

CHAPITRE 1 : CARTOGRAPHIE DES BIOCENOSES MARINES ET DES MILIEUX TERRESTRES DU PARC NATIONAL DU BANC D'ARGUIN (MAURITANIE) PAR IMAGERIE SATELLITAIRE.

Aur a Pottier, Thibault Catry

Ewan Tr egarot, Jean-Philippe Maréchal, Cindy Cornet, Vincent Fayad, Pierre Failler

1. INTRODUCTION

La cartographie de la distribution des écosystèmes marins et terrestres du Parc National du Banc d'Arguin (PNBA, Mauritanie) est un préalable nécessaire à l'évaluation des services écosystémiques qui leur sont associés. L' stimation des Valeurs d'Usages Indirects nécessite la disponibilité des données écologiques et environnementales associées aux fonctions de production et à chaque service écosystémique qui en résulte. Face à l'étendue du PNBA, et à la diversité des milieux observés, la télédétection est un outil approprié pour réaliser des cartographies de ces écosystèmes. Le projet PACOBA (2012) a déjà produit des informations spatialisées sur la répartition des biocénoses marines dans la zone centrale du PNBA à partir d'images satellite SPOT-5 de 2003 et 2007. Cependant, les connaissances cartographiques sont anciennes, limitées sur les zones nord et sud du parc (notamment pour la partie terrestre), et les informations sur les méthodes et la précision des résultats obtenus sont insuffisantes. Il est donc nécessaire de réaliser une mise à jour de la cartographie des écosystèmes du PNBA pour l'évaluation des services écosystémiques.

Dans cette étude, nous proposons une approche se basant sur la combinaison de capteurs optiques à différentes résolutions. En effet, la complexité du milieu à cartographier, à l'interface entre milieu marin et milieu terrestre, dans un environnement fortement dynamique sous l'influence des marées nécessite de recourir à des données présentant des spécificités techniques différentes. Ainsi, les données Sentinel-2 à haute résolution seront associées à des données SPOT-6 à très haute résolution spatiale.

L'objectif est de mettre en place une méthodologie de traitement de ces données pour la production d'une cartographie des biocénoses marines et des milieux terrestres du PNBA, en privilégiant la reproductibilité de cette méthode pour de futures mises à jour des cartes.

2. LES TRAVAUX PRÉCEDENTS DE CARTOGRAPHIE DU PNBA

2.1. La zone d'étude : le PNBA

Le parc national du banc d'Arguin (PNBA) est une réserve naturelle de Mauritanie, fondé en 1976 par décision du président de la toute jeune République Islamique de Mauritanie, Mokhtar Ould Daddah, en concertation avec le naturaliste français Théodore Monod (Ould Cheikh, 2002a). Couvrant un tiers du littoral mauritanien, il s'étend de la pointe Minou au nord (au-delà du cap d'Arguin) jusqu'à la ville de Mamghar au sud (située au-delà du cap Timiris), et

comprend également les îles d'Arguin et de Tidra. Sa surface atteint 12 000 km² partagés entre la partie maritime : l'océan Atlantique, et la partie continentale : le désert du Sahara (Figure 3). Le PNBA est donc un des plus grands parcs d'Afrique de l'Ouest, devenu site Ramsar en 1982 et site classé au Patrimoine mondial de l'Unesco en 1989. Le Parc joue un rôle capital pour le maintien de la biodiversité marine et la protection de l'écosystème du Golfe d'Arguin, pièce maîtresse du renouvellement des ressources halieutiques à l'échelle de la ZEE (Zone Economique Exclusive) Mauritanienne et, sans doute, plus largement à une échelle sous-régionale. Conservation de l'environnement naturel et développement durable des populations sont les objectifs principaux du PNBA.

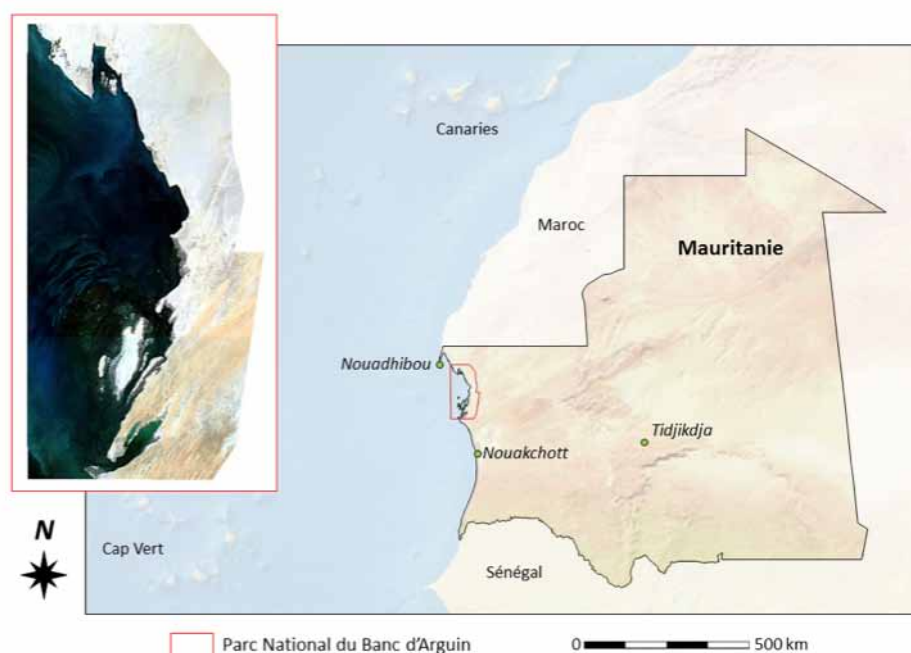


Figure 3 : Localisation et extension du Parc national du Banc d'Arguin (PNBA) en Mauritanie, sur la côte atlantique, entre les villes de Nouakchott et Nouadhibou. Le zoom montre les limites du PNBA vues par le satellite Sentinel-2 (© ESA, 2018).

Le PNBA possède un écosystème marin très riche alimenté à la fois par les eaux côtières enrichies par l'upwelling de Mauritanie et, dans sa partie orientale, par les apports éoliens venus du Sahara, chargés en acides aminés (Demarcq et Faure, 2000). Cet écosystème est marqué par de fortes abondances intraspécifiques (mulets jaunes et courbines notamment) et une faible diversité spécifique (Ould Cheikh, 2002b). Les zones intertidales couvrent de vastes étendues dans la partie méridionale du PNBA. Elles se composent de vasières peu profondes, parcourues de chenaux et sont couvertes en grande partie d'herbiers de phanérogame marines (zostères : *Zostera noltii* et cymodocées : *Cymodocea nodosa*). Les marais maritimes sont remarquables dans le sens où ils abritent les formations de mangrove (*Avicennia germinans*) les plus septentrionales de l'Afrique de l'Ouest et les prairies de Spartines (*Spartina maritima*) les plus méridionales (Lebigre, 1991). Les herbiers marins constituent le fondement de la chaîne trophique. Ils forment l'habitat de prédilection des mulets, l'espèce cible "traditionnelle" des pêcheurs Imraguen et jouent un rôle essentiel de protection du trait de

côte contre l'érosion à travers le piégeage des sédiments qui réduit l'énergie des vagues et des courants de marée (Chen et al., 2007). Ils constituent également un important puits de carbone dans une zone par ailleurs très peu végétalisée. Étant donné l'importance que revêt cet écosystème complexe, l'état de conservation des herbiers est considéré comme un indicateur efficace reflétant la santé globale des écosystèmes marins et côtiers. La partie septentrionale du PNBA se compose de zones trop profondes pour être cartographiées par télédétection satellitaire. Elles constituent l'habitat des courbines et des sélaciens (requins et raies), particulièrement abondants dans les eaux du PNBA (Sevrin Reyssac et Richer de Forges, 1985 ; Révillion et al., 2010 et 2011).

2.2. Les résultats du projet PACOBA (2012)

Dans le cadre du projet PACOBA (Projet d'Approfondissement des COnnaisances scientifiques des écosystèmes du Golfe du Banc d'Arguin, Chery et al., 2012), une classification de la zone d'estran (intertidale), découverte par les marées, ainsi que de la zone subtidale, a été réalisée. L'utilisation des images SPOT-5 a permis de cartographier les herbiers marins intertidaux en distinguant trois grandes classes : les vases, les sables et les herbiers (Figure 4).

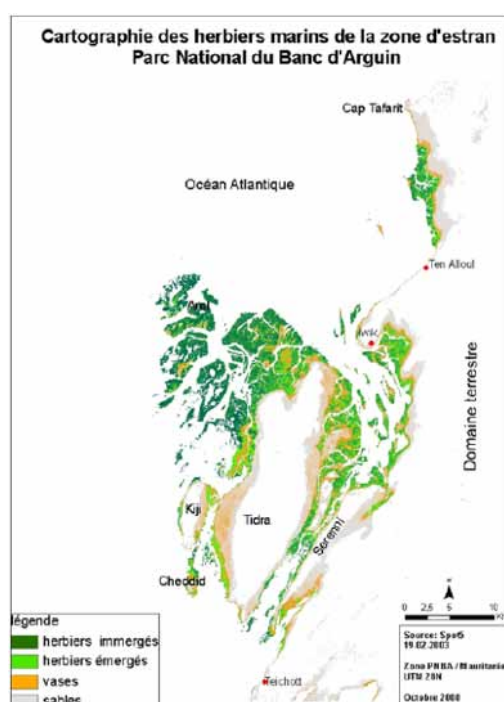


Figure 4 : Cartographie des herbiers de la zone intertidale du Banc d'Arguin à partir d'une image SPOT-5 (19 février 2003) (Chery et al., 2012 ; PACOBA, 2012).

La classe des herbiers est détaillée selon la présence ou l'absence d'eau. Ainsi, deux sous-classes ont été différenciées : herbiers immergés et herbiers émergés. La surface totale des herbiers cartographiés est de l'ordre de 200 km². Toutefois, quelques espèces végétales halophytes sont présentes dans la zone. C'est le cas des mangroves observées au nord de l'île de Tidra.

Une cartographie plus fine a également été réalisée dans le cadre de ce projet (Figure 5) par le bureau d'étude TBM (Chauvaud, 2012 ; Chery et al., 2012), sur la base d'un échantillonnage de terrain réalisé en 2008 et 2010, et d'une image SPOT-5 de 2007 à 2,5 m de résolution spatiale. Peu d'informations sont cependant disponibles sur la méthodologie employée pour réaliser cette cartographie ainsi que sur la validité des résultats.

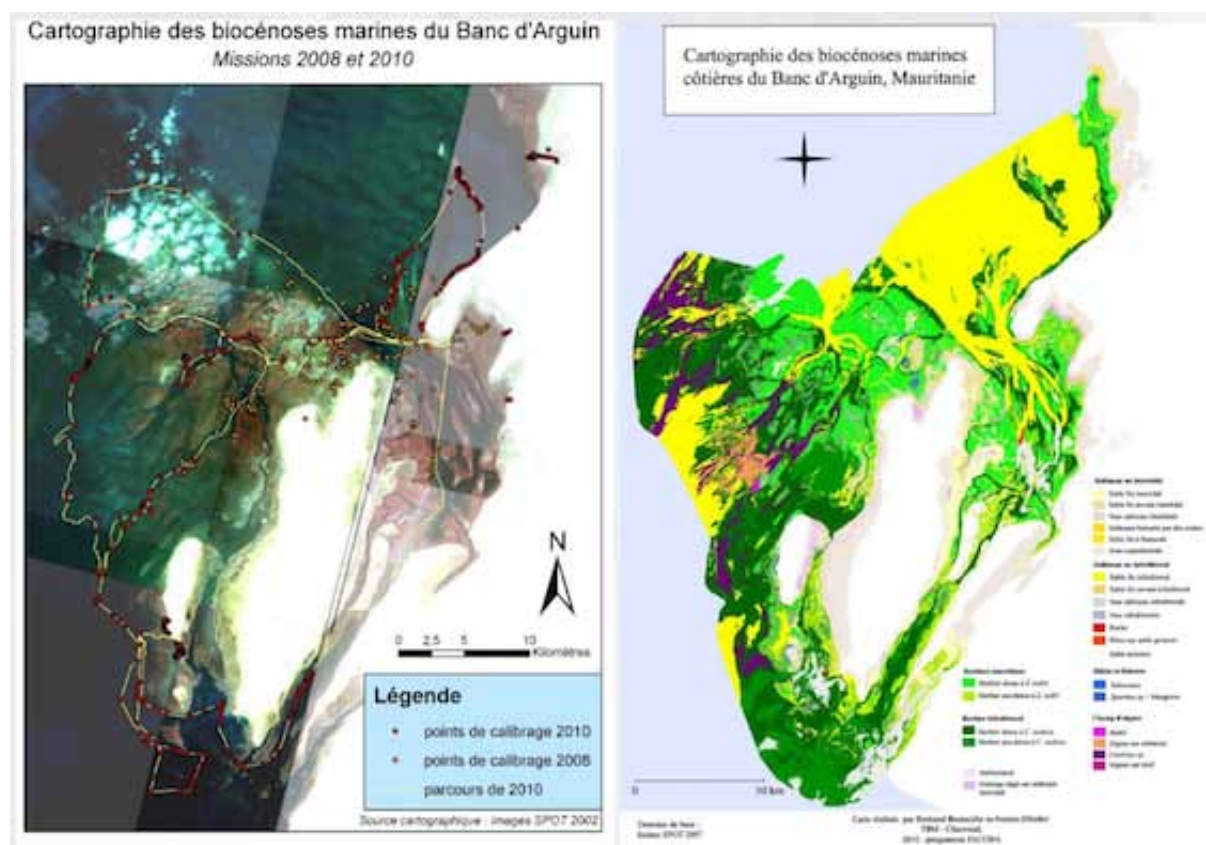


Figure 5 : le cadre du projet PACOBA à partir d'une image SPOT-5 de 2007 à 2,5 m de résolution et d'un échantillonnage de terrain de 2008 et 2010 (Chery et al., 2012).

Comme indiqué par les figures 4 et 5, les connaissances cartographiques sur le PNBA sont parcellaires, et concernent principalement les zones centrales et Sud autour de Tidra. Certains aspects méthodologiques sont peu précis et des éléments de validité des cartes produites manquent pour pouvoir les utiliser comme travaux de référence. D'autre part, certaines espèces ne sont pas cartographiées ou mal cartographiées (confusion herbiers/mangroves). Une mise à jour des connaissances cartographiques est donc nécessaire.

3. LES DONNÉES UTILISÉES DANS CETTE ÉTUDE.

3.1. Les données de référence

3.1.1. Données de l'observatoire du PNBA

L'observatoire du PNBA a mis à disposition du projet de nombreuses données cartographiques et vectorielles qui ont permis d'affiner/valider les classifications réalisées à partir des images

satellites. Parmi ces données, on trouve des données géographiques, des données socio-économiques, des données écologiques (faune et flore) et des données environnementales pour la plupart spatialisées.

3.1.2. Bathymétrie

Une couche bathymétrique a été mise à disposition par l'IMROP (Figure 6). Initialement, nous souhaitions réaliser une correction de la colonne d'eau sur les images satellitaires à partir de cette couche car il est nécessaire d'en tenir compte pour la cartographie des herbiers subtidaux. Cette correction peut s'effectuer via une approche de modélisation reliant la luminance mesurée aux paramètres de la cible (herbiers ou/et substrat) d'une part, et aux paramètres de l'eau qui s'intercale entre le capteur et la cible, d'autre part. Cette approche physique repose sur la combinaison :

- d'un modèle de la profondeur de fond (liée à la bathymétrie et aux marées) ;
- d'un modèle d'atténuation de l'éclaircissement et du signal réfléchi en fonction de la turbidité et de la hauteur de la colonne d'eau (liée à la bathymétrie et aux marées).

Cependant, ces données ne sont pas d'une finesse suffisante pour être exploitées efficacement pour la cartographie en utilisant des images satellites d'une résolution inférieure à 10 m. D'autre part, dans la mesure du possible, et afin de limiter la complexité de la méthodologie développée, nous avons privilégié des acquisitions satellitaires à marée basse et si possible avec des coefficients importants afin de faciliter la cartographie des herbiers subtidaux.

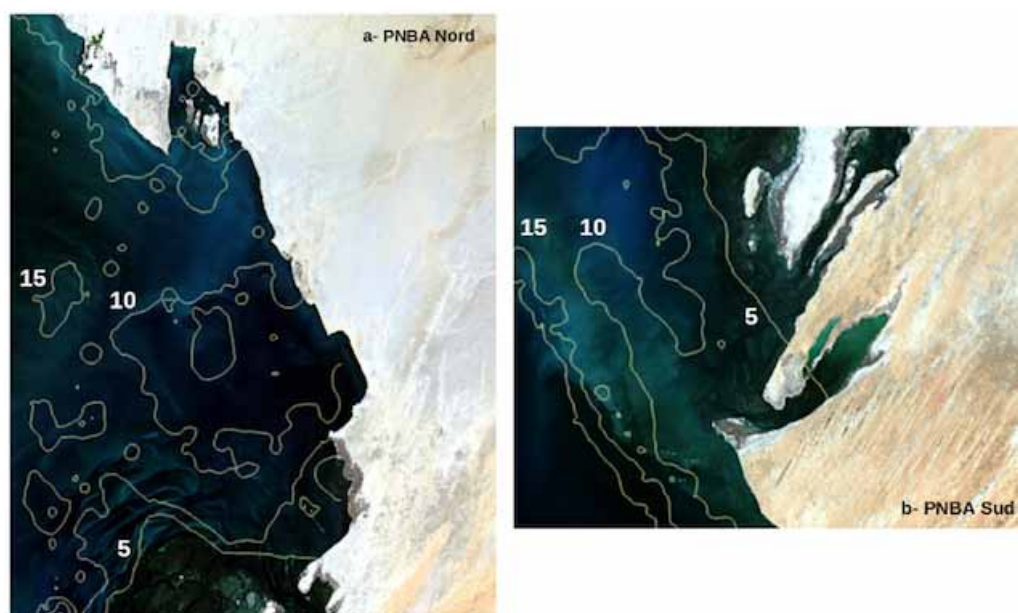


Figure 6 : La bathymétrie de 0 à 15 m sur la zone du PNBA fournie par l'IMROP.

Les informations bathymétriques ont cependant été mises à profit pour réaliser un masque sur la zone d'étude : toutes les zones situées à une profondeur supérieure à 10 m ont été masquées dans la mesure où les conditions de luminosité ne sont pas compatibles avec la

présence d'herbiers marins. Cela nous a permis de réduire la zone à classer et donc de réduire les temps de calcul et la taille des produits issus de la classification, afin d'en optimiser l'exploitation par les partenaires.

3.1.3. Turbidité

Idéalement, une correction de l'effet de la turbidité aurait dû être incluse dans les pré-traitements de la donnée satellitaire (modèle d'atténuation de l'éclairement et du signal réfléchi). Cependant, nous n'avons pas réalisé de mesure de turbidité sur le terrain et les produits globaux existants (MODIS notamment) sont à des résolutions pluri-kilométriques incompatibles avec les résolutions d'images que nous avons utilisées pour la cartographie (inférieures à 10 m). D'autre part, la turbidité de l'eau dans le domaine maritime du PNBA présente une forte variation spatiotemporelle liée au cycle saisonnier de croissance du phytoplancton (blooms phytoplanctoniques), au phénomène d'upwelling et à la présence de courants importants engendrés par le remplissage et le vidage de la baie du banc d'Arguin au cours du cycle des marées. La turbidité de l'eau est donc un paramètre difficile à évaluer en raison de la multiplicité des phénomènes impliqués. Cependant, les images ayant été prises à marée basses (et coefficients élevées), l'impact de cette absence de correction a été considéré comme limité.

3.1.4. Données de terrain

Un échantillonnage des différentes biocénoses marines et des milieux terrestres a été réalisé lors d'une mission sur le terrain du 8 au 25 avril 2018. Plus de 500 points ont été collectés sur l'ensemble du parc afin de valider les observations cartographiques issues des images satellites. Dans la mesure du possible, chaque écosystème a été échantillonné (Figure 7).



Figure 7 : Echantillonnage de terrain réalisé dans le cadre de ce projet sur la partie marine (a) et sur la partie terrestre (b) du PNBA, regroupant un total de plus de 500 points.

3.2. Les images satellites

Les images satellitaires ont été acquises à marée basse, autant que possible pendant une marée à fort coefficient (« grande marée »), et ce, pour deux raisons :

- une partie importante des herbiers, localisée sur les platiers, est découverte,
- sur les herbiers encore recouverts d'eau la lame d'eau est moindre, ce qui minimise l'effet de la colonne et donc facilite leur détection.

3.2.1. Sentinel-2

Une image Sentinel-2 (S2, libre de droits, fournie par l'ESA : Agence Spatiale Européenne) du 22/02/2018 (à marée basse, résolution spatiale de 10 m, Figure 8a) a été utilisée pour identifier les écosystèmes marins et terrestres, notamment les herbiers et vasières intertidaux, ainsi que la mangrove. Étant donnée la taille du PNBA, l'ensemble du parc se répartit sur 2 tuiles S2. Bien que moins bien résolues spatialement que l'image SPOT-5 de 2007 utilisée dans le programme PACOBA, avec une résolution de 10 à 60 m en fonction des bandes spectrales (Tableau 1), les images Sentinel-2 ont l'avantage d'être facilement accessibles pour les partenaires du projet avec une répétitivité temporelle de 12 jours sur la Mauritanie, donnant accès à des conditions d'enneigement et de marées optimales pour une mise à jour régulière des cartographies produites dans le cadre de ce projet.

Tableau 1 : Les bandes spectrales du capteur Sentinel-2 (Delegido et al., 2011).

Bande spectrale	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8a	B9	B10	B11	B12
λ Centre	443	490	560	665	705	740	783	842	865	945	1375	1610	2190
(nm)													
$\Delta\lambda$ Largeur (nm)	20	65	35	30	15	15	20	115	20	20	30	90	180
Résolution spatiale (m)	60	10	10	10	20	20	20	10	20	60	60	20	20

3.2.2. SPOT-6

Les données SPOT-6, à 4 bandes spectrales (Tableau 2), datant du 24/01/2016 ont été fournies par l'EQUIPEX-GEOSUD de Montpellier (Maison de la Télédétection, <http://ids.equipex-geosud.fr/>), ortho-rectifiées et fusionnées à une résolution spatiale de 1,5 m (Figure 8b). L'emprise du PNBA se répartit sur 72 tuiles SPOT-6 pour un volume total de données d'environ 100 Go. Ce volume de données a entraîné des contraintes importantes en termes de stockage et de temps de calcul nécessaires à la production de la cartographie des écosystèmes marins et terrestres du PNBA.

Tableau 2 : Les bandes spectrales du capteur SPOT-6.

Bande	Longueur d'onde (nm)
Bleu	455-525
Vert	530-590
Rouge	625-695
Proche infra rouge	760-890

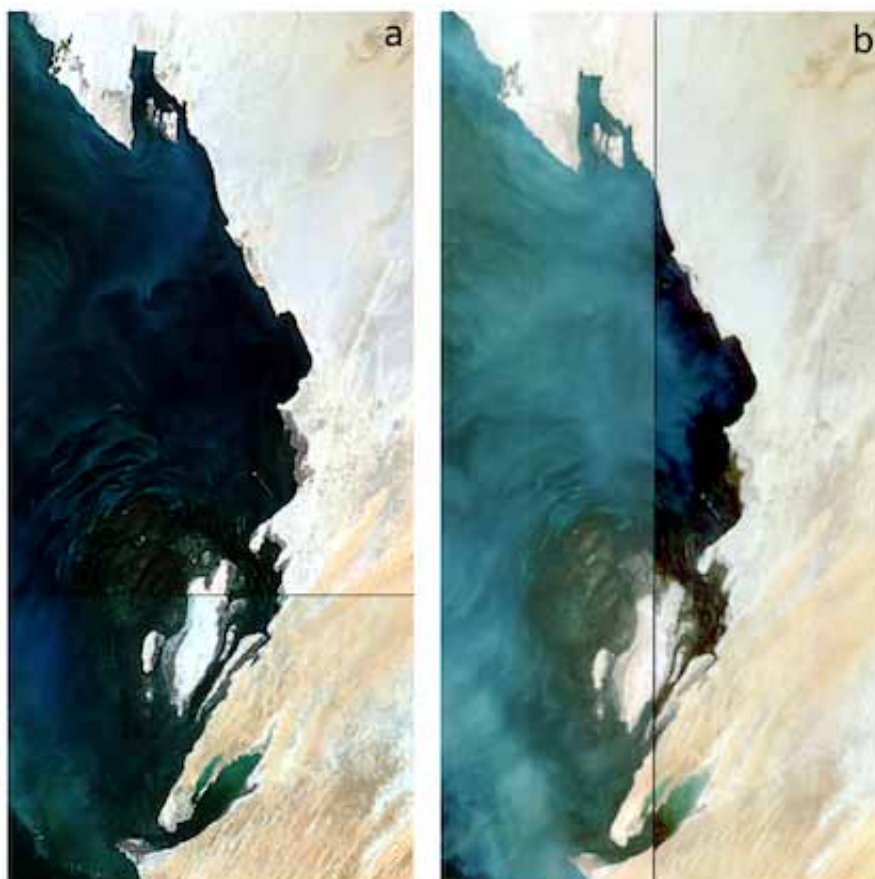


Figure 8 : Mosaique des scènes Sentinel-2 (a) et SPOT-6 (b) couvrant l'emprise du PNBA.

4. METHODOLOGIE

D'un point de vue méthodologique, les données de références existant sur le PNBA ont été utilisées pour réaliser la classification des écosystèmes via deux approches :

- à l'échelle du PNBA, une image Sentinel-2 (libre de droits, fournie par l'ESA) du 22/02/2018 (à marée basse, résolution spatiale de 10 m) a été utilisée pour identifier les écosystèmes marins et terrestres, notamment les herbiers et vasières intertidaux, ainsi que la mangrove.
- à une échelle locale, des images SPOT-6 d'archive (2016, résolution spatiale de 1,5 m) ont été utilisées pour cartographier finement les biocénoses marines (herbiers et vasières principalement) et établir des indicateurs de leur état de santé (densité,

fragmentation). Une partie des données de terrain a servi à la validation de ces cartographies.

Pour chaque type de donnée, une classification a été réalisée et une nomenclature définie de sorte à refléter la nature des écosystèmes présents dans la zone. Il s'agit notamment d'identifier et de caractériser les zones humides comme l'eau libre, les vasières et les herbiers qui sont les trois ensembles principaux qui nous intéressent ici. Un intérêt particulier a aussi été porté sur la répartition de la mangrove dans la zone d'étude.

L'ensemble des pré-traitements et des traitements réalisés sur les images Sentinel-2 et SPOT-6 se sont basés sur des logiciels libres, à savoir R, la Sentinel Application Platform (SNAP) et QGIS. La figure 9 résume l'ensemble des étapes suivies pour la production des résultats présentés dans la section suivante.

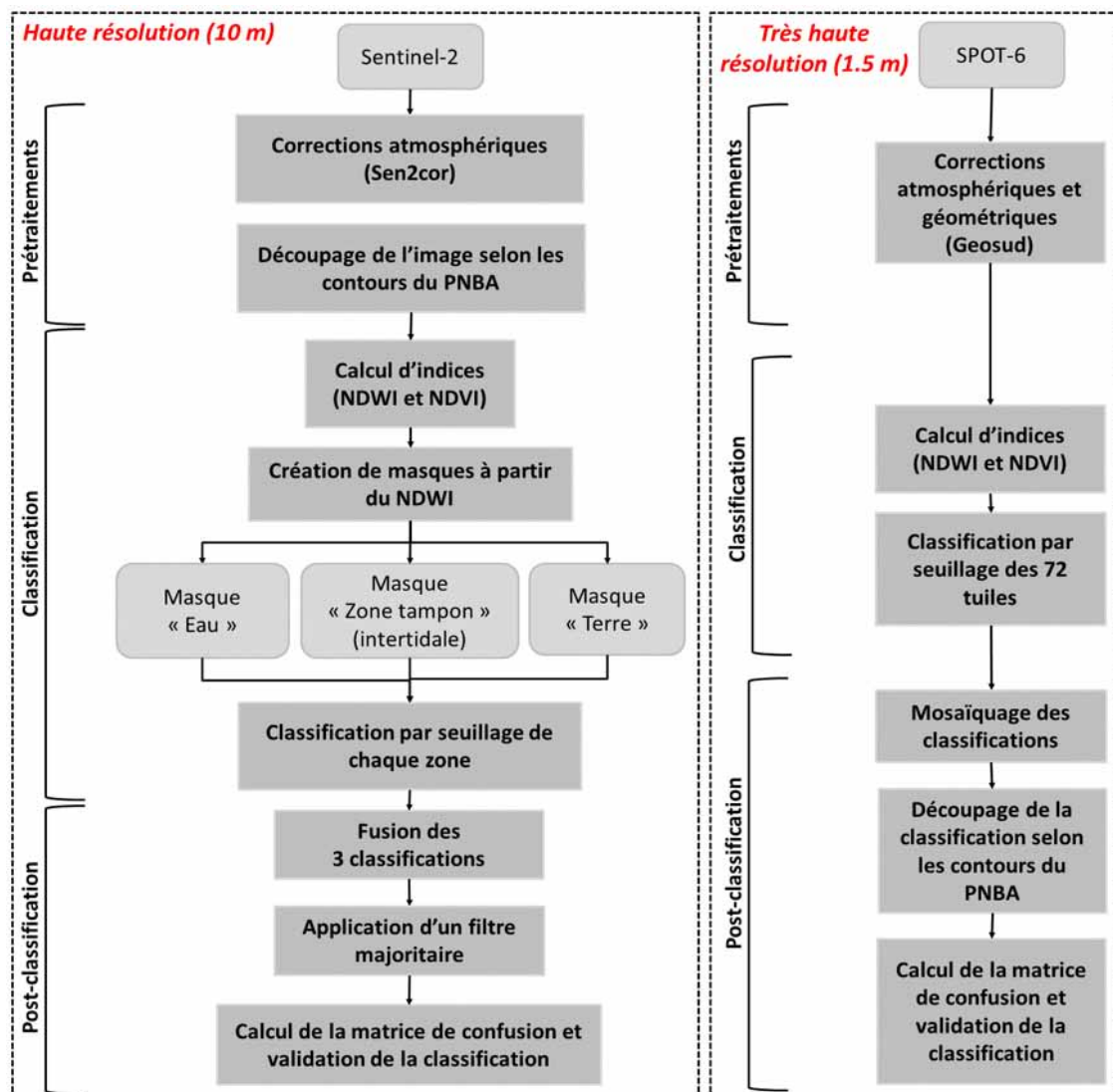


Figure 9 : Méthodologie employée pour le traitement des images Sentinel-2 et SPOT-6 ayant servies à la classification des écosystèmes du PNBA.

L'algorithme R ayant servi à réaliser les classifications est fourni en Annexe 1 de ce rapport : pour Sentinel-2, un algorithme pour chacun des 3 masques créés, et un algorithme unique pour SPOT-6.

4.1. Pré-traitements des données satellites

4.1.1. Sentinel-2

Les données Sentinel-2 sont téléchargées au niveau de traitement 1C sur la plateforme PEPS du CNES (peps.cnes.fr). Des corrections atmosphériques permettant d'obtenir un produit de niveau 2A sont réalisées à l'aide du module Sen2cor mis à disposition dans SNAP. Il est indispensable de travailler sur des produits de niveaux 2A pour pouvoir comparer des images à des dates différentes (si l'on souhaite réaliser une mise à jour des produits cartographiques par exemple). Ces prétraitements sont réalisés sur les 2 scènes Sentinel-2 couvrant le PNBA. Pour diminuer les temps de calcul, les scènes Sentinel-2 sont ensuite découpées selon l'emprise du PNBA.

4.1.2. SPOT-6

Les données SPOT-6 ont été mises à disposition par l'EQUIPEX-GEOSUD. Elles ont été fournies prétraitées, déjà corrigées géométriquement et atmosphériquement. En raison du poids des données, il a été impossible de produire une mosaïque SPOT-6 de l'ensemble du PNBA, les 72 tuiles produisant un raster non-géré par les outils de traitement.

4.2. Classification

Cette étape a été appliquée aux deux types de données.

4.2.1. Calcul d'indices NDVI et NDWI

Deux indices, le NDVI (Indice de végétation par différence normalisée, Carlson et al., 1997) et le NDWI (Indice d'eau par différence normalisée, McFeeters et al., 1996) ont été calculés à l'aide du logiciel R.

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \quad \text{et} \quad NDWI = \frac{V-PIR}{V+PIR}$$

où PIR représente le Proche Infra-rouge (Bande 8 de Sentinel-2, à 10 m de résolution et bande 4 de SPOT-6 à 1,5 m de résolution) et R représente le Rouge (Bande 2 de Sentinel-2 à 10 m de résolution et bande 3 de SPOT-6 à 1,5 m de résolution, Tableaux 1 et 2) et V représente le Vert (Bande 3 de Sentinel-2 à 10 m de résolution et bande 2 de SPOT-6 à 1,5 m de résolution), voir les tableaux 1 et 2.

Le NDVI est un indice radiométrique permettant de caractériser l'état photosynthétique de la végétation à partir des bandes spectrales du rouge et du proche infrarouge. Avec cet indice compris entre -1 et 1, il est possible de discriminer la végétation des autres types d'occupation du sol. Le NDWI, compris entre -1 et 1, est lui utilisé pour caractériser radiométriquement les corps en eau. Ici, il nous permet donc de discriminer milieu marin de milieu terrestre.

4.2.2. Classification par seuillage radiométrique

Dans une première étape de seuillage, l'indice NDWI est seuillé pour discriminer les 3 masques, en combinant avec l'information spectrale contenue dans la bande 8 (proche infra-rouge) selon les seuils suivant (Tableau 3) :

Tableau 3 : Seuils radiométriques de créations des masques marins, de transition et terrestre pour la classification du PNBA à partir d'une image Sentinel-2.

Masque	Seuils radiométriques
Maritime	NDWI > 0,15
Zone de transition	NDWI ≤ 0,15 et B8 ≤ 0,35
Terrestre	NDWI ≤ 0,15 et B8 > 0,35

Ces deux indices sont utilisés pour créer 3 masques (Figure 10) : un masque d'eau (contenant la partie marine du parc incluant les herbiers), un masque de « terre » sur lequel une classification sera appliquée, et enfin un masque de transition correspondant à la zone tampon entre les parties maritimes et terrestres du parc (incluant les mangroves et la sebkha).

L'objectif de cette « segmentation » de l'image en 3 ensembles est de diminuer les temps de calcul et de diminuer les confusions entre des écosystèmes n'appartenant pas au même milieu.

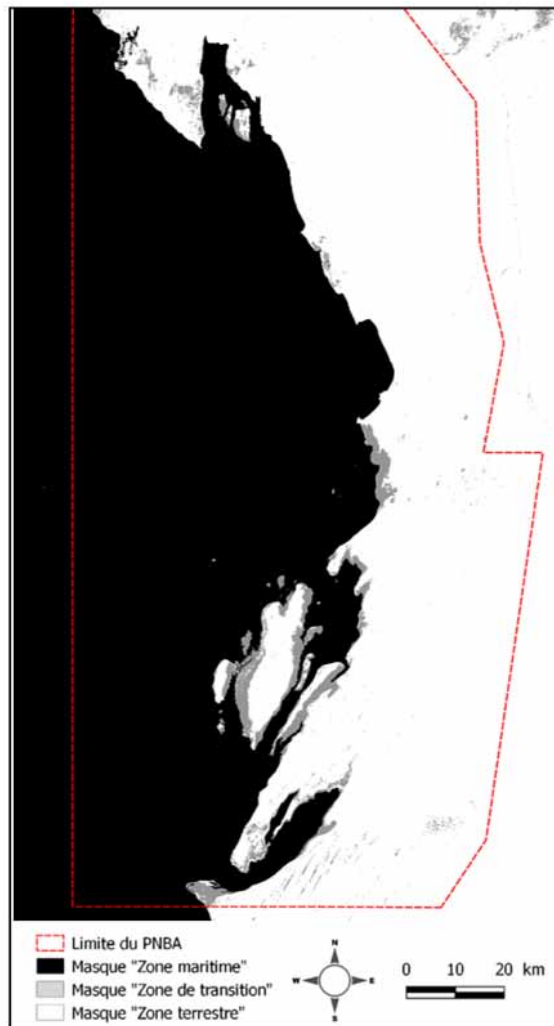


Figure 10 : Représentation des 3 masques créés à partir d'un seuillage radiométrique sur Sentinel-2.

Dans un second temps, pour chacun de ces 3 masques, les pixels ont été répartis dans un certain nombre de classes via classification par seuillage radiométrique. Pour chaque classe définie, la moitié des points échantillonnés sur le terrain a été utilisée pour définir les seuils radiométriques associés à chaque classe. Pour une classe donnée, chaque pixel sur l'image satellite est caractérisé par une valeur radiométrique (la réflectance). Sur un pixel de 10 m de côté (100 m^2) sur une image Sentinel-2 à 10 m de résolution, la valeur de réflectance correspond à une moyenne de l'ensemble des signaux réfléchis par les objets présents sur ces 100 m^2 (on parle de pixels mixtes). Ainsi, chaque classe correspond à une gamme de valeurs radiométriques définie par l'ensemble des configurations d'occupation du sol rencontré sur les pixels de 100 m^2 . Le même raisonnement s'applique pour une image SPOT-6 à 1,5 m de résolution ($2,25 \text{ m}^2$). Ici, la diversité des objets par unité de surface est moins grande (il y a moins de pixels mixtes), mais la gamme de variation des signaux reste forte dans la mesure où, à cette résolution, un même écosystème peut avoir de nombreuses valeurs de réflectance.

La tableau 4 présente les seuils radiométriques utilisés pour classifier les biocénoses marines sur l'image Sentinel-2 à partir du masque marin. Ces seuils combinent des informations spectrales extraites de différentes bandes du capteur Sentinel-2.

Tableau 4 : Seuils radiométriques de classifications des biocénoses marines du PNBA à partir d'une image Sentinel-2.

Sentinel-2 (Masque "Eau")		
Classe	Valeurs	Seuils radiométriques
H. à cymodocées denses	0,5	$B2 < 0.015 \ \& \ B3 < 0.020 \ \& \ B4 \leq 0.020$
H. à cymodocées moyennement denses	1	$B2 < 0.05 \ \& \ B3 < 0.1 \ \& \ B4 \geq 0.0001$
H. à cymodocées peu denses	1,5	$B2 < 0.035 \ \& \ B3 < 0.045 \ \& \ B4 \leq 0.015$
H. à zostères peu denses	2	$B2 < 0.05 \ \& \ B3 < 0.1 \ \& \ B4 \geq 0.0001$
H. à zostères moyennement denses	3	$B2 < 0.03 \ \& \ (B3 < 0.055 \ \& \ B3 > 0.035) \ \& \ B4 \geq 0.01$
H. à zostères denses	4	$B2 < 0.02 \ \& \ (B3 < 0.045 \ \& \ B3 > 0.025) \ \& \ B4 \geq 0.009$
Vasière	5	$B2 > 0.03 \ \& \ B3 > 0.08 \ \& \ B4 > 0.001$
Sédiments nus intertidaux	6	$B2 < 0.05 \ \& \ B3 > 0.030 \ \& \ B4 < 0.023$
Algues	9	$B2 < 0.03 \ \& \ B3 > 0.055 \ \& \ B4 \geq 0.0001$

Le tableau 5 présente les seuils radiométriques utilisés pour classifier les biocénoses marines sur l'image Sentinel-2 à partir du masque de transition entre milieu marin et terrestre. Ces seuils combinent des informations spectrales extraites de différentes bandes du capteur Sentinel-2 ainsi que des indices NDVI et NDWI calculés précédemment.

Tableau 5 : Seuils radiométriques de classifications des biocénoses marines du PNBA à partir d'une image Sentinel-2, dans la zone de transition entre milieux marin et terrestre.

Sentinel-2 (Masque "Zone tampon")		
Classe	Valeurs	Seuils radiométriques
H. à zostères peu denses	2	$B3 \leq 0.09 \ \& \ B4 < 0.10 \ \& \ B8 < 0.12$
Vasière	5	$(B4 < 0.24 \ \& \ B4 > 0.10) \ \& \ B8 < 0.30 \ \& \ NDVI < 0.15 \ \& \ (NDWI2 < -0.15 \ \& \ NDWI2 > -0.25)$
Sédiments nus intertidaux	6	$B4 > 0.20 \ \& \ B8 > 0.25 \ \& \ NDVI \leq 0.15 \ \& \ NDWI2 > -0.27$
Sebkha	7	$B4 > 0.10 \ \& \ B8 > 0.10 \ \& \ NDVI \leq 0.15$
Mangroves	10	$B2 < 0.10 \ \& \ B4 < 0.15 \ \& \ B8 > 0.10 \ \& \ NDVI > 0.30$
Marais salés	11	$B4 < 0.25 \ \& \ B3 < 0.20 \ \& \ B8 > 0.10 \ \& \ NDVI \geq 0.15$

Le tableau 6 présente les seuils radiométriques utilisés pour classifier les milieux terrestres sur l'image Sentinel-2 à partir du masque terrestre. Ces seuils combinent des informations spectrales extraites de différentes bandes du capteur Sentinel-2.

Tableau 6 : Seuils radiométriques de classifications des milieux terrestres du PNBA à partir d'une image Sentinel-2.

Sentinel-2 (Masque "Terre")		
Classe	Valeurs	Seuils radiométriques
Sable nu	12	$B2 > 0.10 \ \& \ B3 > 0.25 \ \& \ B4 > 0.40 \ \& \ B8 > 0.50$
Sable rocheux	13	$B2 > 0.05 \ \& \ B3 > 0.15 \ \& \ B4 > 0.30 \ \& \ B8 < 0.70$
Sol sableux à végétation plus ou moins dense	14	$B2 > 0.20 \ \& \ B3 > 0.30 \ \& \ B4 > 0.40 \ \& \ B8 > 0.50$

La tableau 7 présente les seuils radiométriques utilisés pour la classification de l'image SPOT-6.

Tableau 7 : seuils radiométriques de classifications des biocénoses marines et des milieux terrestres du PNBA à partir d'une image SPOT-6.

SPOT-6		
Classe	Valeurs	Seuils radiométriques
H. à cymodocées denses	0,5	$(B4 < 400 \ \& \ B4 > 225) \ \& \ (B3 < 425 \ \& \ B3 > 325) \ \& \ (B2 < 450 \ \& \ B2 > 300) \ \& \ (B8 < 550 \ \& \ B8 > 125) \ \& \ (NDWI < 0.3 \ \& \ NDWI > 0.1)$
H. à cymodocées moyennement denses	1	$B4 > 200 \ \& \ B3 \geq 355 \ \& \ B2 > 385 \ \& \ B8 > 100 \ \& \ NDWI > 0.52$
H. à zostères peu denses	2	$B4 > 470 \ \& \ B3 > 500 \ \& \ B2 > 450 \ \& \ B8 > 600 \ \& \ NDVI > 0$
H. à zostères moyennement denses	3	$B4 \geq 415 \ \& \ B3 \geq 475 \ \& \ B2 > 400 \ \& \ B8 > 300$
H. à zostères denses	4	$B4 \geq 200 \ \& \ B3 \geq 375 \ \& \ B2 > 350 \ \& \ B8 > 200$
Vasière	5	$B4 > 350 \ \& \ B3 \geq 500 \ \& \ B2 > 475 \ \& \ B8 > 200 \ \& \ NDWI > 0.045$
Sédiments nus intertidaux	6	$B4 > 350 \ \& \ B3 \geq 570 \ \& \ B2 > 475 \ \& \ B8 > 170 \ \& \ NDWI > 0.35$
Sebkha	7	$B4 > 600 \ \& \ B3 \geq 500 \ \& \ B2 > 400 \ \& \ B8 > 700$
Mangroves	10	Reclassification des pixels selon le masque Sentinel-2*
Marais salés	11	$B4 > 600 \ \& \ B3 \geq 600 \ \& \ B2 > 500 \ \& \ B8 > 800 \ \& \ NDVI \geq 0.1$
Sable nu	12	$B4 > 1200 \ \& \ B3 \geq 900 \ \& \ (B2 < 750 \ \& \ B2 > 500) \ \& \ B8 > 1400$
Sable rocheux	13	$B4 > 875 \ \& \ B3 \geq 800 \ \& \ B2 > 500 \ \& \ B8 > 1100$
Sol sableux à végétation plus ou moins dense	14	Reclassification des pixels selon le masque Sentinel-2*

* se reporter à la section 4.3

A ce niveau du processus s'ajoute une étape importante qui est la création d'une zone tampon le long des littoraux et des chenaux de marées, permettant de caractériser la présence d'herbiers à cymodocées. L'objectif était de limiter la surdétection des cymodocées qui se confond avec l'eau à une certaine distance des côtes, à cause de la profondeur, de la turbidité et des courants notamment. Cette étape primordiale a posé de nombreux problèmes dans la mesure où les cymodocées ne sont pas réparties sur des bandes de largeurs homogènes le long des littoraux et chenaux, et que la profondeur d'extension maximale de cette espèce, dans le PNBA, est inconnue. Ainsi, l'automatisation de la création de cette zone tampon était très peu satisfaisante (il était impossible de définir un « buffer » de largeur constante correspondant à l'extension des cymodocées sur l'ensemble de la zone d'étude) et un travail fastidieux de validation manuelle s'est avéré indispensable.

En ce qui concerne les 72 tuiles SPOT 6, le volume du jeu de données nous a contraints à modifier légèrement la méthodologie pour pouvoir produire les cartes. Une même méthode de seuillage a été appliquée à partir des indices NDVI et NDWI, sans créer de masques cette fois-ci (trop coûteux en stockage et en temps de calcul sur 72 tuiles). Seul le masque de détection des cymodocées a été reproduit. Les 72 tuiles n'ont pas été mosaïquées dès le départ mais chaque tuile a été seuillée et classifiée, puis une mosaïque du résultat a été produite et découpée selon l'emprise du PNBA. Les seuils de classification ont été adaptés pour SPOT-6, la réflectance étant différente de celle de Sentinel-2.

4.3. Post-classification

Une fois ces 3 classifications réalisées, elles ont été fusionnées pour produire une classification unique à 15 classes (Figures 11 à 14) : herbiers à cymodocées (3 classes en fonction de la densité), herbiers à zostères (3 classes en fonction de la densité), mangroves, algues, marais salés, vasières, sédiments intertidaux, sebkha, sable nu, sol sableux à végétation plus ou moins dense, sable rocheux. Cette classification a été nettoyée en appliquant un filtre majoritaire qui a permis d'éliminer de nombreux pixels isolés et un certain nombre de confusions, en appliquant une règle du plus proche voisin (moyennage de la valeur d'un pixel isolé à partir de la valeur de ses voisins).

4.3.1. Reclassification SPOT-6

Certains pixels n'étaient pas clairement discriminés sur la simple base de la réflectance. C'était notamment le cas des pixels de mangrove. Nous avons donc utilisé le masque de transition défini à partir de Sentinel-2, afin d'attribuer ces pixels SPOT-6 à leur classe d'appartenance à partir de Sentinel-2 (reclassification).

4.3.2. Densité des herbiers

Cette classification a également permis de produire une classification des herbiers en fonction de la densité de leur couverture. Ici, des densités de couvert d'herbier ont été mesurées sur le terrain. Pour chaque point terrain, la signature spectrale (réflectance) du pixel associé a été identifiée. Ensuite, nous avons testé une approche d'extrapolation de la relation entre

signature spectrale et densité mesurée sur le terrain à l'ensemble de l'image pour produire une échelle de densité des herbiers à 3 niveaux.

4.3.3. Validation de la classification

Enfin, la qualité de la classification a été estimée en réalisant une matrice de confusion permettant d'obtenir un pourcentage global de précision. Pour les classes herbiers et mangroves, la moitié de l'échantillon de terrain (non-utilisée pour définir les seuils dans l'algorithme de classification) a servi à la validation des résultats de classification. Ainsi, la nature de chaque point mesuré sur le terrain a été comparée à la classe à laquelle il est rattaché sur l'image. Cela permet d'établir quels points sont correctement classés (même nature que celle observée sur le terrain) et d'obtenir une précision par classe des résultats.

5. RESULTATS

5.1. Classifications et surfaces des écosystèmes

5.1.1. Sentinel-2

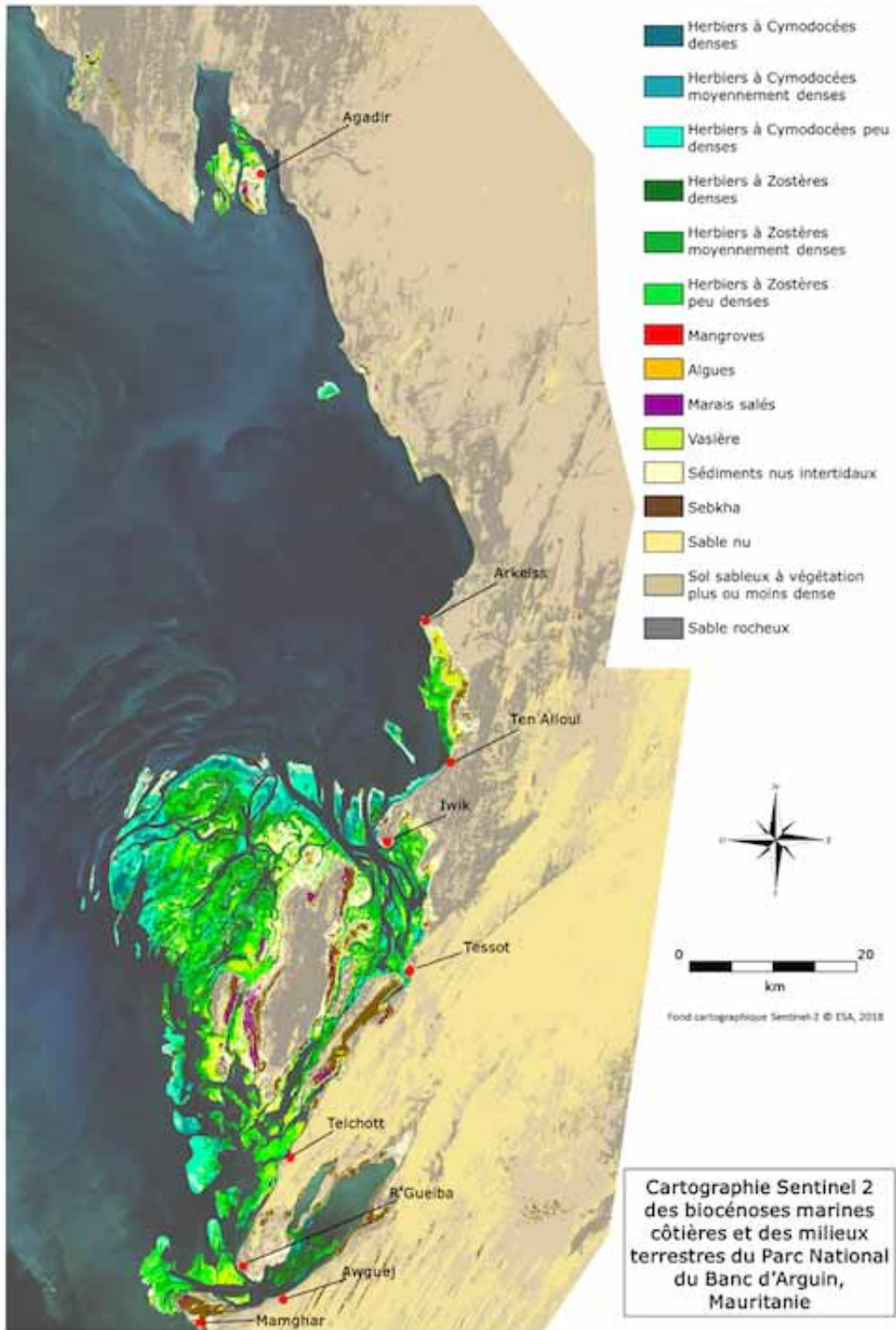


Figure 11 : Cartographie des biocénoses marines côtières et des milieux terrestres du PNBA par imagerie Sentinel-2.

Cartographie Sentinel 2 des biocénoses marines côtières et des milieux terrestres de l'île de Tidra dans le Parc National du Banc d'Arguin, Mauritanie

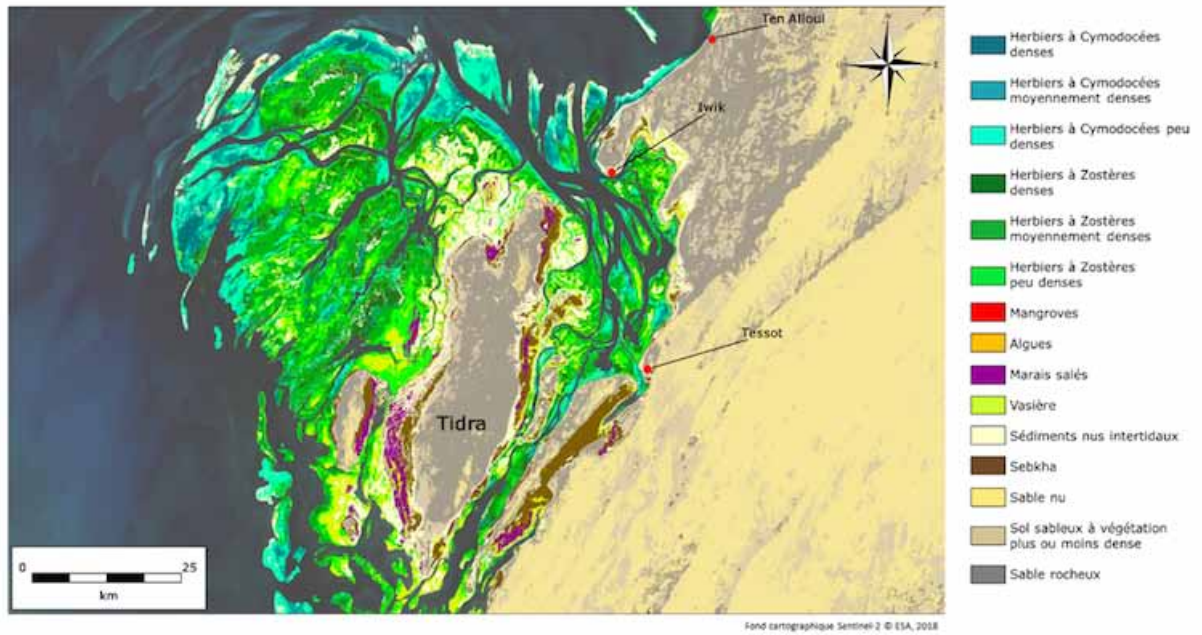


Figure 12 : Cartographie des biocénoses marines côtières et des milieux terrestres de l'île de Tidra dans le PNBA par imagerie Sentinel-2.

5.1.2. SPOT-6

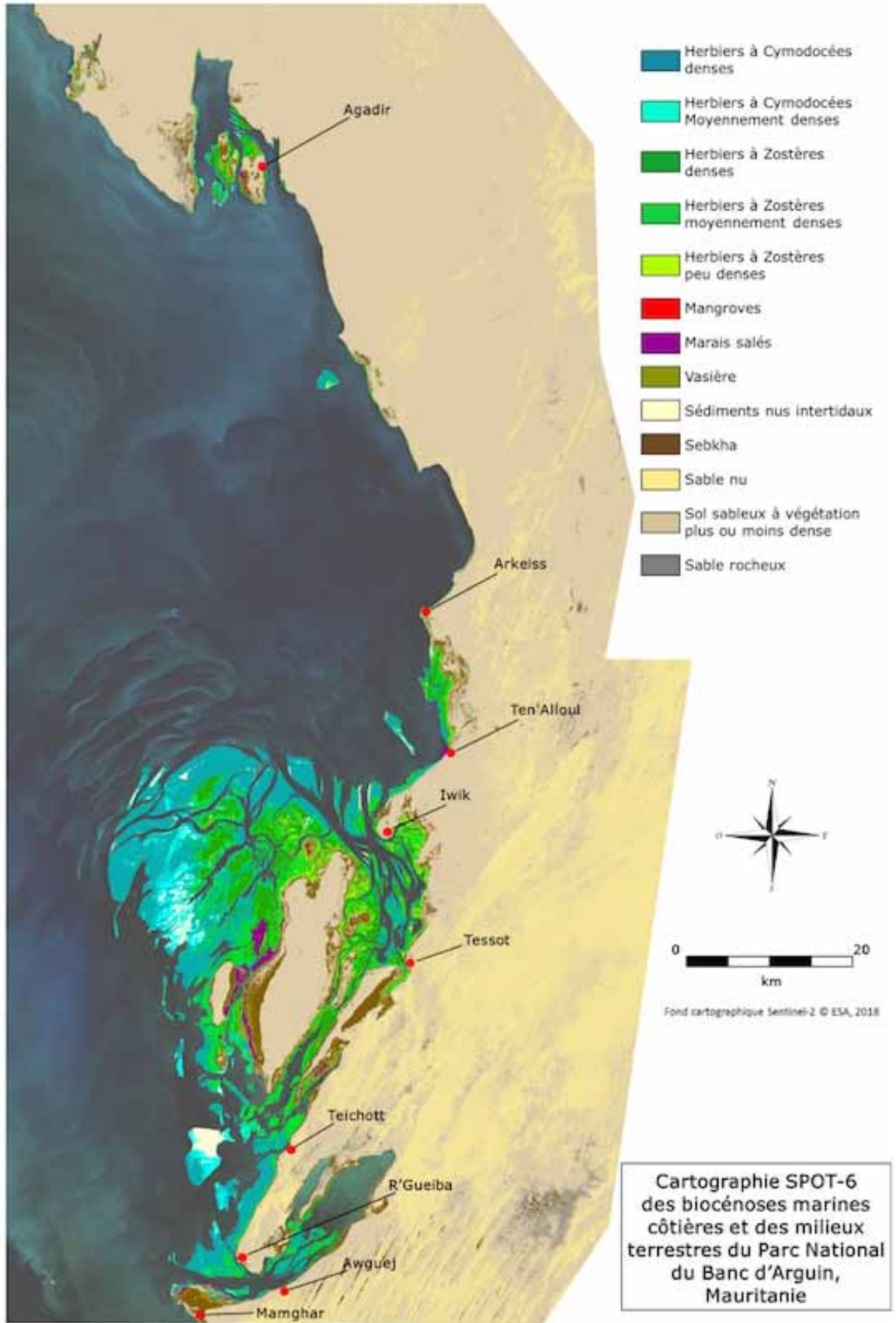


Figure 13 : Cartographie des biocénoses marines côtières et des milieux terrestres du PNBA par imagerie SPOT-6.

Cartographie SPOT-6 des biocénoses marines côtières et des milieux terrestres de l'île de Tidra dans le Parc National du Banc d'Arguin, Mauritanie

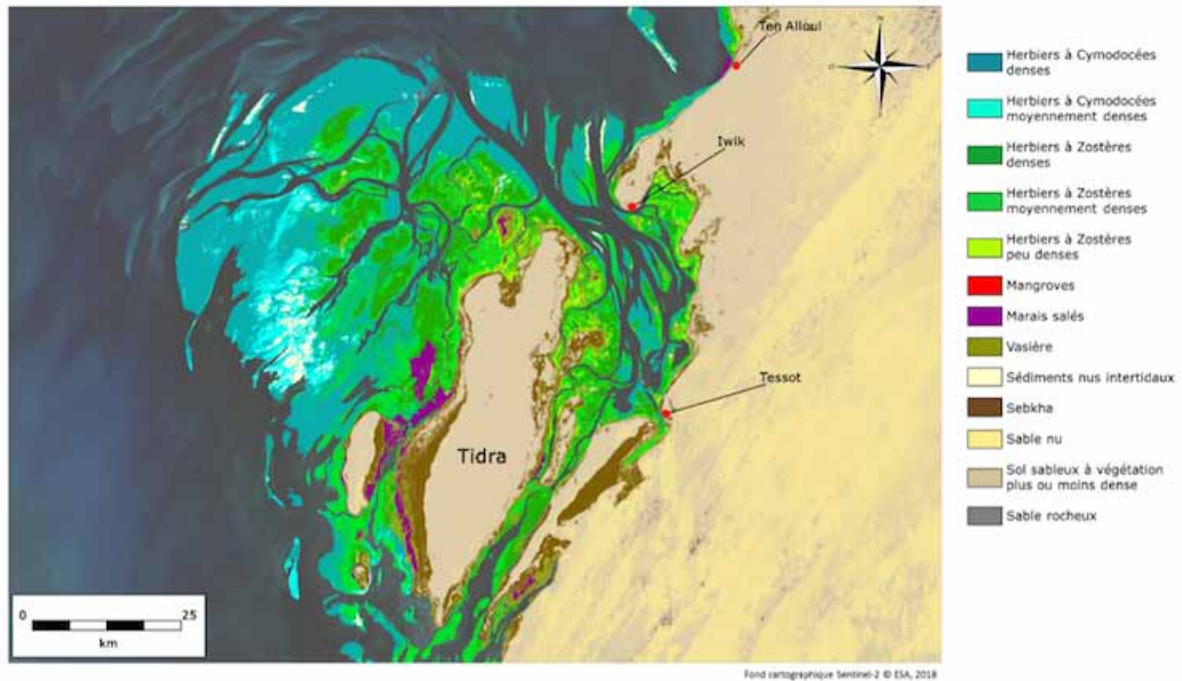


Figure 14 : Cartographie des biocénoses marines côtières et des milieux terrestres de l'île de Tidra dans le PNBA par imagerie SPOT-6.

Ces cartographies ont permis de réaliser des estimations des extensions de chaque écosystème. Les valeurs de référence sur le PNBA étaient les suivantes : 450 km² d'herbiers à zostères, 374 km² d'herbiers à cymodocées et 5 km² de mangroves (Clavier et al., 2014). Dans cette étude, les extensions calculées sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8 : Extensions des différents écosystèmes calculées à partir des classifications réalisées sur Sentinel-2 et SPOT-6.

Classe	Surface de référence (km ²)	Sentinel-2 (km ²)	SPOT-6 (km ²)
H. cymodocées denses		22	370
H. cymodocées moyennement denses		55	60
H. cymodocées peu denses		145	
Total H. cymodocées	374	222	430
H. zostères denses		70	123
H. zostères moyennement denses		219	205
H. zostères peu denses		163	23
Total H. zostères	450	452	351
Mangroves	5	0,8	0,2
Marais salés	25	26	31
Vasières	88	121	68

La cartographie réalisée sur Sentinel-2 a permis de mettre en évidence : 452 km² d'herbiers à zostères, 222 km² d'herbiers à cymodocées (total de 674 km² d'herbiers) et 0,8 km² de mangrove. Avec SPOT-6, ont été cartographiés 430 km² de cymodocées, 351 km² de zostères (total de 781 km² d'herbiers) et 0,2 km² de mangrove.

5.2. Variabilité spatiale de la distribution des herbiers

Une comparaison des images SPOT-5 de 2003 avec les images Sentinel-2 de 2018 permet de mettre en évidence la grande variabilité spatiale de la distribution des herbiers, notamment dans la zone de Tidra (Figure 15).

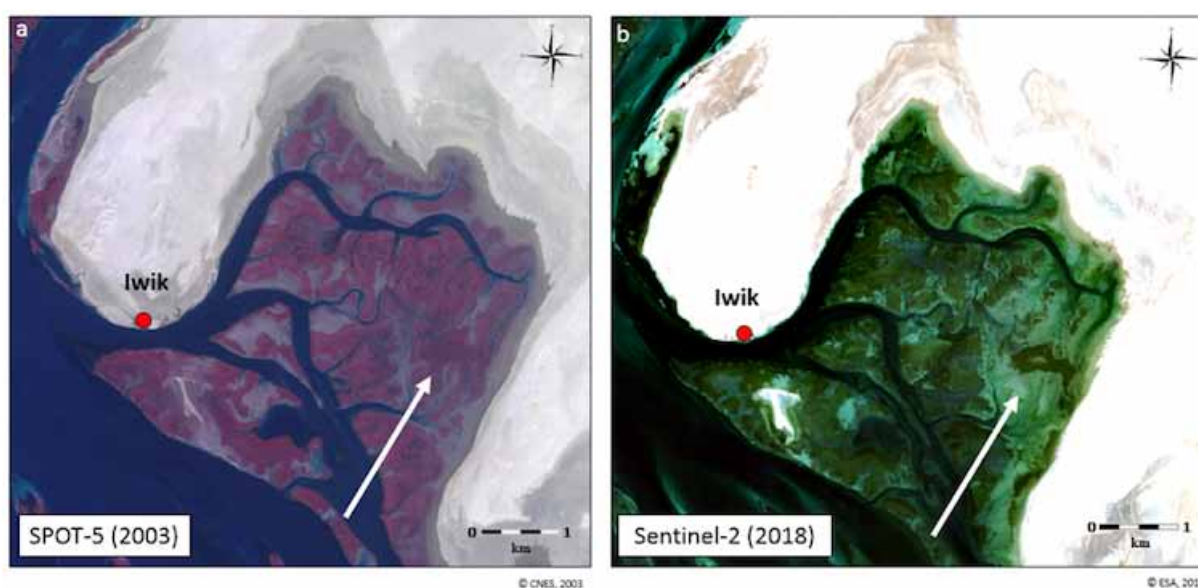


Figure 15 : Distribution spatiale des herbiers : comparaison entre une image SPOT 5 de 2003 et une image Sentinel-2 de 2018.

5.3. Densité des herbiers

5.3.1. Sentinel-2

Une cartographie de la densité des herbiers a été produite à partir de quelques mesures ponctuelles sur le terrain, pour lesquelles une corrélation a été établie avec la signature spectrale du pixel correspondant sur l'image, puis généralisée à l'échelle de l'image (Figures 16 et 17). Pour chaque espèce de phanérogames, 3 classes ont été définies suivant un gradient de densité, de forte densité à faible densité.

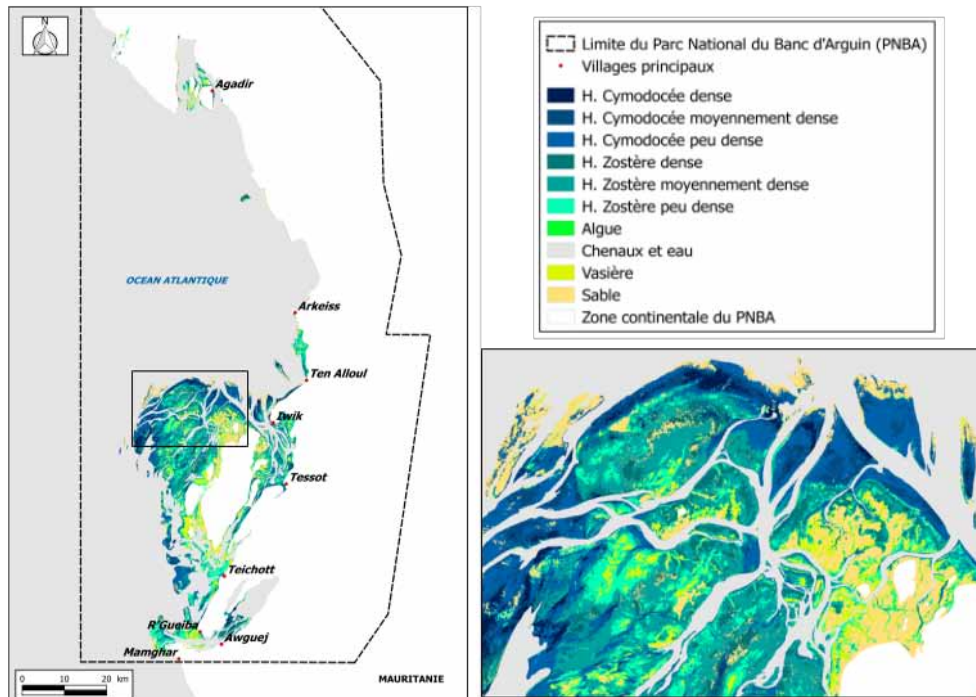


Figure 16 : Cartographie des densités d'herbiers à zostères et à cymodocées. 3 classes pour chaque espèce sont définies : forte densité, densité moyenne et faible densité.

Les estimations de couverture (densité) des herbiers à partir de Sentinel-2 montrent que pour les zostères et les cymodocées, on trouve principalement des zones peu denses à moyennement denses (Tableau 8).

5.3.2. SPOT-6

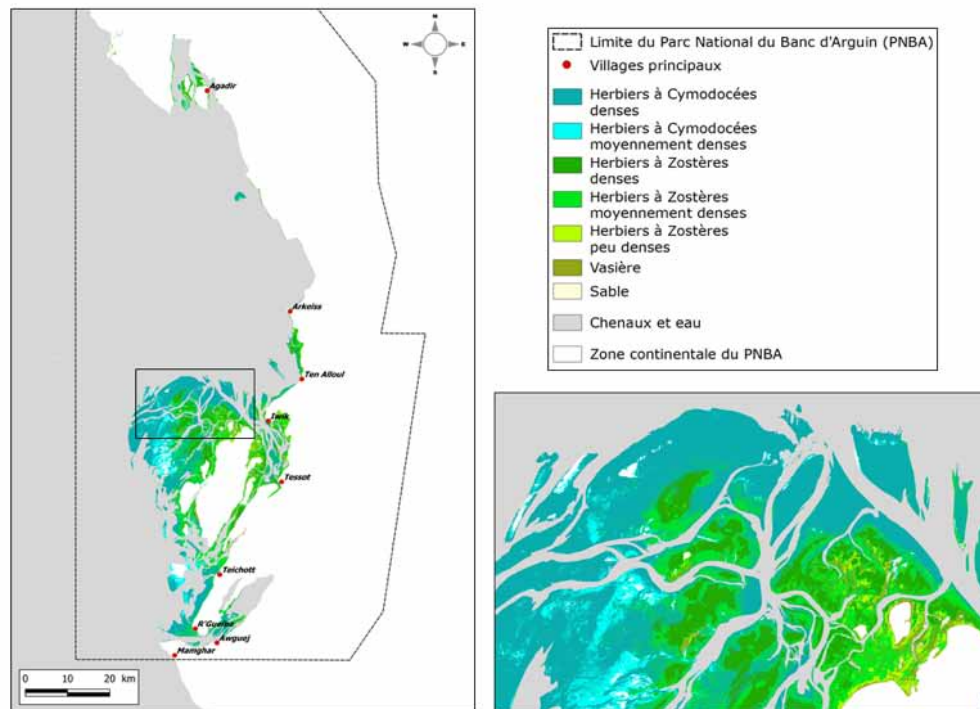


Figure 17 : Cartographie des densités d'herbiers à zostères et à cymodocées. 3 classes pour chaque espèce sont définies : forte densité, densité moyenne et faible densité.

Ici, seules deux classes de densité ont pu être détectées pour les cymodocées : une classe à forte densité et une classe à densité moyenne, avec une grande majorité d'herbiers à forte densité. Pour les zostères, on trouve les 3 classes de densité avec principalement des herbiers denses (Figure 17).

6. DISCUSSION

6.1. Surfaces des écosystèmes

En ce qui concerne Sentinel-2, nous avons détecté 452 km² d'herbiers à zostères ce qui est en accord avec la valeur de référence établie à partir de l'image de 2003. Cela montre une très forte stabilité générale de cet écosystème malgré la grande variabilité spatiale de sa distribution au cours du temps (Figure 15). Au total, 222 km² d'herbiers à cymodocées ont été détectés contre 374 km² pour la valeur de référence. Cette différence s'explique probablement par le fait que l'image Sentinel-2 de 2018 a été prise à un coefficient de marée basse plus faible qu'en 2003, laissant apparaître une moins grande quantité de cymodocées. Ainsi, la surface totale des herbiers (674 km²) est légèrement inférieure à la référence (774 km²), avec une surface en zostères supérieure à la surface en cymodocées. Cependant, malgré la présence d'eau, la bande bleue de Sentinel-2 permet une pénétration minimale de la colonne d'eau et l'extraction d'information à minima sur la présence d'herbiers. Pour la mangrove, 0.8 km² ont été détectés, contre 5 km² en 2003. Ici la différence s'explique probablement par la différence de résolution des images (2,5 m pour SPOT-5 contre 10 m pour Sentinel-2). Les patches de

mangrove étant de très petite taille il est tout à fait possible qu'une grande partie n'ait pas été détectée en utilisant Sentinel-2.

En ce qui concerne SPOT-6, nous avons globalement détecté autant d'herbiers que la référence (environ 781 km² contre 774 km²) et 15 % de plus qu'avec Sentinel-2. Cependant les surfaces de zostères et de cymodocées sont inversées par rapport à Sentinel-2 avec une surface en cymodocées supérieure à la surface en zostères. Cela traduit la confusion intra-classe qu'il existe entre les deux espèces d'herbiers, que ce soit sur Sentinel-2 ou sur SPOT-6. Pour la mangrove, la faible détection (0,2 km²) est liée au bruit dans l'image qui rend difficile la caractérisation de cet écosystème qui tend à se confondre avec les pixels voisins. La détection est cependant du même ordre de grandeur pour les deux capteurs.

6.2. Qualité des classifications

Des matrices de confusion ont été réalisées pour les deux classifications, en se concentrant sur les herbiers à zostères, les herbiers à cymodocées, les mangroves et les marais salés. Ces matrices ont permis d'estimer la précision de classification de ces écosystèmes.

6.2.1. Sentinel-2

Si l'on s'intéresse à la classification de la classe herbiers dans son ensemble par imagerie Sentinel-2, la précision globale obtenue pour cette classe est de 81 %. Cette valeur a été établie à partir d'un échantillon de validation constitué de 100 points relevés lors de la campagne de terrain d'avril 2018. Étant donnée la résolution des images Sentinel-2, la complexité des écosystèmes d'herbiers (grande fragmentation et distribution spatiale disparate) et la taille très variable des patches observés sur le terrain, la précision globale de 81% obtenue pour la classe herbier est satisfaisant.

Si l'on s'intéresse à la précision intra-classe des herbiers, les résultats sont cependant moins fiables avec de nombreuses confusions entre les herbiers et d'autres classes, notamment les sédiments nus intertidaux. En effet, une précision de 60 % est observée pour les Zostères et une précision de 45 % pour les cymodocées. Plusieurs facteurs expliquent ces résultats : à une résolution de 10 m les herbiers peu denses sont entourés de zones sableuses dont le signal est prépondérant sur un pixel moyenné qui se retrouve attribué à la classe sédiments nus intertidaux alors qu'il s'agit en réalité d'un pixel mixte contenant des herbiers. D'autre part, il a souvent été difficile de faire la distinction entre les espèces d'herbiers au niveau radiométrique sur l'image, ce qui explique la bonne précision globale, mais le résultat médiocre au niveau intra-classe.

D'autre part, le fait qu'une partie de la zone soit recouverte par la marée induit un biais sur le signal observé dans certaines zones et entraîne des confusions de classifications. Afin d'améliorer les résultats, il est nécessaire de corriger la composante du signal en fonction de la hauteur d'eau. Comme indiqué plus haut, ces corrections font appel à des données de bathymétrie, de turbidité et de marée dont la disponibilité et/ou la qualité sont actuellement insuffisantes pour pallier à ce problème.

L'analyse des classes mangroves et marais salés nous conduit à regrouper ces deux classes pour l'étude de la précision. Au PNBA, ces deux écosystèmes sont souvent associés, avec une distribution très éparse et sur des surfaces qui sont à la limite de la résolution des images Sentinel-2. Une précision globale de 79 % a été calculée pour ces classes, à partir d'un échantillon de terrain de 20 points.

6.2.2. SPOT-6

Alors que l'on pouvait s'attendre à une amélioration de la précision grâce à l'utilisation de la très haute résolution spatiale fournie par SPOT-6, cette augmentation de la résolution s'est traduite par la présence de bruit sur l'image caractérisé par une très grande variabilité spectrale des pixels au sein d'une même classe. Ainsi, la précision globale de la classe herbiers est très similaire à celle obtenue avec Sentinel-2, avec une valeur de 80 %, et le même problème de confusion intra-classe. Cette fois-ci cependant, les cymodocées sont mieux détectées que les zostères avec un taux de 77 % contre 45 % (avec le même échantillon de terrain pour la validation).

Il est important de noter que l'état de marée est similaire entre les deux acquisitions, mais les prises de vue ont été réalisées à des horaires correspondant à des hauteurs d'eau différentes (0,5 m pour Sentinel-2 contre 1,5 m pour SPOT-6, figure 18), ce qui entraîne des différences dans la détection des herbiers. Les images sont également séparées de deux années, d'où une variabilité dans la distribution des écosystèmes observés et donc des différences dans les classifications.

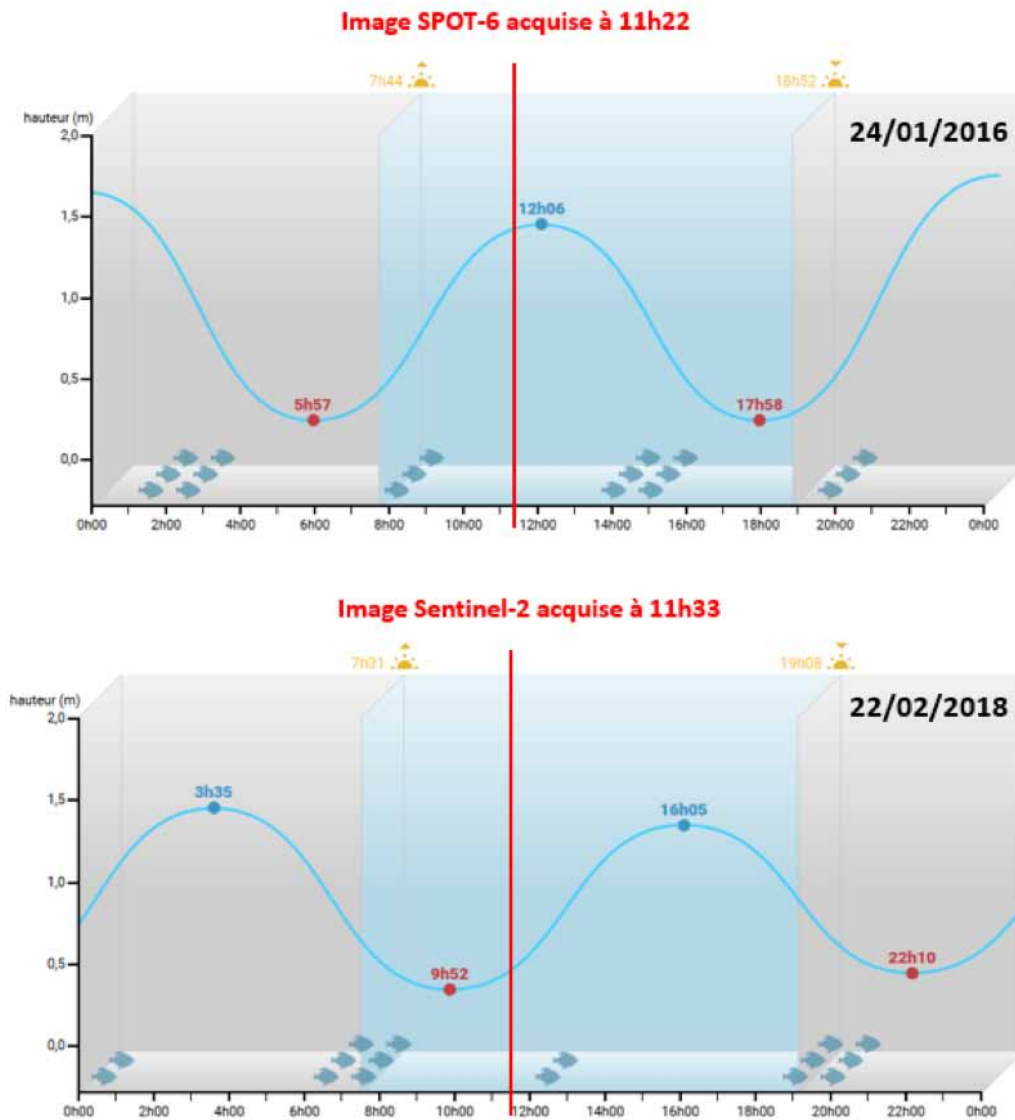


Figure 18 : Etat des marées et hauteurs d'eau lors des acquisitions SPOT-6 du 24/01/2016 et Sentinel-2 du 22/02/2018 utilisées dans cette étude (<https://mareespeche.com/af/mauritania/ile-darguin>).

La classe mangroves / marais salés quant à elle plafonne à environ 60 % de précision, le bruit et la très grande quantité de pixels mixtes compliquant grandement une détection fine. Pour les deux capteurs, il est important de prendre également en compte la précision des mesures GPS effectuées sur le terrain qui peut être source de discordance entre une observation sur le terrain et une classification sur l'image.

6.3. Extraction du signal de densité des herbiers à partir des images satellites

Que ce soit pour Sentinel-2 ou SPOT-6, l'utilisation de relevé terrains de densité d'herbiers, corrélés à une information spectrale puis extrapolés à l'ensemble de l'image se révèle assez peu satisfaisante. En effet sur Sentinel-2, environ 20 % des mesures de densité effectuées sur le terrain concordent avec l'observation sur l'image. Ce phénomène s'explique principalement

par le fait que la mesure de densité est une mesure ponctuelle (qui a une précision liée à la précision de la position du GPS) que l'on extrapole à des unités de surface de 100 m². Il est donc délicat d'extraire ce type d'information. Une solution serait de mesurer une densité d'herbier (ou taux de couverture) sur des parcelles de 100 m², représentant la surface d'un pixel, réparties sur l'ensemble de la zone d'étude.

La présence de bruit dans le signal n'a pas permis de distinguer 3 classes de densité des herbiers sur SPOT-6. Seuls des herbiers denses ou moyennement denses sont détectés. Cette observation liée à la très haute résolution spatiale a déjà été faite sur la carte de Chauvaud à 2,5 m de résolution (figure 3) où seules deux classes de densité étaient répertoriées. Sur SPOT-6 cependant, la résolution permet tout de même d'améliorer les résultats avec 33 % de concordance entre les données mesurées sur le terrain et les observations satellite.

La comparaison entre les deux capteurs met en évidence une majorité d'herbiers peu ou moyennement denses sur Sentinel-2 et au contraire une majorité d'herbiers denses sur SPOT-6. Cette différence résulte notamment de la différence de surface sur un pixel : le pixel de 100m² sur Sentinel-2 est plus fortement moyenné par les classes autres qu'herbiers, contrairement à un pixel de 2,25 m². La densité apparaît donc plus forte sur SPOT-6.

Ces résultats restent insatisfaisants, la méthode employée n'est pas adéquate pour caractériser la densité des herbiers à l'échelle du PNBA.

Pour les cymodocées, seules deux classes ont été identifiées sur SPOT-6. Cela s'explique par la grande confusion produite lorsque que l'on essaye de classer les cymodocées selon 3 classes de densité à une résolution de 1,5 m.

6.4. Recommandations pour la production d'une cartographie du PNBA

Les résultats de cette étude ont montré que pour les deux capteurs utilisés, malgré des résolutions spatiales différentes, les précisions globales obtenues pour les classes principales impliquées dans la séquestration du carbone sont similaires, à environ 80 %. Cependant, plusieurs critères nous amènent à recommander l'utilisation des données Sentinel-2, bien que moins bien résolues spatialement :

- Leur disponibilité libre tous les 12 jours sur l'emprise du PNBA.
- L'accès aux données SPOT-6 est limité, avec des prises de vue qui ne sont pas systématiques et qui constituent un volume (72 tuiles) peu compatible avec les contraintes de programmation et les politiques de diffusion des données des services comme GEOSUD.
- Le fait que seules deux tuiles soient nécessaires pour couvrir l'ensemble de la zone.
- Le volume des données SPOT-6 et les temps de calcul très importants nécessaires à la classification. Des moyens matériels importants ont été mobilisés pour produire ces cartes et de nombreuses contraintes techniques ont été rencontrées.

Cependant, l'utilisation des données SPOT-6 s'est avérée intéressante pour la discrimination entre les espèces d'herbiers, en atteignant une précision plus grande sur les cymodocées que

Sentinel-2. Ainsi, Sentinel-2 semble plus adapté à la détection des herbiers au sens large et SPOT-6 à la détection intra-classe.

Enfin, l'automatisation de la classification s'est avérée extrêmement complexe étant donnée la complexité des milieux à caractériser. Il a notamment été nécessaire de valider manuellement un masque des chenaux de marée permettant de caractériser la présence de cymodocées en bordures de chenaux. Cette opération n'a pas été possible en définissant une zone tampon automatique, en partie à cause de la configuration spatiale de la zone et également à cause du manque de connaissance sur la répartition spatiale et bathymétrique des cymodocées. D'autre part, les réflectances étant très variables d'un capteur à l'autre les seuils choisis pour Sentinel-2 ne sont pas transposables directement à SPOT-6 et une adaptation est nécessaire. Cependant, les images étant calibrées radiométriquement, les seuils Sentinel-2 pour une date sont transposables à une autre date pour une mise à jour de la carte (moyennant des corrections atmosphériques et des conditions de marée similaires).

Tableau 9 : Comparaison entre les capteurs Sentinel-2 et SPOT-6.

	Sentinel-2	SPOT-6
Résolution spatiale (m)	10	1.5
Coût d'acquisition	libre	non-libre
Répétitivité temporelle	12 jours	Indéterminée, sur commande
Taille du jeu de données	2 Go	100 Go
Temps de calcul	Quelques heures	1 jour
Estimation des surfaces d'herbiers	✓	
Discrimination des espèces d'herbiers		✓
Estimation des densités d'herbiers	~	~
Détection de la mangrove	✓	
Reproductibilité des classifications	✓	

6.5. Intégration d'autres sources d'imagerie satellite

Initialement, nous souhaitions utiliser les données Pléiades à 50 cm de résolution pour cartographier le PNBA. Cependant seules des données d'archives de 2015 ne couvrant que la zone centrale (autour de Tidra) n'étaient disponibles. Cette zone étant bien connue, elle ne constituait pas la zone d'intérêt principale de cette étude contrairement au Nord et au Sud du PNBA. Ainsi, nous avons privilégié, les données SPOT-6, certes légèrement moins résolue, mais couvrant l'ensemble du Parc.

Tout autre type de données (satellitaires ou non) peuvent être considérées pour la mise en place d'un suivi de l'évolution des écosystèmes du PNBA. Les applications de la très haute résolution spatiale (satellite ou drone) seraient cependant à privilégier pour des applications locales alors que la haute résolution spatiale est plus adaptée à une couverture globale du Parc.

7. CONCLUSION

Cette étude a permis la mise à jour des connaissances cartographiques des biocénoses marines et des milieux terrestres du PNBA. Deux sources d'imagerie satellite ont été testées pour réaliser des classifications à partir d'un échantillonnage de terrain conséquent. Bien que les résultats en termes de précision de classification soient proches, les deux capteurs Sentinel-2 et SPOT-6 ont montré une complémentarité dans la production cartographique, ainsi que des différences. Ces deux aspects ont été résumés par une série de recommandations à destination des acteurs de la gestion et de la conservation du PNBA. Malgré tout, l'accent est à mettre sur les données Sentinel-2, qui sont libres, exploitables avec des logiciels libres (demandant des ressources techniques moindres) et dont les constellations sont programmées au moins jusqu'en 2030 dans le cadre des programmes Copernicus, garantissant la mise à disposition de données d'observation de la terre sur la zone du PNBA. Cet aspect est important dans l'optique d'une mise à jour régulière et à long terme de la cartographie pour un suivi efficace des écosystèmes du PNBA et de leur évolution.



PARC NATIONAL DU BANC D'ARGUIN



Évaluation des services écosystémiques du Banc d'Arguin, Mauritanie

Rapport Final

Décembre 2018

