importe quelle source de données vecteur OGR vers un fichier .KML compatible avec l'application *DJI pilot 2* de la radiocommande. Il prend en entrée :

- *Polygon vector file* : Chemin vers le fichier vecteur contenant le polygone de la surface à cartographier ;
- *Output folder* : Chemin vers le dossier de sortie.

Un fichier .KML contenant les géométries du polygone mis en entrée sera généré vers le dossier de sortie, les coordonnées géographiques sont automatiquement converties vers le système WGS 84 (EPSG:4326).

Onglet 1 du panneau principal - Module *Mapping*

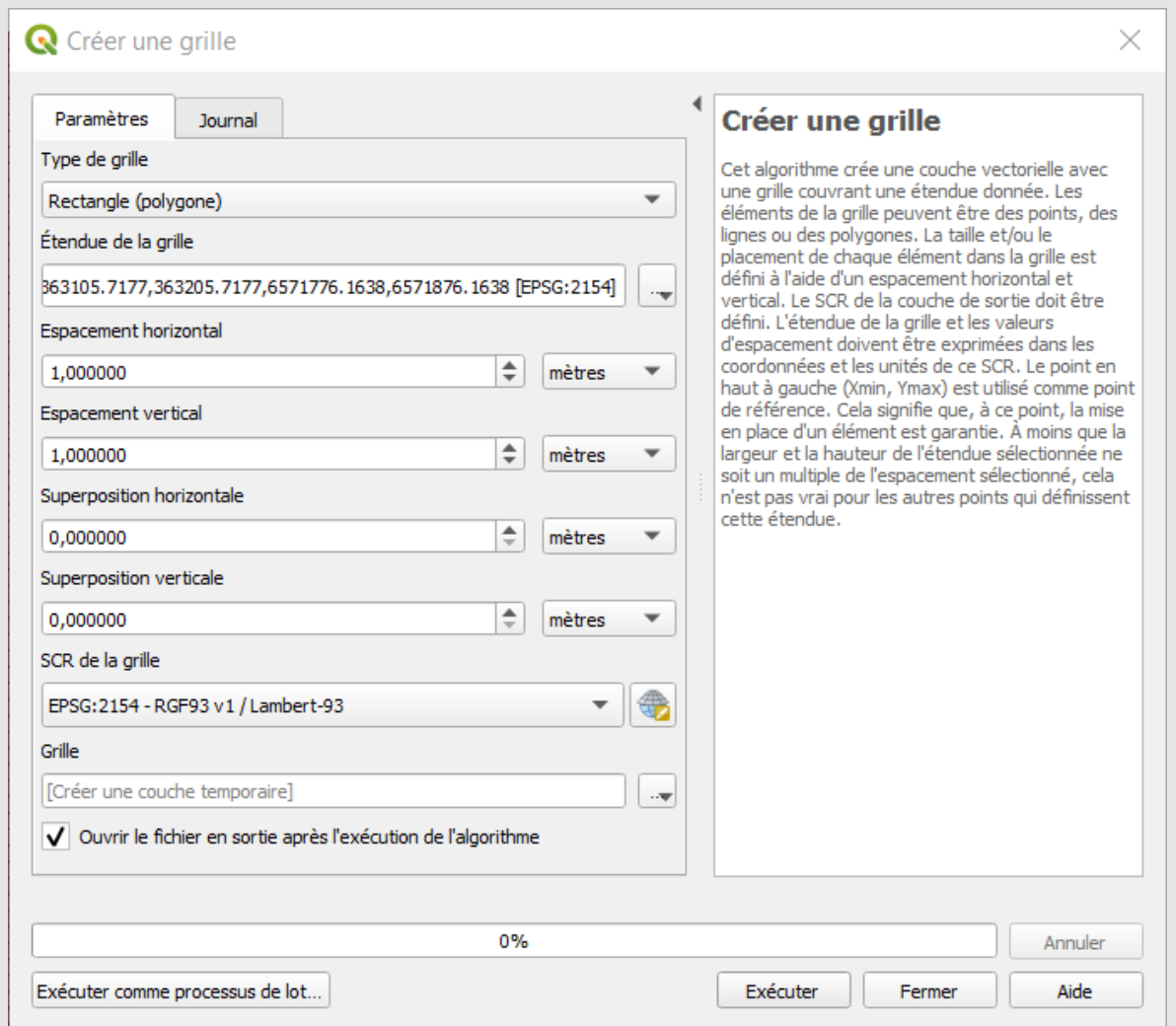
Il s'agit du premier module à utiliser lorsque les données ont été générées *via* Metashape (voir première partie de ce guide logiciel). Ce module intègre les parties [Détection automatique des récifs à *Sabellaria alveolata*](#) et [Métriques paysagères et morphologiques](#) de la chaîne de traitement des images drone. Les entrées sont les suivantes :

- *Site* : ID désignant le site d'étude (e.g. 'OLE' pour l'île d'Oléron) ;
- *Zone* : ID désignant une zone d'intérêt ZI survolée (e.g. 'ZI01' pour zone d'intérêt 01) ;
- *Date* : Date d'acquisition des images drone afin de générer un ID unique (e.g. '2024-02-10' ou 'Winter_2024' pour indiquer un relevé réalisé en hiver 2024) ;
- *Multispectral drone imagery* : Chemin vers l'orthomosaique multispectrale générée par Metashape ;
- *DSM drone imagery* : Chemin vers le MNS généré par Metashape ;
- *Sampling grid vector* : Chemin vers le fichier vecteur de la grille ; d'échantillonnage avec une maille d'1m² sur l'ensemble de la ZI. Il faut ici utiliser une grille d'un site déjà suivi ou se reporter à l'Encadré 5. QGIS (ci-dessous) pour créer une nouvelle grille ;
- *Output folder* : Chemin vers le dossier de sortie ;
- *Batch size* : Permet de paramétrer le nombre d'échantillons à traiter simultanément. Ce paramètre est à tester en fonction des capacités de calculs de votre machine.

En sortie, un fichier vecteur (.geojson) est généré. Ce fichier garde la géométrie de la grille d'échantillonnage à laquelle seront ajoutés les champs suivants :

- *IA_score* : Le score d'appartenance de la prédiction du modèle de classe récif à *Sabellaria alveolata* ;
- *Class* : Le label associé selon le seuillage du score d'appartenance. Pour rappel, les seuils ont été fixés d'après l'analyse des performances du modèle actuel tels que :
 - Présence : $IA\ score \geq 0,7$
 - Incertitude : $0,7 > IA\ score \geq 0,3$
 - Absence : $0,3 > IA\ score$;
- *Mean_elev* : Valeur d'élévation moyenne au sein de la maille d'échantillonnage ;
- *Rugosity* : Valeur de rugosité au sein de la maille d'échantillonnage ;
- *Surface* : Extension surfacique en m² des mailles de la ZI classées en "Présence" de récif à *Sabellaria alveolata* ;
- *Frag* : Métrique de fragmentation de la ZI calculée sur le polygone de l'extension surfacique des récifs.

Le logiciel QGIS offre dans sa boîte à outils la possibilité de créer automatiquement une grille selon une étendue et un espacement personnalisable. L'outil *Créer une grille...* peut-être trouvé dans le menu *Vecteur* puis *Outils de recherche*. Pour créer une grille avec des mailles carrés de 1m^2 , il suffit de sélectionner *Rectangle (polygone)* comme type de grille, de définir l'espacement horizontal et vertical à 1 mètre sans superposition. L'étendue de la grille doit être calculée depuis la couche vecteur qui représente la surface de la zone d'intérêt. Le SCR de la grille de sortie doit être RGF93 v1 / Lambert (EPSG:2154) afin que la grille soit compatible avec le logiciel SISTER. Le vecteur peut être enregistré sous n'importe quel format vecteur OGR (Geojson, shapefile, etc.).



Encadré 5. Création d'une grille d'échantillonnage à l'aide d'un Système d'Information Géographique gratuit tel que QGIS.

Onglet 2.1 du panneau principal - Module *Orthophoto*

Ce module intègre la partie [Géo-positionnement des photo-quadrats](#) (comme montré par exemple dans la Fig. 2.8.). Les photo-quadrats - une fois positionnés sous un SIG

- peuvent être photo-interprétées pour créer un fichier de “vérités terrain” afin de valider les sorties du modèle via l’onglet 2.2. Les entrées de ce module sont les suivantes :

- *DJI photo folder* : Chemin vers le dossier contenant les images acquises par un drone DJI ;
- *DSM drone imagery* : Chemin vers le MNS généré par Metashape ;
- *Camera model* : Modèle de la caméra intégrée au drone parmi :
 - M3M: Mavic 3 Multispectral
 - P1 : Camera P1 35mm sur Matrice 300 RTK
 - P4 : Phantom 4 Multispectral RTK

En sortie, le logiciel génère des fichiers avec une extension .wld (worldfile) pour chaque photo qui contient des coordonnées géographiques estimées dans le système de référence de coordonnées (SRC) RGF93 / Lambert-93 (EPSG: 2154).

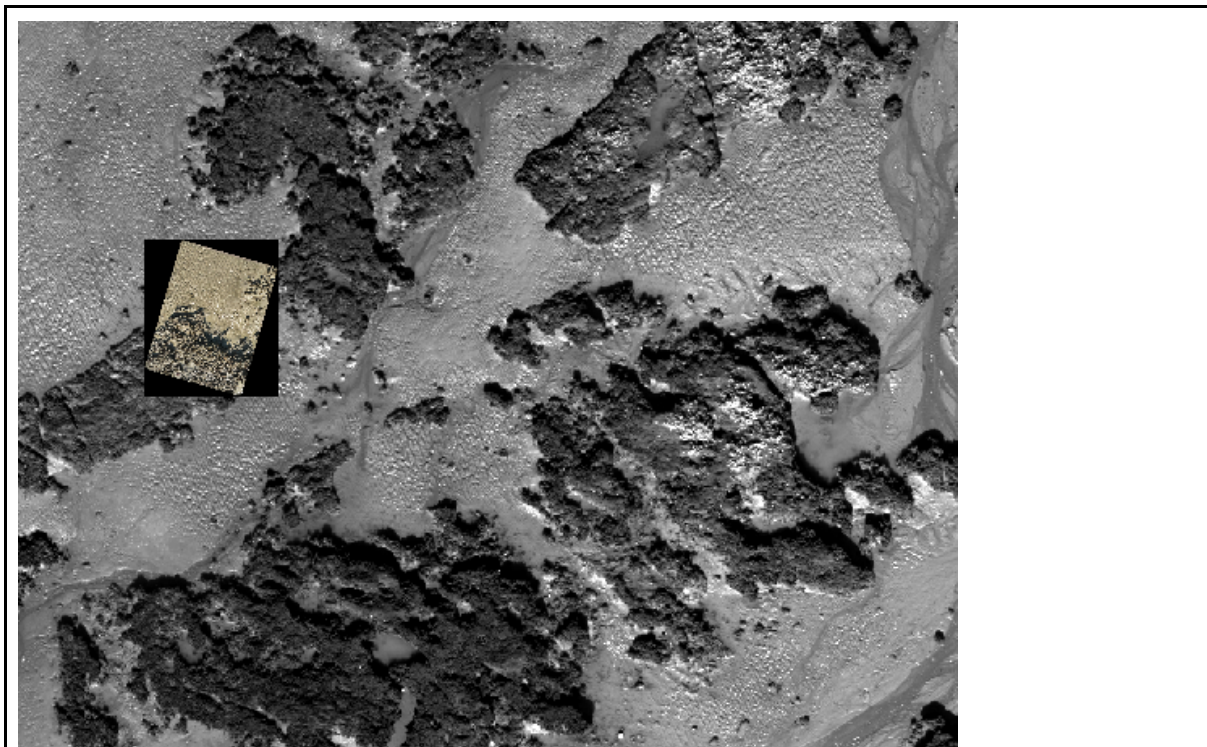


Fig. 2.8: Capture d’écran du résultat de positionnement. Le photo-quadrat est positionné et orienté par le module - ce qui explique l’enveloppe convexe noire) en superposition à l’orthomosaïque afin de permettre un zoom et une vérification *a posteriori* par l’opérateur.

Onglet 2.2 du panneau principal - Module *Validation*

Ce module intègre la partie [Validation](#) afin d’évaluer les sorties du modèle de détection automatique en les confrontant à une “vérité terrain” sur une ZI. Les entrées sont les suivantes :

- *Ground truth* : Chemin vers le fichier vecteur de “vérité terrain” (voir Encadré 6) ;
- *Multispectral drone imagery* : Chemin vers l’orthomosaique multispectrale générée par Metashape ;
- *DSM drone imagery* : Chemin vers le MNS généré par Metashape ;
- *Output folder* : Chemin vers le dossier de sortie ;
- *Batch size* : permet de paramétrer le nombre d’échantillons à traiter en simultanée. Ce paramètre dépend des capacités de calculs de votre ordinateur.

En sortie, un fichier vecteur d’extension .geojson est généré. Ce fichier garde la géométrie du fichier vecteur de “vérité terrain” à laquelle seront ajoutés les champs suivants :

- *Validation* : Label de concordance ou non entre la prédiction et la “vérité terrain” ;
- *F1_score* : Valeur de F1-score pour l’ensemble du jeu de données d’évaluation.

Attention : Les prédictions faites sur la validation peuvent varier de celles faites pour la cartographie car l’échantillonnage n’est pas le même : lors de la validation, l’échantillonnage est refait par rapport à la position fournie dans le fichier vecteur et non par rapport à la grille d’échantillonnage de la ZI. Cette précision est importante à considérer.

Le fichier vecteur de “vérité terrain” doit contenir des géométries de type point qui représentent le centre de la surface de 1m² qui est échantillonnée. Il doit contenir une colonne dans le champ attributaire nommé ‘gt’ (ground truth) qui contient les annotations « 1 » ou « 0 », respectivement pour présence et absence de récif d’hermelles. Le fichier peut être au format de n’importe quelle source de données vecteur OGR, tel que ESRI Shapefile, GeoPackage, et GeoJSON.

Encadré 6. Formats acceptables du fichier vecteur de “vérité terrain”.

Onglet 3 du panneau principal - Module *Monitoring*

Lorsque plusieurs dates ont été acquises sur une même zone et traitées via le module *Mapping*, il est possible de faire un suivi via le module *Monitoring* qui permet de détecter les changements au niveau surfacique et morphologique des récifs entre deux dates de suivi. Les entrées sont les suivantes :

- *Date 1* : Chemin vers le fichier vecteur (.geojson) de sortie du module *Mapping* pour la date la plus ancienne ;

- *Date 2* : Chemin vers le fichier vecteur (.geojson) de sortie du module *Mapping* pour la date la plus récente ;
- *Output folder* : Chemin vers le dossier de sortie.

En sortie, un fichier vecteur (.geojson) est généré. Ce fichier garde la géométrie de la grille d'échantillonnage à laquelle seront ajoutés les champs suivants :

- *SabChange* : Label qui renseigne sur le changement ou non de catégorie entre absence et présence de récif à *Sabellaria alveolata* ;
- *EleChange* : Valeur de différence de l'élévation moyenne entre la date 2 et la date 1 ;
- *Surface* : Valeur de différence de la surface des récifs entre la date 2 et la date 1 ;
- *Frag* : Valeur de différence de la fragmentation des récifs entre la date 2 et la date 1.

Il faut noter que les calculs des valeurs de différence de l'élévation moyenne entre la date 2 et la date 1 (*EleChange*) ne sont pas complètement fonctionnels. Ils nécessitent encore des développements techniques et des ajustements sur le positionnement (en z) des valeurs.

Partie 3

Guide d'analyse des données

Résultats et interprétations des suivis réalisés sur les sites tests du Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis

1. Introduction

L'espèce *Sabellaria alveolata* est une espèce fréquemment rencontrée en Europe dans les environnements côtiers rocheux et sableux (Curd et al. 2020). Les formations récifales qu'elle élabore sont donc également fréquentes : elles couvrent des surfaces allant de quelques mètres carrés à plusieurs centaines d'hectares (Lisco et al. 2020, Firth et al. 2021). Un récif est une mosaïque de structures tridimensionnelles bio-construites qui peuvent prendre différentes formes (appelés types récifaux : structures en boules, en placages ou en plateformes) sous différentes phases (des phases de progradation quand le récif se développe et des phases de rétrogradation quand il régresse) (Curd et al. 2019).

Le Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis (PNMEGMP) se trouve au centre de l'aire de distribution européenne de *Sabellaria alveolata* (Curd et al. 2023). A ce titre, cette espèce et les habitats qu'elle structure sont particulièrement communs. Mais leurs dynamiques spatiales et temporelles sont très différentes selon l'environnement physique avoisinant.

Dans le cadre du projet SISTER qui vise à proposer une méthodologie de suivi de la dynamique spatiale de ces bioconstructions, 3 sites tests ont été sélectionnés afin de représenter la plus grande diversité possible de types et de phases de structures récifales et ainsi proposer des outils génériques et transférables. Sur chacun des sites, après une phase de test du matériel et des techniques, une méthodologie a été appliquée au cours de 3 campagnes afin d'acquérir des données spatialisées mais également proposer un examen de l'aspect temporel.

L'objectif du guide d'analyse proposé ici est de faire la démonstration de la mise en place de la méthodologie et de fournir aux gestionnaires et opérateurs du protocole SISTER une analyse des produits issus de ce protocole.

2. Interprétation des métriques paysagères et morphologiques

Les changements spatiaux des habitats récifaux sont souvent évidents visuellement mais parfois difficiles à quantifier. C'est le rôle des métriques paysagères qui cherchent à mesurer l'importance des changements. La littérature scientifique en propose des centaines - dont beaucoup sont des déclinaisons de quelques-unes - et le choix a été fait de calculer ici un ensemble de 4 métriques simples, complémentaires et explicites, adaptées à notre connaissance de l'habitat récifal, et sur la base de la cartographie issue de la classification réalisée par le modèle :

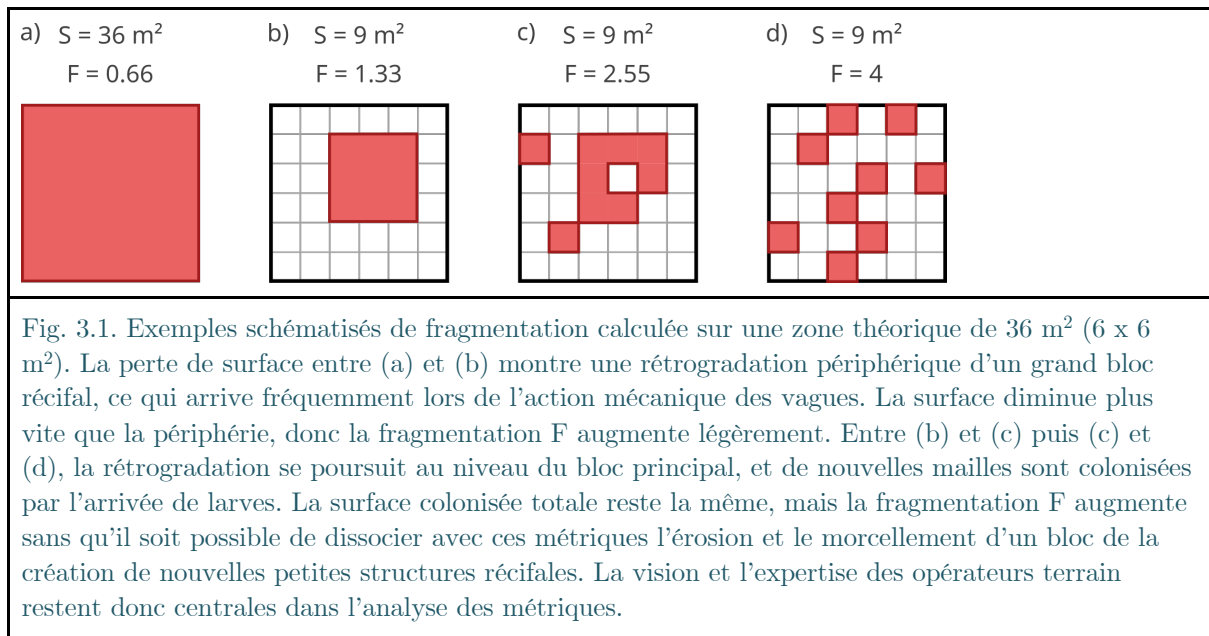
(métrique 1) Extension surfacique - il s'agit de la surface totale couverte par les formations récifales sur la ZI (exprimée en m² et en pourcentage de la surface totale

de la ZI). C'est le premier indicateur de l'habitat. On parle de phase de progradation ou de rétrogradation de l'habitat quand la surface totale augmente ou diminue entre deux évaluations pour la même ZI, respectivement. Une combinaison de trois facteurs explique ces extensions et ces régressions. L'apport larvaire tout d'abord qui permet une extension de la couverture mais également du volume récifal dans la mesure où les larves se fixent préférentiellement sur des structures récifales existantes. Ce facteur compense les mortalités naturelles et les conditions météorologiques extrêmes comme les tempêtes et les actions mécaniques des vagues qui détruisent une partie des structures récifales. Dans un second temps, certains événements de déplacement des masses sableuses peuvent être bénéfiques pour les hermelles si elles se montrent capables d'intégrer dans la dynamique de construction les volumes de sable déplacés. Enfin, les pressions anthropiques directes (e.g. pêche à pied et piétinement associé) ou indirectes (e.g. pollutions, modification du trait de côte) sont le plus souvent responsables de phases de rétrogradation. Il est toujours difficile de séparer ces facteurs confondants. Dans les zones où les impacts anthropiques sont jugés faibles et peu impactant, le résultat net des apports larvaires et des conditions physiques détermine la phase de progradation ou de rétrogradation de la ZI ;

(métrique 2) Fragmentation - la fragmentation est mesurée de très nombreuses manières et un grand nombre de métriques cherchent à la quantifier. Elle est ici exprimée très simplement par le ratio entre le périmètre des mailles comportant des récifs sur la surface couverte par ces mailles. Cette métrique s'interprète donc avec la surface totale de récif. Une augmentation de la fragmentation à surface totale équivalente entre deux relevés révèle un morcellement des structures récifales et donc une augmentation des périmètres. Souvent, des portions de récifs disparaissent au sein de grands blocs récifaux de plusieurs dizaines ou centaines de mètres carrés. C'est typiquement ce qui est observé lors de pressions humaines localisées, ou lors de la colonisation d'épibiontes (macroalgues, huîtres, moules) sur des zones récifales, causant la régression puis la disparition des récifs. Mais le plus souvent, on observe une diminution de la surface totale en plus de l'augmentation de la valeur de fragmentation. Une augmentation de la fragmentation peut également être due à l'apparition de nouvelles petites structures récifales, sous forme de champs de structures en boules. Le périmètre augmente alors beaucoup plus que les surfaces. Mais dans ce cas, il y a le plus souvent également une augmentation de la surface totale.

Enfin, si la fragmentation varie peu - ce qui est souvent le cas - c'est que les récifs s'étendent ou se contractent par leur périphérie, ce qui fait mathématiquement peu varier cette métrique, ou très marginalement. Pour une grille de 10 000 m², l'indice peut varier entre 0.04 (toutes les mailles contiennent des récifs) et 4 (fragmentation maximale), soit 2 log de variation.

Une même valeur d'indice peut être obtenue avec plusieurs configurations spatiales différentes (Fig. 3.1.).



(métrique 3) Volume relatif - il s'agit d'une estimation du changement de volume récifal sur la ZI considérée. Le volume (exprimé en m^3) est calculé pour chaque maille de 1 m^2 par la différence d'élévation entre deux dates de relevés. Ce calcul ne permet donc pas d'estimer directement le volume du récif mais un changement volumique en gain ou en perte. La spatialisation de cette information volumique permet la production de cartes d'accrétion (augmentation) ou d'érosion (diminution) pour chaque ZI. L'ensemble des différences de volumes par maille est sommé pour fournir un changement volumique relatif par ZI.

Un gain de volume indique une accrétion de sable qui est liée à l'arrivée de juvéniles ou à une activité de construction des adultes. Biologiquement, l'activité de construction des hermelles est permanente et continue tant que les matériaux de construction - i.e. le sable - sont disponibles. Cette activité est donc très liée aux mouvements sédimentaires de la ZI. À l'inverse, une diminution de volume est liée à un mécanisme d'érosion dont l'origine est complexe et multiple, mais qui globalement signifie que l'activité biologique de construction ne compense pas les facteurs d'érosion (e.g. action mécanique des vagues).

(métrique 4) Rugosité - cette métrique - exprimée en m - correspond à l'écart-type des valeurs d'élévation mesurées au sein de chaque maille de 1 m^2 . La mesure de rugosité complète le volume en renseignant sur la morphologie du récif (Jackson-Bué et al. 2024). Comme chaque maille possède une valeur de rugosité, il est possible de fournir une carte de la rugosité pour chaque ZI. La mesure de rugosité n'est calculée que dans les mailles qui sont prédites avec une présence de structures récifales. Dans ces mailles, une faible rugosité indique un récif très homogène, le plus souvent en phase de progradation et donc avec une forte activité de construction des tubes. Les récifs en placage, en structures arrondies ou en plateforme en forte progradation présentent très peu d'hétérogénéités de surface (Dubois et al. 2003), à l'inverse des zones de rétrogradation qui se définissent par la présence de nombreuses failles et microcavités

dans les structures, en plus de la présence d'épibiontes, qui rendent la surface très fragmentée à petite échelle. L'indicateur de rugosité permet donc d'identifier et de suivre les zones à forte dynamique de croissance (Jackson-Bué et al. 2024).

Cet ensemble de 4 métriques fournit des indications sur les dynamiques écologiques et l'évolution de l'état de l'habitat à *Sabellaria alveolata* dans les zones d'études. Ces métriques sont complémentaires et liées à des processus biologiques (e.g. activité de construction des tubes, recrutement larvaire) et physiques (e.g. action mécanique des vagues, événements météorologiques et climatiques) qui les impactent différemment, avec une certaine inertie et une spécificité locale. Il est donc important de considérer les variations de ces métriques dans le temps plus que leurs valeurs absolues à un instant donné.

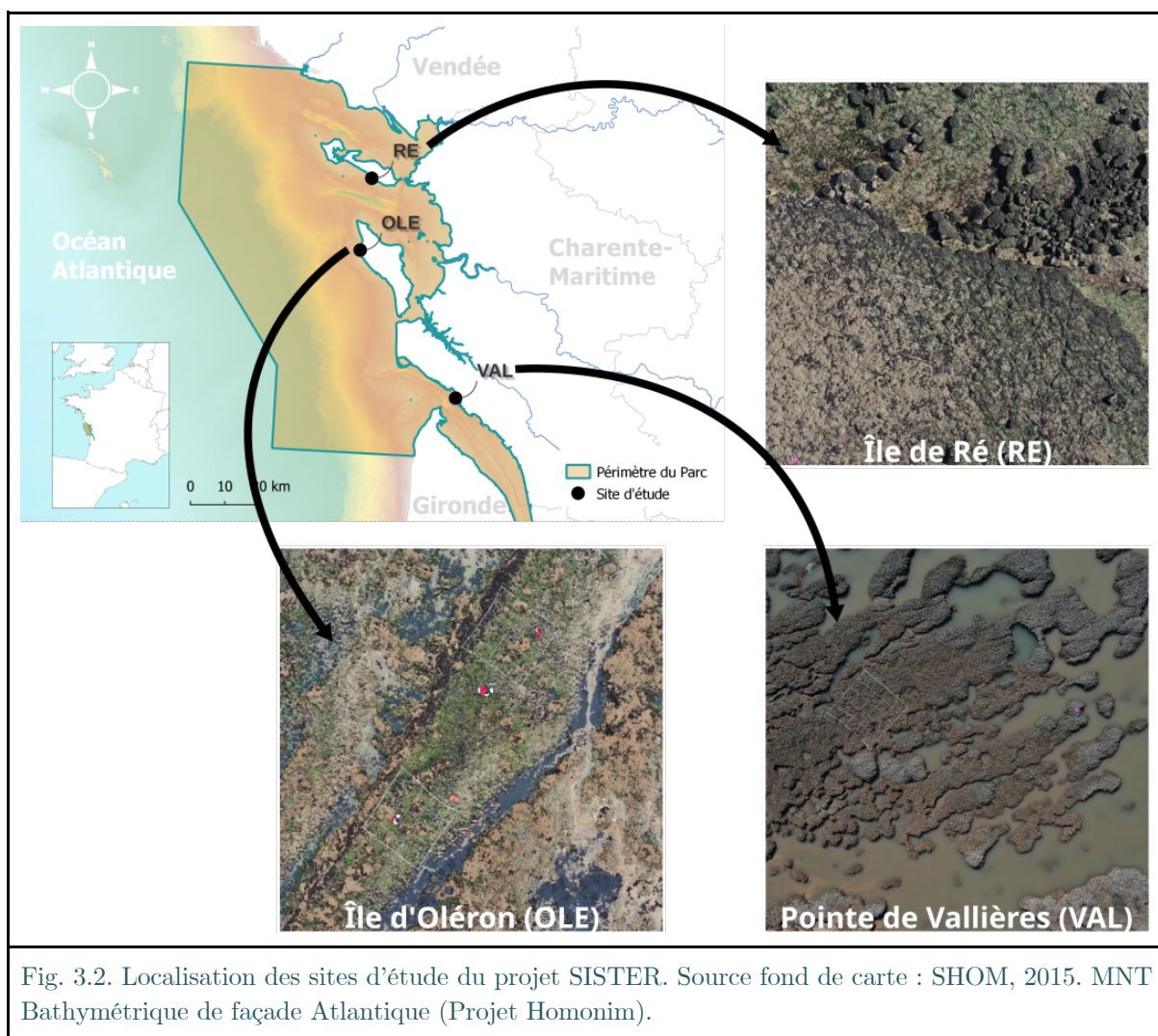
L'application-logiciel SISTER (cf. Partie 2 - Guide logiciel) fournit un calcul de ces 4 métriques paysagères et morphologiques dans le module *Mapping*, à partir de la cartographie des récifs et du MNS.

3. Description et localisation des sites d'étude

Trois sites tests ont été retenus pour appliquer le protocole SISTER. Ces sites sont par ailleurs intégrés au suivi national REEHAB et bénéficient donc d'un historique écologique des formations récifales à *Sabellaria alveolata*. Les deux protocoles SISTER et REEHAB permettent des visions complémentaires de la dynamique récifale, même s'ils peuvent être opérés indépendamment.

Initialement, 3 périodes de suivi ont été programmées afin de tester la détection de variations temporelles pour les sites qui en présenteraient : après un test à l'automne 2021, des survols drone ont été réalisés sur les 3 sites en hiver 2022, en été 2022 et en hiver 2023. Si les survols se sont bien déroulés, avec des conditions météorologiques acceptables, des blocages techniques liés aux drones ont été constatés *a posteriori*. Le traitement des images a révélé des erreurs sur le capteur du drone multispectral, et aucune solution technique satisfaisante n'a pu être trouvée pour corriger les erreurs qui affectaient essentiellement la position en altitude. Le drone a été renvoyé en réparation après le premier vol. D'autres contraintes techniques sont apparues régulièrement, liées aux drones ou aux logiciels qui permettent de les piloter, mais elles n'ont pas été bloquantes. Il est apparu assez évident que l'utilisation de drones grand public doit être associée à un service technique après-vente de qualité afin de d'assurer par exemple un prêt de matériel (sollicité à deux reprises). Il est également rassurant de bénéficier localement d'un drone supplémentaire en cas de défaillance d'un élément matériel, ou d'une erreur de pilotage.

Seules deux dates sont donc présentées et interprétées ici pour les sites de Vallières (VAL) et des îles d'Oléron (OLE) et de Ré (RE) (Fig. 3.2.).



3.1. Site des Grenettes (île de Ré – commune de Sainte-Marie de Ré)

Description géographique : Site sur le plateau rocheux de la plage des Grenettes.

Zones programmées : Le site est survolé au niveau de trois zones d'intérêt, assez distantes pour représenter l'étendue du site (Fig. 3.3.). Tous les quadrats du protocole REEHAB sont couverts par les ZI.

Accessibilité et contraintes de vol : Par coefficient de 100, le survol peut avoir lieu 1h30 avant et 1h30 après la basse mer, en conditions anticycloniques. L'accessibilité au site est facile.

Fréquentation : Lors de nos survols, de nombreux pêcheurs à pied ont été comptés mais la superficie du site et la grande couverture des formations récifales fait apparaître une pression limitée. Il peut être intéressant de prévoir une communication claire pendant les survols, en balisant la zone de décollage qui a été installée en haut de plage sur le platier rocheux.

Description des récifs : Les formations récifales sont particulièrement étendues sur tout le platier rocheux. Celui-ci s'étend d'ailleurs sur une grande partie de la façade Ouest de l'île. Leur distribution est homogène et régulière, juste en dessous de la mi-marée. Les types de récifs alternent entre des formations en placages denses (veneers) et des structures coalescentes en boules (hummocks), mais toujours peu développées. Les hermines bénéficient d'apports de sédiments réguliers par une exposition directe aux houles dominantes d'Ouest et des langues de sable qui font la jonction entre une réserve subtidale et un haut de plage sableux (Fig. 3.3.).



Fig. 3.3. Vue aérienne (Nord géographique en haut de l'image) extraite de Google Earth (janvier 2024 - sur la base des images satellite de 2021) du site des Grenettes sur l'île de Ré, commune de Sainte-Marie de Ré. Les trois zones d'intérêt (ZI) de 1 hectare sont matérialisées par un carré blanc-transparent - Z1 (en haut), Z2 (au milieu) et Z3 (en bas). Elles sont situées à un niveau bathymétrique identique le long d'un platier rocheux très étendu, entièrement découvert à marée basse (par grand coefficient). Cette zone est très largement colonisée par les algues rouges et brunes.

3.2. Site de Oléron (île d'Oléron - commune de Domino)

Description géographique : Site sur un platier rocheux calcaire à fossiles à l'extrémité nord de la grande plage des Bonnes.

Zones programmées : Le site comporte 3 zones d'intérêt qui recouvrent les quadrats réalisés dans le cadre du protocole REEHAB (Fig. 3.4.).

Accessibilité et contraintes de vol : Le site est facile d'accès. Par coefficient de 100, les ZI sont émergées 1h30 avant et 1h15 après la basse mer, en conditions anticycloniques. Il peut rester de l'eau résiduelle dans les cuvettes et chenaux et il est préférable d'attendre 1 heure avant la basse-mer si le timing le permet, pour lancer les survols drone. Il faut également noter que le réseau GSM est faible et donc que des déconnexions intempestives du RTK peuvent se produire (d'après nos expériences et avec nos équipements).

Fréquentation : Lors de nos visites, de très nombreux pêcheurs à pied (locaux) ont été comptés (parfois plus d'une cinquantaine), surtout en période automnale. Il est donc préférable d'anticiper la présence humaine et de prévoir une communication claire pendant les survols, en balisant la zone de décollage qui a été installée en haut de plage sur le platier rocheux.

Description des récifs : Les formations récifales sont très étendues sur l'ensemble de la côte Ouest de l'île et sur le site de Domino en particulier, représentatif de cet environnement exposé. La présence de champs de blocs et l'alternance de plages sableuses permettent la formation de structures récifales (hummocks) assez hautes, sur de grandes surfaces. Le site se caractérise par une grande diversité des types de constructions récifales, ce qui en fait un site globalement très représentatif de la dynamique récifale des côtes françaises, illustrant également très bien les alternances entre les régimes algaux / moulières / récifs.



Fig. 3.4. Vue aérienne (Nord géographique en haut de l'image) extraite de Google Earth (janvier 2024 - sur la base des images satellite de 2021) du site d'Oléron, commune de Domino. Les trois zones d'intérêt de 1 hectare sont matérialisées par un carré blanc-transparent - Z1 (au centre), Z2 (à gauche) et Z3 (à droite). Elles sont situées à un niveau bathymétrique identique le long d'une pointe rocheuse entièrement découverte à marée basse. Cette zone est très largement colonisée par les algues rouges et brunes.

3.3. Site de Vallières (commune de Saint-Georges-de-Didonne)

Description géographique : Site au pied du phare de Vallières, entre le banc de la Béchade et le banc de Vallières.

Zones programmées : Le site est petit en termes de surfaces et seules 2 zones d'intérêt ont été programmées et survolées (Fig. 3.5.).

Accessibilité et contraintes de vol : Le site est difficile d'accès (escalier escarpé et marche difficile sur roche au pied des falaises). Il est donc préférable de se placer en hauteur au-dessus de la zone de vol. Le pied du phare est public et accessible facilement pour déployer les équipements et faire décoller les drones. Le platier rocheux possède

une pente très faible, voire inverse avec des chenaux, ce qui limite fortement le temps de travail pendant lequel les quadrats sont accessibles. Par coefficient de 100, les ZI sont accessibles 45 minutes avant et 45 minutes après la basse mer, en conditions anticycloniques.

Fréquentation : lors de nos visites, il n'a été observé que de rares pêcheurs à pied. Il n'y a donc pas de contrainte de vol à ce niveau, mais il faut être attentifs aux personnes curieuses sur la zone de décollage et d'atterrissage.

Description des récifs : Les formations récifales sont peu développées et quasi-exclusivement sous formes plaquées plus ou moins développées. Elles atteignent parfois une vingtaine de centimètres d'épaisseur, rarement plus dans les zones rocheuses proches de la digue non-colonisées par les huîtres. Elles couvrent cependant de grandes surfaces, en pied de falaise sur roche calcaire ou directement sur des bancs d'huîtres qui colonisent le plateau. Ce site présente en effet un banc d'huîtres d'une taille rarement observée sur les côtes françaises. Les hermelles se développent directement sur – ou entre – les coquilles d'huîtres sur une large partie du plateau. Les apports de sable semblent limités et proviennent de zones plus au large : le développement des récifs sera donc limité par cette contrainte. Les apports terrigènes sont massifs dans cette zone quasi-estuarienne mais les hermelles sont connues pour s'adapter à des conditions de dessalures fréquentes. Il faut également noter qu'il est particulièrement rare de voir les hermelles s'installer sur les huîtres. C'est traditionnellement l'inverse qui se produit. En raison des quantités très limitées de sédiments meubles, il est peu probable que ce site présente d'importantes formations récifales en monticules : les matériaux de construction sont ici un facteur limitant évident.



Fig. 3.5. Vue aérienne (Nord géographique en haut de l'image) extraite de Google Earth (janvier 2024 - sur la base des images satellite de 2021) du site de Vallières, commune de Saint-Georges de Didonne. Les deux zones d'intérêt de 1 hectare sont matérialisées par un carré blanc-transparent - Z1 (à droite) et Z2 (à gauche). Elles couvrent presque complètement la pointe rocheuse sous le phare et la digue portuaire de Vallières. Cette zone est quasi-intégralement et massivement colonisée par les huîtres creuses.

4. Résultat des survols drones et acquisition des données

Les résultats des survols drone sont présentés pour les 3 sites et chaque ZI, mais pour deux périodes d'acquisition uniquement. Comme mentionné précédemment, le traitement des données de la première date d'acquisition a révélé un défaut du capteur du drone, rendant la production de modèles numériques peu fiable.

Les figures suivantes illustrent donc le résultat de la compilation des images drones, sur chacune des ZI, sous forme d'une mosaïque d'images ortho-rectifiées (Fig. 3.6. et 3.7.) et d'un modèle numérique de surface (Fig. 3.8. et 3.9.).

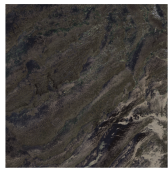
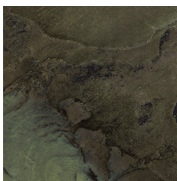
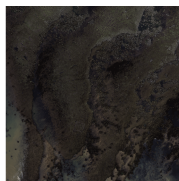
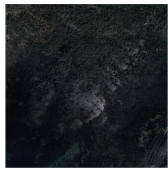


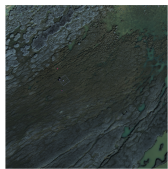
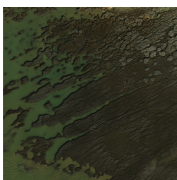
	Zone d'intérêt Z1	Zone d'intérêt Z2	Zone d'intérêt Z3
GR E			
OL E			
VA L			

Fig. 3.6. Orthomosaïques produites par traitement des images drone réalisées sur les 3 sites d'étude au cours de la mission de l'été 2022. Seules des vignettes sont représentées afin de faciliter l'affichage car la taille du fichier de chaque orthomosaïque est de l'ordre de 900 Mo.

	Zone d'intérêt Z1	Zone d'intérêt Z2	Zone d'intérêt Z3
GR E			

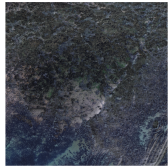

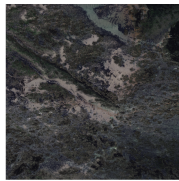

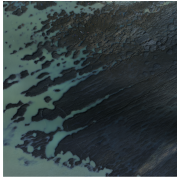
OL E			
VA L			

Fig. 3.7. Orthomosaïques produites par traitement des images drone réalisées sur les 3 sites d'étude au cours de la mission de l'hiver 2023. Seules des vignettes sont représentées afin de faciliter l'affichage car la taille du fichier de chaque orthomosaïque est de l'ordre de 900 Mo.

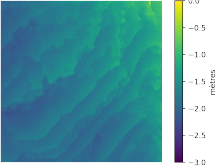
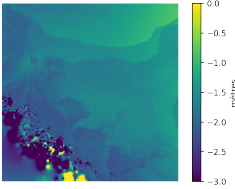
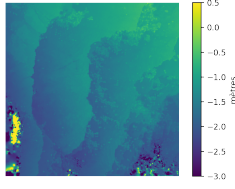
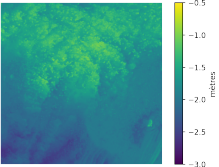
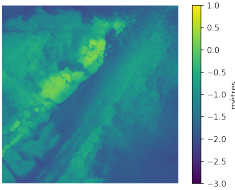
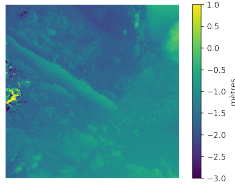
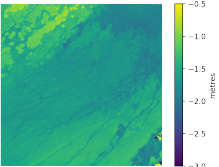
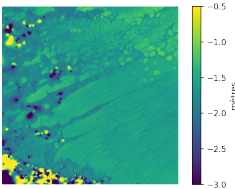
	Zone d'intérêt Z1	Zone d'intérêt Z2	Zone d'intérêt Z3
GR E			
OLE			
VA L			

Fig. 3.8. Modèles numériques de surface (MNS) produits par traitement des images drone réalisés sur les 3 sites d'étude au cours de la mission de l'été 2022. Seules des vignettes sont représentées afin de faciliter l'affichage car la taille du fichier de chaque MNS est de l'ordre de 300 Mo. Les modèles révèlent certaines parties des zones qui sont mal reconstruites (e.g. Z2 de Grenettes GRE ou Z2 de Vallières VAL) dans les zones couvertes d'eau. Que ce soit de l'eau permanente ou temporaire (mer non retirée lors du passage du drone), un masque devrait être appliqué en amont.

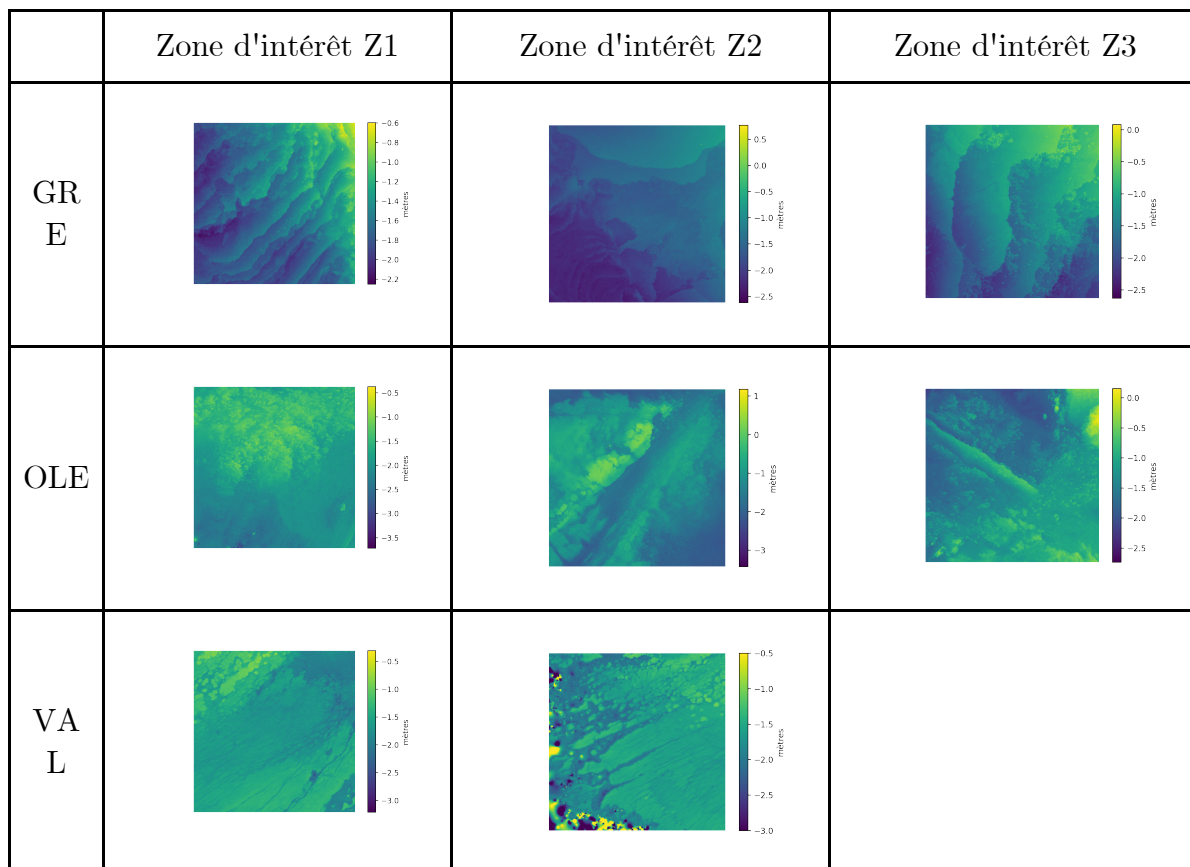


Fig. 3.9. Modèles numériques de surface (MNS) produits par traitement des images drone réalisées sur les 3 sites d'étude au cours de la mission de l'hiver 2023. Seules des vignettes sont représentées afin de faciliter l'affichage car la taille du fichier de chaque MNS est de l'ordre de 300 Mo. Les modèles révèlent certaines parties des zones qui sont mal reconstruites (e.g. Z2 de Vallières VAL) dans les zones couvertes d'eau. Que ce soit de l'eau permanente ou temporaire (mer non retirée lors du passage du drone), un masque devrait être appliqué en amont.

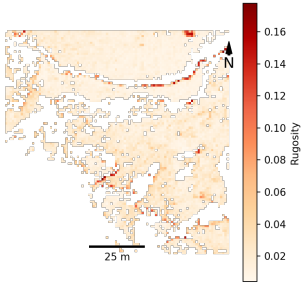
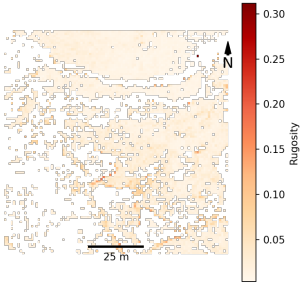
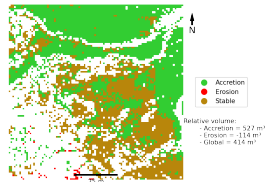
5. Carte de distribution des récifs à *Sabellaria alveolata* et métriques paysagères

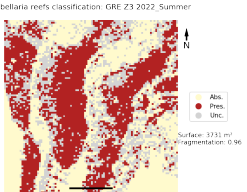
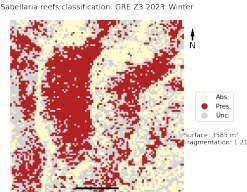
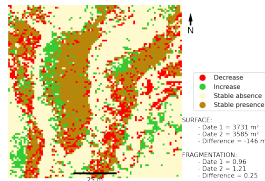
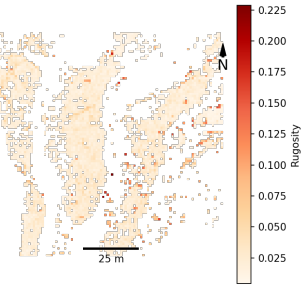
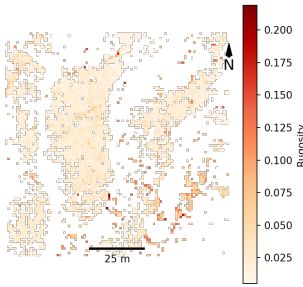
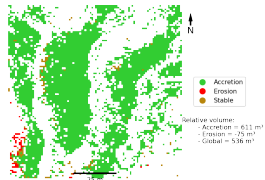
Les résultats de la chaîne de traitement tels que fournis par l'application-logiciel SISTER sont synthétisés dans les vignettes ci-dessous. Ils sont classés par site d'étude et proposent les classifications automatiques et les métriques paysagères pour chaque date de suivi (excepté pour l'hiver 2022 dont les données sont entachées d'erreurs liées à un capteur défaillant) et en comparant les deux dates. Une interprétation écologique est fournie pour chaque site.

5.1. Site de l'île de Ré - Grenettes

GRE	Été 2022	Hiver 2023	Comparaison
Surface de récif	<p>Sabellaria reefs classification: GRE Z1 2022_Summer</p> <p>Surface: 3564 m² Fragmentation: 1.32</p>	<p>Sabellaria reefs classification: GRE Z1 2023_Winter</p> <p>Surface: 3252 m² Fragmentation: 1.32</p>	<p>Surface: -312 m² Fragmentation: 0.00</p>
Rugosité et Volume relatif	<p>Rugosity: 0.06</p>	<p>Rugosity: 0.06</p>	<p>Relative volume: -113 m³ Rugosity: 0.00</p>
Z1	<p>Résultats cartographiques de la présence (ligne 1) et de l'indice de rugosité (ligne 2) des récifs d'hermelles sur la zone d'intérêt Z1 du site de Grenettes (GRE) pour l'été 2022 (colonne 1), l'hiver 2023 (colonne 2) et la différence entre ces deux dates de survol séparées de 6 mois (colonne 3). Les métriques de surface, de fragmentation et de changement de volume sont également fournies.</p>		

GRE	Été 2022	Hiver 2023	Comparaison
Surface de récif	<p>Sabellaria reefs classification: GRE Z2 2022_Summer</p> <p>Surface: 5476 m² Fragmentation: 0.59</p>	<p>Sabellaria reefs classification: GRE Z2 2023_Winter</p> <p>Surface: 5278 m² Fragmentation: 0.90</p>	<p>Surface: -198 m² Fragmentation: 0.31</p>

Rugosité et Volume relatif			
Z2	<p>Résultats cartographiques de la présence (ligne 1) et de l'indice de rugosité (ligne 2) des récifs d'hermelles sur la zone d'intérêt Z2 du site de Grenettes (GRE) pour l'été 2022 (colonne 1), l'hiver 2023 (colonne 2) et la différence entre ces deux dates de survol séparées de 6 mois (colonne 3). Les métriques de surface, de fragmentation et de changement de volume sont également fournies.</p>		

GRE	Été 2022	Hiver 2023	Comparaison
Surface de récif			
Rugosité et Volume relatif			
Z3	<p>Résultats cartographiques de la présence (ligne 1) et de l'indice de rugosité (ligne 2) des récifs d'hermelles sur la zone d'intérêt Z3 du site de Grenettes (GRE) pour l'été 2022 (colonne 1), l'hiver 2023 (colonne 2) et la différence entre ces deux dates de survol séparées de 6 mois (colonne 3). Les métriques de surface, de fragmentation et de changement de volume sont également fournies.</p>		

Interprétations - Le platier des Grenettes est construit sous forme de grandes marches calcaires sur lesquelles les hermelles se développent de façon importante, mais sans jamais former des structures récifales hautes. Elles cohabitent avec un couvert algal

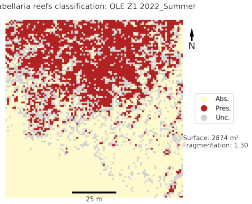
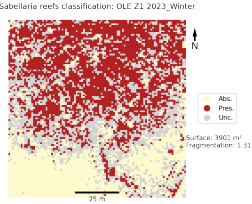
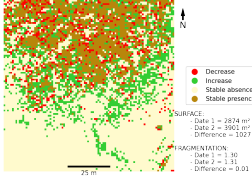
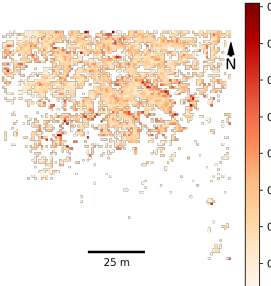
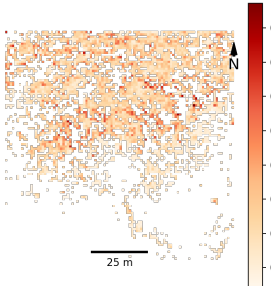
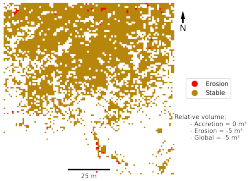
presque constant toute l'année et surtout représenté par des algues peu hautes des genre *Chondrus* et *Osmundea*.

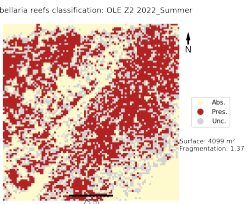
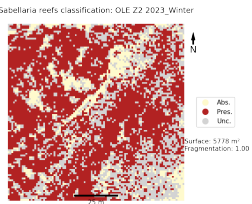
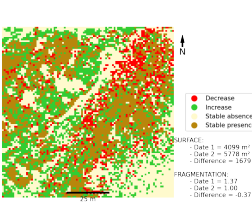
Les résultats montrent une forte homogénéité sur les trois ZI et peu de changements dans les surfaces à l'échelle de 6 mois, au maximum 10%, et toujours avec une différence négative. Cette rétrogradation est attendue entre un été et un hiver dans la mesure où la régression d'un récif se fait essentiellement pendant la période hivernale, plus sujette aux actions de la houle. Néanmoins, très peu de variations spatiales sont observées par rapport à la surface totale couverte par les formations récifales. L'indice de fragmentation reste stable ou augmente faiblement pour chacune des ZI, ce qui indique que les mailles qui ont changé de catégorie entre été 2022 et hiver 2023 (i.e. non classées comme récif à *Sabellaria alveolata* puis classées comme récif, ou inversement) sont plutôt regroupées spatialement, ce que confirment visuellement les cartes où les mailles vertes (apparition de récif) et les mailles rouges (i.e. disparition de récif) sont spatialement discriminées.

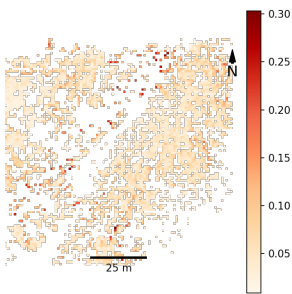
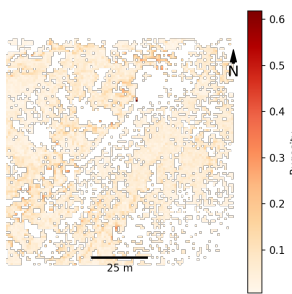
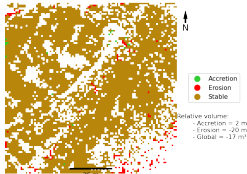
La mesure de rugosité - affichée dans les mailles qui sont prédites avec une présence de structures récifales - est globalement faible, ce qui indique une homogénéité des bioconstructions. Celles-ci se rencontrent *de facto* quasiment toujours sous la forme de placages fins adossés à la roche. Les plus fortes valeurs de rugosité apparaissent au niveau des zones de bordures (e.g. en bord de marches de plateau rocheux ou le long de sillons sableux inter-roches) justement là où les ruptures sont les plus marquées et où les variations de hauteurs sont mécaniquement les plus fortes.

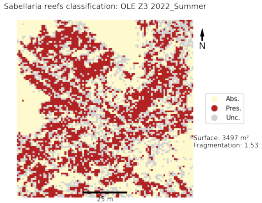
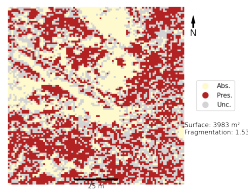
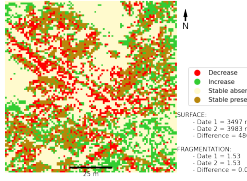
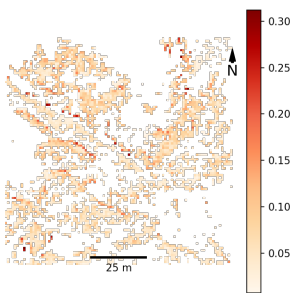
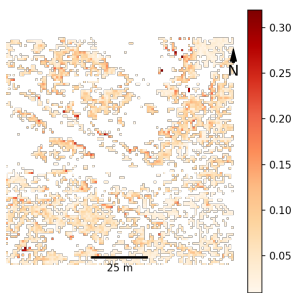
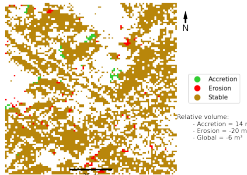
Les cartes des volumes relatifs doivent théoriquement donner une idée des mailles classées en récif pour les deux dates comparées où les bioconstructions se sont développées (i.e. avec une élévation de hauteur de plus de 10 cm = accrétion) ou à l'inverse se sont réduites (i.e. avec une érosion des récifs de plus de 10 cm sur la hauteur = érosion). Les 3 zones survolées montrent toutes des profils d'accrétion marqués, c'est-à-dire que les hauteurs relevées dans les mailles sont nettement plus importantes (ou dépassent en tout état de cause le seuil d'incertitude de la mesure en hauteur, i.e. 10 cm). On décèle néanmoins que certaines zones classées "decrease" par le modèle - c'est-à-dire avec disparition des bioconstructions - sont néanmoins plus hautes en hauteur. Il apparaît donc probable qu'entre les deux dates et les deux productions d'orthomosaïques, les niveaux en hauteur aient pu bouger sur certaines zones de la carte, générant alors des changements artificiels de hauteur récifale. Un bon indicateur d'une erreur globale sur les hauteurs entre deux dates est un code-couleur uniforme sur toute une partie homogène de la zone survolée. L'analyse du workflow mis en place pour traiter les images ne nous permet pas pour l'instant de confirmer cette erreur, mais il existe une forte probabilité d'erreur générique sur l'estimation des changements volumiques.

5.2. Site de l'île d'Oléron - Domino

OLE	Été 2022	Hiver 2023	Comparaison
Surface de récif			
Rugosité et Volume relatif			
Z1	<p>Résultats cartographiques de la présence (ligne 1) et de l'indice de rugosité (ligne 2) des récifs d'hermelles sur la zone d'intérêt Z1 du site d'Oléron (OLE) pour l'été 2022 (colonne 1), l'hiver 2023 (colonne 2) et la différence entre ces deux dates de survol séparées de 6 mois (colonne 3). Les métriques de surface, de fragmentation et de changement de volume sont également fournies.</p>		

OLE	Été 2022	Hiver 2023	Comparaison
Surface de récif			

Rugosité et Volume relatif			
Z2	<p>Résultats cartographiques de la présence (ligne 1) et de l'indice de rugosité (ligne 2) des récifs d'hermes sur la zone d'intérêt Z2 du site d'Oléron (OLE) pour l'été 2022 (colonne 1), l'hiver 2023 (colonne 2) et la différence entre ces deux dates de survol séparées de 6 mois (colonne 3). Les métriques de surface, de fragmentation et de changement de volume sont également fournies.</p>		

OLE	Été 2022	Hiver 2023	Comparaison
Surface de récif			
Rugosité et Volume relatif			
Z3	<p>Résultats cartographiques de la présence (ligne 1) et de l'indice de rugosité (ligne 2) des récifs d'hermes sur la zone d'intérêt Z3 du site d'Oléron (OLE) pour l'été 2022 (colonne 1), l'hiver 2023 (colonne 2) et la différence entre ces deux dates de survol séparées de 6 mois (colonne 3). Les métriques de surface, de fragmentation et de changement de volume sont également fournies.</p>		

Interprétations - Le platier suivi par les survols drone est une avancée rocheuse entourée par la mer et plusieurs plages de sable. Cette zone rocheuse abrite des bioconstructions étendues et parfois sous forme de monticules assez hauts. Elle est aussi

largement colonisée par les macroalgues (rouges du genre *Osmundea* notamment et vertes du genre *Ulva*) et les moules (surtout dans la Z2).

La surface classée comme récif augmente systématiquement et fortement pour les trois zones survolées pour le site d'Oléron (OLE) : +36% pour la Z1, +43% pour la Z2 et +14% pour la Z3. L'indice de fragmentation reste stable ou diminue très légèrement, ce qui tend à indiquer que la formation de bioconstructions se fait dans la continuité de récifs existants et déjà d'une certaine taille. L'apparition de nouvelles structures en boules dans des zones non colonisées aurait pu avoir un même effet sur la carte des surfaces mais l'indice de fragmentation aurait montré une augmentation notable. Ce n'est pas le cas. On voit d'ailleurs que les mailles d'apparition de récif ("increase") sont regroupées en patches assez importants et en bordures de zones déjà classées en récifs. Les patrons d'apparition ("increase") et disparition ("decrease") de récif semblent assez typiques de mouvements de sables qui passent pendant les périodes automnales et hivernales sur les zones rocheuses où les hermelles se développent. Au passage des masses sédimentaires, les hermelles piègent et capturent d'importants volumes de sables qui sont alors intégrés aux constructions. Mais cette analyse fait aussi l'hypothèse d'un recrutement massif de juvéniles en automne, justifiant ainsi l'apparition de nouvelles mailles classées en récif entre début septembre 2022 et février 2023. Il est connu que si les hermelles se reproduisent massivement en fin d'hiver, une seconde période de reproduction existe au moment du bloom automnal. Ce second pic de reproduction - qui conduit souvent à une deuxième période de recrutement de jeunes - est d'autant plus marqué que l'on se trouve au cœur de la zone de distribution de l'hermelle, i.e. les côtes vendéennes et charentaises. Néanmoins, un tel phénomène massif devrait être visible dans les environnements physiques similaires à proximité, comme le site de Grenettes sur l'île de Ré. Ce n'est pas le cas : une stabilité, voire une légère diminution est constatée, même si globalement une croissance en hauteur est mesurée et pourrait être attribuée à une colonisation secondaire de juvéniles sur un récif existant, sans néo-colonisation de substrat rocheux.

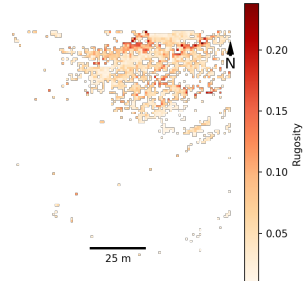
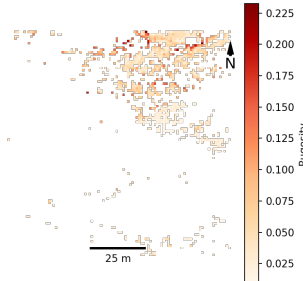
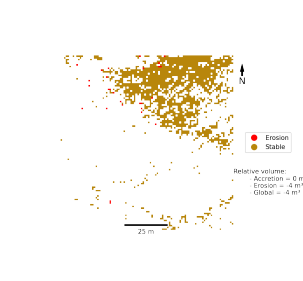
Les cartes de rugosité ne montrent quasiment aucun changement entre les deux dates mais surtout des valeurs très faibles sur les zones nouvellement classées comme récifs. Cela indique que les constructions se sont faites de façon homogène dans les mailles et autour de mailles déjà classées comme récifs. Il n'apparaît pas de maille avec des changements importants dans les hauteurs et donc une forte variance dans les valeurs. Cette indication permet de reprendre l'idée de la néo-colonisation de substrat rocheux par des juvéniles. Si cela est le cas, la carte des rugosités devrait montrer une variance plus forte (et les métriques de fragmentations des augmentations probablement beaucoup plus fortes). L'explication la plus probable est qu'entre l'été 2022 et l'hiver 2023, les algues - et en particulier les algues vertes qui dominent souvent sur l'île d'Oléron - ont nettement régressé et ont mis en évidence des bioconstructions que la vue au nadir des drones n'a pas pu mettre en évidence en été avec un couvert algal massif. Il a été montré dans les tests réalisés avec le modèle que les macroalgues généraient de l'incertitude dans l'affectation de la classe "récif". La connaissance du

terrain, les photos et les prises de notes permettent d'apporter des éléments complémentaires. Mais ce site illustre également pourquoi il est recommandé dans le protocole SISTER que le survol des zones se fasse une fois par an pendant la période hivernale et avant le bloom phytoplanctonique, qui correspond aussi au bloom d'algues vertes.

5.3. Site de Vallières

VAL	Été 2022	Hiver 2023	Comparaison
Surface de récif			
Rugosité et Volume relatif			
Z1	<p>Résultats cartographiques de la présence (ligne 1) et de l'indice de rugosité (ligne 2) des récifs d'hermelles sur la zone d'intérêt Z1 du site de Vallières (VAL) pour l'été 2022 (colonne 1), l'hiver 2023 (colonne 2) et la différence entre ces deux dates de survol séparées de 6 mois (colonne 3). Les métriques de surface, de fragmentation et de changement de volume sont également fournies.</p>		

VAL	Été 2022	Hiver 2023	Comparaison
Surface de récif			

Rugosité et Volume relatif			
Z2	<p>Résultats cartographiques de la présence (ligne 1) et de l'indice de rugosité (ligne 2) des récifs d'hermelles sur la zone d'intérêt Z2 du site de Vallières (VAL) pour l'été 2022 (colonne 1), l'hiver 2023 (colonne 2) et la différence entre ces deux dates de survol séparées de 6 mois (colonne 3). Les métriques de surface, de fragmentation et de changement de volume sont également fournies.</p>		

Interprétations - Le site de Vallières comprend uniquement deux zones de survol, qui correspondent à une huître partiellement colonisée par les récifs d'hermelles. Les macroalgues vertes, brunes et rouges y sont absentes.

Les cartes de présence des formations récifales montrent deux tendances différentes de la surface couverte par les bioconstructions entre l'été 2022 et l'hiver 2023 : une croissance forte (+24%) sur la Z1 et une décroissance aussi marquée (-25%) sur la Z2. La croissance est associée à une diminution de la fragmentation indiquant un développement autour d'une zone récifale existante et inversement, la décroissance est associée à une augmentation de la fragmentation qui reflète une disparition de mailles de récifs au centre d'une zone homogène qui se morcelle. Les cartes de comparaison entre les deux dates montrent clairement ces deux tendances opposées. Sur la Z2, on peut noter l'apparition de nouvelles mailles récifales dans la partie la plus distante du trait de côte et de façon homogène à la zone de progression de la Z1. Les deux zones possèdent une frontière commune, ce qui permet par ailleurs de vérifier que les résultats du modèle sont cohérents. Le développement de la surface constaté dans la Z1 - et s'étendant donc très faiblement sur une petite partie de la Z2 - s'explique par la configuration spéciale et manifestement hétérogène du site, en arrière d'une digue qui sépare l'huître où les récifs se développent sur une zone sablo-vaseuse en arrière. Les mouvements sédimentaires suivent l'orientation de la digue, elle-même parallèle au flot dominant de la Gironde. La Z1 est donc la première zone alimentée en sédiments et il semble cohérent que les hermelles de cette zone en bénéficient avant celles de la Z2. Le sable piégé au niveau de Z1 n'est plus disponible en Z2, et les conditions hydrodynamiques sont également moins favorables (moins de remise en suspension et brassage).

Ce site de Vallières montre que des différences marquées dans le positionnement ou l'orientation des zones survolées, surtout si des éléments artificiels associés au trait de côte sont impliqués (digue, polder, etc.), peuvent conduire à des tendances différentes

entre les zones qui ne sont alors pas des pseudo-réplicats comme c'est le cas lors de zones très homogènes et toutes orientées de façon identiques par rapport à la côte (i.e. site de Grenettes).

An aerial photograph of a rocky coastline during low tide. The ground is a mix of dark, wet rocks and shallow, greyish-brown pools of water. The rocks are scattered and vary in size, with some larger, rounded boulders. The water is shallow and reflects the sky, creating a textured, shimmering effect. The overall scene is rugged and natural.

Discussion

&

Perspectives

1. Synthèse des outils fournis

Ce rapport présente un guide complet de suivi et d'évaluation surfacique des formations récifales à *Sabellaria alveolata* à l'aide de drones. Il propose une chaîne d'acquisition et de traitement des données afin de cartographier les récifs sur des zones cibles choisies, représentatives d'une portion d'estran où les habitats récifaux sont sous une forme de surveillance et où des éléments quantitatifs de changements sont nécessaires. Au-delà des rendus cartographiques, des métriques surfaciques et paysagères sont produites. Leurs variations sont une aide à l'interprétation écologique de la dynamique des habitats récifaux à *Sabellaria alveolata*. Elles ne sont néanmoins pas une fin en soi et doivent être regardées à la lumière des connaissances locales et des spécificités de chaque site. Dit autrement, il est pertinent de comparer les métriques dans le temps pour chaque zone survolée, voire pour chaque site en considérant les zones survolées comme des pseudo-réplicats d'un même site (et en calculant des paramètres de position et de dispersion). Les comparaisons inter-sites doivent être réalisées avec prudence, même en données relatives : il n'est par exemple pas évident que les progressions ou les régressions relatives des couvertures récifales soient comparables entre les sites dans la mesure où toutes les variables liées à la dynamique récifale (e.g. apports larvaires, nature géologique, colonisation par les épibiontes, dynamiques sédimentaires, etc.) ne sont pas identiques.

Ces guides méthodologiques fournissent donc une application logicielle qui permet de traiter les données acquises et de produire une information spatialisée et des métriques paysagères. Ces outils doivent donner aux gestionnaires des informations quantitatives nécessaires à la définition de l'état écologique des habitats à *Sabellaria alveolata* dans des zones d'intérêt écologique ou devant faire l'objet d'une évaluation. Et à ce titre, le protocole SISTER vient compléter le protocole REEHAB qui n'enregistre que des informations stationnelles, sur une surface limitée et figée. Même si les deux protocoles sont opérables de façon complètement indépendantes, les résultats des deux protocoles fournissent une aide mutuelle à l'interprétation. Tout comme le protocole REEHAB, on mesure ici l'importance de disposer de plusieurs années de suivi qui permettront de dissocier les variations inter-annuelles et locales, de grands cycles pluri-annuels ou de mesures de gestion pour lesquelles l'inertie écologique ne laisse pas apparaître immédiatement les résultats. Les différences entre les protocoles REEHAB et SISTER sont rappelés dans la Table 4.

Le protocole proposé répond à un besoin d'outils de suivis des habitats marins qui soient simples, à coûts humains et matériels maîtrisés, et transférables à l'échelle européenne. Il a été conçu pour être programmé avec des outils - ici les drones aériens - sur étagère et grand public, nécessitant des compétences relativement courantes d'opérateur drone. Il est également déployable sur le principe "une marée - un site" pour une équipe de 2 personnes (minimum - idéalement 3), afin d'optimiser le temps d'acquisition des images. Le fait d'avoir démontré que les suivis étaient optimaux en période hivernale (afin d'éviter ou de limiter une couverture algale opportuniste qui

gênait les classifications automatiques) apporte un élément de réponse important quant à la fréquence du suivi du protocole SISTER.

Table 04. Comparaison (différences et complémentarités) des protocoles REEHAB et SISTER du suivi des habitats récifaux à *Sabellaria alveolata* (hermelles). Les descriptions et le matériel nécessaire sont donnés pour le suivi d'un site.

	Protocole REEHAB	Protocole SISTER
Objectif du protocole	Suivi des trajectoires écologiques des formations récifales et des régimes écologiques associés	Suivi de la couverture récifale et production de métriques paysagères quantitatives
Emprise spatiale	5 quadrats fixes de 25 m ² (1 m ² = 1 sous-quadrat)	3 quadrats fixes virtuels de 1 ha (10 000 m ²)
Fréquence d'acquisition des données	2 fois par an (autour du plus froid [fev-mars] et du plus chaud [aout-sept] de l'année)	1 fois par an avec un couvert végétal minimal [fev-mars]
Type de données collectées	Recouvrement et dénombrement d'hermelles et épibiontes associés par sous-quadrat	Photographies de l'estran au nadir à 30 mètres d'altitude sur un hectare
Bancarisation et accessibilité des données	Quadrige - mise en place d'un protocole de saisie automatique (format Quadrilabo) – accès gratuit et libre	Stockage local (serveur sécurisé) - bancarisation à définir – accès gratuit sur demande
Type de traitement	Classification statistique de régimes écologiques - analyse de persistance et stabilité - modèles de distribution (boosted regression tree) - statistiques prédictives	Production d'une orthomosaïque puis deep learning (basé sur des CNN) sur images - calcul de métriques paysagères sur résultats

Résultats produits	Graphiques d'évolutions temporelles du nombre de sous-quadrats dans chaque régime écologique et quantité de sous-quadrats susceptibles de changer de régime	Carte modélisée (avec seuil d'incertitude) de présence/absence des récifs d'hermelles pour chaque hectare survolé – carte des changements spatiaux
Support informatique	Application web REEHAB sur https://reehab.ifremer.fr	Application logiciel SISTER-APP à télécharger sur https://www.hermelles.fr/Medias/Suivi-scientifique (fonctionnement autonome)
Guides terrain et analytique	https://www.hermelles.fr/Medias/Suivi-scientifique	
Moyens humains terrain (conditions optimales - pour opérateurs formés)	2 personnes x 2 jours par an (en période de grandes marées - coef > 100)	2 personnes x 1 jour par an (en période de grandes marées - coef > 100 - conditions météorologiques permettant le vol de drones)
Moyens humains laboratoire (conditions optimales - pour opérateurs formés)	1 personne x 1 jour par an (comprend saisie des données et utilisation de l'application) – hors temps rapportage si besoin	1 personne x 4 jours (comprends temps de traitement des orthomosaïques - dépendant vitesse de calcul disponible) – hors temps rapportage si besoin
Investissement matériel pour initier le déploiement du protocole	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Quadrat souple de 25 m² subdivisé en 25 sous-quadrats de 1 m² • 1 GPS de terrain • 1 Appareil photo numérique ou GoPro • 1 Téléphone portable de terrain • 6 Sondes de temperature (optionnel mais recommandé) • Feuilles terrain pour prise de notes et EPI selon nature des sites 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 drone (type Mavic Pro) avec capteur multispectral et positionnement RTK • 1 abonnement GSM pour positionnement RTK (ou moyen de correction a posteriori) • Matériel de sécurité et de signalisation des pilotes de drone + EPI terrain • 1 ordinateur puissant pour traitement des images • 1 logiciel de photogrammétrie (recommandé : Metashape - licence payante) • 1 antenne multi-bandes GNSS RTK Emlid (ou équivalent) pour PCS

Estimation du coût pour initier le déploiement du protocole (coûts marginaux)	Environ 1 200 euros	Environ 12 000 euros
Estimation du coût pour maintenir le protocole en routine (consommables - coûts marginaux)	<ul style="list-style-type: none"> • feuilles terrain à imprimer • éventuellement remplacement crochets si détériorations 	<ul style="list-style-type: none"> • vérification et remplacement éventuel du matériel drone (batteries / capteurs / radiocommande) • Feuilles pour PCS à re-imprimer éventuellement
Formation(s) / Diplôme(s) nécessaire(s)	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de diplôme particulier nécessaire • Autonomie assurée avec les guides terrain et analyse des données • Formation possible lors de workshop "REEHAB" ou aide spécifique sur demande motivée 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessité d'être titulaire du certificat de télépilote (UAV) • Autonomie assurée avec les guides terrain et analyse des données (ce document) • Formation possible lors de workshop "SISTER" ou aide ponctuelle sur demande motivée

2. Limites actuelles et perspectives de développements du protocole SISTER

La construction du protocole et ses tests ont été réalisés en utilisant 3 sites distincts du Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis. Ils ont été choisis afin de présenter une grande diversité de typologie de bioconstruction dans l'idée d'obtenir un outil transposable sur l'ensemble des côtes colonisées par les hermelles, c'est-à-dire l'ensemble de l'Europe.

La diversité des sites choisis a permis de réaliser un apprentissage du modèle sur une grande diversité de configurations spatiales. L'utilisation de l'intelligence artificielle permet de s'assurer de la même interprétation des images dans le temps. Elle offre une standardisation qui rend les données fiables et vierges de biais expérimentateur, car basée sur un set d'apprentissage commun. Néanmoins, plusieurs perspectives d'améliorations se dégagent de ce projet.

Dans un premier temps, la transférabilité souhaitée initialement reste à tester. Le protocole se veut applicable sur tous les estrans et ces tests n'ont pas été complètement aboutis. Certains survols complémentaires ont été réalisés sur des zones nouvelles non survolées (i.e. Pornic sur les côtes vendéennes et Douarnenez sur les côtes

bretonnes), mais des capteurs défectueux ne nous ont pas permis d'évaluer correctement le caractère transférable à des sites complètement nouveaux et non vus par le modèle. Une première perspective de développement est donc l'intégration de nouveaux sites à la chaîne de traitement, afin de tester - et de quantifier avec des métriques d'incertitudes et de précision sur les classements - la transférabilité du protocole vers de nouveaux sites.

Dans un deuxième temps, un travail pourrait être réalisé à l'échelle de chaque site d'étude pour qualifier la représentativité des zones d'intérêt choisies. Choisir 3 zones d'intérêt par site (ou moins si le site est plus petit comme pour le site-test de Vallières) est un *a priori* qui prend en compte essentiellement une dimension logistique de faisabilité. Le protocole est fait pour que les acquisitions se passent sur une marée, par grand coefficient – donc à l'échelle de 2 ou 3 heures au plus. Trois zones survolées permettent de fournir une valeur moyenne (et un écart-type associé) des métriques paysagères. Mais on peut aussi se dire que 3 zones ne suffisent pas à capter la variabilité des variations de la couverture spatiale de cet habitat et donc que plus de zones (éventuellement plus petites) permettraient d'avoir une puissance statistique supérieure (en diminuant l'erreur standard) pour tester des variations. Techniquement, l'application SISTER supporte des zones plus petites que 100 x 100. Il serait donc possible de tester les avantages et les inconvénients d'une multiplication de zones d'intérêt pour chaque site. Dans l'idéal, chaque site souhaitant déployer le protocole SISTER pourrait adapter la couverture spatiale en découpant une surface totale de survol en une marée en plusieurs zones d'intérêt dont le nombre et la taille serait adaptés à la bathymétrie et la configuration de la zone (donc le temps de travail disponible en une marée).

Dans un troisième temps, un travail de fond sur les métriques paysagères doit suivre ce projet. Et avant toute chose, il convient de revenir sur l'estimation des changements volumiques entre deux dates. L'idée est de fournir une carte des zones susceptibles d'accumuler du sable (accrétion) ou d'en perdre (érosion). Les sites tests ont montré l'importance de disposer de points de contrôle au sol (PCS) dont l'élévation est parfaitement connue afin de recalculer en z les deux levés. Il semble assez clair que des erreurs se sont glissées dans la création des MNS, sans que l'on puisse les identifier. Ces erreurs de positionnement ont artificiellement généré des zones d'accrétion, notamment sur le site-test des Grenettes. Les résultats relatifs aux changements volumiques des habitats récifaux est donc probablement biaisé dans les tests réalisés. Il convient de bien identifier les sources de cette erreur et trouver une solution pour éviter ce biais.

Dans l'approche proposée ici, un set de métriques complémentaires est calculé sur la base de ce qui est classiquement mis en avant dans la littérature. Une interprétation écologique est proposée afin de lier les variations des métriques aux processus écologiques de développement des habitats récifaux, tels que la dynamique de progradation-rétrogradation ou le recrutement de larves. Il semble néanmoins important de réaliser un travail de simulation pour connaître (i) l'étendue des valeurs

qu'il est possible d'obtenir (sur une zone, un site, ou même plus généralement sur l'ensemble des zones où le protocole SISTER est déployé) et (ii) les niveaux de variations des métriques suite à un recrutement ou une tempête automnale. A ce titre, une modélisation numérique pourrait être envisagée en faisant varier un mécanisme biologique artificiellement et en recalculant les métriques. Les approches de modélisation des processus de densité-dépendance basées sur des agents (ou agent-based modelling) semblent particulièrement bien adaptées à ce travail qui permettrait notamment de définir des seuils de variations significatives ou des niveaux d'intensité pour alerter les gestionnaires. Il y a donc un travail à poursuivre pour rendre plus performant ce protocole dans le guide qu'il fournit aux gestionnaires des sites surveillés.

Enfin dans un quatrième temps, un travail sur l'ergonomie de l'application pourrait être réalisé. Tout en gardant la volonté de disposer d'un outil gratuit et intuitif, des développements pourraient rendre l'utilisation de l'application plus intuitive et plus performante. Au-delà de la forme, d'autres fonctionnalités pourraient être envisagées après des phases tests, comme par exemple le fait de pouvoir subdiviser certaines zones d'intérêt et recalculer des métriques instantanément. Un formulaire pour identifier les utilisateurs et se nourrir des avis pourrait également être implémenté et contribuer à faire vivre la communauté des utilisateurs de SISTER.

En somme, il existe de nombreuses améliorations qu'une seconde étape de développements pourrait faire émerger. Le protocole SISTER est intrinsèquement lié à des outils technologiques qui évoluent rapidement. Les drones et les capteurs qu'ils embarquent nécessiteront quoi qu'il en soit des adaptations – ou *a minima* – des tests si certaines longueurs d'onde des capteurs multispectraux venaient à changer ou à disparaître (ce que nous avons déjà expérimenté pendant ce projet avec la disparition du 'bleu' du capteur multispectral). Il faut donc faire vivre ce protocole et le déployer sur le plus de sites possibles afin désormais d'acquérir des données dont de futurs développements pourront se nourrir.

Références

- Agisoft LLC. 2023. « Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 2.0 ». https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf.
- Brunier, Guillaume, Simon Oiry, Yves Gruet, Stanislas F. Dubois, et Laurent Barillé. « Topographic Analysis of Intertidal Polychaete Reefs (Sabellaria Alveolata) at a Very High Spatial Resolution ». *Remote Sensing* 14, no 2 (10 janvier 2022): 307. <https://doi.org/10.3390/rs14020307>.
- Collin, Antoine, Stanislas Dubois, Camille Ramambason, et Samuel Etienne. « Very High-Resolution Mapping of Emerging Biogenic Reefs Using Airborne Optical Imagery and Neural Network: The Honeycomb Worm (*Sabellaria Alveolata*) Case Study ». *International Journal of Remote Sensing* 39, no 17 (2 septembre 2018): 5660-75. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1484964>.
- Curd, Amelia, Celine Cordier, Louise B. Firth, Laura Bush, Yves Gruet, Patrick Le Mao, Julie A. Blaze, et al. « A broad-scale long-term dataset of Sabellaria alveolata distribution and abundance curated through the REEHAB (REEF HABitat) Project ». SEANOE, 2020. <https://doi.org/10.17882/72164>.
- Curd, Amelia, Fabrice Pernet, Charlotte Corporeau, Lizenn Delisle, Louise B. Firth, Flavia L.D. Nunes, et Stanislas F. Dubois. « Connecting Organic to Mineral: How the Physiological State of an Ecosystem-Engineer Is Linked to Its Habitat Structure ». *Ecological Indicators* 98 (mars 2019): 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.044>.
- Deng, Jia, Wei Dong, Richard Socher, Li-Jia Li, Kai Li, et Li Fei-Fei. 2009. « ImageNet: A large-scale hierarchical image database ». In 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 248-55. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206848>.
- Desroy, N., S. F. Dubois, J. Fournier, L. Ricquiers, P. Le Mao, L. Guerin, D. Gerla, M. Rougerie, et A. Legendre. « The Conservation Status of Sabellaria Alveolata (L.) (Polychaeta: Sabellariidae) Reefs in the Bay of Mont-Saint-Michel ». *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* 21, no 5 (août 2011): 462-71. <https://doi.org/10.1002/aqc.1206>.
- Dubois, S., C. Retiere, et F. Olivier. « Biodiversity Associated with Sabellaria Alveolata (Polychaeta : Sabellariidae) Reefs: Effects of Human Disturbances ». *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 82, no 5 (octobre 2002): 817-26. <https://doi.org/10.1017/S0025315402006185>.
- Dubois, S., L. Barille, B. Cognie, et P. G. Beninger. « Particle Capture and Processing Mechanisms in Sabellaria Alveolata (Polychaeta : Sabellariidae) ». *Marine Ecology Progress Series* 301 (2005): 159-71. <https://doi.org/10.3354/meps301159>.
- Dubois, Stanislas, John A. Commito, Frederic Olivier, et Christian Retiere. « Effects of Epibionts on Sabellaria Alveolata (L.) Biogenic Reefs and Their Associated Fauna in the Bay of Mont Saint-Michel ». *Estuarine Coastal and Shelf Science* 68, no 3-4 (juillet 2006): 635-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.03.010>.
- Dubois, Stanislas, Laurent Barille, et Bruno Cognie. « Feeding Response of the Polychaete Sabellaria Alveolata (Sabellariidae) to Changes in Seston Concentration ». *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 376, no 2 (15 août 2009): 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2009.06.017>.
- Firth, Louise B., Amelia Curd, Stephen J. Hawkins, Antony M. Knights, Julie A. Blaze, Michael T. Burrows, Stanislas F. Dubois, et al. « On the Diversity and Distribution of a Data Deficient Habitat in a Poorly Mapped Region: The Case of Sabellaria Alveolata L. in Ireland ». *Marine Environmental Research* 169 (juillet 2021): 105344. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105344>.
- Goldberg, Walter M. *The biology of reefs and reef organisms*. Chicago: University of Chicago Press, 2013.

- Gruet, Yves. « Spatio-Temporal Changes of Sabellarian Reefs Built by the Sedentary Polychaete *Sabellaria Alveolata* (Linné) ». *Marine Ecology* 7, no 4 (décembre 1986): 303-19. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1986.tb00166.x>.
- Hendrick, Vicki J., et Robert L. Foster-Smith. « *Sabellaria Spinulosa* Reef: A Scoring System for Evaluating 'Reefiness' in the Context of the Habitats Directive ». *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 86, no 4 (août 2006): 665-77. <https://doi.org/10.1017/S0025315406013555>.
- Holt, T.J., E.I. Rees, S.J. Hawkins, et R. Seed. « Biogenic Reefs. An overview of dynamic and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs. » Scottish Association for Marine Science (UK Marine SACs Project), 1998. http://ukmpa.marinebiodiversity.org/uk_sacs/pdfs/biogreef.pdf.
- Jackson-Bué, Tim, Ally J. Evans, Peter J. Lawrence, Paul R. Brooks, Sophie L. Ward, Stuart R. Jenkins, Pippa J. Moore, Tasman P. Crowe, Simon P. Neill, et Andrew J. Davies. 2024. « Habitat structure shapes temperate reef assemblages across regional environmental gradients ». *Science of The Total Environment* 906 (janvier): 167494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167494>.
- Jackson-Bué, Tim, Ally J. Evans, Peter J. Lawrence, Paul R. Brooks, Sophie L. Ward, Stuart R. Jenkins, Pippa J. Moore, Tasman P. Crowe, Simon P. Neill, et Andrew J. Davies. « Habitat Structure Shapes Temperate Reef Assemblages across Regional Environmental Gradients ». *Science of The Total Environment* 906 (janvier 2024): 167494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167494>.
- Jones, Ag, Sf Dubois, N Desroy, et J Fournier. « Intertidal Ecosystem Engineer Species Promote Benthic-Pelagic Coupling and Diversify Trophic Pathways ». *Marine Ecology Progress Series* 660 (18 février 2021): 119-39. <https://doi.org/10.3354/meps13600>.
- Jones, Auriane G., Stanislas F. Dubois, Nicolas Desroy, et Jérôme Fournier. « Interplay between abiotic factors and species assemblages mediated by the ecosystem engineer *Sabellaria alveolata* (Annelida: Polychaeta) ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 200, no Supplement C (2018): 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.10.001>.
- Le Cam, Jean-Benoît, Jérôme Fournier, Samuel Etienne, et Jérôme Couden. « The Strength of Biogenic Sand Reefs: Visco-Elastic Behaviour of Cement Secreted by the Tube Building Polychaete *Sabellaria Alveolata*, Linnaeus, 1767 ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 91, no 2 (janvier 2011): 333-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.10.036>.
- LeCun, Yann, Yoshua Bengio, et Geoffrey Hinton. 2015. « Deep Learning ». *Nature* 521 (7553): 436-44. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
- Lisco, S., M. Moretti, V. Moretti, F. Cardone, G. Corriero, et C. Longo. « Sedimentological features of *Sabellaria spinulosa* bioconstructions ». *Marine and Petroleum Geology, Sedimentology in Italy: recent advances and insights*, 87 (1 novembre 2017): 203-12. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.013>.
- Lisco, Stefania Nunzia, Pasquale Acquafredda, Salvatore Gallicchio, Luisa Sabato, Andrea Bonifazi, Frine Cardone, Giuseppe Corriero, Maria Flavia Gravina, Cataldo Pierri, et Massimo Moretti. « The Sedimentary Dynamics of *Sabellaria Alveolata* Bioconstructions (Ostia, Tyrrhenian Sea, Central Italy) ». *Journal of Palaeogeography* 9, no 1 (décembre 2020): 2. <https://doi.org/10.1186/s42501-019-0050-6>.
- Lowe, David G. 2004. « Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints ». *International Journal of Computer Vision* 60 (2): 91-110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.
- Muller, Alexandre, Camille Poitrimol, Flávia L. D. Nunes, Aurélien Boyé, Amelia Curd, Nicolas Desroy, Louise B. Firth, et al. « Musical Chairs on Temperate Reefs: Species Turnover and Replacement Within Functional Groups Explain Regional Diversity Variation in Assemblages

Associated With Honeycomb Worms ». *Frontiers in Marine Science* 8 (11 mai 2021): 654141. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.654141>.

- Noernberg, Mauricio Almeida, Jérôme Fournier, Stanislas Dubois, et Jacques Populus. « Using airborne laser altimetry to estimate Sabellaria alveolata (Polychaeta: Sabellariidae) reefs volume in tidal flat environments ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 90, no 2 (10 décembre 2010): 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.07.014>.
- Pell, Taleatha, Joan Y. Q. Li, et Karen E. Joyce. 2022. « Demystifying the Differences between Structure-from-Motion Software Packages for Pre-Processing Drone Data ». *Drones* 6 (1): 24. <https://doi.org/10.3390/drones6010024>.
- Plicanti, Adriana, Davide Iacofano, Iacopo Bertocci, et Sabrina Lo Brutto. « The Amphipod Assemblages of Sabellaria Alveolata Reefs from the NW Coast of Portugal: An Account of the Present Knowledge, New Records, and Some Biogeographic Considerations ». *Marine Biodiversity* 47, no 2 (juin 2017): 521-34. <https://doi.org/10.1007/s12526-016-0474-5>.
- Simonyan, Karen, et Andrew Zisserman. 2015. « Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition ». arXiv:1409.1556 [cs], avril. <http://arxiv.org/abs/1409.1556>.

Abréviations

CNN	Convolutional Neural Network
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
MNS	Modèle Numérique de Surface
PCS	Point de Contrôle au Sol
PPK	Post-Processed Kinematic
RGP	Réseau GNSS Permanent
RTH	Return To Home
RTK	Real Time Kinematic
SIG	Système d'Information Géographique
SRC	Système de référence de coordonnées
VGG	Visual Geometry Group
ZI	Zone d'Intérêt