

# Estimation du carbone de la mangrove de la Réserve de Biosphère du Delta du Saloum (RBDS) à partir des données d'observation de la terre

---

**Moussa SOW**

[moussa.sow@ussein.edu.sn](mailto:moussa.sow@ussein.edu.sn),

Université du Sine Saloum El-Hâdj Ibrahima NIASS

**Labaly TOURE**

[labaly.toure@ussein.edu.sn](mailto:labaly.toure@ussein.edu.sn),

Université du Sine Saloum El-Hâdj Ibrahima NIASS, Sénégal

**El Hadji SOW**

[elhadji.sow@ugb.edu.sn](mailto:elhadji.sow@ugb.edu.sn),

Laboratoire Leïdi « Dynamiques des Territoires et Développement », Université Gaston Berger, Saint-Louis, Sénégal, UFR des Lettres et Sciences Humaines, Département de Géographie

## Résumé

Depuis les années 70, le changement climatique est devenu un phénomène qui s'accroît de jour en jour et qui est perçu dans les différentes parties du monde. Pour l'atténuer, les ressources forestières jouent un grand rôle en captant environ 30 % du CO<sub>2</sub> émis par les activités humaines. Écosystème aux multiples fonctions et services écosystémiques, la mangrove est une ressource assez particulière qui participe à la séquestration du carbone atmosphérique. L'objectif de ce travail a été d'utiliser les données d'observation de la terre et les techniques de télédétection pour estimer le carbone de la mangrove de la réserve de biosphère du Saloum en 1984, 2002 et 2022.

Il apparaît que les données Landsat permettent d'évaluer la capacité de séquestration du carbone de la mangrove. Ainsi, le carbone séquestré de la mangrove du delta du Saloum est passé de 3,29 Ton/ha en 1984 à 6,87 Ton/ha en 2002 à 3,23 Ton/ha en 2022. Les résultats obtenus traduisent une variation irrégulière du carbone séquestré à l'hectare, ce qui peut s'expliquer par différents éléments : l'âge et le type de mangrove et le niveau de pollution de l'atmosphère. Il serait important de comparer les résultats obtenus par télédétection avec les techniques d'évaluation du carbone au sol.

**Mots-clés** : Saloum, stock de carbone, séquestration de CO<sub>2</sub>, mangrove, télédétection

## Estimation of the carbon of the mangrove of the Saloum delta biosphere reserve (RBDS) from earth observation data

### Abstract

Since the 70s, climate change has become increasingly pronounced and is being felt in different parts of the world. To cope with this situation, forest resources play an important role by capturing around 30% of the CO<sub>2</sub> emitted by human activities. An ecosystem with multiple functions and ecosystem services, the mangrove is a rather special resource that contributes to the sequestration of atmospheric carbon. The aim of this study was to use earth observation data and remote sensing techniques to estimate the mangrove content of carbon in 1984, 2002 and 2022 in the Saloum reserve.

The results show that Landsat data can be used to assess the mangrove's carbon sequestration capacity. Thus, the carbon sequestered in the mangrove of the Saloum delta went from 3.29 Ton/ha in 1984 to 6.87 Ton/ha in 2002 to 3.23 Ton/ha in 2022. The results show an irregular variation pattern in sequestered carbon per hectare, which can be explained by various factors: the age and type of mangrove and the level of atmospheric pollution. It would be important to compare the results obtained by remote sensing with ground-based carbon assessment techniques.

**Keywords**: Saloum, carbon stock, CO<sub>2</sub> sequestration, mangrove, remote sensing

## Introduction

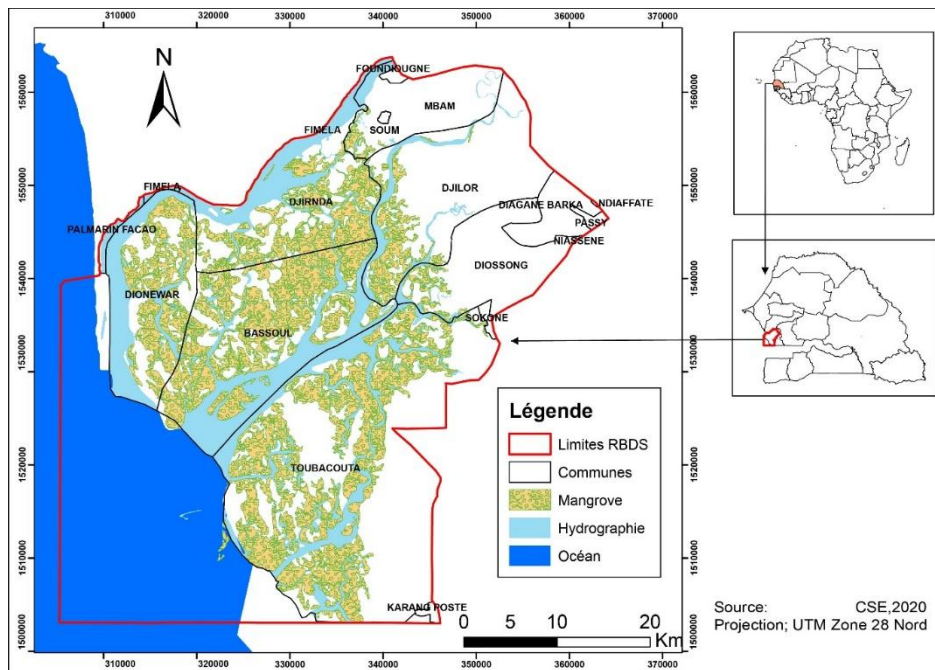
Les récentes évolutions du climat mondial attestent du caractère évolutif et non statique du climat qui connaît ainsi une succession d'épisodes chauds/froids et humides/secs (Nouaceur, 2020, p.1). Ces changements sont alors imputés à l'importance des émissions de gaz à effet de serre (GES) et aux nouveaux modes d'utilisation de la terre (Saïdou, 2012, p.2). Présente dans l'atmosphère, la concentration dans l'atmosphère de certains gaz s'accroît du fait des activités humaines. Cette situation est à l'origine du réchauffement de la planète noté ces dernières années. L'impact de la variabilité climatique est perçu au niveau socioéconomique dans les différentes parties du monde (Bilal, A. et Känzig, 2024, p. 26). Dès lors, il est nécessaire de mettre en place des alternatives permettant de réduire la concentration des GES dans l'atmosphère (Dembele *et al.*, 2023, p. 282). Les écosystèmes forestiers, en général, ont une très grande capacité de séquestration du carbone (Stavi *et al.*, 2013, p. 11) en ce sens qu'ils peuvent capter environ 30 % du CO<sub>2</sub> émis par les activités de l'homme (GIEC, 2021, p. 33). Localisée dans les régions tropicale et subtropicale, la mangrove occupe une place particulière en raison de son fort potentiel.

Dès lors, s'étendant sur 1 % des forêts tropicales (FAO, 2007, p. 1), la mangrove est une ressource naturelle assez singulière au regard des innombrables services écosystémiques et fonctions écologiques qu'elle assure pour les hommes. Elle se développe dans la zone de transition entre la mer et la terre (E. Sow, 2019, p. 19) avec une très grande sensibilité à la température (isotherme 24 °C) et à l'aridité (P. Saenger, 1998 in F. S. Lang *et al.*, 2014, p. 423).

Cette singularité de la mangrove se dénote de par sa capacité à façonner de microclimats locaux qui jouxte la fourniture de biens et services (N. Ndour *et al.*, 2012, p. 6 ; F. Folega *et al.*, 2017, p. 33) qui participent aux maintiens des équilibres naturels. De plus, le potentiel économique de la mangrove est estimé entre 200 000 et 900 000 dollars/km<sup>2</sup>/an (UNEP-WCMC, 2007 in E. Sow, 2019, p. 19). Ceci est similaire à toutes les régions du monde où la mangrove est présente. A l'échelle du globe, il est recensé environ 15 millions d'hectares de mangrove (FAO, 2007, p. 1). Ces derniers sont constitués par environ 69 espèces (N. C. Duke, 1992, p. 70) qui sont localisées sur tous les continents à l'exception de l'Europe (E. Bocquet, 2018, p. 2).

Le cadre géographique de cette étude, la réserve de biosphère du delta du Saloum, est une région côtière localisée dans le centre ouest du Sénégal. Elle s'étend entre les latitudes 13° 35 et 14° 15 nord et entre 16° 03 et 16° 50 ouest et couvre les régions naturelles du Sine et du Saloum (Figure 1). D'une superficie de 234 000 ha et créée en 1981, c'est un espace peuplé d'écosystèmes naturels, ce qui en fait une zone humide à part entière, avec les potentialités qui y sont associées. L'établissement de cette aire permet de favoriser la conservation et la restauration des formations de mangrove, d'instaurer des périodes de repos biologique pour les espèces exploitées, et de protéger les côtes par le reboisement (N. Ndour *et al.*, 2012, p. 8).

Au niveau topographique, la faiblesse des altitudes (moins de 40 m) et des pentes y est assez marquée ; ce qui explique la récurrence des incursions marines sur les côtes (E. B. Dieye *et al.*)



**Figure 1** : localisation de la réserve de biosphère du Delta du Saloum.

*l.*, 2013, p. 3). Cette faiblesse des altitudes permet ainsi le développement du patrimoine naturel, particulièrement la biodiversité (Diouf et *al.* 2021, p. 2) qui y est assez diversifié en raison des conditions climatiques stables. Le delta du Saloum est à cheval entre les zones soudano-guinéenne et sahélo-soudanienne, se traduisant au niveau de la phytogéographie, par l'existence d'une végétation submersible à l'image de la mangrove et d'une végétation non submersible comme la savane arbustive à boiser. Cette variété de la végétation est rendue possible par des totaux pluviométriques annuels qui sont compris entre 500 et 1000 mm (E. Sow, 2019, p. 5).

Par ailleurs, la mangrove de la réserve de biosphère du Delta du Saloum contribue à la séquestration du carbone à l'image des autres formations végétales. R. M. Deugue-Namboma (2008, p. 37) évalue le potentiel de séquestration de la mangrove à 1,936 tonnes en deux ans (N. Ndour et *al.*, 2011, p. 6). Toutefois, rares sont les études qui abordent la capacité de piégeage du carbone des mangroves de manière générale et de celles du Delta du Saloum en particulier à travers les données d'observation de la terre.

Cette situation rend assez complexes les négociations pour la gestion de l'environnement avec les Conférences des Parties (COP) en raison du manque de connaissance sur les écosystèmes naturels, en particulier la mangrove. De plus, la plupart des travaux existants ont utilisé des méthodes allométriques pour l'étude du carbone des écosystèmes. Aujourd'hui, avec les opportunités de la télédétection, il est nécessaire de trouver des alternatives à ces méthodes fastidieuses et coûteuses.

C'est dans cette logique que ce travail cherche à estimer la capacité de stockage de carbone de la mangrove de la réserve de biosphère du delta du Saloum à partir des données d'observation. De manière spécifique, il s'agit (i) d'analyser et d'évaluer l'état de l'indice de végétation de la mangrove (ii) d'étudier la biomasse qu'elle contient et (iii) d'estimer la quantité de carbone qu'elle stocke. L'estimation du carbone par satellite est une approche assez nouvelle qui vise à apporter des connaissances scientifiques à l'évaluation des contributions écologiques de l'écosystème de

mangrove. Pour l'atteinte des objectifs de l'étude, différentes méthodes ont été appliquées aux données satellitaires.

## I. Matériels et Méthodes

### 1. Données

Les images des différents capteurs de Landsat ont été utilisées dans le cadre de cette étude. Elles ont été obtenues sur la plateforme USGS (United States Geological Survey <http://earthexplorer.usgs.gov/>). L'approche diachronique de ce travail impose d'avoir des images de différentes dates (Tableau 1). Ces données permettront de calculer l'indice de végétation de la période, d'évaluer la dynamique de la mangrove, d'estimer la biomasse et, enfin, de quantifier le carbone contenu dans la mangrove.

**Tableau 1 : données utilisées**

Capteurs	Résolution	Projection	Dates
Landsat 5 TM	30 m	UTM WGS 84 zone 28 N	17/10/1984
Landsat 7 ETM+	30 m	UTM WGS 84 zone 28 N	25/09/2002
Landsat 8 OLI	30 m	UTM WGS 84 zone 28 N	25/10/2022

### 2. Logiciels

Différents logiciels ont été utilisés dans ce travail pour atteindre les objectifs définis :

- Envi 5.3 : Pour le prétraitement numérique des images satellites afin d'obtenir l'occupation du sol de la zone d'étude ;
- ArcGIS 10.8 : Pour le traitement cartographique, les calculs sur les bandes et la visualisation des résultats.
- R Studio : Pour les traitements statistiques des données.

### 3. Méthodes

L'estimation du stock de carbone suit une succession d'étapes rigoureuses qui sont les suivantes.

#### a) Conversion des DN en réflectance

Les images Landsat sont converties en réflectance en utilisant des constantes qui sont données dans les métadonnées. Il est recommandé de les convertir des comptes numériques (DN) en radiance à travers la formule suivante :

$$\rho\lambda' = MpQcal + Ap$$

Où :  $\rho\lambda'$  est la réflectance sans la sun élévation ;  $Mp$  = facteur de remise à l'échelle multiplicative spécifique ;  $Ap$  = Facteur de remise à l'échelle additive spécifique disponible dans les métadonnées.

À la suite, il faut convertir en réflectance en intégrant la valeur de Sun élévation par l'équation suivante :

$$\rho\lambda' = \frac{\rho\lambda'}{\cos(OSZ)} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(OSE)}$$

Où :  $\rho\lambda'$  : Réflectance ; OSE : Sun élévation local ; OSZ : local l'angle zénithal du soleil ;  $OSZ = 90^\circ - \theta SE$ .

### **b) Calcul de l'indice végétation**

La couverture de la végétation terrestre est estimée à travers l'indice de végétation normalisé (NDVI) qui est obtenu par la formulation suivant :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Les valeurs de NDVI s'étendent de -1 à 1. Les valeurs négatives renvoient à l'eau, aux roches, à la neige, etc. Les valeurs positives tendant vers 1 correspondent à la végétation et celles autour de 0 concernent les sols nus (A. M. T. Arfa et al., 2019, p. 11).

### **c) Classification d'images et extraction des couches de mangrove**

Dans cette partie, il s'agit d'extraire les couches représentatives de la mangrove des images classifiées par l'algorithme du « Maximum likelihood ». Les images Landsat ont été classifiées pour ressortir l'état de l'occupation du sol de la RBDS en 1984, 2002 et 2022 sur la base d'une composition colorée de type fausse couleur. Cet algorithme permet de différencier la mangrove des autres classes. La classification ainsi produite est convertie en format vecteur pour en extraire la mangrove à partir de requête spatiale, avec Arcmap. Il s'agit de processus de sélection attributaire des couches de mangrove. Les différentes couches spatio-temporelles des mangroves ont été utilisées pour affiner l'analyse du NDVI, de la biomasse et du stock de carbone.

### **d) Estimation de la biomasse sur le sol (ABG, Above Ground Biomass)**

L'estimation de la biomasse sur le sol est basée sur la corrélation du NDVI et l'ABG. L'ABG correspond à la biomasse aérienne contenue dans les tiges, écorces, branches et les brindilles. Il en résulte un coefficient de 0,787 et une équation de corrélation formulée par C. S. et al. (2015) :

$$ABG = 305,9 * NDVI^{4,864}$$

Où NDVI : Indice de végétation normalisé ; ABG : Above Ground Biomass (Ton ha<sup>-1</sup>)

### **e) Estimation de la biomasse souterraine (BGB, Below Ground Biomass)**

La biomasse souterraine correspond à cette portion de biomasse qui est contenue dans les racines des plantes. Elle est non négligeable dans l'estimation de la biomasse, car pouvant représenter entre 20 et 26 % de la biomasse totale (D. Santantonio et al. 1977, p. 2). Elle est déduite de l'ABG par la formule de M. Cairns et al., (1997) (B. Tamilselvan et al., 2021, p. 5) :

$$BGB = \exp(-1,0587 + 0,8836 * \ln(ABG))$$

Où : ABG : Above Ground Biomass (Ton ha<sup>-1</sup>); BGB : Below Ground Biomass (Ton ha<sup>-1</sup>).

### **f) Calcul du total de biomasse accumulée (TAC)**

La biomasse totale est calculée par l'addition de la biomasse aérienne (ABG) et de la biomasse souterraine (BGB). Elle est donnée par la formule suivante :

$$TAC = ABG + BGB$$

TAB = biomasse totale accumulée (ton ha<sup>-1</sup>) ou Total Accumulated Biomass.

### **g) Estimation de la quantité totale de stock de carbone (TCS)**

L'estimation du stock de carbone totale est obtenue par la formule de Westlake (1963) suivante (A. W Hastuti et al., 2017, p. 5) :

$$TCS = TAC * \% C\ organic$$

TCS : Stock total de carbone (Ton ha<sup>-1</sup>) ; TAB : biomasse totale accumulée (ton ha<sup>-1</sup>) ; % C Organic : 0,475 (47,5 % biomasse, GIEC in G. Bindu (2017, p. 3). Il est possible de déterminer le carbone à partir de la biomasse, étant donné qu'entre 47,5 et 50 % de la biomasse est constituée de Carbone (E. Paladinic *et al.* 2009, p.7).

#### **h) Calcul de la quantité de carbone séquestré**

Pour obtenir les quantités de carbone séquestrées, il est recommandé de convertir les stocks de carbone afin d'exprimer de manière cohérente l'impact de ces stocks sur le cycle de carbone atmosphériques. Ainsi, pour convertir le carbone en CO<sub>2</sub> équivalent, on multiplie la quantité de carbone par le résultat du rapport entre la masse molaire du CO<sub>2</sub> et celle du carbone, soit environ 3,67 (44/12 ≈ 3,67) (S. Aljenaid *et al.*, 2022, p. 5). Cette opération est donnée par la formule ci-dessous (GIEC, 2001) :

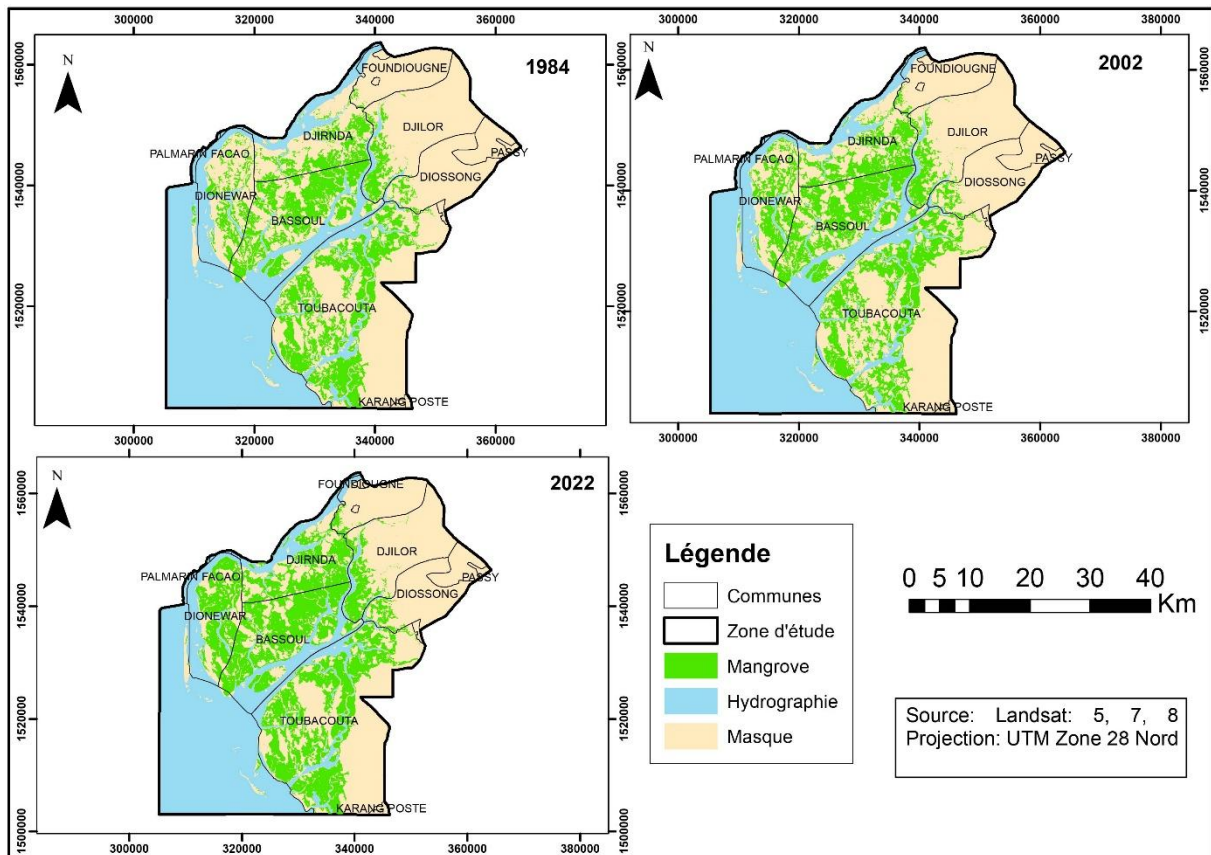
$$ACS = 3,67 * TCS$$

Où : ACS : montant de carbone séquestré (Ton ha<sup>-1</sup>) ; TCS : Stock total de carbone (Ton ha<sup>-1</sup>).

## **II. Résultats**

### **1. Cartographie de la mangrove**

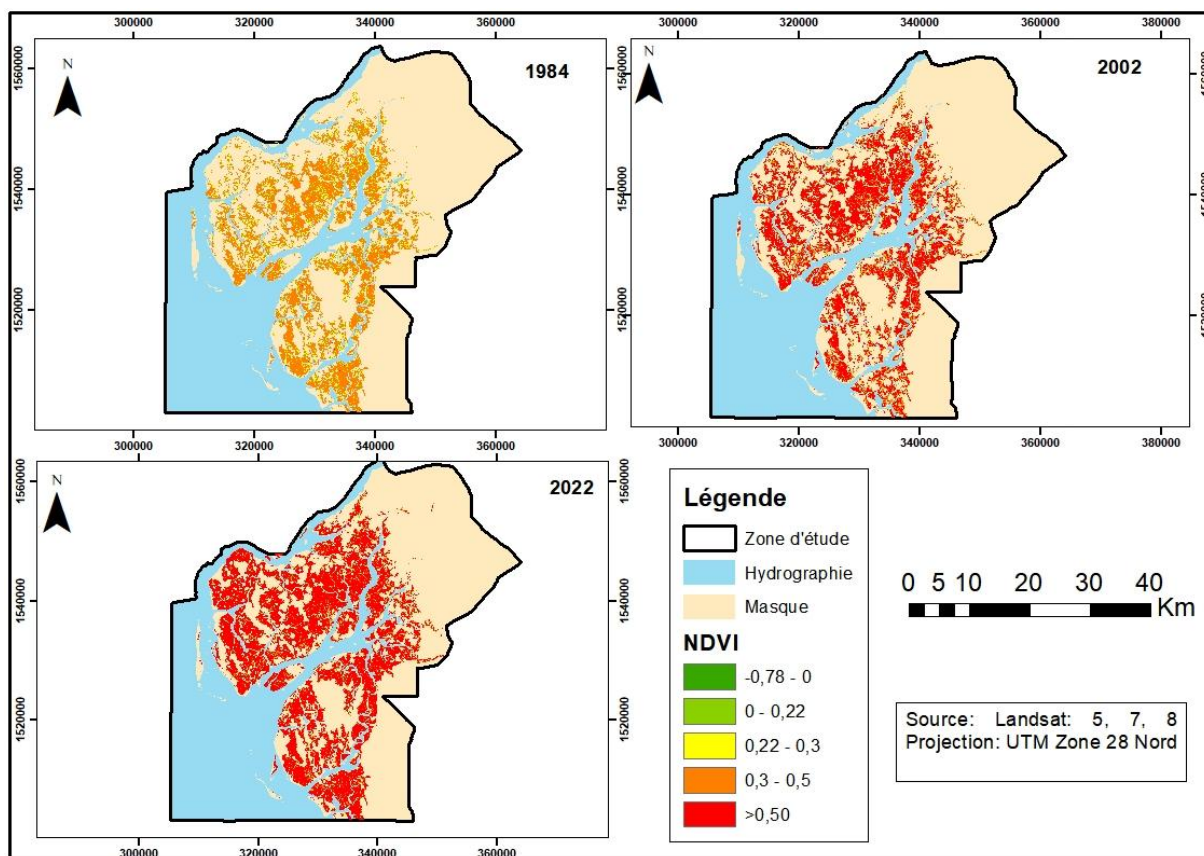
L'extraction des couches de mangrove a été faite et les résultats cartographiques sont donnés dans la figure 2. Les résultats obtenus traduisent une croissance de la mangrove qui passe de 44 081,07 ha, soit 18,81 % en 1984, à 47 252,74 ha, soit 20,17 % de la surface de la réserve en 2002, et à 59 298 ha, soit environ 25,31 % de la superficie totale en 2022. Cette évolution ne suit pas une direction précise, mais s'effectue principalement sur les vasières, dans la zone soumise aux balancements des marées. Ainsi, les résultats de la cartographie de la mangrove sont utilisés pour estimer le NDVI de la mangrove.



**Figure 2 :** Cartographie diachronique de la mangrove de la RBDS.

## 2. Dynamique de l'indice de végétation normalisée dans la RBDS

La figure 3 montre la spatialisation du NDVI à l'échelle de la RBDS en 1984, 2002 et 2022.



**Figure 3** : spatialisation du NDVI en 1984, 2002 et 2022.

En 1984, la cartographie du NDVI a révélé des valeurs allant de -0,70 à 0,93. En 2002, les valeurs se situaient entre -0,31 et 0,63, tandis qu'en 2022, elles sont comprises entre -0,12 et 0,63 (Tableau 2). Au niveau spatial, les valeurs les plus courantes sont comprises entre 0,25 et 0,36, ce qui est en accord avec les faiblesses des superficies de mangrove. La quasi-totalité de la mangrove a des valeurs comprises entre 0,32 et 0,63, ce qui traduit une certaine amélioration de la santé de la mangrove par rapport à 1984. En 2022, les valeurs maximales observées traduisent une baisse de 0,12 par rapport à 2002, et de 0,42 entre 1984 et 2022.

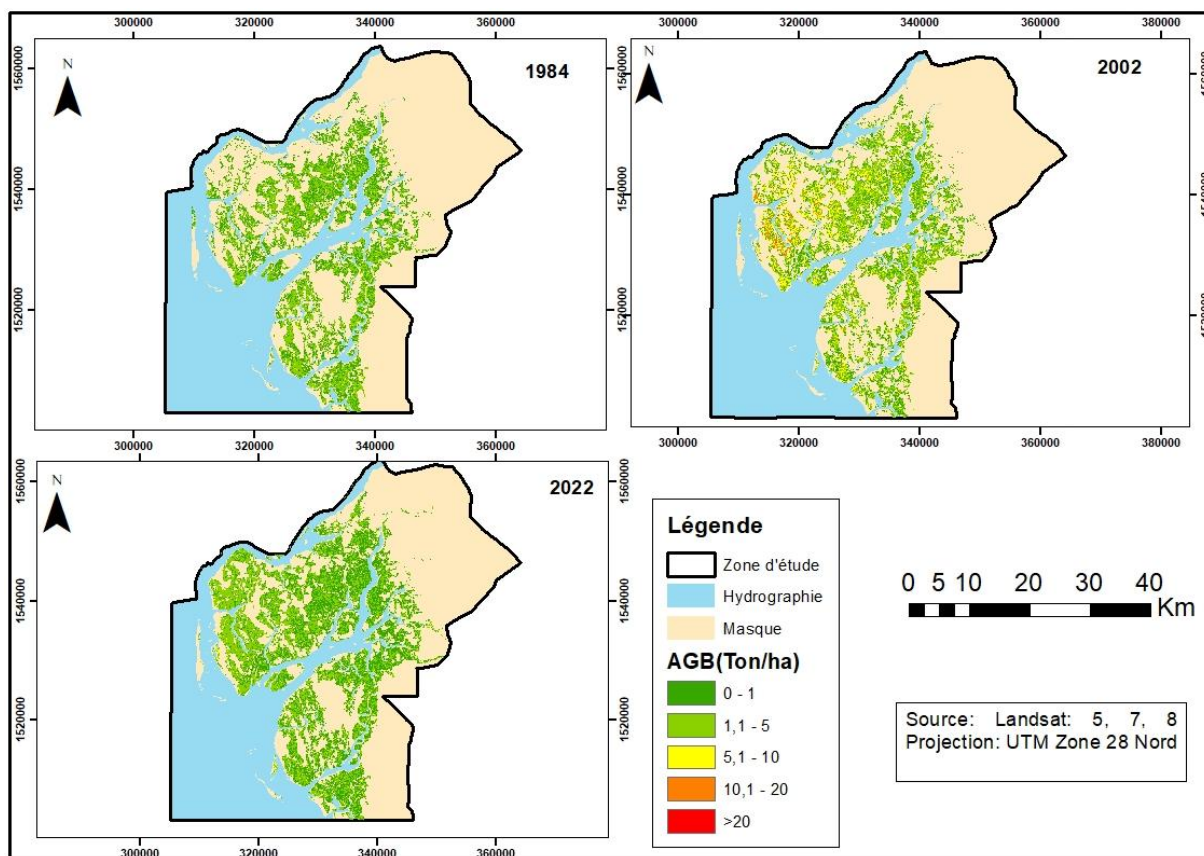
Cette NDVI est un bon indicateur de la santé de la végétation surtout celle de la mangrove, mais elle est aussi autant utilisée pour la prédiction de la biomasse.

**Tableau 2** : Statistiques descriptives du NDVI en 1984, 2002 et 2022.

Année	Min	Max	Moyenne
1984	-0,70	0,93	0,30
2002	-0,31	0,63	0,33
2022	-0,12	0,51	0,30

### 3. Estimation de la biomasse aérienne

La biomasse aérienne de la mangrove de la RBDS a été cartographiée pour la période allant de 1984 à 2002 (Figure 4).



**Figure 4 :** Spatialisation de la biomasse aérienne (AGB).

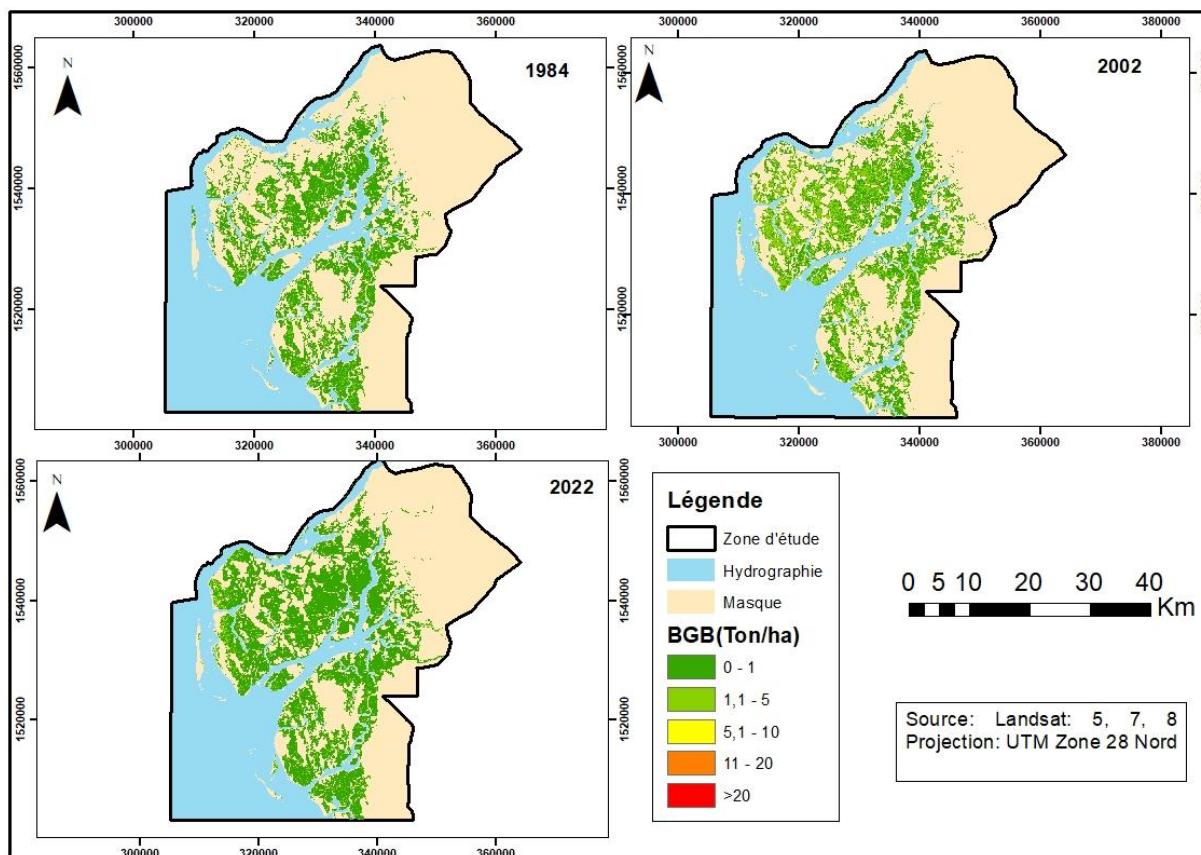
En 1984, la biomasse aérienne de la mangrove de la RBDS est évaluée à 1,42 Ton/ha avec un maximum de 210 Ton/ha (Tableau 3). Sur le plan spatial, l'essentiel de la mangrove a une valeur de biomasse aérienne inférieure à 17 Ton/ha. Par contre, pour 2002, il s'observe une biomasse moyenne de 1,40 ton/ha. Les valeurs maximales sont de 33 Ton/ha contre 210 en 1984. Les plus élevées s'observent dans la partie nord conformément à la répartition du NDVI de cette année. Pour 2022, la biomasse aérienne est inférieure à 12 Ton/ha sur l'ensemble de la mangrove de la réserve avec une moyenne qui est de 3,04 Ton/ha. Par rapport aux années précédentes, des hausses de 1,62 Ton/ha et 1,60 Ton/ha pour 1984 et 2002 ont été observées. À l'échelle de la réserve, les valeurs extrêmes sont observées dans la partie nord-ouest.

**Tableau 3 :** Statistiques descriptives de la biomasse aérienne en 1984, 2002 et 2022 (Ton/ha).

Année	Ecart-type	Max	Moyenne
1984	1,80	213,32	1,42
2002	2,95	11,85	1,40
2022	1,19	32,72	3,04

#### 4. Estimation de la biomasse souterraine

La biomasse souterraine a été cartographiée à l'échelle de la réserve et est illustrée par la figure 5.



**Figure 5** : spatialisation de la biomasse souterraine (BGB).

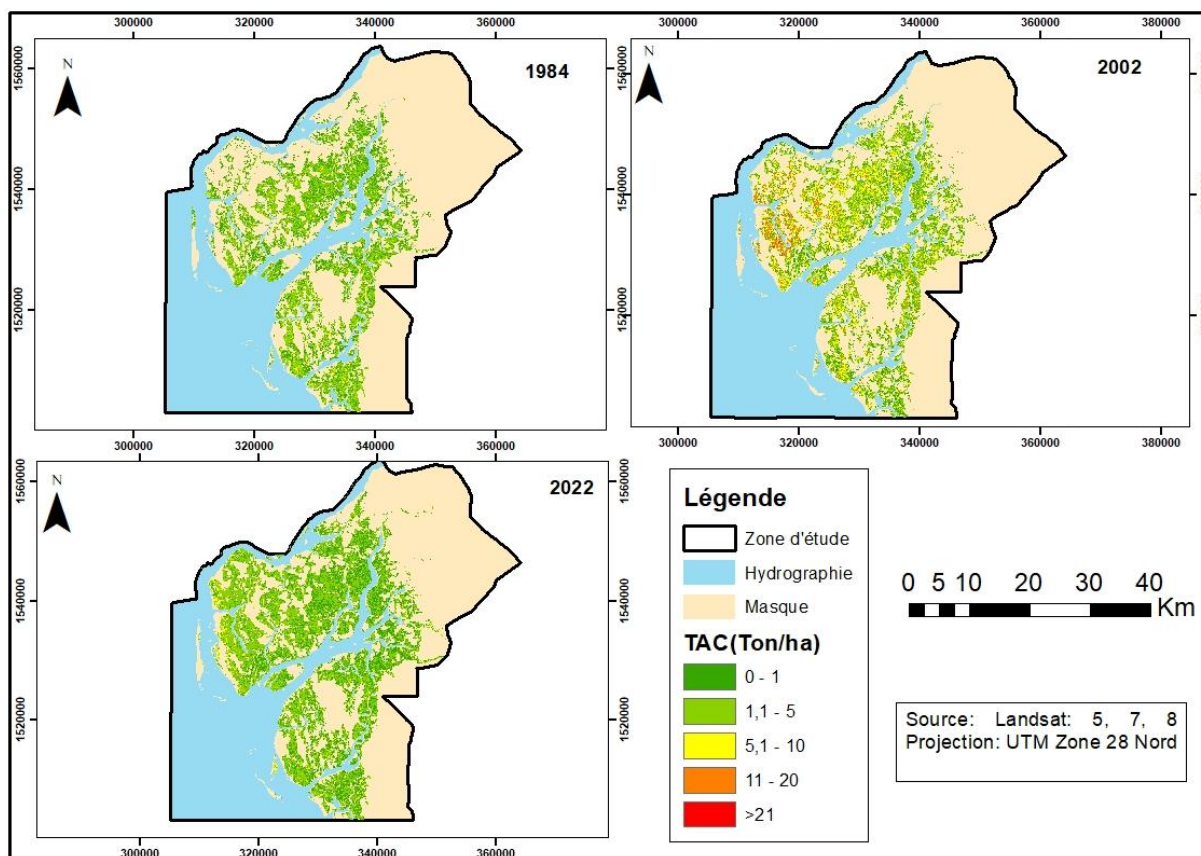
Au regard de la figure 5, la biomasse souterraine de la mangrove de la réserve est estimée à environ 0,45 Ton/ha avec un maximum de 40 Ton/ha. Sur le plan spatial, on note une homogénéité des valeurs de biomasse qui sont essentiellement autour de 3,1 Ton/ha (Tableau 4). Par ailleurs, en 2002, il s'observe une hausse de la biomasse souterraine moyenne estimée à 0,88 Ton/ha, avec un maxima de 7,6 Ton/ha. Pour 2022, la biomasse souterraine est en moyenne de 0,45 Ton/ha ; ce qui traduit une baisse moyenne de 0,43 Ton/ha par rapport à 2002 et une égalité par rapport à 1984. Au niveau spatial, on note une importance de la quantité de la biomasse dans le nord-ouest de la réserve pour les différentes années de l'étude ; ce qui s'explique par des peuplements différents de mangrove, l'âge et la santé de l'écosystème.

**Tableau 4** : Statistiques descriptives de la biomasse souterraine en 1984, 2002 et 2022 (Ton/ha).

Année	Ecart-type	Max	Moyenne
1984	0,44	39,64	0,45
2002	0,78	7,56	0,88
2022	0,34	3,08	0,45

#### 5. Estimation de la biomasse totale accumulée

La figure 6 illustre la répartition spatio-temporelle de la biomasse totale de la mangrove dans l'aire de la RBDS.



**Figure 6** : Spatialisation de la biomasse totale accumulée (TAC).

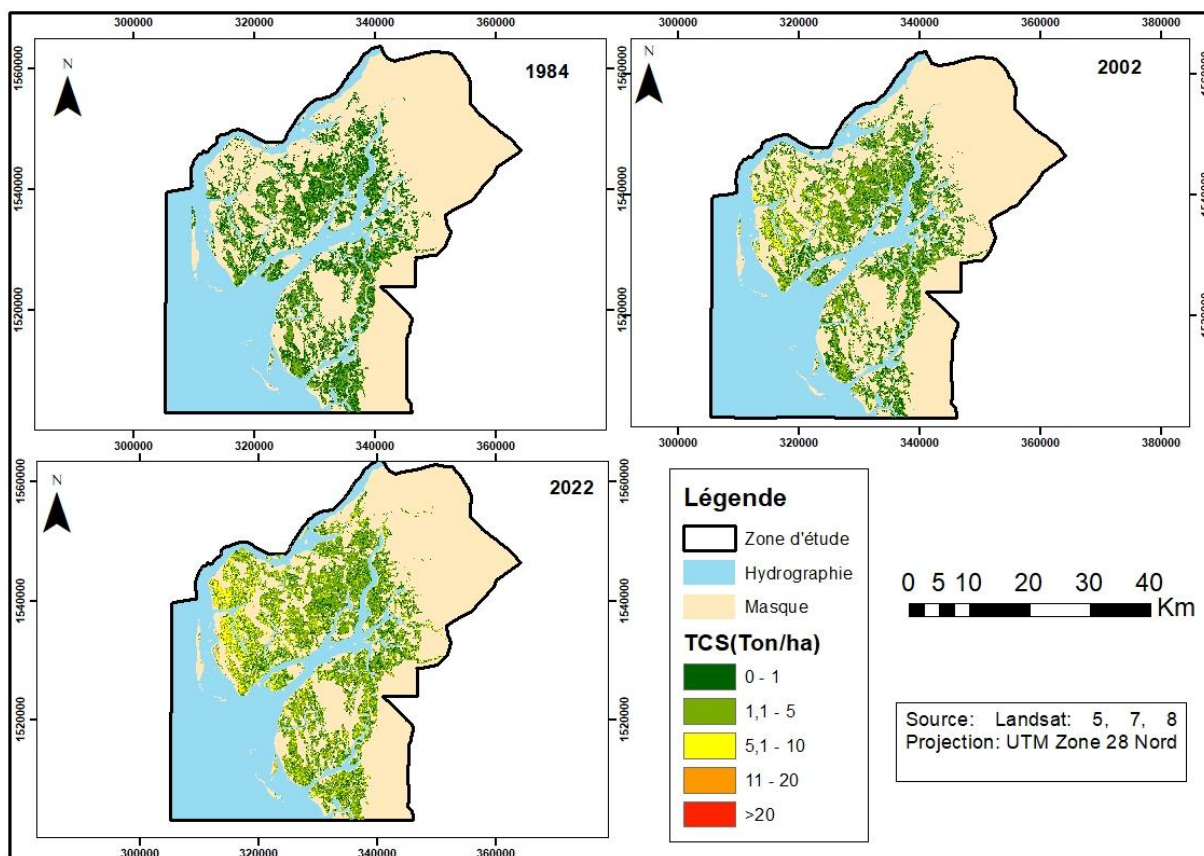
En 1984, la biomasse totale est inférieure à 250 Ton/ha avec une valeur moyenne de 1,88 Ton/ha (Tableau 5). Les scores présentent une certaine homogénéité avec des valeurs qui sont généralement inférieures à 2 Ton/ha. En 2002, la biomasse totale est en moyenne de 3,94 Ton/ha avec un maximum qui est estimée à 40 Ton/ha. Comparé à 1984, une hausse moyenne de 2,06 Ton/ha est notée. Par contre, en 2022, la biomasse totale est en moyenne de 1,85 Ton/ha. Les valeurs maximales sont 15 Ton/ha. Par rapport à 1984 et 2002, il est noté une baisse respective de 0,03 et de 2,09 Ton/ha. Ainsi, il s'observe un maintien de la tendance spatiale avec les scores les plus élevés qui sont notés dans les zones nord-ouest dans la réserve.

**Tableau 5** : Statistiques descriptives de la biomasse totale accumulée en 1984, 2002 et 2022 (Ton/ha).

Année	Ecart-type	Max	Moyenne
1984	2,24	252,96	1,88
2002	3,73	40,28	3,94
2022	1,54	14,93	1,85

## 6. Estimation de la quantité totale de stock de carbone (TCS)

La figure 7 montre la répartition spatiale des stocks de carbone de la mangrove de la RBDS.



**Figure 7 : Spatialisation des stocks de carbone (TCS).**

L'évolution des stocks de carbone est très contrastée sur la période de 1984 et 2022. En 1984, les stocks moyens sont estimés à 0,90 Ton/ha avec un maximum qui est à 120 Ton/ha. Au niveau spatial, il est observé une certaine homogénéité des valeurs dans la répartition qui sont essentiellement inférieures à 1 Ton/ha. En 2002, les stocks sont de 1,87 Ton/ha, soit une croissance de 0,97 Ton/ha. À l'échelle de la RBDS, la quasi-totalité des valeurs les plus élevées est localisée dans la partie nord de la mangrove.

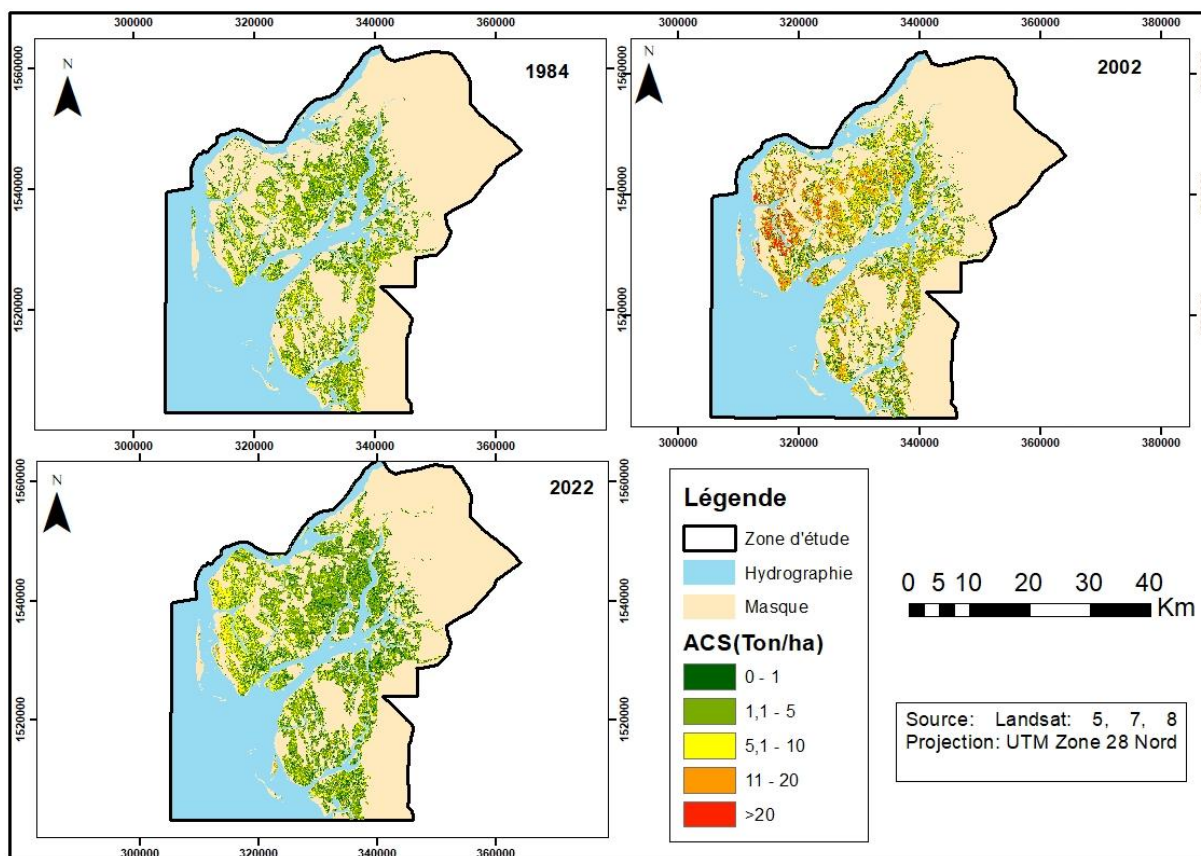
En 2022, les stocks moyens de carbone sont estimés à 0,88 Ton/ha, soit des baisses respectives par rapport à 1984 et 2002 de 0,02 et 0,99 Ton/ha. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 7,1 Ton/ha. Au niveau spatial, les stocks de carbone les plus élevés sont localisés dans la partie nord-ouest de la mangrove.

**Tableau 6 : Statistiques descriptives des stocks de carbone en 1984, 2002 et 2022 (Ton/ha).**

Année	Ecart-type	Max	Moyenne
1984	1,06	120,15	0,89
2002	1,77	19,13	1,87
2022	0,73	7,09	0,87

### 7. Estimation de la quantité totale de carbone séquestrée (ACS)

Le carbone séquestré est la dernière étape du processus d'estimation du carbone de la mangrove. Ainsi, la figure 8 montre la répartition spatiale du carbone séquestrée dans l'aire de la RBDS.



**Figure 8** : spatialisation de la quantité totale de carbone séquestrée (ACS).

En 1984, le carbone moyen séquestré dans la mangrove de la RBDS est d'environ 3,29 Ton/ha contre 6,87 Ton/ha en 2002, soit une hausse de 3,58 Ton/h (Tableau 7). L'année 2022 se démarque avec un carbone séquestré de 3,23 Ton/ha ; ce qui permet de voir des baisses respectives par rapport à 1984 et 2002 de 0,03 et 3,64 Ton/ha. Les maxima sont de l'ordre de 440 Ton/ha en 1984, 70 Ton/ha en 2002 et de 26 Ton/ha en 2022.

**Tableau 7** : Statistiques descriptives des stocks de carbone en 1984, 2002 et 2022 (Ton/ha).

Année	Ecart-type	Max	Moyenne
1984	3,90	440,97	3,28
2002	6,51	70,23	6,86
2022	2,68	26,03	3,22

Le tableau 8 donne les statistiques descriptives de la biomasse et du carbone de 1984, 2002 et 2022. Il est observé une variabilité de la biomasse moyenne et du potentiel carbone au fil des années.

**Tableau 8** : Statistiques moyennes de la biomasse et du carbone (Ton/ha).

<b>Variabes</b>	<b>1984</b>	<b>2002</b>	<b>2022</b>
Biomasse aérienne (AGB)	1,43	1,40	3,04
Biomasse souterraine (BGB)	0,46	0,89	0,45
Biomasse totale accumulée TAC	1,89	3,94	1,85
Carbone total stocké (TCS)	0,90	1,87	0,88
Carbone total séquestré (ACS)	3,29	6,87	3,23

En somme, cette étude a permis de déterminer le potentiel carbone de la mangrove à partir des méthodes de télédétection. Les résultats ont été obtenus par l'utilisation de l'indice de végétation normalisée (NDVI) qui a permis de passer de la biomasse au carbone.

## Discussion

L'objectif de ce travail a été d'estimer le stockage du carbone de la mangrove de la réserve de biosphère du delta du Saloum de 1984 à 2022, à partir des données d'observation de la terre.

En outre, ce travail a cherché à estimer la quantité de carbone stockée dans la mangrove à partir des méthodes de télédétection. La démarche est assez nouvelle, mais commence à être fortement vulgarisée en raison des difficultés pour étudier le carbone de la mangrove par les méthodes traditionnelles, du fait de sa morphologie.

Toutefois, cette approche d'utilisation des données optiques n'est pas assez utilisée pour estimer la biomasse et le carbone des mangroves. L'approche basée sur les données optiques est une nouvelle tendance déjà été utilisée par A. W. Hastuti *et al.*, (2017, p. 3-5), S. C. Sahu *et al.*, (2016, p. 4), O. Hamdan *et al.*, (2013, p. 557), G. Winarso *et al.*, (2015, p. 86-89), et Li *et al.*, (2007, p. 5570-5573). L'utilisation des données du Landsat est assez courante dans le suivi de la biodiversité surtout de la mangrove. E. Sow et T. Ba, (2019, p. 6621-6623), E. B. Dieye, *et al.*, (2013, p. 3-6) ont principalement utilisé les données Landsat pour la cartographie des ressources de la réserve. A. W. Hastuti A *et al.*, (2017, p. 139-141), quant à eux, ont choisi ce type de données afin d'étudier la biomasse et le carbone de la mangrove dans l'estuaire du Perancak. Ces données sont souvent choisies en fonction de leur disponibilité, de leur périodicité, mais aussi de leurs résolutions spectrale et spatiale.

Les résultats obtenus montrent une dynamique à la hausse de la mangrove dans la réserve de biosphère passant de 44 081,07 ha soit 18,81 % en 1984 à 59 298 ha (25,31 %) en 2022. D'autres auteurs confirment cette tendance avec une croissance de +0,25 % entre 1986 et 2001 et de +2,11 % entre 2011 et 2010 (E. B. Dieye *et al.*, 2013, p. 11), et de +0,25 % entre 1984 et 1999 (E. Sow *et al.*, 2019, p. 89). Cette évolution est le résultat de la combinaison des facteurs naturels et anthropiques. D'une part, l'accroissement des superficies s'explique par la mise en place d'un meilleur cadre de gestion, la multiplication des actions de conservation et de restauration et la prise de conscience des populations. D'autre part, le retour pluviométrique des années 2000 au Sahel induit des apports en eaux douces qui permettent la réduction de la salinité des sols et la régénération des mangroves (E. Sow *et al.*, 2019, p. 98 ; E. B. Dieye *et al.*, (2013, p. 2). A l'échelle du globe, c'est une période de croissance des mangroves avec une augmentation de +16 % en 2021 contre 8 % en 2016 (T.V. Tran *et al.*, 2022, p. 3).

Les résultats de la quantification du carbone montrent une évolution irrégulière marquée par un pic de 6,87 Ton/ha en 2002 contre 3,29 Ton/ha en 1984 et 3,23 Ton/ha en 2022. Ces estimations entrent en phase avec le travail de N. Ndour *et al.*, (2012, p. 7) qui concluait à environ 1,936 tonnes de carbone séquestrées en deux ans par la mangrove de la RBDS. De plus, les résultats corroborent le travail de R. M. Degue-Nambona (2008, p. 57) qui déduisait

entre 3,335 et 4,968 tonnes de carbone séquestrées entre 1990 et 2000. La capacité de séquestration du carbone est tributaire de l'âge, mais aussi du type de mangrove. D'autres facteurs comme la densité, la taille du tronc et la hauteur de l'arbre déterminent la capacité de production de biomasse et donc de séquestration de carbone (J. Chave *et al.*, 2006, p. 12). Dès lors, il est évident que la mangrove participe à la séquestration du carbone dans la RBDS. Ainsi, selon le type et l'âge, elle va séquestrer moins ou davantage de carbone (I. D. Thompson *et al.*, 2003, p. 463 ; R. M. Degue-Nambona, 2008, p. 64).

## Conclusion

Ce travail a eu pour objectif d'étudier la biomasse et le carbone de la mangrove de la réserve de biosphère du delta du Saloum. C'est donc une analyse diachronique qui a utilisé les techniques de télédétection et les données d'observation de la terre afin d'estimer le carbone de cet écosystème.

Les résultats montrent une croissance progressive de la mangrove qui passe de 44 081,07 ha, en 1984 à 47 252,74 ha de la surface de la réserve en 2002, et à 59 298 ha de la superficie totale en 2022. Parallèlement, l'évolution de la biomasse totale traduit une tendance irrégulière marquée par un pic de 3,94 Ton/ha en 2002 contre 1,89 Ton/ha en 1984 et 1,85 Ton/ha en 2022. Les stocks de carbone suivent cette même tendance en atteignant 1,87 Ton/ha en 2002 contre 0,90 T/ha en 1984, et 0,88 Ton/ha en 2022. Enfin, le carbone séquestré par la mangrove du delta du Saloum est ainsi passé de 3,29 Ton/ha en 1984 à 6,87 Ton/ha en 2002 avant d'atteindre 3,23 Ton/ha en 2022. La capacité de séquestration du carbone de la mangrove est fortement liée à la typologie et à l'âge des mangroves, mais aussi à la présence de carbone dans l'atmosphère. Dès lors, plusieurs facteurs agissent dans la capacité de séquestration du carbone de la mangrove de la réserve de biosphère du delta du Saloum.

En somme, les résultats obtenus montrent une tendance irrégulière de la capacité de séquestration du carbone de la mangrove de la RBDS. Aussi, ce travail pose les bases scientifiques de l'estimation du carbone. Il serait alors intéressant de faire une étude comparative entre les méthodes de télédétection et les techniques d'évaluation au sol.

## Références bibliographiques

ALJENAID Sabah, ABIDO Mohammad, REDHA Ghadeer Kadhem., ALKHUZAEI, Manaf., MARSAN Yvonne, KHAMIS Abdulqader KHAMIS, HUMOOD Naser, ALRUMAIDH Mohammad et ALSABBAGH Maha, 2022, *Assessing the spatiotemporal changes, associated carbon stock, and potential emissions of mangroves in Bahrain using GIS and remote sensing data, Regional Studies in Marine Science*, 52, 102282.

ARFA Azzedine Mohamed Touffik, BENDERRADJI Mohamed El Habib, SAINT-GERAND Thierry et ALATOU Djamel, 2019, *Cartographie du risque feu de forêt dans le Nord-est algérien : cas de la wilaya d'El Tarf, Cybergeography: European Journal of Geography*.

BILAL Adrien et KÄNZIG Diego, 2024, *The macroeconomic impact of climate change: Global vs. local temperature* (No. w32450). National Bureau of Economic Research.

BINDU Gokulapalan, RAJAN Poornima, JISHNU Sachithanandan, et JOSEPH K. Ajith, 2020, *Carbon stock assessment of mangroves using remote sensing and geographic information system*, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(1), 1-9.

BOCQUET Evelyne, 2018, *Reboisements de mangrove dans le delta du Saloum, Sénégal : Évaluation écologique et sociale*, Mémoire de fin de cycle. 75 p. URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5182>

CAIRNS Michael, BROWN Sandra, HELMER Eileen et BAUMGARDNER Greg, 1997, «Root biomass allocation in the world's upland forests», *Oecologia*, 111, pp 1-11.

CHAVE Jérôme, Helene MULLER-LANDAU, BAKER Timothy, EASDALE Tomás, STEEGE Hans ter et WEBB Campbell, 2006, «Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species», *Ecological applications*, 16(6), pp 2356-2367.

DEMBELE Basirou, GOMGNIMBOU Alain, YAMEOGO Jérôme, OUEDRAOGO Osée et HIEN Mipro, 2023, « Détermination du carbone stocké par les ligneux dans la bande de servitude de la rivière Kou dans la Province du Houet (Burkina Faso) », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 17 (1), pp. 281-292.

DEUGUE-NAMBOMA Ralph Mercier, 2008, *Contribution des reboisements de mangrove de la RBDS à la séquestration du carbone atmosphérique : cas des villages de Djirnda et de Sanghako du Delta du Saloum (Sénégal)*, Mémoire de DEA, UCAD.

DIOUF Adama Cheikh, BA, Aicha Idy Seydou Wally, BA Mamadou Demba et Mamadou Saliou DIALLO, 2021, Biogéographie des zones humides face aux contraintes multiples : cas de la réserve de biosphère du delta Saloum au Sénégal, 17p.

DOYEN André AGBOBA Christophe, 1985, La mangrove à usages multiples de l'estuaire du Saloum (Sénégal), In *Selected Papers of the Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils*, pp.176-201.

DUKE Norman, 1992, «Mangrove floristics and biogeography», *Tropical mangrove ecosystems*, 41, pp. 63-100.

FAO, 2007, *The world's mangrove 1980-2005*, forestry paper, Rome, 89 p.

GIEC, 2006, *guidelines for national greenhouse gas inventories*, GIEC, 20 p.

GIEC, 2021, *AR6 Climate Change 2021 : La base des sciences physiques. In Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'Evaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat : Conséquences, Adaptation et Vulnérabilité*, Cambridge University Press : Cambridge (Royaume Uni) et New York (États-Unis d'Amérique) ; 1800 p.

HAMDAN Omar, KHAIRUNNISA MR, AMMAR Abdul Aziz, HASMADI Mohd Ismail, 2013, «Mangrove carbon stock assessment by optical satellite imagery», *Journal of Tropical Forest Science*, pp. 554-565.

HASTUTI Amandangi Wahyuning, SUNIADA Komang Iwan et ISLAM Y Fikru, 2017, «Carbon stock estimation of mangrove vegetation using remote sensing in Perancak Estuary, Jembrana District, Bali», *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 14(2), pp.137-150.

JHA Chandra Shekhar, FARARODA Rakesh, RAJASHEKAR Rajashekar, SINGH, S., & DADHWAL, V. K. (2015). Spatial distribution of biomass in Indian forests using spectral modelling. *Geospatial Information Systems for Multi-Scale Forest Biomass Assessment and Monitoring in the Hindu Kush Himalayan region*, 139. Komiyama, A., ONG Jin Eong et POUNGPARN Sasitorn, 2008, Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic botany*, 89(2), pp.128-137.

LI Xue, YEH Anthony Gar-On, WANG Shuang, LIU Kun, LIU Xiang, QIAN Jian et CHEN Xia, 2007, Regression and Analytical Models for Estimating Mangrove Wetland Biomass in South China Using Radarsat Images. *International Journal of Remote Sensing* 28, pp. 5567-5582.

MBOW Cheikh, VERSTRAETE Marc M, SAMBOU Babacar, DIAW Amadou T et NEUFELDT Heidi, 2014, Allometric models for aboveground biomass in dry savanna trees of the Sudan and Sudan-Guinean ecosystems of Southern Senegal, *Journal of Forest Research*, 19(3), pp. 340-347.

NDOUR Ngor, DIENG Sara et FALL Mamadou, 2012, « Rôles des mangroves, modes et perspectives de gestion au Delta du Saloum (Sénégal) », *VertigO*, 11 (3).

NIKLAS KARL, 1995, «Size-dependent allometry of tree height, diameter and trunk-taper», *Annals of botany*, 75(3), pp. 217-227.

NOUACEUR Zeineddine, 2020, « La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest sahélienne », *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, (Volume 15), pp. 89-109.

PALADINIC Elvis, VULETIC Dijana, MARTINIC Ivan, MARJANOVIC Hrvoje, INDIR Krunoslav, BENKO Miroslav et NOVOTNY VLADIMIR, 2009, « Forest biomass and sequestered carbon estimation according to main tree components on the forest stand scale», *Periodicum biologorum*, 111(4), pp. 459-466.

SAHU SUDAM, KUMAR Manish et RAVINDRANATH NH, 2016, « Carbon stocks in natural and planted mangrove forests of Mahanadi Mangrove Wetland, East Coast of India», *Current Science*, 2253-2260.

SAÏDOU Aliou, DOSSA, GNANGLE Césaire, BALOGOUN Ibouaïman, et AHO N, 2012, *Evaluation du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers à karité (Vitellaria paradoxa CF Gaertn.) et à néré (Parkia biglobosa Jacq. G. Don) en zone Soudanienne du Bénin*, *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)*, 9.

SANTANTONIO, D., HERMANN, R. K., & OVERTON, W. S. (1977). Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiology*, vol. 17, p. 1-31.

SAPUTRA Getry Ratna, 2007, *Model Penduga Potensi Hutan Rakyat Menggunakan Citra Aster dan Sistem Informasi Geografis di Beberapa Wilayah Kabupaten Bogor Bagian Barat*. [Skripsi]. *Skripsi. Bogor (ID): Departemen Manajemen Hutan Fakultas Kehutanan, IPB (Bogor Agricultural University), Bogor*.

SEMBOUNG LANG Firmin, DESTAIN Jacqueline, CAMPANELLA Bruno, DELVIGNE Franck, DRUART, Philippe THONART, Philippe, 2014, *Aperçu des connaissances actuelles sur la gestion de la pollution des mangroves par les hydrocarbures*, *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18 (3).

SOW EL Hadj, 2019, *Dynamique de l'écosystème mangrove de la réserve de biosphère du delta du Saloum (RBDS), Sénégal, de 1965 à 2017 et analyse des politiques de restauration*, Thèse de doctorat, Université Gaston Berger de Saint-Louis, 245 p.

SOW EL Hadj, TAIBOU BA et BOUBOU Aldiouma SY, (2019, Impact of rainfall variability on mangrove dynamics of the Saloum Delta biosphere reserve (Senegal). *Journal of Animal and Plant Sciences (JAPS)*, 40(2), 6619-6635.

STAVI Ilan, LAL Rattan, 2013, *Agroforestry and biochar to offset climate change: a review*. *Agronomy for Sustainable Development*, 33: pp.81-96. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0081-1>

TAMILSELVAN Balaraman, SEKAR Thangavel, et ANBARASHAN Thangavel, 2021, *Estimation of biomass and carbon stocks of trees in Javadhu Hills, Eastern Ghats, India*. *Journal of forest and environmental science*, 37(2), 128-140.

THOMPSON Ian, BAKER, Jerome, & TER-MIKAELIAN Michael, 2003, « A review of the long-term effects of post-harvest silviculture on vertebrate wildlife, and predictive models, with an emphasis on boreal forests in Ontario, Canada», *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 441-469.

WESTLAKE DF. (1963). Comparisons of plant productivity. *Biological Reviews*, 38(3), 385-425.

WICAKSONO Pramaditya, DANOEDORO Projo , HARTONO Hartono, NEHREN, Udo et RIBBE Lars, 2011, « Preliminary work of mangrove ecosystem carbon stock mapping in small

island using remote sensing: above and below ground carbon stock mapping on medium resolution satellite image », In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII* (Vol. 8174, pp. 408-417). SPIE.

WINARSO Gathot, VETRITA Yenni, PURWANTO Anang et Soni DARMAWAN, 2015, « Mangrove above ground biomass estimation using combination of Landsat 8 and ALOS PALSAR data, *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 12(2), pp. 85-96.