

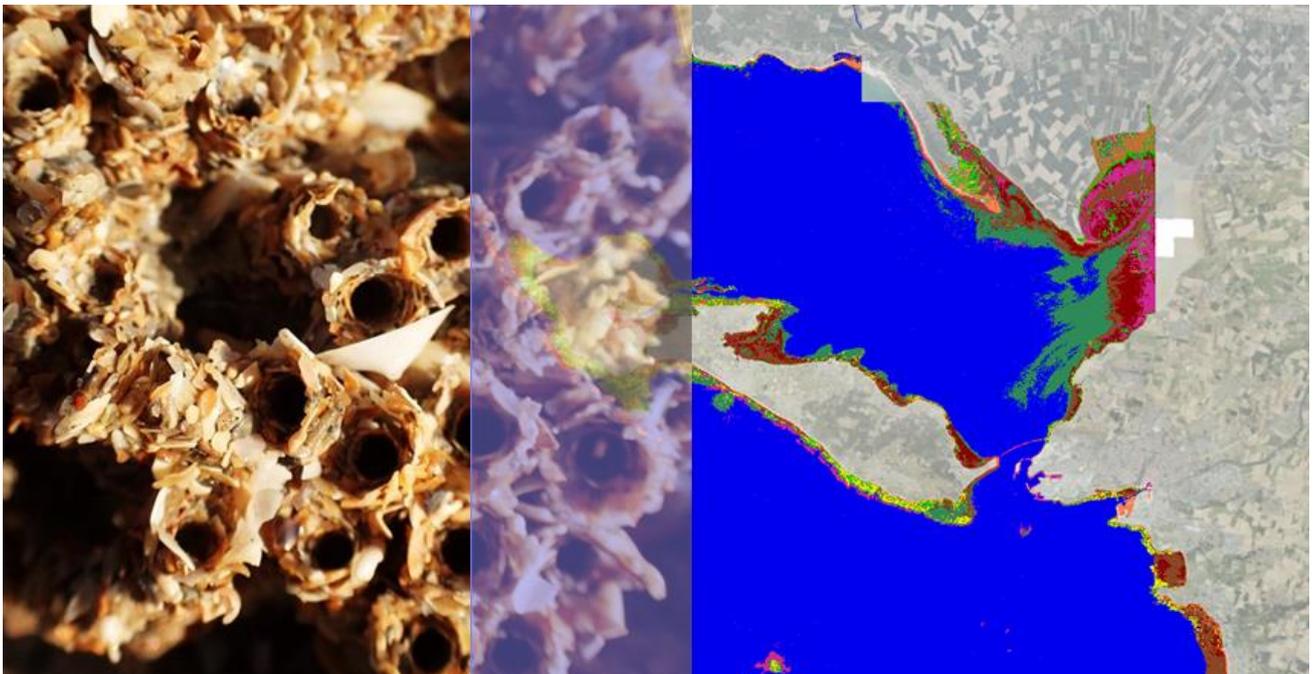


École Pratique
des Hautes Études

PSL 



Action 1: Rapport sur la cartographie des formations récifales à *Sabellaria alveolata* dans le Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis



Olivia LE GAL, Dorothée JAMES, Stanislas DUBOIS et Antoine COLLIN
Centre de GéoEcologie Littorale
Ecole Pratique des Hautes Etudes – Paris Sciences Lettres Université
Mai 2023



Ce document a pu être produit au soutien de la Région Nouvelle Aquitaine

Résumé

L'espace intertidal du Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis a été classifié via l'intelligence artificielle et notamment l'apprentissage automatique basée sur l'algorithme probabiliste de maximum de vraisemblance. D'un bloc ou fractionné en 5 zones géographiques pourvue d'hermelles, plusieurs dizaines de classifications ont été générées en utilisant l'imagerie satellite Sentinel-2 (optique) et Sentinel-1 (RADAR) à 10 m de résolution spatiale, Pléiades-1 (optique) à 2 m, aérienne BD-Ortho (optique) à 0,5 m et Ortho-HR (optique) à 0,2 m. Les classifications de ces imageries spatio- et aéroportées ont été calibrées et validées par l'Ortho-HR, dont la photo-interprétation a permis de mettre en exergue neuf habitats : hermelles, platiers, algues vertes, algues brunes, sédiments secs, sédiments humides, eau de mer, tables ostréicoles et bateaux.

La meilleure classification des neuf habitats (*Overall Accuracy* : 88,06 %) a été atteinte avec l'imagerie optique (bleu-vert-rouge et infrarouge) de la BD-Ortho (0,5 m de résolution spatiale) en additionnant les classifications des 5 zones géographiques (et non en classifiant le Parc d'un bloc : 78,02%). Les scores des classifications des zones ont touché 84,10 % pour Rochelle Nord, 87,34% pour Oléron, 87,53% pour Ré, 87,62 % pour Entrée Estuaire, et 93,73% pour Vendée SO (Annexe 4, Tableau 15).

En ne se focalisant que sur l'habitat « hermelles » (*Producer's* et *User's Accuracy* : 84,11% et 84,42%, respectivement), la meilleure classification fut produite avec le couplage de l'imagerie optique Sentinel-2 (12 bandes) et RADAR Sentinel-1 (σ_{0dBVV}) à 10 m de résolution spatiale, toujours, en additionnant les classifications des 5 zones géographiques (et non en classifiant le Parc d'un bloc : 75,48% et 61,32%, respectivement). Les scores *Producer's Accuracy* (considérant les erreurs d'omissions) des zones furent : Rochelle Nord (68,77%), Ré (83,14%), Entrée Estuaire (87,27%), Oléron (87,67%), et Vendée SO (93,55%).

Les scores *User's Accuracy* (considérant les erreurs de commissions) des zones furent, quant à elles : Ré (73,58%), Vendée SO (81,05%), Oléron (81,66%), Rochelle Nord (82,48%), et Entrée Estuaire (93,55%).

En ressortent trois grands effets mesurés sur la qualité des résultats des classifications :

- Echelle : classier zone par zone plutôt qu'une grande zone ;
- Résolution spatiale : classier à la très haute résolution plutôt que de la moyenne pour les neuf habitats mais classier à la moyenne résolution pour les hermelles ;
- Résolution spectrale : classier avec l'infrarouge en plus du bleu-vert-rouge pour Ortho-HR, BD-Ortho et P1MS, et avec toutes les bandes pour S2, si possible avec le σ_{0dBVV} de S1 (uniquement pour améliorer les hermelles).

Deux perspectives importantes sont à intégrer :

- Test des nouveaux capteurs satellitaires bénéficiant d'une plus haute résolution spectro- spatiale (Pléiades-NEO) et spectro-temporel (PlanetScope SuperDove) ;
- Test d'autres algorithmes d'intelligence artificielle (forêts aléatoires, réseaux de neurones superficiels et profonds).

Table des matières

1 - INTRODUCTION	7
2 - MATERIELS ET METHODES	9
2.1 SITE D'ETUDE	9
2.2 CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS CAPTEURS SELECTIONNES POUR REALISER LA CARTOGRAPHIE MULTI-SOURCES ET MULTI-ECHELLES DE LA ZONE INTERTIDALE DU PARC NATUREL MARIN	10
2.2.1 PRESENTATION DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU CAPTEUR SENTINEL-2	10
2.2.2 PRESENTATION DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU CAPTEUR SENTINEL-1	12
2.2.3 PRESENTATION DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU CAPTEUR PLEIADES-1	15
2.3 PRESENTATION DES JEUX DE DONNEES SELECTIONNES ET DE LEURS PRINCIPAUX (PRE-) TRAITEMENTS AVANT EXPLOITATION	16
2.3.1 SENTINEL-2	16
2.3.2 SENTINEL-1	19
2.3.3 FUSION DES DONNEES SENTINEL-2 ET SENTINEL-1	23
2.3.4 PLEIADES-1	24
2.3.5 SELECTION DES ORTHO-HR (HAUTE RESOLUTION) ET DES BD-ORTHO	26
2.3.6 CREATION DE MASQUES POUR L'OPTIMISATION DES TEMPS DE TRAITEMENT	28
2.3.7 RECAPITULATIF GLOBAL DES DONNEES SELECTIONNEES ET DE LEURS PRINCIPAUX TRAITEMENTS EN VUE DE LA CLASSIFICATION DES RECIFS D'HERMELLES	29
2.3.8 APPORT D'UN PREDICTEUR SUPPLEMENTAIRE : DONNEE NUALID (NUAGE DE POINTS LIDAR)	31
2.4 CREATION DES VERITES TERRAIN (CALIBRATION ET VALIDATION)	32
2.5 CHAINE DE TRAITEMENTS POUR TRANSFERER LES VERITES TERRAINS (CALIBRATION ET VALIDATION) VERS LES JEUX DE DONNEES MULTI-ECHELLES	35
2.6 CLASSIFICATION SUPERVISEE PAR MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE	38
2.7 ÉVALUATION DE LA PRECISION ET VALIDATION DES RESULTATS	38
2.8 POST-TRAITEMENTS ET LIVRABLES	39
3 – RESULTATS ET DISCUSSION	40
3.1 EFFET DE L'ECHELLE D'ANALYSE LOCALE (MOYENNE DES 5 SOUS-ZONES POURVUS D'HERMELLES) VERSUS REGIONALE (PARC)	40
3.2 EFFET DE LA RESOLUTION SPATIALE	45
3.1.1 EFFET SPATIAL AVEC LA REFERENCE RVB	45
3.1.2 EFFET SPATIAL AVEC LA REFERENCE RVB+IR	45
3.3 EFFET DE LA TOPOGRAPHIE	46
3.4 EFFET DE LA RESOLUTION SPECTRALE	48
3.4.1 CONTRIBUTION DE L'IR A L'IMAGERIE DE L'ORTHO-HR	48
3.4.2 CONTRIBUTION DE L'IR A L'IMAGERIE DE LA BD-ORTHO	50
3.4.3 CONTRIBUTION DE L'IR A L'IMAGERIE DE PLEIADES-1	50
3.4.4 CONTRIBUTION DES BANDES SPECTRALES A L'IMAGERIE DE SENTINEL-2	53
3.4.5 COMBINAISON DES BANDES SPECTRALES SENTINEL-1 AUX 12 BANDES SENTINEL-2	56
3.5 POLYGONES VECTORIELS D'HERMELLES ET LIVRABLES	62
3.6 BIG DATA : POIDS DES FICHIERS ET TEMPS DE TRAITEMENT	62

Table des figures

FIGURE 1 : TUBES DE SABLES COQUILLERS CONSTRUITS PAR LES HERMELLES GREGAIRES *SABELLARIA ALVEOLATA* 7

FIGURE 2 : RECIFS D’HERMELLES DE SAINTE-ANNE DANS LA BAIE DU MONT-SAINT-MICHEL (CGEL) 7

FIGURE 3 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DU SITE D’ETUDE 9

FIGURE 4 : SATELLITE SENTINEL-2 ©ESA 10

FIGURE 5 : SATELLITE SENTINEL-1 ©ESA 12

FIGURE 6 : A) CHAMP DE POLARISATION LINEAIRE VERTICALE. B) CHAMP DE POLARISATION LINEAIRE HORIZONTALE (SOURCE : [HTTPS://SCIHUB.COPERNICUS.EU/USERGUIDE/](https://scihub.copernicus.eu/userguide/)) 13

FIGURE 7 : NIVEAUX DES PRODUITS SENTINEL-1 EN FONCTION DES MODES D’ACQUISITION (SOURCE : [HTTPS://SCIHUB.COPERNICUS.EU/USERGUIDE/](https://scihub.copernicus.eu/userguide/)) 14

FIGURE 8 : DIFFERENCE DE RESOLUTION SPATIALE ENTRE UNE DONNEE *SINGLE LOOK COMPLEX* ET UNE DONNEE *GROUND RANGE DETECTED* (SOURCE : SITE ESA) 14

FIGURE 9 : SATELLITE PLEIADES ©CNES-AIRBUS 15

FIGURE 10 : DONNEES SENTINEL-2 SELECTIONNEES (SOURCE : [HTTPS://SCIHUB.COPERNICUS.EU/DHUS/#/HOME](https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home)) 17

FIGURE 12 : DONNEE SENTINEL-1 SELECTIONNEE (SOURCE : [HTTPS://SCIHUB.COPERNICUS.EU/DHUS/#/HOME](https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home)) 20

FIGURE 13 : CONSTRUCTION DU *GRAPH BUILDER* DANS *SNAP* - PRETRAITEMENTS APPLIQUES AUX DONNEES SENTINEL-1 AVANT EXPLOITATION 21

FIGURE 14 : CONVERSION DE LA DONNEE SENTINEL-1-*GRDH* DE NIVEAU 1 EN DONNEE Σ_{0dB} , POLARISATION CROISEE VH 23

FIGURE 15 : CONVERSION DE LA DONNEE SENTINEL-1-*GRDH* DE NIVEAU 1 EN DONNEE Σ_{0dB} , POLARISATION SIMPLE VV 23

FIGURE 16A : DONNEES PLEIADES 1 - MULTISPECTRALES DU SITE D’ETUDE 25

FIGURE 16B : DONNEES PLEIADES 1 - PANCHROMATIQUE DU SITE D’ETUDE 25

FIGURE 17 : DECOUPAGE DE LA ZONE D’ETUDE EN 8 SOUS-ZONES SUR LES ORTHO-HR – TAILLE DE CHAQUE SOUS-ZONE POUR LA DONNEE ORTHO-HR RVB 0,2 M 28

FIGURE 18 : MASQUAGE DES DONNEES NON UTILES A L’ECHELLE DU PARC NATUREL MARIN SUR LE JEU DE DONNEES SENTINEL-2 29

FIGURE 20 : ZONES COUVERTES PAR DES NUAGES DE POINTS *LIDAR* 31

FIGURE 21 : POLYONES DES RECIFS D’HERMELLES (EN ROUGE) DE L’ILE D’OLERON, VALIDES PAR L’OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITE 33

FIGURE 22 : REPARTITION EQUITABLE DES REGIONS D’INTERET ENTRE CLASSES CALIBRATION ET VALIDATION 34

FIGURE 23 : RE-ECHANTILLONNAGE DES CLASSES CALIBRATION ET VALIDATION DANS *ENVI CLASSIC 5.3* POUR LA SOUS-ZONE 1 OLERON 34

FIGURE 24 : SCHEMA SIMPLIFIE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS DANS *ENVI CLASSIC 5.3* - OBTENTION DES DONNEES CALIBRATION ET VALIDATION MULTI-ECHELLES UTILISEES POUR LES CLASSIFICATIONS 36

FIGURE 25 : CLASSIFICATION PAR MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE DE LA BD-ORTHO (RVB) A 0,5 M 41

FIGURE 26 : CLASSIFICATION PAR MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE DE LA BD-ORTHO (RVB-IR) A 0,5 M 43

FIGURE 27 : EFFET DE L’ECHELLE D’ANALYSE SUR LES *OA*, *PA*(HERMELLES) ET *UA*(HERMELLES) DE LA COMBINAISON RVB A L’ECHELLE LOCALE DES 5 SOUS-ZONES ET REGIONALE DU PARC 44

FIGURE 28 : EFFET DE L’ECHELLE D’ANALYSE SUR LES *OA*, *PA*(HERMELLES) ET *UA*(HERMELLES) DE LA COMBINAISON RVB-IR A L’ECHELLE LOCALE DES 5 SOUS-ZONES ET REGIONALE DU PARC 44

FIGURE 29 : EFFET DE LA RESOLUTION SPATIALE EN FONCTION DE LA TAILLE DES PIXELS SUR LES *OA*, *PA*(HERMELLES) ET *UA*(HERMELLES) DE LA COMBINAISON RVB A L’ECHELLE LOCALE DES 5 SOUS-ZONES 45

FIGURE 30 : EFFET DE LA RESOLUTION SPATIALE EN FONCTION DE LA TAILLE DES PIXELS SUR LES *OA*, *PA*(HERMELLES) ET *UA*(HERMELLES) DE LA COMBINAISON RVB+IR A L’ECHELLE LOCALE DES 5 SOUS-ZONES 46

FIGURE 31 : EFFET DE LA TOPOGRAPHIE (Z) EN FONCTION DE LA TAILLE DES PIXELS SUR L’*OVERALL ACCURACY* DE LA COMBINAISON RVB A L’ECHELLE LOCALE (5 SOUS-ZONES) 47

FIGURE 32 : EFFET DE LA TOPOGRAPHIE (Z) EN FONCTION DE LA TAILLE DES PIXELS SUR L’*OVERALL ACCURACY* DE LA COMBINAISON RVB-IR A L’ECHELLE LOCALE (5 SOUS-ZONES) 47

FIGURE 33 : EFFET DE LA RESOLUTION SPECTRALE DE L'ORTHO-HR (0,2 M) SUR LA MOYENNE DES OA, PA(HERMELLES) ET UA(HERMELLES) A L'ECHELLE LOCALE DES 5 SOUS-ZONES.....	48
FIGURE 34 : CLASSIFICATION PAR MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE DE L'ORTHO-HR (RVB-IR) A 0,2 M	49
FIGURE 35 : EFFET DE LA RESOLUTION SPECTRALE DE LA BD-ORTHO (0,5 M) SUR LA MOYENNE DES OA, PA(HERMELLES) ET UA(HERMELLES) A L'ECHELLE LOCALE DES 5 SOUS-ZONES.....	50
FIGURE 36 : EFFET DE LA RESOLUTION SPECTRALE DE PLEIADES-1 (2 M) SUR LA MOYENNE DES OA, PA(HERMELLES) ET UA(HERMELLES) A L'ECHELLE LOCALE DES 5 SOUS-ZONES.....	51
FIGURE 37 : CLASSIFICATION PAR MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE DE PLEIADES-1 (RVB-IR) A 2 M	52
FIGURE 38 : EFFET DE LA RESOLUTION SPECTRALE DE SENTINEL-2 (10 M) SUR LA MOYENNE DES OA, PA(HERMELLES) ET UA(HERMELLES) A L'ECHELLE LOCALE DES 5 SOUS-ZONES.....	54
FIGURE 39 : CLASSIFICATION PAR MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE DE SENTINEL-2 (12 BANDES) A 10 M	55
FIGURE 40 : EFFET DE LA RESOLUTION SPECTRALE SUR LES OA, PA(HERMELLES) ET UA(HERMELLES) A PARTIR DE DIFFERENTES COMBINAISONS SPECTRALES ENTRE LES 12 BANDES DE SENTINEL-2 ET LES PRODUITS DE SENTINEL-1 A L'ECHELLE LOCALE DES 5 SOUS-ZONES.....	57
FIGURE 41 : CLASSIFICATION PAR MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE DE SENTINEL-2 (12 BANDES) + SENTINEL-1 ($\Sigma_{0dB}VV$) A 10 M	59
FIGURE 42 : <i>OVERALL ACCURACIES</i> DES ECHELLES LOCALES ET REGIONALES A PARTIR DE COMBINAISONS SPECTRALES DES 12 BANDES SENTINEL-2 ET DES 12 BANDES DE SENTINEL-2 + $\Sigma_{0dB}VV$ SENTINEL-1	60
FIGURE 43 : PA(HERMELLES) DES ECHELLES LOCALES ET REGIONALES A PARTIR DE COMBINAISONS SPECTRALES DES 12 BANDES SENTINEL-2 ET DES 12 BANDES DE SENTINEL-2 + $\Sigma_{0dB}VV$ SENTINEL-1.....	61
FIGURE 44 : UA(HERMELLES) DES ECHELLES LOCALES ET REGIONALES A PARTIR DE COMBINAISONS SPECTRALES DES 12 BANDES SENTINEL-2 ET DES 12 BANDES DE SENTINEL-2 + $\Sigma_{0dB}VV$ SENTINEL-1.....	61
FIGURE 45 : MOYENNE DES TEMPS DE TRAITEMENT DE CLASSIFICATION <i>MAXIMUM LIKELIHOOD</i> EN FONCTION DES COMBINAISONS SPECTRALES ET DE L'ECHELLE D'ANALYSE SUR LES JEUX DE DONNEES SENTINEL-2 ET SENTINEL-1 (10 M)	63
FIGURE 46 : MOYENNE DES TEMPS DE TRAITEMENT DE CLASSIFICATION <i>MAXIMUM LIKELIHOOD</i> EN FONCTION DES COMBINAISONS SPECTRALES ET DE L'ECHELLE D'ANALYSE SUR LE JEU DE DONNEE PLEIADES-1 MULTISPECTRAL (2 M).....	63
FIGURE 47 : MOYENNE DES TEMPS DE TRAITEMENT DE CLASSIFICATION <i>MAXIMUM LIKELIHOOD</i> EN FONCTION DES COMBINAISONS SPECTRALES ET DE L'ECHELLE D'ANALYSE SUR LE JEU DE DONNEE BD-ORTHO (0,5 M).....	64
FIGURE 48 : MOYENNE DES TEMPS DE TRAITEMENT DE CLASSIFICATION <i>MAXIMUM LIKELIHOOD</i> EN FONCTION DES COMBINAISONS SPECTRALES A L'ECHELLE D'ANALYSE LOCALE SUR LE JEU DE DONNEE ORTHO-HR (0,2 M)	64

1 - Introduction

Sabellaria alveolata (Linnaeus, 1767), plus connu sous le nom d'hermelle, est un ver marin grégaire capable de produire des structures biogéniques (Figure 1).



Figure 1 : Tubes de sables coquillers construits par les hermelles grégaires *Sabellaria alveolata*

Espèce ingénieuse, vivant sur la zone intertidale de la côte européenne, de la Mer du Nord à la Méditerranée occidentale (1), elle capture et cimente des particules de sable pour construire des tubes de 5 à 10 mm de diamètre dans lesquels elle s'abrite à marée basse. Accolés les uns aux autres, ces tubes forment des bioconstructions à structure tridimensionnelle complexe, appelées communément récifs (Figure 2).



Figure 2 : Récifs d'hermelles de Sainte-Anne dans la baie du Mont-Saint-Michel (CGEL)

Situé dans la zone de balancement des marées à fort hydrodynamisme, ce polychète joue un rôle écologique de première importance fournissant de précieux services écosystémiques. Suspensivores, les hermelles filtrent l'eau et contribuent au transfert de la matière organique au sein des écosystèmes. Leurs récifs offrent une très grande diversité de niches écologiques à de nombreuses espèces qui viennent s'y abriter ou se reproduire (2). Ces récifs ont aussi un effet protecteur contre l'érosion (3) (4).

Point chaud de biodiversité, *S. alveolata* est listée sous l'Annexe 1 de la Directive Européenne Habitat Faune-Flore (*Council Directive EEC/92/43*) en tant qu'habitats marins à protéger. Depuis 2008, la Directive Cadre sur la Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) a pour objectif l'atteinte du « bon état écologique » des habitats marins. Les habitats récifaux y sont particulièrement ciblés, en particulier les constructions biogéniques. Cependant, à ce jour, cette espèce ne bénéficie d'aucune mesure de gestion et de protection à l'échelle nationale et européenne. Les pressions anthropiques qu'elles subissent sont pourtant multiples, pouvant être directes (fragmentation des structures par piétinement et arrachage des algues épibiontes lors des pêches à pied (5) (6) (7)) ou indirectes (aquaculture industrielle d'huîtres et de moules, compétiteurs de nourriture et d'espace (8)) Ces pressions provoquent depuis plusieurs années une dégradation de leur état de santé (9).

A l'échelle du Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis, la distribution géographique des récifs d'hermelles reste encore mal connue. Contrairement au récif massif de quelques km² de Sainte-Anne dans la baie du Mont-Saint-Michel (Bretagne), la distribution des hermelles du Parc est éparse et inféodée aux substrats rocheux en milieu turbide. Les récifs d'hermelles de la baie du Mont-Saint-Michel ou encore ceux du site de la Barbâtre à Noirmoutier (Pays de la Loire) ont fait l'objet de nombreuses études sur le terrain, par survol de drone et par approche satellitaire (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17). Les récifs d'hermelles du Parc restent moins documentés scientifiquement, bien qu'un suivi ait lieu depuis trois ans dans le cadre du projet CoEHCo via l'initiative REEHAB (pour REEHABitat, <https://www.hermelles.fr/Le-projet-REEHAB>). REEHAB, piloté par Ifremer, a permis de développer un protocole standardisé de suivi des formations récifales *S.alveolata* à l'échelle européenne (18), répondant aux Directives Européennes citées ci-dessus. Il est aujourd'hui déployé à haute résolution temporelle sur l'ensemble des côtes européennes.

En complément du protocole REEHAB, un nouveau projet, toujours piloté par Ifremer, appelé SISTER (*Surface Imaging Solution for TEmperate Reefs*), a été lancé en octobre 2021. En collaboration avec l'Office Français de la Biodiversité (OFB-Parc) et l'École Pratique des Hautes Etudes (EPHE) de Dinard, il a pour objectif de cartographier à partir d'imagerie drones et de *machine learning*, les récifs d'hermelles et les communautés rocheuses associées au sein du Parc naturel marin.

L'étude proposée ici est une approche complémentaire de ces deux premières méthodologies. L'objectif général est d'implémenter une méthodologie basée sur la télédétection satellitaire multi-source optique et *RADAR*, adaptée à l'échelle du Parc, pour classifier la probabilité de présence de neuf habitats intertidaux dont les hermelles. Seront évalués les effets de l'échelle d'analyse, de la résolution spatiale et de la résolution spectrale, d'où la problématique-titre suivante :

Classifications satellitaires optiques et *RADAR* des récifs biogéniques intertidaux : Sentinel-1, Sentinel-2 et Pléiades-1 au service des hermelles (*Sabellaria alveolata*) du Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis.

2 - Matériels et Méthodes

2.1 Site d'étude

Créé en 2015, le Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis est une aire marine protégée s'étirant des côtes de la Vendée au nord jusqu'à l'estuaire de la Gironde au sud, en passant par la Charente Maritime (Figure 3).

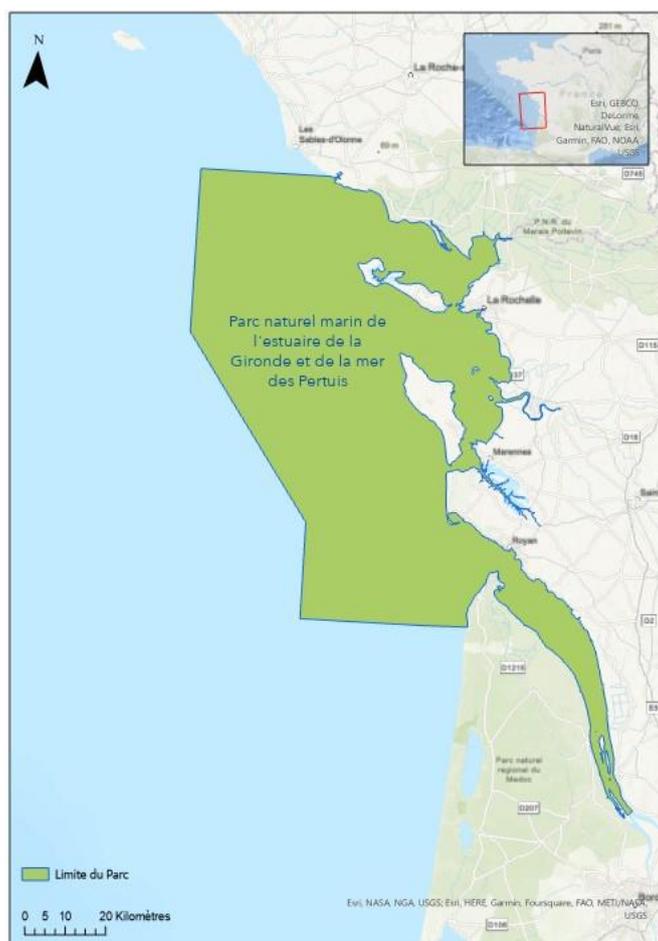


Figure 3 : Situation géographique du site d'étude

A cheval sur trois départements (La Vendée, la Charente Maritime et la Gironde), sa surface est de 6500 km². Avec 1300 km de côte sur la façade Atlantique, ce vaste espace marin protégé (couvert à 99,47% par le réseau Natura 2000) est géré par l'OFB. Les marées dans le secteur du Parc sont mésotidales avec un marnage variant entre 2 et 4 m. Six estuaires entre le nord et le sud du Parc (le Payré, le Lay, la Sèvre niortaise, la Charente, la Seudre et le plus vaste d'Europe occidentale, celui de la Gironde) y apportent une très forte turbidité. Sous influence de ces apports en eaux douces, cette aire marine protégée présente une forte production planctonique déterminante pour la biodiversité. Les vastes vasières qui caractérisent le Parc, les côtes sableuses et les estrans rocheux, sont des lieux d'alimentation, de reproduction et de nurserie essentiels pour de nombreuses espèces.

L'OFB a pour mission, d'une part, de préserver ces écosystèmes extrêmement riches et, d'autre part, de concilier cette préservation avec l'existence de nombreuses activités maritimes : conchyliculture, pêche côtière et estuarienne, activité portuaire, tourisme).

2.2 Caractéristiques des différents capteurs sélectionnés pour réaliser la cartographie multi-sources et multi-échelles de la zone intertidale du Parc

Les capteurs retenus pour cette étude sont Sentinel-2 (S2), Sentinel-1 (S1) et Pléiades-1 (P1). Ce choix de satellites a été fait pour obtenir la plus grande complémentarité possible d'informations entre les jeux de données. En effet, l'utilisation de ces trois capteurs offre la possibilité de surveiller les propriétés physiques, chimiques, sédimentologiques et biologiques des différents éléments à classer sur la zone d'étude. Les images ouvertes S1 et S2 sont en accès libre sur le site de l'*European Space Agency* (ESA) (<http://scihub.copernicus.eu/dhus/>). De nombreuses informations sur ces jeux de données sont aussi disponibles grâce aux guides techniques. (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/>). Les images commerciales du capteur P1 proviennent d'une commande de l'OFB_Parc à l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN) en date d'avril 2020. Elles ont été téléchargées depuis la plateforme Dinamis (<https://catalogue-dinamis.data-terra.org/>).

2.2.1 Présentation des principales caractéristiques du capteur Sentinel-2

La mission S2 (Figure 4), menée par ESA dans le cadre du programme Copernicus, est une mission d'imagerie multispectrale (MS) à haute résolution (10, 20 ou 60 m selon la bande spectrale) et à large fauchée (290 km).



Figure 4 : Satellite Sentinel-2 ©ESA

Sentinel-2A (S2A) a été lancé le 23 juin 2015, puis Sentinel-2B (S2B) le 7 mars 2017 à 786 km d'altitude. Ce sont des satellites optiques à capteur passif, ils utilisent l'énergie solaire et enregistrent la radiance en $W.m^{-2}.sr^{-1}$.

L'instrument multispectral S2 échantillonne 13 bandes spectrales dans le domaine du visible, du Proche Infrarouge (IR) et Moyen Infrarouge (MIR, Tableau 1).

Tableau 1 : Bandes spectrales de Sentinel-2 (Source : <https://sentinel.esa.int/>)

Numéro de bande	Description	Longueur d'onde centrale (nm)	Bande passante (nm)	Résolution spatiale (m)
1	Aérosols côtiers	443	21	60
2	Bleu	493	66	10
3	Vert	560	36	10
4	Rouge	665	31	10
5	Végétation « Red Edge »	704	15	20
6	Végétation « Red Edge »	740	15	20
7	Végétation « Red Edge »	783	20	20
8	Proche IR	833	106	10
8a	Proche IR « étroit »	865	21	20
9	Vapeur d'eau	945	20	60
10	SWIR Cirrus	1374	31	60
11	SWIR 1	1610	92	20
12	SWIR 2	2190	180	20

Grâce à cette diversité de bandes spectrales et à une revisite de 5 jours à l'Équateur, ces satellites jumeaux d'observation de la Terre permettent notamment un contrôle et un suivi de l'environnement (végétation, sols, couvertures aquatiques et zones côtières jusqu'à 20 km du rivage).

Les données accessibles sur internet (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) sont disponibles en Niveau 1C ou en Niveau 2A pour les utilisateurs. Les images de Niveau 1C ont subi des corrections géométriques et radiométriques, mais pas de correction atmosphérique. Les produits de Niveau 2A ont subi cette correction atmosphérique permettant de convertir les données de réflectance de la haute atmosphère (TOA pour *Top of Atmosphere*) du Niveau 1C en données de réflectance de la basse atmosphère (BOA pour *Bottom of Atmosphere*) de Niveau 2A. Les produits de Niveau 2A géoréférencés, orthorectifiés et corrigés des effets atmosphériques sont directement exploitables alors que les produits de Niveau 1C nécessitent un traitement de correction atmosphérique. Celui-ci peut s'effectuer dans le logiciel *SNAP* grâce au *plugin* *Sen2Cor* de la boîte à outils de S2 (logiciel et *plugin* téléchargeables gratuitement sur le site de l'ESA : <https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/>).

Intérêt des données optiques multispectrales sur le site du Parc

La diversité de longueurs d'onde proposée par les capteurs S2 doit permettre d'étudier l'effet de la résolution spectrale de chacune d'elle ainsi que celui de leurs combinaisons sur la classification de la zone intertidale du Parc (en partant du jeu de référence Rouge/Vert/Bleu, RVB). Bien que ces données MS soient sensibles aux conditions atmosphériques (acquisition uniquement de jour, couverture nuageuse), elles permettent de discriminer les différentes classes de couverture terrestre en fonction des changements spectraux de leurs caractéristiques spécifiques (19). L'objectif est de mettre en évidence la contribution spectrale des différentes bandes ou combinaisons de bandes sur la classification de la zone intertidale, et plus spécifiquement sur celle des récifs d'hermelles.

2.2.2 Présentation des principales caractéristiques du capteur Sentinel-1

La mission S1 (Figure 5) est composée de deux satellites en orbite polaire basse, nommés 1A et 1B (S1A et S1B).



Figure 5 : Satellite Sentinel-1 ©ESA

Lancés respectivement le 3 avril 2014 et le 25 avril 2016 à 693 km d'altitude, ces satellites à capteur actif fournissent des images *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging (*RADAR*) s'affranchissent de la couverture nuageuse puisque les ondes électromagnétiques radiofréquences traversent les nuages : c'est l'observation *RADAR* tout temps du programme européen Copernicus. S1A et S1B peuvent opérer de jour comme de nuit contrairement à l'imagerie MS optique passive de S2. Le principal avantage de S1 est lié à sa haute résolution temporelle (20) sur de nombreuses régions du globe. Sa revisite régulière sur un même site (12 jours depuis 2014 et 6 jours depuis 2016 à l'Équateur) offre un large potentiel pour la surveillance de l'environnement maritime, la détection et le suivi des zones humides, de la végétation ou encore des glissements de terrain.

S1 transporte un seul instrument *RADAR* à Synthèse d'Ouverture (RSO) en bande C, fonctionnant à une fréquence centrale de 5,405 GHz. Opérant dans le domaine des micro-ondes, les ondes en bande C de S1 se situent entre 3,75 cm et 7,50 cm. Grâce à ce domaine spectral d'acquisition, S1 a la capacité d'interagir avec la structure physique des éléments paysagers. Le signal émis interagit avec les différentes cibles au sol, une partie de ce signal est rétrodiffusée et revient vers l'antenne. Cette rétrodiffusion *RADAR* dépend de la rugosité de la surface.

S1 réalise des acquisitions sous différentes configurations de polarisation. La polarisation d'une onde électromagnétique correspond à la trajectoire décrite par l'extrémité du champ électrique au cours du temps. Ce champ électrique évolue dans un plan perpendiculaire à celui de la direction de propagation du signal. Lorsque le champ électrique est inclus dans le plan d'incidence, l'onde est dite polarisée verticalement et notée V (Figure 6a). Lorsque ce champ électrique est orthogonal au plan d'incidence, l'onde est dite polarisée horizontalement et notée H (Figure 6b). Une acquisition *RADAR* est donc caractérisée par une émission en H ou en V et par une réception en H ou en V.

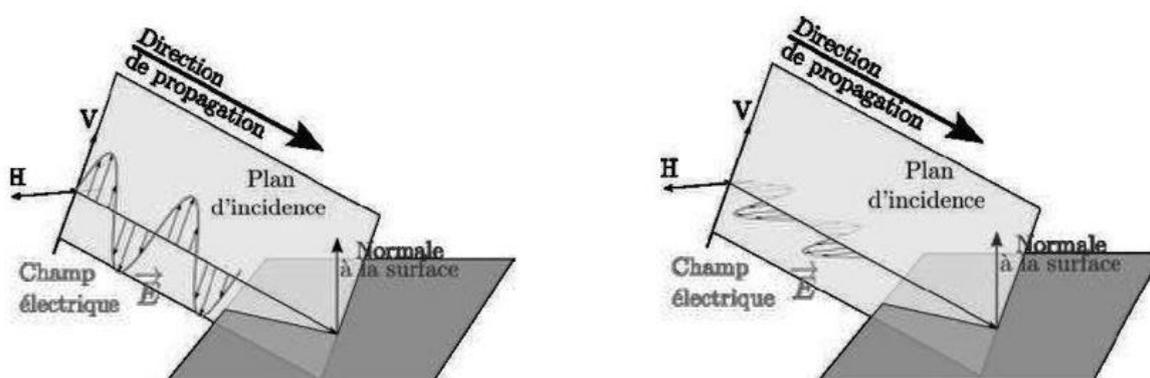


Figure 6 : a) Champ de polarisation linéaire verticale. b) Champ de polarisation linéaire horizontal (Source : <https://scihub.copernicus.eu/userguide/>)

La polarimétrie *RADAR* analyse la polarisation de l'onde rétrodiffusée par la surface en fonction de la polarisation de l'onde incidente (21) (22).

S1 fonctionne selon quatre modes d'acquisition exclusifs programmables : *Stripmap (SM)* ; *Large Fauchée Interférométrique (IW)* ; *Andain Extra Large (EW)* ; *Vague (WV)*. Le mode *SM* est utilisé pour l'imagerie de petites îles et dans certains cas pour gérer des situations d'urgence. Le mode *WV* est le mode par défaut pour l'acquisition des données en haute mer (vents, vagues, courants). Le mode *EW* a pour principales missions le suivi de la fonte des glaces, la surveillance des déversements d'hydrocarbures en haute mer et la sécurité du territoire. Le mode *IW* est le plus utilisé sur terre car il remplit la majorité des exigences pour les suivis scientifiques (23). Dans ce mode, les acquisitions effectuées par S1 ont une fauchée de 250 km et une résolution spatiale de 5 m × 20 m. Les acquisitions sont partiellement polarimétriques avec une onde émise en polarisation V et un signal rétrodiffusé dans les polarisations H et V. Seule la différence de phase entre VV et VH est mesurée. Si le mode d'acquisition de S1 était pleinement polarimétrique, imposant une alternance des impulsions émises en polarisation H et V, la largeur de la fauchée pour une même résolution spatiale serait réduite de moitié et le temps de revisite serait doublé, passant à 12 jours.

Chacun de ces modes d'acquisition permet d'obtenir, après traitements, des produits de différents niveaux : 0, 1 ou 2 (Figure 7).

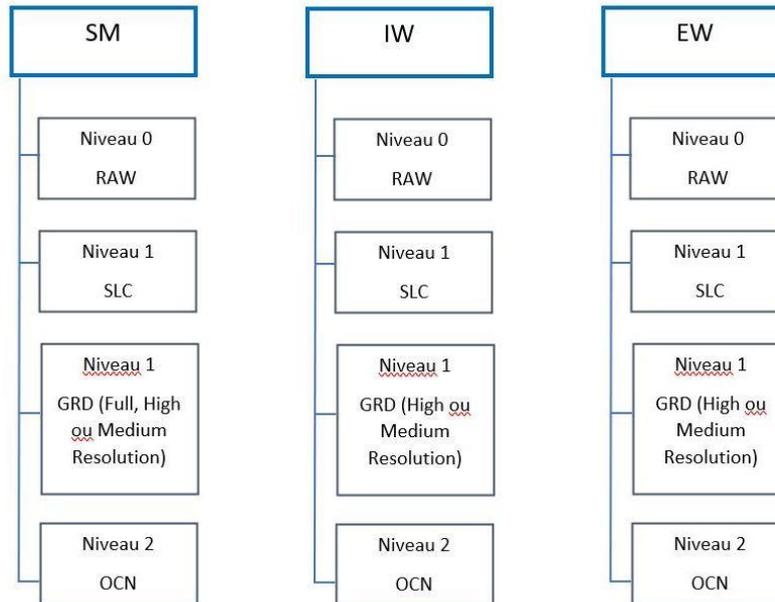


Figure 7 : Niveaux des produits Sentinel-1 en fonction des modes d'acquisition (Source : <https://scihub.copernicus.eu/userguide/>)

Les produits SAR de Niveau 0 consistent en des données brutes compressées et non ciblées. Les produits de Niveau 1 peuvent être de deux types, *Single Look Complex* (SLC ou Complexe de Vue Unique) ou *Ground Range Detected* (GRD ou Distance au Sol Détectée). Les produits sont désignés en fonction de leur mode d'acquisition, du type de produit et, dans le cas du GRD de niveau 1, également de sa résolution (*Full, High ou Medium*). Ils sont tous traités directement à partir du produit de niveau 0.

Les données ciblées de Niveau 1 sont les produits destinés à la plupart des utilisateurs de données. Les produits SLC de Niveau 1 consistent en des données SAR ciblées, géoréférencées à l'aide des données d'orbite et d'altitude du satellite. Les produits SLC de Niveau 1 conservent les informations de phase et sont traités à l'espace naturel des pixels (Figure 8). Les produits GRD de Niveau 1 consistent en des données SAR focalisées qui ont été détectées, regardées plusieurs fois (multi-look ou multi-visée) et projetées à la distance au sol à l'aide du modèle d'ellipsoïde terrestre WGS84. La projection ellipsoïdale des produits GRD est corrigée à l'aide de la hauteur de terrain spécifiée dans l'annotation générale du produit. Les valeurs de pixel représentent l'amplitude détectée. Les informations de phase sont perdues. Le produit résultant a des pixels à résolution approximativement carrée de 10 m x 10 m.

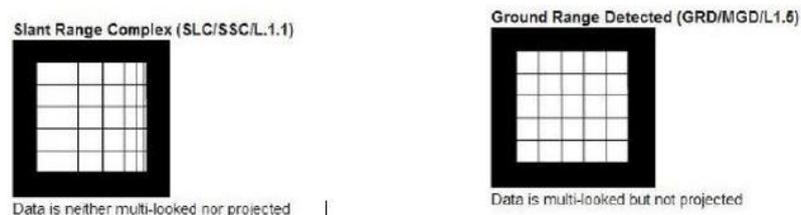


Figure 8 : Différence de résolution spatiale entre une donnée *Single Look Complex* et une donnée *Ground Range Detected* (Source : site ESA)

Intérêt des données *RADAR* sur le site du Parc

Les données *RADAR* apportent une complémentarité avec les données optiques en terme de longueur d'onde (23). L'objectif est de combiner cette donnée *C-SAR* de S1 à la donnée optique MS de S2 pour observer l'impact obtenu sur la classification des récifs d'hermelles et mettre en évidence l'effet de la résolution spectrale. Sur notre zone d'étude, les récifs d'hermelles sont très dispersés. A l'échelle du Parc, les hermelles se développent et vivent de manière inféodée aux substrats rocheux qui présentent souvent des signatures spectrales proches de celle des hermelles, ce qui augmente le risque de confusion des classes. « Injecter » le caractère physique de la rugosité des hermelles (qui vivent légèrement au-dessus de ces substrats) permet de rajouter un prédicteur discriminant, sur le même principe qu'un Modèle Numérique de Surface (MNS).

2.2.3 Présentation des principales caractéristiques du capteur Pléiades-1

Le système Pléiades (Figure 9 du satellite dans l'espace) est constitué de deux satellites jumeaux, 1A et 1B, évoluant à une altitude de 694 km.



Figure 9 : Satellite Pléiades ©CNES-Airbus

Projet porté par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et Airbus Défense et Espace, ces capteurs ont été lancés respectivement le 17 décembre 2011 (P1A) et le 1^{er} décembre 2012 (P1B). Ils opèrent à la même orbite polaire héliosynchrone avec un déphasage de 180° l'un par rapport à l'autre. Le fait que ces deux satellites soient en opposition sur la même orbite permet d'obtenir une image de n'importe quel point de la planète en moins de 24 heures.

Cette grande zone de couverture est l'un de ses atouts majeurs, notamment pour les situations de crise même si ce n'est pas sa seule application (urbanisme, mer et littoral, sylviculture, forêt, défense ou sécurité civile). Dépassant S2, P1 est un capteur optique passif qui fournit des images à très haute résolution spatiale. Les acquisitions ne se font que de jour et il est aussi soumis aux contraintes de la couverture nuageuse. Les caractéristiques des images P1 sont toutes identiques. La résolution spatiale est de 0,5 m pour les images panchromatiques et de 2 m pour les images MS (RVB et IR). Les cinq bandes sont acquises simultanément avec une fauchée au nadir de 20 km (Tableau 2).

Tableau 2 : Bandes spectrales de Pléiades-1 (Source : <https://dinamis.data-terra.org/pleiades/>)

Mode	Canal	Longueur d'onde (nm)	Résolution spatiale (m)
Multispectral	0	430-550 (bleu)	2
	1	500-620 (vert)	2
	2	590-710 (rouge)	2
	3	740-940 (infrarouge)	2
Panchromatique	P	470-830 (noir et blanc)	0,5

Sa capacité de revisite varie de 4 jours avec les deux satellites pour un angle de prise de vue de 30° jusqu'à 26 jours avec un satellite pour un angle de prise de vue de 0°. Grâce à la capacité d'acquisition quasi simultanée de P1A et P1B, des images stéréoscopiques et même tri-stéréoscopiques peuvent être produites. Cette capacité de stéréoscopie associée à la très haute résolution spatiale permet de répondre aux besoins de cartographie fine en complément des photographies aériennes. Les caractéristiques spectrales de P1 sont bien adaptées à l'étude de l'environnement marin.

Intérêt des données Pléiades-1 sur le site du Parc

La différence de résolution spatiale entre les images S2 et P1 va permettre d'étudier l'effet de la résolution spatiale sur la classification des différents éléments du Parc, et plus particulièrement celui sur la classification des récifs d'hermelles.

2.3 Présentation des jeux de données sélectionnés et de leurs principaux (pré-)traitements avant exploitation

2.3.1 Sentinel-2

La recherche des données S2 est faite en respectant les contraintes suivantes :

- Couverture nuageuse inférieure à 15% ;
- Prise en compte d'un coefficient de marée élevé pour avoir la hauteur d'eau la plus faible possible afin que les récifs d'hermelles soient découverts au maximum (source : <http://maree.info/128>);

- La donnée P1 étant en date d'avril 2020, la recherche s'est d'abord effectuée autour de cette date pour tenir compte de la temporalité.

L'image retenue (Figure 10) est celle du 29 mars 2021, téléchargée en L2A (Niveau 2A), c'est-à-dire qu'elle ne nécessite pas de corrections atmosphériques dans SNAP. Deux tuiles (T30TXR et T30TXS) sont nécessaires pour couvrir l'ensemble du Parc naturel marin.

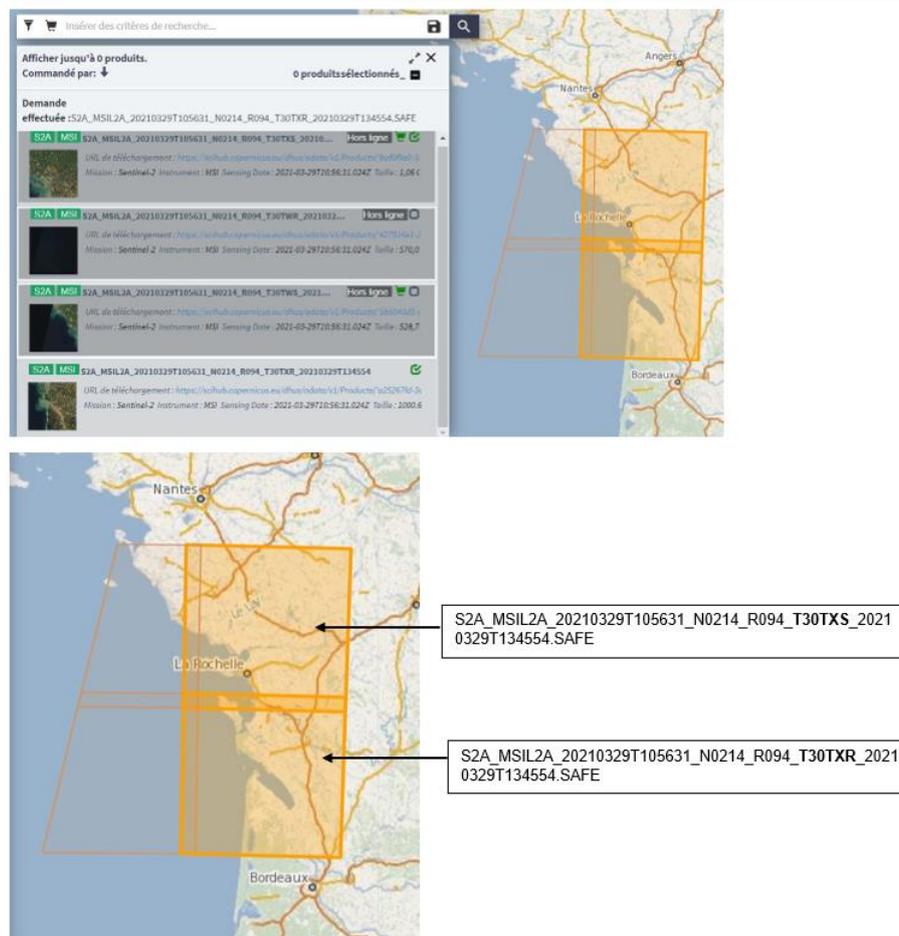


Figure 10 : Données Sentinel-2 sélectionnées (source : <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

Le tableau 3 ci-dessous récapitule l'ensemble des caractéristiques de cette donnée.

Tableau 3 : Principales caractéristiques de la donnée Sentinel-2 sélectionnée

Nom de la tuile	T30TXS	T30TXR
Nom du fichier	S2A_MSIL2A_20210329T105631_N0214_R094_T30TXS_20210329T134554.SAFE	S2A_MSIL2A_20210329T105631_N0214_R094_T30TXR_20210329T134554.SAFE
Plateforme Instrument	Sentinel 2A MSI	Sentinel 2A MSI
Sens du Col	Descendant	Descendant
Largeur de fauchée	290 km	290 km
Niveau de traitement	L2A	L2A
Projection	WGS84	WGS84
Date acquisition UTC	29 mars 2021	29 mars 2021
Heure d'acquisition UTC	10h56	10h56
% couverture nuageuse	13	14,7
Coefficient de marée	107	107
Hauteur d'eau à l'heure de passage de S2	0,90 m	0,90 m
Taille du fichier	1,06 Go	1,068 Go

Chaque tuile est ouverte dans *SNAP* pour réaliser un *pansharpening* grâce au plugin *Sen2Res* développé par Brodu (24) de l'INRIA de Bordeaux Sud-Ouest (<http://nicolas.brodu.net/recherche/sen2res/>) et accessible sur le site de l'ESA (<https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2res/>). Cette opération permet de rééchantillonner les 12 bandes utiles de S2 à une résolution spatiale de 10 m. Les deux tuiles sont ensuite mosaïquées dans *ENVI Classic 5.3* (<https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>) pour passer à l'échelle du Parc naturel marin. Comme l'indique Brodu dans sa méthodologie, c'est un traitement « gourmand » qui nécessite une puissance de calculs élevée. Le dernier traitement avant exploitation de ces données est la reprojection en RGF93-Lambert93 (Figure 11).

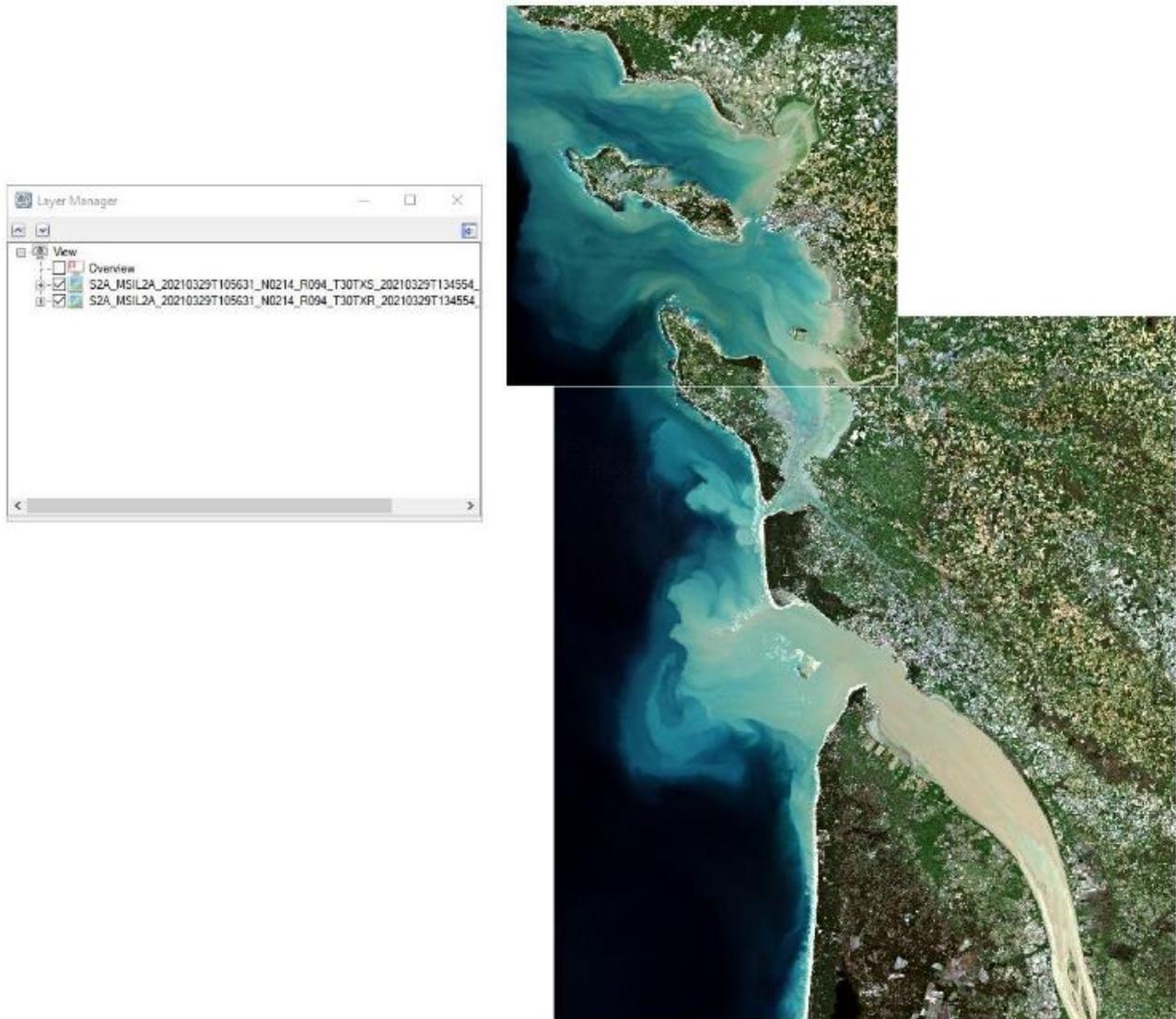


Figure 11 : Données Sentinel-2 - multispectrales du site d'étude

2.3.2 Sentinel-1

Les contraintes pour S1 sont moins nombreuses car les images *RADAR* s'affranchissent de la couverture nuageuse et sont acquises de jour comme de nuit. Cependant, elles ne traversent pas l'eau donc la recherche doit tenir compte, comme pour S2, des conditions environnementales de marée et de hauteur d'eau au moment du passage du capteur sur la zone d'étude (source : <http://maree.info/128>). La recherche sur les années 2015 à 2022 met en évidence que les heures de passage de S1 (6h15 ou 17h55 UTC) au-dessus du Parc naturel marin est en déphasage avec les basses hauteurs d'eau souhaitées à l'occasion d'une forte marée. Le meilleur résultat obtenu (Figure 12) date du 21 juin 2017 avec une hauteur d'eau de 1,70 m et un coefficient de marée de 70. Un seul fichier couvre la quasi-totalité du Parc naturel marin, exception faite de l'extrémité sud de l'estuaire de la Gironde. Il s'agit d'un produit *GRDH* qui a donc perdu l'information de la phase, information utilisée pour des séries multi-temporelles ou pour l'interférométrie. N'ayant besoin que d'une image pour effectuer la classification des récifs d'hermelles, ceci est donc sans conséquence pour notre étude.

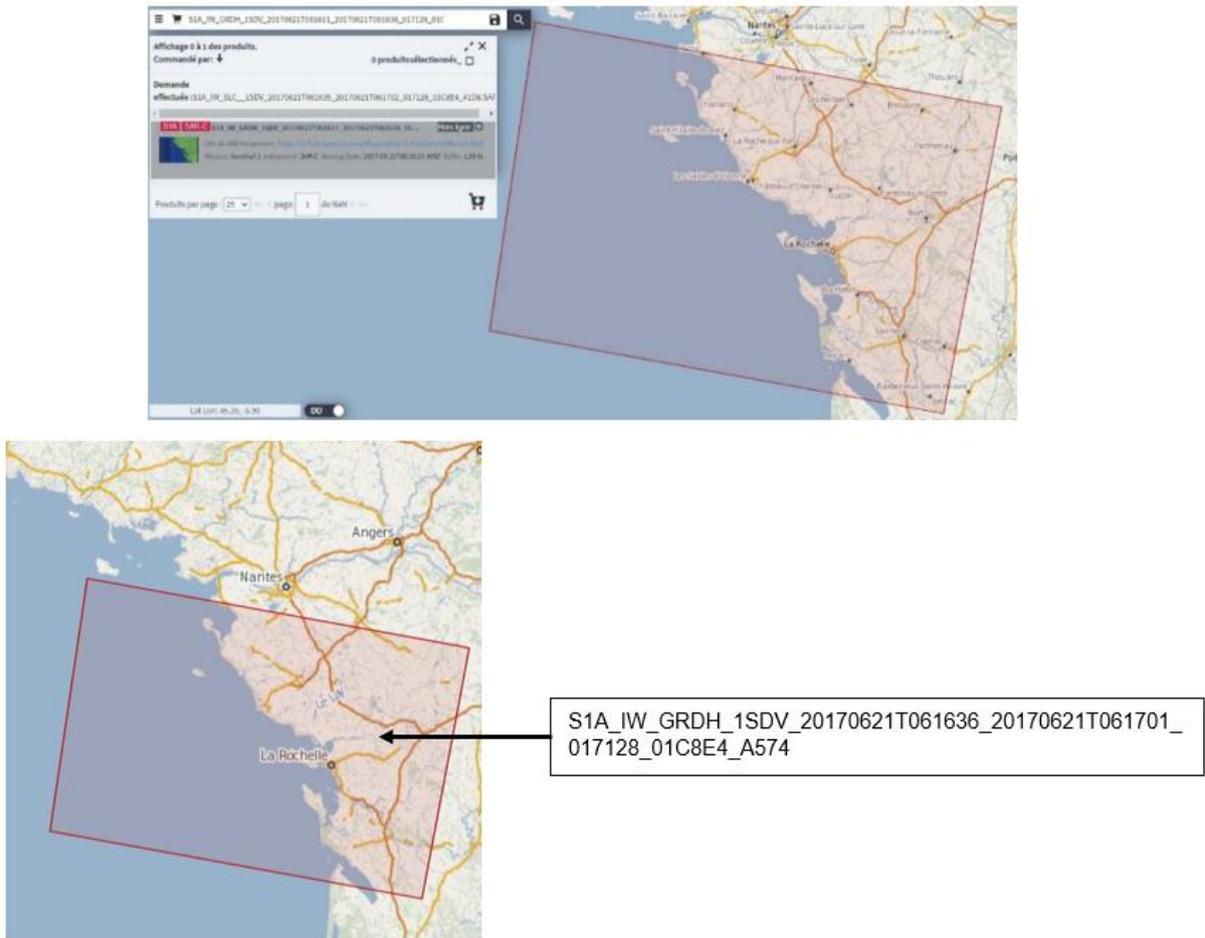


Figure 12 : Donnée Sentinel-1 sélectionnée (source : <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

Le tableau 4 récapitule l'ensemble des caractéristiques de cette donnée.

Tableau 4 : Caractéristiques de la donnée Sentinel-1 sélectionnée

	Caractéristiques
Nom du fichier	S1A_IW_GRDH_1SDV_20170621T061611_20170621T061636_017128_01C8E4_D246.SAFE
Plateforme	Sentinel 1A
Instrument	RADAR à Synthèse d'Ouverture en bande C (RSO-C ou SAR-C)
Largeur de fauchée	250 km
Mode d'acquisition	IW
Type du produit	Niveau 1 GRDH (perte de la phase)
Projection	WGS84
Résolution spatiale (m)	10 – pixels carrés

Résolution spectrale	$\lambda = 6 \text{ cm}$
Polarisation	Double VV + VH
Sens du col	Descendant
Date acquisition UTC	21 juin 2017
Heure acquisition UTC	06h16
Coefficient de marée	70
Hauteur d'eau à l'heure de passage de S1A	1,70 m
Taille du fichier (Go)	1,65

Comme évoqué au chapitre 2.2.2, les produits *GRDH* ont subi un traitement de multivisée (ou *multi-look*) transformant le pixel rectangulaire (5 m × 20 m) en pixel carré de même résolution en x et en y (10 m). Avant de pouvoir exploiter la donnée S1, une séquence de géoréférencement et de calibration est nécessaire. Celle-ci couple des aspects géométriques et radiométriques. L'objectif est d'établir une correspondance entre les valeurs numériques pixellaires et les coefficients de rétrodiffusion qui caractérisent les états de surface. Cette calibration est indispensable pour la fusion d'informations issues de données multi-capteurs et/ou multi-temporelles (25). Ces opérations sont réalisées dans *SNAP* via un *Graph Builder* (Figure 13).



Figure 13 : Construction du *Graph Builder* dans *SNAP* - Prétraitements appliqués aux données Sentinel-1 avant exploitation

Le détail de ces étapes est décrit dans le tableau 5. A la fin de cette chaîne de prétraitements, un produit standardisé, appelé σ_{0dB} , est obtenu. C'est le coefficient de rétrodiffusion en décibels sur lequel les traitements de classification peuvent être effectués.

Tableau 5 : Description des prétraitements effectués sur la donnée Sentinel-1-GRDH sélectionnée

Etapes	Nom du traitement	Description du traitement
1	<i>Read Sentinel 1 GRDH Copernicus Data Hub</i>	Téléchargement de la donnée zippée sur le site de l'ESA et ouverture de celle-ci dans SNAP
2	<i>Apply Orbit File</i>	Correction de la localisation du satellite
3	<i>Thermal Noise Removal</i>	Réduction des effets de bruit entre les sous-fauchées au moment de l'acquisition en mode IW
4	<i>Remove GRD Border Noise</i>	Suppression des bruits de faible intensité et des données invalides en bordure de scène (liées à la courbure de la Terre)
5	<i>Calibration</i>	Corrections radiométriques des pixels. Étape de conversion de l'intensité en un coefficient de rétrodiffusion exploitable selon les caractéristiques du capteur et de l'angle d'incidence local. Choix du coefficient σ_0 pour un terrain avec peu de relief. Appelée aussi étape de normalisation.
6	<i>Speckle filter</i>	Corrige les interférences entre les signaux rétrodiffusés à l'origine de l'effet « poivre et sel » de l'image appelé chatoiement (ou <i>speckle</i>)
7	<i>Terrain Correction</i>	Ortho rectification et géoréférencement dans une projection donnée (ici, RGF93-Lambert93). Correction des effets liés au terrain avec possibilité de remplacer le MNT proposé par défaut dans SNAP (SRTM 3sec) par un autre MNT de meilleure qualité (<i>External DEM</i>).
8	<i>Write</i>	Enregistrement de la donnée Sentinel-1-GRDH prête à l'exploitation (export en Geotiff).

A l'étape 7 « Terrain Correction », le Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM 3 sec proposé par défaut dans SNAP (résolution spatiale de 30 m) est remplacé par les MNT topobathymétriques côtiers de la mer des Pertuis et de l'estuaire de la Gironde Aval et Amont mosaïqués et reprojétés en RGF93-Lambert93 (Source : <https://data.shom.fr/>). Les métadonnées (Annexe 1) précisent que ces « MNT topo-bathymétriques côtiers correspondent à une surface topographique et bathymétrique dont l'emprise englobe la bande littorale et s'étendent de part et d'autre du trait de côte, sur terre comme en mer, couvrant partiellement le plateau continental » (Source : liens SHOM des métadonnées ci-dessous). Leur résolution spatiale est de l'ordre de 22 m. Les MNT téléchargés sont référencés verticalement à la plus basse mer astronomique. Celui de la mer des Pertuis date de 2015 ; ceux de l'estuaire de la Gironde Aval et Amont de 2016.

Les figures ci-dessous présentent le résultat final de la donnée σ_{0dB} obtenue à partir de l'intensité de l'image respectivement en polarisation VH (émission verticale du signal / réception horizontale du signal, Figure 14) et en polarisation VV (émission et réception du signal verticales, Figure 15).

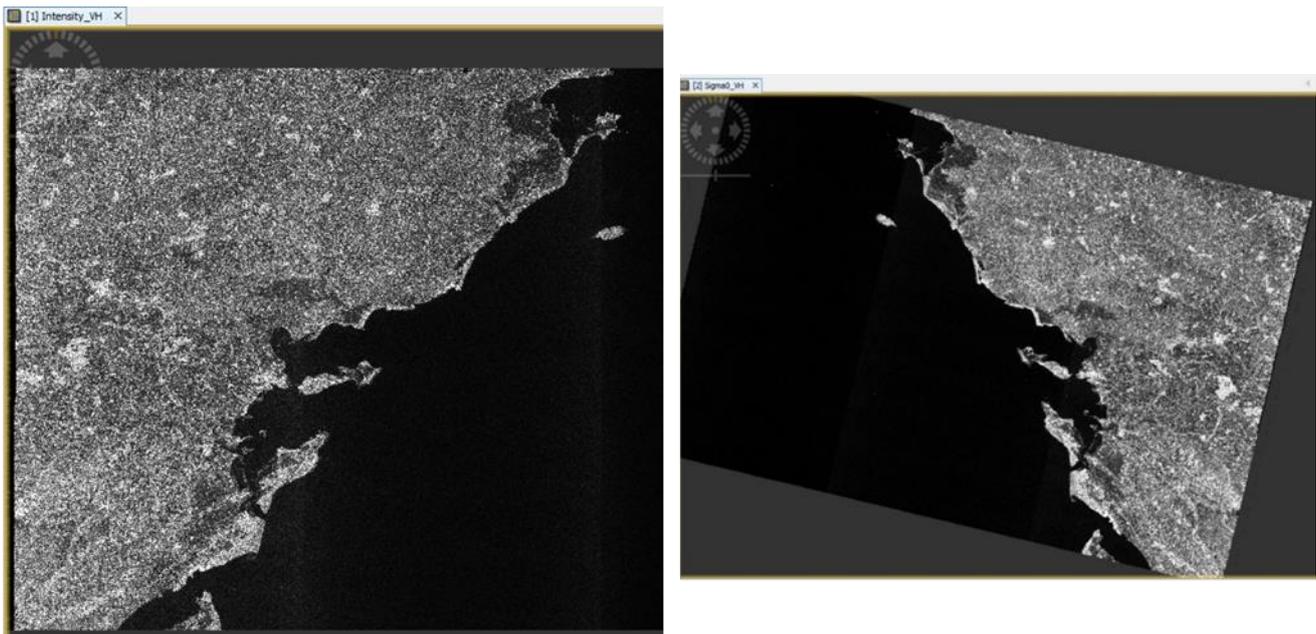


Figure 14 : Conversion de la donnée Sentinel-1-GRDH de Niveau 1 en donnée σ_{0dB} , polarisation croisée VH.

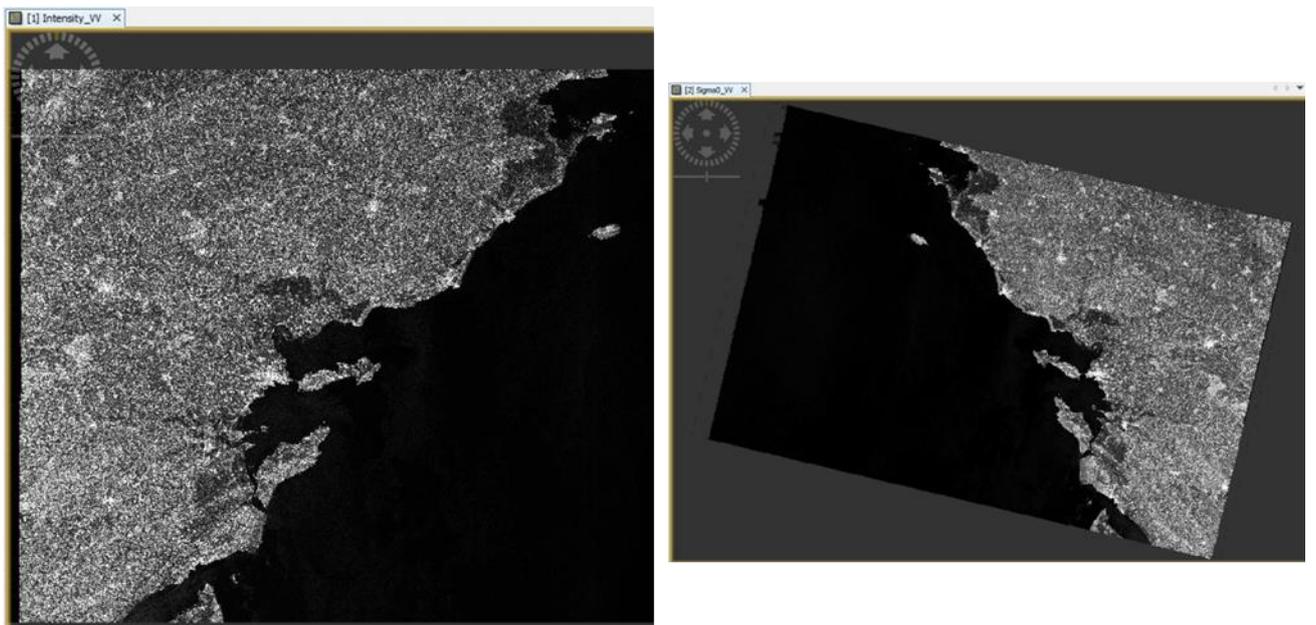


Figure 15 : Conversion de la donnée Sentinel-1-GRDH de Niveau 1 en donnée σ_{0dB} , polarisation simple VV

2.3.3 Fusion des données Sentinel-2 et Sentinel-1

De même qu'une donnée topographique de type MNT, la donnée S1 ne s'utilise pas seule pour réaliser une classification. Elle est un prédicteur supplémentaire. L'objectif est d'analyser sa contribution spectrale une fois fusionnée à la donnée S2. Pour cela, il faut vérifier que les données aient la même résolution spatiale, la même projection et la même emprise, ce qui est le cas ici après application des différents prétraitements. Un *layer stacking* est effectué dans *ENVI Classic 5.3* nous permettant d'obtenir 15 bandes spectrales (Tableau 6).

Tableau 6 : Apport spectral de Sentinel-2 et de Sentinel-1

Données Sentinel	Contribution spectrale
Sentinel-2	12 bandes de B1 à B12
Sentinel-1	$\sigma_{0dB}VH$ $\sigma_{0dB}VV$ $\sigma_{0dB}VH / \sigma_{0dB}VV$ (Ratio)

D'après plusieurs études [(23) et (26)], l'ajout du ratio $\sigma_{0dB}VH / \sigma_{0dB}VV$ améliore la précision de la classification d'une couverture terrestre. Cependant, il est à noter que ces études portent principalement sur des zones végétalisées. Le choix est cependant maintenu de tester la contribution spectrale de ce ratio sur notre zone d'étude littorale.

2.3.4 Pléiades-1

Cette donnée issue d'une commande de l'OFB-Parc date du 09 avril 2020. Au moment de l'acquisition à 11h18 UTC, les données environnementales sont :

- Couverture nuageuse : 0 % ;
- Coefficient de marée : 117 ;
- Hauteur d'eau à l'heure de passage du capteur : 0,60 m.

Onze tuiles recouvrent la quasi-totalité du Parc, à l'exception d'une zone située au sud de La Rochelle. Les caractéristiques de chacune de ces tuiles sont présentées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Caractéristiques des données Pléiades 1 sur le site d'étude (Source : Airbus DS Geo)

ID	Instrument	Type de produit	Date et Heure d'acquisition	Angle d'incidence (degrés)	Angle d'orientation (degrés)	Sun azimuth (degrés)	Sun elevation (degrés)
DS_PHR1A_2020 04091118545_FR 1_PX_W001N45_ 0117_07320	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11:19:06	22.13°	180.05°	161.61°	51.06°
DS_PHR1A_2020 04091118373_FR 1_PX_W002N46_ 1007_01787	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11:18:40	15.55°	179.95°	161.08°	50.40°
DS_PHR1A_2020 04091118058_FR 1_PX_W002N46_ 0508_02845	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11:18:10	17.07°	179.99°	160.47°	50.25°
DS_PHR1A_2020 04091118373_FR 1_PX_W002N46_ 1007_01787	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11:18:40	15.55°	179.95°	161.08°	50.40°
DS_PHR1A_2020 04091118058_FR 1_PX_W002N46_ 0508_02845	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11:18:10	17.07°	179.99°	160.47°	50.25°
DS_PHR1A_2020 04091119170_FR 1_PX_W002N45_ 1118_05093	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11:19:25	29.41°	179.98°	161.28°	50.96°
DS_PHR1A_2020 04091118180_FR 1_PX_W002N46_ 0803_05734	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11:18:27	14.34°	180.05°	160.71°	50.47°

DS_PHR1A_2020 04091118545_FR 1_PX_W001N45_ 0117_07320	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11 :19 :06	22.13°	180.05°	161.62°	51.06°
DS_PHR1A_2020 04091118180_FR 1_PX_W002N46_ 0803_05734	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11 :18 :27	14.34°	180.05°	160.71°	50.47°
DS_PHR1A_2020 04091119170_FR 1_PX_W002N45_ 1118_05093	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11 :19 :25	29.41°	179.98°	161.28°	50.96°
DS_PHR1A_2020 04091118545_FR 1_PX_W001N45_ 0117_07320	P1A	Pléiades 0,5 m	2020-04-09 11 :19:06	22.13°	180.05°	161.61°	51.06°

Les images sont téléchargées en MS d'une part (4 bandes spectrales à résolution de 2 m) et en panchromatique d'autre part (1 bande spectrale à résolution de 0,5 m). Ces données sont en WGS84 – UTM Zone 30N.

Il faut appliquer une séquence de corrections radiométriques, atmosphériques et géométriques sur les onze images P1MS, et seulement une correction géométrique sur les onze images P1-Panchromatiques (P1Pan). Ces opérations sont effectuées dans ENVI 5.3.

Les données initiales téléchargées sont des données *Digital Numbers*, c'est-à-dire des valeurs numériques codées en *bits*. La correction radiométrique permet la correction des effets du capteur et convertit les images en radiance *TOA*. La correction atmosphérique qui suit permet d'obtenir des données en réflectance *BOA*. Enfin, grâce à la correction géométrique, les images sont ensuite orthorectifiées. Un mosaïquage des onze tuiles MS d'une part, et des onze tuiles Pan d'autre part, est effectué pour obtenir une seule tuile à l'échelle du Parc (Figures 16a et 16b).

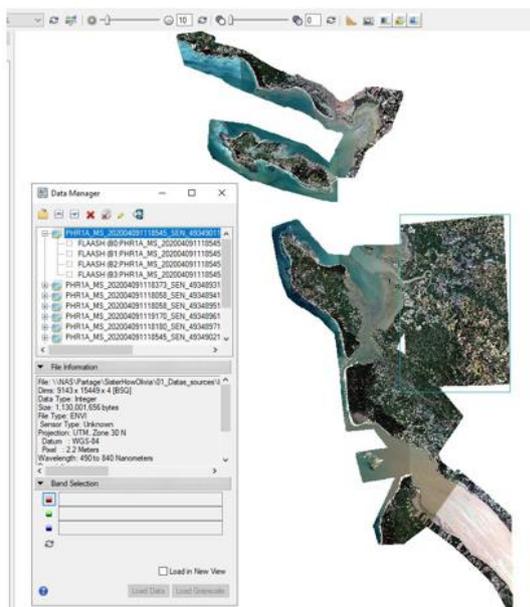


Figure 16a : Données Pléiades 1 - multispectrales du site d'étude

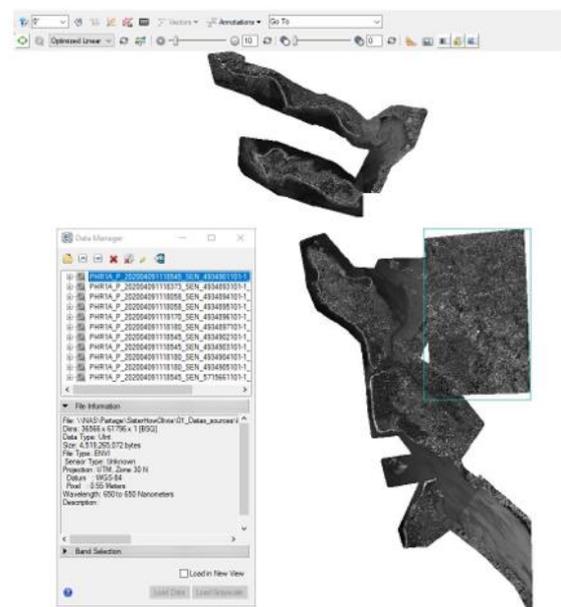


Figure 16b : Données Pléiades 1 - panchromatique du site d'étude

Comme pour les données satellitaires S1 et S2, les données P1MS et P1Pan sont reprojétées en RGF93-Lambert93.

Le traitement de *pansharpening* (ou fusion multi-résolution) appliqué ensuite consiste à fusionner les images Pan et MS pour obtenir une image MS ayant la résolution de l'image Pan. La condition *sine qua non* pour réaliser cette opération est que la résolution de la bande Pan doit être plus élevée que celle des bandes MS à fusionner (27) (28). C'est l'algorithme Gram-Schmidt qui est utilisé pour obtenir quatre bandes de 0,5 m. Cet algorithme est l'un des plus utilisés car il surpasse la plupart des autres méthodes de *pansharpening* en maximisant la netteté de l'image et en minimisant les distorsions de couleurs (29). Cependant, il faut garder à l'esprit qu'il nécessite une forte puissance de calculs.

2.3.5 Sélection des Ortho-HR (Haute Résolution) et des BD-Ortho

L'Ortho-HR (RVB à 0,2 m) et la BD-Ortho (IR/RVB à 0,5 m) correspondent à une collection ortho-photographique produite par l'IGN à l'échelle du territoire français. Il s'agit de donnée en valeurs de gris et non en réflectance comme les images satellites précédentes. La recherche s'effectue sur le site <https://geoservices.ign.fr/bdortho#telechargementanc> en prenant toujours en compte les meilleures conditions environnementales possibles (notamment la hauteur d'eau liée au coefficient de marée). Elle nous permet d'obtenir deux données distinctes (une pour le département Vendée et une pour le département Charente-Maritime) dont les caractéristiques sont présentées dans les tableaux 8a et 8b ci-dessous.

Tableau 8a : Métadonnées du jeu de données Ortho-HR (0,2 m) et BD-Ortho (0,5 m) de la Charente Maritime (2014)

Nom du produit	IGNF_ORTHO-HR_1-0_JP2-E080_LAMB93_D17-2014	IGNF_BD-ORTHO_2-0_JP2-E080_LAMB93_D17-2014
Producteur	IGN-F / http://www.ign.fr/	IGN-F / http://www.ign.fr/
Bandes spectrales	Rouge, Vert, Bleu	InfraRouge, Rouge, Vert
Date acquisition	Du 15 au 17 avril 2014	Du 15 au 17 avril 2014
Format de téléchargement	JP2 optimisé	JP2 optimisé
Résolution spatiale	0,2 m	0,5 m
Système de référence	RGF93-Lambert93	RGF93-Lambert93
Nombre de dalles (5 km x 5 km) sur la zone d'étude	89	89
Codage des données	24 bits	24 bits
Plus fort coefficient de marée dans cet intervalle de dates	96 (Hauteur d'eau : 1,01 m)	96 (Hauteur d'eau : 1,01 m)
Plus faible coefficient de marée dans cet intervalle de dates	91 (Hauteur d'eau : 1,11 m)	91 (Hauteur d'eau : 1,11 m)

Tableau 8b : Métadonnées du jeu de données Ortho-HR (0,2 m) et BD-Ortho (0,5 m) de la Vendée (2016)

Nom du produit	IGNF_ORTHO-HR_1-0_JP2-E080_LAMB93_D85-2016	IGNF_BD-ORTHO_2-0_JP2-E080_LAMB93_D85-2016
Producteur	IGN-F / http://www.ign.fr/	IGN-F / http://www.ign.fr/
Bandes spectrales	Rouge, Vert, Bleu	InfraRouge, Rouge, Vert
Date acquisition	Du 09 au 11 avril 2016	Du 09 au 11 avril 2016
Format de téléchargement	JP2 optimisé	JP2 optimisé
Résolution spatiale	0,2 m	0,5 m
Système de référence	RGF93-Lambert93	RGF93-Lambert93

Nombre de dalles (5 km x 5 km) sur la zone d'étude	29	29
Codage des données	24 bits	24 bits
Plus fort coefficient de marée dans cet intervalle de dates	117 (Hauteur d'eau : 0,10 m)	117 (Hauteur d'eau : 0,10 m)
Plus faible coefficient de marée dans cet intervalle de dates	91 (Hauteur d'eau : 0,67 m)	91 (Hauteur d'eau : 0,67 m)

Grâce à sa haute résolution spatiale, la donnée aérienne Ortho-HR servira ultérieurement de vérités terrains, calibration et validation par photo-interprétation. Les bandes de la BD-Ortho seront, après un *pansharpening* les rééchantillonnant à 0,2 m, ajoutées à la bande Bleu de l'Ortho-HR. Ceci permet de disposer d'un jeu de données RVBIR à 0,2 m. A l'inverse, un jeu de données RVB+IR à 0,5 m est créé grâce à un *layer stacking* entre les 3 bandes de la BD-Ortho et la bande Bleu de l'Ortho-HR.

Malheureusement, les métadonnées ne donnent pas d'indication précise sur l'heure d'acquisition exacte au-dessus de notre zone d'étude. Il est donc impossible de déterminer précisément la hauteur d'eau au moment de l'acquisition. De plus, ces deux jeux de données diffèrent de deux ans, ce qui peut soulever un problème de temporalité d'une part et d'homogénéité d'autre part. Cependant, grâce à leur haute résolution, ces jeux de données restent une source intéressante pour créer les vérités terrains (30), qui seront à la base de toutes les classifications.

Le mosaïquage des dalles RVB 0,2 m (89 pour la Charente Maritime et 29 pour la Vendée) a avorté de manière systématique car le fichier obtenu devient trop volumineux. Par ailleurs, même si cette opération avait réussi, un problème de temps d'affichage et de temps de traitement de cette donnée se serait posé, rendant trop difficile, voire impossible, les nombreuses manipulations à effectuer au moment de la création des vérités terrains sur l'Ortho-HR 0,2 m. Des études [(31), (32)] ont mis en évidence que sur des zones à large superficie, il est préférable de travailler en sous-zones et de les classifier individuellement pour obtenir de meilleurs résultats. Le choix a été donc fait à cette étape de travailler en 8 sous-zones (Figure 17) de poids moins élevé.

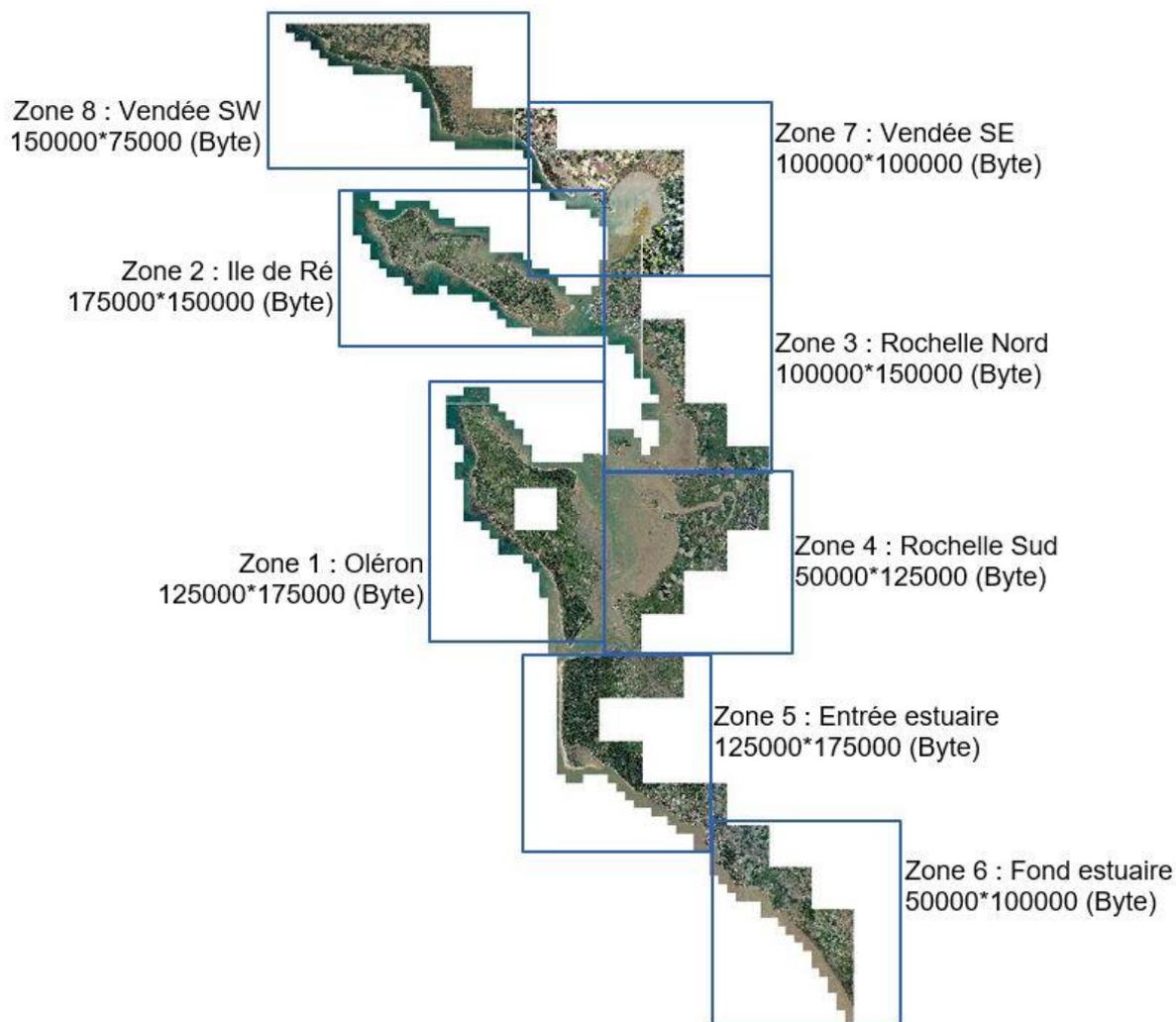


Figure 17 : Découpage de la zone d'étude en 8 sous-zones sur les Ortho-HR – Taille de chaque sous-zone pour la donnée Ortho-HR RVB 0,2 m

2.3.6 Création de masques pour l'optimisation des temps de traitement

Dans un souci d'optimisation des temps de traitement, des masques sont créés à partir de la donnée vecteur « Limite Terre-Mer » (Source donnée : SHOM et IGN) sur l'ensemble des jeux de données : Ortho-HR 0,2 m sur chaque sous-zone ; BD-Ortho 0,5 m à l'échelle du Parc ; P1MS 0,5 m à l'échelle du Parc ; P1MS 2 m à l'échelle du Parc ; S2 10 m à l'échelle du Parc et (S2+S1) 10 m à l'échelle du Parc. Ces masques permettent de retirer la partie continentale « inutile » dans cette étude. Les données nulles (data = 0) sont elles aussi retirées dans *ENVI Classic 5.3*. Il ne reste que la partie de l'estran « utile » comme illustré par la Figure 18 ci-dessous pour le jeu de données Sentinel-2.

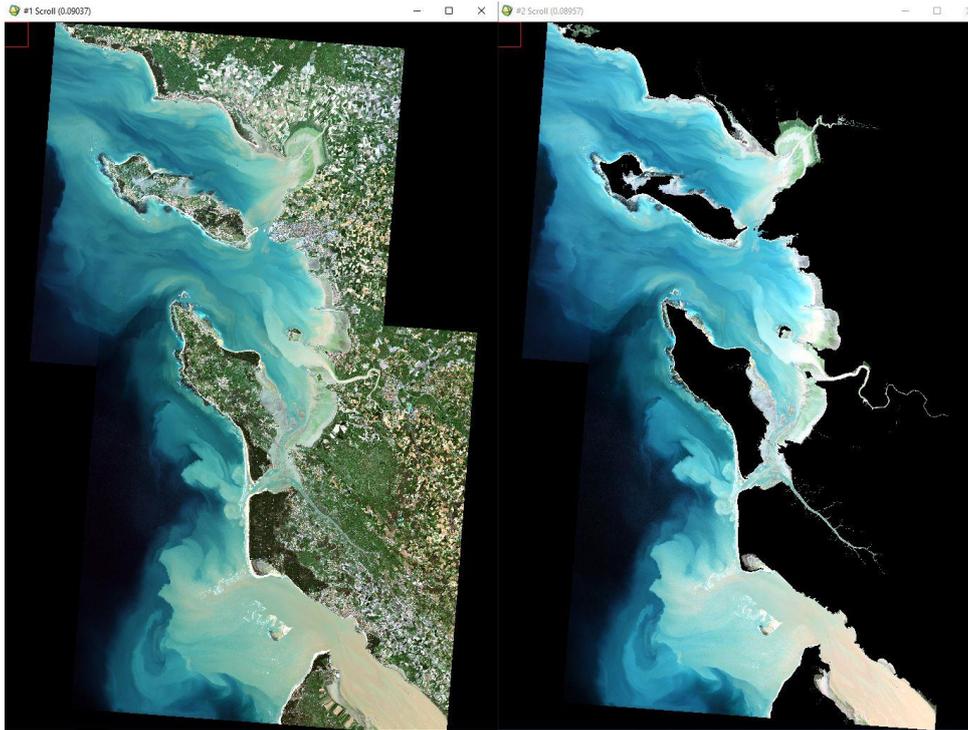
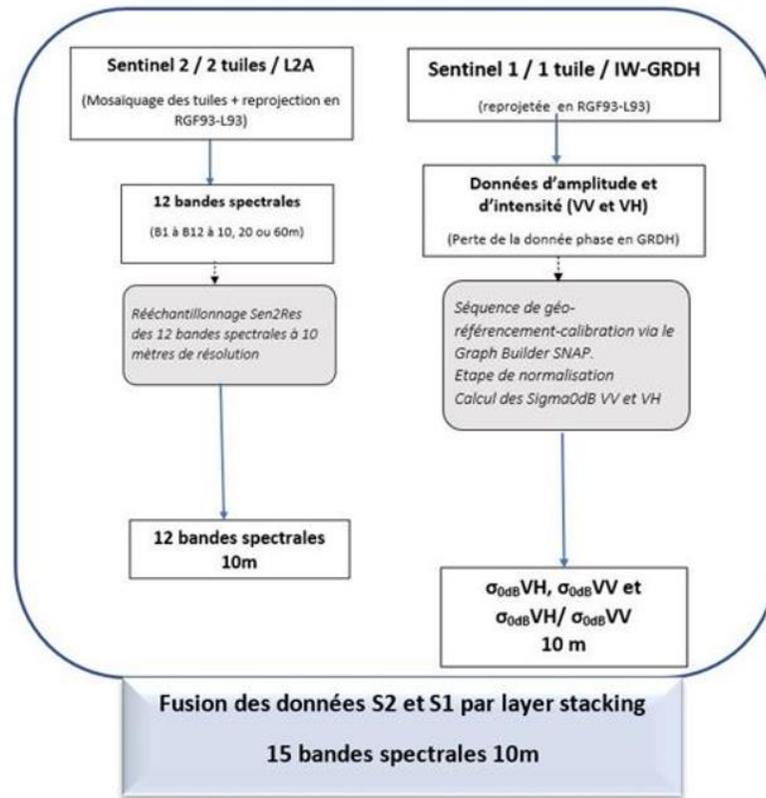
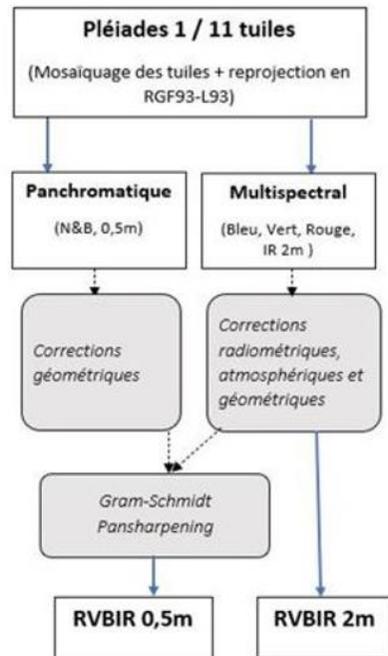
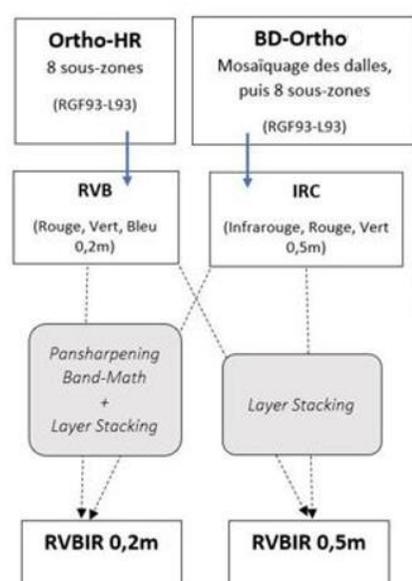


Figure 18 : Masquage des données non utiles à l'échelle du Parc sur le jeu de données Sentinel-2

2.3.7 Récapitulatif global des données sélectionnées et de leurs principaux traitements en vue de la classification des récifs d'hermelles

Le schéma ci-dessous (Figure 19) présente de manière synthétique l'ensemble des chaînes de traitements réalisées sur chaque jeu de données.



Création de masques sur l'ensemble des jeux de données

Création de subsets sur P1Pan, P1MS, S2 et (S2 + S1) suivant la même emprise des 8 sous-zones Ortho-HR

Figure 19 : Schéma simplifié de l'ensemble des chaînes de traitements réalisées sur les différents jeux de données

A l'issue de cette chaîne de traitements, le jeu de données RVBIR 0,5 m existe en doublon : l'un fourni par BD-Ortho, l'autre par le *pansharpening* Gram-Schmidt de P1Pan. L'option retenue est de conserver uniquement la donnée BD-Ortho qui couvre entièrement la surface du Parc naturel marin contrairement à la donnée P1Pan qui a une absence de données au sud de La Rochelle.

La méthodologie initialement prévue était de créer les vérités terrains directement à l'échelle du Parc naturel marin sur les deux Ortho-HR mosaïquées. Mais les contraintes imposées par cette donnée trop lourde nous obligent à travailler en sous-zones. Cette approche s'avère finalement intéressante car elle offre l'opportunité de mesurer l'effet de l'échelle d'analyse locale (cinq sous-zone) vs l'échelle d'analyse régionale (un bloc) pour les différentes classifications qui seront obtenues sur S2, (S2+S1), P1MS et BD-Ortho. Seule la donnée Ortho-HR 0,2 m n'a pas d'échelle d'analyse régionale car le calcul du mosaïquage n'a pas possible en raison d'un manque de mémoire.

2.3.8 Apport d'un prédicteur supplémentaire : donnée Nualid (nuage de points *LiDAR*)

Deux nuages de points *LiDAR* (*Light Detection And Ranging* ; Sources IGN et SHOM) sont disponibles mais ne couvrent pas l'intégralité du littoral de la zone d'étude (Figure 20).

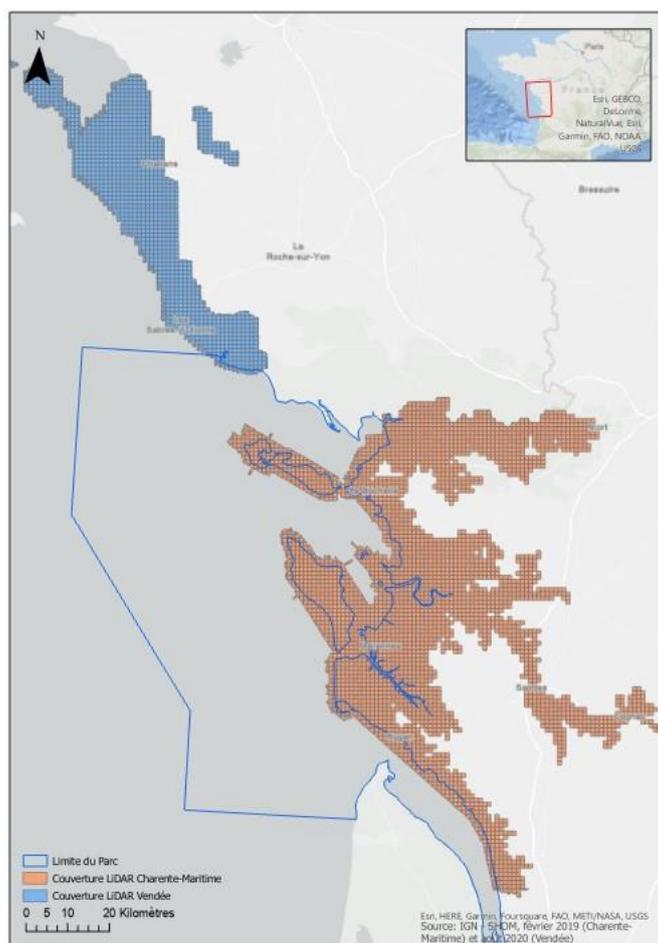


Figure 20 : Zones couvertes par des nuages de points *LiDAR*

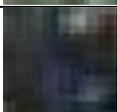
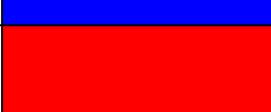
Le nuage de points correspondant à la partie vendéenne (marron foncé), nommé Nualid 85, a été acquis en août 2020. Il est constitué de 43,64 points/m². Celui correspondant à la partie Poitou-Charentes (marron clair), nommé Nualid 17, a été acquis en février 2019 et a 18,87 points/m².

Ils sont traités dans *Global Mapper* pour créer une grille d'élévation. Un *layer stacking* permet d'ajouter ce prédicteur aux bandes spectrales de S2, (S2+S1), P1MS, BD-Ortho et Ortho-HR pour chaque sous-zone et à l'échelle du Parc marin naturel (sauf pour Ortho-HR). Ceci va permettre d'observer l'effet de la topographie sur les résultats de classification globale.

2.4 Création des vérités terrain (calibration et validation)

Les vérités terrains ou *Region of Interests* (ROIs) sont créées sur chaque sous-zone par photo-interprétation en neuf classes distinctes (Tableau 9).

Tableau 9 : Description des classes d'intérêt

Classe	Vignette	Couleur
Hermelle		
Algue verte		
Algue brune		
Sédiment sec		
Sédiment humide		
Platier rocheux		
Eau de mer		
Table ostréicole		
Bateau		

L'OFB dispose de données de présence compilées (exemple de l'île d'Oléron en Figure 21), qui ont servi de base d'apprentissage à la reconnaissance visuelle des hermelles et leur contexte spatial sur l'Ortho HR (0,2 m) par l'analyste Olivia Le Gal. Les 134 données vectorielles (polygones), principalement issues du programme CARTHAM de 2012 (33), présentaient une surface moyenne trop grossière (englobant d'autres classes que les hermelles) pour être directement utilisées en tant que vérités terrain « pures ». C'est pourquoi les vérités terrains ont été affinées par l'analyste sur l'Ortho-HR. Il existe un grand nombre d'interactions possibles entre des biocénoses et des habitats (au sens physique du terme), telles que le nombre de classes possibles peut se résumer dans une approche parcimonieuse par 9 classes (Tableau 9).



Figure 21 : Polygones des récifs d'hermelles (en rouge) de l'île d'Oléron, validés par l'Office Français de la Biodiversité

Chaque classe est subdivisée en calibration et validation (Figure 22) dans ENVI 5.3. Les échantillons de calibration sont utilisés pour définir les classes en s'appuyant sur les valeurs radiométriques des pixels sélectionnés. Ceux de validation permettent d'évaluer la qualité de la classification (34).



Figure 22: Répartition équitable des régions d'intérêt entre classes calibration et validation

Chaque classe doit contenir au minimum trente échantillons calibration et validation. La qualité de la classification dépend du nombre suffisant de ces échantillons (35). Il faut de plus avoir une bonne proportion dans le nombre de pixels par classe pour éviter un biais dans la classification. Pour pallier cela, un ré-échantillonnage aléatoire (Figure 23) est réalisé pour que toutes les classes (calibration et validation) contiennent le même nombre de pixels.

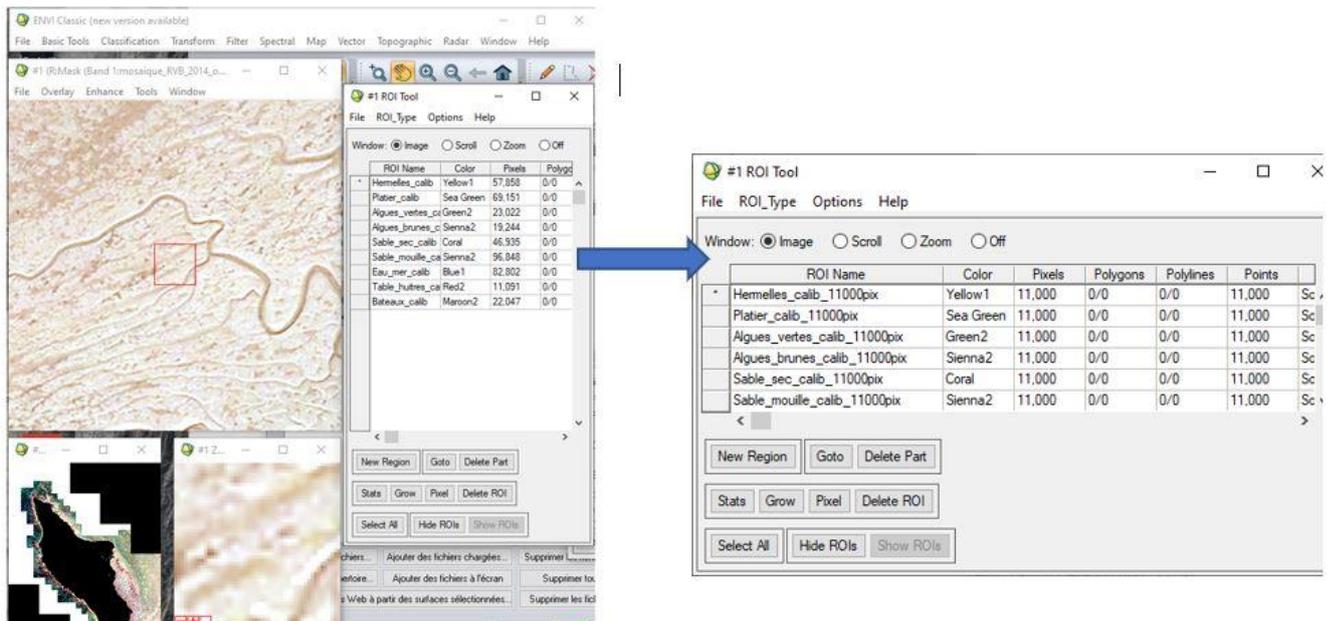


Figure 23 : Ré-échantillonnage des classes calibration et validation dans ENVI Classic 5.3 pour la sous-zone 1 Oléron

Les classes de validation sont celles qui nécessitent la plus grande rigueur dans la sélection des pixels. Les *ROIs* doivent être créés de manière aléatoire et homogène sur chaque sous-zone en se basant sur les vérités terrains fournies par le Parc. La photo-interprétation à cette étape doit être précise même si elle entraînera inévitablement des biais.

A l'issue de ce travail de photo-interprétation, il apparaît que trois sous-zones ne présentent pas de récifs d'hermelles qui soient détectables ou qui aient été identifiées sur le terrain. L'échelle d'analyse régionale correspondra donc à la combinaison de cinq sous-zones où des récifs d'hermelles ont pu être identifiés (Tableau 10).

Tableau 10 : Identification des récifs d'hermelles dans chaque sous-zone

Sous-zones sans récifs d'hermelles	Sous-zones avec récifs d'hermelles
Zone 4 : Rochelle Sud	Zone 1 : Oléron
Zone 6 : Fond estuaire	Zone 2 : Ile de Ré
Zone 7 : Vendée SE	Zone 3 : Rochelle Nord
	Zone 5 : Entrée estuaire
	Zone 8 : Vendée SO

Pour rappel, la donnée P1 présente une absence de données pour la zone 3 (Rochelle Nord). L'échelle d'analyse régionale pour P1MS se réalisera à partir des quatre sous-zones restantes présentant des récifs d'hermelles.

2.5 Chaîne de traitements pour transférer les vérités terrains (calibration et validation) vers les jeux de données multi-échelles

Une fois les *ROIs* ré-échantillonnés sur les Ortho-HR 0,2 m, ils sont exportés en format vectoriel (.evf dans *ENVI*) vers les jeux de données BD-Ortho 0,5 m, P1MS 2 m, S2 10 m et (S2+S1) 10 m. Il faut faire l'export en deux fois pour préserver les classes calibration d'une part et validation d'autre part. Ces données .evf sont ensuite ré-exportées en *ROIs* vers chaque jeu de données, *ROIs* qui doivent être à nouveau ré-échantillonnés. L'ensemble de ces traitements est présenté dans la Figure 24 ci-dessous. Il s'agit d'un schéma simplifié de toutes les étapes nécessaires pour aboutir à des données « prêtes » pour les classifications multi-sources et multi-échelles.

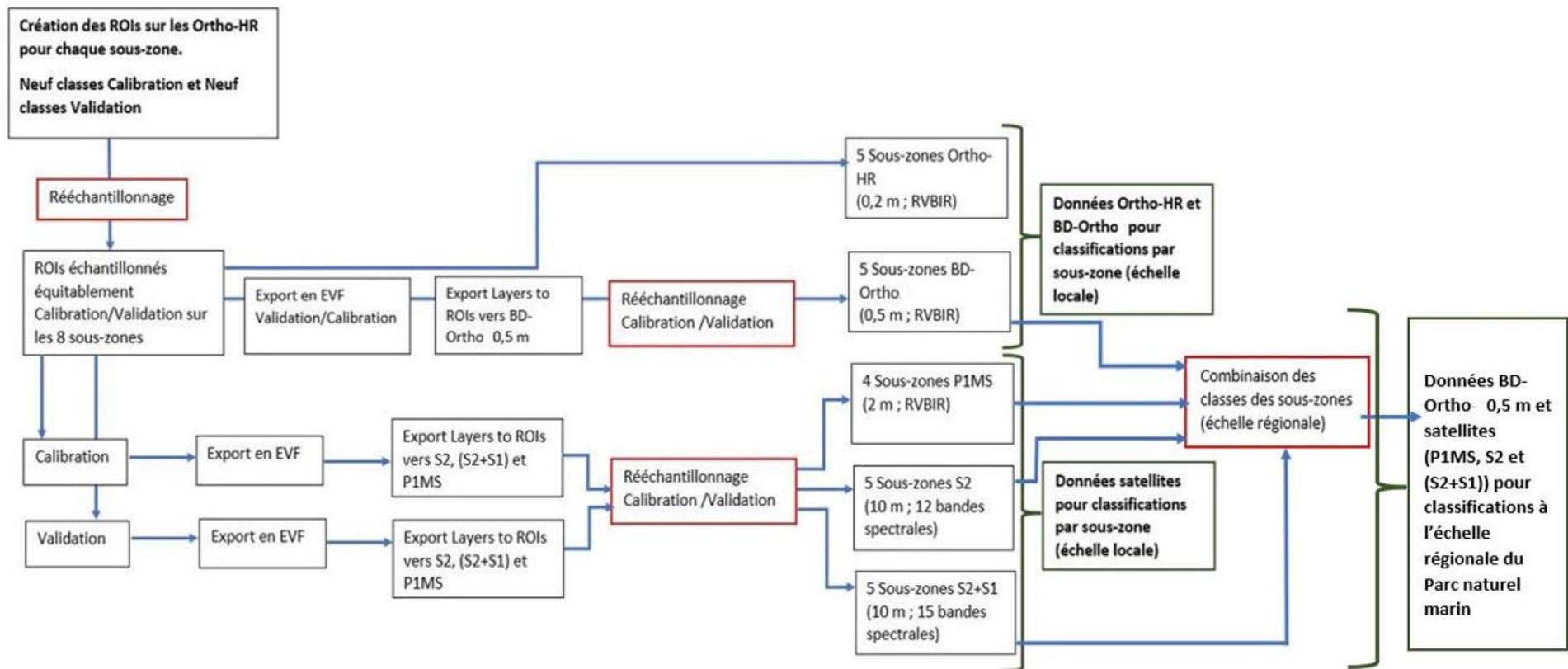


Figure 24 : Schéma simplifié des différents traitements dans *ENVI Classic 5.3* - Obtention des données calibration et validation multi-échelles utilisées pour les classifications

A l'image de la classe « Hermelles » sur trois sous-zones, d'autres classes peuvent aussi être absentes. Le tableau 11 ci-dessous présente l'ensemble des classes pour chaque sous-zone (P = présence de la classe, ou A = absence de la classe).

Tableau 11 : Identification des classes par sous-zone

Sous-zones / Classes	1 Oléron	2 Ile de Ré	3 Rochelle Nord	4 Rochelle Nord	5 Entrée estuaire	6 Fond estuaire	7 Vendée SE	8 Vendée SO
Hermelles	P	P	P	A	P	A	A	P
Platiers	P	P	P		P			P
Algues vertes	P	P	A		A			P
Algues brunes	P	P	P		P			A
Sédiment sec	P	P	P		P			P
Sédiment humide	P	P	P		P			P
Eau de mer	P	P	P		P			P
Tables ostréicoles	P	P	P		A			A
Bateaux	P	P	A		P			P

Suite aux différents rééchantillonnages effectués, il apparaît que plus la résolution spatiale du jeu de données, vers lequel les ROIs d'origine sont exportés, est faible, plus le nombre de pixels diminue. Le tableau 12 répertorie le nombre de pixels final obtenu en fonction des jeux de données et de l'échelle d'analyse.

Tableau 12 : Nombre de pixels par classe (validation et calibration) après rééchantillonnage sur les différents jeux de données utilisés (par sous-zone et à l'échelle du Parc naturel marin)

Sous-zones / Jeux de données	1 Oléron	2 Ile de Ré	3 Rochelle Nord	5 Entrée estuaire	8 Vendée SO	Échelle du Parc naturel marin (combinaison des classes des sous-zones et ré-échantillonnage)
Ortho-HR (0,2 m)	11 800	11 900	13 500	14 500	17 000	<i>Absence données</i>
BD-Ortho (0,5 m)	5400	5730	6290	6570	7490	17 370
P1MS (2 m)	1930	1990	<i>Absence données</i>	2335	2500	4150
S2 (10 m)	340	570	630	700	320	1810
S2+S1 (10 m)	430	580	615	660	355	1610

2.6 Classification supervisée par maximum de vraisemblance

Il s'agit du classifieur probabiliste maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood, ML*) qui est entraîné sur la fraction de calibration des vérités terrains. Les classifications supervisées des différents jeux de données s'effectuent *via* l'algorithme *ML* qui est très communément utilisé en télédétection car il est peu « gourmand » en terme de temps de traitement (36). De plus, cette approche de classification paramétrique est considérée très robuste statistiquement (37). C'est un algorithme basé sur la probabilité qu'un pixel donné appartienne à une classe prédéfinie dans une distribution normale. Les pixels assignés à une classe ont ainsi une forte probabilité d'appartenir à celle-ci (28). Cet algorithme de classification a été calibré (entraîné) et validé (testé) sur différents types de couvertures au sol et sur plusieurs gammes de données satellitaires (38) (39).

2.7 Évaluation de la précision et validation des résultats

A l'issue des classifications, le calcul de la précision est estimé à partir des matrices de confusion générées, méthode couramment utilisée en télédétection, très largement détaillée dans la littérature scientifique (19) (40) (41), et en particulier dans les travaux de Congalton (42) (43) (44). Dans ces matrices de confusion, la nature de la classification des pixels de validation (issus des polygones de la base de reconnaissance sur l'Ortho-HR, cf. 2.4) est comparée avec la nature de référence de ces pixels. Elles sont de taille $n \times n$ (n étant le nombre de classes) avec en colonnes les pixels classifiés et en lignes les pixels de référence. Les pixels correctement classés se situent sur la diagonale de la matrice.

Pour chaque classification, la précision globale (*Overall Accuracy, OA*) est utilisée. Celle-ci est calculée en divisant les pixels correctement classés par le nombre total de pixels (41), c'est-à-dire suivant l'équation :

$$OA = \frac{\sum_i \frac{n_{BC(i)}}{n}}{m} \quad (1)$$

Où : $BC(i)$ = Nombre de pixels correctement classés pour une classe (i) ;
 n = Nombre de classes ;
 m = Nombre total de pixels.

Cet indice permet de mesurer quantitativement la qualité des résultats. Une classification est jugée fiable lorsque la précision globale OA est supérieure à 80%.

Pour évaluer la précision des classes individuellement, on prend en compte le *Producer's Accuracy (PA)* et le *User's Accuracy (UA)*. Le PA correspond au rapport entre les pixels d'une classe correctement classés et tous les pixels des données de validation de cette classe. Le UA est le rapport des pixels d'une classe correctement classés sur tous les pixels classés de cette classe donnée (45) (46). Les tableaux des travaux de Story et Congalton (45) présentés ci-dessous (Tableaux 13 et 14) illustrent par des exemples numériques ce que sont OA , PA et UA issus d'une matrice de confusion.

Tableau 13 : Exemple numérique d'un *overall accuracy* [45]

TABLE 1. AN EXAMPLE ERROR MATRIX SHOWING ROW, COLUMN, AND GRAND TOTALS.

		Reference Data			Row Total
		X	Y	Z	
Classified Data	X	15	2	4	21
	Y	3	12	2	17
	Z	1	3	14	18
Column Total		19	17	20	56

Sum of the major diagonal = 41
Overall Accuracy = $41/56 = 73\%$

Tableau 14 : Exemple numérique d'un *producer's accuracy* et d'un *user's accuracy*

TABLE 2. A NUMERICAL EXAMPLE SHOWING PRODUCER'S AND USER'S ACCURACIES

		Reference Data			Row Total
		F	W	U	
Classified Data	F	28	14	15	57
	W	1	15	5	21
	U	1	1	20	22
Column Total		30	30	40	100

Sum of the major diagonal = 63
Overall Accuracy = $63/100 = 63\%$

<u>Producer's Accuracy</u>	<u>User's Accuracy</u>
F = $28/30 = 93\%$	F = $28/57 = 49\%$
W = $15/30 = 50\%$	W = $15/21 = 71\%$
U = $20/40 = 50\%$	U = $20/22 = 91\%$

Il existe deux types d'erreurs pour *PA* et *UA*. Par exemple, pour la classe F qui comporte un total de 30 pixels de validation, 28 sont correctement classés et 2 se rangent dans d'autres classes, il s'agit d'une erreur d'omission. Dans la colonne totale d'arrivée à droite, la classe F compte 57 pixels classés dont 28 proviennent des pixels de validation et 29 se rangeant dans d'autres classes. Il s'agit cette fois d'une erreur de commission.

2.8 Post-traitements et livrables

L'OFB du Parc naturel marin souhaite des livrables sous forme de polygones vectoriels correspondant à la probabilité de présence de récifs d'hermelles à l'échelle du Parc. Une fois les différentes classifications effectuées, seuls les meilleurs résultats seront retenus et fournis à l'OFB. Ces résultats subiront un post-traitement de lissage grâce à l'outil *Majority / Minority Analysis* d'*ENVI 5.3*. Ce traitement filtre l'image en remplaçant la valeur du pixel central d'une fenêtre de taille $n \times n$ (où il faut définir n) par la valeur majoritaire située dans cette fenêtre. Des fiches de métadonnées accompagneront l'ensemble des données vectorielles livrées comme l'exige la Directive Européenne INSPIRE de 2007.

3 – Résultats et discussion

Graduellement seront quantifiés les effets de l'échelle (locale versus régionale), puis la résolution spatiale et enfin la résolution spectrale (optique et radio).

3.1 Effet de l'échelle d'analyse locale (moyenne des 5 sous-zones pourvus d'hermelles) versus régionale (Parc)

L'effet de l'échelle d'analyse a pu être évalué sur le produit aérien (BD-Ortho à 0,5 m), produit le plus fin dont le calcul était faisable à l'échelle régionale. En effet, la classification régionale à 0,2 m n'a pas abouti en raison d'un manque de mémoire. L'effet a été quantifié à partir des performances de classification *OA*, *PA*(Hermelles) et *UA*(Hermelles) dérivées de l'échelle locale, via la moyenne des 5 sous-zones géographiques du Parc, et celles issues de l'échelle régionale du Parc, d'un bloc.

Une première série de résultats a été produite à l'aide de la combinaison RVB (Figures 25 et 27). La moyenne *OA*, issue des 5 classifications géographiques, est supérieure de 13,32% au résultat de la classification globale du Parc. Ces résultats en faveur de l'analyse locale sont encore plus manifestes pour la classe « hermelles », avec une différence de 35,60% et 39,25% pour *PA*(Hermelles) et *UA*(Hermelles), respectivement.

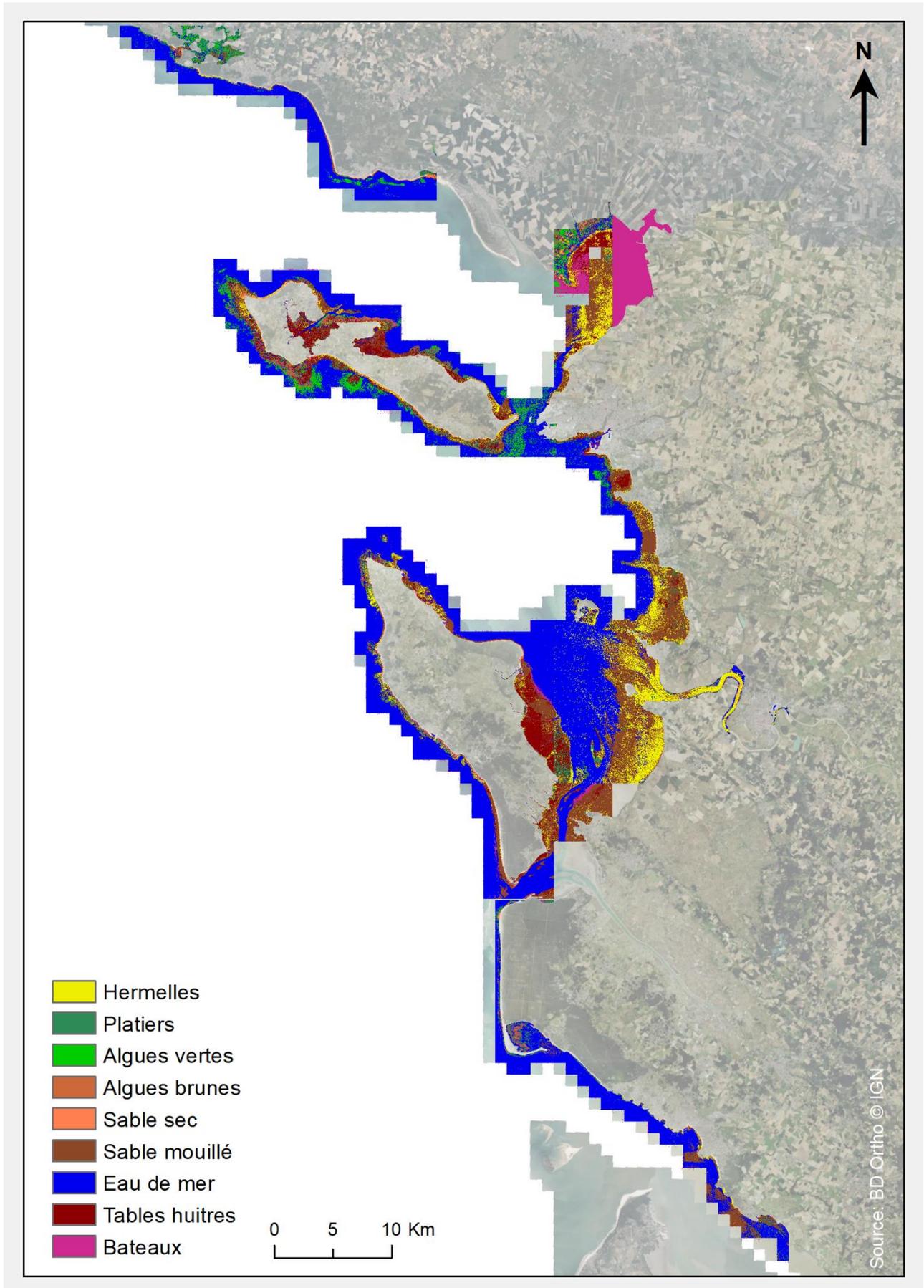


Figure 25 : Classification par maximum de vraisemblance de la BD-Ortho (RVB) à 0,5 m

Une seconde série de résultats a été produite à l'aide de la combinaison RVB-IR (Figures 26 et 28). La moyenne OA, issue des 5 classifications géographiques, est supérieure de 10,04% au résultat de la classification globale du Parc. Ces résultats en faveur de l'analyse locale sont aussi plus importants pour la classe « hermelles », avec une différence de 26,32% et 23,72% pour PA(Hermelles) et UA(Hermelles), respectivement.

Il est donc recommandé d'adopter l'analyse locale (zone par zone) versus régionale (un bloc).

Pour faciliter une synthèse, les résultats d'effet d'analyse liés à P1MS et S2 ne sont pas présentés, néanmoins ils suivent aussi ce constat de travailler à l'échelle locale, réunifiée/moyennée a posteriori, que d'effectuer les classifications « d'un bloc » à l'échelle régionale. Cette tendance traduit le fait que les modèles probabilistes de *ML* appréhendent mieux la variabilité intra-zone qu'inter-zone. Une piste de recherche consistera donc à produire des modèles plus sophistiqués, tels qu'arbres de décision, forêts aléatoires, réseaux de neurones superficiels ou profonds, pour réduire cet écart entre l'analyse locale et régionale.

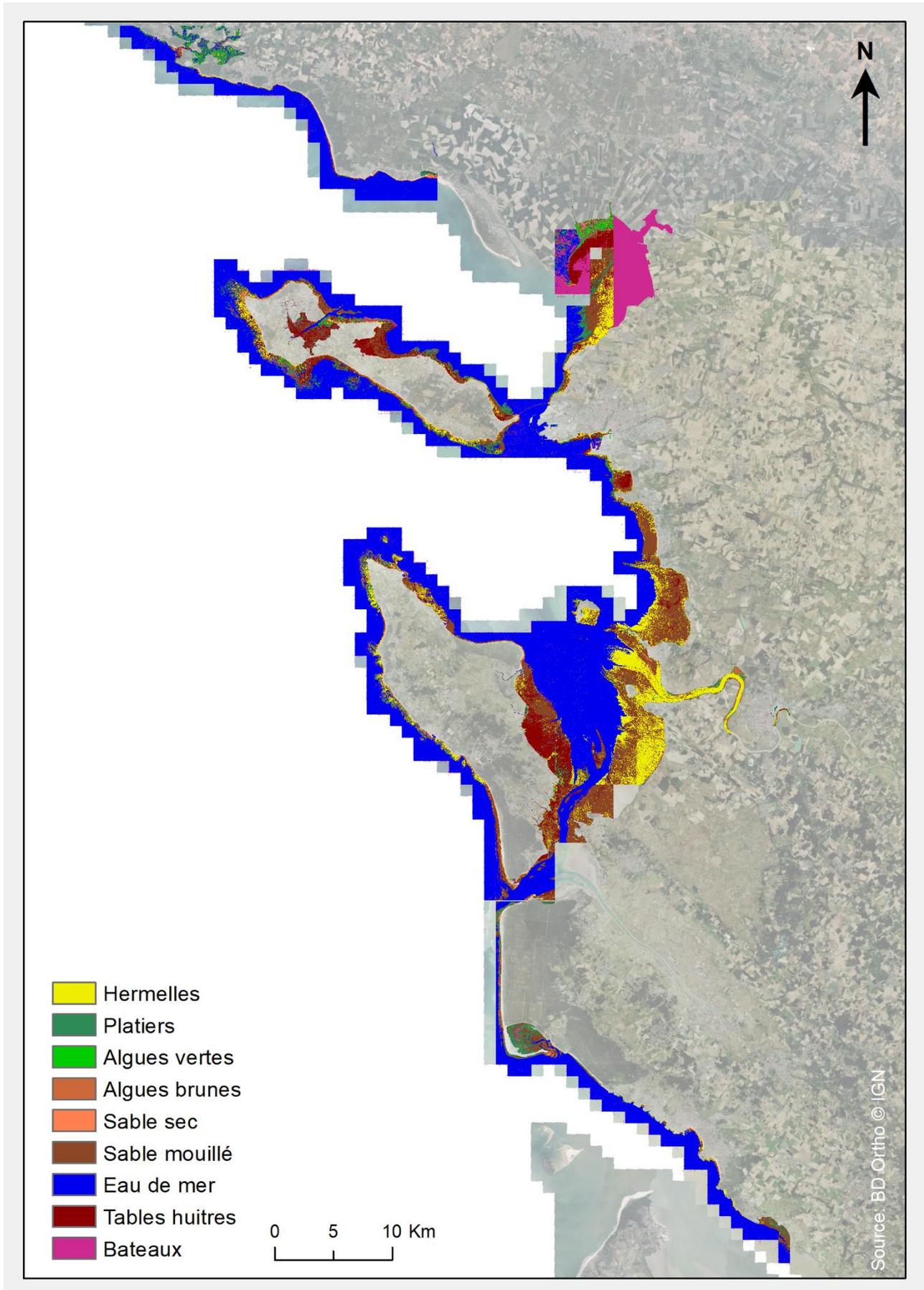


Figure 26 : Classification par maximum de vraisemblance de la BD-Ortho (RVB-IR) à 0,5 m

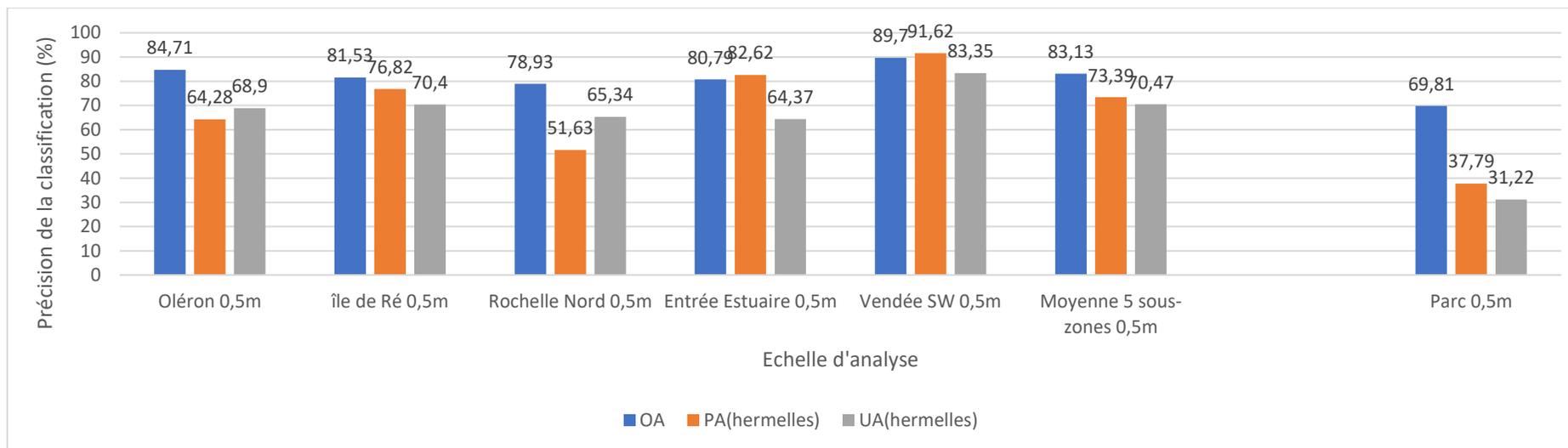


Figure 27 : Effet de l'échelle d'analyse sur les OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) de la combinaison RVB à l'échelle locale des 5 sous-zones et régionale du Parc

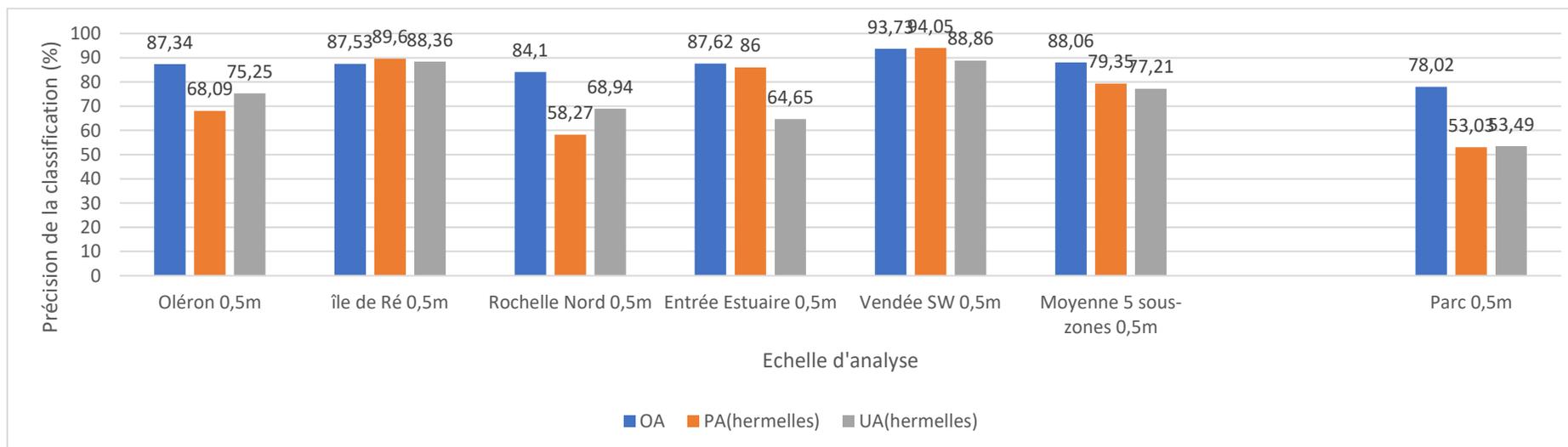


Figure 28 : Effet de l'échelle d'analyse sur les OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) de la combinaison RVB-IR à l'échelle locale des 5 sous-zones et régionale du Parc

3.2 Effet de la résolution spatiale

Les résultats liés à l'estimation de l'effet spatial ont été extraits à l'échelle locale, comme déterminée précédemment.

3.1.1 Effet spatial avec la référence RVB

L'effet de la résolution spatiale (taille du pixel) sur les scores des OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) a, de prime abord, été évalué sur le jeu de référence de base RVB (Figure 29).

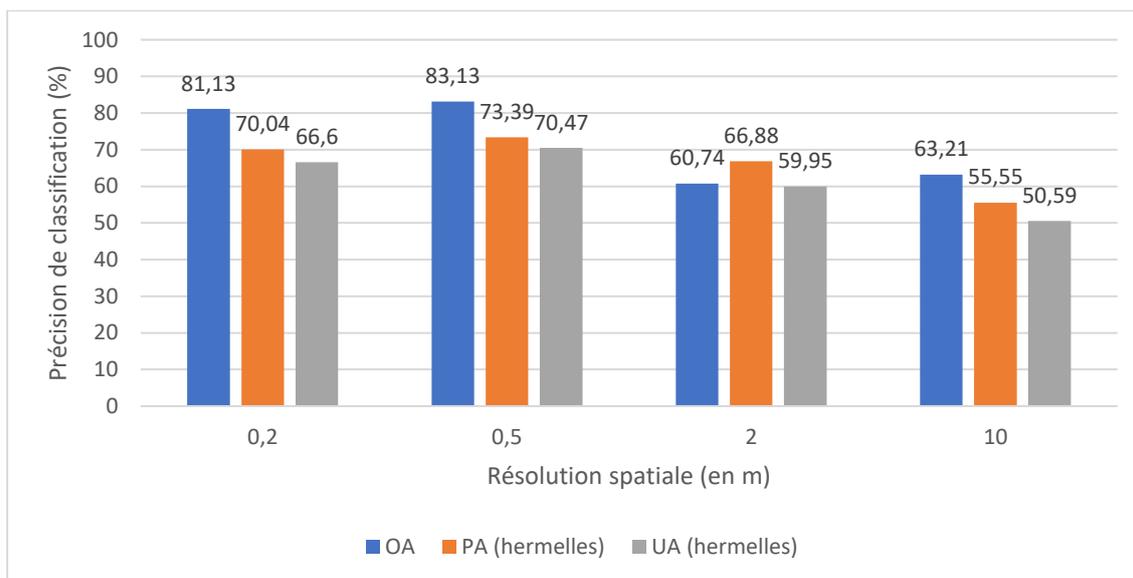


Figure 29 : Effet de la résolution spatiale en fonction de la taille des pixels sur les OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) de la combinaison RVB à l'échelle locale des 5 sous-zones

Toutes séries de précision de classification confondues, la résolution spatiale à 0,5 m est la meilleure, suivie des scores liés à 0,2 m, puis 2 m, et enfin 10 m. Les meilleures OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) atteignent respectivement 83,13%, 73,39% et 70,47% (pour 0,5 m), et les moins bons descendent à 60,74% (pour 2 m), 55,55% et 50,59% (pour 10 m), respectivement.

A l'échelle du Parc, incluant les neuf classes, la différence de OA la plus importante s'établit entre 0,5 et 2 m, avec 22,39% de baisse. A l'échelle de la classe « Hermelles », les baisses les plus drastiques se dessinent entre 0,5 et 10 m, à la fois pour PA (17,84%) et UA (19,88%).

Un effort de travail sur la très haute résolution spatiale est donc fortement conseillé.

3.1.2 Effet spatial avec la référence RVB+IR

L'effet de la résolution spatiale (taille du pixel) sur les scores des OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) a, ensuite, été quantifié sur le second jeu de référence RVB+IR (Figure 30).

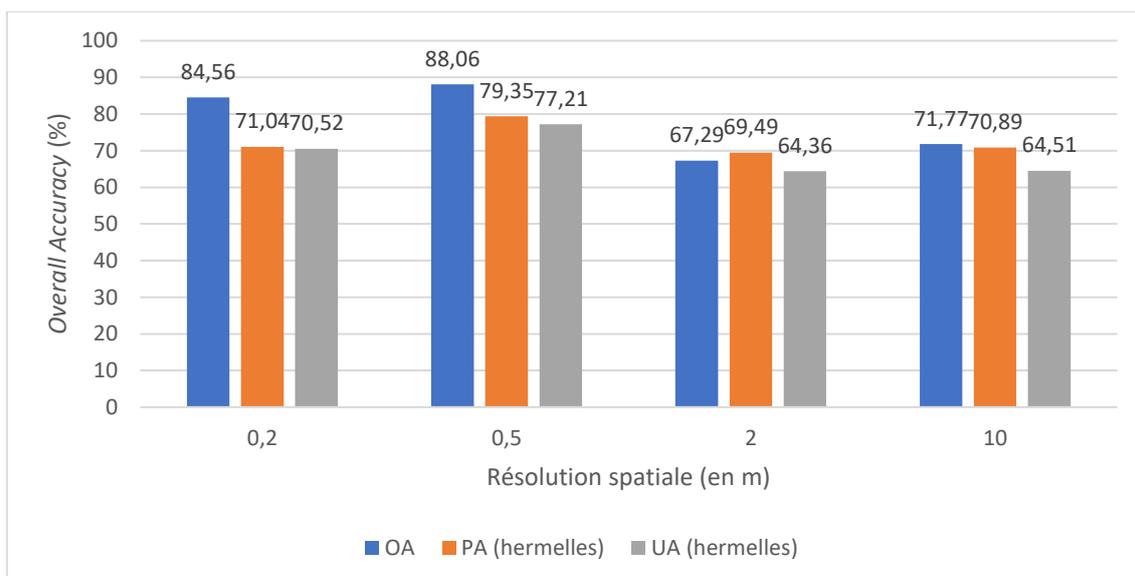


Figure 30 : Effet de la résolution spatiale en fonction de la taille des pixels sur les OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) de la combinaison RVB+IR à l'échelle locale des 5 sous-zones

Toutes séries confondues, les meilleures performances décroissent de la résolution spatiale de 0,5 m, puis 0,2 m, 10 m et enfin 2 m. Les meilleures OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) montent respectivement à 88,06%, 79,35% et 77,21% (pour 0,5 m), et les moins bons déclinent à 67,29%, 69,49% et 64,36% (pour 2 m), respectivement.

A l'échelle du Parc, la différence de OA la plus importante s'établit, donc, entre 0,5 et 2 m, avec 20,77% de baisse. A l'échelle de la classe d'hermelles, les diminutions les plus importantes se dessinent, à nouveau, entre 0,5 et 2 m, à la fois pour PA (9,86%) et UA (12,85%).

Se confirme une vive recommandation de classification à l'échelle de la très haute résolution spatiale.

3.3 Effet de la topographie

Les résultats associés à l'effet de la topographie (MNT Nualid) ont été créés en comparant les performances OA à l'échelle locale pour les produits satellitaires (S2, P1MS) et aériens (BD-Ortho et Ortho-HR).

Pour la combinaison de référence RVB (Figure 31), le score de la classification des neuf classes a été égal ou inférieur lorsque la combinaison était augmentée du MNT. Ainsi, par ordre croissant, il n'y a pas eu d'effet pour P1MS (0%), suivi par une diminution de 13,35% pour S2, de 20,22% pour la BD-Ortho et de 25,24% pour l'Ortho-HR.

S'agissant de la combinaison RVB-IR (Figure 32), le score de la classification des neuf classes a été systématiquement et fortement inférieur lorsque la combinaison était pourvu du MNT. Ainsi, par ordre croissant, il y a un déclin pour S2 (28,71%), puis P1MS (29,25%), BD-Ortho (31,94%) et Ortho-HR (34,79%).

Cet effet négatif de la topographie pourrait s'expliquer du fait que les MNT Nualid produits soient issus de levés topographiques (infrarouge) et ne couvrent que la moitié intertidale supérieure (au-dessus du zéro topographique). Ainsi, tous les habitats, dont les hermelles, localisés dans la moitié intertidale inférieure, n'ont pas pu bénéficier d'un apport de cette topographie manquante. Il sera donc judicieux d'employer une donnée d'élévation topobathymétrique fine (type Litto3D®) de la zone intertidale complète ou quasi-complète pour appréhender justement cette composante verticale. De surcroît, il sera attendu les résultats des classifications des *PA*(hermelles) et *UA*(hermelles) dans des études plus détaillées.

Il est donc ici conseillé de ne pas utiliser la donnée de topographie Nualid, mais plutôt topobathymétrique Litto3D®, lorsque celle-ci sera disponible sur l'estran.

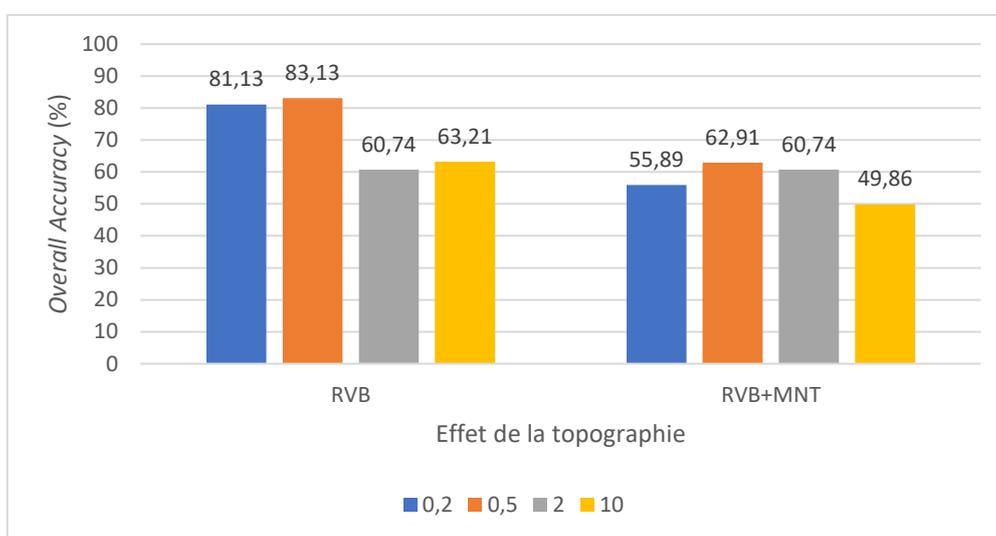


Figure 31 : Effet de la topographie (z) en fonction de la taille des pixels sur l'*overall accuracy* de la combinaison RVB à l'échelle locale (5 sous-zones)

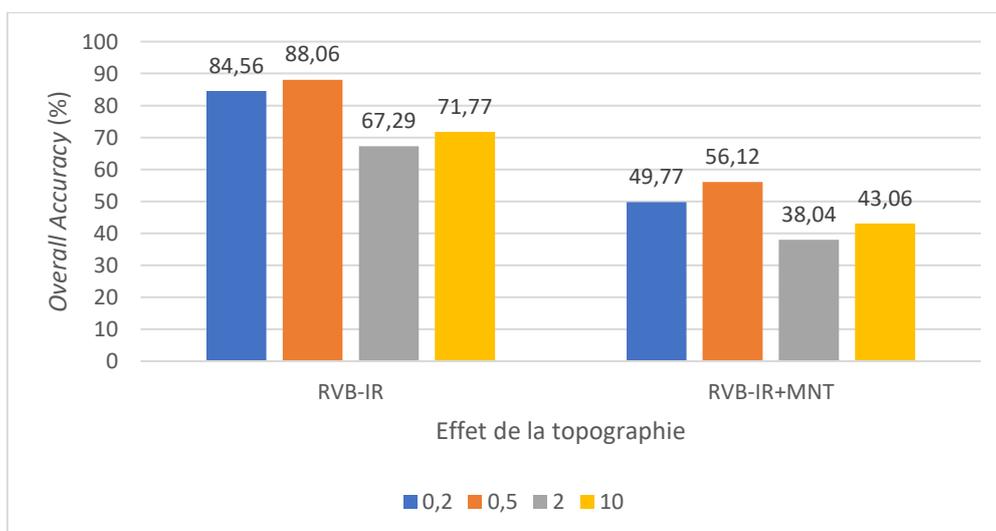


Figure 32 : Effet de la topographie (z) en fonction de la taille des pixels sur l'*overall accuracy* de la combinaison RVB-IR à l'échelle locale (5 sous-zones)

3.4 Effet de la résolution spectrale

L'effet de la résolution spectrale a été calculé sur la base de l'échelle locale, c'est-à-dire des 5 sous-zones pourvues d'hermelles.

3.4.1 Contribution de l'IR à l'imagerie de l'Ortho-HR

L'effet de la résolution spectrale à 0,2 m (Figure 33) a été quantifié en comparant les indicateurs de classifications entre la référence RVB et la référence augmentée RVB+IR (Figure 34).

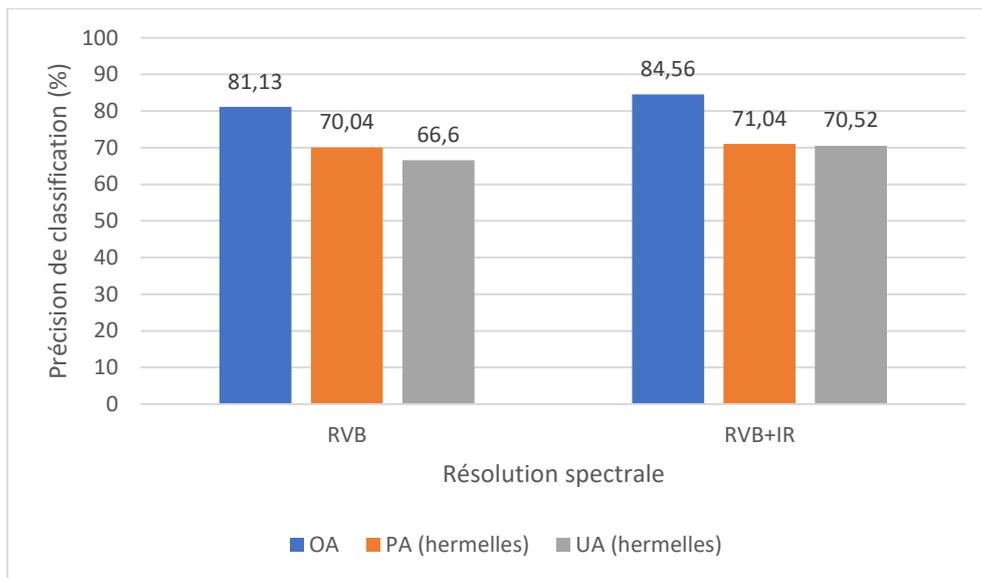


Figure 33 : Effet de la résolution spectrale de l'Ortho-HR (0,2 m) sur la moyenne des OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) à l'échelle locale des 5 sous-zones

A la résolution spatiale la plus fine (0,2 m), l'ajout de l'IR contribue positivement aux performances de classification des neuf classes (OA, 84,56%), et aux scores liés à la classe hermelles (PA, 71,04%, et UA, 70,52%). Nous notons ainsi des gains de 3,43%, 1% et 3,92% pour OA, PA(hermelles) et UA(hermelles), respectivement.

L'augmentation des performances de classification RVB avec l'ajout de l'IR corrobore de nombreuses études intertidales comportant des classes caractérisées par une saturation d'eau différente (sec et humide) et/ou par une concentration de pigments photosynthétiques différente (algues vertes et brune). Ces différences sont mieux détectées par une combinaison RVB+IR que RVB uniquement (15).

L'intégration de l'IR au sein de l'imagerie Ortho-HR est donc vivement conseillée.

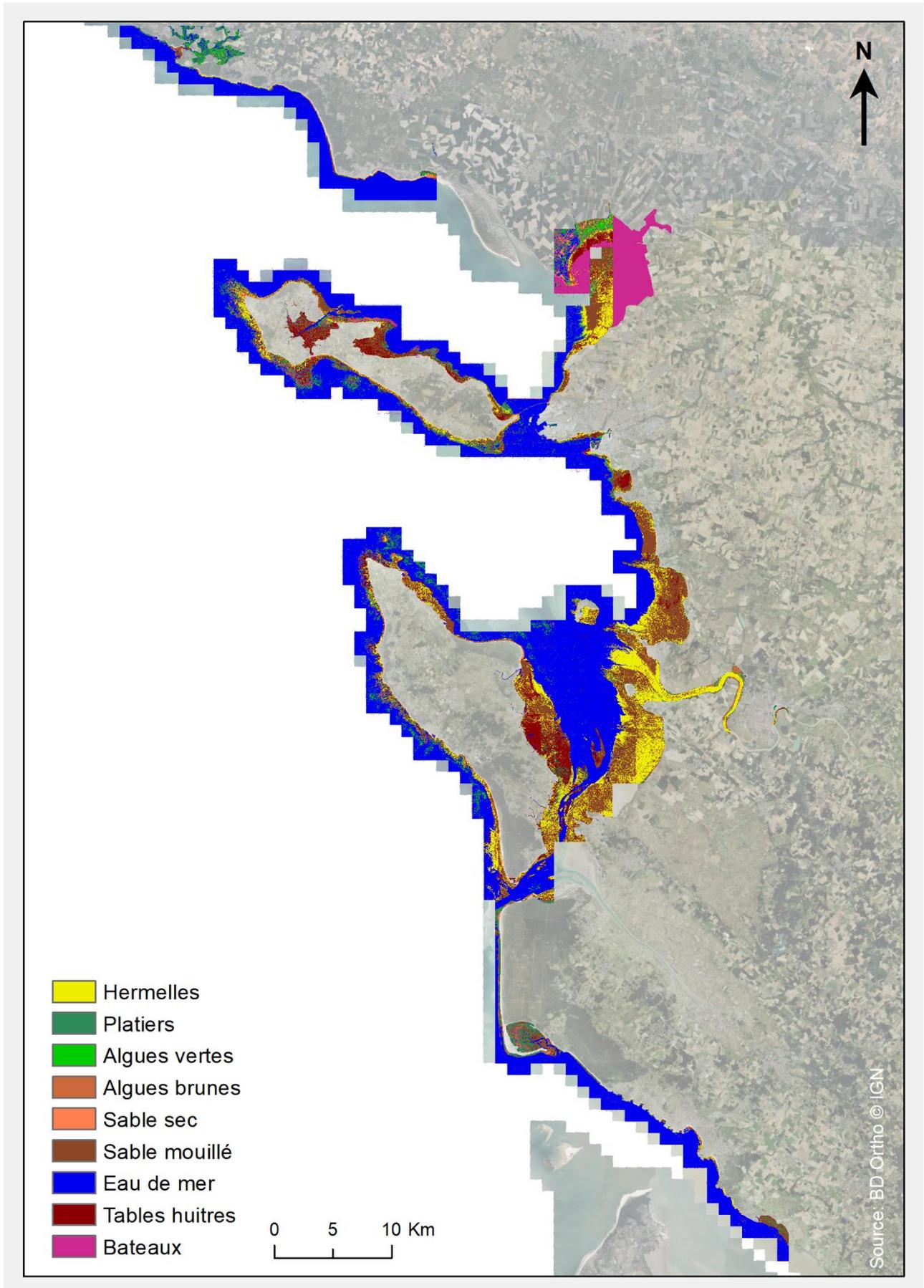


Figure 34 : Classification par maximum de vraisemblance de l'Ortho-HR (RVB-IR) à 0,2 m

3.4.2 Contribution de l'IR à l'imagerie de la BD-Ortho

L'effet de la résolution spectrale à 0,5 m (Figure 35) a été quantifié en comparant les indicateurs de classifications entre la référence RVB (Figure 25) et la référence augmentée RVB+IR (Figure 26).

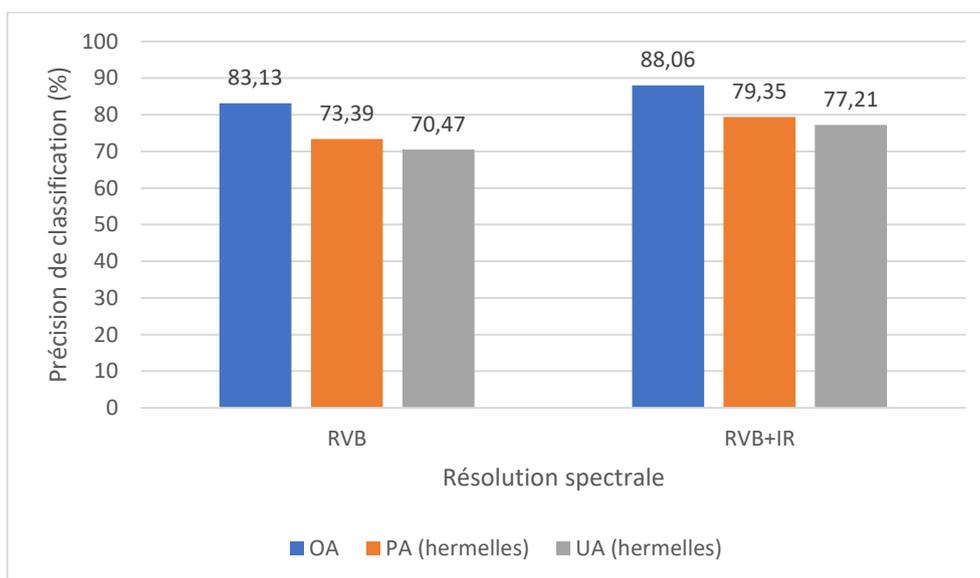


Figure 35 : Effet de la résolution spectrale de la BD-Ortho (0,5 m) sur la moyenne des OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) à l'échelle locale des 5 sous-zones

A la résolution spatiale de 0,5 m, l'ajout de l'IR contribue aussi systématiquement à de meilleures discriminations des neuf classes (OA, 88,06%), et à la détection de la classe « Hermelles » (PA, 79,35%, et UA, 77,21%). Nous calculons ainsi des gains majeurs de 4,93%, 5,96% et 6,74% pour OA, PA(hermelles) et UA(hermelles), respectivement.

L'intégration de l'IR au sein de l'imagerie BD-Ortho est donc encouragée.

3.4.3 Contribution de l'IR à l'imagerie de Pléiades-1

L'effet de la résolution spectrale à 2 m (Figure 36) a été quantifié en comparant les indicateurs de classifications entre la référence RVB et la référence augmentée RVB+IR (Figure 37).

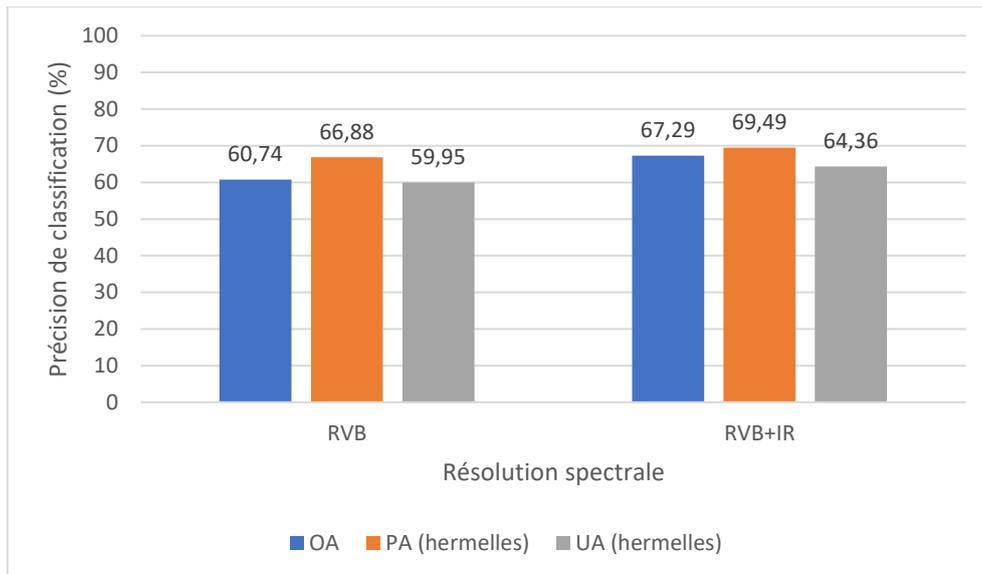


Figure 36 : Effet de la résolution spectrale de Pléiades-1 (2 m) sur la moyenne des OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) à l'échelle locale des 5 sous-zones

A la résolution spatiale de l'imagerie multispectrale de 2 m, l'ajout de l'IR à la combinaison de base RVB augmente ici, à nouveau, les taux de classifications OA (67,29%), PA(hermelles) (69,49%) et UA(hermelles) (64,36%). Des gains tangibles ont pu être calculés : 6,55%, 2,61% et 4,41% pour OA, PA(hermelles) et UA(hermelles), respectivement.

L'intégration de l'IR au sein de l'imagerie P1MS est donc recommandée.

En perspective, il sera judicieux de tester :

- L'imagerie *pansharpenée* à 0,5 m (via la contrainte de l'image panchromatique) ;
- La nouvelle imagerie Pléiades-NEO bénéficiant de deux bandes spectrales (violet et bord rouge), ainsi qu'une bande panchromatique à 0,3 m ;
- L'imagerie à très haute résolution temporelle PlanetScope SuperDove (huit bandes spectrales à 3 m acquises quotidiennement).

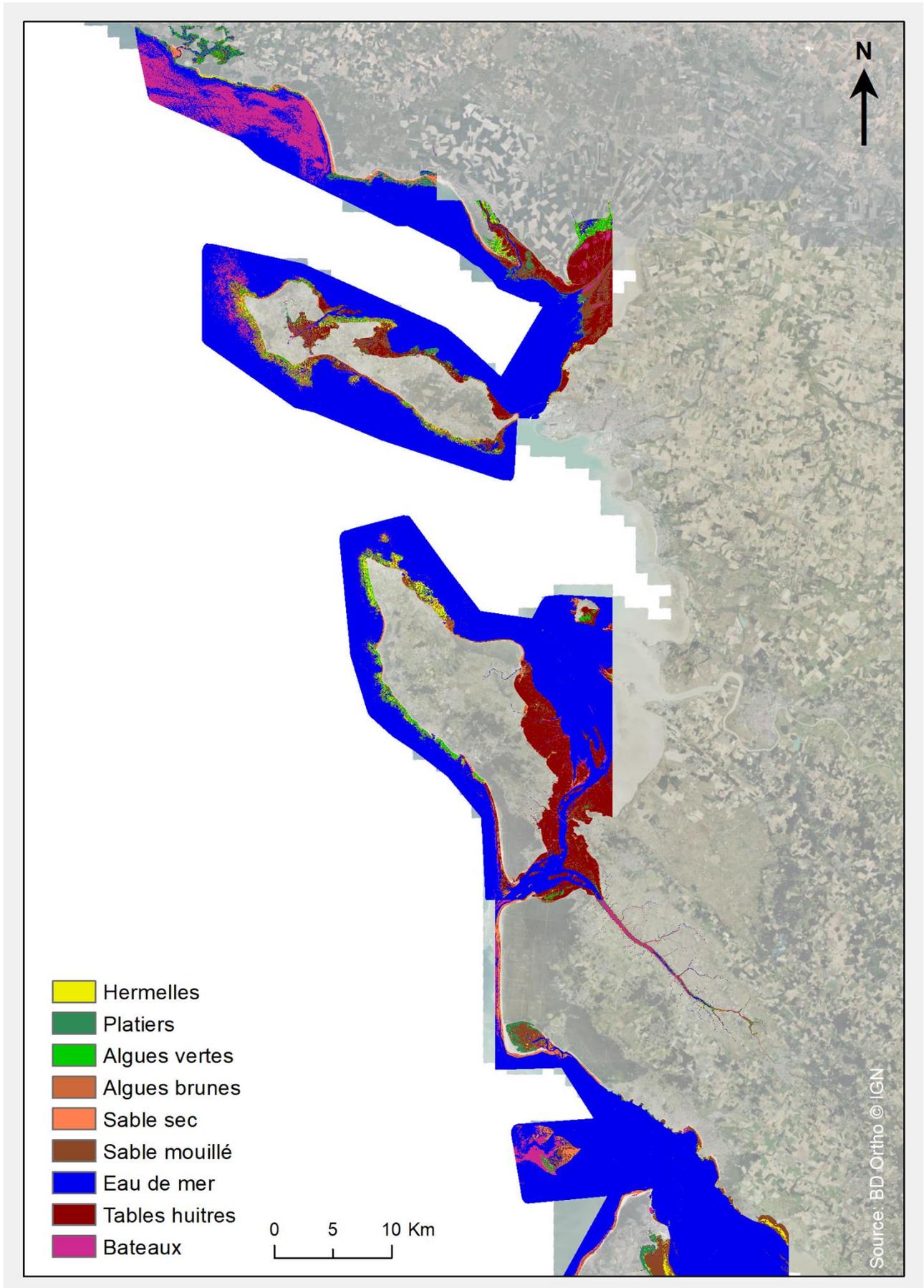


Figure 37 : Classification par maximum de vraisemblance de Pléiades-1 (RVB-IR) à 2 m

3.4.4 Contribution des bandes spectrales à l'imagerie de Sentinel-2

L'effet de la résolution spectrale à 10 m (Figure 38) a été quantifié en comparant les indicateurs de classifications entre la référence RVB et les combinaisons RVB augmentées, individuellement, des bandes B1, B5, B6, B7, B8A, B8, B9, B10 et B11, et conjointement de toutes les bandes (Figure 39).

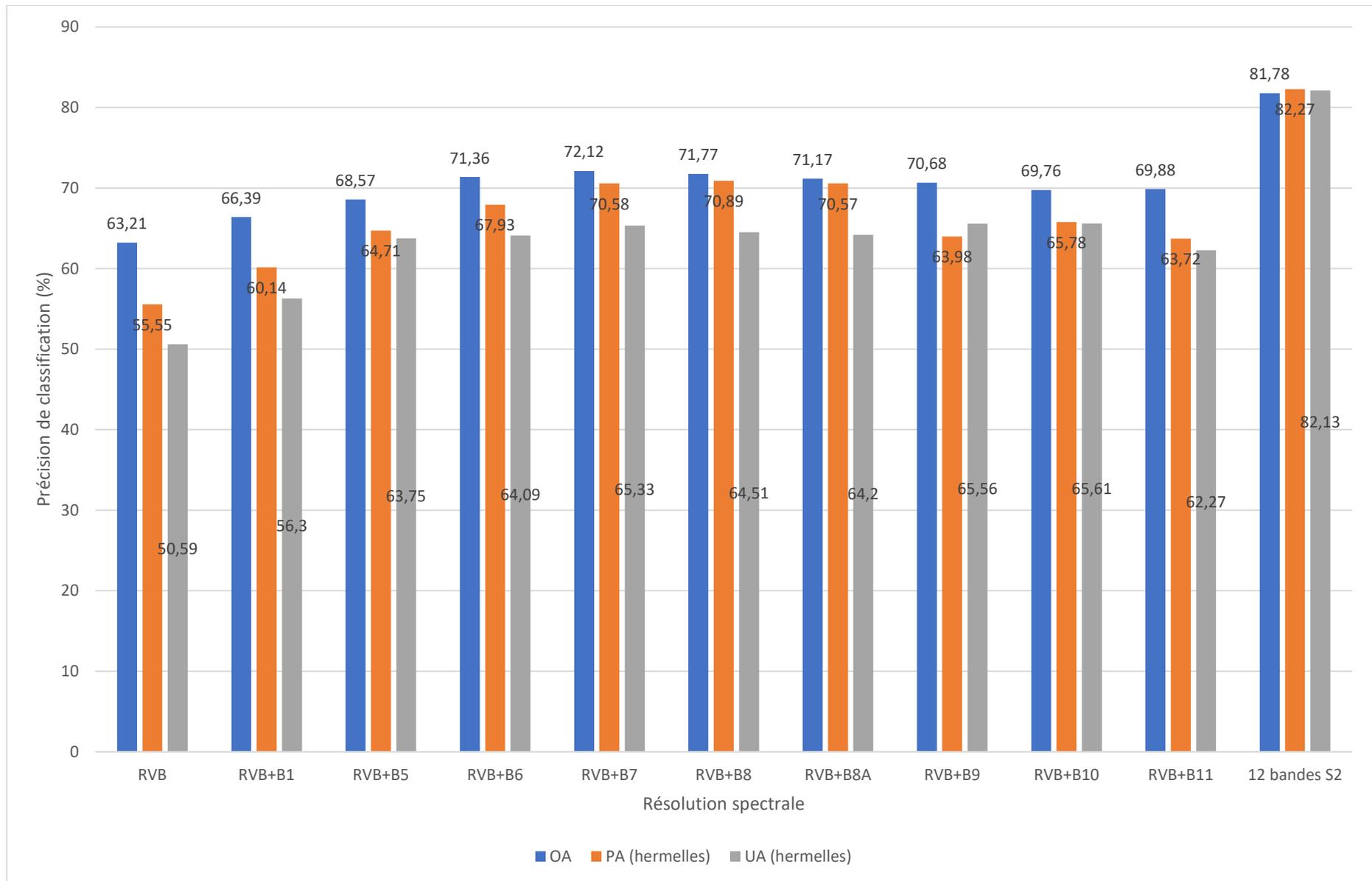


Figure 38 : Effet de la résolution spectrale de Sentinel-2 (10 m) sur la moyenne des OA, PA(hermelles) et UA(hermelles) à l'échelle locale des 5 sous-zones

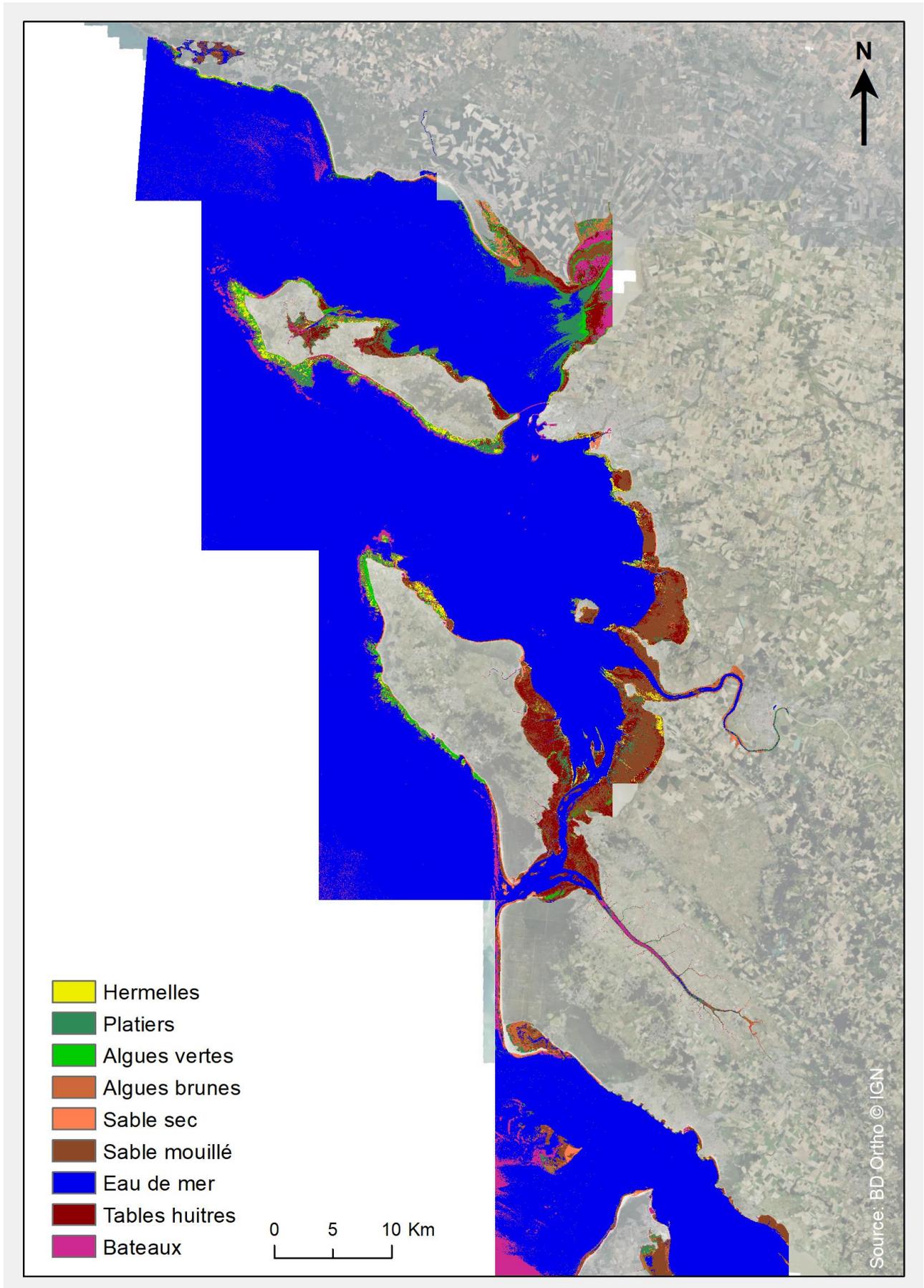


Figure 39 : Classification par maximum de vraisemblance de Sentinel-2 (12 bandes) à 10 m

Tous les ajouts de bandes à la référence de base RVB ont contribué positivement à améliorer les scores *OA*, *PA*(hermelles) et *UA*(hermelles).

Concernant les *OA*, la meilleure combinaison est celle qui englobe les 12 bandes, c'est-à-dire, RVB + 9 autres bandes, atteignant 81,78%, donc un gain de 18,57%. Ensuite, de manière décroissante, ont contribué les bandes B7 (8,91%), B8 (8,56%), B6 (8,15%), B8A (7,96%), B9 (7,47%), B11 (6,67%), B10 (6,55%), B5 (5,36%) et B1 (3,18%).

Concernant les *PA*(hermelles), les 12 bandes affichent le meilleur score (82,27%), boostant le score de RVB de 26,72%. S'ensuivent, de manière décroissante, les contributions des bandes B8 (15,34%), B7 (15,03%), B8A (15,02%), B6 (12,38%), B10 (10,23%), B5 (9,16%), B9 (8,43%), B11 (8,17%) et B1 (4,59%).

A propos des *UA*(hermelles), la combinaison complète des 12 bandes plafonne à 82,13%, réhaussant la détection de 31,54% par rapport à celle de RVB. Les contributions décroissantes des bandes individuelles suivent cette série : B10 (15,02%), B9 (14,97%), B7 (14,74%), B8 (13,92%), B8A (13,61%), B6 (13,5%), B5 (13,16%), B11 (11,68%) et B1 (5,71%).

A l'échelle de la classification des 9 classes, les bandes spectrales les plus enrichissantes s'étalent du rouge-IR (732,5 nm), appelé, *Red Edge*, jusqu'à l'IR sensible à la vapeur d'eau (955 nm). Cette tranche électromagnétique de 300 nm correspond à une meilleure acuité entre le sédiment sec et humide, et les algues vertes et brunes (15).

Alors que les plus hautes contributions IR des *PA*(hermelles) se concentrent entre 732,5 et 875 nm, les meilleures contributions IR des *UA*(hermelles) s'étalent de 696,5 à 1389 nm, englobant IR et MIR.

L'utilisation des 12 bandes S2 est donc fortement conseillée.

3.4.5 Combinaison des bandes spectrales Sentinel-1 aux 12 bandes Sentinel-2

La contribution des informations spectrales des ondes radio aux ondes optiques (Figure 40) a été quantifiée en comparant les résultats de classification globale *OA*, *PA*(hermelles) et *UA*(hermelles) issus des 12 bandes de S2 (Figure 39) avec ceux combinés aux produits standardisés de S1 (σ_{dBVV} , σ_{dBVH} , ratio) de manière individuelle et conjointe (Figure 41).

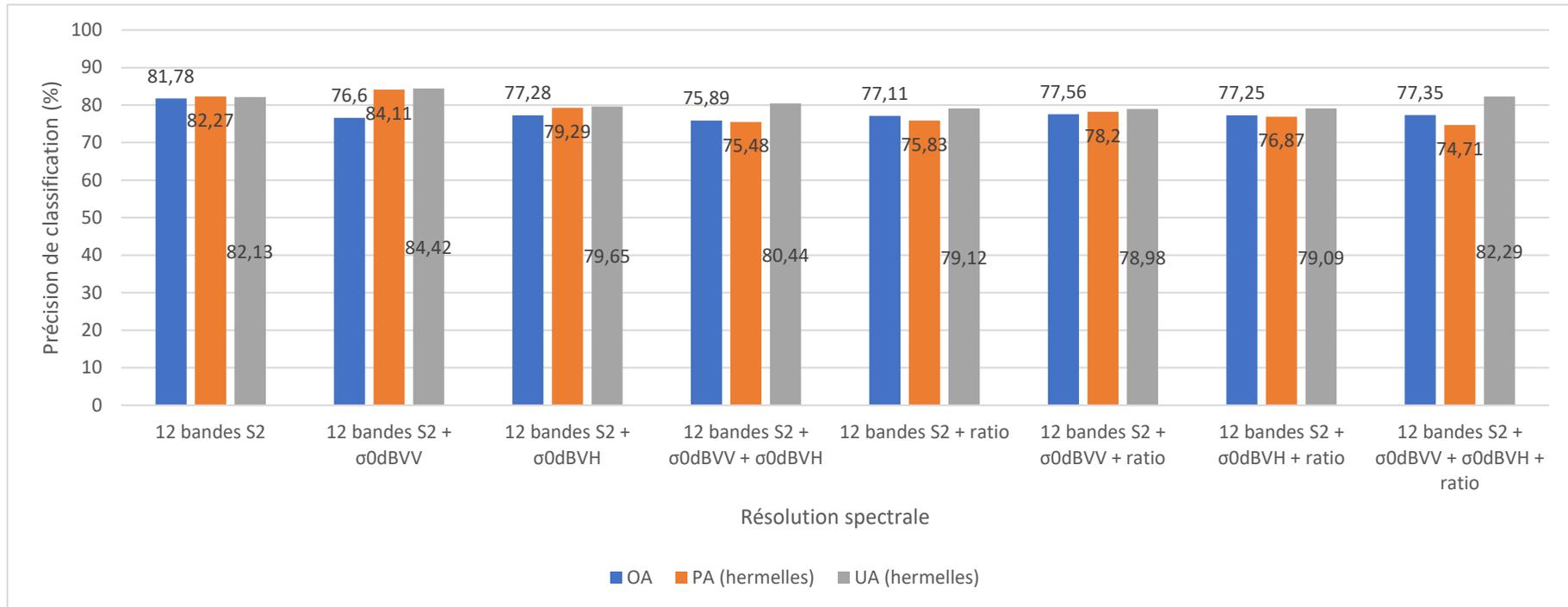


Figure 40 : Effet de la résolution spectrale sur les OA, PA(Hermelles) et UA(Hermelles) à partir de différentes combinaisons spectrales entre les 12 bandes de Sentinel-2 et les produits de Sentinel-1 à l'échelle locale des 5 sous-zones

Les contributions de tous les produits S1 aux 12 bandes de S2 sont négatives pour les scores OA. De manière croissante, le produit S1 avec la plus faible perte est $\sigma_{0dBVV} + \text{ratio}$ (-4,22%), puis la combinaison des trois produits (-4,43%), puis σ_{0dBVH} (-4,5%), puis $\sigma_{0dBVH} + \text{ratio}$ (-4,53%), puis ratio (-4,67%), puis σ_{0dBVV} (-5,18%), et enfin $\sigma_{0dBVV} + \sigma_{0dBVH}$ (-5,89%).

A propos des contributions des produits S1 aux 12 bandes de S2 aux scores PA(hermelles), seul le produit S1 σ_{0dBVV} apporte une plus-value (+1,84%). Les autres contributions sont négatives: σ_{0dBVH} (-2,98%), $\sigma_{0dBVV} + \text{ratio}$ (-4,07%), $\sigma_{0dBVH} + \text{ratio}$ (-5,4%), ratio (-6,44%), $\sigma_{0dBVV} + \sigma_{0dBVH}$ (-6,79%), enfin la combinaison des trois produits (-7,56%).

A propos des contributions des produits S1 aux 12 bandes de S2 aux scores UA(hermelles), deux produits S1 apportent une contribution positive : σ_{0dBVV} (2,29%), et la fusion des trois produits S1 (+0,16%). Les autres contributions sont négatives: $\sigma_{0dBVV} + \sigma_{0dBVH}$ (-1,69%), σ_{0dBVH} (-2,48%), ratio (-3,01%), $\sigma_{0dBVH} + \text{ratio}$ (-3,04%), $\sigma_{0dBVV} + \text{ratio}$ (-3,15%).

L'utilisation des 12 bandes S2 conjointement à σ_{0dBVV} S1 est donc recommandée.

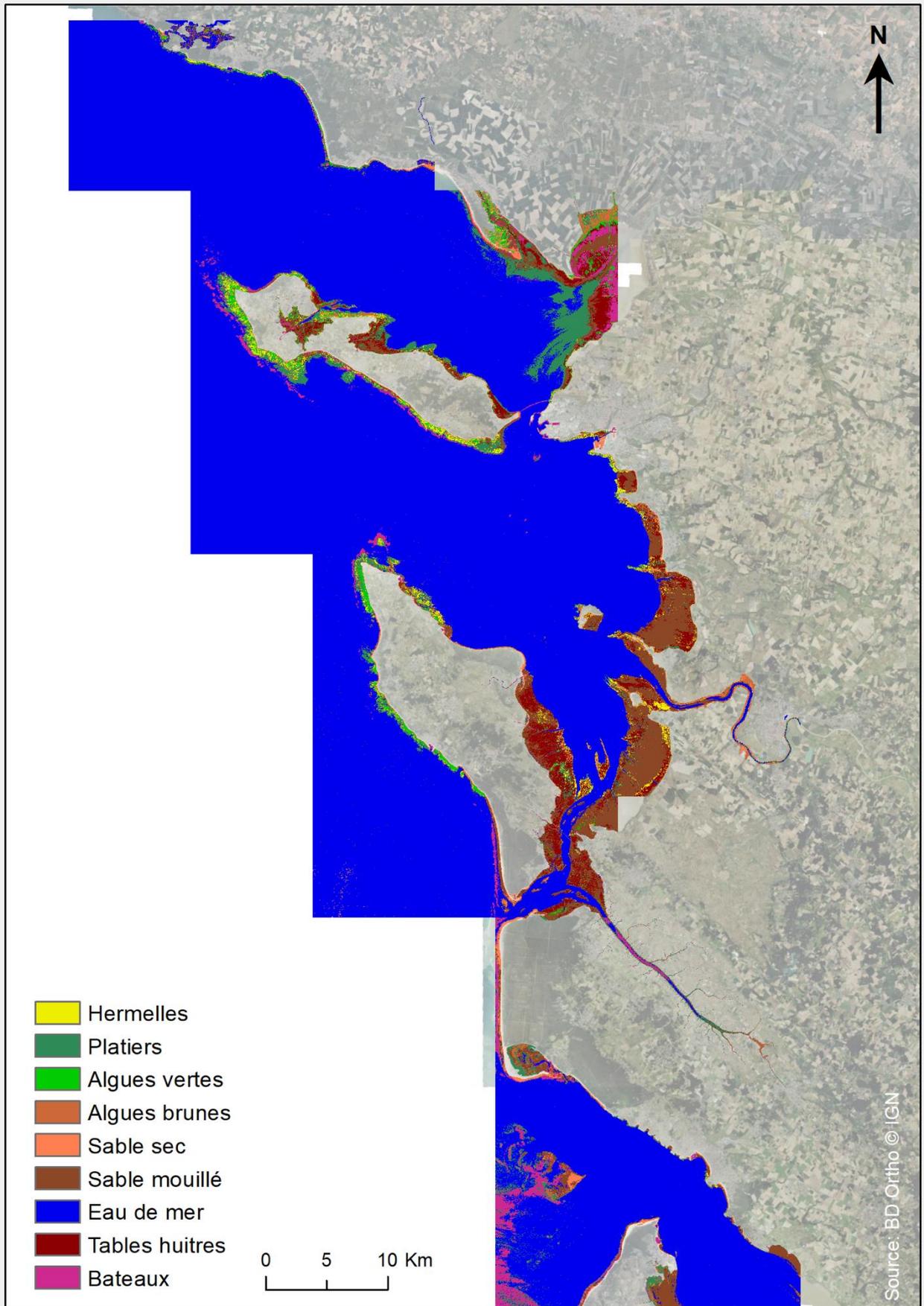


Figure 41 : Classification par maximum de vraisemblance de Sentinel-2 (12 bandes) + Sentinel-1 (σ_{dBVV}) à 10 m

En se concentrant sur les indicateurs *OA*, *PA*(hermelles) et *UA*(hermelles) des deux classifications 12 bandes S2 et 12 bandes S2 + σ_{0dBVV} S1, les résultats des cinq zones pourvues d'hermelles ont pu être analysés individuellement, sans être moyennés.

Ainsi, la diminution moyennée de 5,18% d'*OA* entre les deux classifications provient d'une diminution croissante de : Oléron (-1,35%), Entrée Estuaire (-3,29%), Rochelle Nord (-6,82%), Ré (-7,14%), et Vendée SO (-7,31%) (Figure 42).

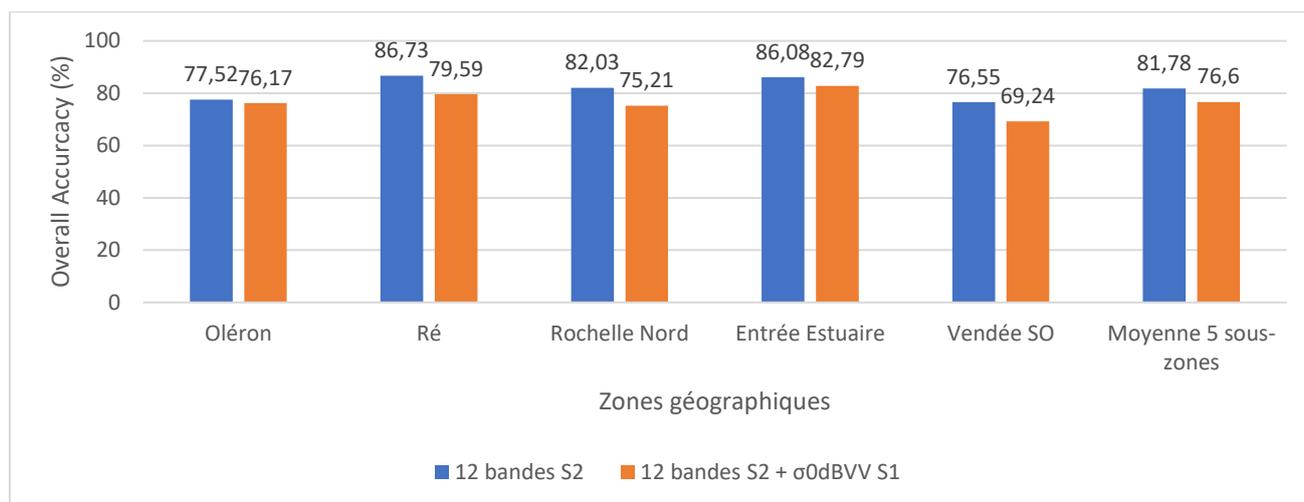


Figure 42 : Overall accuracies des échelles locales et régionales à partir de combinaisons spectrales des 12 bandes Sentinel-2 et des 12 bandes de Sentinel-2 + σ_{0dBVV} Sentinel-1

L'augmentation moyennée de 1,84% de *PA*(hermelles) entre les deux classifications émane d'une augmentation croissante de : Rochelle Nord (0,52%), Vendée SO (1,36%), Ré (4,54%) et Oléron (5,20%). Une contribution négative a été toutefois obtenue pour Entrée Estuaire (-3,59%) (Figure 43). Ceci peut s'expliquer par le fait que cette zone est très différente écologiquement du reste du Parc naturel marin avec une absence de classes « Algues vertes » et « Sédiments secs » et la présence d'une très forte turbidité.

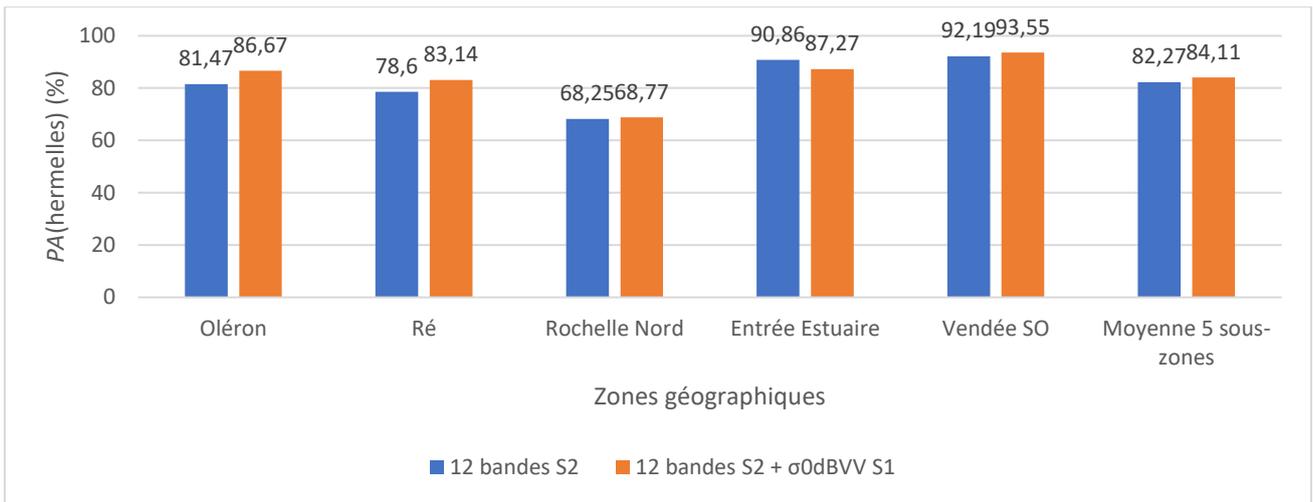


Figure 43 : PA(Hermelles) des échelles locales et régionales à partir de combinaisons spectrales des 12 bandes Sentinel-2 et des 12 bandes de Sentinel-2 + σ_{0dBVV} Sentinel-1

L'augmentation moyennée de 2,29% de UA(hermelles) entre les deux classifications émane d'une augmentation croissante de toutes les zones : Rochelle Nord (0,1%), Ré (1,55%), Oléron (1,6%), Entrée Estuaire (2,23%) et Vendée SO (3,01%) (Figure 44).

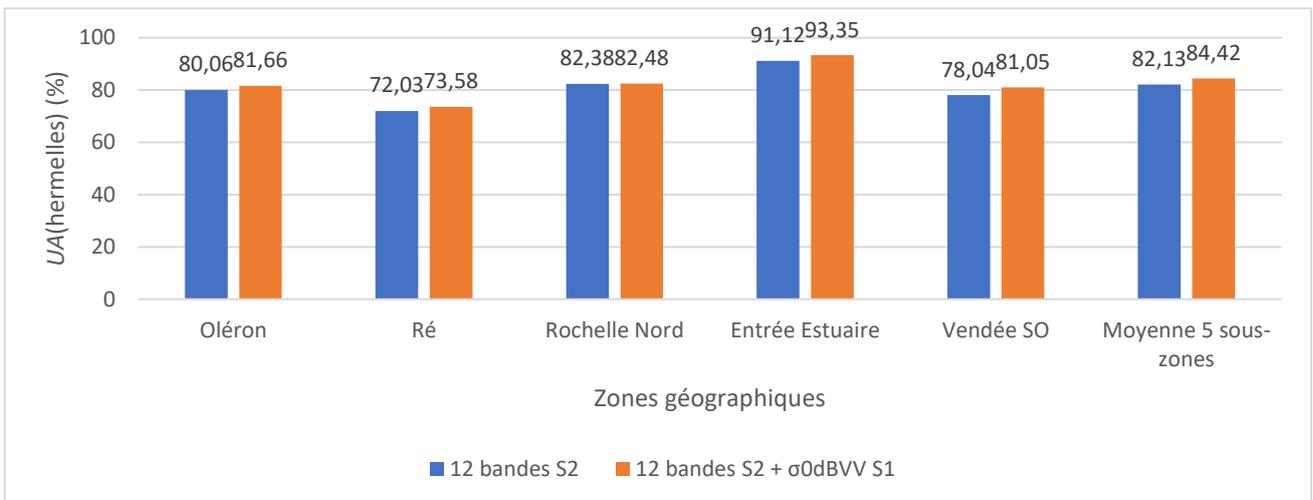


Figure 44 : UA(Hermelles) des échelles locales et régionales à partir de combinaisons spectrales des 12 bandes Sentinel-2 et des 12 bandes de Sentinel-2 + σ_{0dBVV} Sentinel-1

Les UA(Hermelles), comme les PA(Hermelles), montrent des résultats satisfaisants pour toutes les sous-zones (de 81,05% à 93,35%), avec la combinaison (12 bandes S2+ σ_{0dBVV} S1), à l'exception cette fois de la sous-zone Ile de Ré (73,58%). L'UA(Hermelles) à l'échelle régionale n'est que de 61,32%. Contrairement aux résultats de OA, l'apport de la bande σ_{0dBVV} de S1 aux 12 bandes de S2 améliore sensiblement les PA(Hermelles) et UA(Hermelles).

3.5 Polygones vectoriels d'hermelles et livrables

Les résultats quantitatifs ont montré que la meilleure classification à l'échelle régionale est celle de la combinaison (12 bandes S2 + $\sigma_{0dB}VV$ S1) pour *PA*(Hermelles) et *UA*(Hermelles). Un traitement de post-classification *Majority/Minority Filter* est réalisé dans *ENVI 5.3* sur la classe « Hermelles » de S2+S1 avec un *kernel size* 9 x 9. A l'issue de cela, un export en *.shp* de cette classe fournit les polygones vectoriels qui ont été livrés à l'OFB et qui représentent la probabilité de présence des hermelles dans le Parc naturel marin (Annexe 2). Les résultats quantitatifs de *PA*(Hermelles) et *UA*(Hermelles) issus des 12 bandes de S2 sont proches ou légèrement inférieurs à ceux issus de S2+S1. Ils pourront aussi être fournis à l'OFB (Annexe 3) après ce même traitement de post-classification. Les tables attributaires de chacune de ces données vectorielles sont remplies selon la typologie *European UNiversity Informations Systems (EUNIS)* et la nomenclature souhaitée par l'OFB. En parallèle, les métadonnées sont complétées et livrées au format *.xlsx*.

3.6 Big data : poids des fichiers et temps de traitement

Les temps de traitement de classification augmentent avec la résolution spatiale et le nombre de bandes spectrales sélectionnées. La puissance de calcul doit être élevée pour que les traitements aboutissent. Les résultats présentés ci-dessous ont été réalisés sur une tour d'ordinateur caractérisée par une vitesse de processeur de 3,7 GHz, un système d'exploitation de 64 *bits*, une mémoire vive (*Random Access Memory, RAM*) de 32 Go et une mémoire vive de carte graphique de 24 Go.

Pour une sous-zone, le poids moyen des fichiers à traiter est pour (S2+S1+MNS) de 0,72 Go ; pour (P1MS+MNS) de 3,60 Go : pour (BD-Ortho+MNS) de 12,5 Go et pour (Ortho-HR+MNS) de 77,73 Go. Ce poids augmente considérablement lorsque l'on passe à l'échelle régionale avec pour (S2+S1+MNS) un fichier de 3,68 Go ; pour (P1MS+MNS) un fichier de 49,75 Go et pour (BD-Ortho+MNS) un fichier de 515,62 Go. La mosaïque des Ortho-HR n'a pas abouti à l'échelle régionale. Il en découle des temps moyens de classification *ML* très variables en fonction du jeu de donnée initial et des combinaisons spectrales (Figures 45, 46, 47 et 48).

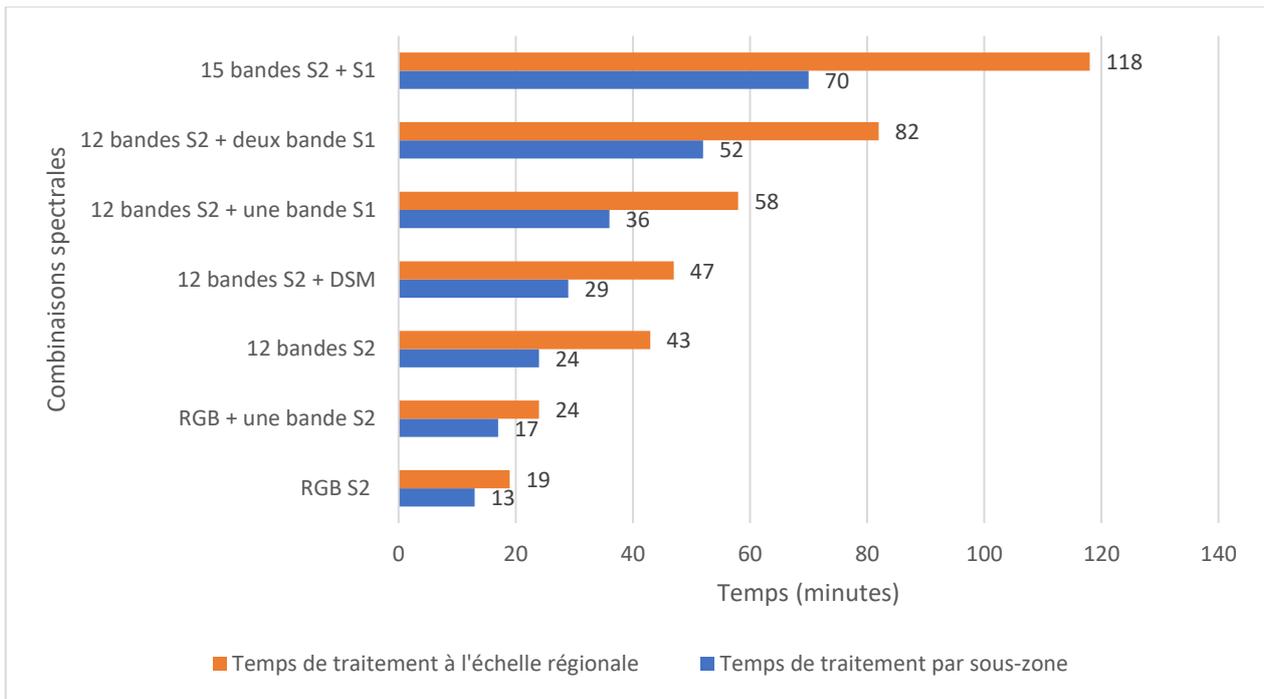


Figure 45 : Moyenne des temps de traitement de classification *Maximum Likelihood* en fonction des combinaisons spectrales et de l'échelle d'analyse sur les jeux de données Sentinel-2 et Sentinel-1 (10 m)

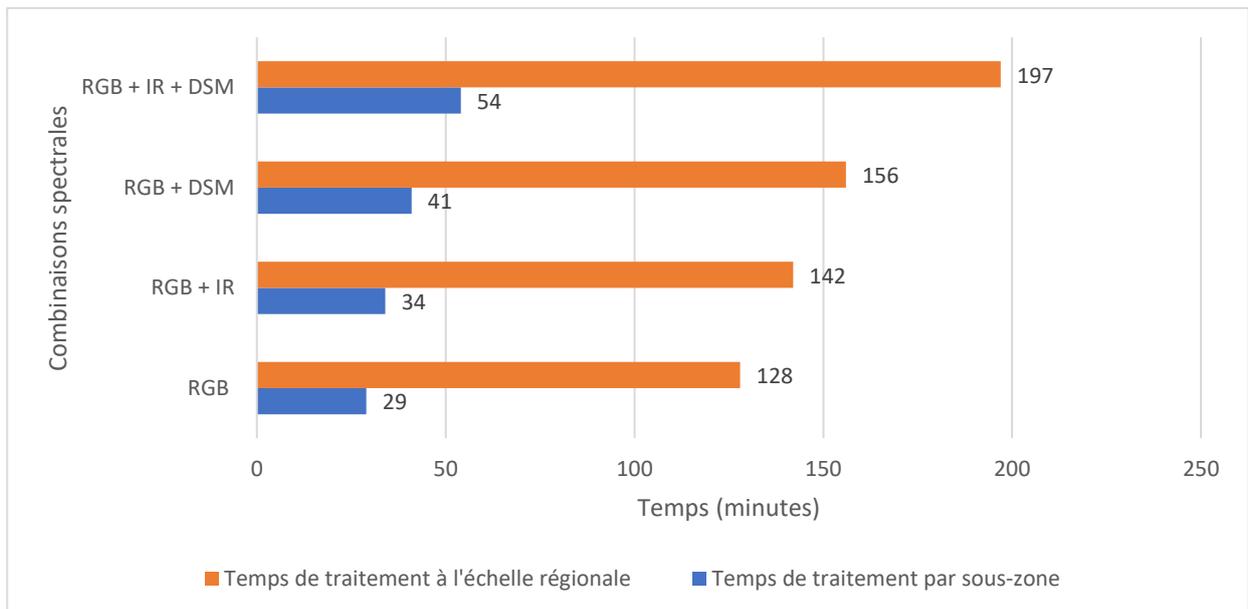


Figure 46 : Moyenne des temps de traitement de classification *Maximum Likelihood* en fonction des combinaisons spectrales et de l'échelle d'analyse sur le jeu de donnée Pléiades-1 multispectral (2 m)

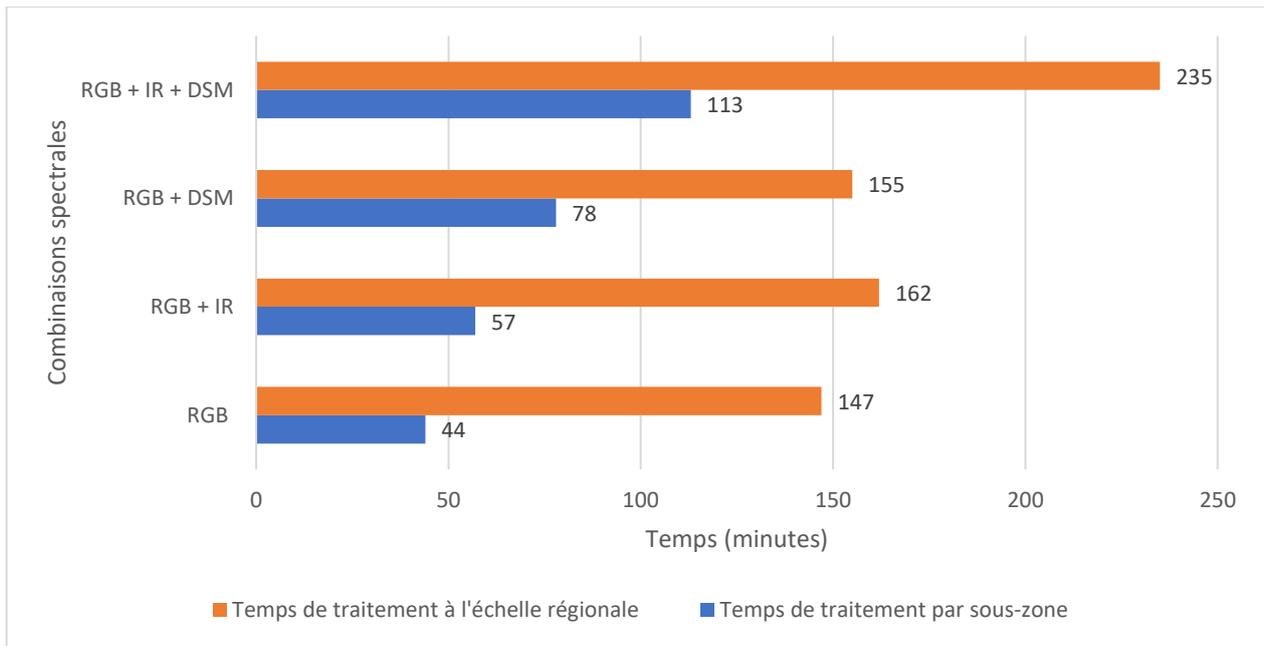


Figure 47 : Moyenne des temps de traitement de classification *Maximum Likelihood* en fonction des combinaisons spectrales et de l'échelle d'analyse sur le jeu de donnée BD-Ortho (0,5 m)

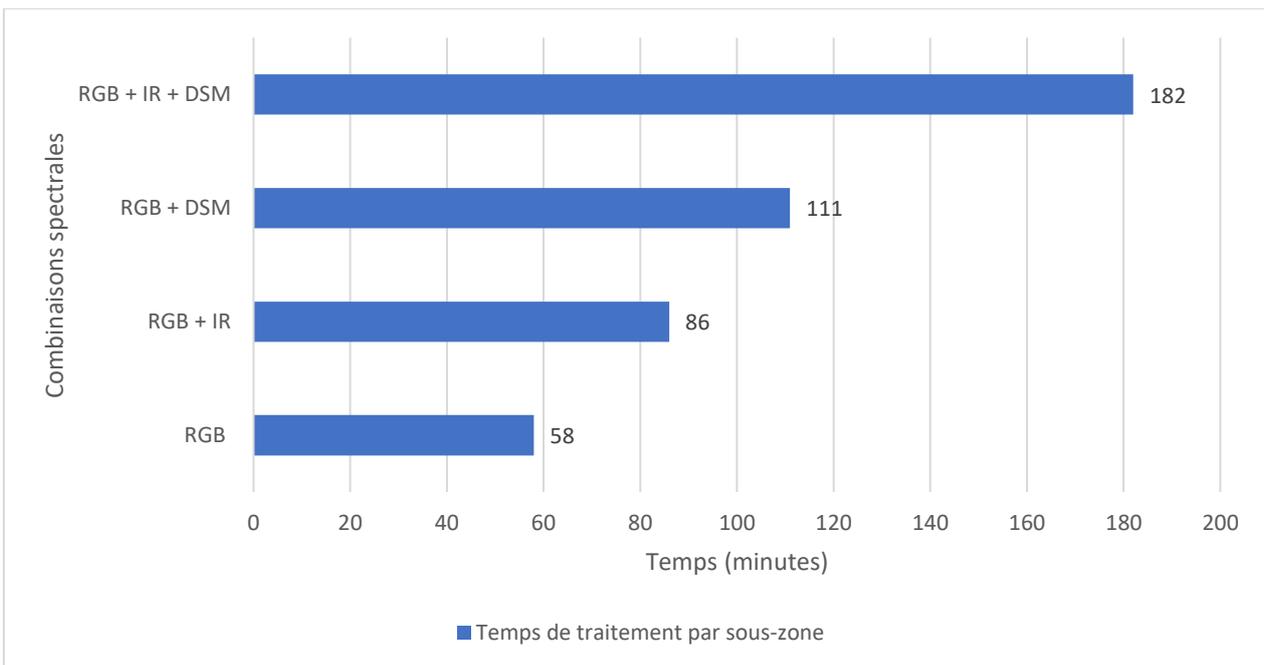


Figure 48 : Moyenne des temps de traitement de classification *Maximum Likelihood* en fonction des combinaisons spectrales à l'échelle d'analyse locale sur le jeu de donnée Ortho-HR (0,2 m)

Ces résultats ne prennent pas en compte le temps de préparation des données avant le lancement de ces classifications. Celui-ci est aussi très chronophage avec des temps de création des *subsets* variant de 4 à 17 minutes et de création des masques variant de 12 à 78 minutes en fonction de la donnée.

4 – Conclusions et perspectives

L'espace intertidal du Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis a été classifié via l'intelligence artificielle et notamment l'apprentissage automatique basée sur l'algorithme probabiliste de maximum de vraisemblance. D'un bloc ou fractionné en 5 zones géographiques pourvue d'hermelles, plusieurs dizaines de classifications ont été générées en utilisant l'imagerie satellite Sentinel-2 (optique) et Sentinel-1 (*RADAR*) à 10 m de résolution spatiale, Pléiades-1 (optique) à 2 m, aérienne BD-Ortho (optique) à 0,5 m et Ortho-HR (optique) à 0,2 m. Les classifications de ces imageries spatio- et aéroportées ont été calibrées et validées par l'Ortho-HR, dont la photo-interprétation a permis de mettre en exergue neuf habitats : hermelles, platiers, algues vertes, algues brunes, sédiments secs, sédiments humides, eau de mer, tables ostréicoles et bateaux.

La meilleure classification des neuf habitats (*Overall Accuracy* : 88,06%) a été atteinte avec l'imagerie optique (bleu-vert-rouge et infrarouge) de la BD-Ortho (0,5 m de résolution spatiale) en additionnant les classifications des 5 zones géographiques (et non en classifiant le Parc d'un bloc : 78,02%). Les scores des classifications des zones ont touché 84,10% pour Rochelle Nord, 87,34% pour Oléron, 87,53% pour Ré, 87,62% pour Entrée Estuaire, et 93,73% pour Vendée SO (Annexe 4, Tableau 15).

En ne se focalisant que sur l'habitat « hermelles » (*Producer's* et *User's Accuracy* : 84,11% et 84,42%, respectivement), la meilleure classification fut produite avec le couplage de l'imagerie optique Sentinel-2 (12 bandes) et *RADAR* Sentinel-1 (σ_{0dBVV}) à 10 m de résolution spatiale, toujours, en additionnant les classifications des 5 zones géographiques (et non en classifiant le Parc d'un bloc : 75,48% et 61,32%, respectivement). Les scores *Producer's Accuracy* (considérant les erreurs d'omissions) des zones furent : Rochelle Nord (68,77%), Ré (83,14%), Entrée Estuaire (87,27%), Oléron (87,67%), et Vendée SO (93,55%) (Annexe 4, Tableau 16).

Les scores *User's Accuracy* (considérant les erreurs de commissions) des zones furent, quant à elles : Ré (73,58%), Vendée SO (81,05%), Oléron (81,66%), Rochelle Nord (82,48%), et Entrée Estuaire (93,55%) (Annexe 4, Tableau 17).

En ressortent trois grands effets mesurés sur la qualité des résultats des classifications :

- Echelle : classier zone par zone plutôt qu'une seule grande zone ;
- Résolution spatiale : classier à la très haute résolution plutôt que de la moyenne pour les neuf habitats mais classier à la moyenne résolution pour les hermelles ;
- Résolution spectrale : classier avec l'infrarouge en plus du bleu-vert-rouge pour Ortho-HR, BD-Ortho et P1MS, et avec toutes les bandes pour S2, si possible avec le σ_{0dBVV} de S1 (uniquement pour améliorer les hermelles).

Deux perspectives importantes sont à intégrer :

- Test des nouveaux capteurs satellitaires bénéficiant d'une plus haute résolution spectro- spatiale (Pléiades-NEO) et spectro-temporel (PlanetScope SuperDove) ;
- Test d'autres algorithmes d'intelligence artificielle (forêts aléatoires, réseaux de neurones superficiels et profonds).

Bibliographie

1. Curd A, Pernet F, Corporeau C, Delisle L, Firth LB, Nunes FLD, et al. Connecting organic to mineral: How the physiological state of an ecosystem-engineer is linked to its habitat structure. *Ecol Indic.*, 2019, 98:49-60.
2. Jones AG, Dubois SF, Desroy N, Fournier J. Interplay between abiotic factors and species assemblages mediated by the ecosystem engineer *Sabellaria alveolata* (Annelida: Polychaeta). *Estuar Coast Shelf Sci.*, 2018, 200:1-18.
3. Dubois S, Barillé L, Cognie B, Beninger PG. Particle capture and processing mechanisms in *Sabellaria alveolata* (Polychaeta: Sabellariidae). *Mar Ecol Prog Ser.*, 2005, 301:159-71.
4. Boström C, Pittman SJ, Simenstad C, Kneib RT. Seascape ecology of coastal biogenic habitats: advances, gaps, and challenges. *Mar Ecol Prog Ser.*, 2011, 427:191-217.
5. Plicanti A, Domínguez R, Dubois SF, Bertocci I. Human impacts on biogenic habitats: Effects of experimental trampling on *Sabellaria alveolata* (Linnaeus, 1767) reefs. *J Exp Mar Biol Ecol.*, 2016, 478:34-44.
6. Dubois S, Retière C, Olivier F. Biodiversity associated with *Sabellaria alveolata* (Polychaeta: Sabellariidae) reefs: effects of human disturbances. *J Mar Biol Assoc U K.*, 2002, 82(5):817-26.
7. Dubois S, Commito JA, Olivier F, Retière C. Effects of epibionts on *Sabellaria alveolata* (L.) biogenic reefs and their associated fauna in the Bay of Mont Saint-Michel. *Estuar Coast Shelf Sci.*, 2006, 68(3):635-46.
8. Dubois S, Barillé L, Cognie B, Beninger P. Feeding mechanism of the polychaete *Sabellaria alveolata* revisited: reply to Riisgård & Nielsen (2006). *Mar Ecol Prog Ser.*, 2006, 328:307-11.
9. Rollet C, Matherion D, Desroy N, Le Mao P. Suivi de l'état de conservation des récifs d'hermelles (*Sabellaria alveolata*). Rapport Final. 2015 [cité 8 déc 2022]. Disponible sur: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00366/47711/>
10. Dubois S, Comtet T, Retière C, Thiébaud E. Distribution and retention of *Sabellaria alveolata* larvae (Polychaeta: Sabellariidae) in the Bay of Mont-Saint-Michel, France. *Mar Ecol Prog.*, 2007, 346:243-54.
11. Dubois S, Barillé L, Barillé-Boyer AL, Gruet Y. Conditions de préservation des formations récifales à *Sabellaria alveolata* (L.) en baie de Bourgneuf [Internet]. ISOMER. 2004 [cité 8 déc 2022]. Papier, 48 p. Disponible sur: <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/137704/conditions-de-preservation-des-formations-recifales-a-sabellaria-alveolata-l-en-baie-de-bourgneuf>
12. Collin A, Dubois S, James D, Ramambason C, Gloria H, Feunteun E, et al. Complexité structurale des récifs biogéniques d'hermelles (*Sabellaria alveolata*) par drone aérien. In: 2ème colloque merigéo [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01812540>
13. Desroy N, Dubois SF, Fournier J, Ricquiers L, Le Mao P, Guerin L, et al. The conservation status of *Sabellaria alveolata* (L.) (Polychaeta: Sabellariidae) reefs in the Bay of Mont-Saint-Michel. *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst.*, 2011, 21(5):462-71.

14. Collin A, Dubois S, Ramambason C, Etienne S. Very high-resolution mapping of emerging biogenic reefs using airborne optical imagery and neural network: the honeycomb worm (*Sabellaria alveolata*) case study. *Int J Remote Sens.*, 2018, 39(17):5660-75.
15. Collin A, Dubois S, James D, Houet T. Improving Intertidal Reef Mapping Using UAV Surface, Red Edge, and Near-Infrared Data. *Drones*, 2019, 3(3):67.
16. Brunier G, Oiry S, Gruet Y, Dubois SF, Barillé L. Topographic analysis of intertidal polychaete reefs (*Sabellaria alveolata*) at a very high spatial resolution. *Remote Sens.*, 2022, 14(2):307.
17. Bajjouk T, Jauzein C, Drumetz L, Dalla Mura M, Duval A, Dubois SF. Hyperspectral and Lidar: complementary tools to identify benthic features and assess the ecological status of *Sabellaria alveolata* reefs. *Front Mar Sci.*, 2020
18. Dubois SF, Boyé A, Cordier C, Curd A. REEHAB - Dispositif de suivi des habitats à *Sabellaria alveolata* (hermelles) pour la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin et la Directive Habitat Faune Flore :27.
19. Nguyen HTT, Doan TM, Tomppo E, McRoberts RE. Land Use/land cover mapping using multitemporal Sentinel-2 imagery and four classification methods—A case study from Dak Nong, Vietnam. *Remote Sens.*, 2020, 12(9):1367.
20. Cazals C. Apport des données Sentinel-1 pour la cartographie des milieux humides. 2017. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2017PESC1226>
21. Woodhouse IH. Polarimetric radar imaging: from basics to applications by Jong-Sen Lee and Eric Pottier. *Int J Remote Sens.*, 2012, 33(1):333-4.
22. Massonnet D, Souyris JC. *Imaging with Synthetic Aperture Radar*. New York: EPFL Press; 2008. 250 p.
23. Frison PL, Lardeux C, Fruneau B, Rudant JP. Polarimétrie radar complète et partielle pour le suivi des surfaces terrestres. *Rev Fr Photogrammétrie Télédétection*, 2019, (219-220):33-9.
24. Brodu N. Super-resolving multiresolution images with band-independent geometry of multispectral pixels. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(8), 4610-4617.
25. Rudant JP, Frison PL. Télédétection radar : de l'image d'intensité initiale au choix du mode de calibration des coefficients de diffusion β , σ , γ . *Rev Fr Photogrammétrie Télédétection*, 2019, (219-220):19-28.
26. Lopes M, Frison PL, Durant SM, Schulte to Bühne H, Ipavec A, Lapeyre V, et al. Combining optical and radar satellite image time series to map natural vegetation: savannas as an example. *Remote Sens Ecol Conserv.*, 2020, 6(3):316-26.
27. Laben CA, Brower BV. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. 2000. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/US6011875A/en>
28. James D, Collin A, Mury A, Letard M. Enhancing UAV coastal mapping using infrared pansharpening. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci.*, 2021, XLIII-B3-2021:257-64.
29. Maurer T. How to pan-sharpen images using the Gram-Schmidt method - a recipe. *Int Arch Photogramm Rem Sens Spat Inf Sci.*, 2013, XL-1/W1:239-44.

30. Haarpaintner J, Davids C. Satellite Based Intertidal-Zone Mapping from Sentinel-1&2. 2020.
31. Cai H, Zhang S, Bu K, Yang J, Chang L. Integrating geographical data and phenological characteristics derived from MODIS data for improving land cover mapping. *J Geogr Sci.*, 2011, 21(4):705-18.
32. Stehman SV. Sampling designs for accuracy assessment of land cover. *Int J Remote Sens.*, 2009, 30(20):5243-72.
33. Cajeri P, Curti C, Lafon V, Launay R, Sauriau PG. Cartographie des habitats intertidaux des sites Natura 2000 des Pertuis charentais: complémentarité des approches inventaire terrain, télédétection et SIG. *Actes XIIèmes Journ Natl Génie Côtier–Génie Civ.*, 2012, 855-64.
34. Billey A. Synergie des données Sentinel optiques et radar pour l'observation et l'analyse de la végétation du littoral du Pays de Brest. 2019, 63.
35. Lu D, Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *Int J Remote Sens.*, 2007, 28(5):823-70.
36. Richards JA, Jia X. *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. 4th ed. Berlin: Springer, 2006. 439 p.
37. Bolstad P., & Lillesand TM. Rapid maximum likelihood classification. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1991, 57(1), 67-74.
38. Lillesand T, Kiefer RW, Chipman J. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, 2015. 772 p.
39. Jensen JR. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. *Introd Digit Image Process Remote Sens Perspect*. Prentice-Hall Inc., 1996.
40. Foody GM. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sens Environ.*, 2002, 80(1):185-201.
41. Acharki S, FRISON PL, Amharref M, Hanna K, BERNOUSSI S. Complémentarité des images optiques SENTINEL-2 avec les images radar SENTINEL-1 et ALOS-PALSAR-2 pour la cartographie de la couverture végétale: application à une aire protégée et ses environs au Nord-Ouest du Maroc via trois algorithmes d'apprentissage automatique. *Rev Fr Photogrammétrie Télédétection*, 2021, 223:143-58.
42. Congalton RG. A Quantitative Method to Test for Consistency and Correctness in Photointerpretation. *Photogramm Eng.*, 1983, 6.
43. Congalton RG. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens Environ.*, 1991, 37(1):35-46.
44. Congalton RG, Green K. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, Third Edition. 3^e éd. Boca Raton: CRC Press, 2019, 346 p.
45. Story, M. and Congalton, R.G. Accuracy Assessment A User's Perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1986, 52, 397-399.
46. Powell RL, Matzke N, de Souza C, Clark M, Numata I, Hess LL, et al. Sources of error in accuracy assessment of thematic land-cover maps in the Brazilian Amazon. *Remote Sens Environ.*, 2004, 90(2):221-34.

Annexes

Annexe 1

Liens des métadonnées des MNT topo-bathymétriques côtiers des Pertuis Charentais, de l'estuaire de la Gironde Aval et de l'estuaire de la Gironde Amont.

- https://services.data.shom.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/MNT_COTIER_PERTUIS_HOMONIM_20m_WGS84.xml
- https://services.data.shom.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/MNT_COTIER_GIRONDE_AVAL_TANDEM_20m_WGS84.xml
- https://services.data.shom.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/MNT_COTIER_GIRONDE_AMONT_TANDEM_20m_WGS84.xml

Annexe 2

Livrable 1 OFB : couche *.shp* des polygones vectoriels « Hermelles » issus de la classification *Maximum Likelihood* sur Sentinel-2 + Sentinel-1 à l'échelle régionale du Parc naturel marin.

Polygones vectoriels d'hermelles obtenus à partir de la classification Maximum Likelihood
12 bandes Sentinel-2 + Sigma0dBVV Sentinel-1 (10 mètres),
à l'échelle régionale du Parc naturel marin



Shapes_Hermelles_S2S1
Polygones_hermelles_S2S1_parc

Sources : BD-Ortho IGN / ESA

0 5 km
└───┘

Annexe 3

Livrable 2 OFB : couche *.shp* des polygones vectoriels « Hermelles » issus de la classification *Maximum Likelihood* sur Sentinel-2 à l'échelle régionale du Parc naturel marin.

Polygones vectoriels d'hermelles obtenus à partir de la classification Maximum Likelihood 12 bandes Sentinel-2 (10 mètres) à l'échelle régionale du Parc naturel marin



 Polygones Hermelles

Sources : BD-Ortho IGN / ESA

0 5 km


Annexe 4 : Synthèse des meilleurs scores de classification

Tableau 15 : Synthèse des meilleurs OA selon les combinaisons spectrales, la résolution spatiale et l'échelle d'analyse

<i>Combinaisons spectrales</i>	RVB+IR (BD-Ortho)	12 bandes Sentinel-2	12 bandes S2 + σ_{0dB} VV S1
Résolution spatiale	0,5 m	10 m	10 m
Oléron	87,34	77,52	76,17
Ré	87,53	86,73	79,59
Rochelle Nord	84,10	82,03	75,21
Entrée estuaire	87,62	86,08	82,79
Vendée SO	93,73	76,55	69,24
Echelle locale	88,06	81,78	76,60
Échelle régionale	78,02	66,18	67,79

Tableau 16 : Synthèse des meilleurs PA(Hermelles) selon les combinaisons spectrales, la résolution spatiale et l'échelle d'analyse

<i>Combinaisons spectrales</i>	RVB+IR (BD-Ortho)	12 bandes Sentinel-2	12 bandes S2 + σ_{0dB} VV S1
Résolution spatiale	0,5 m	10 m	10 m
Oléron	68,09	81,47	87,67
Ré	89,60	78,60	83,14
Rochelle Nord	58,27	68,25	68,77
Entrée estuaire	86,00	90,86	87,27
Vendée SO	94,05	92,19	93,55
Echelle locale	79,35	82,27	84,11
Échelle régionale	53,03	70,11	75,48

Tableau 17 : Synthèse des meilleurs UA(Hermelles) selon les combinaisons spectrales, la résolution spatiale et l'échelle d'analyse

<i>Combinaisons spectrales</i>	RVB+IR (BD-Ortho)	12 bandes Sentinel-2	12 bandes S2 + σ_{0dB} VV S1
<i>Résolution spatiale</i>	<i>0,5 m</i>	<i>10 m</i>	<i>10 m</i>
Oléron	75,25	80,06	81,66
Ré	88,36	72,03	73,58
Rochelle Nord	68,94	82,38	82,48
Entrée estuaire	64,65	91,12	93,55
Vendée SO	88,86	78,04	81,05
Echelle locale	77,21	82,13	84,42
Échelle régionale	53,49	57,34	61,32