



# Bulletin de liaison

Trimestriel de l'Observatoire Régional du Littoral Ouest Africain (ORLOA)

Quarterly West African Regional Coastal Observatory (WARCO)

# Newsletter

No. 27

Jan-Feb-Mar 2026

## Focus

### Entretien avec Mme Madeleine Diouf Sarr

Directrice du changement climatique, de la transition écologique et des financements verts du Sénégal

## Focus

### Interview with Ms. Madeleine Diouf Sarr

Director of Climate Change, Ecological Transition and Green Finance in Senegal



**Question 1 :** Le protocole d'accord de l'Observatoire Régional du Littoral Ouest Africain (ORLOA) préconise la mise en place d'observatoires nationaux du littoral dans les pays. Quel est l'état d'avancement de ce processus au Sénégal ?

Au Sénégal, la mise en place de l'Observatoire national du littoral s'inscrit dans une dynamique nationale de consolidation de la gouvernance intégrée des zones côtières, conformément aux orientations stratégiques

**Question 1:** The memorandum of understanding of the West African Regional Coastal Observatory (ORLOA) recommends the establishment of national coastal observatories in member countries. What is the current status of this process in Senegal?

In Senegal, the establishment of the National Coastal Observatory is part of a national dynamic to consolidate integrated coastal zone governance, in accordance with

## Sommaire/Summary

1....**Focus:** Entretien avec Mme Madeleine Diouf Sarr

1....**Focus:** Interview with Ms. Madeleine Diouf Sarr

4....**Article des correspondants :** Validation d'une approche géospatiale intégrée pour la cartographie des mangroves du littoral sénégalais

4....**Article from our correspondents:** Validation of an integrated geospatial approach for mapping mangroves on the Senegalese coast



WORLD BANK



définies dans les cadres nationaux de planification du littoral, notamment la stratégie nationale et son plan d'action quinquennal.

Ce processus contribue également au renforcement des engagements nationaux en matière d'adaptation au changement climatique, en particulier dans les zones côtières fortement exposées aux phénomènes d'érosion, de submersion marine et de salinisation des terres.

La démarche engagée repose sur la consolidation progressive des bases scientifiques, techniques et institutionnelles. Il comprend notamment la validation des études préalables, l'identification des besoins institutionnels et opérationnels, ainsi que la mobilisation progressive des acteurs nationaux, territoriaux et sectoriels impliqués dans la gestion du littoral.

Une attention particulière est accordée au renforcement des capacités au niveau des territoires côtiers afin de garantir une appropriation durable par les communautés locales, les collectivités territoriales et les institutions techniques. L'Observatoire est ainsi conçu comme un mécanisme structurant, inclusif et participatif, au service d'une gouvernance côtière durable et résiliente.

**Question 2 :** *Quel est l'ancrage prévu de cet observatoire dans le dispositif institutionnel de gestion de l'environnement au Sénégal ?*

L'Observatoire national du littoral sera institutionnellement adossé au Ministère de l'Environnement et de la Transition écologique du Sénégal, plus précisément au niveau de la Direction en charge du changement climatique, de la transition écologique et des financements verts.

Ce positionnement permettra d'assurer une cohérence stratégique avec les politiques publiques nationales en matière d'environnement, de climat et de développement durable, tout en facilitant la coordination intersectorielle avec l'ensemble des structures techniques nationales impliquées dans la gestion du littoral, notamment dans les domaines de l'aménagement du territoire, de la gestion des ressources naturelles, de la pêche, du tourisme et des infrastructures.

**Question 3 :** *Selon vous, quel sera l'apport de l'observatoire national du littoral du Sénégal dans la gestion des risques côtiers au niveau national ?*

L'Observatoire national du littoral constituera un dispositif stratégique pour la production, la centralisation, l'analyse et la diffusion de données scientifiques et opérationnelles fiables relatives aux dynamiques côtières.

Il s'appuiera sur des outils modernes d'observation incluant la télédétection, les systèmes d'information

the strategic guidelines defined in the national coastal planning frameworks, particularly the national strategy and its five-year action plan.

This process also contributes to strengthening national commitments to climate change adaptation, especially in coastal areas highly exposed to erosion, marine submersion, and soil salinization.

The approach undertaken is based on the progressive consolidation of the scientific, technical, and institutional foundations. This includes, in particular, the validation of preliminary studies, the identification of institutional and operational needs, and the gradual mobilization of national, territorial, and sectoral stakeholders involved in coastal management.

Special attention is paid to capacity building at the coastal territory level to ensure sustainable ownership by local communities, territorial authorities, and technical institutions. The Observatory is thus designed as a structuring, inclusive and participatory mechanism, serving sustainable and resilient coastal governance.

**Question 2:** *What is the planned integration of this observatory within the institutional framework for environmental management in Senegal?*

The National Coastal Observatory will be institutionally attached to the Ministry of the Environment and Ecological Transition of Senegal, specifically to the Directorate in charge of climate change, ecological transition, and green finance.

This positioning will ensure strategic coherence with national public policies on the environment, climate, and sustainable development, while facilitating intersectoral coordination with all national technical bodies involved in coastal management, particularly in the areas of land-use planning, natural resource management, fisheries, tourism, and infrastructure..

**Question 3:** *In your opinion, what will be the contribution of the Senegalese National Coastal Observatory to coastal risk management at the national level?*

The National Coastal Observatory will be a strategic tool for the production, centralization, analysis, and dissemination of reliable scientific and operational data on coastal dynamics.

It will rely on modern observation tools, including remote sensing, geographic information systems, and interoperable databases, enabling regular monitoring



géographique et des bases de données interopérables, permettant un suivi régulier de l'évolution du trait de côte, des phénomènes d'érosion, de submersion marine et de salinisation des zones côtières.

Il contribuera ainsi au renforcement de la planification stratégique, de l'anticipation des risques et de l'aide à la décision publique, notamment en appui à la planification territoriale, à l'aménagement durable du littoral et à la sécurisation des investissements publics et privés dans les zones côtières.

Au-delà de sa fonction d'observation, il servira également de plateforme nationale de dialogue scientifique et technique, de prévention et de gestion des risques côtiers, notamment à travers le développement progressif de systèmes d'alerte précoce adaptés aux aléas littoraux.

À terme, l'Observatoire contribuera également à la protection des infrastructures socio-économiques stratégiques, des activités halieutiques, touristiques et portuaires, ainsi qu'au renforcement de la résilience des communautés côtières.

**Question 4 :** *Comment envisagez-vous la collaboration avec les autres observatoires nationaux du littoral pour contribuer à la gestion des risques côtiers au niveau régional ?*

Les dynamiques océaniques et littorales dépassant les frontières administratives, la coopération régionale constitue un levier déterminant pour une gestion efficace et durable des risques côtiers.

Dans cette perspective, la mutualisation des données scientifiques, l'harmonisation progressive des méthodologies d'observation, ainsi que la mise en réseau des expertises techniques régionales seront essentielles pour améliorer la connaissance et la gestion concertée du littoral ouest-africain.

À cet égard, le Centre de Suivi Ecologique joue un rôle stratégique dans la facilitation des échanges scientifiques et techniques entre pays, le renforcement des capacités régionales et la capitalisation des connaissances et des bonnes pratiques.

Cette dynamique contribuera à consolider une vision régionale intégrée de la gestion du littoral, fondée sur la connaissance scientifique, la solidarité entre États et la prévention des risques côtiers à l'échelle ouest-africaine, avec l'ambition de construire progressivement un système régional d'observation et d'alerte face aux risques côtiers.

of coastal evolution, erosion, marine submersion, and salinization of coastal areas.

It will thus contribute to strengthening strategic planning, risk anticipation, and public decision-making, particularly in support of territorial planning, sustainable coastal development, and securing public and private investments in coastal areas.

Beyond its observational function, it will also serve as a national platform for scientific and technical dialogue, and for the prevention and management of coastal risks, notably through the progressive development of early warning systems adapted to coastal hazards.

In the long term, the Observatory will also contribute to the protection of strategic socio-economic infrastructure, fishing, tourism and port activities, as well as to strengthening the resilience of coastal communities.

**Question 4:** *How do you envision collaborating with other national coastal observatories to contribute to coastal risk management at the regional level?*

Since ocean and coastal dynamics transcend administrative boundaries, regional cooperation is a crucial lever for the effective and sustainable management of coastal risks.

In this context, the pooling of scientific data, the progressive harmonization of observation methodologies, and the networking of regional technical expertise will be essential to improving knowledge and coordinated management of the West African coastline.

In this regard, the Ecological Monitoring Centre plays a strategic role in facilitating scientific and technical exchanges between countries, strengthening regional capacities, and capitalizing on knowledge and best practices.

This dynamic will contribute to consolidating an integrated regional vision of coastal management, based on scientific knowledge, solidarity between states, and the prevention of coastal risks at the West African level, with the ambition of progressively building a regional system for observing and alerting to coastal risks.



## Article des correspondants

# Validation d'une approche géospatiale intégrée pour la cartographie des mangroves du littoral sénégalais

Approche multi-capteur, Cartographie, Classification par seuillage, Digital Earth Africa, Mangrove, Random forest, Sénégal



## Résumé

Les mangroves jouent un rôle écologique et socioéconomique majeur : elles protègent les littoraux contre l'érosion et les inondations, constituent d'importants réservoirs de carbone bleu, abritent une biodiversité exceptionnelle et soutiennent les moyens de subsistance des communautés. Cependant, les mangroves subissent une dégradation dans le contexte du changement climatique, nécessitant ainsi un suivi régulier et précis. Au Sénégal, ce suivi reste limité en raison de l'hétérogénéité des méthodes de cartographie et du manque de données de validation au sol. L'étude propose une approche intégrée, automatisée et reproductible de cartographie des mangroves, combinant la télédétection multi-capteurs (Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat), les produits dérivés du programme Digital Earth Africa et les relevés de terrain. Un ensemble de 1 793 points d'échantillonnage a servi à analyser la capacité discriminante des variables séparément, à entraîner un modèle Random Forest et à valider indépendamment chaque classificateur avant une

## Article from our correspondents

# Validation of an integrated geospatial approach for mapping mangroves on the Senegalese coast

Multi-sensor approach, Mapping, Thresholding classification, Digital Earth Africa, Mangrove, Random forest, Senegal

**Papa Ababacar Ndong, Lissong Diop, Mamadou Adama Sarr, Mamadou Lamine Ndiaye, Ndeye Fatou Sané**

Centre de Suivi Ecologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Géologie (ENSMG), Université Cheikh Anta Diop (UCAD), Dakar, Université Gaston Berger (UGB), Saint-Louis

## Summary

Mangroves play a major ecological and socioeconomic role: they protect coastlines from erosion and flooding, constitute important blue carbon sinks, harbor exceptional biodiversity, and support community livelihoods. However, mangroves are undergoing degradation in the context of climate change, thus requiring regular and accurate monitoring. In Senegal, this monitoring remains limited due to the heterogeneity of mapping methods and the lack of ground-based validation data. This study proposes an integrated, automated, and reproducible approach to mangrove mapping, combining multi-sensor remote sensing (Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat), products derived from the Digital Earth Africa program, and field surveys. A set of 1,793 sampling points was used to analyze the discriminatory capacity of variables separately, to train a Random Forest model, and to independently

comparaison des performances. Le modèle Random Forest a montré des performances significatives (Précision globale = 0,97 ; F1 = 0,97), surpassant les approches par seuillage. Les résultats ont aussi démontré que les variables radar Sentinel-1 (VH, VV) et les indices de végétation et d'humidité sont plus discriminants pour la détection des mangroves que les bandes optiques. La stabilité temporelle, évaluée en appliquant le modèle entraîné sur les données de 2024 à celles de 2020, reste très satisfaisante (Précision globale = 0,90 ; F1 = 0,84) par rapport à 2000 points du produit de référence mondial : Global Mangrove Watch attestant de la robustesse et de la transférabilité de l'approche. Cette méthodologie encourage l'intégration des données d'observation de la terre couplées à l'apprentissage automatique pour la surveillance à grande échelle des mangroves. Ces travaux offrent un cadre évolutif et transposable pour le suivi harmonisé et la gestion durable des mangroves en Afrique de l'Ouest.

## Introduction

Les mangroves sont des forêts sempervirentes tolérantes au sel qui se développent dans les zones intertidales le long des côtes, là où les eaux sont calmes et où les sédiments permettent l'ancrage des racines (Leal et Spalding, 2022). Elles sont présentes dans les régions tropicales et subtropicales du monde, entre environ 30° de latitude nord et 30° de latitude sud (Giri et al., 2010 ; Dat Pham, 2019). Ces écosystèmes jouent un rôle majeur dans le fonctionnement des zones côtières : stabilisation des sols, atténuation de l'érosion, protection contre les tempêtes et tsunamis, stockage du carbone et soutien à la biodiversité et aux pêcheries (Donato et al., 2011 ; Barbier, 2011 ; Zu Ermgassen et al., 2020).

Malgré leur importance, les mangroves sont de plus en plus menacées par la déforestation, l'urbanisation, l'aquaculture intensive et la pollution (Polidoro et al., 2010 ; Pham et Yoshino, 2016). À l'échelle mondiale, elles ont perdu environ 30 % de leur couverture au cours des quarante dernières années (FAO, 2007 ; FAO, 2020), et certaines espèces sont aujourd'hui fortement menacées d'extinction.

En Afrique de l'Ouest, les mangroves constituent des écosystèmes essentiels pour la protection des zones côtières et le maintien des moyens de subsistance des communautés locales. Elles couvrent plus de 2,4 millions d'hectares dans 19 pays et représentent 13 % de la population mondiale de mangroves.

Au Sénégal, elles se concentrent principalement dans les deltas du fleuve Sénégal et du Saloum, en basse Casamance et d'autres zones littorales. Cependant, les mangroves sénégalaises sont confrontées à de

validate each classifier before comparing performance. The Random Forest model demonstrated significant performance (Overall Accuracy = 0.97; F1 = 0.97), surpassing thresholding approaches. The results also showed that Sentinel-1 radar variables (VH, VV) and vegetation and humidity indices are more discriminating for mangrove detection than optical bands. Temporal stability, assessed by applying the model trained on 2024 data to 2020 data, remains very satisfactory (Overall Accuracy = 0.90; F1 = 0.84) compared to 2000 points of the global reference product: Global Mangrove Watch, attesting to the robustness and transferability of the approach. This methodology encourages the integration of Earth observation data coupled with machine learning for large-scale mangrove monitoring. This work offers an evolving and transferable framework for the harmonized monitoring and sustainable management of mangroves in West Africa.

## Introduction

Mangroves are salt-tolerant evergreen forests that thrive in intertidal zones along coastlines, where the waters are calm and the sediments allow for root anchorage (Leal and Spalding, 2022). They are found in tropical and subtropical regions worldwide, between approximately 30° north and 30° south latitude (Giri et al., 2010; Dat Pham, 2019). These ecosystems play a major role in the functioning of coastal areas: soil stabilization, erosion mitigation, protection against storms and tsunamis, carbon sequestration, and support for biodiversity and fisheries (Donato et al., 2011; Barbier, 2011; Zu Ermgassen et al., 2020).

Despite their importance, mangroves are increasingly threatened by deforestation, urbanization, intensive aquaculture, and pollution (Polidoro et al., 2010; Pham and Yoshino, 2016). Globally, they have lost approximately 30% of their cover in the last forty years (FAO, 2007; FAO, 2020), and some species are now critically endangered.

In West Africa, mangroves are essential ecosystems for protecting coastal areas and maintaining the livelihoods of local communities. They cover more than 2.4 million hectares in 19 countries and represent 13% of the world's mangrove population.

In Senegal, they are concentrated mainly in the deltas of the Senegal and Saloum rivers, in Lower Casamance, and other coastal areas. However, Senegalese mangroves



nombreuses pressions. La déforestation, l'expansion agricole, la salinisation des sols, la pollution et la surexploitation des ressources compromettent leur santé et leur résilience (Ndour et al., 2007 ; Dieye et al., 2013). Toutefois, il apparaît une certaine discordance dans la littérature quant à la dynamique des zones de mangrove au Sénégal, entre expansion et régression (Lombard, 2023).

Afin de protéger les mangroves et les services écosystémiques qu'elles offrent, il est essentiel de cerner leur étendue, leur répartition et leur état de conservation. Ce suivi de la couverture de la mangrove est idéalement effectué avec une approche par télédétection. Il existe de nombreux outils et plateformes qui permettent de cartographier et de suivre la dynamique de la mangrove. Au Sénégal, la mangrove est cartographiée depuis la moitié du 20<sup>ème</sup> siècle (Trochain, 1940 in Andrieu et Mering, 2008). Cependant la cartographie et l'étude des dynamiques de la mangrove est souvent réalisée à l'échelle des écorégions avec des méthodes différentes (Diagne, 1998 ; Dieye et al., 2013 ; Ndour et al., 2011). Plusieurs revues de littérature ont mis en évidence l'hétérogénéité des méthodes employées et les différences marquées en termes de précision et de validation (Wang et al., 2019). Si certaines études soulignent les promesses de techniques émergentes comme les données radar, hyperspectrales ou de très haute résolution spatiale (Giri, 2016 ; Pham et al., 2019 ; Maurya et al., 2021 ; Zhu et al., 2020), leur intégration demeure limitée par des contraintes méthodologiques, logistiques et économiques.

En Afrique de l'Ouest, ces défis sont encore plus prononcés : les cartes de mangroves produites à partir de la télédétection souffrent souvent d'un manque de calibration et de validation au sol, rendant difficile l'interprétation des signatures spectrales et la quantification fiable des surfaces et des dynamiques (Andrieu et al., 2019). Cette dépendance à des études ponctuelles et localisées engendre des biais méthodologiques qui compromettent la comparabilité des résultats et limitent la compréhension des processus écologiques sous-jacents. Dès lors, il apparaît essentiel de renforcer l'articulation entre télédétection et observations de terrain, d'harmoniser les protocoles de traitement et d'assurer la transparence des incertitudes afin de produire des données robustes, comparables et exploitables pour la gestion durable des mangroves.

Dans ce contexte, les données des satellites Sentinel-1 et Sentinel-2 jouent un rôle clé dans l'amélioration de la détection et de la cartographie des mangroves. De nombreux travaux ont démontré leur efficacité pour caractériser ces écosystèmes côtiers complexes, notamment grâce à la complémentarité entre les

face numerous pressures. Deforestation, agricultural expansion, soil salinization, pollution, and resource overexploitation compromise the health and resilience of mangroves (Ndour et al., 2007; Dieye et al., 2013). However, there is some discrepancy in the literature regarding the dynamics of mangrove areas in Senegal, between expansion and regression (Lombard, 2023).

To protect mangroves and the ecosystem services they provide, it is essential to determine their extent, distribution, and conservation status. This monitoring of mangrove cover is ideally carried out using a remote sensing approach. Numerous tools and platforms exist for mapping and monitoring mangrove dynamics. In Senegal, mangroves have been mapped since the mid-20th century (Trochain, 1940 in Andrieu and Mering, 2008). However, mapping and studying mangrove dynamics is often carried out at the ecoregional level using different methods (Diagne, 1998; Dieye et al., 2013; Ndour et al., 2011). Several literature reviews have highlighted the heterogeneity of the methods used and the marked differences in terms of accuracy and validation (Wang et al., 2019). While some studies emphasize the promise of emerging techniques such as radar, hyperspectral, or very high spatial resolution data (Giri, 2016; Pham et al., 2019; Maurya et al., 2021; Zhu et al., 2020), their integration remains limited by methodological, logistical, and economic constraints.

In West Africa, these challenges are even more pronounced: mangrove maps produced from remote sensing often suffer from a lack of calibration and ground validation, making it difficult to interpret spectral signatures and reliably quantify areas and dynamics (Andrieu et al., 2019). This reliance on isolated, localized studies generates methodological biases that compromise the comparability of results and limit the understanding of underlying ecological processes. Therefore, it is essential to strengthen the link between remote sensing and field observations, harmonize processing protocols, and ensure transparency regarding uncertainties in order to produce robust, comparable, and usable data for the sustainable management of mangroves.

In this context, data from the Sentinel-1 and Sentinel-2 satellites play a key role in improving mangrove detection and mapping. Numerous studies have demonstrated the effectiveness of radar in characterizing these complex coastal ecosystems, particularly thanks to the complementarity between radar and optical information



informations radar et optiques (Pham et al., 2019 ; Sharafi et al., 2022 ; Wang et al., 2022). Les capteurs radar à synthèse d'ouverture (SAR) de Sentinel-1, sensibles à la structure verticale et à l'humidité de la végétation, permettent de discriminer les mangroves d'autres types de couverts côtiers même sous forte nébulosité. Parallèlement, les images multispectrales de Sentinel-2 offrent des informations détaillées sur la composition et l'état physiologique de la végétation à travers leurs bandes dans le visible, le proche et le moyen infrarouge (Giri et al., 2016 ; Li et al., 2020 ; Bunting et al., 2022). L'intégration conjointe de ces deux sources de données améliore considérablement la précision des classifications, la détection des changements spatio-temporels et la compréhension des dynamiques écologiques des mangroves, tout en garantissant une couverture spatiale et temporelle adaptée aux contextes tropicaux (Baloloy et al., 2020).

Cette étude vise à développer et valider une approche intégrée, automatisée et reproductible pour la cartographie et le suivi des mangroves sur l'ensemble du littoral sénégalais. Plus spécifiquement, il s'agit : (i) d'identifier les variables les plus discriminantes pour la détection des mangroves ; (ii) de comparer les performances des approches par seuillage et par apprentissage automatique par rapport aux observations de terrain ; et (iii) d'évaluer la robustesse et la transposabilité temporelle de l'approche retenue par rapport aux produits globaux existants.

## Matériel et méthodes

La méthode utilisée pour la cartographie des écosystèmes de mangroves appliquée au Sénégal repose sur une approche intégrée combinant des données de terrain et des données satellitaires optiques, radar et topographiques. Cette approche vise à tirer parti de la complémentarité des informations fournies par les différents capteurs afin d'améliorer la précision et la discrimination des classes de couverture du sol.

## Zone d'étude

L'étude porte principalement sur le littoral du Sénégal. Situé à l'extrémité occidentale de l'Afrique de l'Ouest, le pays est bordé par l'océan Atlantique sur environ 700 km. Son climat, de type tropical, se caractérise par deux saisons distinctes : une saison sèche, dominée par l'harmattan de novembre à mai et une saison humide, de juin à octobre, sous l'influence de la mousson.

Les précipitations, plus abondantes au sud qu'au nord, conditionnent la répartition de la couverture végétale malgré une variabilité pluviométrique persistante (Sarr et al., 2013 ; Sarr et al., 2014). Du nord

(Pham et al., 2019; Sharafi et al., 2022; Wang et al., 2022). Sentinel-1's synthetic aperture radar (SAR) sensors, sensitive to the vertical structure and moisture content of vegetation, allow for the differentiation of mangroves from other types of coastal cover, even under heavy cloud cover. Simultaneously, Sentinel-2's multispectral images provide detailed information on the composition and physiological state of vegetation through their visible, near-infrared, and mid-infrared bands (Giri et al., 2016; Li et al., 2020; Bunting et al., 2022). The joint integration of these two data sources significantly improves classification accuracy, the detection of spatiotemporal changes, and the understanding of mangrove ecological dynamics, while ensuring spatial and temporal coverage adapted to tropical contexts (Baloloy et al., 2020).

This study aims to develop and validate an integrated, automated, and reproducible approach for mapping and monitoring mangroves along the entire Senegalese coastline. More specifically, it aims to: (i) identify the most discriminating variables for mangrove detection; (ii) compare the performance of thresholding and machine learning approaches with field observations; and (iii) evaluate the robustness and temporal transposition of the chosen approach compared to existing global products.

## Materials and methods

The method used for mapping mangrove ecosystems in Senegal is based on an integrated approach combining field data with optical, radar, and topographic satellite data. This approach aims to leverage the complementary nature of the information provided by the different sensors to improve the accuracy and differentiation of land cover classes.

## Study Area

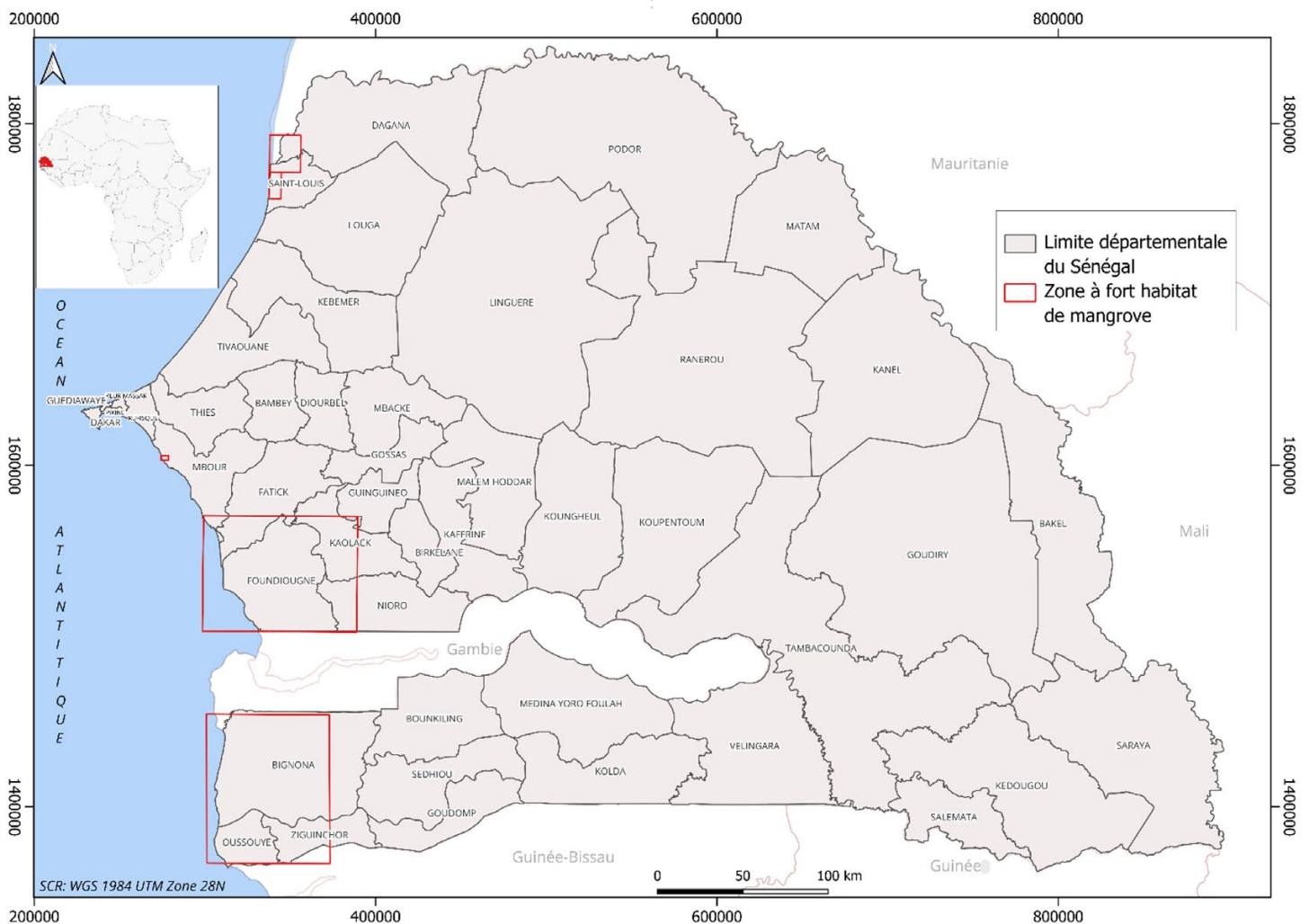
The study focuses primarily on the coastline of Senegal. Located at the westernmost tip of West Africa, the country is bordered by the Atlantic Ocean for approximately 700 km. Its tropical climate is characterized by two distinct seasons: a dry season, dominated by the harmattan wind from November to May, and a wet season, from June to October, influenced by the monsoon. Rainfall, more abundant in the south than in the north, determines the distribution of vegetation cover despite persistent variability in rainfall patterns (Sarr et al., 2013; Sarr et al., 2014). From north to



au sud, le Sénégal présente un gradient écologique prononcé, passant progressivement des steppes et savanes arbustives du domaine sahélien aux savanes arborées, puis aux forêts denses et humides des zones méridionales.

Les principales formations de mangroves se concentrent sur les zones côtières (figure 1), notamment dans les zones estuariennes du delta du fleuve Sénégal (département de Saint-Louis), la lagune de Somone (département de Mbour), les estuaires du Sine-Saloum (départements de Fatick et Foundiougne) et de la Basse-Casamance (départements de Bignona, Oussouye et Ziguinchor).

south, Senegal exhibits a pronounced ecological gradient, gradually transitioning from the steppes and shrubby savannas of the Sahelian zone to wooded savannas, and then to the dense, humid forests of the southern areas. The main mangrove formations are concentrated in coastal areas (Figure 1), particularly in the estuarine areas of the Senegal River delta (Saint-Louis department), the Somone lagoon (Mbour department), the estuaries of the Sine-Saloum (Fatick and Foundiougne departments) and of Lower Casamance (Bignona, Oussouye and Ziguinchor departments).



**Figure 1 : Localisation des zones couvertes par les écosystèmes de mangrove au Sénégal**

**Figure 1: Location of areas covered by mangrove ecosystems in Senegal**

## Données

### DONNÉES DE RÉFÉRENCE

Les données de référence utilisées proviennent de campagnes de terrain menées au cours du mois de septembre 2024 dans les zones de mangrove. Les échantillons correspondant aux zones non mangroves

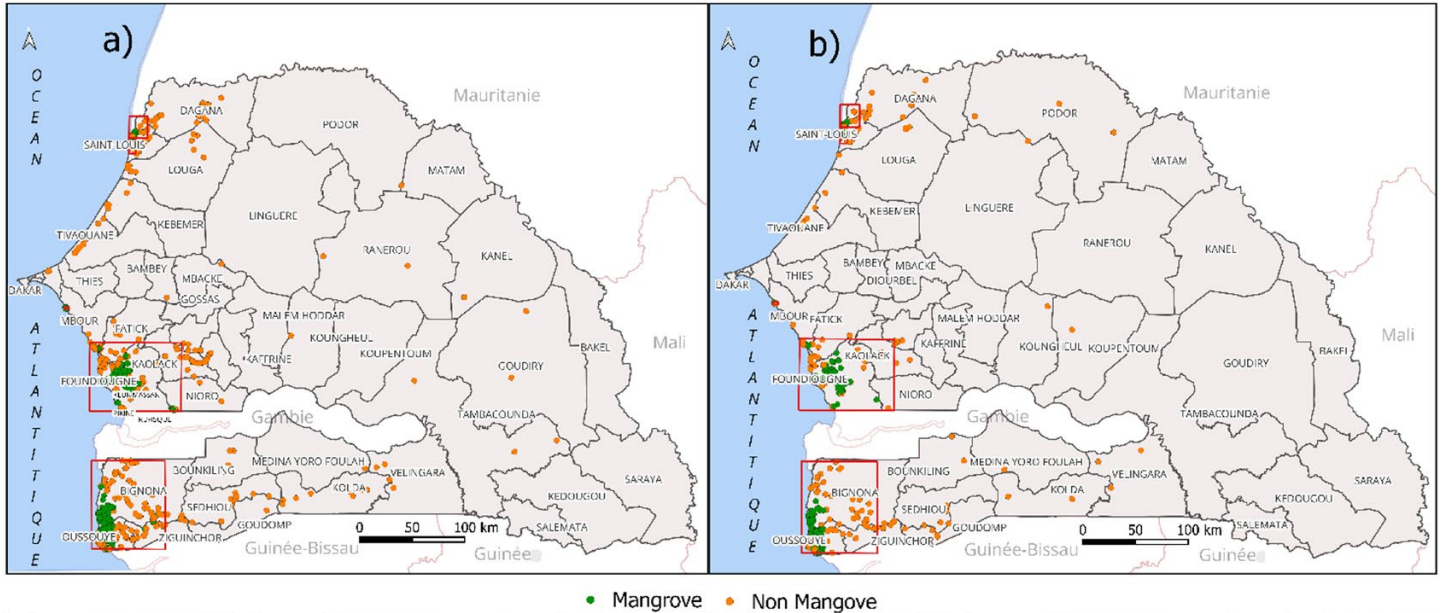
## Data

### REFERENCE DATA

The reference data used came from field campaigns conducted in September 2024 in mangrove areas. Samples corresponding to non-mangrove areas were obtained through photo-interpretation of 2024 Google

ont été obtenus par photo-interprétation d'images Google Earth Pro de 2024. Au total, 2 000 points d'échantillonnage ont été initialement collectés. Après extraction et découpage à l'échelle du territoire sénégalais, 1 793 points ont été retenus pour l'analyse (figure 2).

Earth Pro images. A total of 2,000 sampling points were initially collected. After extraction and segmentation across the Senegalese territory, 1,793 points were selected for analysis (Figure 2).



**Figure 2 : Répartition des données de référence : a) points d'entraînement, b) points de validation**

**Figure 2: Distribution of reference data: a) training points, b) validation points**

**DONNÉES SATELLITAIRES**

Les données satellitaires utilisées dans cette étude proviennent de la [plateforme Digital Earth Africa](#), qui fournit des produits satellitaires en libre accès, ainsi que des produits dérivés développés couvrant l'ensemble du continent africain. D'autres types de données ont été exploités pour cartographier de manière homogène les mangroves le long du littoral sénégalais (tableau 1).

**SATELLITE DATA**

The satellite data used in this study comes from the [Digital Earth Africa platform](#), which provides open-access satellite products, as well as derived products developed to cover the entire African continent. Other types of data were used to map mangroves along the Senegalese coast in a consistent manner (Table 1).

**Tableau 1: Données satellitaires**

**Table 1: Satellite data**

Variable	Produit / Product	Formule / Formula	Reference
red, green, blue, nir_1, nir_2, swir_1, swir_2	Sentinel-2 Geomedian annuel 2024	-	Roberts et al., 2017
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	Sentinel-2 Geomedian annuel 2024	$(nir_1 - red) / (nir_1 + red)$	Rouse et al., 1974
NDVI_8A	Sentinel-2 Geomedian annuel 2024	$(nir_2 - red) / (nir_2 + red)$	Rouse et al., 1974
MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)	Sentinel-2 Geomedian annuel 2024	$(green - swir_1) / (green + swir_1)$	Xu, 2006
MI (Mangrove Index)	Sentinel-2 Geomedian annuel 2024	$(nir_1 - swir_1) / (nir_1 * swir_1)$	Pham, T. D. 2019
MVI (Mangrove Vegetation Index)	Sentinel-2 Geomedian annuel 2024	$(nir_1 - green) / (swir_1 - green)$	Baloloy et al., 2020
TCW (Tasseled Cap Wetness)	Sentinel-2 Geomedian annuel 2024	$(0,1511 * blue) + (0,1973 * green) + (0,3283 * red) + (0,3407 * nir_1) - (0,7117 * swir_1) - (0,4559 * swir_2)$	Baig et al., 2014

Variable	Produit / Product	Formule / Formula	Reference
Sentinel-1_VV, Sentinel-1_VH	Sentinel-1 mosaïque mensuelle 2024 (DEA)	-	
Élévation	DEM SRTM 1 Arc-Second Global / dem_srtm_deriv		
Slope (pente)	DEM SRTM 1 Arc-Second Global / dem_srtm_deriv	-	
MrVBF (Multi-Resolution Valley Bottom Flatness)	DEM SRTM 1 Arc-Second Global / dem_srtm_deriv	-	
MrRTF (Multi-Resolution Ridge Top Flatness)	DEM SRTM 1 Arc-Second Global / dem_srtm_deriv	-	
Fraction végétation verte (FC_green_veg_p50)	Landsat	-	

#### ▶ Sentinel-1 mosaïque mensuelle

Les mosaïques mensuelles Sentinel-1 accessibles via DEA ont été utilisées pour extraire les variables de rétrodiffusion. Les mosaïques sont générées à partir des acquisitions prétraitées (Ground Range Detected) à l'aide d'un algorithme de composition multitemporelle incluant calibration radiométrique, correction du bruit thermique et correction topographique avec le MNT Copernicus (CDSE). Les données sont combinées par une moyenne pondérée des pixels valides, éliminant les observations dans les zones d'ombre radar. Les mosaïques ont une résolution de 20 m et sont organisées sur une grille UTM de 100 X 100 km. Les 12 mosaïques mensuelles de 2024 ont été combinées pour constituer une image composite annuelle, à partir de laquelle les variables de rétrodiffusion VV et VH ont été extraites.

#### ▶ Sentinel-2 Geomedian annuel

Le produit Sentinel-2 Geomedian annuel 2024 de DEA a été utilisé pour extraire les valeurs de bande (red, green, blue, nir\_1, nir\_2, swir\_1, swir\_2) et les indices spectraux (MNDWI, TCW, NDVI, NDVI\_8A, MI, MVI). Il est dérivé des images multispectrales acquises par les satellites Sentinel-2A et 2B, offrant 13 bandes à une résolution de 10 à 60 mètres. Le Geomedian est calculé en prenant, pour chaque pixel, la médiane géométrique des valeurs de réflectance sur l'année, ce qui réduit l'impact des nuages, des ombres et des anomalies radiométriques. Cette approche permet de générer des mosaïques homogènes adaptées à la cartographie des écosystèmes côtiers.

#### ▶ Modèle numérique de terrain

Les données topographiques proviennent de la mission Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) menée par la NASA et la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). La mission a utilisé un radar en bande C et une antenne secondaire sur un mât de 60 m, permettant

#### ▶ Sentinel-1 monthly mosaic

Monthly Sentinel-1 mosaics accessible via DEA were used to extract backscatter variables. The mosaics are generated from preprocessed Ground Range Detected (GRD) acquisitions using a multitemporal composite algorithm that includes radiometric calibration, thermal noise correction, and topographic correction with the Copernicus DEM (CDSE). The data are combined by weighted average of valid pixels, eliminating observations in radar shadow areas. The mosaics have a resolution of 20 m and are arranged on a 100 x 100 km UTM grid. The 12 monthly mosaics for 2024 were combined to create an annual composite image, from which the VV and VH backscatter variables were extracted.

#### ▶ Sentinel-2 Geomedian annual

DEA's Sentinel-2 Geomedian 2024 annual product was used to extract band values (red, green, blue, nir\_1, nir\_2, swir\_1, swir\_2) and spectral indices (MNDWI, TCW, NDVI, NDVI\_8A, MI, MVI). It is derived from multispectral images acquired by the Sentinel-2A and 2B satellites, providing 13 bands at a resolution of 10 to 60 meters. The geomedian is calculated by taking, for each pixel, the geometric median of the reflectance values over the year, which reduces the impact of clouds, shadows, and radiometric anomalies. This approach allows for the generation of homogeneous mosaics suitable for mapping coastal ecosystems.

#### ▶ Digital elevation model

The topographic data comes from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), a joint project of NASA and the National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). The mission used a C-band radar and a secondary antenna on a 60-meter mast, enabling the simultaneous acquisition

l'acquisition simultanée de deux signaux radar sous des angles légèrement différents. Cette configuration a permis de produire un MNT quasi mondial à 1 arc-seconde (~30 m), couvrant 80% des terres émergées entre 60°N et 56°S. Le produit SRTM 1 Arc-Second Global, correspond à la version corrigée des zones de vide (void-filled) et a été utilisé, par DEA pour générer le produit dérivé dem\_srtm\_deriv avec GDALDEM pour le calcul de la pente et SAGA GIS pour les indices Multi-Resolution Valley Bottom Flatness (MrVBF) et Multi-Resolution Ridge Top Flatness (MrRTF), afin de mieux caractériser la morphologie du terrain.

#### ► Fraction de végétation verte

La fraction de végétation verte extraite provient du produit Fractional Cover (FC) annuel 2024 de DEA, dérivé des images Landsat Collection 2 Surface Reflectance à 30 m de résolution. L'algorithme FC, développé par le Joint Remote Sensing Research Program (JRSRP) et décrit dans Scarth et al. (2010), utilise un modèle de décomposition spectral calibré et validé sur des données de terrain. Dans cette étude, seule la fraction de végétation verte au percentile 50 (médiane) a été utilisée, après exclusion des zones d'eau et de nuages identifiées par la couche Water Observations from Space (DEA, WOfS).

## Approches testées

Afin de développer une approche simple et reproductible pour la cartographie des mangroves, la capacité discriminante des variables a d'abord été évaluée individuellement à l'aide de courbes Receiver Operating Characteristic (ROC), avant leur intégration dans un modèle Random Forest. Enfin, une comparaison des performances obtenues a permis d'identifier la combinaison la plus efficace pour la classification.

### ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ DISCRIMINANTE DES VARIABLES

Pour évaluer la capacité de chaque variable à distinguer les zones de mangroves des zones de non-mangroves, une analyse des courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) a été réalisée. Pour chaque variable, différentes valeurs seuils ont été testées afin d'établir une matrice de confusion comparant la classification obtenue aux données de référence. À partir de ces matrices, le taux de vrais positifs (TPR) et le taux de faux positifs (FPR) ont été calculés, permettant de tracer la courbe ROC.

$$TPR = TP / (TP + FN)$$

$$FPR = FP / (FP + TN)$$

of two radar signals at slightly different angles. This configuration produced a near-global DEM with a resolution of 1 arcsecond (~30 m), covering 80% of the Earth's landmass between 60°N and 56°S. The SRTM 1 Arc-Second Global product, which is void-filled, was used by DEA to generate the derivative product dem\_srtm\_deriv, with GDALDEM for slope calculation and SAGA GIS for the Multi-Resolution Valley Bottom Flatness (MrVBF) and Multi-Resolution Ridge Top Flatness (MrRTF) indices, to better characterize the terrain morphology.

#### ► Fraction of green vegetation

The extracted green vegetation fraction comes from the DEA's 2024 annual Fractional Cover (FC) product, derived from Landsat Collection 2 Surface Reflectance images at 30 m resolution. The FC algorithm, developed by the Joint Remote Sensing Research Program (JRSRP) and described in Scarth et al. (2010), uses a spectral decomposition model calibrated and validated on field data. In this study, only the 50th percentile (median) green vegetation fraction was used, after excluding areas of water and clouds identified by the Water Observations from Space (DEA, WOfS) layer.

## Tested Approaches

To develop a simple and reproducible approach for mangrove mapping, the discriminatory power of the variables was first individually evaluated using Receiver Operating Characteristic (ROC) curves before their integration into a Random Forest model. Finally, a comparison of the performance obtained allowed the identification of the most effective combination for classification.

### EVALUATION OF THE DISCRIMINATORY CAPACITY OF THE VARIABLES

To assess the ability of each variable to distinguish mangrove areas from non-mangrove areas, a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve analysis was performed. For each variable, different threshold values were tested to establish a confusion matrix comparing the resulting classification to reference data. From these matrices, the true positive rate (TPR) and false positive rate (FPR) were calculated, allowing the ROC curve to be plotted.

$$TPR = TP / (TP + FN)$$

$$FPR = FP / (FP + TN)$$



où TP (True Positives) correspond au nombre de pixels correctement identifiés comme mangroves, TN (True Negatives) au nombre de pixels correctement identifiés comme non-mangroves, FP (False Positives) aux pixels non-mangroves mal classés comme mangroves, et FN (False Negatives) aux mangroves mal classées comme non-mangroves.

L'aire sous la courbe (AUC) a été calculée ensuite pour quantifier la performance de chaque variable : une AUC proche de 1 indique que la variable distingue efficacement les pixels de mangrove des autres pixels, tandis qu'une AUC proche de 0,5 indique une discrimination équivalente au hasard. Le seuil optimal de classification a été déterminé à l'aide de l'index de Youden (Youden, 1950), défini par :

$$J = TPR - FPR$$

Le seuil correspondant à la valeur maximale de J maximise la capacité de la variable à discriminer les pixels de mangrove des pixels non-mangrove.

## RANDOM FOREST

Un classificateur Random Forest (RF) basé sur les pixels a été utilisé en raison de son efficacité démontrée dans la cartographie des écosystèmes de mangroves (Jhonnerie et al., 2015 ; Purwanto et al., 2023 ; Simarmata et al., 2024). Ce classificateur repose sur la méthode du bootstrap aggregation, qui combine les résultats de plusieurs arbres de décision construits à partir de sous-échantillons aléatoires des données d'entraînement. Cette approche permet de réduire le sur-apprentissage et d'accroître la robustesse du modèle face au bruit.

L'optimisation du modèle a reposé sur trois étapes principales :

- une analyse d'intercorrélation afin d'éliminer les variables redondantes ( $r > 0,9$ ) susceptibles d'introduire une multicollinéarité et de biaiser l'apprentissage ;
- l'évaluation de l'importance des variables selon leur contribution à la réduction de l'impureté de Gini, afin d'identifier celles jouant un rôle majeur dans la discrimination entre mangroves et non-mangroves ;
- un grid search pour tester différentes combinaisons d'hyperparamètres et retenir celle offrant les meilleures performances sur les données d'entraînement.

Le modèle a ensuite été évalué au moyen d'une validation croisée à cinq sous-ensembles (5-fold cross-validation), appliquée à la base de données d'entraînement. Celle-ci a été divisée en cinq parties égales afin d'estimer la stabilité et les performances internes du modèle.

where TP (True Positives) corresponds to the number of pixels correctly identified as mangroves, TN (True Negatives) to the number of pixels correctly identified as non-mangroves, FP (False Positives) to non-mangrove pixels misclassified as mangroves, and FN (False Negatives) to mangroves misclassified as non-mangroves.

The area under the curve (AUC) was then calculated to quantify the performance of each variable: an AUC close to 1 indicates that the variable effectively distinguishes mangrove pixels from other pixels, while an AUC close to 0.5 indicates discrimination equivalent to chance. The optimal classification threshold was determined using Youden's index (Youden, 1950), defined by :

$$J = TPR - FPR$$

The threshold corresponding to the maximum value of J maximizes the variable's ability to discriminate mangrove pixels from non-mangrove pixels.

## RANDOM FOREST

A pixel-based Random Forest (RF) classifier was used due to its proven effectiveness in mapping mangrove ecosystems (Jhonnerie et al., 2015; Purwanto et al., 2023; Simarmata et al., 2024). This classifier relies on bootstrap aggregation, which combines the results of multiple decision trees built from random subsamples of the training data. This approach reduces overfitting and increases the model's robustness to noise.

The model optimization was based on three main steps:

- an intercorrelation analysis to eliminate redundant variables ( $r > 0.9$ ) that could introduce multicollinearity and bias the learning;
- an assessment of the importance of variables based on their contribution to reducing Gini impurity, in order to identify those playing a major role in discriminating between mangroves and non-mangroves;
- a grid search to test different combinations of hyperparameters and select the one offering the best performance on the training data.

The model was then evaluated using a five-fold cross-validation applied to the training dataset. This dataset was divided into five equal parts to assess the model's stability and internal performance. In each iteration, four



À chaque itération, quatre sous-ensembles sont utilisés pour l'apprentissage et le cinquième pour la validation, de sorte que chaque sous-ensemble soit utilisé au moins une fois comme donnée de test.

## Comparaison des approches

Afin de comparer les performances de la classification par seuillage et de l'algorithme Random Forest, seules les variables présentant une AUC supérieure à 0,8 ont été retenues. Selon la règle empirique établie par Hosmer et Lemeshow (2000), ce seuil permet de ne conserver que les variables offrant une capacité de discrimination qualifiée d'« excellente ». Pour chacune de ces variables, une classification binaire par seuillage optimal a été réalisée sur les données de 2024, tandis que le modèle Random Forest a été appliqué sur les mêmes données. Les performances des classificateurs ont été évaluées à l'aide d'une base de données de validation indépendante, inconnue des modèles, en utilisant deux métriques principales issues de la matrice de confusion : la précision globale (Overall Accuracy, OA), qui indique la proportion de pixels correctement classés, et le F1-score, qui combine précision et rappel tout en pénalisant les fausses détections et les omissions.

## Évaluation de la stabilité temporelle de l'approche

Pour évaluer la stabilité temporelle de l'approche développée, le classificateur ayant présenté les meilleures performances lors de la validation indépendante a été appliqué aux données de l'année 2020. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés à 2 000 points de référence de mangroves issus de Global Mangrove Watch (GMW, 2020), plateforme de cartographie des mangroves à l'échelle mondiale. Cette comparaison vise à analyser la cohérence spatiale et la capacité de généralisation temporelle du modèle.

## Résultats

### Capacité discriminante des variables

La figure 3 présente les courbes ROC regroupées par groupes de variables : radar, indices de végétation, indices d'eau, indices topographiques et bandes spectrales.

Les variables issues des données radar ainsi que les indices de végétation et d'eau présentent les performances les plus élevées, tandis que les bandes spectrales optiques affichent des capacités discriminantes faibles. Les variables topographiques montrent des performances intermédiaires.

subsets were used for training and the fifth for validation, ensuring that each subset was used at least once as test data.

## Comparison of approaches

To compare the performance of threshold-based classification and the Random Forest algorithm, only variables with an AUC greater than 0.8 were retained. According to the rule of thumb established by Hosmer and Lemeshow (2000), this threshold ensures that only variables with «excellent» discriminatory power are kept. For each of these variables, binary classification using optimal thresholding was performed on the 2024 data, while the Random Forest model was applied to the same data. The classifiers' performance was evaluated using an independent validation database, unknown to the models, using two main metrics from the confusion matrix: Overall Accuracy (OA), which indicates the proportion of correctly classified pixels, and the F1 score, which combines accuracy and recall while penalizing false detections and omissions.

## Evaluation of the temporal stability of the approach

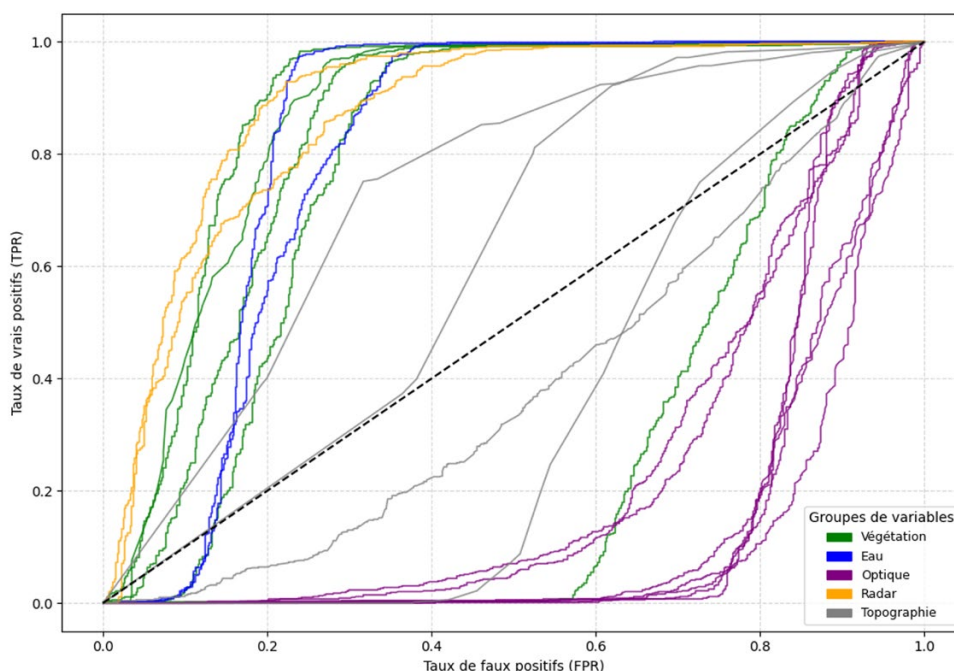
To assess the temporal stability of the developed approach, the classifier that demonstrated the best performance during independent validation was applied to the 2020 data. The results were then compared to 2,000 mangrove reference points from Global Mangrove Watch (GMW, 2020), a global mangrove mapping platform. This comparison aims to analyze the spatial consistency and temporal generalization capacity of the model.

## Results

### Discriminatory capacity of variables

Figure 3 presents the ROC curves grouped by variable: radar, vegetation indices, water indices, topographic indices, and spectral bands.

The variables derived from radar data, as well as the vegetation and water indices, exhibit the highest performance, while the optical spectral bands display low discriminatory capabilities. The topographic variables show intermediate performance.



**Figure 3 : Courbe ROC par groupe de variables**

Le tableau 2 synthétise les performances individuelles des variables classées par ordre décroissant de l'aire sous la courbe (AUC). La variable Sentinel-1 VH obtient la valeur d'AUC la plus élevée (0,897). Les variables Sentinel-1 VV, MVI et FC\_green\_veg\_p50 présentent également des AUC supérieures à 0,85. À l'inverse, l'indice MI et les bandes spectrales individuelles montrent des valeurs d'AUC inférieures à 0,3.

**Tableau 2 : AUC des variables testées**

Variables radar / Radar variables	AUC	Variables de végétation / Vegetation variables	AUC	Variables d'eau / Water variables	AUC	Variables topographiques / Topographic variables	AUC	Bandes spectrales / Spectral bands	AUC
Sentinel-1_vh	0,897	MVI	0,88	TCW	0,825	mrrtf	0,732	nir_1	0,247
Sentinel-1_vv	0,861	FC_green_veg_p50	0,865	MNDWI	0,792	mrvmf	0,615	nir_2	0,237
—	—	NDVI	0,829	—	—	slope	0,391	swir_1	0,161
—	—	NDVI_8A	0,778	—	—	élévation/elevation	0,347	swir_2	0,158
—	—	MI	0,265	—	—	—	—	green	0,137
—	—	—	—	—	—	—	—	blue	0,127
—	—	—	—	—	—	—	—	red	0,11

**Figure 3: ROC curve by variable group**

Table 2 summarizes the individual performance of the variables, ranked in descending order of area under the curve (AUC). The Sentinel-1 variable VH has the highest AUC value (0.897). The Sentinel-1 variables VV, MVI, and FC\_green\_veg\_p50 also have AUC values greater than 0.85. Conversely, the MI index and the individual spectral bands show AUC values less than 0.3.

**Table 2: AUC of the tested variables**

## Performance du modèle Random Forest

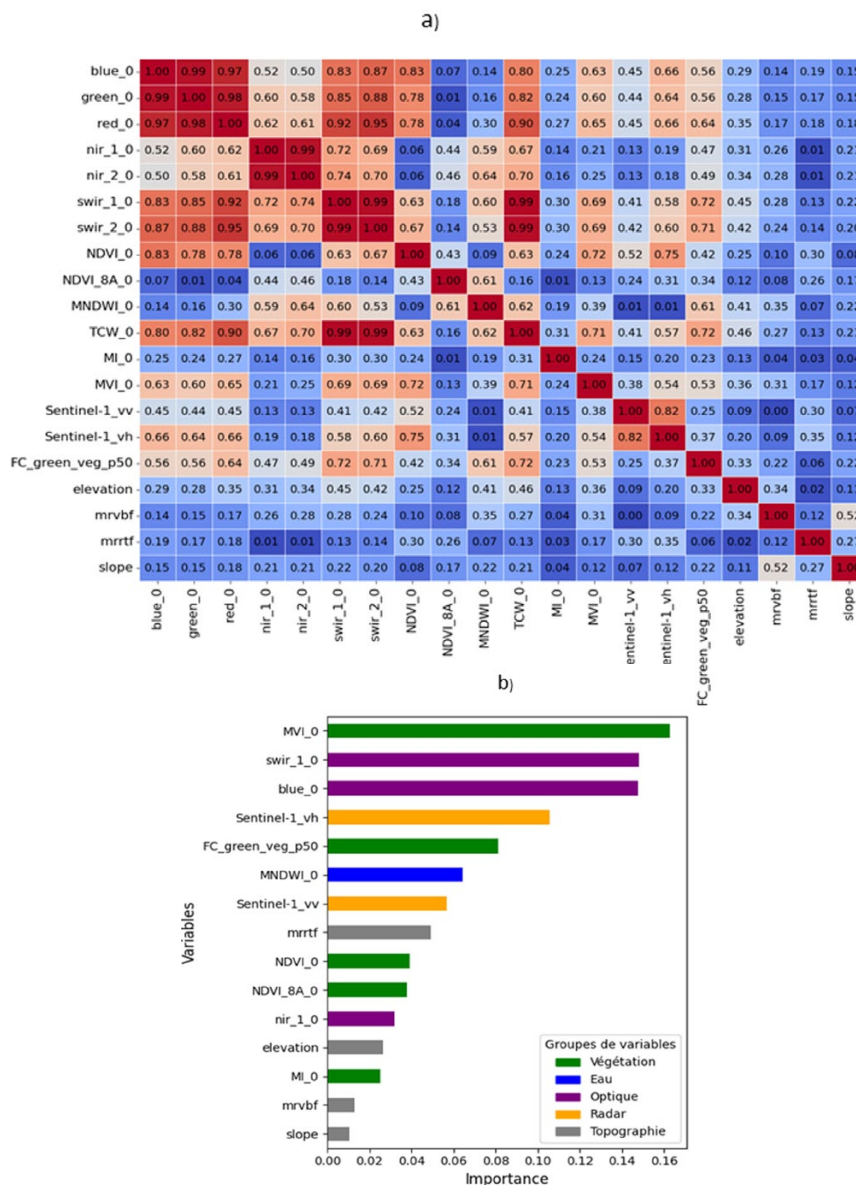
Après l'analyse d'intercorrélation, cinq (05) variables fortement corrélées (red, green, nir\_2, swir\_2 et TCW) ont été retirées, ramenant le nombre total de variables de 20 à 15 (figure 4a).

L'analyse de l'importance des variables (figure 4b) montre que le MVI contribue le plus à la classification. Certaines bandes optiques, malgré leur faible capacité discriminante lorsqu'elles sont considérées individuellement (swir\_1, blue), présentent également une contribution notable. Elles sont suivies des variables radar Sentinel-1 VH et VV.

## Performance of the Random Forest model

After the cross-correlation analysis, five (5) highly correlated variables (red, green, nir\_2, swir\_2, and TCW) were removed, reducing the total number of variables from 20 to 15 (Figure 4a).

The analysis of variable importance (Figure 4b) shows that MVI contributes the most to the classification. Certain optical bands, despite their low discriminatory capacity when considered individually (swir\_1, blue), also make a significant contribution. These are followed by the Sentinel-1 VH and VV radar variables.

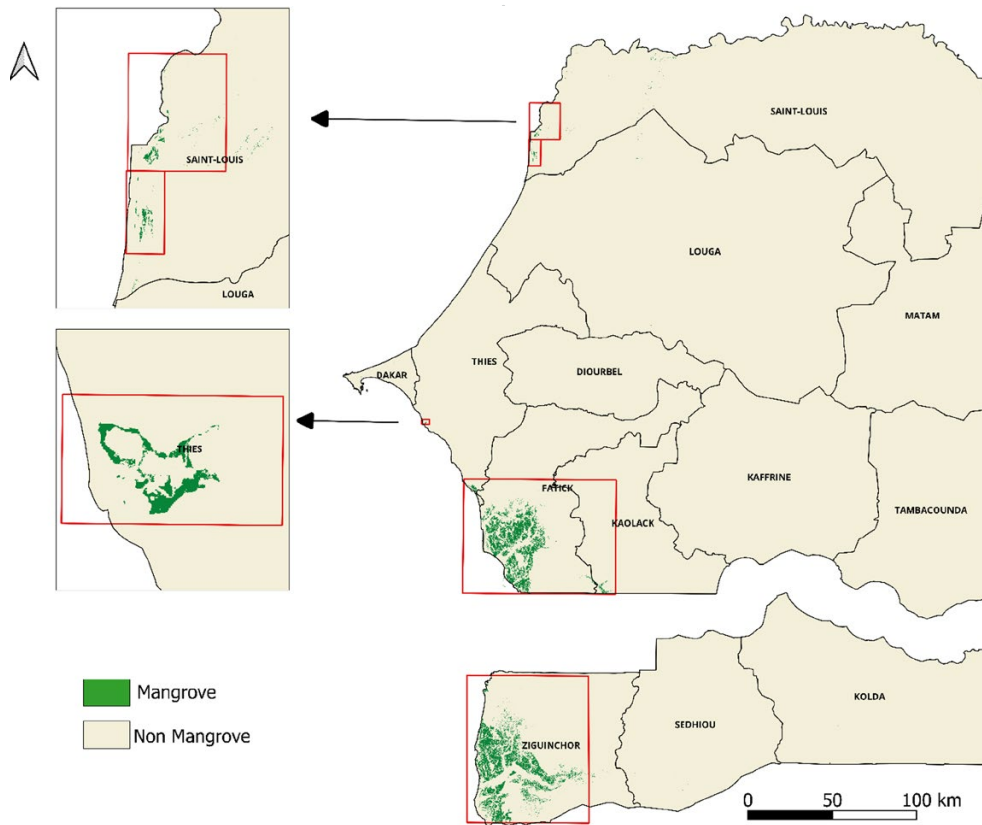


**Figure 4 : a) Matrice de corrélation, b) Importance des variables**

La validation croisée à cinq sous-ensembles indique une précision globale moyenne de 0,96. Le modèle final a permis de produire une cartographie des mangroves à 10 m de résolution pour l'année 2024 (figure 5) délimitant les principales zones de mangrove du Sénégal.

**Figure 4: a) Correlation matrix, b) Importance of variables**

Cross-validation across five subsets indicates an overall average accuracy of 0.96. The final model produced a 10 m resolution mangrove map for the year 2024 (Figure 5), delineating the main mangrove areas of Senegal.



**Figure 5: Prédiction des zones de mangrove avec le modèle Random Forest**

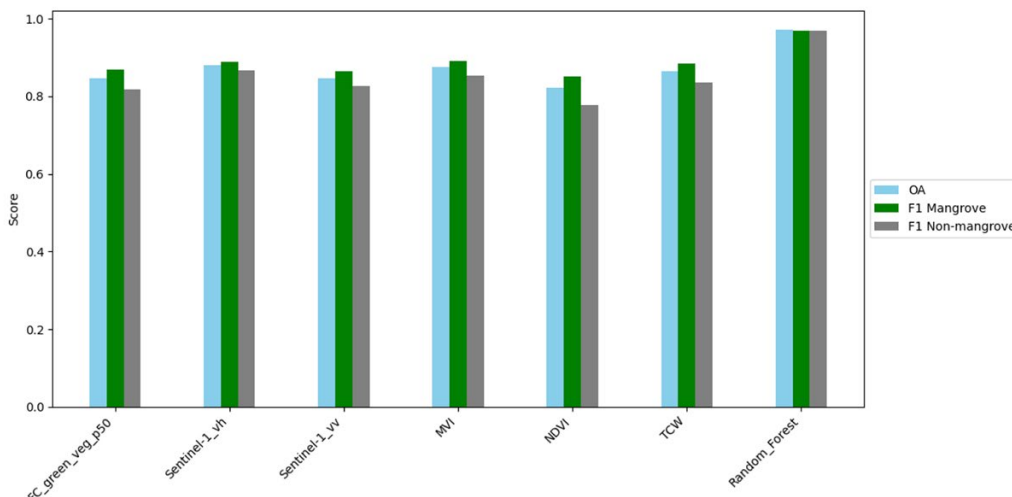
**Figure 5: Prediction of mangrove areas using the Random Forest model**

### Comparaison des performances

Le classificateur Random Forest obtient les meilleures performances, avec une précision globale de 0,97 et un F1-score de 0,97 pour les deux classes (figure 6).

### Performance Comparison

The Random Forest classifier achieves the best performance, with an overall accuracy of 0.97 and an F1-score of 0.97 for both classes (Figure 6).



**Figure 6: Comparaison OA et F1-score**

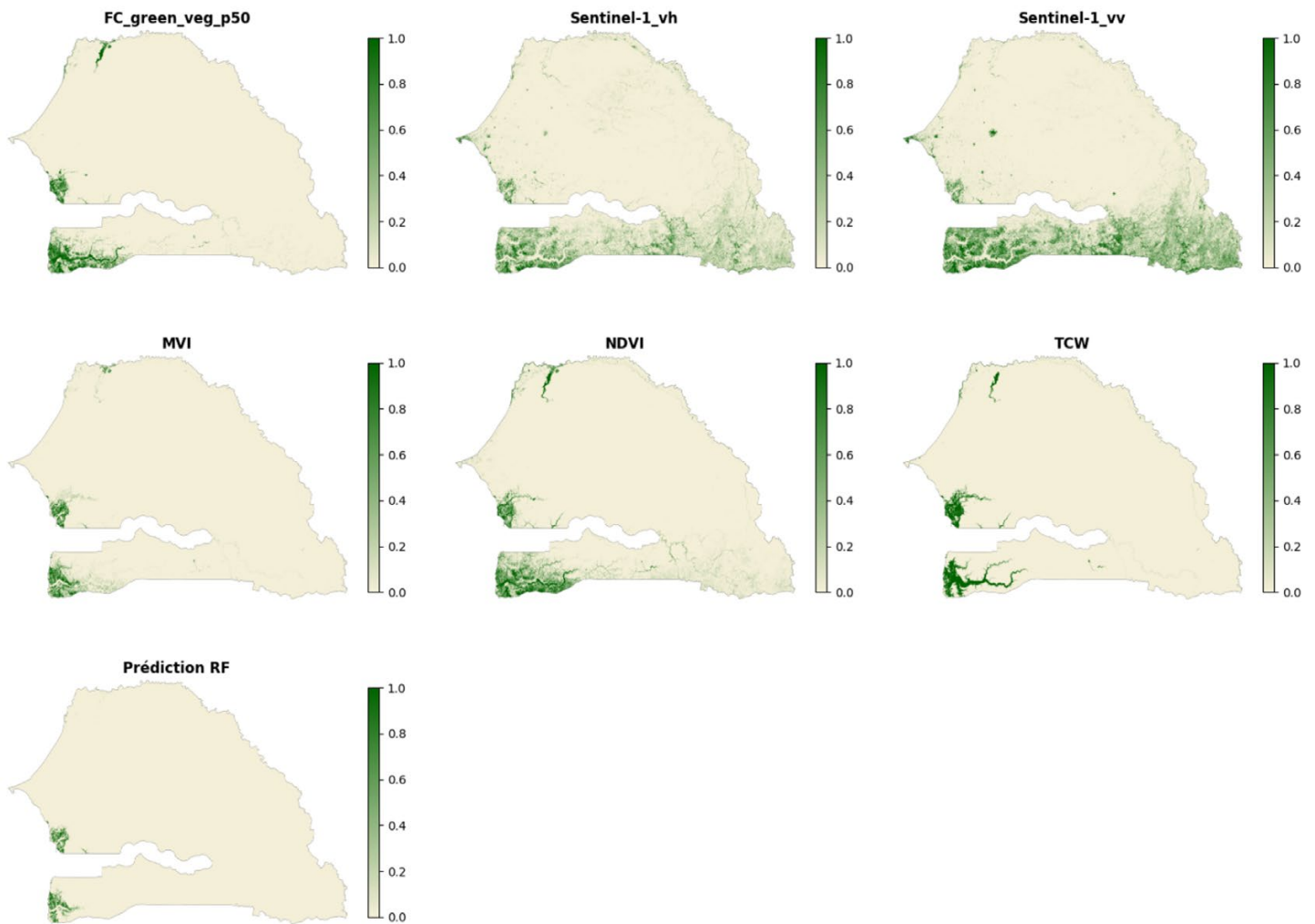
Les classifications par seuillage appliquées aux variables MVI, Sentinel-1 VH et TCW présentent également des performances élevées, mais inférieures à celles du modèle RF. La figure 7 met en évidence la réalité spatiale de ces différentes approches de classification

**Figure 6: OA and F1-score comparison**

Thresholding classifications applied to the variables MVI, Sentinel-1 VH, and TCW also show high performance, but lower than that of the RF model. Figure 7 highlights the spatial reality of these different classification

caractérisant des zones de mangrove surestimées à travers Sentinel-1 VV, Sentinel-1 VH et NDVI, et dans une moindre mesure avec TCW, FC\_green\_veg\_p50 et MVI.

approches, characterizing overestimated mangrove areas using Sentinel-1 VV, Sentinel-1 VH, and NDVI, and to a lesser extent with TCW, FC\_green\_veg\_p50, and MVI.



**Figure 7 : Prédications des différents modèles utilisés**

**Figure 7: Predictions from the different models used**

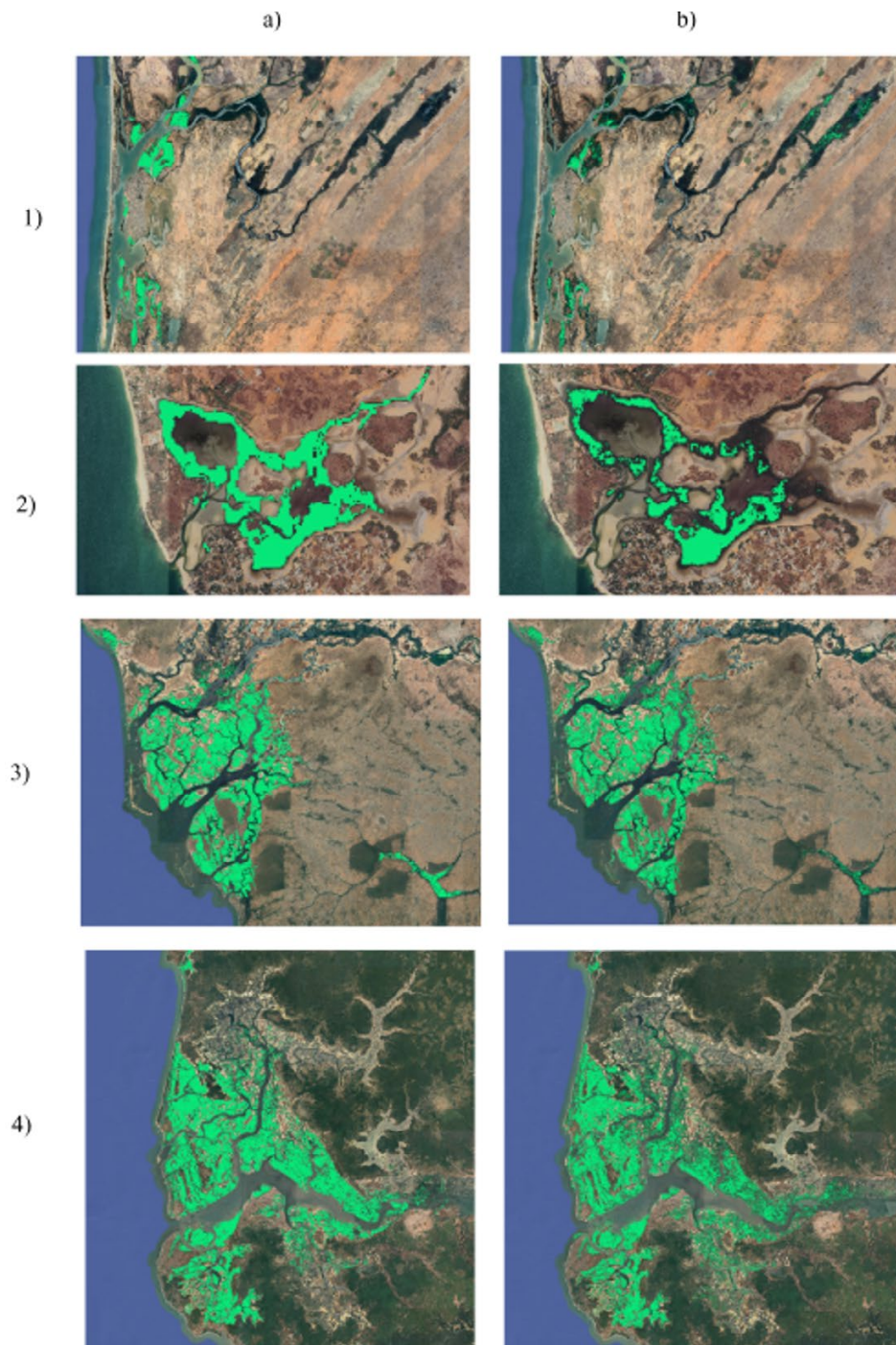
## Stabilité temporelle de l'approche Random Forest

Le modèle Random Forest, entraîné à partir des données de 2024, a été appliqué aux données de l'année 2020 afin de produire une carte des mangroves. Cette carte a ensuite été comparée au produit Global Mangrove Watch (GMW, 2020). La comparaison avec 2 000 points de référence du produit GMW montre une précision globale de 0,91, un F1-score de 0,95 témoignant d'une stabilité du modèle. Les résultats par site sont présentés à la figure 8.

## Temporal stability of the Random Forest approach

The Random Forest model, trained using 2024 data, was applied to 2020 data to produce a mangrove map. This map was then compared to the Global Mangrove Watch (GMW, 2020) product. Comparison with 2,000 reference points from the GMW product shows an overall accuracy of 0.91, with an F1 score of 0.95 indicating model stability. The results by site are presented in Figure 8.





**Figure 8 : Comparaison entre GMW 2020 et RF 2020. a): GMW 2020, b): RF 2020, 1: Saint-Louis, 2: Somone, 3: Iles du Saloum, 4: Basse Casamance**

## Discussions

Les résultats confirment le rôle central des données radar Sentinel-1 dans la discrimination des mangroves, en particulier la polarisation VH, dont la sensibilité à la structure verticale et à l'humidité des couverts végétaux explique les performances élevées observées. Ces résultats sont cohérents avec les travaux antérieurs montrant l'intérêt du radar pour la cartographie des

**Figure 8: Comparison between GMW 2020 and RF 2020. a): GMW 2020, b): RF 2020, 1: Saint-Louis, 2: Somone, 3: Saloum Islands, 4: Lower Casamance**

## Discussions

The results confirm the central role of Sentinel-1 radar data in mangrove discrimination, particularly VH polarization, whose sensitivity to vertical structure and canopy moisture explains the high performance observed. These results are consistent with previous work demonstrating the value of radar for mapping

mangroves dans des environnements côtiers soumis à une forte nébulosité (Maurya et al, 2021 ; Sharifi et al, 2022).

Les indices de végétation, notamment le MVI et le NDVI, présentent également une bonne capacité discriminante. Toutefois, la faible performance de l'indice MI, pourtant conçu spécifiquement pour les mangroves, suggère une sensibilité limitée aux conditions écologiques locales du littoral sénégalais ou à la présence de végétations inondées non mangroves.

L'intégration conjointe de variables radar, optiques et topographiques au sein du modèle Random Forest permet d'améliorer significativement la classification par rapport aux approches de seuillage univarié (Pham et al., 2019). Les contributions non négligeables de certaines bandes optiques, malgré leurs faibles performances individuelles, soulignent l'intérêt des interactions non linéaires capturées par le modèle.

Les confusions observées au nord du Lac de Guiers, liées à la présence de *Typha australis* (plante aquatique envahissante), illustrent les limites des approches fondées uniquement sur la signature spectrale ou structurale. Ces confusions persistent relativement dans le modèle RF, indiquant la nécessité d'intégrer des informations complémentaires, telles que des données phénologiques ou hydrologiques.

Enfin, l'évaluation temporelle montre que le modèle conserve de bonnes performances lorsqu'il est appliqué à une année antérieure sans ré-entraînement, malgré une légère baisse de la précision globale. Cette diminution peut être attribuée à des dynamiques spatio-temporelles des mangroves et à des changements environnementaux ou anthropiques. Néanmoins, la robustesse observée suggère que l'approche développée constitue un outil pertinent pour le suivi pluriannuel de la dynamique des mangroves au Sénégal.

## Conclusion

Cette étude a démontré la pertinence et la robustesse d'une approche géospatiale intégrée, combinant données multi-capteurs, apprentissage automatique et observations de terrain pour la détection et la surveillance des écosystèmes de mangrove sur le littoral sénégalais. En mobilisant les jeux de données ouvertes de Digital Earth Africa et les images Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat et SRTM, l'approche proposée offre une méthodologie harmonisée, automatisée et reproductible, adaptée aux conditions environnementales des zones côtières ouest-africaines.

Les résultats obtenus, avec une précision globale de 0,97 et un F1-score de 0,97 pour l'année 2024, confirment

mangroves in coastal environments subject to high cloud cover (Maurya et al., 2021; Sharifi et al., 2022).

Vegetation indices, notably the MVI and NDVI, also exhibit good discriminatory capacity. However, the poor performance of the MI index, despite being specifically designed for mangroves, suggests limited sensitivity to local ecological conditions along the Senegalese coast or to the presence of flooded non-mangrove vegetation. The combined integration of radar, optical, and topographic variables within the Random Forest model significantly improves classification compared to univariate thresholding approaches (Pham et al., 2019). The significant contributions of certain optical bands, despite their low individual performance, highlight the value of the nonlinear interactions captured by the model.

The confounding observed north of Lake Guiers, linked to the presence of *Typha australis* (an invasive aquatic plant), illustrates the limitations of approaches based solely on spectral or structural signatures. This confounding persists relatively well in the RF model, indicating the need to integrate complementary information, such as phenological or hydrological data.

Finally, the temporal evaluation shows that the model maintains good performance when applied to a previous year without retraining, despite a slight decrease in overall accuracy. This decrease can be attributed to spatiotemporal dynamics of the mangroves and to environmental or anthropogenic changes. Nevertheless, the observed robustness suggests that the developed approach constitutes a relevant tool for multi-year monitoring of mangrove dynamics in Senegal.

## Conclusion

This study demonstrated the relevance and robustness of an integrated geospatial approach, combining multi-sensor data, machine learning, and field observations for the detection and monitoring of mangrove ecosystems along the Senegalese coast. By leveraging open datasets from Digital Earth Africa and Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat, and SRTM imagery, the proposed approach offers a harmonized, automated, and reproducible methodology adapted to the environmental conditions of West African coastal areas.

The results obtained, with an overall accuracy of 0.97 and an F1 score of 0.97 for 2024, confirm the performance of the Random Forest model and the added value of combining radar and optical variables to effectively



la performance du modèle Random Forest et la valeur ajoutée de la combinaison des variables radar et optiques pour discriminer efficacement les mangroves des autres types de végétation. L'évaluation temporelle sur l'année 2020, comparée au produit de référence Global Mangrove Watch (GMW), a confirmé la stabilité et la transférabilité du modèle (Overall Accuracy = 0,91; F1 = 0,95), témoignant de sa capacité à être appliqué sur plusieurs années et à d'autres zones côtières de la région.

Au-delà des performances techniques, cette approche contribue à combler les lacunes méthodologiques souvent observées dans les travaux de cartographie des mangroves au Sénégal, en favorisant la standardisation des protocoles, la transparence des incertitudes et la répliquabilité des analyses. Elle constitue ainsi un outil opérationnel de suivi environnemental au service des décideurs, des gestionnaires de ressources côtières et des initiatives régionales, notamment dans le cadre de la mise en œuvre des Objectifs de développement durable (ODD 13, 14 et 15) et des Contributions Déterminées au niveau National (CDN).

Enfin, les perspectives de ce travail ouvrent la voie à une intégration accrue de l'intelligence artificielle et de l'observation de la Terre dans la gestion durable des zones côtières. L'enrichissement du modèle par des données à plus haute résolution, des séries temporelles longues et des observations in situ régulières, permettrait de mieux appréhender les dynamiques spatio-temporelles des mangroves et d'appuyer les politiques de conservation, de restauration et de résilience côtière face aux effets du changement climatique.

distinguish mangroves from other vegetation types. The temporal evaluation for 2020, compared to the Global Mangrove Watch (GMW) reference product, confirmed the stability and transferability of the model (Overall Accuracy = 0.91; F1 = 0.95), demonstrating its ability to be applied over several years and to other coastal areas in the region.

Beyond its technical performance, this approach helps to address the methodological gaps often observed in mangrove mapping work in Senegal by promoting the standardization of protocols, the transparency of uncertainties, and the replicability of analyses. It thus constitutes an operational environmental monitoring tool for decision-makers, coastal resource managers, and regional initiatives, particularly within the framework of the implementation of the Sustainable Development Goals (SDGs 13, 14, and 15) and the Nationally Determined Contributions (NDCs).

Finally, the prospects of this work pave the way for greater integration of artificial intelligence and Earth observation in the sustainable management of coastal areas. Enriching the model with higher-resolution data, long time series, and regular in-situ observations would allow for a better understanding of the spatio-temporal dynamics of mangroves and support policies for conservation, restoration, and coastal resilience in the face of the effects of climate change.

## Références

Andrieu, J., Cormier-Salem, M. C., Descroix, L., Sané, L., Diéye, E. L. B., Ndour, N., 2019. Correctly assessing forest change in a priority West African mangrove ecosystem: 1986–2010. An answer to Carney et al. (2014) paper "Assessing forest change in a priority West African mangrove ecosystem: 1986–2010." *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.12.001>

Andrieu, J., Mering, C., 2008. Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale ouest-africaine : Exemple des rivières du Sud du delta du Saloum au Rio Geba. *Teledetection*, 8(2), 93–118. <https://halshs-00388170>

Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., Tong, Q., 2014. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423–431. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434>

Baloloy, A. B., Blanco, A. C., Sta. Ana, R. R. C., Nadaoka, K., 2020. Development and application of a new Mangrove Vegetation Index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 95–117. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.001>

Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., Silliman, B. R., 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81, 169–193.



Bunting, P., Rosenqvist, A., Hilarides, L., Lucas, R. M., Thomas, N., Tadono, T., Worthington, T. A., Spalding, M., Murray, N. J., & Rebelo, L.-M., 2022. Global mangrove extent change 1996–2020: Global Mangrove Watch Version 3.0. Remote Sensing, 14(15), 3657. <https://doi.org/10.3390/rs14153657>

Carib Coast., 2024. Réalisation d'une cartographie de la distribution des écosystèmes de mangrove dans les Caraïbes par télédétection et caractérisation de leur rôle dans la protection contre l'érosion côtière. IRD.

[www.carib-coast.com/erosion-cotiere/etat-des-lieux-mangroves/cartographie-de-mangrove-par-teledetection-ird](http://www.carib-coast.com/erosion-cotiere/etat-des-lieux-mangroves/cartographie-de-mangrove-par-teledetection-ird)

Diagne, A. P., 1998. Cartographie d'évolution de la mangrove de Saint-Louis (effets de la sécheresse et impacts potentiels du barrage de Diama) (98 p., mémoire de maîtrise). Université Gaston Berger.

Dieye, E. H. B., Diaw, A. T., Sané, T., Ndour, N., 2013. Dynamique de la mangrove de l'estuaire du Saloum (Sénégal) entre 1972 et 2010. Cybergeog: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage.

<https://doi.org/10.4000/cybergeog.25671>

Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., Kanninen, M., 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. Nature Geoscience, 4(5), 293–297.

FAO., 2007. The world's mangroves 1980–2005. FAO Forestry Paper 153. Rome – FAO. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2008433305>

Giri, C., 2016. Observation and monitoring of mangrove forests using remote sensing: Opportunities and challenges. Remote Sensing, 8(9), 783. <https://doi.org/10.3390/rs8090783>

Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J., & Duke, N., 2010. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. Global Ecology and Biogeography.

Hosmer D. W., Lemeshow S., 2000. Applied Logistic Regression. Second Edition. New York, USA, John Wiley & Sons, 392 p.

Jhonnerie, R., Siregar, V. P., Nababan, B., Prasetyo, L. B., Wouthuyzen, S., 2015. Random forest classification for mangrove land cover mapping using Landsat 5 TM and ALOS PALSAR imageries. Procedia Environmental Sciences, 24, 215–221.

<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.028>

Leal, M., Spalding, M. D., 2022. The state of the world's mangroves 2022. Global Mangrove Alliance.

[www.mangrovealliance.org/wpcontent/uploads/2022/09/The-State-of-the-Worlds-Mangroves-Report\\_2022.pdf](http://www.mangrovealliance.org/wpcontent/uploads/2022/09/The-State-of-the-Worlds-Mangroves-Report_2022.pdf)

Li, Z., Han, Y., Chen, J. S., 2020. Exploring the capabilities of combining Sentinel-2 MSI data and high-resolution Google Earth imagery for mapping mangrove species. In The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B3-2020, Proceedings of the XXIV ISPRS Congress.

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1441-2020>

Lombard, F., 2023. Dynamiques spatio-temporelles de la mangrove du Sénégal : Caractérisation de la résilience des espèces végétales par la modélisation spatiale des processus biologiques [Thèse de géographie, Université Côte d'Azur].

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-04431000>

Maurya, K., Mahajan, S., Chaube, N., 2021. Remote sensing techniques: Mapping and monitoring of mangrove ecosystem—a review. Complex & Intelligent Systems, 7, 2797–2818. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00457-z>

Menendez, P., Losada, I. J., Torres-Ortega, S., Narayan, S., Beck, M. W., 2020. The global flood protection benefits of mangroves. Scientific Reports, 10, 4404.

Ndour, N., Dieng, S. D., Fall, M., 2011. Rôles des mangroves, modes et perspectives de gestion au Delta du Saloum (Sénégal). Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement. <https://doi.org/10.4000/vertigo.11515>

Pham, T. D., 2019. Mangrove species mapping using Sentinel-1 and Sentinel-2 data in North Vietnam. In IGARSS 2019 – 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. <https://doi.org/10.1109/igarss.2019.8898987>

Pham, T. D., Yokoya, N., Bui, D. T., Yoshino, K., Friess, D. A., 2019. Remote sensing approaches for monitoring mangrove species, structure, and biomass: Opportunities and challenges. Remote Sensing, 11(3), 230.

<https://doi.org/10.3390/rs11030230>

Pham, T. D., Yoshino, K., 2016. Impacts of mangrove management systems on mangrove changes in the Northern Coast of Vietnam. Tropics, 24, 141–151.



Polidoro, B. A., Carpenter, K. E., Collins, L., Duke, N. C., Ellison, A. M., Ellison, J. C., Farnsworth, E. J., et al., 2010. The loss of species: Mangrove extinction risk and geographic areas of global concern. PLoS ONE, 5.

Purwanto, A. D., Wikantika, K., Deliar, A., Darmawan, S., 2023. Decision tree and random forest classification algorithms for mangrove forest mapping in Sembilang National Park, Indonesia. Remote Sensing, 15(1), 16.

<https://doi.org/10.3390/rs15010016>

Roberts, D., Mueller, N., McIntyre, A., 2017. High-dimensional pixel composites from Earth observation time series. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55(11), 6254–6264. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2723896>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium, Greenbelt, 10–14 December, SP-351, 309–317.

Sarr, M.A., Gachon, P., Seidou, O., Bryant, C.R., Ndione, J., Comby, J., 2014. Inconsistent linear trends in Senegalese rainfall data indices from 1950 to 2007. Hydrological Sciences Journal, 60(9), 1538–1549.

<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.926364>

Sarr, M.A., Zorome, M., Seidou, O., Bryant, C.R., Gachon, P., 2013. Recent trends in selected extreme precipitation indices in Senegal – a change-point approach. J. Hydrol. 505, 326–334.

Sharifi, A., Felegari, S., Tariq, A., 2022. Mangrove forests mapping using Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite images. Arab Journal of Geosciences, 15, 1593. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10867-z>

Simarmata, N., Wikantika, K., Darmawan, S., Harto, A. B., Sakti, A. D., Santo, A. A., 2024. Mangrove ecosystem species mapping from integrated Sentinel-2 imagery and field spectral data using random forest algorithm. Journal of Applied Remote Sensing, 18(1), 014509. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.18.014509>

Wang, L., Jia, M., Yin, D., & Tian, J., 2019. A review of remote sensing for mangrove forests: 1956–2018. Remote Sensing of Environment, 231, 111223. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111223>

Wolanski, E., Brinson, M. M., Cahoon, D. R., Perillo, G. M. E., 2009. Coastal wetlands: An integrated ecosystem approach (1st ed.). Elsevier.

Xu, H., 2006. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14), 3025–3033.

<https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Youden, W. J., 1950. Index for rating diagnostic tests. Cancer, 3, 32–35.

Zu Ermgassen, P. S., Mukherjee, N., Worthington, T. A., Acosta, A., da Rocha Araujo, A. R., Beitzel, C. M., Castellanos-Galindo, G. A., et al., 2020. Fishers who rely on mangroves: Modelling and mapping the global intensity of mangrove-associated fisheries. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 247, 106975.

