

RESUME :

Le Ferlo, appartient au domaine climatique sahélien, semi-aride, caractérisé par de fortes chaleurs qui durent cinq (05) mois (de février à juin) avec des maxima qui atteignent plus de 45°C et une période de basse température de sept (07) mois (de juillet à janvier) avec un adoucissement du climat dû aux précipitations. Cette zone est fortement soumise aux changements climatiques. La rareté de la pluviométrie combinée aux actions anthropiques influence le développement du couvert végétal notamment les espèces ligneuses. Les ligneux sont d'une grande utilité pour la population du ferlo et interviennent dans l'alimentation du bétail pendant la saison sèche. L'objectif général de ce travail est de contribuer à la connaissance et à la gestion de la biodiversité au Sénégal. Il s'agira plus spécifiquement de caractériser la variation multi dates de flore et de la végétation. D'analyser les relations entre les paramètres dendrométriques et métriques satellitaires issues des NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisé). Des inventaires floristiques et forestiers ont été réalisés dans dix (10) sites en 1991, 2000, 2010 et en 2017 dans la zone sableuse du ferlo. Les images satellitaires de végétation des mois de juin à juillet des années 2010 et 2017 ont permis de calculer les cumules NDVI. Cette étude a permis de répertorier 25 espèces ligneuses réparties dans 19 genres et 10 familles avec une dominance des dicotylédones. Les familles les plus représentées sont les *Fabaceae* (32%), les *Combretaceae*, (20%) et les *Capparaceae* (12%). Le genre *Acacia* est plus représenté dans cette flore. Toutes les espèces rencontrées sont des Phanérophytes. La flore est dominée par les espèces Africaines soit environ 68% de la totalité des espèces répertoriées. Cette étude a permis de montrer une homogénéité floristique en fonction des années. La distribution selon la hauteur et le diamètre des individus du peuplement montre une dominance de la strate arbustive. Une étude basé sur les images satellitaires de 2010 et 2017 a montré une faible corrélation entre le cumule NDVI avec les paramètres dendrométriques (densité, hauteur, diamètre).

Mots clés : Biodiversité, Ferlo, changements climatiques, Ligneux, télédétection, NDVI

INTRODUCTION

Le Sénégal est situé à l'extrême Ouest du continent africain avec une façade maritime longue de 700km. Il est caractérisé par la présence de trois domaines climatiques (sahélien au nord, soudanien au centre et sub-guinéen au sud). Cette position lui confère une grande diversité biologique qui se reflète sur la diversité écosystémique, génétique et spécifique. Toutefois la plupart des écosystèmes connaît une dégradation importante et plusieurs espèces sont menacées de disparition (MEDD, 2015).

L'appauvrissement de cette richesse biologique a suscité des préoccupations croissantes, car elle est capitale pour la survie de l'humanité (Boudjema, 2017). C'est en ayant conscience de l'importance de cette ressource vitale que de nombreux pays ont signé la convention sur la diversité biologique à la conférence des Nations Unies sur l'Environnement à Rio en 1992. La conservation de la biodiversité a toujours été une équation très difficile à résoudre dans le contexte africain. Ceci est dû entre autre à la forte dépendance des populations vis-à-vis des ressources naturelles (Jiagho, 2018). Dans la partie sahélienne du Sénégal, en particulier au Ferlo, les actions combinées de la péjoration climatique et des pressions anthropiques aboutissent à la dégradation de cette zone agro-écologique. Les aléas du climat se traduisent par une pluviométrie faible et irrégulière tandis que l'action anthropique se résume par l'utilisation des ligneux comme fourrage (Niang *et al.*, 2014). Avec le développement récent de la télédétection, des SIG (Système d'Information Géographique) et de l'informatique, il est possible d'évaluer et de surveiller la dynamique des couvertures végétales et de l'occupation du sol dans le temps et dans l'espace.

Dans le Ferlo, les études réalisées ont principalement porté sur l'aspect floristique et écologique de la flore et de la végétation ligneuse (Bille, 1974 ; Diouf, 2000 ; Fall, 2014) sur l'aspect pastoral (Broutin & Sokona, 1992 ; Sy, 2009 ; Sarr *et al.*, 2014). Toutefois, peu d'étude ont porté sur la dynamique de la végétation à travers des traitements d'images satellitaires. C'est dans cette optique que ce travail a été entrepris et a pour objectif général de contribuer à la connaissance et à la gestion de la biodiversité au Sénégal.

Il s'agira plus spécifiquement de:

- caractériser la variation multi-date de la flore et de la structure de la végétation
- Déterminer la relation entre les paramètres dendrométriques et métriques satellitaires issues des NDVI.

Ce manuscrit est constitué de (3) parties :

- une synthèse bibliographique réservée à la flore et à la végétation. Dans cette partie, les termes Flore et végétation sont définis ainsi que leurs importances et les menaces auxquelles elles sont confrontées.
- une deuxième partie dans laquelle le matériel utilisé et les méthodes adoptés sont présentés.
- la troisième partie est consacrée à la présentation des résultats et leur discussion.

I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Flore et végétation du Ferlo

Le terme végétation est employé pour désigner le groupe de végétaux qui existent dans un espace géographique donné. Elle est déterminée par la strate herbacée, arbustive et arborée ; alors que la Flore peut être définie comme l'ensemble des espèces végétales qui poussent dans un écosystème (Guillaumet & Koechlin, 1971).

Dans les formations végétales du ferlo, les espèces plus représentées sont le *Balanites aegyptiaca*, *Calotropis procera*, *Boscia senegalensis*, *Acacia senegal* et *Combretum micranthum*. Cette tendance a été soulignée par plusieurs auteurs, (Bille, 1974; Toutain *et al.*, 1983; Akpo & Grouzis, 1996). La prépondérance de *Calotropis procera* serait dû au fait qu'il n'est pas apprécié par le cheptel et ne peut être utilisé comme bois de chauffe par la population du fait de son pouvoir calorifique faible. La flore végétale du ferlo s'ordonne selon un gradient pluviométrique avec une disposition zonale des domaines phytogéographiques interrompus par quelques groupements azonaux au niveau de la vallée du Ferlo (Ndiaye *et al.*, 2013). Les grands types de flore influencés par les grandes formations édaphiques, mais aussi par le climat qui joue un rôle essentiel dans la composition et la structure floristiques, se présentent sous forme de pseudo-steppes arbustives et de savanes arbustives à arborées caducifoliées, très ouvertes, souvent épineuses où prédominent *Acacia raddiana* et *Balanites aegyptiaca* (Sarr, 2009). En rapport avec les types de sols et la topographie, des ligneux comme *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca* et *Combretum glutinosum* impriment leurs marques sur les paysages. Les types de végétation caractéristique du ferlo et le plus répandu dans un grand nombre de milieux sahéliens, les steppes arbustives et arborées présentent une strate arborée ou arbustive. Ce couvert ligneux joue un rôle important aux niveaux socio-économique et écologique. Il est considéré comme un indicateur utile pour évaluer la distribution des plantes ligneuses, leur impact sur les facteurs de production végétale entre les ligneux et les herbacées. A cette strate, est associé un tapis herbacé très discontinu composé essentiellement des herbacées annuelles avec une nette dominance des Poaceae comme le *Dactyloctenium aegyptium*, *Cenchrus biflorus*, *Aristida mutabilis*, *Schoenefeldia gracilis*, *Eragrostis tremula*, *Tragus berteronianus* et le *Zornia glochidiata* (Fall, 2014).

La plupart des familles sont principalement constituées d'herbacées qui sont majoritairement des espèces annuelles. Les espèces ligneuses sont constituées essentiellement d'arbres épineux appartenant à la famille des fabaceae et à la sous famille des mimosoideae (Ba & Noba, 2001).

1.1 Importance de la Flore et de la Végétation

Comme dans toutes les zones à vocation sylvopastoral, les ressources ligneuses jouent un rôle important dans la vie des populations. Elles nourrissent la quasi-totalité des troupeaux, surtout les petits ruminants grâce à leur feuilles, fleurs et fruits (Ndong *et al.* 2015). Les espèces ligneuses sont d'une grande utilité pour la population du Ferlo. Elles entrent dans l'alimentation du bétail pendant la période de soudure et constituent aussi une source d'aliment, de médicaments et surtout de revenus pour les populations du ferlo. Elles sont aussi à la base de toute stratégie d'adaptation et de subsistance des éleveurs surtout pendant la saison sèche (Bakhoum, 2013).

- **Dans l'alimentation**

Dans le ferlo, la couverture ligneuse (arbres et arbustes) constitue une ressource importante pour l'alimentation des hommes et du bétail. La plupart des ligneux relevés donnent des fruits et des feuilles qui sont comestibles. Au sein du système socio écosystème agropastoral sahélien, l'arbre a une place très importante. Toutes ses parties (végétative et reproducteur) peuvent servir. Elles donnent par ailleurs des fruits destinés à l'alimentation humaine (Fall, 2014). Les deux espèces les plus consommées au Ferlo sont le *Balanites aegyptiaca* et *Adansonia digitata*. Elles sont suivies par *Ziziphus mauritiana* et *Sclerocarya birrea* (Ndong *et al.*, 2015).

- **Dans la pharmacopée**

Les plantes ont servi comme première source de médicaments pour les hommes, et elles ont continué à fournir à l'humanité, des remèdes thérapeutiques nouveaux et originaux jusqu'à aujourd'hui (Leduc *et al.*, 2006; Hartmann, 2007). Pour parer au déficit de structures sanitaires appropriées et la recrudescence de certaines maladies liées aux conditions de vie, des populations locales du ferlo se rabattent souvent sur les arbres pour se soigner. C'est ainsi que plus de 60 espèces interviennent dans le traitement de maladies, de symptômes ou d'affections. L'application des savoirs locaux oblige la population à exploiter ou surexploiter les ressources concernées à travers les écorces, les feuilles, les fruits ou les racines (Niang *et al.*, 2014). Les populations pastorales du ferlo ont des connaissances très précieuses sur les maladies humaines ainsi que les plantes à utiliser pour les guérir. Parmi les espèces les plus utilisées dans la pharmacopée, nous pouvons citer le *Combretum glutinosum*, *Zizyphus mauritiana*, *Acacia nilotica*, *Guiera senegalensis*, *Sterculia setigera*, *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca*, *Adansonia digitata*, *Pterocarpus erinaceus*. Les pathologies les plus soignées chez les hommes sont les maux de ventre, la diarrhée, la constipation (Ngom *et al.*, 2014).

1.2 Menaces

Les ressources forestières constituent une part importante de l'économie sénégalaise. Actuellement, ces ressources subissent de nombreuses pressions dues particulièrement à la forte démographie mais aussi aux actions anthropiques, aux variations climatiques et aux systèmes d'utilisation des terres (DNP, 2010), cité par Ba, (2006). Les sécheresses répétées et les exploitations abusives sont à l'origine de régression de nombreux ligneux en zone sahélienne.

1.2.1 Perturbations anthropiques

- **L'agriculture**

L'agriculture est une activité importante dans le ferlo. Elle est pratiquée essentiellement par les wolofs et les sérères, mais aussi par les peulhs et les toucouleurs. Pratiquée sous pluie et en décrue, l'agriculture fut naguère plus orientée vers l'autoconsommation ce qui favorisa un commerce de troc d'une partie de la récolte si besoin se faisait sentir. Avec la croissance des demandes dans le marché alimentaire, des parcelles forestières sont devenues maintenant vulnérables au défrichage, non seulement au bénéfice des terres agricoles, mais aussi pour les parcelles des infrastructures et les résidences urbaines de toute sorte (Boudjema, 2017). Au Sénégal, la végétation a progressivement disparu sur de larges étendues. Cette situation actuelle n'est qu'une conséquence de la sécheresse des années 1968 et 1997, aggravée par un défrichage anarchique des ressources forestières pour la satisfaction des besoins agricoles (Pimentel *et al.*, 1987).

- **L'élevage**

Le Ferlo appartient à la zone sahélienne et correspond à la zone sylvo- pastorale du Sénégal (Sy, 2009). Dans cette zone, l'élevage, de type extensif, exploite les pâturages naturels et fonctionne selon deux modes distinctes. Pendant la saison des pluies les herbacées constituent la principale source de pâturage alors qu'en saison sèche, les ligneux jouent un rôle essentiel dans l'alimentation du bétail (Akpo & Grouzis, 1996). La mobilité de l'élevage pastoral est aujourd'hui scientifiquement et politiquement admise un niveau général comme une dégradation des ressources. Plusieurs études sur les pâturages sahéliens font mention, ces dernières années d'une dégradation progressive du couvert végétal. Ce problème se pose avec acuité surtout aux abords immédiats des forages aménagés dans le nord du Sénégal où l'on observe des zones où la végétation tend à disparaître (Toutain *et al.*, 1983).

1.2.2 Les Perturbations naturelles

Le Sahel d'Afrique de l'ouest est une zone de transition, entre le désert du Sahara au nord et la zone tropicale humide au sud. Il est caractérisé par l'alternance d'une saison sèche longue et d'une brève saison pluvieuse. Le développement du couvert végétal est lié essentiellement à l'intensité et la distribution annuelle des pluies. Toutefois, le déficit de ces précipitations observé au Sahel durant les années 1970-1990, avec les grandes sécheresses des années 1972-1974 et 1983-1985 ont conduit, depuis la fin des années 1970, la communauté internationale à s'interroger sur une éventuelle désertification de la région. En 1991, le programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) définissait la désertification comme une « dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, qui résulte principalement de l'activité humaine. Elle intègre également un certain nombre de processus qui aboutissent à l'appauvrissement des sols et de la végétation là où l'activité de l'homme constitue le principal facteur ».

- **Les incendies**

Selon l'organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) qu'environ 350 millions d'hectares de terres sont boisées, de friches et de cultures sont ravagés par les flammes chaque année dans le monde. Ces incendies provoquent plusieurs conséquences dont le réchauffement climatique, des pertes en vies humaines, la pollution de l'air, la désertification et la perte inestimable de biodiversité. En région sahélienne, les feux sont l'un des principaux facteurs de dégradation de l'environnement en raison des menaces qu'ils exercent sur le patrimoine floristique déjà rendu vulnérable par une importante variabilité climatique. Les impacts notés au Sénégal en général peuvent aller jusqu'à la disparition du couvert végétal, la baisse de la fertilité de sols, le déficit du fourrage pour le bétail et l'augmentation de concentration de CO₂ dans la basse couche de l'atmosphère (Sarr *et al.*, 2015). Les observations ont montré que les quantités de biomasse brûlées par les feux de brousse augmentent en saison de bonne pluviométrie. Les pratiques de feux précoces représentent 50% des feux de brousses sont en train d'être remises en cause par les services habilités du fait de la rareté croissante de la ressource. Le suivi des feux par télédétection montre une augmentation sensible des superficies brûlées. Ces feux sont dus essentiellement à la senescence maximale des végétaux pendant cette période favorisant ainsi la survenue et la propagation des feux à la moindre étincelle (CSE, 2011). La vulnérabilité des ressources sylvo-pastorales est liée à l'extrême sensibilité des formations végétales aux menaces des feux. Les formations forestières reculent chaque année de 45 à 80 000 ha (OSS, 2015). Au Sénégal, d'importantes superficies sont transformées en cendres sous l'action dévastatrice des feux de brousses. Une telle contrainte

contribue à la dégradation de l'environnement en général et à la perte de formations ligneuses (FAO, 1982).

- **Le déficit de la pluviométrie**

Le sahel est caractérisé par un gradient croissant du nord au sud de la pluviométrie et où le couvert végétal à un rythme de croissance dépendant de la pluviosité (Fall, 2014). Ces formations végétales sont confrontées à une forte dégradation. Ces défis environnementaux ne pourront être relevés que par une coopération étroite en matière de surveillance environnementale, d'échange d'informations et d'adaptation aux changements globaux. Elles sont fortement dépendantes des conditions climatiques et plus particulièrement de la pluviométrie. Cette situation contribue à fragiliser l'ensemble des écosystèmes, à réduire la productivité des ressources naturelles (OSS, 2015).

2. Suivi de la végétation par télédétection

Depuis le lancement du premier satellite pour la collection d'informations sur les ressources terrestres (Landsat 1), plusieurs satellites américains, japonais français de l'agence spatiale européenne ont été mis en orbite. Un nombre considérable d'image est collecté et stocké. Les informations dérivées des satellites ont été intensivement utilisées, et la télédétection est devenue la principale outil pour la cartographie des sols, la surveillance de l'environnement et la mise à échelle des processus écologiques aux niveaux régional et mondial (Plummer, 2000). Les informations et les images archivées offrent de large potentialité pour décrire les dynamiques spatiale et temporelle de la végétation sur une période de plus de 40 ans.

La télédétection se réfère aux activités d'enregistrement, d'observation, perception (détection) des objets ou des évènements. Dans la télédétection, les capteurs ne sont pas en contact direct avec l'objet ou le phénomène observé. L'information a besoin d'un transporteur physique pour passer de l'objet au capteur. Le rayonnement électromagnétique est normalement utilisé comme porteur d'information dans la télédétection (Kumar, 2005).. Les images satellitaires à haute résolution offrent une vision particulière de la surface terrestre ce qui permet d'obtenir un état des lieux d'une zone donnée, et donc de présenter simultanément de grandes superficies en détail. De plus, les images satellitaires peuvent être acquises pour la même zone à une fréquence élevée. Cette répétitivité permet de comparer la couverture d'une région à des données équivalentes antérieures, ainsi que d'élaborer des analyses diachroniques des changements de couvertures du sol en utilisant des méthodes traitements d'images numériques (El Hadraoui, 2013).

Avec le développement récent de la télédétection, des SIG et de la technologie de l'informatique, il est maintenant possible d'évaluer et de surveiller la dynamique des couvertures végétales et de l'occupation des sols à des échelles spatio-temporelles différentes (Hansen & DeFries, 2004).

La télédétection peut être appliquée dans plusieurs domaines :

Elle est utilisée dans le domaine de la l'agriculture pour l'estimation de la quantité de production agricoles.

La cartographie forestière et végétale permet d'avoir des informations sur l'étendue du couvert forestier et de donner une idée générale des types de couvertures végétales, mais également les risques forestiers comme le feu, la maladie et l'abatage excessif.

- **Indices de végétation**

Les végétaux réfléchissent différemment les rayons électromagnétiques dans différents bandes spectrales par rapport à leurs caractéristiques, les utilisations selon leurs types d'étude concentrent sur une des longueurs d'onde spécifiques ou la combinaison des différentes longueurs d'onde captées par les satellites de télédétection pour mieux comprendre ou suivre un phénomène ou un état précis.

Parmi ces indices nous pouvons citer l'Indice de végétation par différence normalisée (Normalized Difference Vegetation ou NDVI en anglais).

Mis au point par Rouse, (1973), le NDVI est élaboré à partir de la différence entre la réflectance de la végétation fournie par le capteur du satellite dans le proche infrarouge et de celle obtenue dans le rouge divisé par la somme de ces deux même réflectance. Les valeurs sont comprises entre -1 et $+1$. Les valeurs négatives correspondant à l'eau, la valeur zéro au sol nu et les valeurs positives à la végétation. A cause des variations spectrales des sols, la végétation peut être systématiquement distinguée d'un sol nu et une comparaison entre zones peut être faite réalisée. Pour le traitement informatique, les valeurs originales NDVI sont rééchelonnées et converties en valeurs digitales comprises entre 0 et 255, intervalles appelés « intervalle bite » avec 256 valeurs possibles correspondant à 8 bits. C'est l'analyse de la palette de nuances s'étendant entre ces valeurs extrêmes qui va renseigner l'observateur sur la densité de couvert et la quantité de phytomasse verte. Le NDVI est très utilisé en raison de la simplicité de sa mise en œuvre et surtout de sa corrélation avec la densité du couvert végétal, et renseigne sur la capacité des végétaux à absorber la lumière solaire et à la convertir en biomasse(Hountondji *et al.*, 2005).

Après la grave sécheresse des années 1970, les premières applications d'estimation de la production des herbacées ont été réalisées dans les parcours sahéliens à l'aide de l'indice (NDVI) issu du radiomètre (NOAA-AVHRR) (Brandt *et al.*, 2015). Il est utilisé par le centre de suivi écologique (CSE) sur une base opérationnelle (depuis 1987) dans un modèle statistique afin de surveiller la disponibilité du fourrage dans les parcours du Sénégal. Il s'agit d'un modèle à variable explicative unique, qui omet généralement des détails de la réalité. Toutefois, les métriques satellitaires dérivées de la phénologie des plantes et de la dynamique saisonnière ont permis d'établir des modèles de régressions à variables multiples actuellement utilisés par le CSE pour estimer la biomasse fourragère (Diouf *et al.* ..).