

Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR Sciences et Technologies

Département d'Agroforesterie

Mémoire de Master

Spécialité : Aménagement et Gestion Durable des Ecosystèmes Forestiers et Agroforestiers

Sujet :

Evaluation du carbone au Sénégal à partir de l'imagerie satellitaire (2000 à 2015)

Présenté par :

Fallou SECK

Sous la direction de

Dr Mohamed Mahamoud CHARAHABIL, Maître de Conférences

Encadreur : Dr Abdoul Aziz DIOUF, Chargé de recherche au Centre de Suivi Ecologique (CSE)

Soutenu publiquement le 16/01/2020 devant le jury composé de :

Président : Professeur Tidiane SANE (Maître de conférences)

Membres : Dr Ismaila COLY (Maître Assistant/UASZ)

Dr Mayecor DIOUF (Chargé de recherche ISRA/CRA/Djibélor)

Dr Mohamed Mahamoud CHARAHABIL (Maître de conférences)

Dr Abdoul Aziz DIOUF (Chargé de recherche/CSE)

Année universitaire : 2018 / 2019

Dédicaces

*M*ention spéciale à mon père Moussa SECK ainsi qu'à ma mère Kossia Tamia Sabine ADOU qui n'ont ménagé aucun effort pour notre éducation et bien-être. Je saurais décrit l'estime et l'amour que j'ai pour eux car ils représentent ce que j'ai de plus cher. Par ma voix, nous leur souhaitons une bonne santé et une longue vie.

Je dédie ce mémoire également à notre oncle Moustapha DIOUF ainsi qu'à mes sœurs Mame Awa et Ramatoulaye et mes frères Cheikh et Mada.

Remerciements

J'adresse mes remerciements les plus sincères à tous ceux qui, de près ou de loin, n'ont ménagé aucun effort pour la réussite du stage pendant mon séjour, d'une part, et à l'élaboration du présent mémoire, d'autre part.

Je remercie tout le corps enseignant chercheur du Département d'Agroforesterie, titulaires comme vacataires à savoir Dr Mohamed Mahamoud CHARAHABIL, notre chef de Département, Dr Djibril SARR, Dr Ismaïla COLY, Dr Boubacar CAMARA, Dr Siré Diedhiou SALL, Dr Ousmane NDIAYE, Dr Antoine SAMBOU, Pr Ngor NDOUR, Dr Arfang Ousmane Kémo GOUDIABY, Dr Maurice DASYLVA, Pr Daouda NGOM, ainsi que les membres du jury.

J'exprime ma profonde gratitude au Dr Mohamed Mahamoud CHARAHABIL pour son encouragement, sa disponibilité et son encadrement. Mes remerciements vont également à l'endroit du Directeur Général du Centre de Suivi Ecologique (CSE), pour son accueil dans sa structure ainsi qu'à Dr Abdoul Aziz DIOUF pour son encadrement et sa formation de très haute facture ainsi que sa disponibilité sans faille.

Je remercie l'administration du CSE surtout la direction chargé des stages ainsi que Madame Ndiaye et Louise. Egalement, je remercie : Dr Balla DIEYE du Département de Géographie de l'Université Assane SECK de Ziguinchor, M. Abdourhamane DIAKHATE et Sidy SANE.

Mes profondes reconnaissances vont à l'endroit de tous les doctorants de la première promotion d'Agroforesterie : M. Paul DIOUF, M. Mamadou Abdoul Ader DIEDHIOU et M. Seydou NDIAYE.

Je remercie mes familles d'accueil respectives : A Ziguinchor, la famille SANE et à Dakar, la famille CISSE.

Je ne saurais terminer sans remercier tonton Fallou DIENG et sa femme Mbeugue FALL, tante Gisèle ADOU, tonton René Janis DEGAUD DEGAUD, Tonton Emmanuel et Mamadou TRAORE, Mor GUEYE, Adama et Mbaye SEYE ainsi que Adama TOURE. Je remercie tous les étudiants du Département d'Agroforesterie particulièrement mes camarades de même promotion 2018/2019, Alpha BA, El Hadji Diamé SOW, Mouhamadou MBOW, Aïda NGOM, Tening DIOUF, Ousmane CISSE, M. Semou DIOUF, Moustapha BADJI, Djiby SEYDI, Amadou DIEYE, Saliou DIAW, Khadija DIALLO, Souleymane DIOP, Ameth Tidiane DIOP, Ramatoulaye CISSOKHO avec une mention spéciale à Fatima DIOP.

Liste des abréviations et sigles

- AGEOS : Association Africaine pour le Développement Géospatial (*African Association for Geospatial Development*)
- CO₂/O₂ : Gaz carbonique/Oxygène
- CRA : Centre de Recherches Agricoles
- CSE : Centre de Suivi Ecologique
- EOS : Système d'observation de la Terre (*Earth Observing System*)
- FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*)
- FAPAR/FPAR/APAR : Fraction de PAR absorbée par le couvert végétal
- FRA : Evaluation des ressources forestières mondiales
- GES : Gaz à Effet de Serre
- GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental pour le Climat
- GPP : Production primaire brute (*Gross Primary Productivity*)
- LAI : Indice de surface foliaire (*Leaf Area Index*)
- LANDSAT : Programme américain d'observation de la surface de la terre
- LIDAR : Détection de la lumière et de la distance (*Light Detection And Ranging*)
- MERIS : Spectromètre imageur à résolution moyenne (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*)
- MODIS : Spectroradiomètre d'imagerie à résolution moyenne (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)
- NASA : Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique (*National Aeronautics and Space Administration*)
- NDVI : Indice de végétation par différence normalisée (*Normalized Difference Vegetation Index*)
- NEE : Echanges nets de carbone (*Net Ecosystem Exchange*)

- NPP : Production primaire nette (*Net Primary Productivity*)
- PAR : Rayonnement incident photosynthétiquement actif
- RADAR : *Radio Detection And Ranging*
- SIG : Système d'Information Géographique
- SPOT : Système Probatoire d'Observation de la Terre ou Satellite pour l'Observation de la Terre
- TER : Respiration totale de l'écosystème (*Total Ecosystem Respiration*)
- UASZ : Université Assane Seck de Ziguinchor

Table des matières

| | |
|--|------|
| Dédicaces | i |
| Remerciements | ii |
| Liste des abréviations et sigles | iii |
| Liste des figures | vii |
| Liste des tableaux | vii |
| Liste des annexes | vii |
| Résumé | viii |
| Abstract | ix |
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE | 3 |
| 1.1. Notion de productivité..... | 3 |
| 1.1.1. Biomasse..... | 3 |
| 1.1.2. Stock de carbone | 3 |
| 1.1.3. Relation entre biomasse et stock de carbone | 4 |
| 1.2. Stock de carbone et occupation du sol | 4 |
| 1.3. Notion de bilan carbone d'un écosystème | 5 |
| 1.4. Suivi du stock de carbone par télédétection..... | 7 |
| 1.4.1. Définition | 8 |
| 1.4.2. Les capteurs | 8 |
| 1.4.3. Les satellites..... | 10 |
| 1.5. Les feux | 11 |
| 1.6. Définition de certaines notions | 13 |
| CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES | 14 |
| 2.1. Présentation de la zone d'étude..... | 14 |
| 2.2. Les données satellitaires | 15 |
| 2.3. Les données de l'occupation du sol..... | 15 |
| 2.4. Les données sur les feux | 17 |
| 2.5. Traitement des données | 17 |
| CHAPITRE 3 : RESULTATS | 19 |
| 3.1. Evolution de l'augmentation du carbone aérien de 2000 à 2015 au Sénégal | 19 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2. Perte de carbone due aux feux de 2000 à 2015 au Sénégal..... | 22 |
| CHAPITRE 4 : DISCUSSION..... | 25 |
| CONCLUSION..... | 27 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 28 |
| ANNEXES | 37 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Les principaux réservoirs de carbone à la surface de la Terre et les échanges de carbone qui existent entre ces réservoirs (Source : Saugier, 1999 modifié)..... | 6 |
| Figure 2 : Les flux de CO ₂ échangés entre une culture et l'atmosphère ainsi que son environnement (Source : Moureaux et al., 2008 modifié)..... | 7 |
| Figure 3 : Triangle du feu | 12 |
| Figure 4 : Domaines climatiques du Sénégal (Sagna, 2008) | 14 |
| Figure 5 : Six (6) classes d'occupation du sol au Sénégal..... | 16 |
| Figure 6 : Images satellitaires sur les feux au Sénégal en 2000 et 2015 | 17 |
| Figure 7 : Schémas de la méthode utilisée lors de cette étude..... | 18 |
| Figure 8 : Evolution de l'augmentation du carbone aérien entre 2000 et 2015 au Sénégal | 19 |
| Figure 9 : Evolution de l'augmentation de carbone aérien en fonction de 6 classes d'occupation du sol de 2000 à 2015 | 20 |
| Figure 10 : Evolution de l'augmentation de la densité de carbone aérien moyen sur quatre périodes de 2000 à 2015 en fonction de 6 classes d'occupation du sol..... | 21 |
| Figure 11 : Evolution de la quantité de carbone perdu due aux feux au Sénégal entre 2000 et 2015 | 22 |
| Figure 12 : Evolution de la quantité de carbone perdu due aux feux dans les 6 classes d'occupation du sol de 2000 à 2015 | 23 |
| Figure 13 : Evolution de la densité de carbone moyen perdu à cause des feux sur quatre périodes de 2000 à 2015 en fonction de 6 classes d'occupation du sol..... | 24 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Quelques satellites ou engins spatiaux et leurs caractéristiques (Source : Catry et al., 2018) | 10 |
| Tableau 2 : Quelques satellites et leurs résolutions spatiales (Source : Chehata, 2015) | 10 |
| Tableau 3 : Spécifications techniques de MODIS (Source : Bourget et al., 2010)..... | 15 |
| Tableau 4 : Classification de l'occupation du sol au Sénégal..... | 16 |

Liste des annexes

| | |
|--|----|
| Annexe 1 : Bilan global du carbone (Source : Robert et al., 2003) | 37 |
| Annexe 2 : Spécification MODIS (Source : NASA (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>), 1999)..... | 38 |

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le contexte de suivi et de gestion des ressources agroforestières. Les objectifs étaient d'une part, l'évaluation de l'augmentation du carbone aérien et d'autre part l'évaluation de la quantité de carbone perdu à cause des feux sur l'ensemble du territoire sénégalais puis en fonction des types d'occupations du sol sur la période allant de 2000 à 2015. Pour la réalisation de cette étude, les logiciels de Système d'Information Géographique et R ont permis de traiter les données sur la production primaire nette mondiale pour obtenir le carbone aérien au Sénégal à partir des images satellitaires de types MODIS. Ils ont aussi servi à traiter les données sur le carbone perdu du fait des feux au Sénégal. Les statistiques calculées à partir de ces logiciels ont été exportées dans Excel pour traitement et analyse. L'augmentation du carbone aérien au niveau du Sénégal varie entre 985 tC et 1 170 tC durant toute la période d'étude considérée. La zone humide et la forêt emmagasinent au niveau aérien le moins de carbone par rapport aux autres classes avec en moyenne 32 tC. Cependant, la savane arbustive et arborée stocke une quantité de carbone supérieure à celle des autres types d'occupation du sol. Toutefois, la zone humide présente la densité de carbone moyen la plus élevée avec 14 000 gC/m² durant la période 2004-2007. Alors que la savane arbustive et arborée ainsi que la zone de culture possèdent la plus faible densité avec une valeur de 4 000 gC/m² durant la période 2000-2003. Le carbone perdu à cause des feux au niveau du Sénégal varie très fortement entre 30 tC et 107 tC. Il est le plus élevée au niveau de la savane boisée ainsi que celle arbustive et arborée quelle que soit l'année considérée. La zone humide sur l'ensemble des années, n'a enregistré aucune perte de carbone causée par les feux. Ces résultats constituent une bonne base en ce qui concerne la connaissance de la capacité des écosystèmes du Sénégal pour la séquestration du carbone. Mais ils sont à améliorer par la prise en compte d'autres paramètres.

Mots clés : production primaire nette, MODIS, classe d'occupation du sol, carbone.

Abstract

This study is part of the monitoring and management of agroforestry resources. The objectives were on the one hand, the evaluation of the increase in air carbon and on the other hand the evaluation of the quantity of carbon lost due to fires on the whole of Senegalese territory then according to the types of land cover over the period from 2000 to 2015. For carrying out this study, Geographic Information System and R software made it possible to process data on global net primary production to obtain aerial carbon in Senegal from MODIS type satellite images. They were also used to process data on carbon lost due to fires in Senegal. Statistics calculated from these software were exported to Excel for processing and analysis. The increase in above-ground carbon in Senegal varies between 985 tC and 1,170 tC throughout the study period considered. The wetland and the forest store the least carbon at the air level compared to the other classes with an average of 32 tC. However, the shrub and tree savannah stores more carbon than other types of land use. However, the wetland has the highest average carbon density with 14,000 gC/m² during the period 2004-2007. While the shrub and tree savannah as well as the growing area have the lowest density with a value of 4,000 gC/m² during the period 2000-2003. The carbon lost due to fires in Senegal varies very strongly between 30 tC and 107 tC. It is highest in the wooded savannah as well as the shrubby and wooded whatever the year considered. The wetland over the years has seen no loss of carbon from fires. These results provide a good basis for understanding the capacity of Senegal's ecosystems for carbon sequestration. But they are to be improved by taking into account other parameters.

Key words : net primary production, MODIS, class of land occupation, carbon.

INTRODUCTION

La mesure et l'estimation du carbone ont toujours été faites par des équations allométriques permettant ainsi d'évaluer la biomasse stockée dans les troncs et les houppiers à partir de paramètres dendrométriques (Peltier *et al.*, 2007 ; Peichl *et al.*, 2007). Bien que cette méthode soit la plus conventionnelle, elle est laborieuse, coûteuse, prend du temps et destructrice (Vashum *et al.*, 2012). Les estimations de biomasse qui émanent de ces équations sont précises au niveau de la parcelle ou au niveau local, mais beaucoup moins précises sur des échelles spatiales plus larges (Baccini *et al.*, 2008).

En revanche, la télédétection optique permet une approche beaucoup plus opérationnelle (Goetz *et al.*, 2009). Elle offre un moyen pratique et économique de discriminer et d'estimer les paramètres biochimiques et biophysiques des espèces et ses données numériques peuvent être facilement intégrées au système d'information géographique (SIG) pour plus d'analyses (Adam *et al.*, 2010). Elle a été utilisée pour cartographier le couvert végétal à l'échelle locale et mondiale au cours des trois dernières décennies (Malatesta *et al.*, 2013). Les données de télédétection fournissent des informations en temps réel sur la couverture végétale, le type de biome et les perturbations, notamment les incendies et l'exploitation forestière (Zhao *et al.*, 2006). L'émergence et le développement de la télédétection ont fourni un puissant instrument d'observation, de surveillance et de caractérisation des paysages (Tucker *et al.*, 2005).

Les informations sur le carbone sont rendues possibles grâce à la forte relation qui existe entre la biomasse aérienne de la végétation et les paramètres de la végétation pouvant être évaluée par télédétection (Paylor *et al.*, 1999). En raison de la difficulté à collecter des données de terrain sur la biomasse souterraine, la plupart des recherches sur l'estimation de la biomasse sont axées sur la biomasse aérienne (Lu, 2006). Ainsi, les estimations de la biomasse aérienne peuvent également être utilisées pour prédire la biomasse racinaire, qui est généralement estimée à 20% de la biomasse aérienne pour les forêts (Mokany *et al.*, 2006).

La végétation au sein des écosystèmes terrestres est une composante majeure du cycle global du carbone car elle régule le climat (Zhu *et al.*, 2013).. Ainsi, elle est au cœur des problématiques de développement durable, parce qu'elle contribue aux changements globaux via l'évolution de son état, en émettant (ou en absorbant) des gaz à effet de serre dont le CO₂. Donc il est impératif de pouvoir quantifier et analyser spatialement les stocks de carbone (Calvet *et al.*, 2017). Selon la FAO (2005), la destruction de la forêt serait responsable de 18 à

20% des émissions de gaz à effet de serre (essentiellement le CO₂) avec 13 millions d'hectares de forêts qui disparaissent annuellement sur Terre. Au Sénégal, la perte et/ou la dégradation des surfaces boisées deviennent une préoccupation. En effet, la diminution des surfaces boisées semble être liée à la variabilité du climat (sècheresse et la pluviométrie en baisse) mais aussi aux évolutions sociales (types d'occupation du sol) et économiques (mise en valeur des sols) et politiques des systèmes ruraux.

La biomasse aérienne régit les émissions potentielles de carbone qui pourraient être libérées dans l'atmosphère en raison de la déforestation (Lu, 2005) et autres phénomènes comme les feux de brousse et les incendies. C'est pourquoi, la mesure et le suivi de la biomasse aérienne de la végétation sont devenus ces dernières années un sujet de recherche de premier ordre (Zolkos et *al.*, 2013). Donc, des estimations précises du stockage de carbone terrestre sont nécessaires pour déterminer son rôle dans le cycle global du carbone, pour estimer à quel point les perturbations anthropiques (c'est-à-dire, le changement d'utilisation ou de couverture du sol) modifient ce cycle et pour surveiller les efforts d'atténuation liés à la séquestration du carbone (Lefsky et *al.*, 2006).

Quel est le comportement d'une année à une autre des différentes classes d'occupation du sol au Sénégal en ce qui concerne l'augmentation du carbone aérien d'une part et d'autre part celui perdu dû aux feux en utilisant les outils de la télédétection ? Les hypothèses de cette étude sont :

- 1) l'augmentation du carbone aérien varie en fonction des classes d'occupation du sol ;
- 2) et le carbone perdu à cause des feux évolue d'un type d'occupation du sol à un autre.

L'objectif est de contribuer à l'établissement d'une base de données sur l'état et l'évolution du carbone des différents systèmes d'utilisation des terres au Sénégal. Les objectifs spécifiques sont :

- 1) l'évaluation de l'augmentation du carbone aérien ;
- 2) et l'évaluation des pertes de carbone dues aux feux.

Le présent document est composé de quatre chapitres. Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique. Le deuxième chapitre porte sur le matériel et les méthodes utilisés. Les résultats et la discussion sont développés respectivement dans le troisième et quatrième chapitre avant la conclusion.

CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Notion de productivité

La productivité primaire correspond à la vitesse de production de la biomasse chez les végétaux chlorophylliens. L'accroissement de la biomasse par unité de temps sera la productivité nette (Decourt, 1973). Elle se répartit entre une contribution à l'augmentation de la biomasse ligneuse et un apport de matière organique aux hétérotrophes (Huttel et *al.*, 1975).

1.1.1. Biomasse

La masse totale des composés organiques produite par la quantité de CO₂ assimilés par la photosynthèse constitue la production primaire brute de la plante (Mbow, 2009). Autrement dit, l'assimilation de la matière organique par une communauté végétale pendant une certaine période, y compris la quantité utilisée par la respiration des plantes, est appelée production primaire brute (Newbould, 1967). Donc la production primaire brute (GPP) est un flux essentiel de l'échange net de CO₂ d'écosystème (NEE) entre l'atmosphère et les écosystèmes terrestres (Wang et *al.*, 2014).

La majorité des évaluations de la biomasse sont effectuées pour la biomasse aérienne d'arbres car cette biomasse représente généralement la plus grande fraction de la biomasse vivante totale (Vicharnakorn et *al.*, 2014). En effet, la biomasse aérienne des végétaux constitue le réservoir de carbone le plus important et le plus visible de l'écosystème forestier terrestre (Kuimi et *al.*, 2012). Elle est liée à de nombreux composants importants, tels que les cycles du carbone, la répartition des éléments nutritifs dans le sol et l'accumulation de combustible (Lu, 2005).

1.1.2. Stock de carbone

Le flux de carbone entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère par le biais du CO₂ est en équilibre entre deux processus majeurs : la production primaire nette et la respiration hétérotrophe (Gower et *al.*, 2001). La production primaire nette (NPP) constitue la masse de matière organique synthétisée par les plantes (Mbow, 2009). En effet, la production primaire nette (NPP) est le carbone net stocké en tant que nouveau matériel végétal dans un écosystème fournissant aux humains divers aliments, combustibles, fibres et matériaux de construction (Chapin et *al.*, 2002). C'est-à-dire la quantité de carbone retenue par la plante en soustrayant dans la quantité captée par la photosynthèse, celle perdue par la respiration (Decourt, 1973).

Donc la croissance des plantes et le stock de carbone dépendent de l'équilibre entre le gain de carbone par la photosynthèse et la perte de carbone par la respiration (Cheng et *al.*, 2000).

1.1.3. Relation entre biomasse et stock de carbone

Dans les écosystèmes forestiers, le carbone est stocké dans la biomasse vivante (biomasse aérienne et biomasse souterraine), le bois mort, la matière organique du sol et la litière (GIEC, 2003).

La production primaire brute (GPP) et celle nette (NPP) sont exprimées en taux, généralement en fonction de l'unité de mesure utilisée pour le carbone (par exemple tonnes C/ha/an). Le taux de croissance (ou de rendement) total des plantes dans un écosystème terrestre est pratiquement synonyme de NPP, car la production de biomasse est déjà prise en compte pour les dépenses respiratoires qui soutiennent la croissance et la maintenance des plantes (Gough, 2011). En effet, la production primaire nette (NPP) terrestre se caractérise comme la différence entre le gain de carbone via la productivité primaire brute (GPP) et la perte de carbone via les installations respiratoires (Zhu et *al.*, 2013). Ces dernières années, le NPP a été définie comme la plus grande circulation annuelle de carbone dans la biosphère, ce qui est un bon indicateur pour évaluer l'énergie ou la biomasse (GPP) des écosystèmes (Qin et *al.*, 2016).

En termes d'échange de gaz, la productivité primaire nette peut être définie comme :

$NPP = GPP - R_a$, où GPP (production primaire brute) est le carbone fixé pendant la photosynthèse et R_a est la respiration autotrophe (Field et *al.*, 1995).

1.2. Stock de carbone et occupation du sol

L'occupation du sol est définie comme une description du couvert biophysique du sol (la végétation et l'eau). L'utilisation du sol est définie comme une description du développement anthropique du territoire, par exemple l'agriculture et l'espace urbain (Chalifoux et *al.*, 2006). De façon plus approfondie, l'utilisation des terres fait référence aux arrangements, activités et intrants que les gens entreprennent dans un certain type de couverture terrestre pour produire, modifier ou maintenir cette couverture terrestre (FAO, 2013).

En fonction, des différentes formations végétales présentes sur le territoire, il existe une disparité spatiale dans les stocks de carbone. Cette variabilité peut être associée à des facteurs autogènes et allogènes (Banville, 2009) qui influencent les flux de CO₂ de façon spatiale et temporelle (Goodale et *al.*, 2002). En effet, l'utilisation des sols modifie la quantité de carbone stockée dans la biomasse végétale (Conti et *al.*, 2014). Des études indiquent que le changement de la couverture terrestre a des effets importants sur le stock de carbone. Une grande variabilité

a été notée dans les stocks totaux de carbone parmi les types de couverture terrestre avec des stocks élevés de carbone observés dans les forêts denses et des stocks faibles en carbone dans les terres cultivées et les sols nus (Solomon et *al.*, 2018).

La couverture de la végétation est un paramètre important dans la compréhension de la variabilité et du changement à long terme de la couverture terrestre (Zhou et *al.*, 2009). De nos jours, avec l'avènement de la télédétection, des ensembles de données sur la couverture terrestre sont développés en fonction de la capacité des capteurs satellitaires à distinguer différents types de couverture terrestre à l'aide de leurs signatures spectrales (Loveland et *al.*, 2000). Le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) qui est un outil utilisé en télédétection pour l'estimation du stock de carbone permet d'accentuer les différences entre les classes de végétation et les autres occupations des sols (Pelletier, 2017).

En combinant les changements d'utilisation des terres documentés par imagerie satellitaire avec des mesures de carbone basées sur le terrain et corrigées au fil du temps, des variations ont été observées en analysant les estimations de stocks totaux de carbone terrestre au Sénégal en fonction de l'utilisation des terres dans ses régions écologiques (Woomer et *al.*, 2004).

Il est à noter que les cartes d'occupation des sols constituent un outil essentiel pour l'aménagement du territoire ou l'analyse des impacts du changement climatique (Calvet et *al.*, 2017).

1.3. Notion de bilan carbone d'un écosystème

La teneur de l'atmosphère en CO₂ résulte d'un équilibre entre des processus biologiques (la photosynthèse et la respiration) et des processus physico-chimiques comme l'absorption et le rejet du CO₂ par les eaux des océans (Barnola et *al.*, 1987). Cependant, l'équilibre de sa teneur en CO₂ est modifié à l'échelle globale par les activités humaines, qui rejettent des quantités croissantes de CO₂ en brûlant des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et le bois des forêts défrichées pour l'agriculture ou le pâturage (Saugier, 1999).

Le cycle global du carbone comporte quatre grands compartiments : l'océan, l'atmosphère, les écosystèmes terrestres et les composés fossiles. Entre l'atmosphère et la biomasse terrestre se réalise un double flux (figure 1) : le carbone pénètre dans la biomasse par le processus de photosynthèse et retourne dans l'atmosphère par la respiration végétale et animale, par la décomposition et la respiration des microorganismes ainsi que par les activités humaines (Moureaux et *al.*, 2008).

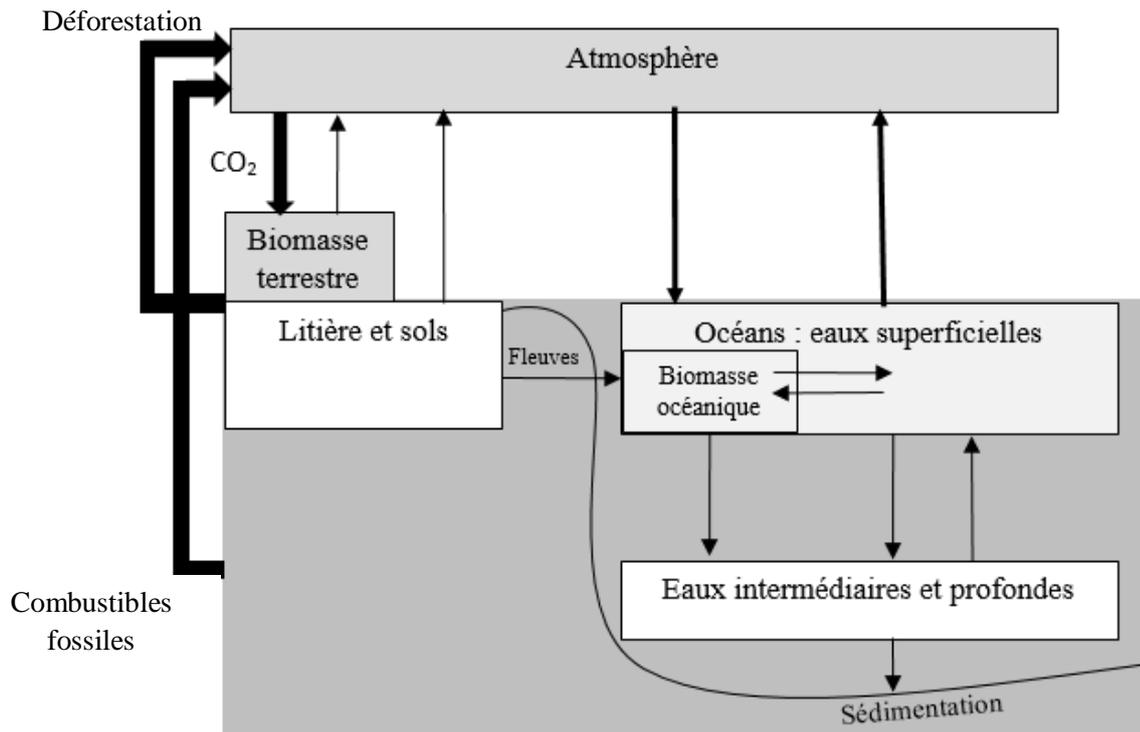


Figure 1 : Les principaux réservoirs de carbone à la surface de la Terre et les échanges de carbone qui existent entre ces réservoirs (Source : Saugier, 1999 modifié)

Selon le type d'écosystème, l'estimation du bilan de carbone doit tenir compte de tous les flux entrants et sortants de carbone dans le système. Ainsi la différence de ces flux permet d'obtenir le bilan de carbone de l'écosystème. La figure 2 ci-dessous représente les flux de CO_2 échangés entre une culture et l'atmosphère ainsi que son environnement et permet de mieux comprendre le bilan de carbone d'un écosystème.

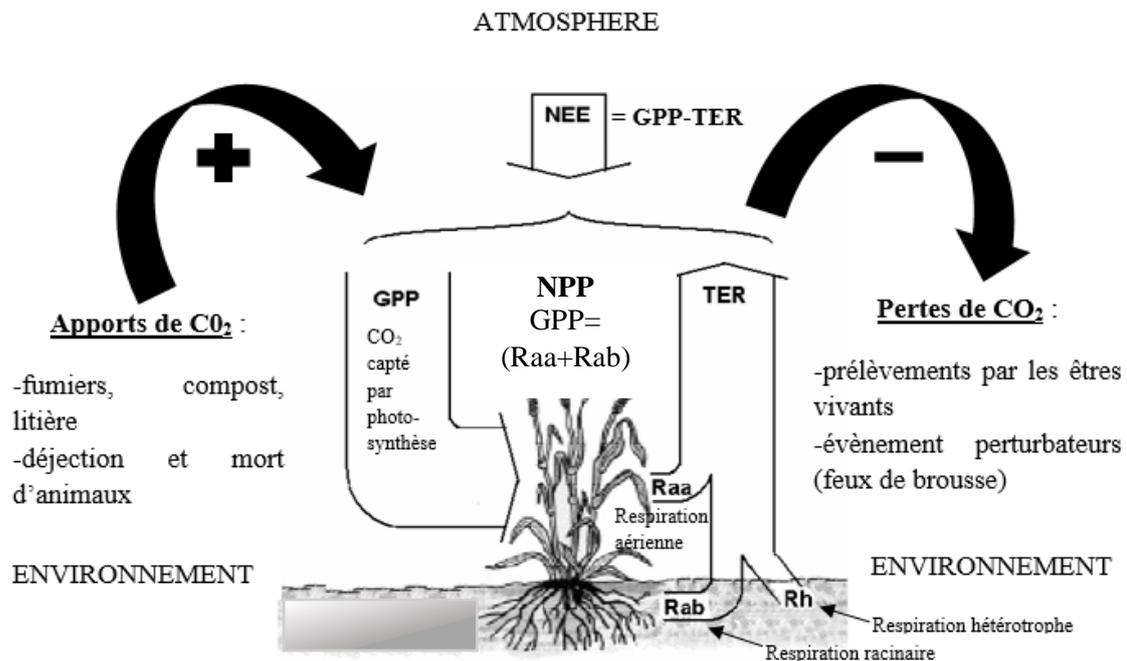


Figure 2 : Les flux de CO₂ échangés entre une culture et l'atmosphère ainsi que son environnement (Source : Moureaux et *al.*, 2008 modifié)

La respiration totale de l'écosystème (TER : *Total Ecosystem Respiration*) correspond au CO₂ libéré par les végétaux (Raa : respiration aérienne et Rab : respiration racinaire), le sol et les êtres vivants (Rh) (microfaune, petits mammifères). La différence entre ces deux flux opposés est appelée l'échange net de l'écosystème (NEE : *Net Ecosystem Exchange*) (Moureaux et *al.*, 2008). Néanmoins, en prairie (pâturée et/ou fauchée), les interventions culturales jouent un rôle primordial dans le bilan de carbone. Ces interventions induisent notamment des exportations (fauche, production de lait et de viande), des importations (fertilisation organique, compléments alimentaires au bétail) et des flux internes (flux liés au pâturage) de carbone.

1.4. Suivi du stock de carbone par télédétection

La télédétection fournit des observations cohérentes et systématiques de la végétation et des écosystèmes. Elle joue un rôle important dans la caractérisation de la structure de la végétation et dans l'estimation de la production primaire brute ou de la production primaire nette de forêts (Behrenfeld et *al.*, 2001). La télédétection a permis des avancées dans les domaines de la modélisation et de la cartographie des écosystèmes (Lefsky et *al.*, 2002).

1.4.1. Définition

La télédétection est un processus d'acquisition de donnée à distance d'un objet, d'une zone ou du stock de carbone dans une forêt en analysant les données à l'aide d'instruments sans être en contact avec l'objet ou la zone en cours d'examen (Vashum et *al.*, 2012).

Autrement dit, elle est aussi la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Elle suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet détecté (Bonn et *al.*, 1992).

1.4.2. Les capteurs

Un capteur désigne l'appareil qui enregistre le rayonnement électromagnétique venant du sol (Demathieu, 1973). A côté des capteurs avec de résolutions spatiales comprises entre 250 et 300 mètres tels que le *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)* des satellites américains Terra et Aqua, et le *Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS)* du satellite européen *ENVironment SATellite (ENVISAT)*, il existe des capteurs à très haute résolution spatiale tels que SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre), Pléiades, Quickbird, Ikonos ou encore WorldView (Pelletier, 2017).

1.4.2.1. Caractéristiques des capteurs

Selon Bonnet et *al.* (2011), les capteurs sont performants les uns des autres en fonction de leurs résolutions :

- La résolution spatiale qui définit le niveau de détail des objets cartographiés, correspond à la dimension des pixels constituant les éléments de base d'une image et conditionne la manière avec laquelle on perçoit le paysage. Ainsi, des pixels plus petits permettent d'appréhender des niveaux de détails plus fins (Pelletier, 2017). À l'inverse, des pixels plus grands vont gommer progressivement les détails présents dans une scène. Les valeurs des pixels représentent la réflectance (quantité de lumière réfléchie par la surface observée) mesurée par le capteur du satellite (Pelletier, 2017) ;
- La résolution radiométrique indique le niveau de séparation des différences selon l'énergie réfléchie. Elle est sensible à la structure de la végétation (taille de la couronne et la densité des arbres etc.) et est corrélée à la biomasse, en particulier dans les bandes infrarouges courtes (Laporte et *al.*, 2010) ;

- La résolution spectrale précise le nombre de bandes du spectre dans lesquelles le capteur peut mesurer l'énergie réfléchi. Les bandes du spectre correspondent à des gammes de longueurs d'onde précises dont le capteur est sensible ;
- Et la résolution temporelle correspond à la fréquence d'acquisition d'une image à un endroit donné selon la possibilité du satellite de répéter l'acquisition des données d'une même surface. Cette fréquence peut être journalière, hebdomadaire, mensuelle, etc.

1.4.2.2. Types de capteurs avec exemples

Les applications typiques de la télédétection impliquent soit des images de systèmes optiques passifs (Goward *et al.*, 1997), soit dans une moindre mesure, des capteurs radar actifs (Waring *et al.*, 1995). La qualité de la cartographie de la biomasse dépend fortement des types de capteurs utilisés (Optique, RADAR ou LIDAR), de la résolution spatiale et/ou temporelle des données de ces capteurs (Zolkos *et al.*, 2013). Toutefois, les données de télédétection ne permettent pas d'estimer directement la quantité de biomasse présente dans la végétation, mais mesurent plutôt d'autres caractéristiques, telles que la taille de la cime et la densité de la végétation, qui sont corrélées à la biomasse (Baccini *et al.*, 2004).

Les capteurs optiques dits passifs sont les plus utilisés par la télédétection spatiale et reposent sur la mesure du rayonnement solaire réfléchi dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge à courtes longueurs d'ondes par l'objet étudié (Frolking *et al.*, 2009). Il faut noter qu'une haute résolution spatiale des capteurs optiques augmente la précision des estimations de la biomasse (Panzou *et al.*, 2016).

Le capteur RADAR (*Radio Detection And Ranging*) étant actif, ce qui signifie qu'il transmet de l'énergie par micro-ondes capable de pénétrer dans la canopée de la forêt, mesure la quantité de cette énergie renvoyée vers le capteur. Il peut fonctionner jour et nuit lorsqu'ils pénètrent dans la brume, la fumée et les nuages (Goetz *et al.*, 2009). Cependant, le signal radar souffre de problèmes de saturation sur des sites forestiers à forte densité de biomasse, comme en forêts tropicales (Goetz *et al.*, 2009).

Le LIDAR (*Light Detection And Ranging*) est basé sur le concept de détection active de la végétation à l'aide d'une impulsion d'énergie mais il fonctionne avec des longueurs d'onde optiques (plutôt qu'avec des micro-ondes). Il ne pénètre pas dans les nuages et possède la capacité unique de mesurer la structure verticale tridimensionnelle de la végétation de manière très détaillée (Dubayah *et al.*, 2000). C'est un instrument embarqué dans des avions hélicoptères ou drones.

1.4.3. Les satellites

Les satellites sont les vecteurs au niveau desquels sont embarqués les capteurs dont leur altitude, le type et le plan de leur orbite ont une influence directe sur les données que fournissent les capteurs qu'ils transportent (Jaeger, 1987). Les données satellitaires peuvent fournir des informations réalistes sur la dynamique de la végétation, ce qui est utile pour réduire les incertitudes dans l'estimation du bilan carbone (Zhu et al., 2013). Les satellites sont soit géostationnaires (tournant à la même vitesse et dans le même sens que la terre), soit héliosynchrones c'est-à-dire passant à la même heure locale au-dessus d'un même point pour chaque prise de vue (Lepoutre et al., 1986).

Tableau 1 : Quelques satellites et leurs caractéristiques (Source : Catry et al., 2018)

| Satellite | Type | Fauchée | Bande spectrale / Polarisation | Résolution spatiale | Résolution temporelle |
|------------|---------|---------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Sentinel-1 | Radar C | 250 km | VV+VH | 10 m | 6 à 12 jours |
| Sentinel-2 | Optique | 290 km | 13 bandes | 10 à 60 m | 5 à 10 jours |
| ALOS | Radar L | 70 km | HH+HV | 10 à 20 m | 46 jours |
| Pléiades | Optique | 20 km | B-V-R-PIR-P | P : 0,5 m MS : 2 m | 1 à 7 jours |

P = Panchromatique (noir et blanc), MS = Multi-spectral (plusieurs bandes en couleur), B = bleu, V = vert, R = rouge, PIR = Proche Infra Rouge, VV = Verticale-Verticale, VH = Verticale-Horizontale, HH = Horizontale-Horizontale et HV = Horizontale-Verticale.

Tableau 2 : Quelques satellites et leurs résolutions spatiales (Source : Chehata, 2015)

| Satellite | Résolution (PAN) |
|----------------|------------------|
| Worldview 3 | 0,3 m |
| Pleiades 1a/1b | 0,5 m |
| Spot 6-7 | 1,5 m |
| RapidEye 1-5 | 5 m |
| Sentinel 2a | 10 m |
| Landsat 8 | 15 m |

1.4.4. Principe d'estimation de la biomasse et du stock de carbone

La biomasse, en général, comprend la masse vivante aérienne d'une part et celle souterraine d'autre part, dont les données de terrain sont difficiles à collecter (Lu, 2006). A cela s'ajoute que la biomasse aérienne stocke l'essentiel du carbone de l'arbre (Vashum et al., 2012). C'est

pourquoi la biomasse aérienne en corrélation avec les propriétés foliaires, la structure de la faille du couvert et les effets d'ombrage associés, etc., est utilisée pour la cartographie en utilisant l'imagerie optique passive (Cartus et *al.*, 2014).

Les estimations du stock de carbone (ou le NPP) et de la biomasse (ou le GPP) sont réalisées à partir de l'efficacité de l'utilisation de la lumière (LUE) (Field et *al.*, 1995), et sont obtenues par les formulations suivantes : **GPP = $\epsilon_g \times \text{FAPAR} \times \text{PAR}$; NPP = $\epsilon_n \times \text{FAPAR} \times \text{PAR}$**

Où PAR est le rayonnement incident photosynthétiquement actif (MJ m^{-2}) sur une période de temps (jour, mois), FAPAR est la fraction de PAR absorbée par le couvert végétal et ϵ (LUE, $\text{g C MJ}^{-1} \text{ PAR}$) est l'efficacité d'utilisation de la lumière (Xiao et *al.*, 2004). Le FAPAR est étroitement lié à l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (Ruimy et *al.*, 1994) et à l'indice de surface foliaire (LAI) (Ruimy et *al.*, 1999).

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) détecté à distance, est une mesure de substitution écologique du rayonnement absorbé photosynthétiquement actif (APAR) selon Myneni et *al.* (1995). Il a été largement utilisé pour l'estimation de la biomasse aérienne d'un couvert végétal, car pouvant refléter l'activité photosynthétique de la végétation (Xia et *al.*, 2014) et il fournit une mesure indiquant la vigueur de la végétation (Xie et *al.*, 2007). C'est un indicateur numérique en télédétection qui utilise les bandes visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique pour analyser, mesurer et évaluer si la cible observée contient de la végétation verte vivante ou non (Tiwari et *al.*, 2018). Il représente la fraction de sol couverte par des feuilles vertes et ses variations saisonnières permettent de différencier les principaux biomes (Robert et *al.*, 2003).

L'indice de surface foliaire (LAI) est une variable clé dans la réflectance du couvert de la végétation pouvant établir des modèles décrivant les processus de la biosphère (Soudani et *al.*, 2006). En effet, les canopées avec un LAI élevé reflètent plus que les canopées avec un LAI moyen ou bas (Adam et *al.*, 2010). Il est défini comme la surface totale unilatérale de toutes les feuilles de la canopée par unité de surface au sol (m^2/m^2). Ses informations sont utiles pour quantifier les caractéristiques d'échange d'énergie et de masse des écosystèmes terrestres, les productivités et rendements des cultures (Gong et *al.*, 2003).

1.5. Les feux

Pour qu'il y ait inflammation et combustion, trois facteurs (combustible, flamme ou étincelle et oxygène) doivent être réunis, chacun en proportions convenables (figure 3). Une végétation dans son intégralité, quel que soit son type, doit être considérée comme un combustible

potentiel. Les flammes peuvent en effet parcourir indifféremment la végétation vivante (branches, feuilles) ou morte (aiguilles, arbres morts), tout comme les infrastructures humaines implantées en zone forestière. La prédisposition de la végétation aux incendies est souvent liée à sa teneur en eau, elle-même déterminée par les conditions météorologiques.

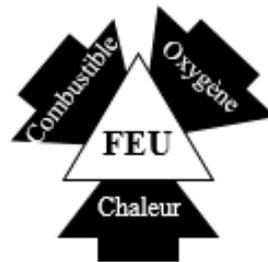


Figure 3 : Triangle du feu

Trois types de facteurs naturels favorisent le déclenchement et la propagation des incendies de forêt : les conditions météorologiques, l'état de la végétation et le relief. Les vents forts accélèrent le dessèchement des sols et des végétaux et favorisent la dispersion d'éléments incandescents lors d'un incendie. La chaleur dessèche les végétaux par évaporation et peut provoquer la libération d'essences volatiles, à l'origine de la propagation des flammes. L'état de la végétation, intervient comme facteur déclenchant, au regard de l'état de sécheresse, et du type d'espèces présentes. Le relief accélère la propagation du feu, par l'envol de flammèches et rend l'accès difficile aux équipes de lutte et de secours (Magnier, 2011). De même, la foudre est à l'origine de 4% à 7% des départs de feux, notamment en plein cœur des massifs et lors des mois les plus chauds de l'année.

Selon Magnier (2011), les événements déclenchant le feu peuvent être d'origine naturelle, comme la foudre, ou d'origine anthropique. Les origines des feux sont réparties en 5 catégories : les causes accidentelles (lignes électriques, chemin de fer, automobiles, dépôts d'ordure, accidents divers, reprise de feu), l'imprudence (par des jets de mégots, des pique-niques dans la nature ou des jeux d'enfants), la déprise agricole (le déclin des activités agricoles et pastorales et l'abandon des espaces ruraux), les travaux agricoles et forestiers, la malveillance, les loisirs et l'urbanisation.

Selon la FAO (2005), la destruction des forêts pour la conversion des terres à l'agriculture ou au pâturage représentent la principale contribution du secteur forestier à l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère. Ainsi la combustion de la biomasse végétale par les feux contribue à la

libération du carbone contenu dans les végétaux dans l'atmosphère. On estime que 750 millions d'hectares de savane sont brûlés chaque année, dont près de la moitié en Afrique.

Cependant, les écosystèmes forestiers méditerranéens sont fortement liés à la combustion et façonnés par le retour périodique du feu (Clément, 2005).

1.6. Définition de certaines notions

Forêt : Terres occupant une superficie de plus de 0,5 hectare avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à 5 mètres et un couvert forestier de plus de 10% (FAO, 2012).

Zone humide : Selon la Convention de Ramsar, une zone humide est une étendue de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres.

Selon la FAO :

- les steppes sont des formations herbeuses ouvertes, comportant un tapis herbacé discontinu et composées principalement d'espèces annuelles. Elles se distinguent de la savane par une végétation plus clairsemée, le remplacement des grands graminées par des graminées plus petites et la diminution du nombre d'espèces arborées et arbustives ;
- la savane arbustive est une formation à peuplement formée d'arbustes uniquement qui sont dispersés parmi le tapis graminéen ;
- et la Savane arborée/Savane boisée est une formation à peuplement constituée d'arbres et d'arbustes formant un couvert clair laissant largement passer la lumière. Au sol, les graminées sont peu abondantes et peuvent être mélangées à d'autres plantes suffrutescentes ou herbacées.

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

Le territoire sénégalais est compris entre 12°8 et 16°41 de latitude Nord et 11°21 et 17°32 de longitude Ouest. D'une superficie de 196 722 km², le Sénégal est limité au Nord par la Mauritanie, à l'Est par le Mali, au Sud par la République de Guinée ainsi que la Guinée Bissau et par l'Océan Atlantique sur une façade de 500 km. Dakar (550 km²), la capitale, est sa pointe Ouest (la presqu'île du Cap-Vert) et constitue la partie la plus occidentale de toute l'Afrique continentale. La Gambie forme une quasi-enclave dans le Sénégal, pénétrant à plus de 300 km à l'intérieur des terres.

C'est un pays plat aux sols variés. Trois fleuves traversent le pays d'Est en Ouest : le Sénégal (1 700 km) au nord, la Gambie au centre (750 km) et la Casamance (300 km) au sud.

Le climat tropical sec du Sénégal est caractérisé par deux saisons : une saison sèche de novembre à Mai et une saison des pluies de Juillet à Octobre. Les trois types de végétations suivantes sont rencontrés au Sénégal : la forêt au sud, la savane au centre et la steppe au nord. Du Nord au Sud se distinguent 6 grandes domaines de variation du climat tropical (figure 4).

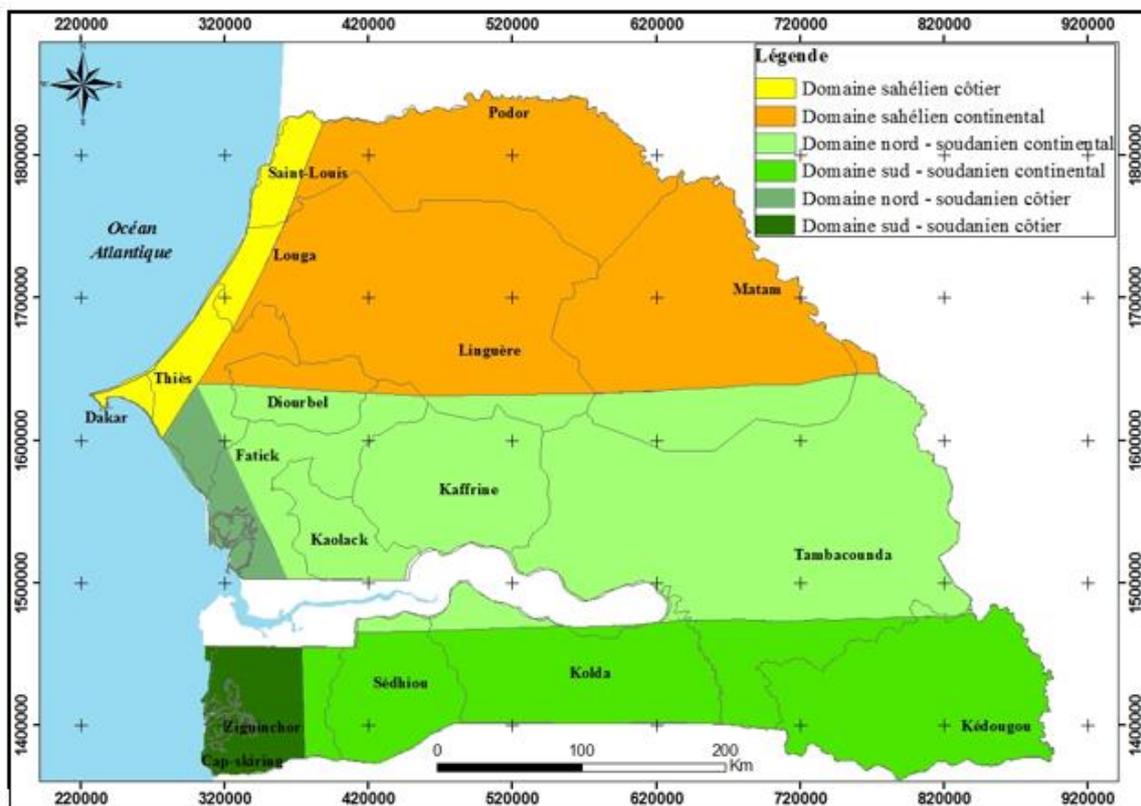


Figure 4 : Domaines climatiques du Sénégal (Sagna, 2008)

2.2. Les données satellitaires

Les images de productivité primaire nette (NPP) utilisées dans cette étude ont été téléchargées à partir du site de l'Université de Maryland suivant :

(http://files.ntsug.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD17/GeoTIFF/MOD17A3/GeoTIFF_30arcsec/). Ces images sont issues du capteur MODIS installé à bord des satellites Terra et Aqua. MODIS est l'un des principaux capteurs de surveillance mondiaux des satellites du Système d'Observation de la Terre (EOS) de la NASA. La plate-forme EOS-AM-TERRA embarquant le capteur MODIS a été lancée le 19 décembre 1999. Elle a commencé à fournir des produits de production primaire mondiaux (NPP et GPP) tous les 8 jours avec une résolution de 1 km sur une surface végétale de 109 782 756 km² depuis le 24 février 2000 (Zhao et al., 2006).

Tableau 3 : Spécifications techniques de MODIS (Source : Bourget et al., 2010)

| MODIS | |
|---------------------|----------------------------|
| Date de lancement | 18 décembre 1999 |
| Altitude | 705 km |
| Fauchée | 2 330 km |
| Répétitivité | 1 à 2 jours |
| Résolution spatiale | 250 m à 1 km |
| Bandes spectrales | 36 bandes spectrales |
| Radiométrie | 0,4 à 14,4 µm |
| dont : | B : 0,459 – 0,479 µm |
| | V : 0,545 – 0,565 µm |
| | R : 0,620 – 0,670 µm |
| | PIR : 0,841 – 0,876 µm |
| | MIR (1) : 1,230 – 1,250 µm |
| | MIR (2) : 1,628 – 1,652 µm |
| | MIR (3) : 2,105 – 2,155 µm |

2.3. Les données de l'occupation du sol

La carte d'occupation du sol du Sénégal est issue de la base de données du Centre Suivi Ecologique (CSE) de Dakar (Figure 5). Elle a été produite en collaboration avec l'Observatoire du Sahel et du Sahara (OSS) basé à Tunis (Tunisie) en 2015 (Atlas, 2015). La carte comporte plus d'une quinzaine de classes d'occupation du sol qui ont été agrégées à six classes pour les besoins de cette étude. Cependant, les classes dune et sol nu, n'ont pas été considérées car n'étant pas pertinentes pour cette étude. En effet, ces classes sont dépourvues de végétaux. Les superficies occupées par chaque classe d'occupation du sol au niveau du Sénégal sont représentées dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Classification de l'occupation du sol au Sénégal

| Classes d'occupation du sol originales | Classes d'occupation du sol agrégées | Superficies (ha) |
|--|--------------------------------------|------------------|
| Plantation forestière | Forêt | 322 835 |
| Forêt galerie | | |
| Forêt claire | | |
| Forêt dense | | |
| Tanne | Zone humide | 206 185 |
| Vasière | | |
| Mangrove | | |
| Plaine inondable | | |
| Prairie aquatique | | |
| Savane arbustive | Savane arbustive et arborée | 3 201 831 |
| Savane arborée | | |
| Savane boisée | Savane boisée | 3 838 015 |
| Steppe | Steppe | 2 986 697 |
| Culture pluviale | Zone de culture | 161 428 |
| Culture maraichère et irriguée | | |

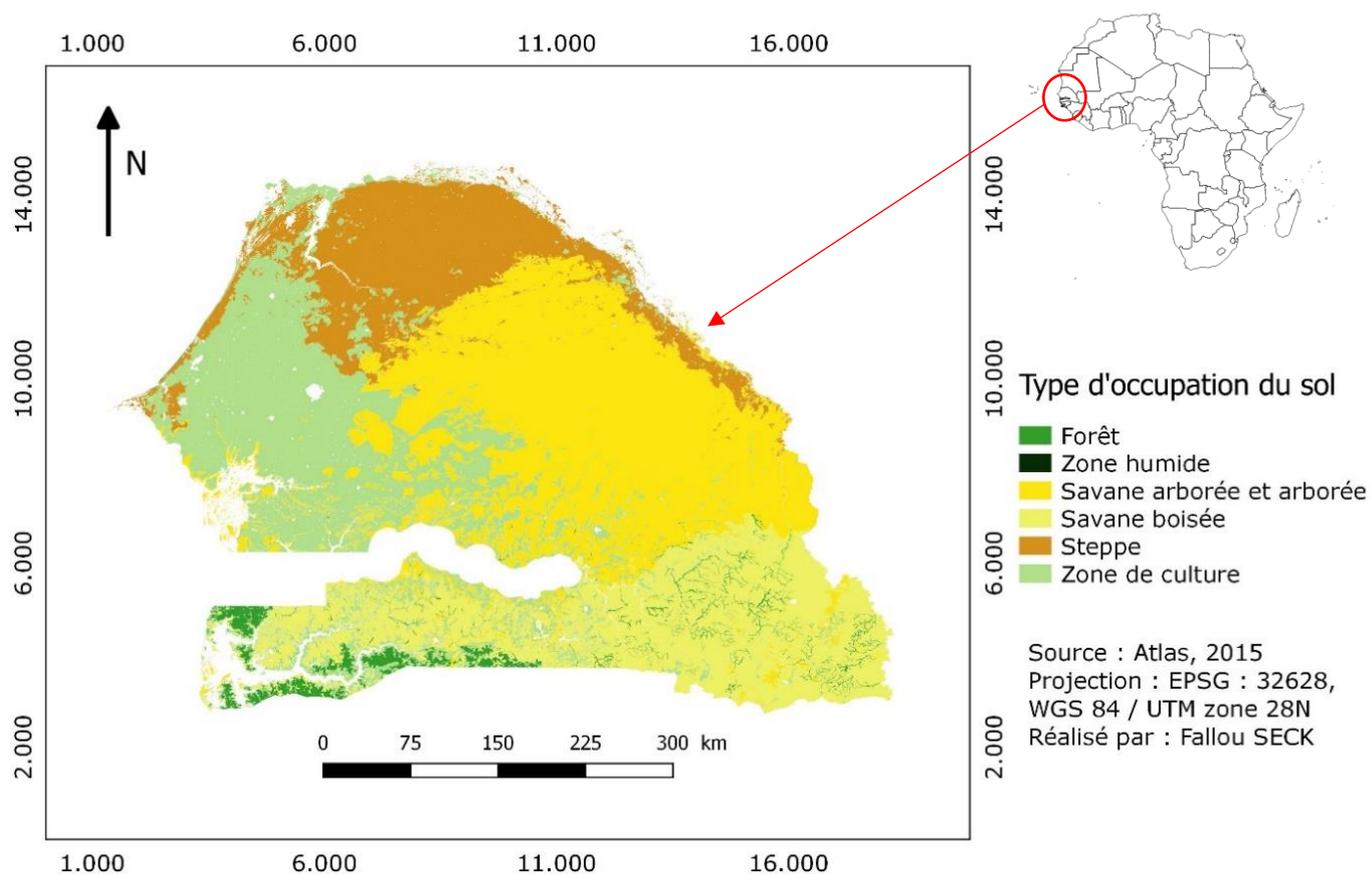


Figure 5 : Six (6) classes d'occupation du sol au Sénégal

2.4. Les données sur les feux

Les données sur les feux (figure 6) pour les années d'étude allant de 2000 à 2015 en ce qui concerne le Sénégal, ont été obtenues par le biais de l'Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique (NASA : *National Aeronautics and Space Administration*) directement à travers son site internet <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>.

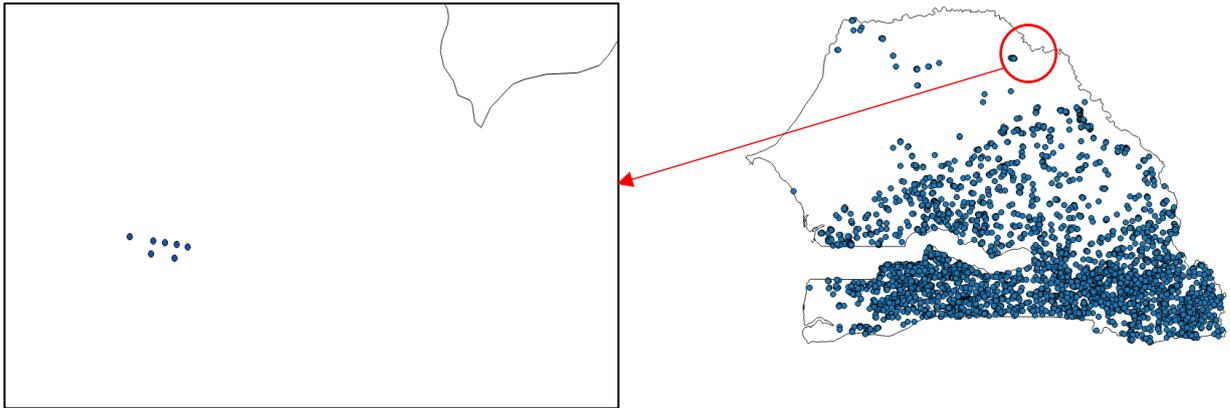
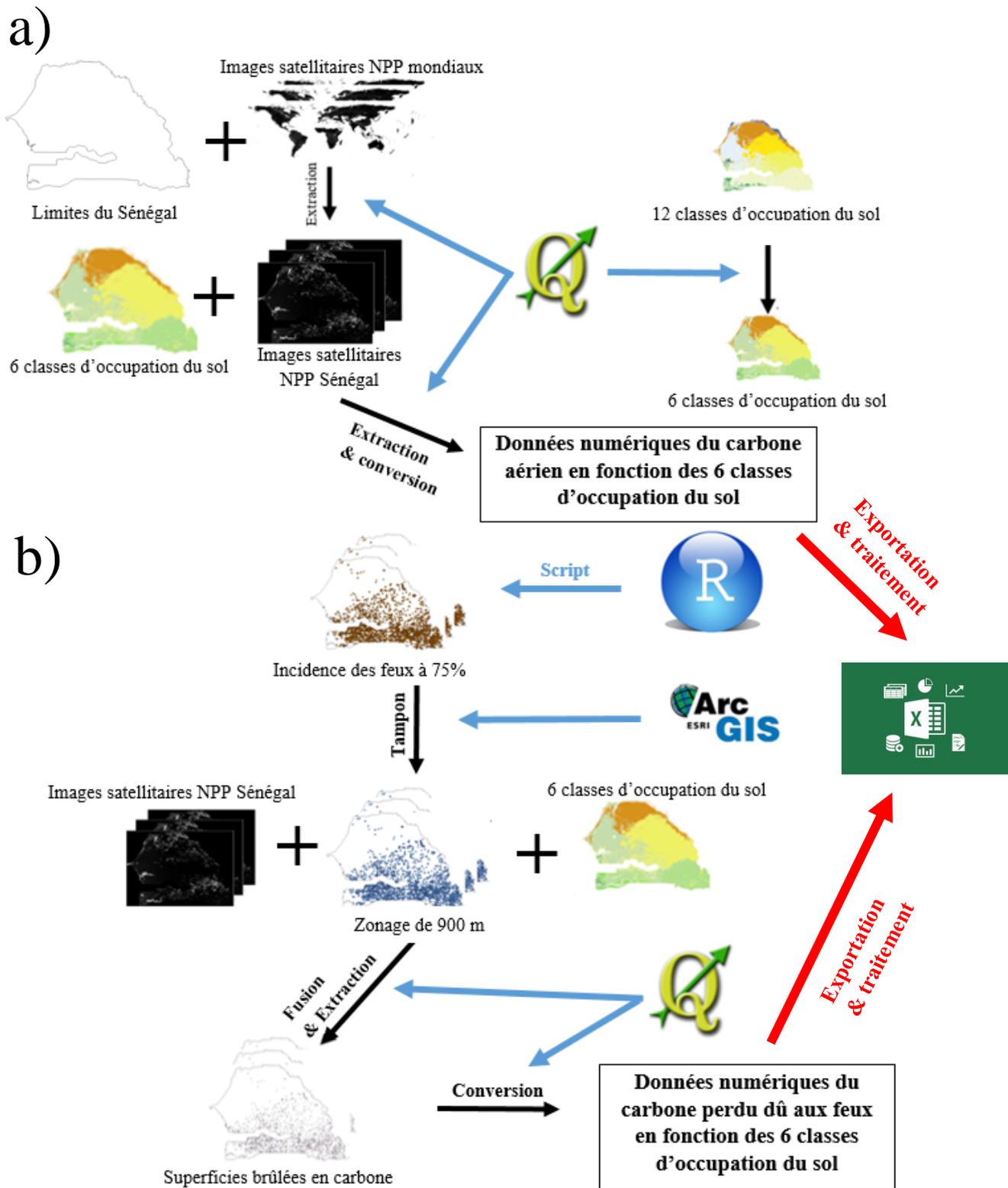


Figure 6 : Images satellitaires sur les feux au Sénégal en 2000 et 2015

2.5. Traitement des données

Le traitement des données satellitaires a été fait à l'aide de deux logiciels de Système d'Information Géographique que sont QGIS et ArcGIS ainsi que du logiciel R.

Les logiciels SIG (Système d'Information Géographique) ont permis l'extraction de la carte du Sénégal à partir des limites territoriales existantes au niveau des images satellitaires du globe terrestre qui concernaient le NPP (figure 7). Les données sur l'occupation du sol au Sénégal, ont fait l'objet d'une reclassification pour obtenir 6 classes. Ces logiciels ont aussi permis d'extraire les données sur le carbone (NPP) pour chaque année en fonction des classes d'occupations du sol. Quant au logiciel R, il a servi à traiter les données des feux au Sénégal. En effet, en appliquant un script, seuls les feux avec une incidence supérieure ou égale à 75 % ont été retenus pour cette étude. Les superficies brûlées par année ont été calculées pour chaque classe d'occupation du sol. En effet, une zone tampon de 900 m pour chaque point de feu a été appliquée. Par la suite, les zones se touchant ont été fusionnées entre elles déterminant ainsi approximativement les superficies brûlées. Enfin, les fichiers obtenus ont été utilisés pour extraire les données du carbone perdu à cause des feux pour chaque classe d'occupation du sol et cela à chaque année. Toutes les données statistiques ont été exportées sous Excel pour la réalisation de courbes et d'histogrammes.



- a) indique le traitement des données satellitaires
- b) montre le traitement des données sur les feux

Figure 7 : Schémas de la méthode utilisée lors de cette étude

CHAPITRE 3 : RESULTATS

3.1. Evolution de l'augmentation du carbone aérien de 2000 à 2015 au Sénégal

La quantité de carbone aérien la plus élevée est atteinte en 2012 avec 1 170 tC et la plus faible en 2002 avec 985 tC (figure 8). Une quantité de 1 078 tC est séquestrée en moyenne au Sénégal. Le carbone diminue en passant de 1 070 tC en 2000 à 985 tC en 2002. Avec 1 060 tC en 2003, le carbone aérien est passé à 1 153 tC en 2009 puis à 1 073 tC en 2011. En 2012, le carbone aérien emmagasiné augmente puis il baisse entre 2013 et 2014 (1 114 tC à 1 093 tC) pour ensuite connaître une augmentation en 2015 avec 1 142 tC.

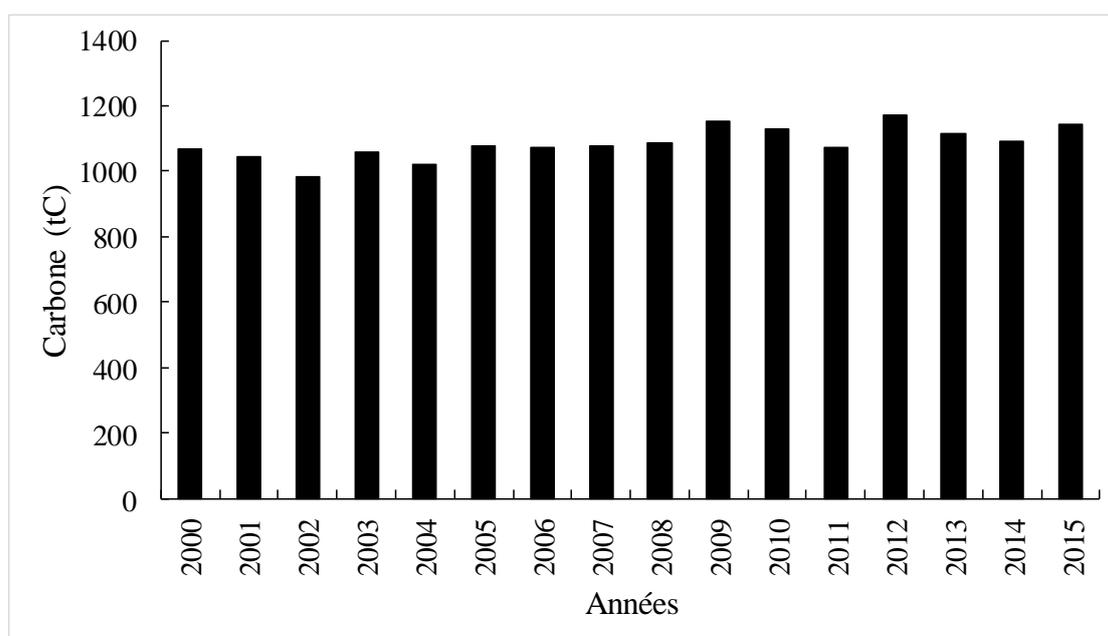


Figure 8 : Evolution de l'augmentation du carbone aérien entre 2000 et 2015 au Sénégal

Le carbone aérien le plus important est obtenu avec la classe savane arbustive et arborée avec 314 tC en 2012 (figure 9). Tandis que sa valeur la plus faible (28 tC) est atteinte sur la période 2002-2004 avec la classe forêt. Le carbone aérien d'une année à l'autre évolue très peu en ce qui concerne la zone humide et la forêt qui emmagasinent le moins de carbone par rapport aux autres classes avec en moyenne 32 tC. Il varie très peu aussi pour la steppe avec une moyenne de 250 tC. Tandis que, la savane boisée, arbustive et arborée ainsi que la zone de culture enregistrent des variations de carbone aérien. De plus, la savane arbustive et arborée possède une quantité de carbone aérien toujours supérieur aux autres types d'occupation du sol. En effet, le carbone aérien stocké évolue jusqu'à atteindre 300 tC en 2015.

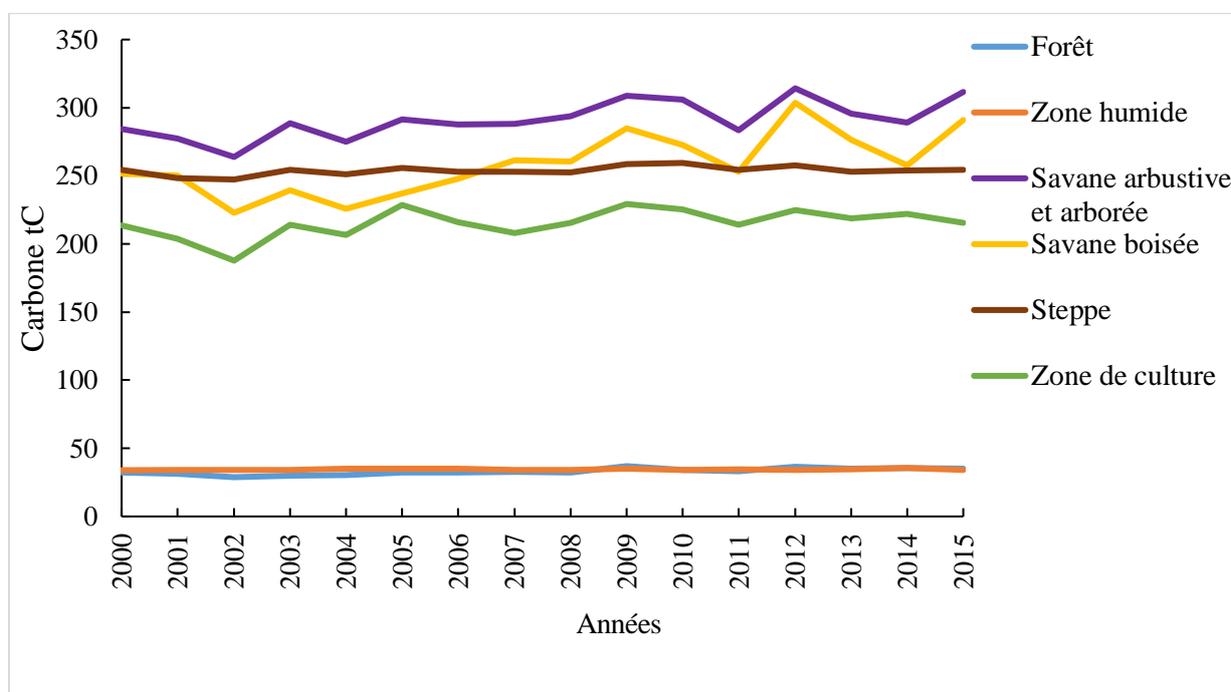


Figure 9 : Evolution de l'augmentation de carbone aérien en fonction de 6 classes d'occupation du sol de 2000 à 2015

La zone humide présente la densité de carbone aérien moyen la plus élevée (14 000 gC/m²) durant la période 2004-2007(figure 10). Alors que la savane arbustive et arborée ainsi que la zone de culture possèdent la plus faible avec 4 000 gC/m² enregistrée à la période 2000-2003. Egalement, la savane boisée et la forêt enregistrent une densité de carbone qui augmente légèrement à partir de la période 2004-2007 (5 000 gC/m²) jusqu'à la période 2012-2015 avec 6 000 gC/m². Cependant, les densités de carbone des autres classes d'occupation du sol évoluent très peu quelle que soit la période considérée.

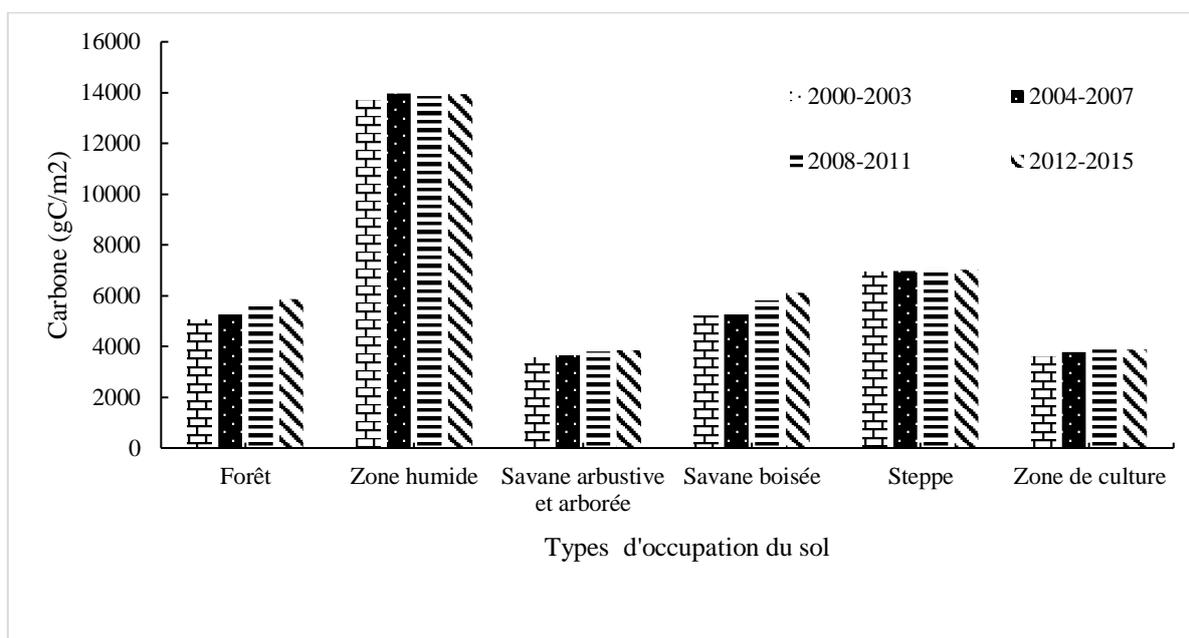


Figure 10 : Evolution de l'augmentation de la densité de carbone aérien moyen sur quatre périodes de 2000 à 2015 en fonction de 6 classes d'occupation du sol

3.2. Perte de carbone due aux feux de 2000 à 2015 au Sénégal

La perte de carbone la plus importante est de 107 tC en 2010 et la plus faible de 30 tC en 2001 (figure 11). En moyenne, une quantité de 69 tC est perdu du fait des feux au Sénégal. En effet, entre 2000 et 2002, la perte de carbone est inférieure à 60 tC. Mais, à partir de 2002, elle connaît une hausse jusqu'à atteindre plus de 90 tC en 2005. Ensuite, la quantité de carbone perdu diminue entre 2005 et 2009 pour atteindre 107 tC en 2010. Enfin, à partir de 2010, l'évolution de carbone perdu se présente en dent de scie pour atteindre une quantité de 80 tC en 2015.

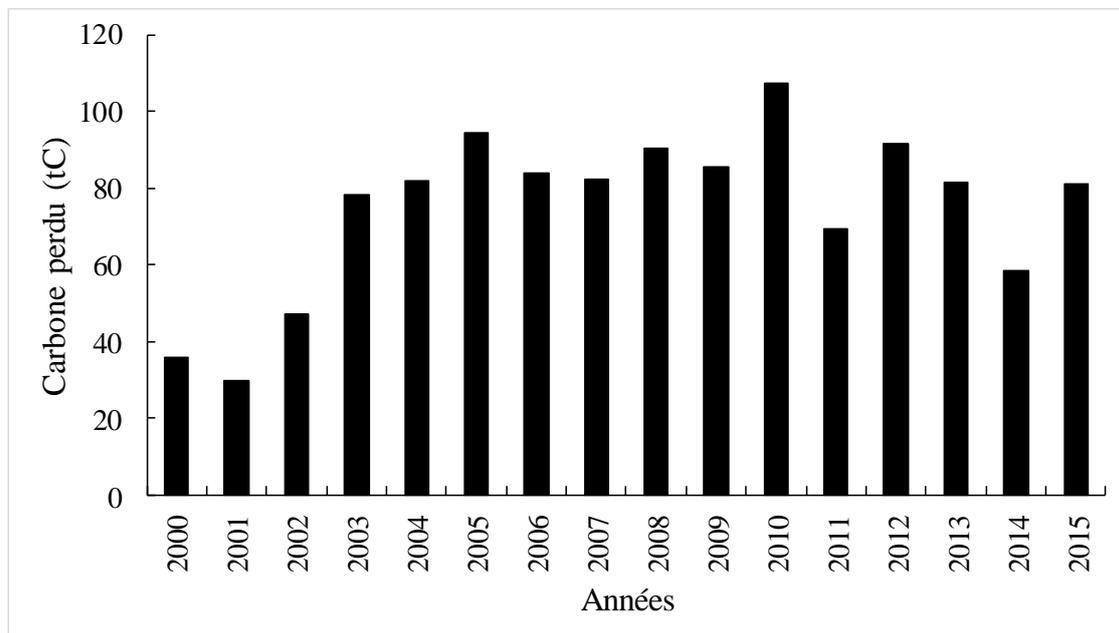


Figure 11 : Evolution de la quantité de carbone perdu due aux feux au Sénégal entre 2000 et 2015

La quantité de carbone perdue la plus importante est obtenue au niveau de la savane boisée avec 50 tC en 2012 (figure 12). Alors que la plus faible est atteinte avec les classes zone humide et steppe avec 0 tC. La savane boisée ainsi que celle arbustive et arborée représentent les deux classes au niveau desquelles quelle que soit l'année considérée, la quantité de carbone perdu est la plus élevée. Egalement, la steppe et la zone humide présentent de faibles quantités de carbone perdues durant toute la période d'étude considérée. En effet, la zone humide sur l'essentiel des années, n'a connu aucune perte de carbone causée par les feux. Cependant, deux pics en 2005 (7 tC) et 2010 (4,6 tC) sont notés en ce qui concerne la steppe. Quant à la forêt et à la zone de culture, on constate des fluctuations de quantité de carbone perdu qui sont comprises entre 2 tC et 10 tC.

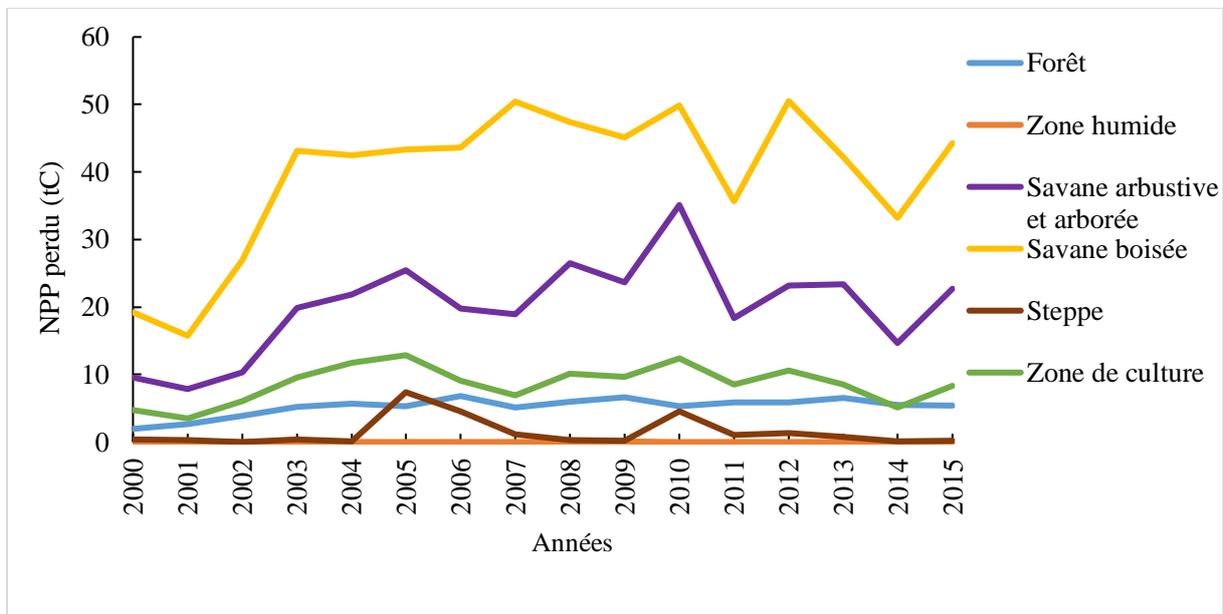


Figure 12 : Evolution de la quantité de carbone perdu due aux feux dans les 6 classes d'occupation du sol de 2000 à 2015

Sur la période 2012-2015, est atteinte la densité de carbone perdue la plus élevée avec la classe steppe (13 325 gC/m²). Par contre, la densité la plus faible est obtenue avec la classe zone humide (2 130 gC/m²) sur la période 2000-2003 (figure 13). De la période 2000-2003 à celle 2012-2015, pour les classes forêt, savane boisée, steppe et zone de culture, la densité de carbone perdu d'une période à l'autre augmente progressivement pour atteindre respectivement à la période 2012-2015 une quantité de 5 200 gC/m², 12 800 gC/m², 13 325 gC/m² et 5 000 gC/m². Néanmoins, la densité de carbone perdu la plus élevée est atteinte à la période 2004-2007 (5 600 gC/m²) pour la zone humide et à la période 2008-2011 (5 800 gC/m²) pour la savane arbustive et arborée.

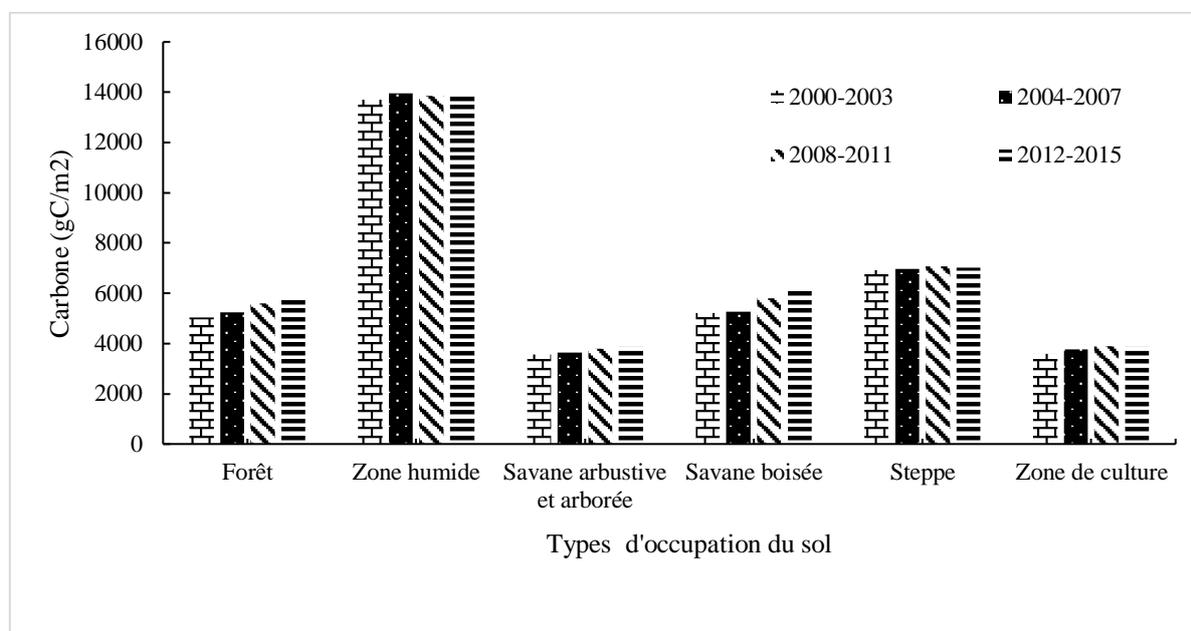


Figure 13 : Evolution de la densité de carbone moyen perdu à cause des feux sur quatre périodes de 2000 à 2015 en fonction de 6 classes d'occupation du sol

CHAPITRE 4 : DISCUSSION

Les résultats montrent que l'évolution de l'augmentation du carbone aérien stockée dans la zone humide et la forêt est peu significative d'une année à l'autre. En effet, une perte de surface annuelle est estimée entre 1 et 2 %, soit des taux égaux à supérieurs aux taux de disparition des récifs coralliens ou des forêts tropicales (FAO, 2003). Egalement, elles emmagasinent le moins de carbone par rapport aux autres classes avec en moyenne 32 tC. Cependant, la mangrove et les forêts tropicales représentent les écosystèmes terrestres les plus productifs au monde avec le NPP qui a été récemment estimé à près de $218 \pm 72 \text{ TgC.a}^{-1}$ (Bouillon *et al.*, 2008). Ces résultats obtenus pourraient s'expliquer par la faible superficie respective que les classes forêt et zone humide occupent par rapport aux autres. En effet, elles couvrent une superficie totale de 529 020 ha (soit 2,6 % du territoire national). Ces résultats sont corroborés par ceux d'André *et al.* (2018) qui stipulent que les mangroves stockeraient davantage de carbone dans leur sol et pour une plus longue durée. Les forêts stockent une quantité de carbone de près de 100 tC/ha dans le sol (Robert *et al.*, 2003).

La variation de carbone aérien notée au niveau de la savane boisée, de celle arbustive et arborée ainsi que de la zone de culture peut être liée à la variation du tapis herbacé au niveau de ces savanes et à celle du rendement des cultures au niveau de la zone de culture. Le développement du tapis herbacé et le rendement des cultures sont effectivement très liés à la pluviométrie. En effet, le climat est sujet à de fortes variabilités des précipitations dont les conséquences restent néfastes pour la production vivrière qui a évolué de 33,1 % du PIB béninois en 1995 à 34,9 % en 2000 et a progressivement diminué jusqu'à atteindre 32,6 % en 2008 (Djohy *et al.*, 2015). Faye *et al.* (2019) stipulent que les rendements des cultures pluviales vivrières comme les céréales ou de rente comme l'arachide sont étroitement liés aux facteurs climatiques et peuvent être négativement affectés.

La savane arbustive et arborée stocke une quantité de carbone aérien toujours supérieure aux autres types d'occupation du sol sur tout le long de la période d'étude considérée. Cela peut être dû à sa superficie importante de 3 201 831 ha (soit 16% du territoire national) et en dehors d'être constituée d'arbres et d'arbustes, on y retrouve une forte densité de graminées. En effet, les graminées constituent de grands réservoirs potentiels de carbone (Trumbmore *et al.*, 1995). Cependant, d'après Kombate *et al.* (2019) la séquestration du stock de carbone est estimée à 16,39 tC/ha pour les Agro forêts, 12,64 tC/ha pour les forêts denses semi-décidues/galeries forestières et 6,44 tC/ha pour les savanes arborées/arbustives.

La zone humide présente l'augmentation de la densité de carbone moyen la plus élevée (14 000 gC/m²). Alors que la savane arbustive et arborée ainsi que la zone de culture possèdent la plus faible avec 4 000 gC/m². Ceci peut se justifier par la formation de chacune de ces deux classes. En effet, la mangrove qui est une zone humide, est constituée de palétuviers qui sont entrelacés entre eux. Tandis que la savane est constituée de quelques arbres dispersés avec un vaste tapis herbacés qui emmagasine environ 70 tC/ha dans le sol (Trumbmore et *al.*, 1995). Les savanes sahéliennes sont caractérisées par une prédominance de végétaux épineux et sont nettement plus pauvres en végétaux ligneux (Lubalega, 2016). Les fortes densités de propagules vont jusqu'à 70/m² pour des mangroves à *Rhizophora* et 330/m² pour des mangroves à *Avicennia* (Jiménez et *al.*, 1985). Malgré la mort de plusieurs d'entre eux dû à la compétition pour l'espace, impliquant une baisse de la densité en individus, la croissance des individus restants permet un stockage de plus en plus affirmé de biomasse jusqu'à la phase de maturité (Leopold, 2012).

Les savanes boisée et arbustive et arborée représentent les deux classes au niveau desquelles quelle que soit l'année considérée, la quantité de carbone perdu est la plus élevée. En raison de l'aridité générale de ces savanes, des incendies peuvent se produire à tout moment, à condition qu'il y ait une source d'inflammation (Hodgkinson et *al.*, 1984). Quant à la zone humide, aucune perte de carbone due aux feux n'a été enregistrée durant toute la période d'étude considérée. Les mangroves en tant que zones humides, sont des forêts marécageuses littorales colonisant les zones côtières de transition entre les milieux terrestres et marins (Baltzer et *al.*, 1971). La forêt et la zone de culture connaissent des fluctuations dans la quantité de carbone perdu au cours de ces 16 années d'étude considérée et sont comprises entre 2 tC et 10 tC. Cela pourrait être dû au fait que le feu est utilisé pour éliminer la biomasse lors du défrichage des terres destinées à l'agriculture, ou, après la culture, pour se débarrasser des résidus agricoles indésirables (Frost, 1998).

De la période 2000-2003 à celle 2012-2015, pour les classes forêt, savane boisée, steppe et zone de culture, la densité de carbone perdu d'une période à l'autre augmente progressivement pour atteindre respectivement à la période 2012-2015 une quantité de 5 200 gC/m², 12 800 gC/m², 13 325 gC/m² et 5 000 gC/m². Cette situation pourrait s'expliquer par l'effet bénéfique des feux qui favorisent une bonne régénération de la végétation (Ouadah et *al.*, 2016).

CONCLUSION

L'objectif de ce travail était d'une part l'évaluation de l'augmentation du carbone aérien et d'autre part l'évaluation de la quantité de carbone perdu due aux feux sur l'ensemble du territoire sénégalais puis en fonction des types d'occupations du sol sur la période allant de 2000 à 2015. Les outils cartographiques utilisés associés à des logiciels statistiques ont permis de montrer que l'augmentation du carbone aérien au niveau du Sénégal connaît des fluctuations qui sont comprises entre 985 tC et 1 170 tC. En fonction des 6 classes d'occupation du sol, l'augmentation du carbone aérien d'une année à l'autre varie très peu pour la zone humide et la forêt qui stockent le moins de carbone aérien par rapport aux autres classes avec en moyenne 32 tC. Cependant, la savane arbustive et arborée emmagasine une quantité de carbone aérien toujours supérieure à celle des autres types d'occupation du sol sur tout le long de la période d'étude considérée. En effet, le carbone aérien évolue jusqu'à atteindre 300 tC en 2015. En ce qui concerne l'augmentation du carbone moyen, la zone humide présente la densité de carbone moyen la plus élevée (14 000 gC/m²). Alors que la savane arbustive et arborée ainsi que la zone de culture possèdent la plus faible densité de carbone moyen avec entre 4 000 gC/m². La quantité de carbone perdue à cause des feux au niveau du Sénégal varie très fortement entre 30 tC et 107 tC. En fonction des classes, elle est la plus élevée au niveau de la savane boisée ainsi que celle arbustive et arborée quelle que soit l'année considérée. Egalement, la zone humide sur l'essentiel des années, n'a connu aucune perte de carbone causée par les feux. La densité moyenne de carbone perdu due aux feux augmente à chaque période pour les classes forêt, savane boisée, steppe et zone de culture pour atteindre respectivement à la période 2012-2015 une quantité de 5 200 gC/m², 12 800 gC/m², 13 325 gC/m² et 5 000 gC/m².

En perspective, ce travail peut être complété en calculant le bilan carbone selon les normes internationales en vigueur qui stipulent que ce calcul doit tenir compte :

- des pertes de carbone dues aux abattages de bois rond commercial et à la collecte de bois de feu ;
- des diminutions de carbone dues aux autres pertes (perturbations) ;
- de la variation annuelle des stocks de carbone de la matière organique morte (bois mort et litière) ;
- de la variation annuelle des stocks de carbone des sols.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adam E., Mutanga O. et Rugege D., 2010.** Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation : a review. *Wetlands Ecol Manage* **18**, pp. 281-296.
- André S., Twilley R. R., Castañeda-Moya E., Riul P., Cifuentes-Jara M., Manrow-Villalobos M., Horta P. A., Simonassi J. C., Fonseca A. L. et Pagliosa P. R., 2018.** Global controls on carbon storage in mangrove soils. *Nature Climate Change*, **8** (6), pp. 534-538.
- Baccini A., Friedl M. A., Woodcock C. E. et Warbington R., 2004.** Forest biomass estimation over regional scales using multisource data. *Geophysical Research Letters*, **31**, pp. 1-4.
- Baccini A., Laporte N., Goetz S. J., Sun M. et Dong H., 2008.** A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery. *Environ. Res. Lett.*, **3**, pp. 1-9.
- Baltzer F. et Lafond L. R., 1971.** Marais maritimes tropicaux. *Rev. Geogr Phys. Géol. Dyn.*, **2**, pp. 173-196.
- Banville J. L., 2009.** Caractérisation des stocks de carbone de 5 types de formations végétales dans un secteur du bassin versant de la rivière Eastmain, baie James. Mémoire de master en Géographie université du Québec à Montréal, pp. 12-136.
- Barnola J. M., Raynaud D., Korotkevitch Y. S., Lorius C., 1987.** Vostok ice cores provides 160,000- year record of atmospheric CO₂. *Nature*, **329**, pp. 408-414.
- Behrenfeld M. J., Randerson J. T., McClain C. R., Feldman G. C., Los S. O., Tucker C. J., Falkowski P. G., Field C. B., Frouin R., Esaias W. E., Kolber D. D. et Pollack N. H., 2001.** Biospheric primary production during an ENSO transition. *Science*, **291**, pp. 2594-2597.
- Bonn F. et Rochon G. 1992.** *Précis de télédétection : principes et méthodes*. Québec : UREF/AURELF/ Presses de l'Université de Québec, p. 485.
- Bonnet S., Toromanof F., Fourneau F. et Lejeune P., 2011.** Principes de base de la télédétection et ses potentialités comme outil de caractérisation de la ressource forestière. I. Images aériennes et satellitaires. *Forêt Wallonne*, **11** 4, pp 45-56.
- Bouillon S., Borges A. V., Castaneda-Moya E., Diele K., Dittmar T., Duke N. C., Kristensen E., Lee S. Y., Marchand C., Middelburg J. J., Rivera-Monroy V. H., Smith III**

- T. J. et Twilley R. R., 2008.** Mangrove production and carbon sinks : a revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, **22**, pp. 1-12.
- Bourget E. et Dû-Blayo L., 2010.** Définition d'unités paysagères par télédétection en Bretagne : méthodes et critiques. *Territoire, Paysage, Anthropisation, Perception, Conservation, Restauration*, **216** (3), pp. 69-83.
- Calvet J-C., Ceschia E., Courault D., Dewaele H., Goulas Y., Inglada J., Le Toan T. et Maignan F., 2017.** Observation de la végétation depuis l'espace. *La Météorologie*, **97**, pp. 86-93.
- Cartus O., Kellndorfer J., Walker W., Franco C., Bishop J., Santos L. et Fuentes J. M. M., 2014.** A national, detailed map of forest aboveground carbon stocks in Mexico. *Remote Sens.*, **6**, pp. 5559-5588.
- Catry T., Pottier A., Marti R., Li Z., Roux E., Herbreteau V., Mangeas M., Demagistri L., Gurgel H. et Dessay N., 2018.** Apports de la combinaison d'images satellites optique et RADAR dans l'étude des maladies à transmission vectorielle : cas du paludisme à la frontière Guyane française - Brésil. *Confins*, **37**, pp. 23-29.
- Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C., Latifovic R. et Fernandes R., 2006.** Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire landsat en hydrogéologie. *Télédétection*, **6** (1), pp. 9-17.
- Chapin F. S., Matson P. A., Mooney H. A. et Chapin M.C., 2002.** *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer-Verlag. New York, NY, p. 398.
- Chehata N., 2015.** Place du drone aéroporté dans l'offre «Très Haute Résolution Spatiale». *African Association for Geospatial Development (AGEOS)*, pp. 1-31.
- Cheng W., Sims D. A., Luo Y., Coleman J. S. et Johnson D. W., 2000.** Photosynthesis, respiration, and net primary production of sunflower stands in ambient and elevated atmospheric CO₂ concentrations: an invariant NPP : GPP ratio? *Global Change Biology*, **6**, pp. 931-941.
- Clément V., 2005.** Les feux de forêt en Méditerranée : un faux procès contre nature, *L'espace géographique*, **4**, pp. 288-303.
- Conti G., Pérez-Harguindeguy N., Quétier F., Gorné L. D., Jaureguiberry P., Bertone G. A., Enrico L., Cuchietti A. et Díaz S., 2014.** Large changes in carbon storage under different

land-use regimes in subtropical seasonally dry forests of southern South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **197**, pp. 68-76.

Decourt N., 1973. Production primaire, production utile : méthodes d'évaluation, indices de productivité. *Ann. Sci. Forest.*, **30** (3), pp. 219-238.

Demathieu P., 1973. Les données de la télédétection. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, **411**, pp. 697-699.

Djohy G. L., Edja A. H. et Nouatin G. S., 2015. Variation climatique et production vivrière : la culture du maïs dans le système agricole péri-urbain de la commune de Parakou au Nord Bénin. *Afrique Science*, **11** (6), pp. 183-194.

Dubayah R. O. et Drake J. B., 2000. Lidar remote sensing for forestry. *Journal of Forestry*, **98**, pp. 44-46.

FAO, 2003. Status and trends in mangrove area extent worldwide. By Wilkie M. L. and Fortuna S. Forest resources assessment working paper, 63. Forest Resources Division. FAO, Rome, Italy, p. 340.

FAO, 2005. Évaluation des Ressources Forestières Mondiales 2005 (FRA) : Progrès vers la gestion forestière durable. Etude FAO : Forêts 147, Rome, Italie, p. 351.

FAO, 2012. Termes et Définitions. Le Programme d'évaluation des ressources forestières. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie, p. 54.

FAO, 2013. The state of the world's land and water resources for food and agriculture. Managing systems at risk. Summary Report. Rome, Italy, p. 47.

Faye A., Camara I., Noblet M. et Mboup S., 2019. Evaluation de la vulnérabilité du secteur de l'agriculture à la variabilité et aux changements climatiques dans la région de Fatick. Report produced under the project "Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne". Climate Analytics, Berlin, p. 100.

Field C. B., Randerson J. T. et Malmstrom C. M., 1995. Global net primary production-combining ecology and remote-sensing. *Remote Sensing of Environment*, **51**, pp. 74– 88.

Frolking S., Palace M. W., Clark D. B., Chambers J. Q., Shugart H. H. et Hurtt G. C., 2009. Forest disturbance and recovery : A general review in the context of spaceborne remote

sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure. *Journal of Geophysical Research*, **114**, pp. 1-28.

Frost P. G. H., 1998. Origines, impacts, effets et maîtrise du feu dans les zones boisées d'Afrique Australe. Réunion de la FAO sur les politiques nationales ayant une incidence sur les incendies de forêts. Rome, Italie, pp. 1-4.

GIEC, 2003. Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan, p. 381.

Goetz S. J., Baccini A., Laporte N. T., Johns T., Walker W., Kelldorfer J., Houghton R. A. et Sun M., 2009. Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations : a comparison of methods. *Carbon Balance and Management*, **4** (2), pp. 1-44.

Gong P., Pu R., Biging G. et Larrieu M. R., 2003. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from hyperion hyperspectral data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sen.*, **41**, pp. 1355-1362.

Goodale C. L., Apps M. J., Birdsey R. A., Field C. B., Heath L. S., Houghton R. A., Jenkins C., Kohlmaier G. H., Kurz W., Liu S., Nabuurs G. J., Nilson S. et Shvidenko A. Z., 2002. Forest carbon sinks in the northern hemisphere. *Ecological Applications*, **12** (3), pp. 891-899.

Gough C. M., 2011. Terrestrial primary production : fuel for life. *Nature Education Knowledge*, **3** (10), pp. 1-28.

Goward S. N. et Williams D. L., 1997. Landsat and earth system science: Development of terrestrial monitoring. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **63**, pp. 887-900.

Gower S. T., Krankina O., Olson R. J., Apps M., Linder S. et Wang C., 2001. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. *Ecological Applications*, **11** (5), pp. 1395-1411.

Hodgkinson K. C., Harrington G. N., Griffin G. F., Noble J. C. et Young M. D., 1984. Management of vegetation with fire. In : Harrington G. N., Wilson A. D. et Young M. D., eds., *Management of Australia's Rangelands*, pp. 141-156.

Huttel C. et Bernhard R. F., 1975. Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire : 5-Biomasse végétale et productivité primaire : Cycle de la matière organique. *La Terre et la Vie. Revue d'Ecologie Appliquée*, **29** (2), pp. 203-228.

- Jaeger M. C., 1987.** La télédétection satellitaire au service de la géographie : son exploitation et ses limites actuelles. *Revue de Géographie Alpine*, **75-** (3), pp. 263-284.
- Jimenez J. A., Lugo A. E. et Cintron G., 1985.** Tree mortality in mangrove forests. *Biotropica*, **17** (3), pp. 177-185.
- Kombate B., Dourma M., Folega F., Woegan A. Y., Wala K. et Akpagana K., 2019.** Structure et potentiel de séquestration de carbone des formations boisées du Plateau Akposso en zone sub-humide au Togo. *Afrique Science*, **15** (2), pp. 70-79.
- Kuimi T., Vashum K. T., et Jayakumar S., 2012.** Methods to Estimate Above-Ground Biomass and Carbon Stock in Natural Forests. *Journal of Ecosystem & Ecography*, **2** (4), pp. 1-7.
- Laporte N., Baccini A., Goetz S., Mekui P. et Bausch A., 2010.** Une première estimation de la biomasse ligneuse aérienne sur la base d'images satellites et d'inventaire forestiers. *Proceeding of the Conference on Carbon Stock and Fluxes, COMIFAC, Brazzaville*, pp. 58-65.
- Lefsky M. A., Cohen W. B., Parker G. G. et Harding D. J., 2002.** Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*, **52** (1), pp. 19-30.
- Lefsky M. A., Harding D. J., Keller M., Cohen W. B., Carabajal C. C., Del Bom Espirito-Santo F., Hunter M. O. et Raimundo de Oliveira Jr., 2006.** Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical Research Letters*, **32**, pp. 1-16.
- Leopold A., 2012.** Dynamique du carbone au sein des mangroves : Quantification spatio-temporelle des flux de CO₂ aux interfaces sol-air et eau-air. Thèse de doctorat de l'université de la Nouvelle-Calédonie, France, p. 214.
- Lepoutre D., Leprieur C. et Peyron J. L., 1986.** Télédétection et forêts : situation actuelle en Suède et perspectives pour la France. *Resources for the Future*, **38** (4), pp. 385-393.
- Loveland T. R., Reed B. C., Brown J. F., Ohlen D. O., Zhu Z., Yang L. et Merchant J. W., 2000.** Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, **21**, pp. 1303-1365.
- Lu D., 2005.** Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, **26**, (12), pp. 2509-2525.

- Lu D., 2006.** The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, **27** (7), pp. 1297-1328.
- Lubalega T., 2016.** Évolution naturelle des savanes mises en défens à Ibivillage, sur le plateau des Bateke, en République Démocratique du Congo. Thèse de doctorat de l'université de Kinshasa, République Démocratique du Congo, p. 151.
- Magnier C., 2011.** Le risque de feux de forêts en France. *Études & documents*, **45**, pp. 8-10.
- Malatesta L., Attorre F., Altobelli A., Adeeb A., Sanctis M. D., Taleb N. M., Scholte P. T. et Vitale M., 2013.** Vegetation mapping from high-resolution satellite images in the heterogeneous arid environments of Socotra Island (Yemen). *Journal of Applied Remote Sensing*, **7**, pp. 1-21.
- Mbow C, 2009.** Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano- guinéennes du Sénégal. Thèse de doctorat de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, pp. 12-29.
- Mokany K., Raison J. R., Prokushkin A. S., 2006.** Critical analysis of root-shoot rations in terrestrial biomes. *Glob. Chang. Biol.*, **12**, pp. 84-96.
- Moureaux C., Bodson B. et Aubinet M., 2008.** Mesure des flux de CO₂ et bilan carboné de grandes cultures : état de la question et méthodologie. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **12** (3), pp. 303-315.
- Myneni R. B., Hall F. G., Sellers P. J. et Marshak A. L., 1995.** The interpretation of spectral vegetation indices. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **33**, pp. 481-486.
- Newbould P. J., 1967.** *Methods for estimating the primary production of forests.* Blackwell Scientific Publications. 2e éd. London, IBP Handbook, p.37.
- Ouadah N., Kadik L., Bendjedda N. et Kaabèche M., 2016.** Impact du feu sur la stratégie de régénération d'espèces végétales forestières méditerranéennes. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, **71** (4), pp. 356-366.
- Panzou G. J. L., Doucet J-L., Loumeto J-J., Biwole A., Bauwens S. et Fayolle A., 2016.** Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **20** (4), pp. 508-522.

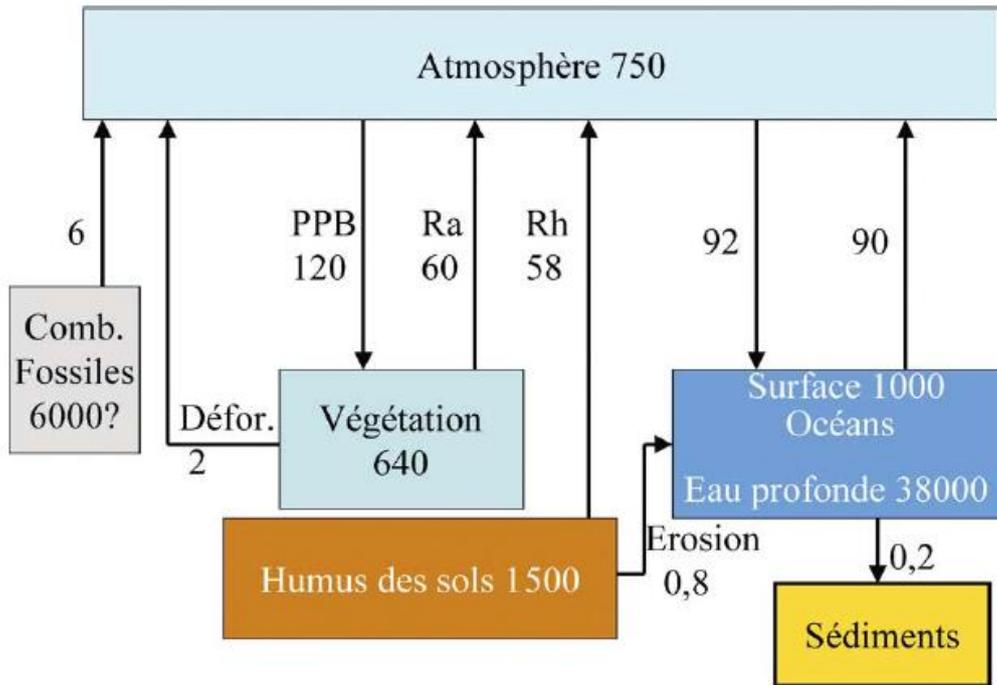
- Paylor E. D., Kaye J. A., Johnson A. R. et Maynard N. G., 1999.** Earth science enterprise : science and technology for society. *Earth Observation Magazine*, **8** (3), pp. 8-12.
- Peichl M. et Arain M. A., 2007.** Allometry and partitioning of above and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. *Forest Ecology and Management*, **253**, pp. 68-80.
- Pelletier C., 2017.** Cartographie de l'occupation des sols à partir de séries temporelles d'images satellitaires à hautes résolutions. Thèse pour l'obtention du diplôme de doctorant à l'université de Toulouse, (France), p. 203.
- Peltier R., Forkong C. N., Ntoupka M., Manlay R., Henry M. et Vincent Morillon, 2007.** Évaluation du stock de carbone et de la productivité en bois d'un parc à karités du Nord-Cameroun. *Bois et forêts des tropiques*, **294** (4) pp. 1-86.
- Qin X., Sun J., Liu M. et Lu X., 2016.** The impact of climate change and human activity on net primary production in Tibet. *Pol. J. Environ. Stud.*, **25** (5), pp. 2113-2120.
- Robert M. et Saugier B., 2003.** Géophysique externe climat et environnement (Climat) : Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *C. R. Geoscience*, **335**, pp. 577-595.
- Ruimy A., Kergoat L. et Bondeau A., 1999.** Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP) : Analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. *Global Change Biology*, **5**, pp 56-64.
- Ruimy A., Saugier B. et Dedieu G., 1994.** Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research, D : Atmospheres*, **99**, pp. 5263-5283.
- Sagna P., 2008.** L'évolution du climat au Sénégal. *Forum régional sur les changements climatiques en Afrique de l'Ouest*, Dakar.
- Saugier B., 1999.** Bilan carboné des écosystèmes forestiers. *Rev. For. Fr. LI.*, **2**, pp. 239-253.
- Solomon N., Pabi O., Annang T., Asante I. K. et Birhane E., 2018.** The effects of land cover change on carbon stock dynamics in a dry Afromontane forest in northern Ethiopia. *Carbon Balance and Management*, **13**, pp. 14-13.

- Soudani K., Francois C., Le Maire G., Le Dantec V. et Dufrene E., 2006.** Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM + data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sensing of Environment*, **102**, pp. 161-175.
- Tiwari R. N., Awasthi K. et Rajan S. N., 2018.** Vegetation change Detection in Delhi using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Scientific Society of Advanced Research and Social Change *International Journal of Information and Communication Technology (SSARSC)*, **1** (1), pp 2581-5873.
- Trumbmore S. E., Davidson E. A., Barbosa de Camargo P., Nepstad D. D. et Martinelli L. A. 1995.** Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, **9**, pp. 515-528.
- Tucker C., Pinzon J., Brown M., Slayback D., Pak E., Mahoney R., Vermote E. et El Saleous N., 2005.** An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *Int. J. Remote Sens.*, **26**, pp. 4485-4498.
- Vashum K. T. et Jayakumar S., 2012.** Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests - a review. *Journal Ecosyst Ecogr.*, **2** (116), pp. 1-17.
- Vicharnakorn P., Shrestha R. P., Nagai M., Salam A. P. et Kiratiprayoon S., 2014.** Carbon stock assessment using remote sensing and forest inventory data in savannakhet, lao PDR. *Remote Sens.*, **6**, pp. 5452-5479.
- Wang J., Dong J., Liu J., Huang M., Li G., Running S. W., Kolby W. S., Harris W., Saigusa N., Kondo H., Liu Y., Hirano T. et Xiao X., 2014.** Comparison of gross primary productivity derived from GIMMS NDVI3g, GIMMS, and MODIS in southeast Asia. *Remote Sens.*, **6**, pp. 2108-2133.
- Waring R. H., Way J., Hunt E. R. Jr., Morrissey L., Ranson K. J., Weishampel J. F., Oren R. et Franklin S. E., 1995.** Imaging radar for ecosystem studies. *BioScience*, **45**, pp. 715-723.
- Woomer P. L., Tieszen L. L., Tappan G., Touré A. et Sall M., 2004.** Land use change and terrestrial carbon stocks in Senegal. *Journal of Arid Environments*, **59**, pp. 625–642.
- Xia J., Liu S., Liang S., Chen Y., Xu W. et Yuan W., 2014.** Spatio-temporal patterns and climate variables controlling of biomass carbon stock of global grassland ecosystems from 1982 to 2006. *Remote Sens.*, **6**, pp. 1783-1802.

- Xiao X., Hollinger D., Aber J., Goltz M., Davidson E. A., Zhang Q. et Moore III B., 2004.** Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, **89**, pp. 519-534.
- Xie H., Tian Y. Q., Granillo J. A. et Keller G. R., 2007.** Suitable remote sensing method and data for mapping and measuring active crop field. *International Journal of Remote Sensing*, **28**, pp. 395-411.
- Zhao M., Nemani R. R. et Running S. W., 2006.** Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. *Journal Of Geophysical Research*, **111**, pp. 1-23.
- Zhou X., Guan H., Xie H. et Wilson J. L., 2009.** Analysis and optimization of NDVI definitions and areal fraction models in remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, **30** (3), pp. 721-751.
- Zhu L. et Southworth J., 2013.** Disentangling the relationships between Net Primary Production and precipitation in southern Africa savannas using satellite observations from 1982 to 2010. *Remote Sens.*, **5**, pp. 3803-3825.
- Zolkos S. G., Goetz S. J. et Dubayah R., 2013.** A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, **128**, pp. 289-298.

ANNEXES

Annexe 1 : Bilan global du carbone (Source : Robert et al., 2003)



NB : Les données sont exprimées en Gigatonne de Carbone (GtC) , les boîtes représentent les stocks en milliards de tonnes et les flèches, les flux en milliards de tonnes par an

Annexe 2 : Spécification MODIS (Source : NASA, 1999)

| Usage principale | Bandes | Largeur de bande (µm) | Résolution spatiale au nadir | |
|---|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|
| Limites Terre/nuages | 1 | 0.620 - 0.670 | 250 m | |
| | 2 | 0.841 - 0.876 | | |
| Propriétés Terre/nuages | 3 | 0.459 - 0.479 | 500 m | |
| | 4 | 0.545 - 0.565 | | |
| | 5 | 1.230 - 1.250 | | |
| | 6 | 1.628 - 1.652 | | |
| | 7 | 2.105 - 2.155 | | |
| Couleur des océans/ Phytoplancton/ Biogéochimie | 8 | 0.405 - 0.420 | 1000 m | |
| | 9 | 0.438 - 0.448 | | |
| | 10 | 0.483 - 0.493 | | |
| | 11 | 0.526 - 0.536 | | |
| | 12 | 0.546 - 0.556 | | |
| | 13 | 0.662 - 0.672 | | |
| | 14 | 0.673 - 0.683 | | |
| | 15 | 0.743 - 0.753 | | |
| Vapeur d'eau atmosphérique | 17 | 0.890 - 0.920 | 1000 m | |
| | 18 | 0.931 - 0.941 | | |
| | 19 | 0.915 - 0.965 | | |
| | Température surface/nuages | 20 | | 3.660 - 3.840 |
| | | 21 | | 3.929 - 3.989 |
| | Température atmosphérique | 22 | | 3.929 - 3.989 |
| | | 23 | | 4.020 - 4.080 |
| 24 | | 4.433 - 4.598 | | |
| Nuages Cirrus | 25 | 4.482 - 4.549 | 1000 m | |
| Vapeur d'eau | 26 | 1.360 - 1.390 | 1000 m | |
| | 27 | 6.535 - 6.895 | | |
| | 28 | 7.175 - 7.475 | | |
| Ozone | 29 | 8.400 - 8.700 | 1000 m | |
| | 30 | 9.580 - 9.880 | | |
| Température surface/nuages | 31 | 10.780 - 11.280 | 1000 m | |
| | 32 | 11.770 - 12.270 | | |
| Altitude du couvert nuageux | 33 | 13.185 - 13.485 | 1000 m | |
| | 34 | 13.485 - 13.785 | | |
| | 35 | 13.785 - 14.085 | | |
| | 36 | 14.085 - 14.385 | | |