
CONTRIBUTION A LA LUTTE CONTRE LES PLANTES ENVAHISSANTES DANS LES PLANS D'EAU DU BURKINA FASO : MONITORING DU PAR TELEDETECTION

Auteur : Sawadogo, Jean Ferdinand

Promoteur(s) : Tychon, Bernard

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5581>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



ULg - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL - Faculté des Bioingénieurs

**CONTRIBUTION A LA LUTTE CONTRE LES PLANTES ENVAHISSANTES
DANS LES PLANS D'EAU DU BURKINA FASO :
MONITORING DU LAC DE TENGRELA PAR TELEDETECTION**

Jean Ferdinand SAWADOGO

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT
DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT**

Filière : Eau et Sol

ANNEE ACADEMIQUE 2017-2018

Promoteur : Bernard TYCHON

©**Copyright** : « Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'**Université de Liège** et de l'**Université Catholique de Louvain**. * L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULg et/ou de l'UC L ».

"Le présent document n'engage que son auteur"

Auteur du présent document : **SAWADOGO Jean Ferdinand**
Contact de l'auteur : **sawjferdin@gmail.com**



ULg - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL - Faculté des Bioingénieurs

**CONTRIBUTION A LA LUTTE CONTRE LES PLANTES ENVAHISSANTES
DANS LES PLANS D'EAU DU BURKINA FASO :
MONITORING DU LAC DE TENGRELA PAR TELEDETECTION**

Jean Ferdinand SAWADOGO

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT
DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT**

Filière : Eau et Sol

ANNEE ACADEMIQUE 2017-2018

Promoteur : Bernard TYCHON

DEDICACES

A ma mère (mon ANGE) pour ses prières et bénédictions ;

A la mémoire de mon feu père qui nous a malheureusement quitté ;

A mon grand frère Windpanga, qui est un peu comme mon petit Papa ;

A ma bien aimée, mon épouse Bintou que j'appelle affectueusement « ma chinoise » pour avoir supporté ma longue absence et n'a cessé de me soutenir ;

Je vous témoigne toute ma gratitude

REMERCIEMENTS

Ce travail de fin d'étude a été possible grâce à la collaboration de plusieurs acteurs et encadreurs que nous tenons à remercier.

Plus particulièrement nos remerciements vont :

- au **Pr. Bernard TYCHON**, mon promoteur et Coordonnateur du Master de Spécialisation en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays en Développement, qui malgré ses multiples occupations a été à notre entière disposition en nous prodiguant des conseils et éclaircissements qui nous ont tant servi ;
- aux **Enseignants** du Master de Spécialisation en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays en Développement pour tout le savoir et savoir-faire que vous nous avez donné tout au long de notre formation et qui nous seront utiles toute notre vie professionnelle ;
- au **Dr. Antoine DENIS** pour sa disponibilité et ses conseils ;
- à l'**ARES** pour le financement de notre formation ;
- à la **Fondation Roi Baudouin** pour nous avoir accompagnés financièrement lors de notre collecte de données sur le terrain ;
- à tout le personnel du **SP/GIRE**, de la **DREA-Cas**, de la **DGAEC**, de la **mairie de Banfora**, du **CLE Haute-Comoé**, des **usagers de l'eau de Tengréla**, de l'**Association Jeunesse Engagée pour un Développement Durable** à Banfora pour votre disponibilité ;
- à ma famille et à tous mes camarades ;
- à tous ceux qui de près ou de loin ont participé à l'édification de ma personne de quelque manière que ce soit ; que cette œuvre soit pour vous le témoignage de ma reconnaissance infinie.

RESUME

Le lac de Tengréla est situé dans le village de Tengréla à environ 7 km de la ville de Banfora. Il couvre une superficie d'environ 340 ha et représente une valeur écologique, culturelle, sociale et économique pour les populations de la localité. Il joue un rôle important dans le maintien de la biodiversité et dans les activités agricoles, la pêche et le tourisme.

Malgré ses multiples fonctions, le lac est sujet à une forte colonisation par les plantes aquatiques envahissantes qui nuisent à son bon fonctionnement.

La télédétection est l'outil que nous avons utilisé pour suivre la dynamique de la prolifération des plantes envahissantes sur le lac. L'indice de végétation NDVI a été utilisé pour mener cette étude en suivant la phénologie des plantes sur le lac. Il a été extrait de 411 images NDVI du produit MOD13Q1 du satellitaire MODIS. Pour chaque pixel des images MODIS de l'emprise du lac, nous avons utilisé une valeur seuil d'indices de végétation NDVI (> 0.3) à partir de laquelle nous avons estimé l'étendue de la couverture végétale sur le lac.

Dans notre démarche méthodologique, nous avons étudié la dynamique intra et interannuelle de la prolifération du couvert végétal sur le plan d'eau du lac de Tengréla de 2000 à 2017, puis la dynamique saisonnière de la variation de la couverture végétale sur le lac.

Il ressort de cette analyse que la dynamique de la prolifération des végétaux sur le lac est contrastée d'une année à une autre. Cependant, au cours de notre étude on note une forte ampleur de la présence de couvert végétal sur lac. Le taux de la couverture végétale moyenne annuelle reste de façon permanente au-dessus de 70% avec une couverture moyenne mensuelle supérieure à 60% de la surface du lac. En plus, l'étendue du couvert végétal est fortement liée à la pluviométrie. Lorsque la saison des pluies s'installe, on assiste à une augmentation progressive de la couverture végétale sur le lac jusqu'à atteindre sa surface maximale au cours des mois d'août-octobre, qui correspondent aux périodes de fortes pluies. A la fin de la saison des pluies à partir du mois d'octobre, on assiste à un effet inverse avec un rétrécissement progressif de la portion du couvert végétal sur le lac jusqu'à atteindre sa couverture minimale en mars.

Au regard de certaines limites de l'étude et dans le but de proposer des pistes de solution pour la gestion des zones humides, une série de recommandations a été formulée. Certaines recommandations concernent le recensement exhaustif des plantes aquatiques envahissantes nuisibles au Burkina Faso afin de mieux comprendre leur cycle végétatif avant de planifier les actions de luttés, la mise en place de système de lutte curative adapté au contexte de chaque plan d'eau (type de plantes envahissantes, régime hydrologique, ...) et la mise en place de système d'alerte précoce de réapparition de certaines plantes nuisibles.

Mots clés : couverture végétale, plantes envahissantes, lac de Tengréla, télédétection, NDVI, MODIS.

ABSTRACT

Tengrela's lake is located in the village of Tengrela about 7 km from Banfora. It covers an area of approximately 340 ha and represents an ecological, cultural, social and economic value for the local population. It is very important for the maintaining of the biodiversity and in agricultural activities, fishing and tourism.

Despite its many functions, the lake is subject to heavy colonization by invasive aquatic plants that interfere with its proper functioning.

Remote sensing is the tool that we used to monitor the dynamic of invasive plants on the lake. The vegetation index NDVI was used to lead this study by following the phenology of the plants on the lake. It was extracted from 411 NDVI images of the MOD13Q1 product of the MODIS satellite. For each pixel of MODIS images of the lake's right-of-way, we used a threshold value of NDVI vegetation index (> 0.3) to estimate the extent of vegetation cover on the lake.

The methodological approach consisted to study the intra- and inter-annual dynamics of the proliferation of vegetal cover on Tengrela's lake from 2000 to 2017, then the seasonal dynamics of the variation of vegetal cover on the lake.

This analysis shows that the dynamics of the proliferation of plants on the lake are different each year. However, there is a strong invasion of the lake surface by invasive plants. The average annual vegetation cover rate remains permanently above 70% with an average monthly coverage of over 60% of the lake's surface. In addition, the extent of vegetal cover is strongly related to rainfall. When the rainy season begins, there is a gradual increase of vegetal cover on the lake until reaching its maximum surface from August to October, which correspond to period of heavy rains. At the end of the rainy season from October, there is an opposite effect, we assist to a gradual narrowing of the vegetal cover on the lake to the minimum cover in March.

Given certain lacks of the study and in order to propose possible solutions for the management of wetland, a series of recommendations are formulated. Some recommendations regard the identification of invasive aquatic weeds in Burkina Faso in order to better understand their vegetative cycle before planning the actions of struggles, the establishment of a curative control system adapted to the context of each water plan (type of invasive plants, hydrological regime, ...) and the setting up of an early warning system for the reappearance of certain harmful plants.

Keywords : vegetation cover, invasive plants, Tengrela lake, remote sensing, NDVI, MODIS.

Table des matières

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT.....	iv
SIGLES ET ABREVIATIONS.....	viii
INTRODUCTION	1
Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	2
I.1 PROLIFERATION DES MACROPHYTES	2
I.2 CAUSES ET CONSEQUENCES DES MACROPHYTES SUR LES PLANS D’EAU	3
I.2.1 Causes de la présence des macrophytes	3
I.2.2 Conséquences de la présence des macrophytes sur les eaux.....	3
I.3 OUTIL DE LA TELEDETECTION.....	4
I.3.1 Fonctionnement du système de collecte.....	5
I.3.2 Choix des satellites.....	6
I.4 INDICES SPECTRAUX.....	8
I.4.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	9
I.4.2 Signature spectrale	10
Chapitre II : PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE.....	12
II.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	12
II.2 DIVERSITE BIOLOGIQUE DU LAC DE TENGRELA.....	13
II.2.1 Faune.....	13
II.2.2 Végétation	14
II.3 FACTEURS CLIMATIQUES.....	15
II.3.1 Pluviométrie	15
II.3.2 Température	18
II.3.3 Evapotranspiration	19
II.4 ACTIVITES SOCIO-ECONOMIQUES	19

II.4.1 Agriculture	19
II.4.2 Pêche	20
II.4.3 Tourisme	20
II.5 GESTION DU LAC	20
Chapitre III : MATERIEL ET METHODE	22
III.1 METHODE DE MESURE DES NDVI AVEC MODIS.....	22
III.2 CARTOGRAPHIE DE LA SURFACE DU LAC.....	23
III.3 ACQUISITION DES IMAGES SATELLITAIRES	24
III.4 TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES	26
III.4.1 Prétraitement des images avec ENVI Classic.....	27
III.4.2 Traitement des images avec QGIS	29
III.4.3 Estimation du couvert végétal	30
III.4.4 Acquisition des données météorologiques.....	35
Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION	36
IV.1 RÉSULTATS DES TRAITEMENTS.....	36
IV.1.1 Variation moyenne mensuelle des NDVI.....	36
IV.1.2 Variation intra et inter-annuelle de la couverture végétale sur le lac	38
IV.1.3 Variation saisonnière de la couverture végétale sur le lac	42
IV.2 DISCUSSIONS.....	43
IV.2.1 Variation des NDVI sur le lac	43
IV.2.2 Evolution intra et inter annuelle du couvert végétal sur le lac	44
IV.2.3 Evolution saisonnière du couvert végétal sur le lac	46
IV.2.4 Limites de l'étude	47
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	48
BIBLIOGRAPHIE	50
ANNEXES	A

Liste des figures

Figure 1 : Etapes du processus de la télédétection.....	5
Figure 2 : NDVI selon l'état de santé des plantes.....	9
Figure 3 : Signatures spectrales de surfaces naturelles.....	11
Figure 4 : Situation géographique du lac de Tengréla.....	12
Figure 5 : Hippopotame sur le lac de Tengréla.....	13
Figure 6 : Espèces végétales sur le lac.....	14
Figure 7 : Zones climatiques du Burkina Faso.....	15
Figure 8 : Pluviométrie annuelle de 2000 à 2017.....	16
Figure 9 : Pluviométrie moyenne mensuelle de 2000 à 2017.....	17
Figure 10 : Température moyenne mensuelle.....	18
Figure 11 : Parcelles agricoles au niveau des berges du lac de Tengréla.....	20
Figure 12 : Limites du lac de Tengréla.....	24
Figure 13 : Système de dalle sinusoïdale de MODIS.....	26
Figure 14 : Affichage d'image brute sur ENVI.....	27
Figure 15 : Délimitation de l'image NDVI selon la zone d'étude.....	28
Figure 16 : Valeurs de NDVI de quelques pixels.....	29
Figure 17 : Pixels MODIS du lac de Tengréla.....	30
Figure 18 : Représentation du NDVI d'images LANDSAT et MODIS.....	32
Figure 19 : Photographies de la surface d'occupation du lac.....	33
Figure 20 : Variation moyenne mensuelle des NDVI de 2000 à 2017.....	37
Figure 21 : Variation annuelle de la couverture végétale sur le lac.....	38
Figure 22 : Variation de la moyenne mensuelle de la couverture végétale de 2000 à 2017.....	40
Figure 23 : Variation de la couverture végétale moyenne annuelle de 2000 à 2017.....	41
Figure 24 : Variation de la couverture végétale et de la pluviométrie moyenne mensuelle.....	42
Figure 25 : Etat de la végétation des berges en période de crue et de décrue.....	45

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemples d'indices spectraux.....	8
Tableau 2 : Caractéristiques des bandes de LANDSAT 8.....	31
Tableau 3 : Traitement des images NDVI de l'année 2000.....	34

SIGLES ET ABREVIATIONS

- CLE : Comité Local de l'Eau
- DGAEC : Direction Générale de l'Agence de l'Eau des Cascades
- DREA-Cas : Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement des Cascades
- EVI : Enhance Vegetation Index
- ENVI : Environment for Visualizing Images
- MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ;
- MVC : Maximum Value Composite ;
- NDVI : Normalized Difference Vegetation Index
- NIR : Near Infrared
- NOAA-AVHRR : National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced very-high-resolution radiometer ;
- ONTB : Office National du Tourisme Burkinabè
- PN-GIRE : Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
- SISR : Système d'Informations sur les Sites Ramsar
- SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau
- UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

INTRODUCTION

La ressource en eau est une composante indispensable à la survie de toute espèce et elle est au centre de toute activité de développement (agriculture, élevage, industrie, artisanat, pêche, etc..). Cette importance de l'eau confère aux zones humides plusieurs fonctions dont le maintien de la biodiversité, l'approvisionnement en eau, la régulation du régime hydrologique, ... Malheureusement, au Burkina Faso, pays sahélien où la ressource en eau est limitée, on constate une disparition progressive des zones humides (PN-GIRE, 2016).

Les aléas climatiques couplés à la forte pression démographique qui poussent les populations rurales à la recherche de nouvelles terres agricoles à potentiel hydrique, les fait migrer dans les zones autrefois inexploitées comme les berges des plans et cours d'eau. Au fil des années la pression au niveau des zones humides a entraîné de nombreuses dégradations environnementales dont l'eutrophisation des plans d'eau. Ce phénomène menace la biodiversité et les potentialités économiques de ces zones humides à cause de la disparition de certaines espèces, le développement de certaines maladies hydriques et l'accès limité à la ressource pour la pêche ou le tourisme (PN-GIRE, 2016).

Dans la région des Cascades au sud-ouest du Burkina Faso, le lac de Tengréla est sujet à une colonisation excessive par les plantes envahissantes aquatiques. Au regard des potentialités touristiques, agricoles et écologiques (site Ramsar) du lac, il s'avère impérieux de trouver des stratégies pour comprendre la dynamique de la prolifération de ces plantes, ce qui pourrait être un début pour la mise en place de moyens de lutte contre ce phénomène afin de préserver la biodiversité et promouvoir l'exploitation économique du site.

Pour mener à bien notre étude, nous utiliserons la télédétection pour analyser une série temporelle de données satellitaires MODIS afin de retracer l'évolution du couvert végétal sur le lac de Tengréla au fil des années. En effet, la télédétection a montré son utilité dans le suivi environnemental, en témoignent les nombreuses études menées pour le suivi de la végétation (Ahmed et *al.*, 2016 ; Zhang et *al.*, 2003) et aussi pour le suivi de la variation de la surface d'eau des lacs (Peng et *al.*, 2005) avec des résultats concluants.

Dans un premier temps nous allons suivre la variation spatio-temporelle intra et inter annuelle de la couverture végétale sur le lac à l'aide de la variation spatiale et temporelle des indices de végétation NDVI et dans un second temps, nous analyserons la variation saisonnière des végétaux sur le lac en fonction du régime hydraulique du plan d'eau. Il s'agira de comprendre comment évolue l'étendue des plantes envahissantes aquatiques sur lac au cours des années et aussi s'assurer si leur expansion est liée à des facteurs météorologiques, en l'occurrence la pluviométrie.

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La recherche bibliographique a consisté à une revue de travaux scientifiques sur l'usage de la télédétection dans le suivi environnemental et sur le phénomène d'eutrophisation des eaux, les causes et les conséquences sur l'écosystème.

I.1 PROLIFERATION DES MACROPHYTES

L'eutrophisation des eaux est l'une des principales causes de la prolifération des plantes aquatiques envahissantes sur les cours d'eau. Elle se définit comme l'enrichissement d'une eau en éléments nutritifs (phosphore, azote, ...) qui occasionnent le développement de plantes aquatiques (Capblancq et Decamps, 2002). Le phénomène est rencontré sur de nombreux plans d'eau en Afrique (Mitchell, 1985) et de façon générale, il est lié à la pollution liée aux activités anthropiques au niveau des cours d'eau (Vollenweider, 1970).

Les signes indicateurs de l'eutrophisation au niveau des plans d'eau sont principalement une augmentation de la quantité de biomasse aquatique et une modification de la qualité et de la quantité de la faune du littoral (exemple de la baisse des poissons) (Vollenweider, 1970). Le développement excessif des plantes envahissantes provoque un déséquilibre de l'écosystème avec une forte baisse de la quantité d'oxygène nécessaire à la vie au fond des lacs (Ghachtoul et al., 2005).

En plus de la pollution, le développement des plantes au niveau des cours d'eau est aussi lié à des facteurs climatiques et morphologiques. Les principaux paramètres physiques qui influencent la prolifération des plantes sont la lumière, l'écoulement de l'eau et le substrat (Peltre et al., 2002). Ainsi, la température favorable des régions tropicales fait qu'on y rencontre une prolifération des plantes aquatiques plus favorable que dans les régions tempérées (Mama et al., 2011).

Selon Lachavanne (1980), la prolifération des plantes envahissantes est fortement liée aux activités humaines. On rencontre des quantités importantes de plantes aquatiques envahissantes dans les régions où il y a de fortes pressions humaines davantage que dans les milieux naturels non mis en valeur.

I.2 CAUSES ET CONSEQUENCES DES MACROPHYTES SUR LES PLANS D'EAU

La prolifération des plantes aquatiques sur les cours d'eau est liée à plusieurs facteurs dont les principaux sont d'ordre anthropique (pollution, modification du régime du cours d'eau, ...). Par leur présence sur les cours d'eau, ces plantes interfèrent avec l'utilisation de l'eau et constituent des nuisances ou dangers pour l'équilibre de l'écosystème (Mitchell, 1985).

I.2.1 Causes de la présence des macrophytes

La prolifération des plantes aquatiques sur les cours d'eau est causée par des perturbations d'ordre physique ou chimique du milieu naturel.

Les perturbations physiques sont liées aux activités de modification de l'habitat physique naturel du milieu. Il s'agit des opérations d'élargissement ou de rétrécissement des lits des cours d'eau, de curage ou de reprofilage, qui peuvent influencer sur la biodiversité existante et favoriser le développement d'espèces étrangères (Hey *et al.*, 1994). En plus, la réalisation d'ouvrage de décrue peut favoriser le maintien de certains macrophytes qui étaient, avant écrêtage des crues, emportés par les eaux. Les travaux d'aménagement au niveau des lacs sont le plus souvent associés à des opérations d'abattage des arbres (réduction ou suppression des ombrages), ce qui augmente la pénétration de la lumière et la température des eaux, favorisant ainsi la prolifération des plantes aquatiques envahissantes (Peltre *et al.*, 2002).

La pollution chimique est considérée comme la principale cause de l'eutrophisation des plans d'eau. Cette pollution est liée à l'augmentation de la quantité d'éléments nutritifs dans les eaux. Ces nutriments, dont les plus actifs dans le phénomène d'eutrophisation sont le phosphore et l'azote, proviennent de plusieurs sources dont les activités humaines (agriculture, rejets domestiques, ...) (Vollenweider, 1970).

I.2.2 Conséquences de la présence des macrophytes sur les eaux

La prolifération des plantes aquatiques envahissantes sur les plans d'eau peut avoir d'énormes impacts environnementaux, sociaux et économiques.

Au niveau économique et social, la prolifération des plantes envahissantes entrave la navigation pour les activités de pêche ou de tourisme. Pour l'approvisionnement en eau, les plantes peuvent constituer des obstacles pour l'accès à l'eau et boucher les canaux d'irrigation ou les équipements hydrauliques. L'accumulation des plantes et leur décomposition après la senescence peut être vecteur de certaines maladies comme le paludisme à cause de l'apparition de certains insectes. On note aussi une diminution de certaines activités récréatives sur certains plans d'eau comme les baignades à cause des piqûres d'insectes, des irritations de la peau dues

à la pollution de l'eau de baignade, ... (Vollenweider, 1970). L'une des conséquences directes de la prolifération des plantes envahissantes sur les cours d'eau est liée aux efforts qui doivent être entrepris (plan de gestion, méthodes de lutte, ...) pour la restauration du milieu. L'opération de mise en état du milieu naturel prend en compte l'arrachage des plantes, la gestion des déchets de végétaux obtenus et la mise en place de stratégie pour éviter l'eutrophisation, ce qui est très coûteux (Dutartre et al., 2008). Aussi, on note des accès difficiles au plan d'eau pour y mener certaines activités. Les plantes envahissantes entraînent une baisse de la productivité de la pêche, ce qui a une influence négative sur l'activité des pêcheurs et des personnes qui font le commerce du poisson. Cette situation aboutit à une baisse de revenus pour ces personnes et leurs familles.

Au niveau environnemental, la prolifération des plantes aquatiques empêche l'oxygénation de l'eau et de ce fait inhibe le développement de certaines espèces provoquant un déséquilibre au niveau de la chaîne trophique. La décomposition des plantes libère des nutriments dans le milieu par minéralisation de la matière organique, ce qui va maintenir le phénomène d'eutrophisation (Mama et al., 2011). Cette décomposition peut également entraîner une dégradation de la qualité des eaux (goût, odeurs, ...) ce qui peut empêcher l'usage de la ressource en eau pour l'approvisionnement en eau potable et pour la baignade par exemple réduisant ainsi les fréquentations touristiques (Vollenweider, 1970).

Bien qu'ayant de nombreux impacts négatifs sur l'écosystème, la présence de certaines plantes aquatiques envahissantes peut avoir des effets positifs sur le milieu naturel. Par exemple, la présence d'espèces comme l'*Elodea nuttallii* et l'*Elodea canadensis* sur les plans d'eau peut améliorer la qualité des petits cours d'eau où les apports de nutriments sont modérés (Thiebaut et al., 1997). Ces plantes aquatiques ont la faculté d'accumuler des quantités importantes de phosphore et d'azote. Par ce processus, elles peuvent donc servir à l'épuration naturelle des cours d'eau en amont, à condition d'effectuer l'extraction des plantes lorsque celles-ci se dégradent, afin d'éviter le relargage d'importantes quantités de nutriments dans les eaux.

I.3 OUTIL DE LA TELEDETECTION

La télédétection est une technique qui permet de collecter des informations sur des objets grâce à des instruments placés à bord d'avions, de drones ou de satellites. C'est une technique qui permet la collecte de données sans contacts directs avec les objets cibles (terre, océans, atmosphère, ...).

I.3.1 Fonctionnement du système de collecte

Le système de collecte d'informations par la télédétection comprend principalement une source d'énergie (passive ou active), un objet cible et des capteurs chargés de collecter et transmettre les données.

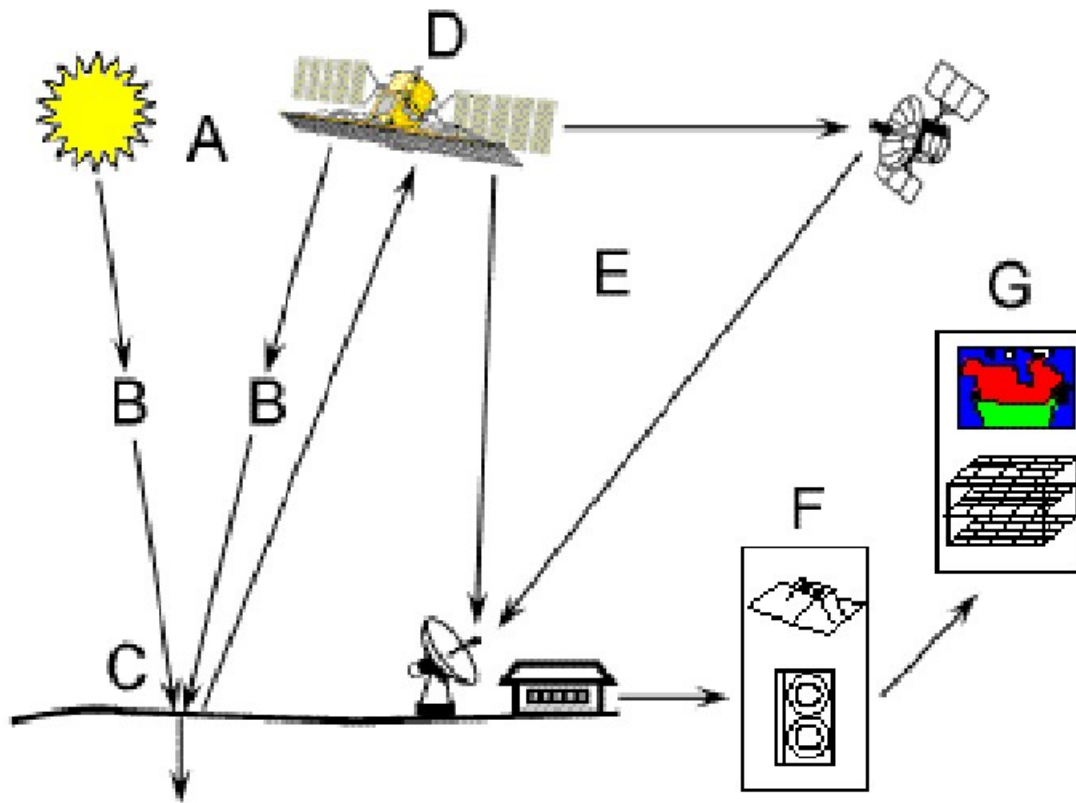


Figure 1 : Etapes du processus de la télédétection
(Source : Centre Canadien de Télédétection, 2013)

La source d'énergie naturelle ou artificielle (A) émet des rayonnements électromagnétiques (B) qui vont interagir avec l'objet cible (C). Un capteur (D) placé à bord d'un avion ou satellite enregistre l'énergie électromagnétique réfléchié ou émise par l'objet cible. Une fois les données enregistrées par le capteur, elles sont transmises à une station de réception (E) où les informations sont numérisées (F) pour donner par exemple des images et une série d'informations supplémentaires. A l'issue de ce traitement, les informations peuvent être extraites et analysées pour mieux comprendre ou suivre l'évolution d'un phénomène.

La collecte de données in situ étant très contraignante car nécessitant la mobilisation de personnes, d'équipements et d'énormes périodes de temps sur le terrain peut être palliée par la télédétection qui offre la possibilité de suivre de façon continue plusieurs phénomènes autour

de la terre (développement de la végétation, l'occupation des sols, ...) sans un contact direct. Plusieurs études ont utilisé la télédétection pour le suivi des transformations sur la terre avec des satellites différents. Jacquin (2010) a mené une étude pour suivre la « dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux à Madagascar » grâce aux données satellitaires MODIS, alors que Gouyet J. F. et *al.* (1989) ont utilisé les données du satellite NOAA-AVHRR pour le suivi de la variation de la végétation forestière.

I.3.2 Choix des satellites

La télédétection offre une gamme de données exploitables. La revue de la littérature montre qu'il n'y a pas de satellite universel pour le suivi des variations au niveau de l'environnement. Les images satellitaires utilisées pour la compréhension de problèmes environnementaux diffèrent d'un auteur à un autre. Dans certaines études, il est possible de rencontrer une combinaison d'informations issue de plusieurs satellites pour mettre en évidence des modifications sur des phénomènes environnementaux. Peng et *al.* (2005), ont utilisé les données du satellite MODIS pour mettre en évidence la variation de la surface du lac Dongting en Chine, alors que Laventure (2009) a utilisé les données du satellite SPOT pour le suivi temporel de la ressource en eau au niveau du parc régional du W transfrontalier entre le Burkina Faso, le Bénin et le Niger.

Les images satellitaires ont aussi longuement été utilisées pour le suivi de la végétation. Zhang et *al.* (2003) ont utilisé des données issues du satellite MODIS pour la surveillance de la phénologie de la végétation dans le nord-est des Etats Unis. Cette étude a permis de mettre en évidence la variation inter et intra-annuelle de la couverture végétale. Par contre, Bougherara et *al.* (2008) ont utilisé les données du satellite Landsat pour cartographier l'occupation du sol dans la wilaya d'El Tarf et le parc national d'El Kala et mettre en évidence les zones dégradées résultant de la déforestation, l'ensablement et l'assèchement des zones humides.

De la multitude d'études ayant utilisé la télédétection, il en découle que le choix des images satellitaires dépend de plusieurs paramètres dont la résolution des images, la fréquence d'acquisition des images, la durée d'archivage, la résolution spectrale et l'accessibilité des images (libre ou payantes).

Les résolutions spatiales des images en télédétection diffèrent selon les satellites. Avec MODIS, on a des résolutions spatiales de 250 m, 500 m ou 1000 m (basse résolution), alors qu'avec Landsat ou IKONOS on a respectivement des valeurs de pixels de 30 m et de moins de 1m (hautes résolutions spatiales). Les satellites collectent et mettent à disposition les données acquises à diverses fréquences. Les satellites Landsat et MODIS peuvent fournir des

informations tous les 16 jours, pendant que Sentinel 2 et IKONOS offrent des informations tous les 02 à 05 jours. Pendant que le satellite Landsat met 16 jours pour revisiter une même zone à la surface de la terre pour collecter des informations, les capteurs MODIS observent le même site à la surface de la terre tous les 01 à 02 jours. Ainsi, du point de vue de la fréquence de collecte d'informations sur un site donné, MODIS a une meilleure résolution que Landsat, mais du point de vue de la résolution spatiale Landsat est meilleur.

En ce qui concerne la résolution spectrale, les satellites utilisés en télédétection ne possèdent pas les mêmes bandes spectrales. La résolution spectrale est vue comme le nombre de bandes avec lequel un objet est observé. Certains satellites sont multi-spectraux (une dizaine de bandes spectrales) et d'autres hyper-spectraux (une soixantaine ou plus d'une centaine de bandes spectrales). Le nombre de bandes spectrales est fonction de la précision du satellite et des informations à collecter (propriétés de la terre ou des nuages, suivi des océans, suivi de la vapeur d'eau atmosphérique, mesures de la température, ...).

Malgré l'existence d'une gamme variée de satellites en télédétection, ils ne sont pas tous à accès libre. Les images provenant des satellites haute résolution comme SPOT ou IKONOS sont payantes. A l'opposé, les images des satellites MODIS, Landsat ou Sentinel sont accessibles gratuitement. Cependant, bien que les satellites payants aient de très bonnes résolutions spatiales, certains présentent l'inconvénient de ne pas effectuer des observations régulières d'un même site à la surface de la terre, donc contraignantes pour des études de suivi régulier d'un événement.

Aussi, le choix des satellites pour des études en télédétection peut être conditionné par la quantité de données archivées. Pour des études environnementales sur des séries d'observations longues (plus de 30 ans) le satellite Landsat peut s'imposer car il est l'un des premiers satellites lancés pour le suivi environnemental depuis 1972 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/how_landsat_helps/case-studies-2/). Malheureusement, il arrive souvent que certaines images de Landsat soient entachées par des couvertures nuageuses ou des traces de capteurs défectueux comme ceux de Landsat 7 qui présentent des rayures par endroit (Bernier et *al.*, 2015). Les satellites Sentinel ont des images de très bonnes qualités (bonne résolution spatiale et temporelle), mais pas assez de données d'archivages car Sentinel n'a été lancé qu'à partir de 2015 avec le programme Copernicus de l'Union Européenne. Quant au satellite MODIS, il offre des images à résolution spatiale moyenne, mais avec de bonnes résolutions temporelles. Mieux que Sentinel, le satellite MODIS possède un archivage de données plus important car lancé depuis le début des années 2000, ce qui justifie son utilisation pour notre étude.

I.4 INDICES SPECTRAUX

Les indices spectraux sont des paramètres indicateurs utilisés par la télédétection pour suivre l'état d'évolution d'un phénomène à la surface de la terre. Ces indices découlent de la combinaison d'informations issues des bandes spectrales des satellites. On rencontre de nombreux indices spectraux, mais les plus utilisés pour mettre en évidence les changements observés au niveau des couverts végétaux sont les indices de végétation (Gandhi *et al.*, 2015). On note une panoplie d'indices de végétation dont les plus communs sont l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice de végétation ajusté en fonction des sols (SAVI), l'indice de végétation par différence renormalisée (RDVI), l'indice de végétation amélioré (EVI), l'indice d'infrarouge par différence normalisée (NDII). Ces indices sont obtenus par combinaison des bandes spectrales du visible et du proche infrarouge.

Le tableau ci-dessous reprend quelques indices spectraux utilisés en télédétection :

NOM	FORMULE	USAGE
NDVI (Normalized Difference Vegetation index)	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Suivre la variation de la végétation, mais peut-être utilisé pour le suivi de l'eau
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$EVI = 2.5 \frac{NIR - Red}{NIR + 6 \times Red - 7.5 \times B + 1}$	EVI dérive du NDVI. Il est utile pour le suivi de la végétation dense.
NDII (Normalized Difference Infrared Index)	$NDII = \frac{NIR - MIR}{NIR + MIR}$	Suivre la teneur en eau au niveau de la canopée des végétaux et l'humidité des sols
SAVI (Vegetation Index Adjusted Soil)	$SAVI = \frac{(NIR - Red)(1 + 0.5)}{(NIR + Red + 0.5)}$	Suivre la variation de la végétation
RDVI (Renormalized Difference Vegetation index)	$RDVI = \frac{NIR - Red}{\sqrt{NIR + Red}}$	Suivi de la végétation

Tableau 1 : Exemples d'indices spectraux (source : Tran *et al.*, 2010)

Avec :

- B = Réflectance dans la bande du bleu ;
- G = Réflectance dans la bande du vert ;
- NIR = Réflectance dans le proche infrarouge ;
- MIR = Réflectance dans le moyen infrarouge ;
- Red = Réflectance dans la bande du rouge ;

I.4.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Le Normalized Difference Vegetation index (NDVI) est le plus commun et le plus utilisé des indices de végétation en télédétection. C'est un indice largement utilisé dans la recherche sur les variations globales de l'environnement (Bhandari et *al.*, 2012). Il dépend de l'activité chlorophyllienne de la végétation et permet de déterminer la production de la quantité de biomasse verte (Gandhi et *al.*, 2015). Sa valeur s'obtient grâce aux mesures de réflectance spectrale dans les longueurs d'ondes du rouge (Red) et du proche infrarouge (NIR). Il a été mis en évidence par Tucker (1979) et se définit par la formule suivante :

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Sa valeur théorique est comprise entre -1 et 1 et dépend du type de surface qui va interagir avec le rayonnement solaire incident. Il permet de faire la distinction entre plusieurs surfaces dont le sol nu, la végétation, l'eau, la neige, etc. En pratique, une étendue d'eau (océan, lac, ...) aura des NDVI négatifs et proches de 0, un sol nu prendra des valeurs de 0.1 à 0.2, alors que la végétation dense aura des valeurs de 0.5 à 0.8 (Denis A., 2017).

Au regard de sa simplicité d'usage, le NDVI peut aussi être utilisé pour déterminer l'état de santé de la végétation.

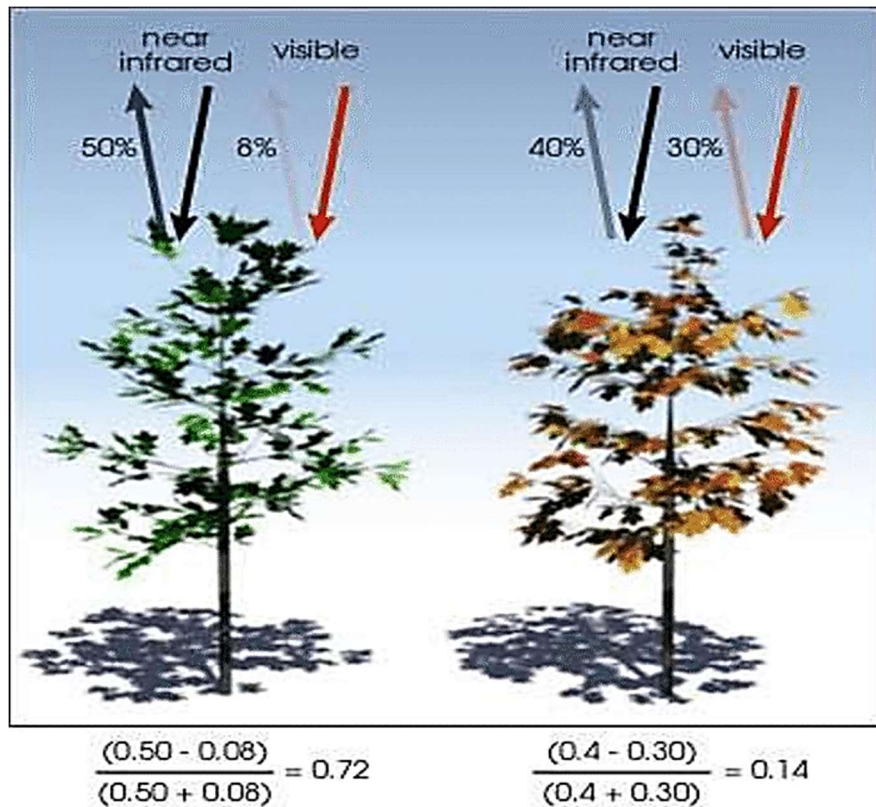


Figure 2 : NDVI selon l'état de santé des plantes

(Source : https://www.nasa.gov/topics/earth/features/obscure_data.html)

Le NDVI de la végétation saine (à gauche sur la Figure 2) est plus élevé que la végétation malsaine (à droite). Cette différence de valeur s'explique par le fait que la végétation saine absorbe plus de rayonnement incident dans le rouge à cause de la chlorophylle (environ 92% du rayonnement incident) et réfléchit plus dans le proche infrarouge (50% du rayonnement incident), alors que la végétation malsaine absorbe une quantité de rayonnement incident plus bas dans le rouge (70%) et réfléchit peu dans le proche infrarouge (40%) (https://www.nasa.gov/topics/earth/features/obscure_data.html, consulté le 11/07/2018).

Selon Huete et *al.* (2002) l'indice de végétation NDVI est suffisamment stable pour permettre des comparaisons de la variation saisonnière et interannuelle de la végétation. Son usage s'avère idéal pour faire la distinction entre différents types de matériaux en vertu de leur capacité d'absorption ou de réflexion des rayonnements solaires incidents.

I.4.2 Signature spectrale

La signature spectrale se définit comme la réponse d'un objet face à un rayonnement électromagnétique selon les longueurs d'ondes. C'est la représentation graphique de la quantité d'énergie émise ou réfléchi par un objet en fonction de la longueur d'onde. Ainsi, chaque objet à la surface de la terre possède sa propre signature spectrale, ce qui permet de l'identifier sur des images satellitaires. La signature spectrale dépend de l'état des objets et de plusieurs paramètres environnementaux (humidité, couverture nuageuse, ...) qui peuvent interagir avec le rayonnement solaire incident et la modifier.

La figure suivante présente la signature spectrale de la neige, de la végétation saine, du sol et de l'eau.

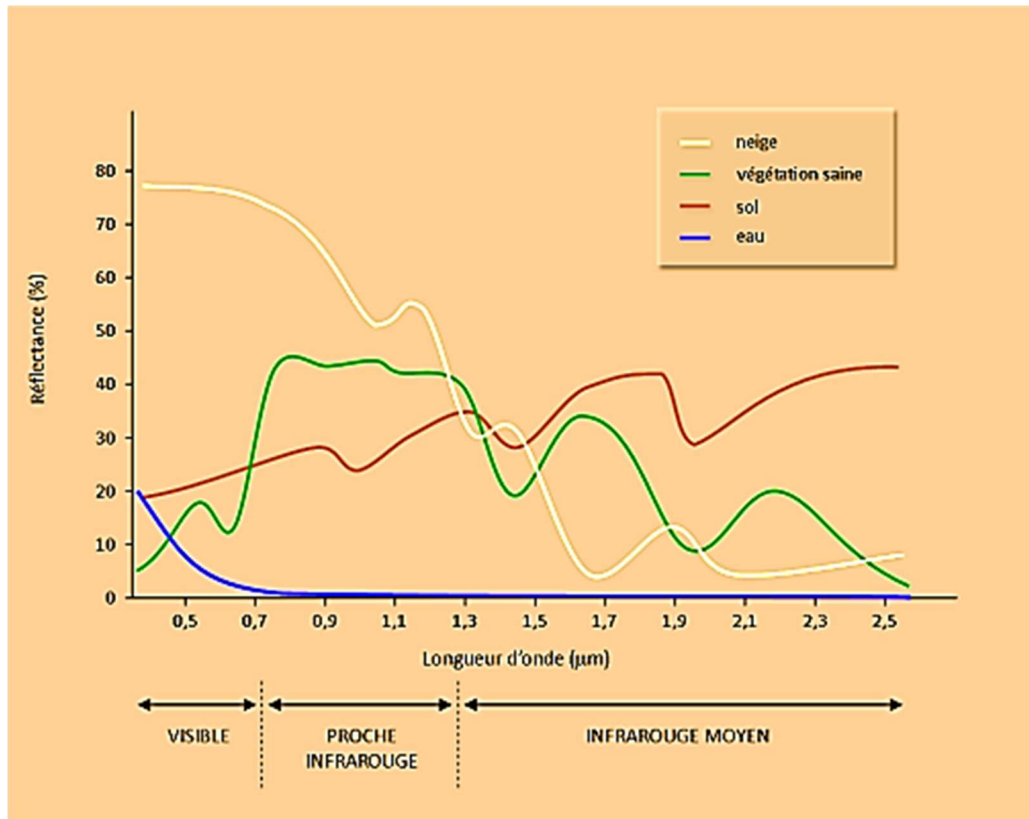


Figure 3 : Signatures spectrales de surfaces naturelles

(Source : <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-7-signatures-spectrales.html>)

La végétation saine absorbe plus de rayonnement solaire incident dans la bande du rouge (0,58 à 0,68 µm) à cause de la chlorophylle de la plante et réfléchit plus dans le proche infrarouge (0,73 à 1,3 µm). Ainsi, les valeurs de NDVI pour la végétation sont toujours supérieures à zéro. Comme la neige et l'eau ont des valeurs de réflectance plus élevées dans les longueurs d'onde du rouge que dans le proche infrarouge, les valeurs négatives de l'indice de végétation NDVI seront associées à la surface de la neige ou à de l'eau.

De la signature spectrale du sol, on constate que la quantité de rayonnement électromagnétique réfléchi dans les longueurs d'ondes du rouge est légèrement plus petite que celle du proche infrarouge. Le sol réagit approximativement de la même manière dans les longueurs d'onde du rouge que du proche infrarouge. Pour cela les valeurs de NDVI positives et proches de 0 correspondent à la surface du sol.

La signature spectrale permet ainsi de faire la distinction entre plusieurs objets à la surface de la terre. Par ce procédé, la télédétection collecte des informations et permet de faire la distinction entre plusieurs objets à la surface de la terre. Certaines surfaces auront des réflectances élevées dans les bandes du visible (neige) et d'autres par contre auront des réflectances élevées dans le proche infrarouge (végétation).

Chapitre II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le lac de Tengréla est situé dans le village de Tengréla à environ 7 km de la ville de Banfora, chef-lieu de la région des Cascades au Burkina Faso. Il couvre une superficie d'environ 340 ha. Il est localisé entre 10.63° et 10.67° de latitude nord et entre 4.82° et 4.87° de longitude Ouest.

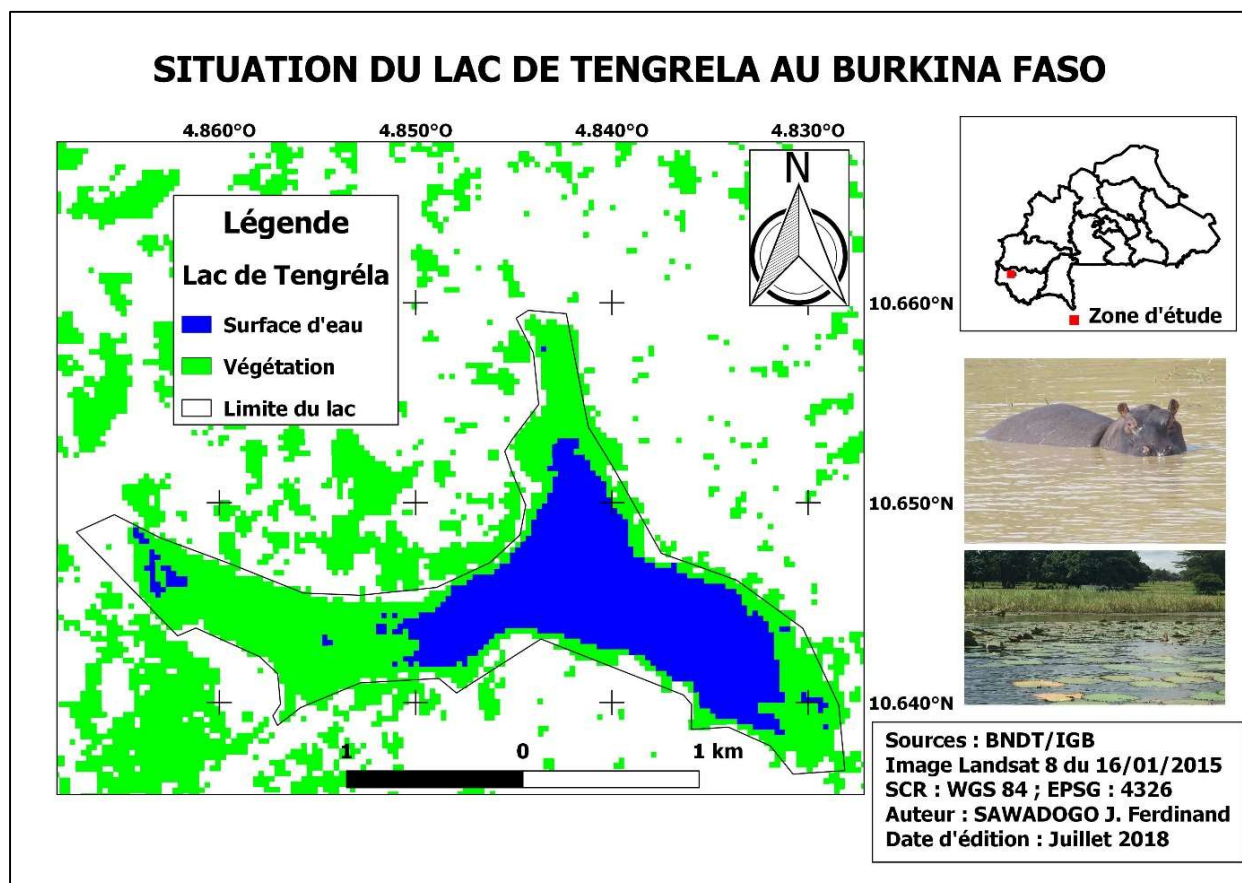


Figure 4 : Situation géographique du lac de Tengréla

Le lac joue un rôle important dans les activités agricoles, la pêche, le tourisme et le maintien de la biodiversité. Il représente une valeur inestimable pour la communauté autochtone car constituant un site de rites culturels et religieux du village. Il est au centre des coutumes du village de Tengréla. Les autochtones y font des sacrifices pour tout événement majeur comme le début de la saison des pluies pour souhaiter une bonne pluviométrie (SISR, 2017).

Au regard de ces multiples intérêts (écologique, culturel, hydrologique, ...), le lac de Tengréla a été considéré par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) comme une zone de biodiversité depuis 1994 (Namoano Y., 2009). Puis, le 07 octobre 2009, il a été

inscrit sur « **la Liste** » des zones humides d'importance internationale établie par l'article 2.1 de la Convention Ramsar (SISR, 2017). Il porte le numéro de site N° 1881.

II.2 DIVERSITE BIOLOGIQUE DU LAC DE TENGRELA

Le lac de Tengréla revêt un intérêt pour la biodiversité et un caractère sacré pour les populations de la localité à cause de sa population d'hippopotames sacrés.

II.2.1 Faune

Etant pérenne toute l'année, il favorise la migration de nombreuses espèces animales. Il abrite des hippopotames (*Hippopotamus amphibius*) et des crocodiles (*Crocodylus niloticus*) qui sont des espèces protégées par la législation Burkinabè (SISR, 2017). Au cours de ces dernières années, ces espèces se sont vues menacées par les braconniers et aussi par un accès limité à l'eau douce à cause des activités humaines (pêche, agriculture,...). Pour préserver ces espèces, elles ont été inscrites à l'annexe I de la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES) (<http://www.iucnredlist.org>). Elles sont interdites au commerce.



Figure 5 : Hippopotame sur le lac de Tengréla (Source photo : OUATTARA B.)

La faune du lac de Tengréla se compose aussi de poissons tels que les capitaines (*Lates niloticus*), les carpes (*Tilapia zillii*), les anguilles (*Protopterus annectens*), les oiseaux (*Phalacrocorax africanus*, *Ardeola ralloides*, *Ardea purpurea Linnaeus*, ...) (Namoano Y., 2009).

II.2.2 Végétation

La végétation autour du lac est marquée par des forêts galeries, des prairies et des zones de cultures (maraîchage, riz, maïs, ...). On rencontre essentiellement des espèces comme l'*Isobertinia doka*, le *Burkea africana*, le *Parkia biglobosa* et des espèces introduites par l'homme comme le manguier, le rônier, ...

Au niveau du plan d'eau du lac, on rencontre plusieurs types d'espèces végétales. Les espèces dominantes au niveau de la flore aquatique du lac sont le *Nymphaea lotus*, le *Imperata cylindrica*, le *Andropogon africana*, le *Vetiveria senegalensis*, le *Pistia stratiotes* et le *Eichhornia crassipes* (Namoano Y., 2009).



Nymphaea lotus



Imperata Cylindrica

Figure 6 : Espèces végétales sur le lac (Source photos : Auteur)

La plante *Imperata Cylindrica* est la plus importante au niveau de la couverture végétale sur le lac. Une étude menée sur cette plante en Afrique de l'Ouest montre que son cycle végétatif commence dès le que le sol est humide avec une période de croissance comprise entre 181 et 210 jours (Chikoye D et al., 2000). Elle constitue une mauvaise herbe pour l'agriculture, car sa présence entraîne une compétition avec les cultures. Selon Chikoye D et al. (2000), sa présence au niveau des parcelles agricoles peut entraîner une réduction de rendements de 76.8% pour le manioc et de 50% pour le maïs, avec un désherbage manuel qui est fastidieux et qui peut occuper environ 54% du temps de travail pour les agriculteurs. Il est très difficile à éliminer par labour à cause de la facilité qu'elle a de germer et du fait que tous les fragments de son rhizome peuvent entraîner sa revégétalisation (Granier P. et al., 1977).

II.3 FACTEURS CLIMATIQUES

Le Burkina Faso est situé dans le climat tropical dans la région sahélienne. On y distingue deux grandes saisons dont une saison sèche et une saison des pluieuses qui est plus courte au nord. Le pays est divisé en trois (03) grandes zones climatiques qui sont fonction de la pluviométrie : la zone sahélienne au nord avec une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 600 mm, la zone soudano-sahélienne au centre avec des précipitations moyennes annuelles comprises entre 600 et 900 mm et la zone soudano-guinéenne au sud avec des précipitations annuelles supérieures à 900 mm. La carte ci-dessous représente la subdivision du pays selon les trois (03) zones climatiques citées plus haut :

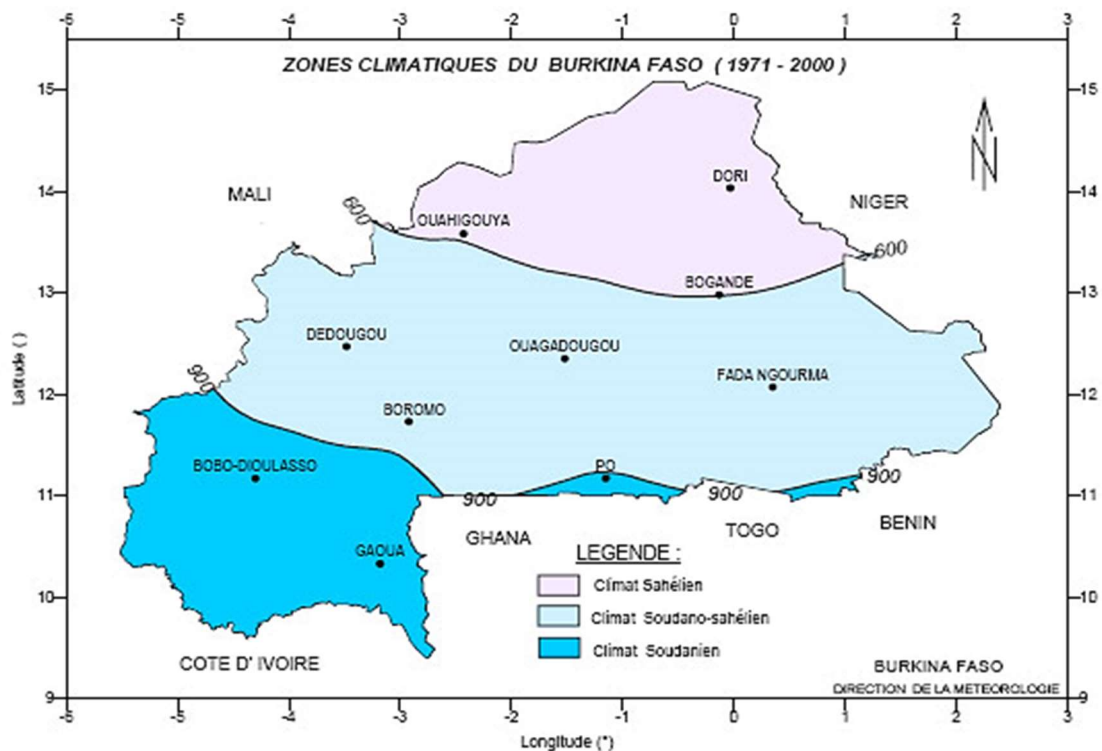


Figure 7 : Zones climatiques du Burkina Faso
(Source : Direction Générale de la Météorologie du Burkina Faso)

II.3.1 Pluviométrie

La pluviométrie de la zone d'étude est la plus importante du pays car étant dans la zone climatique soudano-guinéenne avec plus de 900 mm de pluie par an. Grace aux données pluviométriques collectées auprès de l'Agence Nationale de la Météorologie du Burkina et sur le site <https://fr.tutiempo.net/climat>, les précipitations annuelles de la zone d'étude de 2000 à 2017 se présentent comme suit :

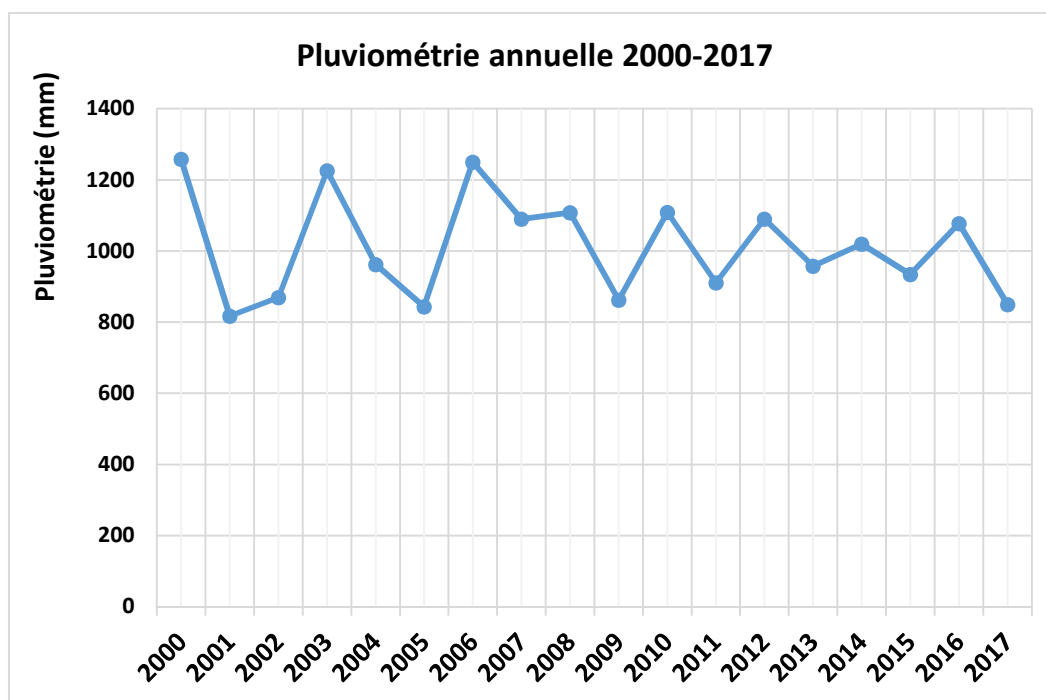


Figure 8 : Pluviométrie annuelle de 2000 à 2017

(Source : Direction Générale de la Météorologie du Burkina, station de Bérégaougou (2000 à 2016) et <https://fr.tutiempo.net/climat> (2017))

Bien que la zone du lac de Tengréla soit l'une des plus pluvieuses du pays, on constate une grande variabilité du cumul des précipitations d'une année à une autre. La précipitation annuelle maximale au cours de la période de l'année 2000 à 2017 a été enregistrée en 2000 avec 1258 mm de pluie et la plus basse en 2001 avec 817 mm, soit un écart de plus de 400 mm de pluie. On voit ainsi le contraste entre ces deux années consécutives.

Les précipitations annuelles varient entre 730 et 1300 mm au cours des années 2000 à 2017 avec des années déficitaires où les pluies annuelles sont inférieures à 900 mm comme en 2001 ou 2017.

De 2000 à 2006, la variation de la pluviométrie annuelle est très grande d'une année à une autre. On note trois années très pluvieuses avec des précipitations annuelles supérieures à 1200 mm, mais aussi des années moins pluvieuses avec des précipitations annuelles en dessous de 900 mm. A partir de l'année 2007, la variation inter annuelle de la pluviométrie est restée moins importante que les années précédentes. Néanmoins, on constate une baisse générale au niveau de la pluviométrie. En effet, la pluviométrie annuelle enregistrée au cours de l'année 2007 à 2015 reste toujours en dessous de 1200 mm de pluie, alors que de 2000 à 2006 il a été enregistré trois années avec des précipitations supérieures à 1200 mm.

Au niveau de la pluviométrie moyenne mensuelle de la zone d'étude, la situation se présente comme suit pour les années 2000, 2005, 2010 et 2017 :

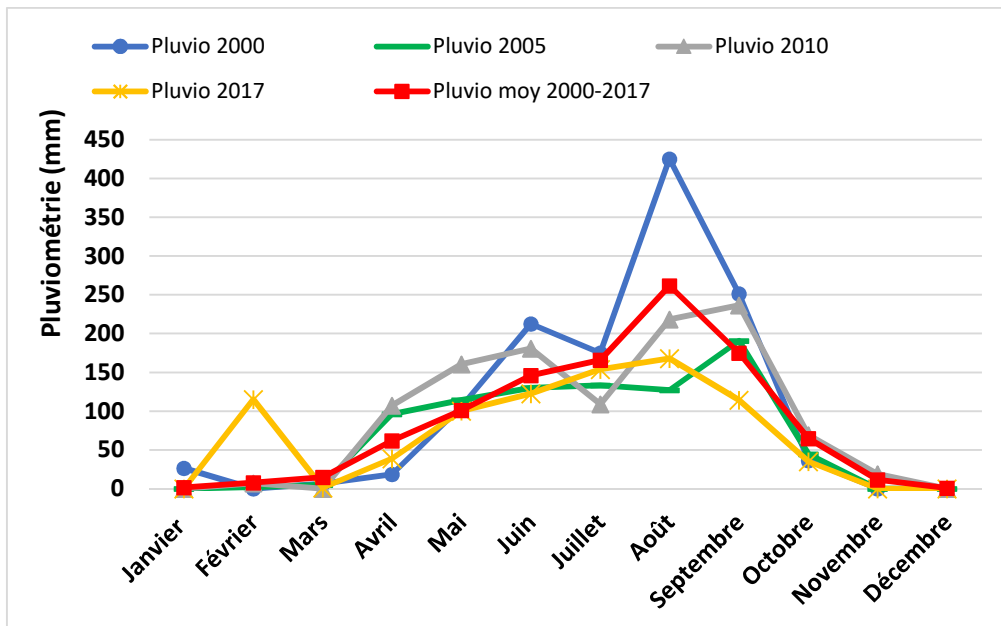


Figure 9 : Pluviométrie moyenne mensuelle de 2000 à 2017

(Source : Direction Générale de la Météorologie du Burkina, station de Bérégaougou (2000 à 2016) et <https://fr.tutiempo.net/climat> (2017))

La saison des pluies débute de façon effective au cours du mois de mai avec une augmentation progressive des précipitations jusqu'à leur maximum au cours des mois d'août ou septembre. Il est possible de rencontrer certaines années des démarrages précoces de la pluie au cours du mois d'avril. A partir du mois d'octobre, les quantités de précipitations diminuent, ce qui marque la fin de la saison des pluies. La saison des pluies dure environ 05 mois.

Les précipitations mensuelles maximales fluctuent entre 150 et 250 mm de pluie, à l'exception de l'année 2000 où la pluie mensuelle était au-delà de 400 mm. L'année 2000 est considérée comme une année très pluvieuse de la série temporelle de pluie. Les mois de Novembre à avril constituent la période de la saison sèche, on ne note pas de pluies significatives au cours de cette période.

Selon la fiche du Service d'informations sur les sites Ramsar (2017), le régime hydrologique du lac de Tengréla est caractérisé par deux saisons distinctes :

- une période de crue qui s'étend du mois d'août à octobre ;
- une période d'étiage de novembre à avril.

L'évolution du régime hydrologique du lac est en corrélation avec l'évolution de la pluviométrie au cours de l'année. Lorsque la pluie s'installe à partir du mois d'avril, on assiste à une augmentation de la quantité d'eau dans le lac jusqu'à l'atteinte de sa période de crue au mois d'août qui correspond à la période où la pluviométrie est maximale. Ensuite, à partir du

mois de novembre, la quantité d'eau du lac diminue progressivement à cause des multiples usages et de l'évapotranspiration jusqu'aux mois de mars ou d'avril.

II.3.2 Température

Les données de température mensuelle de 2000 à 2017 de la station de Bobo-Dioulasso ont été utilisées pour mettre en évidence la variation moyenne mensuelle de la température. Nous avons utilisé les données de cette station météorologique en faisant l'hypothèse que la température serait sensiblement identique à celle de notre zone d'étude, dans la mesure où cette station météorologique se situe dans la zone climatique soudano-guinéenne.

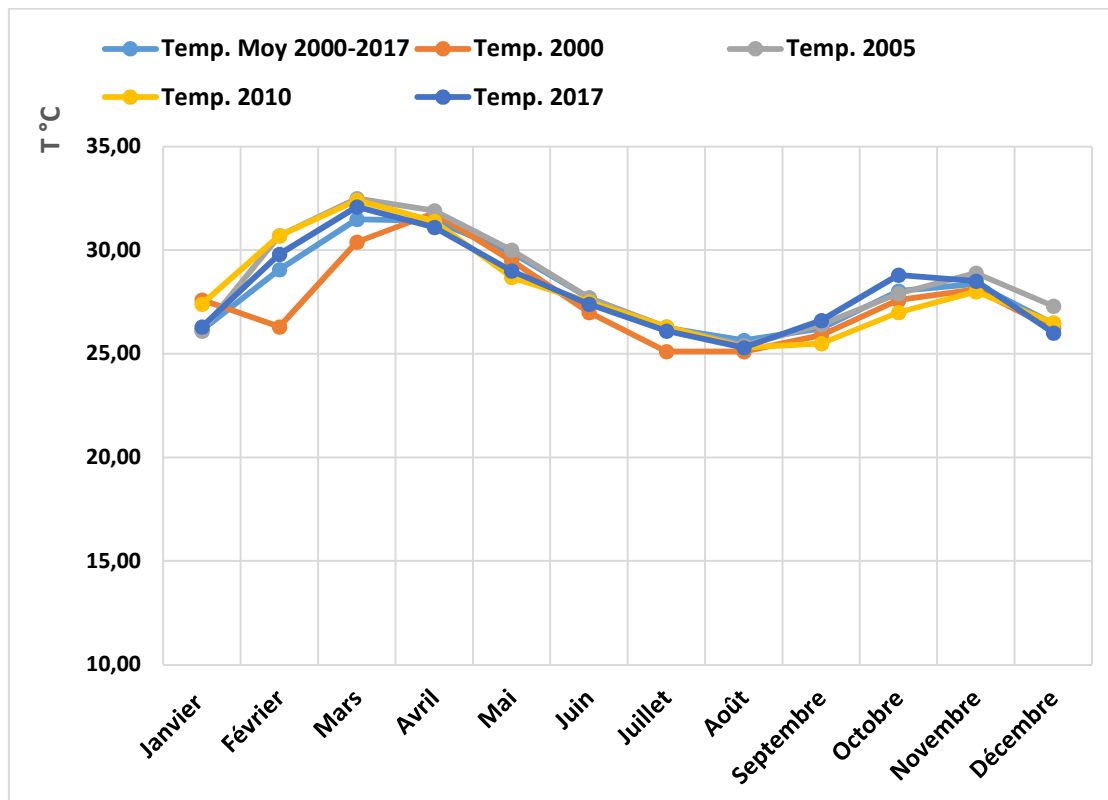


Figure 10 : Température moyenne mensuelle
 (Source : Direction Générale de la Météorologie du Burkina, station de Bobo-Dioulasso (2000 à 2016) et <https://fr.tutiempo.net/climat> (2017))

La température mensuelle de la zone d'étude fluctue entre 25 °C et 35 °C au cours de la période 2000 à 2017. Elle augmente progressivement de janvier à mars-avril où elle atteint sa valeur maximale avant de décroître pour atteindre sa valeur minimale au cours du mois d'août. On note des températures faibles pendant la saison pluvieuse (juillet à septembre) et intenses pendant la saison sèche. La baisse de température pendant la saison des pluies peut s'expliquer par la présence régulière des couvertures nuageuses. En effet, les nuages ont une bonne réflectance du rayonnement solaire incident dans la bande infrarouge, ce qui permet de limiter la hausse de température à la surface de la terre.

II.3.3 Evapotranspiration

Selon une étude commanditée par le « Millennium Challenge Corporation » pour l'élaboration du Schéma directeur d'aménagement et de gestion de l'eau du bassin de la Comoé (SDAGE) (2014), 80% de la ressource en eau précipitée dans ce bassin où se situe notre zone d'étude est reprise par évapotranspiration. Seulement 20% des pluies sera utile de façon directe au régime hydrologique avec une portion qui va s'infiltrer dans la nappe phréatique et le restant alimentera les cours et plans d'eau.

II.4 ACTIVITES SOCIO-ECONOMIQUES

Considéré comme un site public, le lac de Tengréla favorise le développement de plusieurs activités dont les principales sont l'agriculture, la pêche et le tourisme.

II.4.1 Agriculture

Le Burkina Faso est un pays sahélien avec une courte saison pluvieuse et une population rurale à majorité vivant de l'agriculture. Pour faire face à cette faiblesse climatique, les populations au voisinage des zones humides s'installent le long des berges des plans d'eau pour y mener des cultures de contre saison afin de satisfaire à leurs besoins.

Le lac de Tengréla constitue une importante ressource en eau d'irrigation pour le village de Tengréla et les villages riverains. Les principales spéculations agricoles irriguées sont les cultures maraichères (choux, oignon, tomates, ...), les cultures céréalières (maïs, riz, ...) et fruitières (mangues, bananes, ...). Selon le rapport d'évaluation des valeurs d'usages des sites Ramsar au Burkina Faso, la valeur économique de la production céréalière (riz, maïs, mil, sorgho) annuelle au niveau du lac de Tengréla s'élève environ à nonante trois millions trois cent soixante mille (93 360 000) FCFA, soit cent quarante-deux mille cinq cent trente-quatre (142 534) Euro (Tapsoba A., 2015).

La pratique de l'agriculture au niveau des berges du lac est un moyen de lutte contre le chômage dans la localité, mais elle constitue une menace pour le plan d'eau. En effet, un état des lieux du lac fait ressortir un ensablement progressif de la retenue suite aux activités agricoles qui favorisent l'érosion des sols au niveau des berges. On note aussi des risques de pollution des eaux du lac à cause de l'usage des engrais chimiques et herbicides dans les parcelles agricoles (Namoano Y., 2009).



Figure 11 : Parcelles agricoles au niveau des berges du lac de Tengréla
(Source photos : Auteur)

II.4.2 Pêche

Le lac de Tengréla représente un potentiel important pour la pêche dans la région des Cascades. Les pêcheurs y sont organisés en association pour réguler la filière. On distingue deux (02) types de pêche : la pêche artisanale avec des pirogues qui se pratique principalement de nuit et la pêche coutumière pratiquée au niveau des côtes du lac avec des hameçons (Tapsoba A., 2015). Le suivi de la pêche est assuré par la direction provinciale de la Comoé en charge des ressources halieutiques et elle est autorisée sur le lac de juillet à septembre et de décembre à février. La production annuelle de poisson au niveau du lac de Tengréla est estimée à 25 tonnes (Commune de Banfora, 2011). Les produits de la pêche sont destinés à la consommation locale et l'excédent approvisionne le marché de poisson de la ville de Banfora.

II.4.3 Tourisme

Sur le plan culturel, le lac constitue l'un des plus importants sites touristiques du pays avec des espaces récréatifs (campements touristiques). Il attire les touristes à cause de sa population d'hippopotames (environ une centaine). Un mirador est érigé à proximité du lac pour l'observation des hippopotames en toute quiétude. Pendant les flux touristiques, le site peut accueillir une vingtaine de touristes par jour. La recette touristique annuelle du lac s'élève environ à seize millions deux cent mille (16 200 000) FCFA, soit environ vingt-quatre mille sept cent trente-trois (24 733) Euro (Tapsoba A., 2015).

II.5 GESTION DU LAC

Le lac de Tengréla assure plusieurs fonctions dont les principales sont l'approvisionnement en eau pour l'irrigation, la pêche et le tourisme. Au regard de son statut d'offre de biens et services

pour la communauté et de maintien de la biodiversité, la gestion du lac est régie par un « protocole d'accord de gestion et d'exploitation » qui définit les règles de gestion et de préservation du site. Un comité de pilotage tripartite composé de l'Office National du Tourisme Burkinabè (ONTB), la mairie de Banfora et le village de Tengréla assure la gestion du site. Le protocole de gestion a été défini sur base de règles consensuelles entre les acteurs et selon les lois foncières et de gestion de l'eau du Burkina. Au regard de son aspect sacré pour la population autochtone, le protocole a pris en compte les us et coutumes du village de Tengréla pour une gestion intégrée et inclusive (Commune de Banfora, 2011).

Selon le protocole, l'ONTB est chargé de la promotion touristique et de la formation des guides touristiques chargés des visites guidées. La commune de Banfora a en charge l'entretien des voies d'accès au site et participe à l'aménagement et à la promotion du site. Quant au village de Tengréla, il assure les rites et coutumes afférents au site, l'entretien des pirogues et l'assainissement du site.

Le comité est chargé de prévenir et gérer les conflits liés à l'usage de la ressource en eau. Il relaye auprès de la communauté locale les règles de gestion conformément aux dispositions des conventions nationales et internationales Ramsar afin de les respecter.

Chapitre III : MATERIEL ET METHODE

Dans le cadre de l'étude de la dynamique des plantes envahissantes sur le lac de Tengréla, notre démarche a consisté à une collecte d'informations par télédétection et sur le terrain. La télédétection est considérée comme un outil très utile pour le suivi des phénomènes à la surface de la terre, et principalement pour le suivi de la végétation grâce à leurs réactions photosynthétiques. Par la variation de l'indice de végétation (NDVI), on peut suivre le stade de variation au niveau de la canopée des végétaux (Tucker, 1979).

Les données du satellite MODIS ont été principalement utilisées, car MODIS a l'avantage de fournir directement les valeurs des NDVI pour chaque pixel des images. La méthodologie de l'étude a consisté à une acquisition satellitaire d'informations sur les valeurs des indices de végétation NDVI pour chaque pixel de notre zone d'étude, à un prétraitement sur le logiciel ENVI et à un traitement final sur QGIS afin d'extraire les valeurs des NDVI et estimer les couvertures végétales sur le lac.

III.1 METHODE DE MESURE DES NDVI AVEC MODIS

La mesure des NDVI obtenus avec les capteurs MODIS s'obtient selon le principe de **Maximum Value Composite (MVC)**. La méthode MVC a été développée par Holben (1986) et consiste à l'acquisition d'une série de valeurs de NDVI de chaque pixel pendant une période donnée. La méthode MVC utilisée par les capteurs MODIS est similaire à celles qu'utilisait le satellite NOAA AVHRR bien avant MODIS pour le calcul du NDVI (Huete et al., 2002), avec une nette amélioration. En effet, une étude comparative des indices de végétation obtenus in situ, par les capteurs MODIS et NOAA AVHRR a été réalisé par Fensholt et *al.* (2005). Il ressort de cette étude que la méthode MVC qu'utilise MODIS pour déterminer les indices de végétation est très en corrélation avec les valeurs obtenues in situ, contrairement à NOAA AVHRR où la corrélation n'est pas nette.

Les conditions idéales pour avoir des NDVI optimales sont les périodes où le satellite se trouve à sa position nadir, avec peu d'aérosols dans l'atmosphère et le rayonnement solaire incident maximal. Sur certaines images collectées par satellite on retrouve des tâches qui masquent l'information. Ces perturbations sont dues le plus souvent à la présence de la couverture nuageuse qui réfléchit le rayonnement solaire incident. La bonne qualité des données collectées à la surface de la terre est fortement liée aux conditions atmosphériques (Holben, 1986).

Le satellite MODIS a l'avantage de disposer d'un algorithme qui permet d'effectuer les corrections atmosphériques. En effet, comme les capteurs du satellite MODIS collectent des informations sur les conditions atmosphériques (vapeur d'eau, aérosols, ...), ils utilisent ces

informations grâce à des algorithmes pour corriger les images définitives à exploiter (Justice et *al.*, 1998).

La présence d'aérosols dans l'atmosphère influence la quantité de rayonnement solaire qui arrive au niveau de la surface de la terre à cause de leur capacité à absorber ou réfléchir le rayonnement solaire incident. La méthode MVC à l'avantage parfois de remédier à cela puisqu'elle permet de ne considérer que la valeur maximale de la série de données collectées pendant la période de revisite du satellite, comme valeur de NDVI du pixel, ce qui permet ainsi d'exclure certaines mauvaises données collectées pendant des conditions atmosphériques peu favorables.

Avec les capteurs du satellite MODIS, les NDVI sont déterminés sur une série d'informations collectées une à deux fois par jour pendant la période de 16 jours (Fensholt et Sandholt, 2005). Les valeurs de NDVI obtenues pour chaque acquisition d'images (chaque 16 jours) sont examinées pixel par pixel, et la valeur maximale de NDVI de la série est considérée comme NDVI du pixel de l'image.

III.2 CARTOGRAPHIE DE LA SURFACE DU LAC

La cartographie de la surface du lac a été réalisée grâce à des observations sur le terrain et par satellite. Nous avons marqué les limites du lac avec l'aide des usagers du lac. En effet, grâce au témoignage sur le terrain, nous avons marqué avec un GPS quelques bornes extrêmes où s'étend la surface d'eau du lac. Nous avons défini les limites du lac suivant l'étendue maximale de la surface d'eau du lac.

A l'aide du logiciel de Système d'Informations Géographique (SIG) QGIS, nous avons délimité les limites du lac pour notre étude en couplant les coordonnées GPS obtenues sur le terrain aux images satellitaires Google Earth de la zone d'étude.

La figure ci-dessous présente les limites du lac pour notre étude :



Figure 12 : Limites du lac de Tengréla (Source fond de carte : Google Earth)

III.3 ACQUISITION DES IMAGES SATELLITAIRES

Les données du satellite MODIS ont été téléchargées gratuitement sur le site <https://earthexplorer.usgs.gov/> de l'Institut d'études géologiques des Etats-Unis (USGS). MODIS assure la continuité des informations collectées sur la végétation par les satellites Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR, lancé en 1978) et Landsat (lancé en 1972), avec une amélioration au niveau des bandes spectrales (Justice et *al.*, 1998). L'une de ses missions est le suivi de la végétation à la surface de la terre.

Le satellite MODIS fonctionne avec deux (02) capteurs (Terra et Aqua) et a une largeur de 2330 km. Le capteur Terra a été lancé le 18 décembre 1999 et le capteur Aqua le 04 mai 2002 par la NASA. Ces capteurs observent toute la surface du globe tous les un à deux jours. Le capteur Terra observe la surface de la terre (fournit des données en format MODIS) et le capteur Aqua fournit des données au niveau des océans (fournit des données en format MYD). Ils mesurent de façon continue plusieurs informations sur les nuages, la surface de la terre, la vapeur d'eau atmosphérique, les océans et les températures atmosphériques grâce à 36 canaux spectraux dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 0.405 μm et 14.385 μm (voir les caractéristiques spécifiques des capteurs MODIS en *Annexe 1*). (Source : https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis, consulté le 04/07/2018).

Les bandes spectrales des capteurs ont des résolutions spatiales de 250 m, 500 m et 1000 m réparties comme suit :

- bandes 1 à 2 : 250 m ;

- bandes 3 à 7 : 500 m ;
- bandes 8 à 36 : 1000 m.

Le satellite MODIS offre des images codées en 12 bits, c'est-à-dire qu'il permet d'obtenir des images avec 4096 nuances de gris possibles. Ces images sont distribuées à différentes résolutions temporelles (quotidien, 8 jours, 16 jours, mensuel, trimestriel et annuel) selon le produit.

Sur la base d'informations recherchées (couverture végétale, évolution de la température, ...), le satellite MODIS offre plusieurs gammes de produits (MOD13A1, MOD13C2, MOD13Q1, ...). Pour notre étude, les données issues du produit « **Indices de végétation MODIS / Terra 16 jours L3 Global 250 m** », en abrégé **MOD13Q1 versions 5 et 6** du capteur Terra seront utilisées. Le choix de MOD13Q1 par rapport au produit MOD13A1 pour notre étude s'explique par le fait que MOD13Q1 a l'avantage de proposer une meilleure résolution spatiale de 250 m que MOD13A1 où la résolution spatiale est de 500m. Le produit MOD13Q1 fournit des images tous les 16 jours et donne directement les valeurs d'indices de végétation dont le NDVI pour chaque pixel de l'image MODIS.

Pour le suivi de la dynamique du couvert végétal au niveau du lac de Tengréla, **411 images** du produit MOD13Q1 ont été téléchargées. Ces images constituent la série entière d'informations de 2000 à 2017 pour ce produit dans la zone d'étude. Les fichiers téléchargés étaient nommés de la façon suivante :

MOD13Q1.A_YYYYDDD.h17v07.VVV.AAAAJJHHMMSS.hdf.

Dans cette nomenclature :

- **MOD13Q1** est le nom abrégé du produit ;
- **A_YYYYDDD** représente la date d'acquisition en année et jour julien ;
- **h17v07** est l'identificateur de tuile. Pour la projection d'images terrestres MODIS à haute résolution spatiale (250 m), c'est le système de carrelage sinusoïdal qui est utilisé pour identifier les zones où les images ont été acquises. Le système de coordonnées débute au coin supérieur (0,0) et comporte 460 tuiles. Le coin inférieur droit (35,17) correspond à la fin du système de coordonnées. Notre zone d'étude se situe à l'horizontale 17 et à la verticale 07 comme présenté sur cette figure ci-dessous :

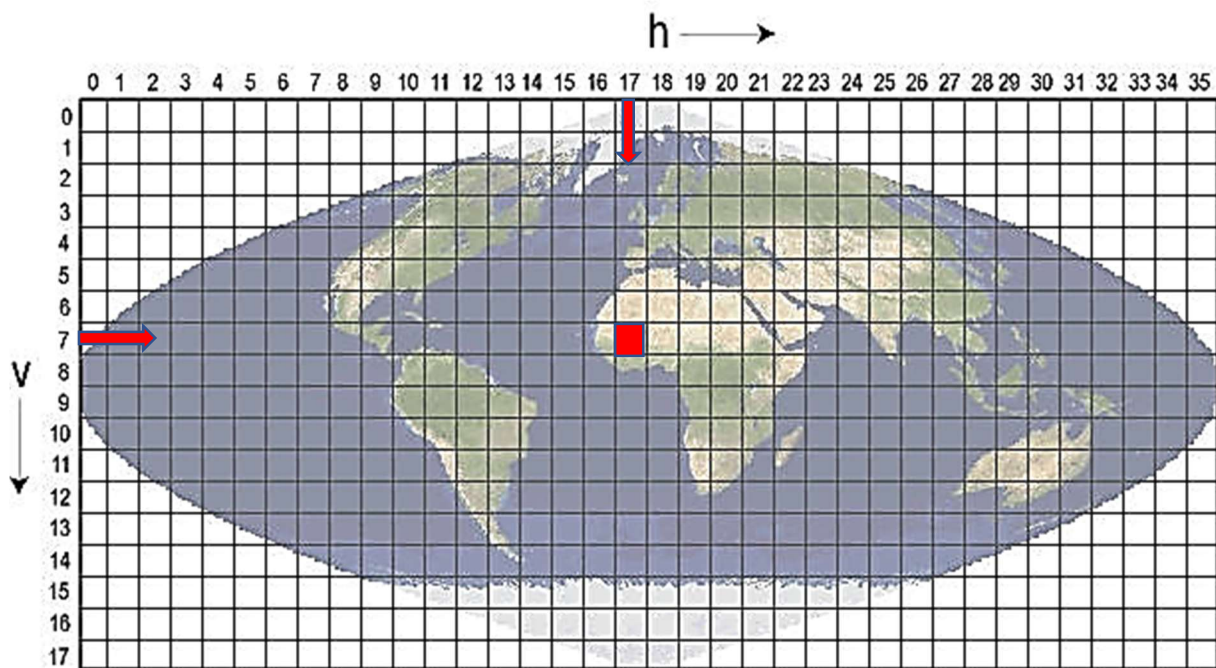


Figure 13 : Système de dalle sinusoïdale de MODIS

(Source : https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis, consulté le 04/07/2018)

- VVV représente la version de collection (version 05 ou 06) ;
- AAAAJJHHMMSS est la date de production en année, jour julien et heure ;
- hdf représente l'extension des fichiers téléchargés, en format de données HDF-EOS.

Par exemple la nomenclature du produit suivant **MOD13Q1.A2000049.h17v07.005.2006269172029.hdf** signifie que les informations sur l'image ont été acquises le 49^{ème} jour julien de l'année 2000 (18/02/2000) par un capteur de la version 05 avec des données produites le 269^{ème} jour julien de l'année 2006 (26/09/2006) à 17h20min29s.

Le produit MOD13Q1 fournit des informations selon les bandes du visible (BLUE et RED), les bandes de l'infrarouge (NIR et MIR) et les indices de végétation (EVI et NDVI). Dans la suite des travaux, seulement l'indice de végétation NDVI sera extrait de ce produit. Ces données serviront à identifier les surfaces fortement couvertes par les végétaux sur le lac.

III.4 TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES

Les images satellitaires MODIS téléchargées ont été traitées grâce au logiciel ENVI Classic version 5.0 et au logiciel de Système d'Informations Géographique (SIG) QGIS version 2.18. Le logiciel ENVI a d'abord été utilisé pour le prétraitement des images brutes et QGIS pour le traitement final des données sur l'indice de végétation NDVI.

III.4.1 Prétraitement des images avec ENVI Classic

Le logiciel ENVI (Environment for Visualizing Images) est l'outil informatique qui nous a servi au prétraitement des images satellitaire MODIS brutes. L'interface de l'image sur ENVI se présente comme suit :

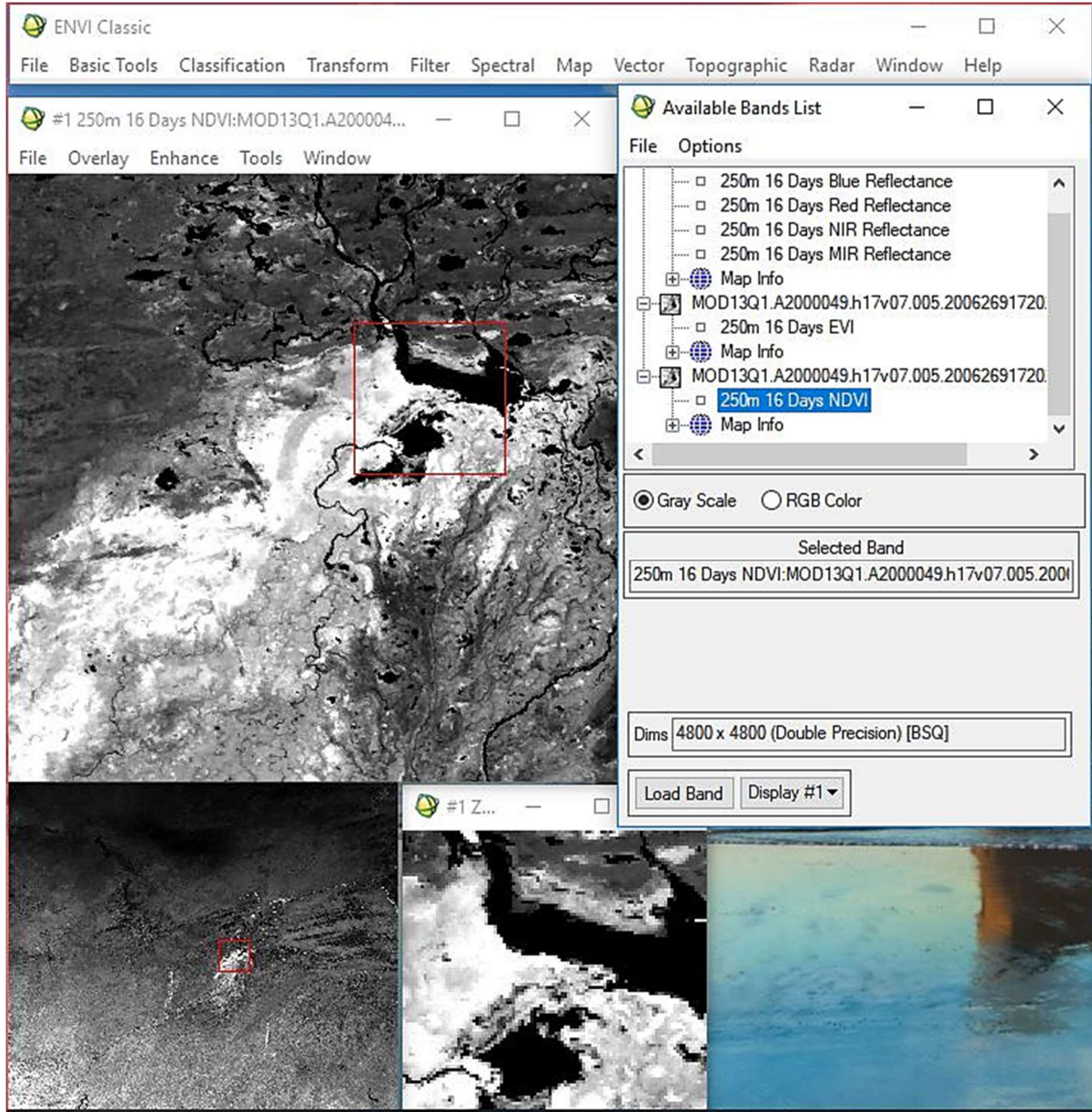


Figure 14 : Affichage d'image brute sur ENVI

Sur cette interface, on retrouve les bandes du bleu, du rouge, du proche infrarouge (NIR), du moyen infrarouge (MIR), de l'indice de végétation amélioré (EVI) et de l'indice de végétation NDVI. Seulement la bande du NDVI sera été utilisée pour la suite des travaux.

Les fichiers ouverts sur ENVI couvraient une très grande zone géographique de 1200 km x 1200 km. Dans le but de faciliter et éviter le bug des logiciels de traitement, chaque image a été

délimitée selon les coordonnées géographiques de notre zone d'études. Cette manipulation a été réalisée sur le logiciel ENVI Classic grâce à la manipulation suivante :

Basic Tools > Resize data (Spatial/Spectral) > sélection de l'image NDVI > délimitation de la zone d'étude avec les coordonnées géographiques.

L'aperçu de l'outil de spatialisation sur ENVI se présente comme suit :

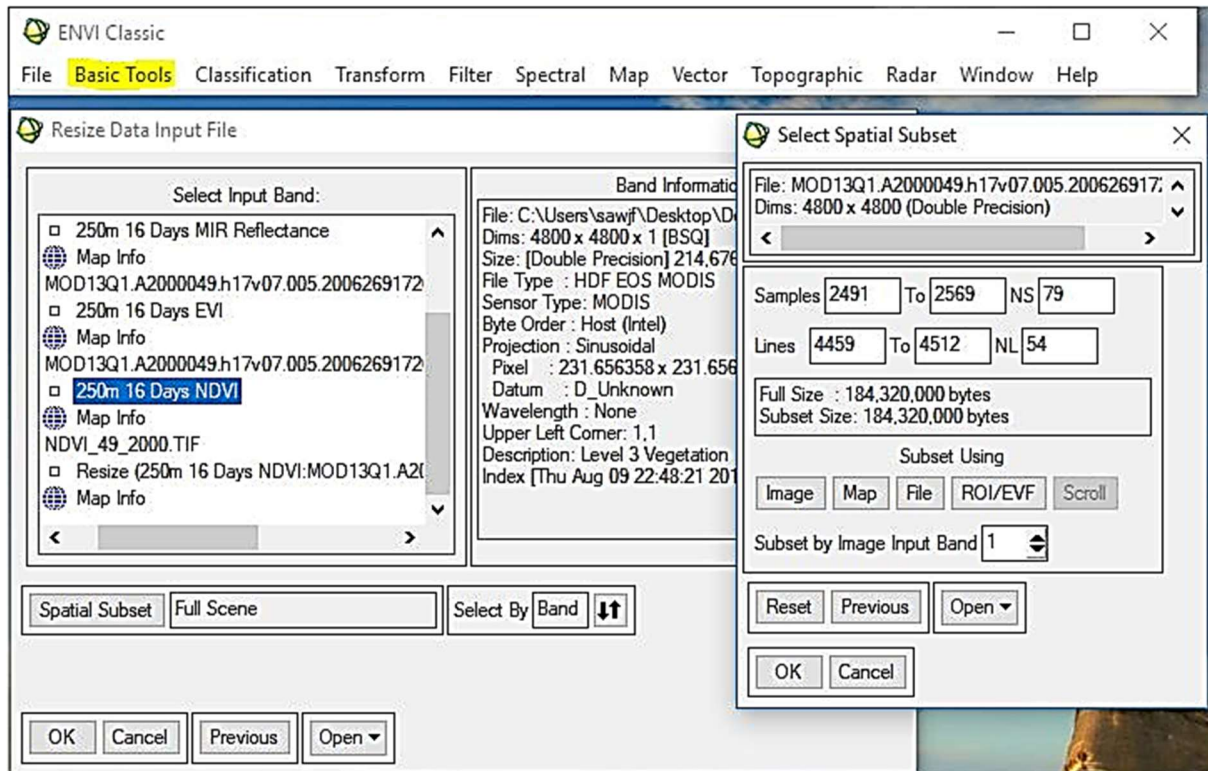


Figure 15 : Délimitation de l'image NDVI selon la zone d'étude

Les images spatialisées à la zone d'étude ont ensuite été enregistrées sous le format .TIF. Ce format a l'avantage d'être pris en compte par le logiciel de traitement QGIS et de permettre la conservation des valeurs réelles des NDVI des pixels de chaque image. Ainsi, les images au format MOD13Q1.AYYYYDDD.h17v07.005.AAAAJJHHMMSS.hdf ont été renommées simplement sous le format **NDVI_JJ_AAAA.TIF** afin de faciliter notre traitement d'images. Dans cette nouvelle nomenclature :

- **NDVI** fait référence à l'usage des données NDVI du produit MOD13Q1 ;
- **JJ** représente la date d'acquisition de l'image en jour julien ;
- **AAAA** représente l'année d'acquisition de l'image ;
- **.TIF** représente l'extension de l'image.

Par exemple l'image MOD13Q1.A2000049.h17v07.005.2006269172029.hdf est renommée comme suit : NDVI_49_2000.TIF, ce qui signifie que l'image NDVI a été acquise le 49^{ème} jour julien de l'année 2000 (18/02/2000) et enregistrée en format .TIF.

La figure ci-dessous donne un aperçu des valeurs de NDVI de l'image NDVI_49_2000.TIF sur le logiciel ENVI pour chaque pixel de notre zone d'étude :

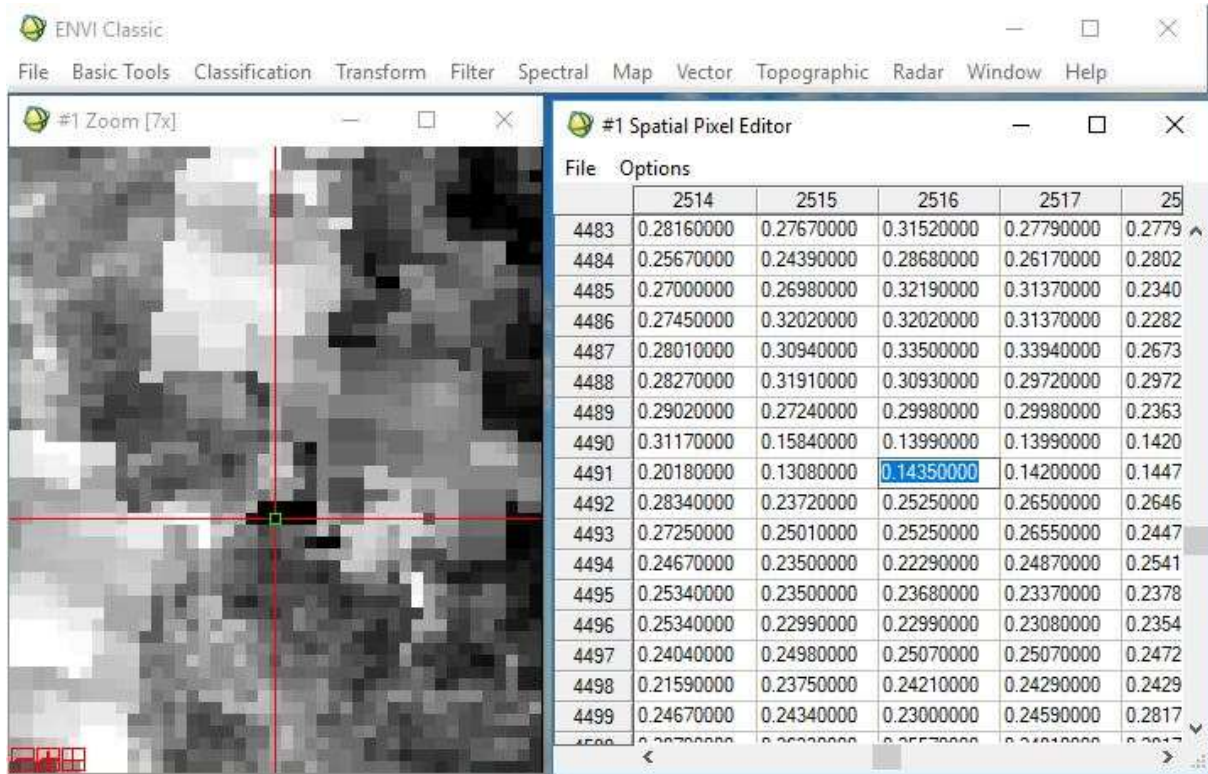


Figure 16 : Valeurs de NDVI de quelques pixels

III.4.2 Traitement des images avec QGIS

Le logiciel SIG QGIS a servi au traitement final de la série d'images NDVI_JJ_AAAA.TIF issues du prétraitement sur ENVI Classic. Ce traitement sur QGIS nous a permis d'extraire les valeurs de NDVI de la surface du lac. Pour cela, nous avons restreint notre surface d'intérêt à l'emprise du lac qui a été défini précédemment (voir figure 12) grâce à une rastérisation. La rastérisation a consisté à extraire la zone d'intérêt en découpant les images NDVI selon l'emprise du trait de coupe du fichier vectoriel de la limite du lac. Pour faire ce découpage, le logiciel QGIS ne considère que les pixels dont au moins la moitié est inscrite dans la limite de la zone d'étude. Malheureusement sur l'affichage du résultat obtenu on note un léger décalage du raster final par rapport au raster initial, ce qui n'impacte pas sur le choix des pixels (voir Figure 17).

La figure suivante présente le découpage de l'image NDVI correspondant au 49^{ème} jour julien de l'année 2000 avec les pixels correspondant à la surface du lac :

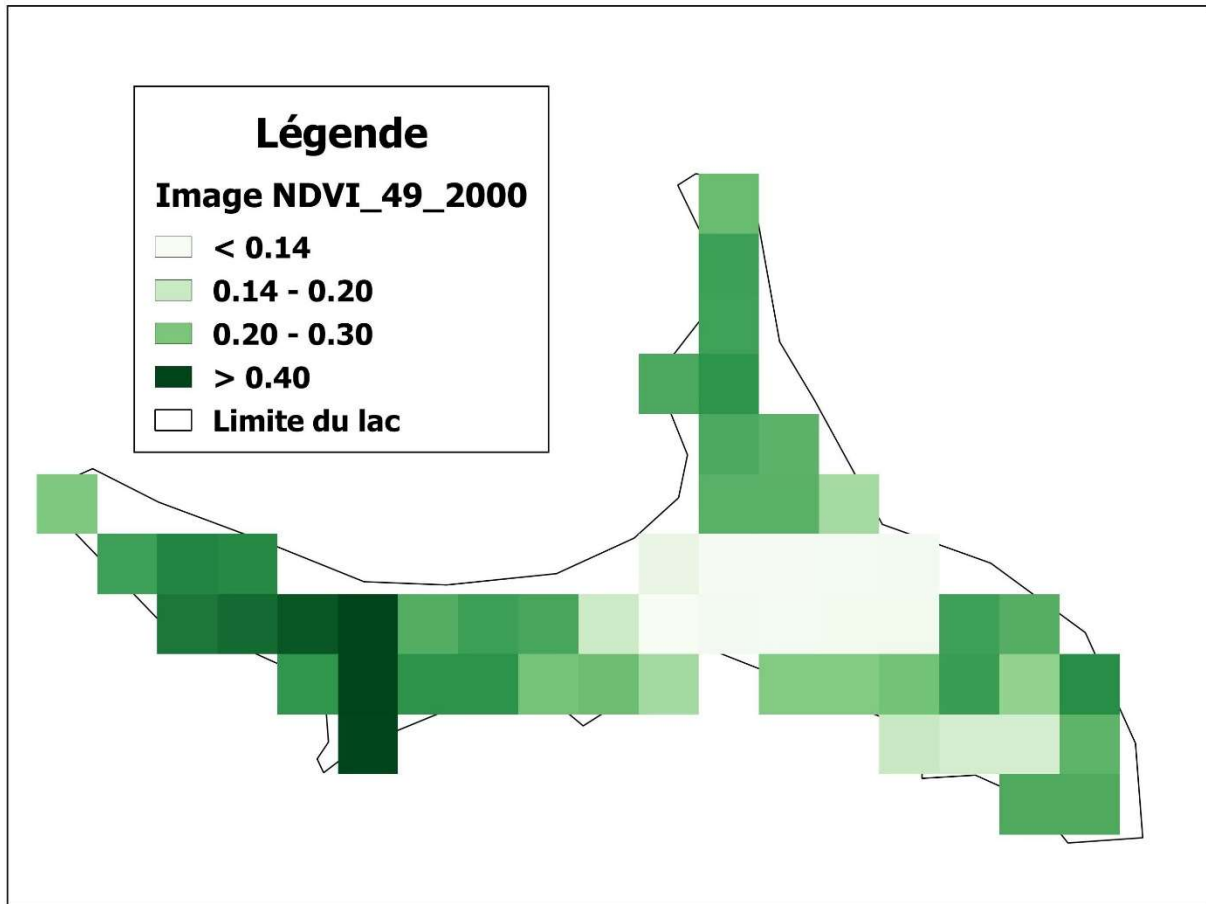


Figure 17 : Pixels MODIS du lac de Tengréla

Sur cette cartographie, la surface totale du lac est délimitée par 54 pixels¹, soit 337.5 ha. Les parties en vert clair correspondent à des valeurs de NDVI faibles et les zones en vert foncé représentent les valeurs de NDVI plus élevées.

III.4.3 Estimation du couvert végétal

III.4.3.1 Choix des valeurs de NDVI correspondant à la surface des végétaux

Pour étudier la dynamique des plantes envahissantes sur le lac, nous nous proposons de mettre en évidence les surfaces fortement colonisées par les macrophytes. Pour cela, nous avons procédé à une analyse comparative des NDVI obtenus grâce à des données satellitaires haute résolution spatiale comme LANDSAT 8 ou basse résolution spatiale comme MODIS avec des observations grâce à des photographies acquises sur le terrain.

¹ Chaque pixel MODIS a une dimension de 250mx250m, soit 6.25 ha

L'avantage avec les satellites à haute résolution spatiale comme Landsat est qu'ils permettent d'identifier clairement sur ses images par la combinaison de longueurs d'ondes du visible les surfaces couvertes par les plantes aquatiques envahissantes, ce qui nous permettra d'identifier la valeur de NDVI à partir de laquelle on aura une forte présence de végétaux.

➤ **Comparaison entre NDVI Landsat et NDVI MODIS**

Les caractéristiques des bandes du capteur Landsat 8 se présentent comme suit :

Bandes	Longueur d'onde (micromètre)	Résolution (mètre)
Band 1 - Ultra Blue (coastal/aerosol)	0.435 - 0.451	30
Band 2 - Blue	0.452 - 0.512	30
Band 3 - Green	0.533 - 0.590	30
Band 4 - Red	0.636 - 0.673	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.851 - 0.879	30
Band 6 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.566 - 1.651	30
Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.107 - 2.294	30
Band 8 - Panchromatic	0.503 - 0.676	15
Band 9 - Cirrus	1.363 - 1.384	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Tableau 2 : Caractéristiques des bandes de LANDSAT 8

(Source : <http://eoedu.belspo.be/fr/satellites/landsat.htm>)

Le NDVI des images LANDSAT a été calculé pour chaque pixel grâce aux bandes spectrales du rouge (Band 4) et du proche infrarouge (Bande 5). Le calcul a été réalisé par rasterisation à l'aide du logiciel QGIS selon la formule suivante :

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

L'image NDVI du satellite Landsat obtenue, nous allons mener une analyse comparative des valeurs de NDVI avec une image MODIS de la même période. Pour cela, nous avons utilisé une image Landsat acquise le 16/01/2015 et une image MODIS acquise le 17/01/2015.

Les cartographies des NDVI obtenus avec Landsat 8 et MODIS pour ces images se présentent comme suit :

Représentation des NDVI issus de LANDSAT et MODIS

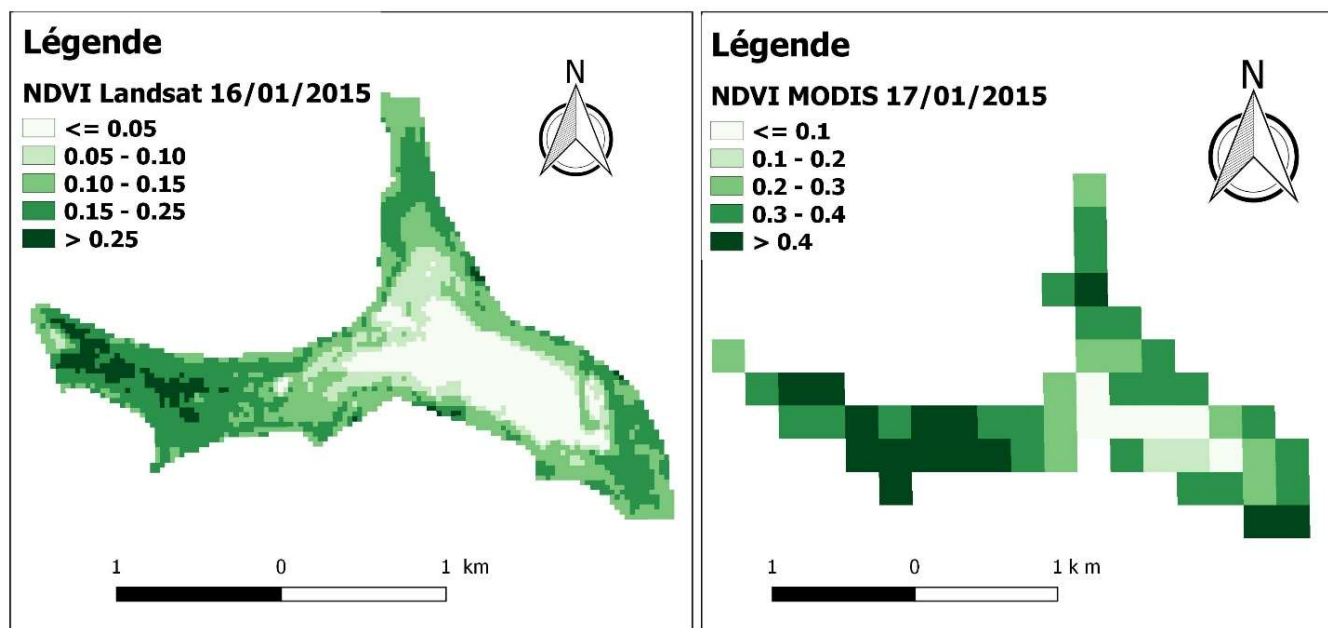


Figure 18 : Représentation du NDVI d'images LANDSAT et MODIS

On note une légère différence entre les valeurs de NDVI obtenues par les capteurs MODIS et Landsat. Cette différence peut s'expliquer par la différence de valeurs des longueurs d'ondes du rouge (Red) et du proche infrarouge (NIR) au niveau de ces deux capteurs. En effet avec Landsat 8, on a une bande du rouge de longueur d'onde comprise entre $0.636 \mu\text{m}$ et $0.673 \mu\text{m}$, alors qu'avec MODIS on a une longueur d'onde du rouge comprise entre $0.620 \mu\text{m}$ et $0.670 \mu\text{m}$. Ensuite, au niveau des bandes du proche infrarouge, avec Landsat 8 on a une longueur d'onde comprise entre $0.851 \mu\text{m}$ et $0.879 \mu\text{m}$, tandis qu'avec MODIS, elle est comprise entre $0.841 \mu\text{m}$ et $0.876 \mu\text{m}$. Ces deux bandes (Red et NIR) servant au calcul du NDVI, la différence au niveau des ordres de grandeur entre les capteurs MODIS et Landsat peut expliquer la légère différence entre les valeurs de NDVI issues d'images d'une même période.

Sur les images LANDSAT (à gauche), on perçoit clairement en couleur verte l'étendue des plantes aquatiques envahissantes sur le plan d'eau du lac pour des valeurs de NDVI supérieures à 0.1. Par contre, sur la cartographie des NDVI de MODIS, la résolution spatiale ne permet pas d'identifier de façon précise la couverture végétale sur le lac. Les NDVI de l'image MODIS varient de -0.016 à plus de 0.4.

Ainsi, en superposant ces deux images (LANDSAT et MODIS), on peut considérer que les NDVI supérieurs à 0.3 sur les images MODIS correspondent à des surfaces fortement colonisées par les plantes envahissantes aquatiques.

➤ Comparaison entre NDVI MODIS et photographie terrain

Pour le choix des valeurs d'indices de végétation NDVI correspondant aux surfaces de couverts végétaux sur le lac, nous allons analyser une image MODIS du 07 avril 2018 qui correspond à notre période de collecte de données terrain que nous comparerons avec des photographies géoréférencées prise sur le terrain à la même période.

Le pixel NDVI de l'image MODIS du 07 avril 2018 comprenant le point de coordonnées 4,837891° de longitude ouest et 10,647095° de latitude nord correspondant à la photographie N°1 ci-dessous a un NDVI égal à 0.3715. Sur cette photo N°1, on voit clairement la présence du couvert végétal au niveau des coordonnées ci-dessus. Après ce pixel, le suivant correspondant sur la photo N°1 à une partie de la surface d'eau du lac a un NDVI de 0.2606.

Sur la photo N°2 qui comprend le point de coordonnées 4,838556° de longitude ouest et 10,64186° de latitude nord, on a un NDVI de 0.3123 et le pixel suivant correspondant à la surface d'eau sur la photo N°2 a un NDVI égal à 0.0507.

La confrontation des photos et des images NDVI du satellite MODIS confirme le choix des NDVI supérieurs à 0.3 comme zone avec présence de couvert végétal.



Photo 1 (4,837891° W, 10,647095° N)

Photo 2 (4,838556° W, 10,64186° N)

Figure 19 : Photographies de la surface d'occupation du lac (Source photo : auteur)

Cette analyse visuelle et satellitaire montre que les valeurs de NDVI supérieures à 0.3 sur les images MODIS correspondent sur le terrain à des surfaces fortement colonisées par les végétaux.

Dans la suite de notre étude, nous analyserons la dynamique de la prolifération des plantes aquatiques envahissantes sur le lac en considérant que les pixels dont les valeurs de NDVI sont

supérieures à 0.3 sur la série d'images MODIS correspondent à des surfaces du lac fortement colonisées par les plantes aquatiques envahissantes.

III.4.3.2 Surfaces couvertes par les végétaux

Puisque les valeurs élevées d'indices de végétations comme le NDVI sont fortement liées à la densité de la couverture végétale (Zhang et al., 2003), sur la base de ces valeurs, les pixels correspondant à la couverture végétale ont été identifiés. En multipliant le nombre de pixels par la dimension d'un pixel l'image (6.25 ha), on estime la surface couverte par les végétaux pour la série d'images de 2000 à 2017.

Le satellite MODIS offre de façon générale deux images par mois. Pour chaque mois, la moyenne des surfaces bimensuelles a été calculée afin d'obtenir des couvertures végétales mensuelles moyennes des années 2000 à 2017.

Le tableau ci-dessous présente le traitement issu de la série d'images NDVI de l'année 2000 :

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
49	18-02-00	6,25	28	175	51,85%
65	05-03-00	6,25	18	112,5	33,33%
81	21-03-00	6,25	30	187,5	55,56%
97	06-04-00	6,25	35	218,75	64,81%
113	22-04-00	6,25	33	206,25	61,11%
129	08-05-00	6,25	37	231,25	68,52%
145	24-05-00	6,25	48	300	88,89%
161	09-06-00	6,25	48	300	88,89%
177	25-06-00	6,25	52	325	96,30%
193	11-07-00	6,25	54	337,5	100,00%
209	27-07-00	6,25	51	318,75	94,44%
225	12-08-00	6,25	51	318,75	94,44%
241	28-08-00	6,25	38	237,5	70,37%
257	13-09-00	6,25	51	318,75	94,44%
273	29-09-00	6,25	47	293,75	87,04%
289	15-10-00	6,25	52	325	96,30%
305	31-10-00	6,25	52	325	96,30%
321	16-11-00	6,25	50	312,5	92,59%
337	02-12-00	6,25	47	293,75	87,04%
353	18-12-00	6,25	46	287,5	85,19%

Tableau 3 : Traitement des images NDVI de l'année 2000

Ces surfaces moyennes mensuelles de la couverture végétale sur le lac seront utilisées pour suivre les variations mensuelles et annuelles des surfaces colonisées par les plantes envahissantes durant la période d'étude (confère *Annexe 3*).

III.4.4 Acquisition des données météorologiques

En plus de l'étude de la variation intra et inter annuelle de la couverture végétale sur le lac, nous analyserons la dynamique saisonnière des plantes envahissantes sur le lac. Ainsi, nous confronterons l'étendue du couvert végétal sur le lac avec le niveau de remplissage du lac. Malheureusement, nous ne disposons pas de système de mesure de débits au niveau du lac de Tengréla. Pour pallier à cette situation, nous utiliserons les données pluviométriques pour suivre cette variation saisonnière des plantes sur le lac.

Les données des précipitations mensuelles de la zone d'étude issue de la station météorologique de Bérégadougou et de Bobo-Dioulasso ont été obtenues auprès de la Direction Nationale de la Météorologie du Burkina Faso. Elles concernent les données pluviométriques et de températures moyennes mensuelles de 2000 à 2016.

Pour compléter les données afin de mener notre étude de 2000 à 2017, nous avons téléchargé les précipitations mensuelles et les températures moyennes mensuelles de la station de Bobo-Dioulasso de l'année 2017 sur le site <https://fr.tutiempo.net/climat> (confère les *Annexe 4* et *Annexe 5*).

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION

L'étude de la variation de la dynamique des plantes aquatiques envahissantes sur le lac de Tengréla au Burkina Faso a été réalisée grâce à une série d'images satellitaires MODIS de 2000 à 2017. La série de données est constituée de **411 images NDVI**, soit 23 images acquises par année à l'exception de l'année 2000, date de début d'acquisition des images MODIS de la zone d'étude (18/02/2000) où il n'y a que 20 images.

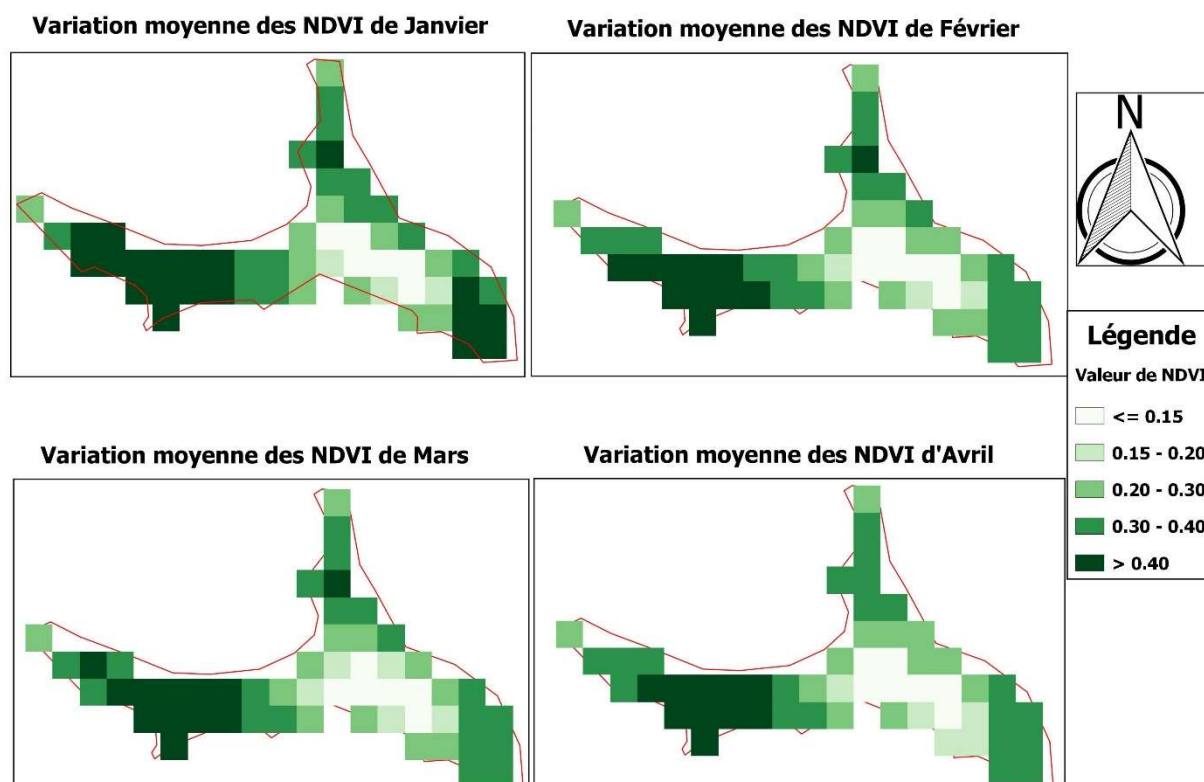
Le traitement de l'ensemble des images NDVI a permis d'identifier et dénombrer les pixels correspondant à des peuplements denses de plantes aquatiques envahissantes sur le lac afin de suivre leurs évolutions intra et inter annuelle.

IV.1 RÉSULTATS DES TRAITEMENTS

IV.1.1 Variation moyenne mensuelle des NDVI

Dans le but de suivre l'état de la végétation sur le lac, nous avons suivi l'évolution des indices de végétations pixel par pixel sur la série d'images NDVI de 2000 à 2017. Pour chaque pixel, nous avons calculé la moyenne mensuelle des valeurs de NDVI de 2000 à 2017.

Les figures suivantes représentent la variation moyenne mensuelle des NDVI de chaque pixel MODIS du lac durant la période de l'année 2000 à 2017 :



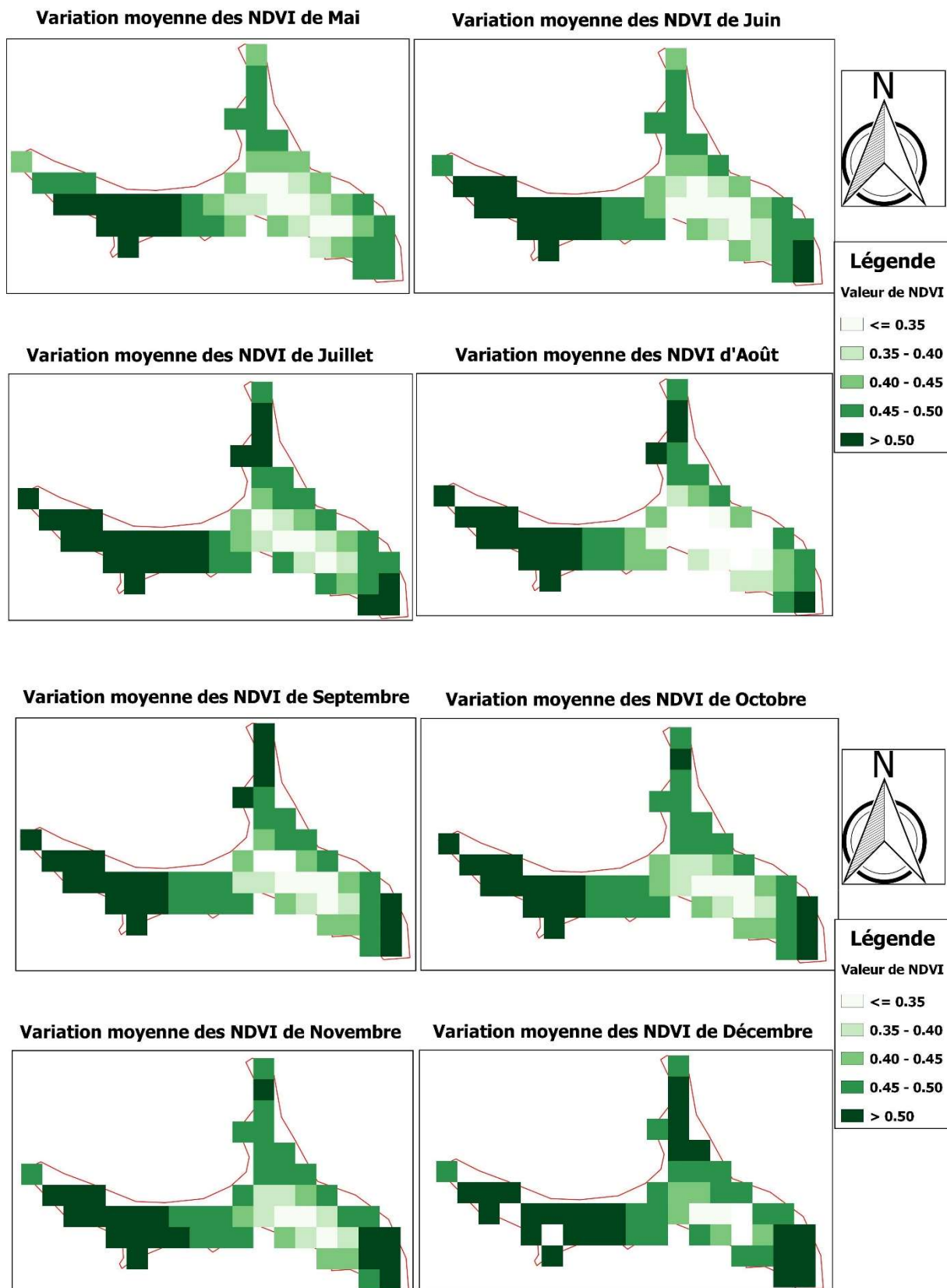


Figure 20 : Variation moyenne mensuelle des NDVI de 2000 à 2017

La représentation graphique de la série temporelle des valeurs de NDVI moyennes mensuelles montre une variation des NDVI des pixels au cours des mois. Aussi, les valeurs de NDVI élevées sont constatées au niveau des abords du lac avec des NDVI supérieurs à 0.3. Les valeurs de NDVI les plus faibles au niveau des abords du lac sont obtenues au cours des mois de janvier à avril où certaines valeurs de NDVI des pixels restent en dessous de 0.5, alors que de mai à décembre, on note généralement des NDVI supérieurs à 0.5.

La partie sud-ouest du lac à l'extrême gauche sur les cartes représente la zone où la présence de la couverture végétale est dense durant tous les mois de l'année avec des indices de végétation supérieurs à 0.5. Par contre, au niveau des abords au nord et au sud-est du lac, la végétation est moins dense au cours des mois de février à juin avec des valeurs de NDVI comprises entre 0.2 et 0.4. Mais à partir du mois de juin, l'activité végétative dévient de plus en plus intense au niveau de l'ensemble des abords du lac avec des indices de végétation NDVI supérieurs à 0.5.

IV.1.2 Variation intra et inter-annuelle de la couverture végétale sur le lac

Le traitement des données NDVI de MODIS nous a permis d'estimer les surfaces du lac fortement colonisées par les végétaux de 2000 à 2017. Les courbes suivantes représentent les variations annuelles de la surface colonisée par les plantes aquatiques envahissantes sur le lac au cours des années 2000, 2005, 2010 et 2015.

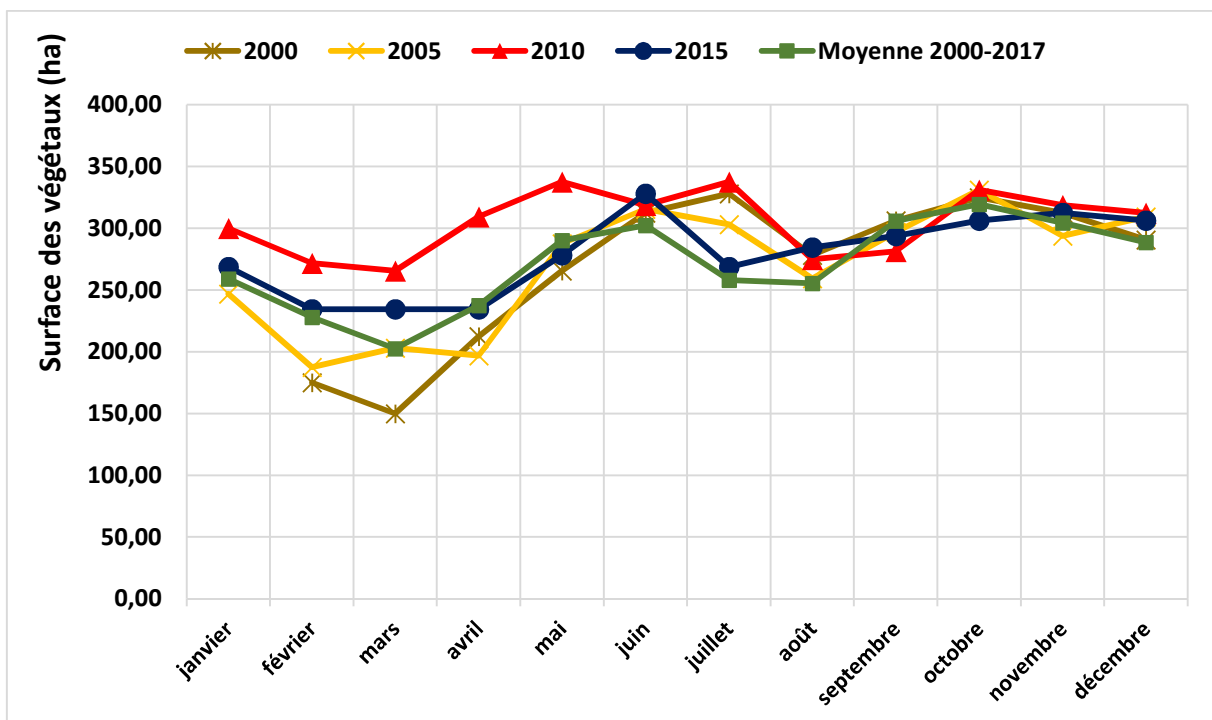


Figure 21 : Variation annuelle de la couverture végétale sur le lac

Ces courbes révèlent une tendance similaire de la dynamique de variation du couvert végétal sur le plan d'eau au cours des années. Le minimum de la couverture végétale sur le lac est constaté au cours de la période février à mars, alors que l'étendue maximale est constatée au cours des mois de juin à octobre.

De mars à juin, on note de façon générale une forte augmentation de la surface colonisée par les plantes envahissantes sur le lac avec des tendances qui varient d'une année à une autre. De mars à juin 2000, la couverture végétale sur le lac passe de 150 ha à plus de 300 ha, soit 150 ha d'extension, alors qu'en 2010 pendant cette même période elle passe de 265 ha à 337 ha, c'est-à-dire avec une extension d'environ 70 ha.

De juin à octobre, la couverture végétale sur le lac reste presque constante avec une valeur minimale constatée au cours du mois d'août autour de 280 ha. Puis, elle décroît progressivement d'octobre jusqu'au mois de mars de l'année suivante.

Durant la période d'étude, la couverture végétale minimale sur le lac est constatée pendant le mois de mars de l'année 2000 avec une superficie occupée d'environ 150 ha, alors qu'en 2010 la couverture végétale minimale du lac était de plus de 270 ha, soit une extension de 120 ha de par rapport à l'année 2000. Au niveau de la couverture végétale maximale sur le lac, elle est obtenue pendant les mois de juin pour la plupart des années avec des valeurs moyennes d'environ 330 ha.

Sur cette série temporelle, l'analyse de la couverture végétale sur le lac de 2000 à 2017 montre que l'année 2010 correspond à l'année où la couverture végétale était la plus importante sur le plan d'eau, que ce soit pendant les périodes de forte extension (juin-juillet) ou pendant les mois où la couverture végétale est moindre (février-mars). Par contre, l'année 2000 correspond à l'année où la couverture végétale était minimale sur le lac.

IV.1.2.1 Variation moyenne mensuelle de la couverture végétale

Dans le souci de suivre la variation de la couverture végétale moyenne mensuelle sur le lac au cours des 18 années (2000 à 2017), les moyennes mensuelles ont été calculées pour la série d'images (confère *Annexe 3*). Pour chaque mois de la série temporelle, nous avons calculé la moyenne de la couverture végétale sur le lac.

Le graphique suivant représente le pourcentage de la variation moyenne mensuelle de la couverture végétale et de l'étendue de la surface d'eau du lac de 2000 à 2017.

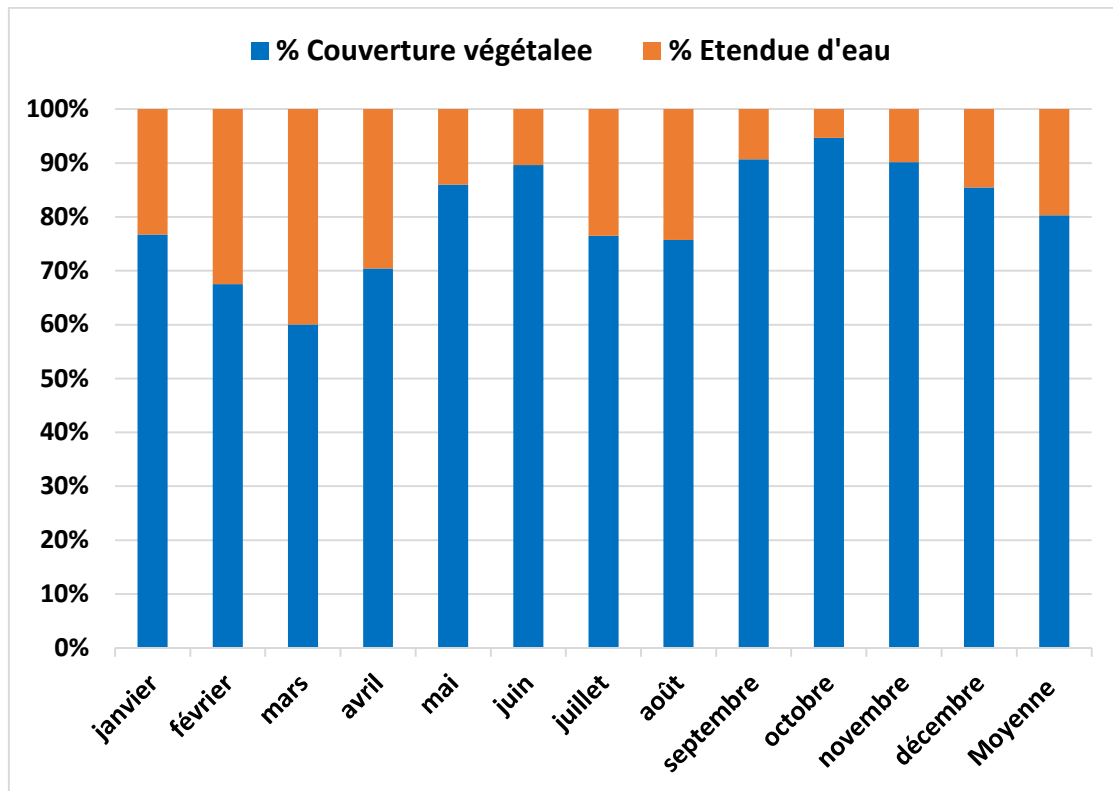


Figure 22 : Variation de la moyenne mensuelle de la couverture végétale de 2000 à 2017

Cette représentation graphique montre la même tendance de la variation de la couverture végétale sur le lac comme sur le graphe précédent de la Figure 21. On note une augmentation progressive de la surface couverte par les végétaux de mars à juin. Ensuite de juin à août on assiste à une faible régression de la couverture des plantes aquatiques sur le lac avant leur expansion jusqu'au mois d'octobre où elles occupent plus 90% de la surface du lac. Comme sur le graphe de la figure précédente, la tendance de la distribution de la couverture végétale moyenne mensuelle sur le lac décroît du mois d'octobre jusqu'au mois de mars de l'année suivante.

De façon générale, la moyenne mensuelle de la surface du couvert végétal sur le lac occupe au moins 60% de la surface totale du lac au cours de la période 2000 à 2017. Le mois de mars correspond à la période où la couverture végétale est minimale sur le lac et la couverture végétale maximale est rencontrée au cours du mois d'octobre.

IV.1.4 Variation moyenne annuelle de la couverture végétale

Dans cette partie, nous allons étudier la variation interannuelle de l'occupation des plantes aquatiques envahissantes sur le lac grâce aux valeurs moyennes annuelles de la couverture des végétaux sur le lac de l'année 2000 à 2017 (confère *Annexe 3*).

Le graphique suivant représente la variation moyenne annuelle de la couverture végétale sur le lac de 2000 à 2017.

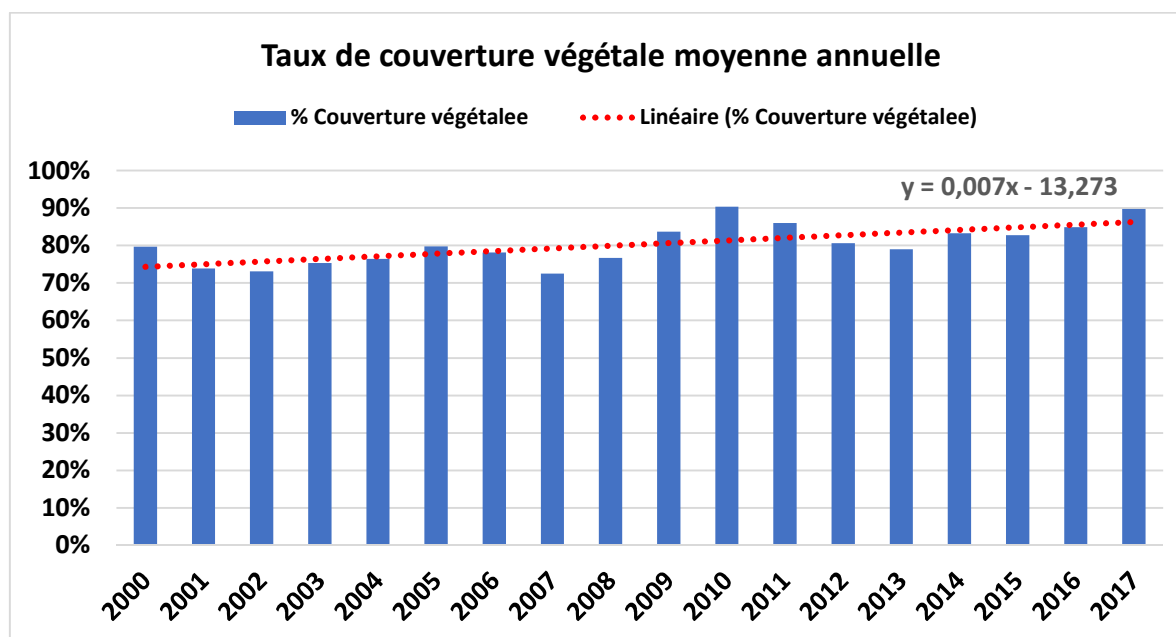


Figure 23 : Variation de la couverture végétale moyenne annuelle de 2000 à 2017

La courbe de régression linéaire associée à l’histogramme montre une tendance du couvert végétal sur le lac à la hausse au fil des années 2000 à 2017. Cependant, la distribution annuelle du couvert végétal sur le lac est très contrastée d’une année à une autre. On note une progression du couvert végétal sur le lac au cours des années en dents de scie. De 2000 à 2002, on note une baisse du couvert végétal sur le lac qui passe de 80% à 73% de la surface du lac. Par contre, de 2007 à 2010 on note une forte hausse de la couverture végétale sur le lac qui passe de 73% à 90% de sa surface totale avant de diminuer progressivement jusqu’en 2013 avec une surface des végétaux de 79%.

La tendance de l’évolution de la couverture des végétaux sur le lac au cours des années n’est pas à sens unique, elle croit par moment avant de décroître pendant une série d’années. Malgré ce contraste sur l’évolution du couvert végétal sur le lac de 2000 à 2017, on constate de façon générale une forte colonisation de la surface du lac par les plantes envahissantes avec une couverture végétale qui occupe plus de 70 % de la surface du lac. La surface moyenne annuelle minimale d’occupation du lac par les plantes envahissantes est constatée au cours des années 2002 et 2007 avec 73% de couverture végétale et la surface maximale colonisée par les végétaux est enregistrée au cours des années 2010 et 2017 avec une occupation de 90% de l’étendue du lac. En plus, on note une légère hausse des surfaces colonisées par les végétaux au fil des

années. En effet, de 2000 à 2008 l'étendue de la surface des plantes envahissantes sur le lac est inférieure à 80% de la surface du lac, alors qu'à partir de 2009, on constate que le taux de surfaces colonisées par les plantes aquatiques envahissantes est à la hausse avec pratiquement plus de 80% de la surface du lac qui est couvert par les végétaux.

IV.1.3 Variation saisonnière de la couverture végétale sur le lac

La variation de la couverture végétale moyenne mensuelle sur le lac et les données pluviométriques de la zone d'étude de 2000 à 2017 ont été utilisées pour étudier la similarité entre la dynamique saisonnière du couvert végétal et le régime pluviométrique.

Les graphes suivants représentent la variation de la couverture végétale (trait plein) sur le lac des années 2000, 2010 et 2015, et la variation de la pluviométrie moyenne annuelle (trait pointillé) de 2000, 2010 et 2015.

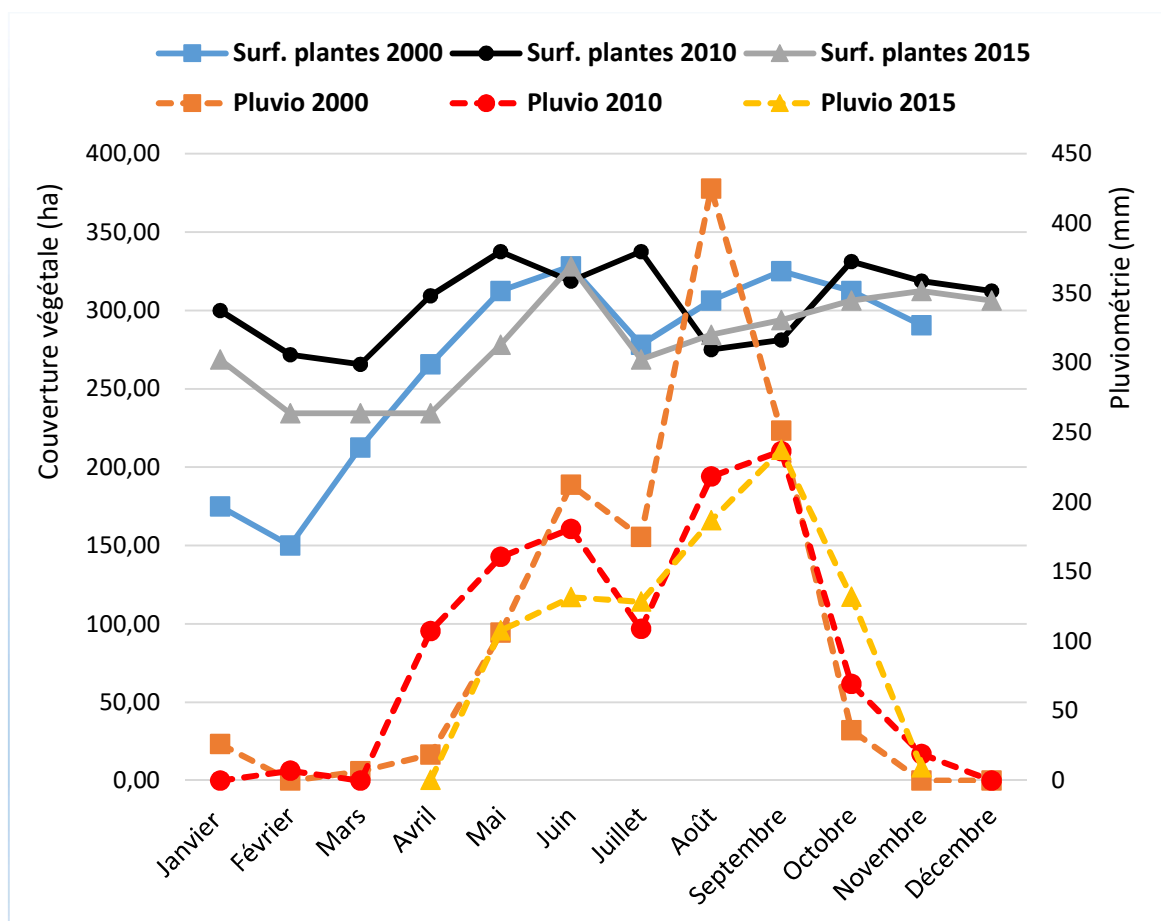


Figure 24 : Variation de la couverture végétale et de la pluviométrie moyenne mensuelle

Sur ces représentations graphiques on constate que la variation de la couverture végétale sur le lac est en phase avec la pluviométrie. Lorsque la pluviométrie augmente, on constate une augmentation de la surface couverte par les végétaux sur le lac avec un léger décalage de temps de réponse des plantes. A partir des mois d'avril à mai qui marquent les dates de démarrage de

la saison des pluies, on constate une hausse de la couverture végétale sur le lac jusqu'au mois d'août à septembre. Ensuite, à partir du mois d'octobre où les précipitations baissent, on note progressivement une baisse de la couverture végétale sur le lac jusqu'en mars.

L'analyse de ces graphiques montre également que lorsque la pluviométrie est élevée au cours d'une période, la surface couverte par les plantes aquatiques envahissantes est importante. De mars à juin, la pluviométrie moyenne mensuelle est plus importante au cours de l'année 2010, de ce fait, on constate une plus grande couverture végétale sur le lac en cette année qu'au cours des années 2000 et 2015. Aussi, pendant les mois d'août à septembre, les pluies sont plus importantes en 2000 qu'au cours des années 2010 et 2015, ce qui a entraîné que pendant cette période la surface de couvert végétal soit plus grande en 2000 qu'en 2010 et 2015.

L'analyse de la variation saisonnière des végétaux sur le lac montre que l'étendue du couvert végétal est liée à la pluviométrie. On note d'une part une extension de la couverture végétale sur le lac lorsque la saison des pluies s'installe et d'autre part que la surface colonisée par les plantes aquatiques envahissantes est plus importante au cours des saisons où la pluviométrie est abondante par rapport aux saisons moins pluvieuses.

IV.2 DISCUSSIONS

IV.2.1 Variation des NDVI sur le lac

Le suivi de la série temporelle d'indices de végétation NDVI de 2000 à 2017 montre une variation de l'activité photosynthétique des végétaux sur le lac. En analysant spatialement l'indice de végétation NDVI sur le lac, on constate une présence permanente des végétaux au fil des années avec des proportions différentes d'une période à une autre.

Les abords du lac représentent les zones les plus fortement colonisées par les végétaux. Cette situation peut s'expliquer par la sédimentation au niveau du lac qui favorise le développement des plantes aquatiques envahissantes. En effet, les berges du lac étant exploitées pour les activités agricoles peuvent être confrontées à l'érosion qui va alimenter le lac en éléments nutritifs favorisant la croissance des végétaux.

Au niveau de l'extrême sud-ouest du lac, la couverture végétale est quasi permanente au cours des années. Cette situation est due au fait que cette partie du lac correspond à une zone marécageuse où la présence de façon permanente de l'humidité maintient l'activité végétative durant toute l'année.

Par contre, au niveau des autres extrémités du lac, la couverture végétale varie fortement d'un mois à un autre avec des espèces très dépendantes de la pluviométrie. Pendant la saison sèche,

les valeurs des indices de végétation NDVI sont basses (inférieures à 0.5), à cause du stress hydrique que subissent certaines plantes. La revégétalisation au niveau du lac commence à partir du mois de mai, c'est-à-dire au début de la saison des pluies. On note à partir de cette période des indices de végétations NDVI plus élevés (supérieurs à 0.5) au niveau des bordures du lac à cause de la croissance des végétaux avec une amélioration de leur activité photosynthétique. Pendant leur croissance, les plantes ont une forte absorbance dans la longueur d'onde du rouge, ce qui entraîne des indices de végétations NDVI élevés.

IV.2.2 Evolution intra et inter annuelle du couvert végétal sur le lac

La proportion de couvert végétal sur le lac au cours des mois diffère d'une année à une autre. De façon générale, elle suit une tendance qui croît d'avril jusqu'au mois d'octobre où elle décroît jusqu'en mars. Les plantes aquatiques étant très dépendantes de l'humidité du sol (Granier P. et *al.*, 1977), lorsque la saison des pluies démarre au cours des mois d'avril-mai, celles-ci commencent leur croissance et on assiste à une végétalisation de la zone, d'où l'extension du couvert végétal d'avril à octobre.

A partir du mois d'octobre, on assiste à une baisse progressive de l'étendue du couvert végétal sur le lac. Cela peut s'expliquer d'une part par la baisse de l'humidité au niveau des abords du lac et d'autre part par la baisse de l'activité photosynthétique des plantes aquatiques envahissantes. En effet, en début de saison sèche, certaines plantes du lac sont en phase de senescence après leur floraison, ce qui fait qu'elles absorbent très peu de rayonnement solaire dans les longueurs d'ondes du rouge entraînant ainsi des valeurs d'indices de végétation NDVI faibles. Lorsque la ressource en eau du lac diminue, les plantes aquatiques subissent un stress hydrique qui entraîne leur flétrissement rendant leurs indices de végétation NDVI faibles. Malgré cette fluctuation de l'étendue du couvert végétal au cours des années, on note la présence permanente sur le lac avec des proportions différentes d'un mois à un autre. Cette présence permanente des plantes peut être liée à la ressource en eau du lac qui reste pérenne toute l'année, assurant ainsi le maintien de l'humidité qui est propice à la croissance de certaines plantes au niveau des abords du lac.

La couverture végétale maximale sur le lac est rencontrée pendant la période de juin à octobre. Cette période correspond à la phase de croissance des plantes et à la période où la ressource en eau du lac est en abondance. Par exemple, une plante comme l'*Imperata cylindrica* présente en abondance sur le lac commence sa croissance dès que le sol est humide en début de la saison des pluies pour atteindre sa floraison au début de la saison sèche vers les mois de septembre-octobre avant d'être soumis à sa phase de senescence (Chikoye D. et *al.*, 2000). En d'autres

termes, certaines plantes commencent leur croissance à partir du mois d'avril jusqu'en octobre où elles fleurissent et commencent à flétrir.

Au cours de la période d'étude de 2000 à 2017, la couverture végétale moyenne mensuelle est restée toujours supérieur à 60 % de la surface du lac. Cette situation montre l'ampleur de la présence des plantes envahissantes sur l'étendue du lac. Cette présence permanente de certaines plantes aquatiques au niveau des berges du lac peut être liée à leur mode d'enracinement profond, qui leur permet de mieux résister au stress hydrique et de croître dès que l'humidité s'installe dans le sol. Les végétaux aquatiques aux abords des plans d'eau qui étaient en stress hydrique (NDVI faible) revégétalisent dès que le sol devient humide, ce qui entraîne une amélioration de leur activité photosynthétique (NDVI élevé).

Au niveau de la distribution interannuelle du couvert végétal sur le plan d'eau, les tendances diffèrent d'une année à une autre. Pendant un certain temps, de 2000 à 2002 par exemple, on note une baisse de la quantité des végétaux sur la surface du lac qui passe de 80% à 73 % d'occupation et d'autres années comme de 2007 à 2010 on note une forte expansion des surfaces colonisées par les végétaux qui passe de 73% à 90% d'occupation de la surface du lac. Cette situation d'expansion ou de baisse du couvert végétal peut s'expliquer par le régime hydraulique du lac. Lorsque le taux de remplissage d'eau du lac est important au cours d'une année, les surfaces colonisées par les végétaux en sont plus grandes par rapport aux années déficitaires en termes d'eau. Une étude réalisée par Hey et *al.* (1994) montre que la hausse du niveau des cours d'eau implique une prolifération des macrophytes au niveau des berges à cause de l'humidité du sol que cela induit.

La figure suivante montre l'état de la végétation au niveau des berges pendant les périodes de crue et de décrue.



Etat des berges en août 2017



Etat des berges en avril 2018

Figure 25 : Etat de la végétation des berges en période de crue et de décrue

Bien que la couverture moyenne annuelle des végétaux fluctue d'une année à une autre, le constat dans la série d'analyse du couvert végétal de 2000 à 2017 est une légère tendance à la hausse. En effet, de 2000 à 2008 seulement moins de 80% de la surface du lac étaient couverts par les végétaux, alors que depuis l'année 2009, on note des couvertures végétales annuelles moyennes de plus de 80%. Cette situation peut s'expliquer par un certain nombre de facteurs qui entraînent l'eutrophisation des eaux comme des facteurs climatiques, biologiques, physiques ou chimiques. Au regard de l'importance de l'humidité du sol dans la croissance des plantes envahissantes aquatique, on peut dire que la pluviométrie joue un rôle important dans cette expansion. A partir de 2010, la pluviométrie annuelle de la zone d'étude est restée très peu variable avec en moyenne 1000 mm de pluie, alors que de 2000 à 2008 les écarts pluviométriques d'une année à une autre étaient très élevés (moyenne 400 mm) entraînant le flétrissement de certaines plantes à cause du manque d'eau. Cette constance de la pluviométrie annuelle à partir de 2010 peut être l'une des raisons pour laquelle on note le maintien et l'expansion progressive des plantes envahissantes aquatiques sur le lac jusqu'à des taux de couverture moyenne annuelle supérieurs à 80%.

IV.2.3 Evolution saisonnière du couvert végétal sur le lac

La courbe représentative du couvert végétal mensuel et annuel sur le lac montre une évolution de la couverture végétale en fonction de la pluviométrie au cours des années. Dès que la saison des pluies s'installe à partir du mois d'avril, la surface de la couverture végétale sur le lac croît jusqu'à atteindre une étendue maximale pendant la période de crue du lac (août-octobre) correspondant aux mois les plus pluvieux de la zone d'étude. On peut aussi lier cette expansion à la biologie des végétaux. Par exemple une plante comme l'*Imperata cylindrica* qui est l'une des principales plantes sur le lac commence sa phase de croissance pendant cette période, ce qui lui confère une forte activité photosynthétique avec des indices de végétation NDVI élevés (> 0.5). En plus, lorsque la pluviométrie est importante au cours d'une période, l'expansion de la surface de couvert végétal en est une réponse évidente. Par exemple, pendant l'année 2010, on note une pluviométrie annuelle de 1108.8 mm avec une occupation de couvert végétal moyenne annuelle de 90% contre 83% en 2015 avec une pluviométrie annuelle de 934,6 mm. Au regard de l'importance de l'humidité des sols pour la croissance des plantes envahissantes aquatiques, de leurs réponses avec l'amélioration de leur activité photosynthétique dès que la pluie s'installe, nous pouvons conclure que la dynamique saisonnière de la prolifération des plantes aquatiques envahissantes sur le lac est fonction de la pluviométrie qui améliore le niveau d'eau du lac et maintient l'humidité du sol au niveau des berges.

IV.2.4 Limites de l'étude

La principale limite de notre étude réside dans l'utilisation d'images basses résolution MODIS (pixels de 6.25 ha). Cette résolution ne garantit pas que les surfaces colonisées soient exclusivement couvertes de végétaux. Il est très probable que les capteurs fassent la confusion pour certains pixels entre les végétaux et la surface d'eau dont la réflectance dépend de plusieurs paramètres dont la profondeur du lac ou la turbidité. Cela signifie que les ondes électromagnétiques ne sont pas réfléchies de la même manière selon la profondeur de l'eau et la matière en suspension et cela peut être source de confusion par rapport à certains éléments de l'environnement (Laventure, 2009). Donc, il est possible que des pixels considérés comme des couverts végétaux soient une combinaison de surface d'eau et de plantes aquatiques envahissantes et vice-versa.

La forte pression anthropique et le souci d'être le plus proche de la ressource en eau fait qu'on retrouve parfois des parcelles agricoles au niveau de l'emprise du lac. En effet, pendant les périodes de crue, les zones de basses eaux sont le plus souvent utilisées pour la culture du riz, alors que pendant les décrues, ces portions sont souvent utilisées pour des cultures irriguées. Ainsi, il est possible que l'estimation du couvert végétal sur le lac ait pris en compte certaines parcelles agricoles. Une meilleure résolution spatiale aurait permis d'éviter ces erreurs en éliminant ces cultures.

Enfin, la mise en place de système de mesure de débit ou de niveau d'eau du lac nous aurait permis d'être un peu plus exact dans l'établissement de la relation entre le taux de remplissage du lac et l'expansion des plantes aquatiques. A défaut, nous avons utilisé des données pluviométriques provenant de stations météorologiques qui ne renseignent pas forcément sur le régime hydrologique du lac.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de notre étude était de suivre la dynamique de la prolifération saisonnière, intra et interannuelle des plantes aquatiques envahissantes sur le lac de Tengréla. La télédétection est l'outil qui nous a permis de remonter dans le temps et de suivre l'évolution du couvert végétal sur le lac de l'année 2000 à 2017. Cette analyse a été possible grâce aux indices de végétation NDVI extrait du satellite MODIS qui permettent de suivre la phénologie de la couverture végétale sur le lac.

De cette analyse d'images satellitaires, il ressort une variation contrastée du couvert végétal sur le lac d'une année à une autre. On rencontre pendant notre période d'étude des années où la couverture végétale sur le lac est en expansion et des années où elle décroît. Néanmoins, le constat qui découle de notre étude est l'ampleur de la présence de plantes envahissantes aquatiques sur le lac de Tengréla. En effet, de 2000 à 2017 le taux de la couverture végétale mensuelle minimale est resté toujours supérieur à 60% et le taux d'occupation moyenne annuelle minimale de la couverture végétale est resté au-dessus de 70% de la surface du lac.

En plus, on note une couverture végétale sur le lac très liée à la saison des pluies. Au démarrage de la saison des pluies en avril-mai, la portion de la surface du lac couverte par les végétaux augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur maximale au cours des mois d'août à octobre où les pluies sont intenses, avant de commencer à perdre en surface au début de la saison sèche jusqu'à atteindre son minimum de couverture pendant le mois de mars. Cette évolution est principalement liée à la pluviométrie, mais peut aussi être caractérisée par le cycle végétatif des plantes présentes sur le lac.

Les résultats de notre étude confortent la thèse selon laquelle la prolifération des plantes aquatiques envahissantes sur le lac de Tengréla peut être liée à plusieurs paramètres dont les facteurs climatiques, biologiques, physiques ou chimiques, au regard du contraste dans l'évolution du couvert végétal sur le lac au fil des années. Quoiqu'il en soit, nous pouvons conclure que la pluviométrie joue un rôle important dans la dynamique de la prolifération des végétaux sur le lac vu leur dynamique saisonnière.

Au regard des résultats obtenus, cette étude peut être utile à plusieurs niveaux :

- pour la compréhension de la dynamique des plantes aquatiques envahissantes ;
- pour planifier des mesures d'interventions dans le but de lutter contre ces plantes pendant leur phase de régression par exemple ;
- pour servir de base pour une étude plus approfondie de l'eutrophisation au niveau des plans d'eau,

Afin de compléter les lacunes de cette étude, nous formulerons quelques recommandations :

- affiner l'étude sur la dynamique des plantes aquatiques envahissantes en utilisant des données satellitaires haute résolution spatiale comme celles de SPOT par exemple, car l'outil de télédétection a montré son utilité dans le suivi de la végétation ;
- mener une étude qui répertorie l'ensemble des plantes aquatiques envahissantes sur les plans d'eau du Burkina afin de mener des études sur leur cycle végétatif par exemple et les classer selon les espèces les plus proliférantes et les plus nuisibles ;
- analyser la relation entre d'autres paramètres climatiques comme la température et la dynamique de la prolifération des végétaux sur le lac ;
- mettre en place un système de suivi du niveau d'eau au niveau du lac pour suivre son régime hydrologique ;
- planifier un calendrier d'intervention pour la lutte curative sur la base des connaissances acquises sur la dynamique de la prolifération des plantes envahissantes et leur cycle végétatif ;
- mettre en place des systèmes de lutte curative adaptés et efficaces (lutte manuelle, mécanique, chimique ou biologique). La mise en place du système de lutte doit prioriser les espèces très nuisibles pour le maintien de la biodiversité afin de les éradiquer ou freiner leur expansion ;
- mettre en place des systèmes d'alerte précoce contre l'apparition de plantes envahissantes nuisibles. Il s'agira de former les populations locales pour qu'elles puissent déceler l'apparition de plantes potentiellement nuisibles afin de les extraire avant qu'elles ne prolifèrent ;
- mener des actions de sensibilisation auprès des usagers de l'eau afin de limiter les perturbations anthropiques qui favorisent la prolifération des plantes aquatiques envahissantes.

La gestion des plantes aquatiques envahissantes est très complexe à cause des multiples interactions climatiques, biologiques, physiques et chimiques qui influencent leurs proliférations. Il est quasiment impossible de proposer une recette de gestion miracle qui prenne en compte toutes les situations. Chaque zone humide doit être analysée selon les types de plantes qui y prolifèrent et ses caractéristiques physiques et chimiques avant de planifier des interventions de lutte. Pour cela, une prise en compte des recommandations citées plus haut sera une piste de solution pour limiter les impacts de la prolifération des végétaux aquatiques sur la biodiversité des zones humides et aussi améliorer l'usage au regard de leur potentialité économique.

BIBLIOGRAPHIE

- **Ahmed L., Amina A. et Djamel A.** 2016. « Apport Des Images Satellites MODIS dans l'étude De l'évolution de la végétation forestière de l'Est Algérien » ;
- **Bernier M., Romain L., Jimmy P., Charles G., Dominic T. et Yves Gauthier.** 2015. « Suivi des conditions de glaces de rives à proximité d ' infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik , Umiujaq , Ivujivik , Baie Déception , Quaqtaq et Aupaluk », n° 1627 ;
- **Bhandari A. K., Kumar A. et Singh G. K.** 2012. « Feature Extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) : A Case Study of Jabalpur City ». *Procedia Technology* 6:612-21 ;
- **Bougherara A. et Lacaze B.** 2008. « Identification et suivi des paysages et de leur biodiversité dans la wilaya d ' El Tarf (Algérie) à partir des images Landsat et ASTER », 132-33 ;
- **Capblancq J. et Henri D.** 2002. « L ' eutrophisation des eaux continentales : questions propos d ' un processus complexe ». *Nature Science Sociétés* 10 (2):6-17 ;
- **Centre Canadien de Télédétection.** 2013. « Notions fondamentales de télédétection »
- **Chikoye D., Manyong V. M. et Ekeleme F.** 2000. « Characteristics of speargrass (*Imperata cylindrica*) dominated fields in West Africa: Crops, soil properties, farmer perceptions and management strategies ». *Crop Protection* 19 (7):481-87 ;
- **Commune de Banfora.** 2011. « Charte foncière inter-villageoise pour la protection des ressources et des berges du lac de Tengréla dans la commune urbaine de Banfora » ;
- **Denis A.** 2017. *Travaux Pratiques de Télédétection Spatiale*, Campus d'Arlon ;
- **Dutartre A., Peltre M-C., Pipet N., Fournier L. et Menozzi M-J.** 2008. « Régulation des développements de plantes aquatiques ». *Ingénieries - EAT, n° spécial Plantes aquatiques d'eau douce : biologie, écologie et gestion*, 135-54 ;
- **Fensholt R. et Sandholt I.** 2005. « Evaluation of MODIS and NOAA AVHRR vegetation indices with in situ measurements in a semi-arid environment ». *International Journal of Remote Sensing* 26 ;
- **Gandhi G. M., Parthiban S., Nagaraj T., et Christy A.** 2015. « Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis - A Case Study of Vellore District ». *Procedia Computer Science* 57. Elsevier Masson SAS:1199-1210 ;
- **Ghachtoul Y., Alaoui M. M. et Gabi H.** 2005. « Eutrophisation des eaux des retenues des barrages Smir et Sehla (maroc) : causes, conséquences et consignes de gestion ». *Revue des sciences de l'eau* 18:75 ;

- **Gouyet J-F, King C. et Malon J-F., 1989.** « Apport des données satellitaires NOAA-AVHRR dans le suivi de la végétation forestière », n° Septembre 1989:65 p.
- **Granier P., Cabanis Y., Ellenberger F., Razafindratsita R. 1977.** « Evolution des pâturages » 30 (2) : 199-228.
- **Hey D., Heritage L. et Patteson M. 1994.** « Impact of flood alleviation schemes on aquatic macrophytes ». *School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, UK* 9 (February):103-19 ;
- **Holben B. N. 1986.** « Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data ». *International Journal of Remote Sensing* 7 (11):1417-34 ;
- **Huete A., Didan K., Miura H., Rodriguez E. P., Gao X. et Ferreira L. F. 2002.** « Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices ». *Remote Sensing of Environment* 83:195-213 ;
- **Jacquin A. 2010.** « Dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux à Madagascar Analyse par série temporelle d'images de télédétection » ;
- **Justice C. O., Vermote E., Townshend J. R. G., Defries R., David P. R., Hall D. K., Salomonson V. V., Privette J. L., Riggs G., Strahler A., Lucht W., Myneni R. B., Knyazikhin Y., Steve W. R. 1998** « The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research », *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 36(4), p. 1228-1249 ;
- **Lachavanne J. B. 1980.** « Les manifestations de l'eutrophisation des eaux dans un grand lac profond: le Léman (Suisse) ». *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie* ;
- **Laventure S. 2009.** « Suivi temporel des points d'eau du Parc Régional du W (Burkina Faso, Bénin, Niger) » ;
- **Mama D., Martin A., Abdoukarim A., Ousmane T. B., Waris C., Véronique D., James B., Abel A. et Michel B. 2011.** « Caractérisation physico-chimique et évaluation du risque d'eutrophisation du lac Nokoué (Bénin) ». *Int. J. Biol. Chem. Sci* 5 (5):2076-93 ;
- **Ministère de l'Eau et de l'Assainissement (MEA) du Burkina Faso. 2016.** « Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau - PN-GIRE - 2016-2030 » ;
- **Mitchell D. S. 1985.** « African aquatic weeds and their management » ;
- **Namoano Y. 2009.** « Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar (FDR) - version 2006-2008 ».
- **Peltre M.C., Dutartre A., Barbe J., Haury J., Muller S. et Ollivier M. 2002.** « Les

proliférations végétales aquatiques en France : caractères biologiques et écologiques des principales espèces et milieux propices », 259-80.

- **Peng D., Lihua X., Shenglian G. et Ning S.** 2005. « Study of Dongting Lake area variation and its influence on water level using MODIS data / Etude de la variation de la surface du Lac Dongting et de son influence sur le niveau d'eau, grâce à des données MODIS ». *Hydrological Sciences Journal* ;
- **Rama R. N., Zhengming W., Huete A. R., Leeuwen W., Wolfe R. E., Giglio L., Muller J. P, Lewis P. et Barnsley M. J.** 1998. « The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research ». *Geoscience and Remote Sensing* ;
- **Service d'Informations sur les Sites Ramsar (SISR).** 2017. « Fiche descriptive Ramsar - Burkina Faso - Lac de Tengréla » ;
- **Tapsoba A.** 2015. « Evaluation des valeurs d'usages de sept sites Ramsar au Burkina Faso ». *Certificat en Gouvernance Locale des Zones Humides, Edition N°2; 2015, 57 p*
- **Thiebaut G., Rolland T., Robach F., Tremolieres M. et Muller S.** 1997. « Quelques conséquences de l'introduction de deux espèces de macrophytes, elodea canadensis michaux et elodea nuttallii st. John, dans les écosystèmes aquatiques continentaux : exemple de la plaine d'alsace et des Vosges du nord (nord-est de la France) » ;
- **Tran A., Flavie G., Lise C., Nicolas B. et Danny L. S.** 2010. « Remote sensing and avian influenza: A review of image processing methods for extracting key variables affecting avian influenza virus survival in water from Earth Observation satellites ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* ;
- **Tucker C. J.** 1979. « Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation ». *Remote Sensing of Environment* ;
- **Vollenweider R. A.** 1970. « Les bases scientifiques de l'eutrophisation des lacs et des eaux courantes sous l'aspect particulier du phosphore et de l'azote comme facteurs d'eutrophisation », 217 pages ;
- **Zhang X., Mark A. F., Crystal B. S., Alan H. S., Hodges J. C. F., Feng G., Bradley C. R. et Huete A.** 2003. « Monitoring vegetation phenology using MODIS ». *Remote Sensing of Environment*.

ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristiques spécifiques de MODIS

(Source : https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis)

Bandes	Longueurs d'ondes réfléchies (µm)	Longueurs d'ondes émises (µm)	Domaines d'application
1	0.620–0.670		Absolute Land Cover Transformation, Vegetation Chlorophyll
2	0.841–0.876		Cloud Amount, Vegetation Land Cover Transformation
3	0.459–0.479		Soil/Vegetation Differences
4	0.545–0.565		Green Vegetation
5	0.123–0.125		Leaf/Canopy Differences
6	0.1628–0.1652		Snow/Cloud Differences
7	0.2105–0.2155		Cloud Properties, Land Properties
8	0.405–0.420		Chlorophyll
9	0.438–0.448		Chlorophyll
10	0.483–0.493		Chlorophyll
11	0.526–0.536		Chlorophyll
12	0.546–0.556		Sediments
13h	0.662–0.672		Atmosphere, Sediments
13l	0.662–0.672		Atmosphere, Sediments
14h	0.673–0.683		Chlorophyll Fluorescence
14l	0.673–0.683		Chlorophyll Fluorescence
15	0.743–0.753		Aerosol Properties
16	0.862–0.877		Aerosol Properties, Atmospheric Properties
17	0.89–0.92		Atmospheric Properties, Cloud Properties
18	0.931–0.941		Atmospheric Properties, Cloud Properties
19	0.915–0.965		Atmospheric Properties, Cloud Properties
20		3.660–3.840	Sea Surface Temperature
21		3.929–3.989	Forest Fires & Volcanoes

22		3.929–3.989	Cloud Temperature, Surface Temperature
23		4.020–4.080	Cloud Temperature, Surface Temperature
24		4.433–4.498	Cloud Fraction, Troposphere Temperature
25		4.482–4.549	Cloud Fraction, Troposphere Temperature
26	0.136–0.139		Cloud Fraction (Thin Cirrus), Troposphere Temperature
27		6.535–6.895	Mid Troposphere Humidity
28		7.175–7.475	Upper Troposphere Humidity
29		8.400–8.700	Surface Temperature
30		9.580–9.880	Total Ozone
31		10.780–11.280	Cloud Temperature, Forest Fires & Volcanoes, Surface Temp.
32		11.770–12.270	Cloud Height, Forest Fires & Volcanoes, Surface Temperature
33		13.185–13.485	Cloud Fraction, Cloud Height
34		13.485–13.785	Cloud Fraction, Cloud Height
35		13.785–14.085	Cloud Fraction, Cloud Height
36		14.085–14.385	Cloud Fraction, Cloud Height

Annexe 2 : Coordonnées de quelques points au niveau des limites du lac

N°	Longitude	Latitude
1	-4,831722	10,64369
2	-4,831722	10,64369
3	-4,832083	10,64361
4	-4,831278	10,64306
5	-4,830972	10,64292
6	-4,830889	10,64247
7	-4,831167	10,64228
8	-4,830833	10,64192
9	-4,819139	10,65128
10	-4,821861	10,63561
11	-4,838556	10,64186
12	-4,838444	10,64222
13	-4,837389	10,64106
14	-4,835756	10,646098
15	-4,839284	10,649625
16	-4,837891	10,647095
17	-4,83609	10,646659
18	-4,854528	10,640797
19	-4,844762	10,643413
20	-4,830581	10,636877

Annexe 3 : Valeurs du couvert végétal sur le lac de Tengréla

Couverture végétale sur le lac (ha)																			
Mois / Année	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Moyenne mensuelle
janvier		240,63	246,88	231,25	253,13	246,88	228,13	240,63	243,75	243,75	300,00	256,25	256,25	281,25	290,63	268,75	296,88	278,13	259,01
février	175,00	193,75	231,25	212,50	234,38	187,50	221,88	215,63	212,50	253,13	271,88	243,75	190,63	243,75	243,75	234,38	271,88	265,63	227,95
mars	150,00	165,63	209,38	162,50	178,13	203,13	209,38	87,50	171,88	228,13	265,63	253,13	168,75	234,38	218,75	234,38	243,75	262,50	202,60
avril	212,50	218,75	87,50	193,75	225,00	196,88	268,75	250,00	243,75	265,63	309,38	259,38	262,50	262,50	259,38	234,38	250,00	278,13	237,67
mai	265,63	250,00	306,25	243,75	265,63	287,50	234,38	296,88	309,38	303,13	337,50	309,38	318,75	312,50	268,75	278,13	325,00	312,50	290,28
juin	312,50	196,88	306,25	290,63	309,38	315,63	337,50	221,88	281,25	300,00	318,75	328,13	331,25	318,75	318,75	328,13	315,63	312,50	302,43
juillet	328,13	281,25	125,00	265,63	268,75	303,13	281,25	187,50	212,50	262,50	337,50	306,25	221,88	200,00	287,50	268,75	203,13	306,25	258,16
août	278,13	246,88	262,50	240,63	209,38	259,38	209,38	237,50	253,13	265,63	275,00	284,38	253,13	181,25	225,00	284,38	296,88	337,50	255,56
septembre	306,25	306,25	309,38	306,25	306,25	296,88	303,13	287,50	306,25	337,50	281,25	325,00	318,75	278,13	312,50	293,75	296,88	337,50	306,08
octobre	325,00	325,00	312,50	337,50	306,25	331,25	300,00	318,75	315,63	337,50	331,25	331,25	315,63	287,50	331,25	306,25	318,75	318,75	319,44
novembre	312,50	287,50	287,50	293,75	281,25	293,75	290,63	309,38	287,50	312,50	318,75	303,13	325,00	300,00	321,88	312,50	309,38	331,25	304,34
décembre	290,63	278,13	275,00	271,88	256,25	309,38	281,25	284,38	268,75	278,13	312,50	281,25	303,13	300,00	293,75	306,25	309,38	293,75	288,54
Moyenne annuelle	268,75	249,22	246,61	254,17	257,81	269,27	263,80	244,79	258,85	282,29	304,95	290,10	272,14	266,67	280,99	279,17	286,46	302,86	271,05

NB : Le lac a une surface totale de 337.5ha.

Annexe 4 : Pluviométrie mensuelle de 2000 à 2017

Pluviométrie mensuelle (mm)																		
Mois/Année	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Janvier	26,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7	0	0	5	0	0	0
Février	0	0	0	0	2,9	2	0	0	0	3,2	7,2	0	0	0	6,2	0	0	0
Mars	6,7	8,7	26,7	8,6	1,3	5,1	0	1,5	74,2	33,1	0	18,9	25,2	0,7	28,4	0	31,2	1,1
Avril	18,8	20,6	106	57	68,2	96	84,3	136,1	4,1	30,8	107,5	88,3	74,8	83,4	43,2	0,6	53	38,62
Mai	106,2	58	110,5	114,1	145,2	114,2	70,6	50,2	126,9	90,4	160,7	60	153,2	99,5	96,8	107,8	54,1	100,34
Juin	212,4	83,6	119,3	198,1	120,6	130,1	242,7	137,7	141,6	132,9	180,8	128,6	168,9	63,2	182,6	131,7	134,4	122,69
Juillet	175,1	220,4	131,4	274,1	217,3	133,3	203,7	75,4	182	135	109	167,9	217,1	171,4	121,3	128,5	166,8	153,92
Août	425,1	164,6	194,7	342,1	279,2	127	299,9	540,5	386,4	106,3	218,4	230,2	177,6	259	268,3	186,9	333,6	168,14
Septembre	251,4	201	135	184	79,3	190,9	228,5	99,6	118,9	164,9	236,6	151,1	108,9	201,4	156,7	237,5	293,9	114,3
Octobre	36,3	57,5	46,1	31,5	28,2	44,5	119,9	26,4	73,7	164,8	69,5	65,1	95,3	78	54	132	6,6	35,05
Novembre	0	2,7	0	16,5	17,5	0	0	22,3	0	0,4	19,1	0	56,4	0,4	57,5	9,6	3,8	0
Décembre	0	0	0	0	2,2	0	0	0	0	0	0	0	12,4	0,5	0	0	0	0
Total	1258,4	817,1	869,7	1226	961,9	843,1	1249,6	1089,7	1107,8	861,8	1108,8	910,8	1089,8	957,5	1020	934,6	1077,4	734,2

(Source : Direction Générale de la Météorologie du Burkina (2000-2016) et <https://fr.tutiempo.net/gratuit.htm> (2017))

Annexe 5 : Température moyenne mensuelle de 2000 à 2017

Température moyenne mensuelle (°C)												
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
2000	27,6	26,3	30,4	31,8	29,5	27	25,1	25,1	25,9	27,6	28,1	26,2
2001	26,2	27,7	31,2	31,9	30,1	27,9	26,5	25,8	26	28,4	28,4	27,8
2002	26,4	28,5	32,3	31,6	30,9	28	27,1	25,8	26,7	28,2	28,8	26,9
2003	27,1	30,7	31,5	31,6	30,4	27,3	26	25,6	26,1	28,5	28,7	26,4
2004	27,1	29,4	30,7	31,1	29,4	27,6	25,6	26	26,5	28,8	28,7	28,8
2005	26,1	30,7	32,5	31,9	30	27,7	26,3	25,4	26,4	27,9	28,9	27,3
2006	27	29,3	31,6	31,6	29,3	27,7	26,8	26	25,9	27,4	27,3	25,5
2007	25,5	29,1	31,4	30,6	30,2	28,4	26,2	25	26,3	28,3	28,2	26,2
2008	23,6	28,9	31	31,6	30,3	27,3	25,7	25,2	25,7	27,6	27,9	26,8
2009	24,8	30	31,3	31,4	30	27,7	26,2	25,6	26,4	27,4	26,6	27,1
2010	27,4	30,7	32,4	31,4	28,7	27,5	26,3	25,3	25,5	27	28	26,5
2011	26,1	28,3	31,7	30,9	29,7	27,9	26,4	25,9	26,6	27,7	28,4	25,3
2012	25,3	28,6	31	30,5	28,8	27,7	25,5	25,7	26,1	27,8	29	25,6
2013	25,6	29,2	32,3	30,7	30,1	28	26,2	25,4	26,3	28	29	25,6
2014	27,2	28,2	30,8	31	30	27,7	26,9	26,1	25,9	28	28,7	26,2
2015	25,1	29,5	30,7	32,4	31,3	28,5	27,2	26,1	26,4	28	28	24,8
2016	26,2	28,3	31,8	32,2	30,3	27,5	26,4	26,4	26,6	29,1	29,3	27
2017	26,3	29,8	32,1	31,1	29	27,4	26,1	25,3	26,6	28,8	28,5	26

(Source : Direction Générale de la Météorologie du Burkina (2000-2016) et <https://fr.tutiempo.net/gratuit.htm> (2017))

Annexe 6 : Couverture végétale issue du traitement des images NDVI de MODIS

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2000

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
49	18-02-00	6,25	28	175	51,85%
65	05-03-00	6,25	18	112,5	33,33%
81	21-03-00	6,25	30	187,5	55,56%
97	06-04-00	6,25	35	218,75	64,81%
113	22-04-00	6,25	33	206,25	61,11%
129	08-05-00	6,25	37	231,25	68,52%
145	24-05-00	6,25	48	300	88,89%
161	09-06-00	6,25	48	300	88,89%
177	25-06-00	6,25	52	325	96,30%
193	11-07-00	6,25	54	337,5	100,00%
209	27-07-00	6,25	51	318,75	94,44%
225	12-08-00	6,25	51	318,75	94,44%
241	28-08-00	6,25	38	237,5	70,37%
257	13-09-00	6,25	51	318,75	94,44%
273	29-09-00	6,25	47	293,75	87,04%
289	15-10-00	6,25	52	325	96,30%
305	31-10-00	6,25	52	325	96,30%
321	16-11-00	6,25	50	312,5	92,59%
337	02-12-00	6,25	47	293,75	87,04%
353	18-12-00	6,25	46	287,5	85,19%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2001

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-01	6,25	42	262,5	77,78%
17	17-01-01	6,25	35	218,75	64,81%
33	02-02-01	6,25	35	218,75	64,81%
49	18-02-01	6,25	27	168,75	50,00%
65	06-03-01	6,25	27	168,75	50,00%
81	22-03-01	6,25	26	162,5	48,15%
97	07-04-01	6,25	32	200	59,26%
113	23-04-01	6,25	38	237,5	70,37%
129	09-05-01	6,25	41	256,25	75,93%
145	25-05-01	6,25	39	243,75	72,22%
161	10-06-01	6,25	39	243,75	72,22%
177	26-06-01	6,25	24	150	44,44%
193	12-07-01	6,25	49	306,25	90,74%
209	28-07-01	6,25	41	256,25	75,93%
225	13-08-01	6,25	31	193,75	57,41%
241	29-08-01	6,25	48	300	88,89%
257	14-09-01	6,25	51	318,75	94,44%
273	30-09-01	6,25	47	293,75	87,04%
289	16-10-01	6,25	52	325	96,30%
305	01-11-01	6,25	46	287,5	85,19%
321	17-11-01	6,25	46	287,5	85,19%
337	03-12-01	6,25	45	281,25	83,33%
353	19-12-01	6,25	44	275	81,48%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2002

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-02	6,25	42	262,5	77,78%
17	17-01-02	6,25	37	231,25	68,52%
33	02-02-02	6,25	35	218,75	64,81%
49	18-02-02	6,25	39	243,75	72,22%
65	06-03-02	6,25	33	206,25	61,11%
81	22-03-02	6,25	34	212,5	62,96%
97	07-04-02	6,25	14	87,5	25,93%
113	23-04-02	6,25	14	87,5	25,93%
129	09-05-02	6,25	44	275	81,48%
145	25-05-02	6,25	54	337,5	100,00%
161	10-06-02	6,25	51	318,75	94,44%
177	26-06-02	6,25	47	293,75	87,04%
193	12-07-02	6,25	15	93,75	27,78%
209	28-07-02	6,25	25	156,25	46,30%
225	13-08-02	6,25	41	256,25	75,93%
241	29-08-02	6,25	43	268,75	79,63%
257	14-09-02	6,25	46	287,5	85,19%
273	30-09-02	6,25	53	331,25	98,15%
289	16-10-02	6,25	50	312,5	92,59%
305	01-11-02	6,25	47	293,75	87,04%
321	17-11-02	6,25	45	281,25	83,33%
337	03-12-02	6,25	44	275	81,48%
353	19-12-02	6,25	44	275	81,48%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2003

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-03	6,25	39	243,75	72,22%
17	17-01-03	6,25	35	218,75	64,81%
33	02-02-03	6,25	38	237,5	70,37%
49	18-02-03	6,25	30	187,5	55,56%
65	06-03-03	6,25	21	131,25	38,89%
81	22-03-03	6,25	31	193,75	57,41%
97	07-04-03	6,25	25	156,25	46,30%
113	23-04-03	6,25	37	231,25	68,52%
129	09-05-03	6,25	37	231,25	68,52%
145	25-05-03	6,25	41	256,25	75,93%
161	10-06-03	6,25	42	262,5	77,78%
177	26-06-03	6,25	51	318,75	94,44%
193	12-07-03	6,25	41	256,25	75,93%
209	28-07-03	6,25	44	275	81,48%
225	13-08-03	6,25	35	218,75	64,81%
241	29-08-03	6,25	42	262,5	77,78%
257	14-09-03	6,25	47	293,75	87,04%
273	30-09-03	6,25	51	318,75	94,44%
289	16-10-03	6,25	54	337,5	100,00%
305	01-11-03	6,25	49	306,25	90,74%
321	17-11-03	6,25	45	281,25	83,33%
337	03-12-03	6,25	47	293,75	87,04%
353	19-12-03	6,25	40	250	74,07%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2004

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-04	6,25	40	250	74,07%
17	17-01-04	6,25	41	256,25	75,93%
33	02-02-04	6,25	39	243,75	72,22%
49	18-02-04	6,25	36	225	66,67%
65	05-03-04	6,25	28	175	51,85%
81	21-03-04	6,25	29	181,25	53,70%
97	06-04-04	6,25	34	212,5	62,96%
113	22-04-04	6,25	38	237,5	70,37%
129	08-05-04	6,25	43	268,75	79,63%
145	24-05-04	6,25	42	262,5	77,78%
161	09-06-04	6,25	45	281,25	83,33%
177	25-06-04	6,25	54	337,5	100,00%
193	11-07-04	6,25	48	300	88,89%
209	27-07-04	6,25	38	237,5	70,37%
225	12-08-04	6,25	28	175	51,85%
241	28-08-04	6,25	39	243,75	72,22%
257	13-09-04	6,25	51	318,75	94,44%
273	29-09-04	6,25	47	293,75	87,04%
289	15-10-04	6,25	49	306,25	90,74%
305	31-10-04	6,25	49	306,25	90,74%
321	16-11-04	6,25	45	281,25	83,33%
337	02-12-04	6,25	41	256,25	75,93%
353	18-12-04	6,25	41	256,25	75,93%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2005

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-05	6,25	39	243,75	72,22%
17	17-01-05	6,25	40	250	74,07%
33	02-02-05	6,25	33	206,25	61,11%
49	18-02-05	6,25	27	168,75	50,00%
65	06-03-05	6,25	33	206,25	61,11%
81	22-03-05	6,25	32	200	59,26%
97	07-04-05	6,25	32	200	59,26%
113	23-04-05	6,25	31	193,75	57,41%
129	09-05-05	6,25	40	250	74,07%
145	25-05-05	6,25	52	325	96,30%
161	10-06-05	6,25	52	325	96,30%
177	26-06-05	6,25	49	306,25	90,74%
193	12-07-05	6,25	47	293,75	87,04%
209	28-07-05	6,25	50	312,5	92,59%
225	13-08-05	6,25	40	250	74,07%
241	29-08-05	6,25	43	268,75	79,63%
257	14-09-05	6,25	44	275	81,48%
273	30-09-05	6,25	51	318,75	94,44%
289	16-10-05	6,25	53	331,25	98,15%
305	01-11-05	6,25	50	312,5	92,59%
321	17-11-05	6,25	44	275	81,48%
337	03-12-05	6,25	50	312,5	92,59%
353	19-12-05	6,25	49	306,25	90,74%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2006

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-06	6,25	38	237,5	70,37%
17	17-01-06	6,25	35	218,75	64,81%
33	02-02-06	6,25	35	218,75	64,81%
49	18-02-06	6,25	36	225	66,67%
65	06-03-06	6,25	36	225	66,67%
81	22-03-06	6,25	31	193,75	57,41%
97	07-04-06	6,25	36	225	66,67%
113	23-04-06	6,25	50	312,5	92,59%
129	09-05-06	6,25	40	250	74,07%
145	25-05-06	6,25	35	218,75	64,81%
161	10-06-06	6,25	54	337,5	100,00%
177	26-06-06	6,25	54	337,5	100,00%
193	12-07-06	6,25	50	312,5	92,59%
209	28-07-06	6,25	40	250	74,07%
225	13-08-06	6,25	21	131,25	38,89%
241	29-08-06	6,25	46	287,5	85,19%
257	14-09-06	6,25	47	293,75	87,04%
273	30-09-06	6,25	50	312,5	92,59%
289	16-10-06	6,25	48	300	88,89%
305	01-11-06	6,25	48	300	88,89%
321	17-11-06	6,25	45	281,25	83,33%
337	03-12-06	6,25	45	281,25	83,33%
353	19-12-06	6,25	45	281,25	83,33%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2007

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-07	6,25	39	243,75	72,22%
17	17-01-07	6,25	38	237,5	70,37%
33	02-02-07	6,25	39	243,75	72,22%
49	18-02-07	6,25	30	187,5	55,56%
65	06-03-07	6,25	13	81,25	24,07%
81	22-03-07	6,25	15	93,75	27,78%
97	07-04-07	6,25	37	231,25	68,52%
113	23-04-07	6,25	43	268,75	79,63%
129	09-05-07	6,25	47	293,75	87,04%
145	25-05-07	6,25	48	300	88,89%
161	10-06-07	6,25	43	268,75	79,63%
177	26-06-07	6,25	28	175	51,85%
193	12-07-07	6,25	52	325	96,30%
209	28-07-07	6,25	8	50	14,81%
225	13-08-07	6,25	34	212,5	62,96%
241	29-08-07	6,25	42	262,5	77,78%
257	14-09-07	6,25	46	287,5	85,19%
273	30-09-07	6,25	46	287,5	85,19%
289	16-10-07	6,25	51	318,75	94,44%
305	01-11-07	6,25	48	300	88,89%
321	17-11-07	6,25	51	318,75	94,44%
337	03-12-07	6,25	45	281,25	83,33%
353	19-12-07	6,25	46	287,5	85,19%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2008

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-08	6,25	39	243,75	72,22%
17	17-01-08	6,25	39	243,75	72,22%
33	02-02-08	6,25	32	200	59,26%
49	18-02-08	6,25	36	225	66,67%
65	05-03-08	6,25	35	218,75	64,81%
81	21-03-08	6,25	20	125	37,04%
97	06-04-08	6,25	34	212,5	62,96%
113	22-04-08	6,25	44	275	81,48%
129	08-05-08	6,25	45	281,25	83,33%
145	24-05-08	6,25	54	337,5	100,00%
161	09-06-08	6,25	45	281,25	83,33%
177	25-06-08	6,25	45	281,25	83,33%
193	11-07-08	6,25	34	212,5	62,96%
209	27-07-08	6,25	34	212,5	62,96%
225	12-08-08	6,25	37	231,25	68,52%
241	28-08-08	6,25	44	275	81,48%
257	13-09-08	6,25	50	312,5	92,59%
273	29-09-08	6,25	48	300	88,89%
289	15-10-08	6,25	51	318,75	94,44%
305	31-10-08	6,25	50	312,5	92,59%
321	16-11-08	6,25	46	287,5	85,19%
337	02-12-08	6,25	42	262,5	77,78%
353	18-12-08	6,25	44	275	81,48%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2009

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-09	6,25	37	231,25	68,52%
17	17-01-09	6,25	41	256,25	75,93%
33	02-02-09	6,25	43	268,75	79,63%
49	18-02-09	6,25	38	237,5	70,37%
65	06-03-09	6,25	32	200	59,26%
81	22-03-09	6,25	41	256,25	75,93%
97	07-04-09	6,25	45	281,25	83,33%
113	23-04-09	6,25	40	250	74,07%
129	09-05-09	6,25	50	312,5	92,59%
145	25-05-09	6,25	47	293,75	87,04%
161	10-06-09	6,25	50	312,5	92,59%
177	26-06-09	6,25	46	287,5	85,19%
193	12-07-09	6,25	50	312,5	92,59%
209	28-07-09	6,25	34	212,5	62,96%
225	13-08-09	6,25	52	325	96,30%
241	29-08-09	6,25	33	206,25	61,11%
257	14-09-09	6,25	54	337,5	100,00%
273	30-09-09	6,25	54	337,5	100,00%
289	16-10-09	6,25	54	337,5	100,00%
305	01-11-09	6,25	51	318,75	94,44%
321	17-11-09	6,25	49	306,25	90,74%
337	03-12-09	6,25	48	300	88,89%
353	19-12-09	6,25	41	256,25	75,93%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2010

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-10	6,25	49	306,25	90,74%
17	17-01-10	6,25	47	293,75	87,04%
33	02-02-10	6,25	42	262,5	77,78%
49	18-02-10	6,25	45	281,25	83,33%
65	06-03-10	6,25	42	262,5	77,78%
81	22-03-10	6,25	43	268,75	79,63%
97	07-04-10	6,25	45	281,25	83,33%
113	23-04-10	6,25	54	337,5	100,00%
129	09-05-10	6,25	54	337,5	100,00%
145	25-05-10	6,25	54	337,5	100,00%
161	10-06-10	6,25	54	337,5	100,00%
177	26-06-10	6,25	48	300	88,89%
193	12-07-10	6,25	54	337,5	100,00%
209	28-07-10	6,25	54	337,5	100,00%
225	13-08-10	6,25	44	275	81,48%
241	29-08-10	6,25	44	275	81,48%
257	14-09-10	6,25	46	287,5	85,19%
273	30-09-10	6,25	44	275	81,48%
289	16-10-10	6,25	53	331,25	98,15%
305	01-11-10	6,25	49	306,25	90,74%
321	17-11-10	6,25	53	331,25	98,15%
337	03-12-10	6,25	53	331,25	98,15%
353	19-12-10	6,25	47	293,75	87,04%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2011

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-11	6,25	42	262,5	77,78%
17	17-01-11	6,25	40	250	74,07%
33	02-02-11	6,25	39	243,75	72,22%
49	18-02-11	6,25	39	243,75	72,22%
65	06-03-11	6,25	41	256,25	75,93%
81	22-03-11	6,25	40	250	74,07%
97	07-04-11	6,25	36	225	66,67%
113	23-04-11	6,25	47	293,75	87,04%
129	09-05-11	6,25	46	287,5	85,19%
145	25-05-11	6,25	53	331,25	98,15%
161	10-06-11	6,25	51	318,75	94,44%
177	26-06-11	6,25	54	337,5	100,00%
193	12-07-11	6,25	49	306,25	90,74%
209	28-07-11	6,25	49	306,25	90,74%
225	13-08-11	6,25	54	337,5	100,00%
241	29-08-11	6,25	37	231,25	68,52%
257	14-09-11	6,25	50	312,5	92,59%
273	30-09-11	6,25	54	337,5	100,00%
289	16-10-11	6,25	53	331,25	98,15%
305	01-11-11	6,25	50	312,5	92,59%
321	17-11-11	6,25	47	293,75	87,04%
337	03-12-11	6,25	47	293,75	87,04%
353	19-12-11	6,25	43	268,75	79,63%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2012

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-12	6,25	42	262,5	77,78%
17	17-01-12	6,25	40	250	74,07%
33	02-02-12	6,25	37	231,25	68,52%
49	18-02-12	6,25	24	150	44,44%
65	05-03-12	6,25	37	231,25	68,52%
81	21-03-12	6,25	17	106,25	31,48%
97	06-04-12	6,25	38	237,5	70,37%
113	22-04-12	6,25	46	287,5	85,19%
129	08-05-12	6,25	49	306,25	90,74%
145	24-05-12	6,25	53	331,25	98,15%
161	09-06-12	6,25	54	337,5	100,00%
177	25-06-12	6,25	52	325	96,30%
193	11-07-12	6,25	54	337,5	100,00%
209	27-07-12	6,25	17	106,25	31,48%
225	12-08-12	6,25	34	212,5	62,96%
241	28-08-12	6,25	47	293,75	87,04%
257	13-09-12	6,25	48	300	88,89%
273	29-09-12	6,25	54	337,5	100,00%
289	15-10-12	6,25	51	318,75	94,44%
305	31-10-12	6,25	50	312,5	92,59%
321	16-11-12	6,25	52	325	96,30%
337	02-12-12	6,25	51	318,75	94,44%
353	18-12-12	6,25	46	287,5	85,19%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2013

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-13	6,25	46	287,5	85,19%
17	17-01-13	6,25	44	275	81,48%
33	02-02-13	6,25	39	243,75	72,22%
49	18-02-13	6,25	39	243,75	72,22%
65	06-03-13	6,25	39	243,75	72,22%
81	22-03-13	6,25	36	225	66,67%
97	07-04-13	6,25	37	231,25	68,52%
113	23-04-13	6,25	47	293,75	87,04%
129	09-05-13	6,25	49	306,25	90,74%
145	25-05-13	6,25	51	318,75	94,44%
161	10-06-13	6,25	48	300	88,89%
177	26-06-13	6,25	54	337,5	100,00%
193	12-07-13	6,25	47	293,75	87,04%
209	28-07-13	6,25	17	106,25	31,48%
225	13-08-13	6,25	13	81,25	24,07%
241	29-08-13	6,25	45	281,25	83,33%
257	14-09-13	6,25	38	237,5	70,37%
273	30-09-13	6,25	51	318,75	94,44%
289	16-10-13	6,25	46	287,5	85,19%
305	01-11-13	6,25	47	293,75	87,04%
321	17-11-13	6,25	49	306,25	90,74%
337	03-12-13	6,25	48	300	88,89%
353	19-12-13	6,25	48	300	88,89%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2014

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-14	6,25	47	293,75	87,04%
17	17-01-14	6,25	46	287,5	85,19%
33	02-02-14	6,25	39	243,75	72,22%
49	18-02-14	6,25	39	243,75	72,22%
65	06-03-14	6,25	34	212,5	62,96%
81	22-03-14	6,25	36	225	66,67%
97	07-04-14	6,25	40	250	74,07%
113	23-04-14	6,25	43	268,75	79,63%
129	09-05-14	6,25	39	243,75	72,22%
145	25-05-14	6,25	47	293,75	87,04%
161	10-06-14	6,25	54	337,5	100,00%
177	26-06-14	6,25	48	300	88,89%
193	12-07-14	6,25	53	331,25	98,15%
209	28-07-14	6,25	39	243,75	72,22%
225	13-08-14	6,25	33	206,25	61,11%
241	29-08-14	6,25	39	243,75	72,22%
257	14-09-14	6,25	50	312,5	92,59%
273	30-09-14	6,25	50	312,5	92,59%
289	16-10-14	6,25	53	331,25	98,15%
305	01-11-14	6,25	53	331,25	98,15%
321	17-11-14	6,25	50	312,5	92,59%
337	03-12-14	6,25	49	306,25	90,74%
353	19-12-14	6,25	45	281,25	83,33%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2015

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-15	6,25	47	293,75	87,04%
17	17-01-15	6,25	39	243,75	72,22%
33	02-02-15	6,25	38	237,5	70,37%
49	18-02-15	6,25	37	231,25	68,52%
65	06-03-15	6,25	36	225	66,67%
81	22-03-15	6,25	39	243,75	72,22%
97	07-04-15	6,25	39	243,75	72,22%
113	23-04-15	6,25	36	225	66,67%
129	09-05-15	6,25	42	262,5	77,78%
145	25-05-15	6,25	47	293,75	87,04%
161	10-06-15	6,25	54	337,5	100,00%
177	26-06-15	6,25	51	318,75	94,44%
193	12-07-15	6,25	50	312,5	92,59%
209	28-07-15	6,25	36	225	66,67%
225	13-08-15	6,25	37	231,25	68,52%
241	29-08-15	6,25	54	337,5	100,00%
257	14-09-15	6,25	43	268,75	79,63%
273	30-09-15	6,25	51	318,75	94,44%
289	16-10-15	6,25	49	306,25	90,74%
305	01-11-15	6,25	50	312,5	92,59%
321	17-11-15	6,25	50	312,5	92,59%
337	03-12-15	6,25	48	300	88,89%
353	19-12-15	6,25	50	312,5	92,59%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2016

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-16	6,25	48	300	88,89%
17	17-01-16	6,25	47	293,75	87,04%
33	02-02-16	6,25	43	268,75	79,63%
49	18-02-16	6,25	44	275	81,48%
65	05-03-16	6,25	39	243,75	72,22%
81	21-03-16	6,25	39	243,75	72,22%
97	06-04-16	6,25	32	200	59,26%
113	22-04-16	6,25	48	300	88,89%
129	08-05-16	6,25	51	318,75	94,44%
145	24-05-16	6,25	53	331,25	98,15%
161	09-06-16	6,25	52	325	96,30%
177	25-06-16	6,25	49	306,25	90,74%
193	11-07-16	6,25	29	181,25	53,70%
209	27-07-16	6,25	36	225	66,67%
225	12-08-16	6,25	48	300	88,89%
241	28-08-16	6,25	47	293,75	87,04%
257	13-09-16	6,25	43	268,75	79,63%
273	29-09-16	6,25	52	325	96,30%
289	15-10-16	6,25	51	318,75	94,44%
305	31-10-16	6,25	50	312,5	92,59%
321	16-11-16	6,25	49	306,25	90,74%
337	02-12-16	6,25	51	318,75	94,44%
353	18-12-16	6,25	48	300	88,89%

❖ Résultats du traitement d'images MODIS de l'année 2017

Jour julien	Date d'acquisition de l'image	Résolution des pixels (ha)	Nombre de pixels correspondant aux végétaux	Surface fortement colonisée (ha)	% de surface occupée par les végétaux
1	01-01-17	6,25	45	281,25	83,33%
17	17-01-17	6,25	44	275	81,48%
33	02-02-17	6,25	43	268,75	79,63%
49	18-02-17	6,25	42	262,5	77,78%
65	06-03-17	6,25	40	250	74,07%
81	22-03-17	6,25	44	275	81,48%
97	07-04-17	6,25	47	293,75	87,04%
113	23-04-17	6,25	42	262,5	77,78%
129	09-05-17	6,25	46	287,5	85,19%
145	25-05-17	6,25	54	337,5	100,00%
161	10-06-17	6,25	50	312,5	92,59%
177	26-06-17	6,25	50	312,5	92,59%
193	12-07-17	6,25	50	312,5	92,59%
209	28-07-17	6,25	48	300	88,89%
225	13-08-17	6,25	54	337,5	100,00%
241	29-08-17	6,25	54	337,5	100,00%
257	14-09-17	6,25	54	337,5	100,00%
273	30-09-17	6,25	54	337,5	100,00%
289	16-10-17	6,25	51	318,75	94,44%
305	01-11-17	6,25	53	331,25	98,15%
321	17-11-17	6,25	53	331,25	98,15%
337	03-12-17	6,25	49	306,25	90,74%
353	19-12-17	6,25	45	281,25	83,33%

Annexe 7 : Liste des personnes ressources consultées sur le terrain

N°	Nom et prénom	Structure
01	N'DO Antoine	SP GIRE / Burkina Faso
02	SAVADOGO/KANZIE B. Céline	DREA-Cascades / DR
03	KAFANDO Moussa Bruno	DREA-Cascades / SG CLE Haute-Comoé
04	BAGAYA Ousséni	Agence de l'Eau des Cascades
05	KABORE Rémi	Agence de l'Eau des Cascades
06	KABORE Fatimata	Agence de de l'Eau du Nakanbé
07	KONE Fulgence	Mairie de la commune de Banfora
08	TOU Sidiki	Président du comité de gestion du lac de Tengréla
09	OUEDRAOGO Hamado	Association Jeunesse Engagée pour un Développement Durable
10	OUATTARA Lamoussa	Association Jeunesse Engagée pour un Développement Durable
11	OUEDRAOGO Eric	Association Jeunesse Engagée pour un Développement Durable

RESUME

Le lac de Tengréla est situé dans le village de Tengréla à environ 7 km de la ville de Banfora. Il couvre une superficie d'environ 340 ha et représente une valeur écologique, culturelle, sociale et économique pour les populations de la localité. Il joue un rôle important dans le maintien de la biodiversité et dans les activités agricoles, la pêche et le tourisme.

Malgré ses multiples fonctions, le lac est sujet à une forte colonisation par les plantes aquatiques envahissantes qui nuisent à son bon fonctionnement.

La télédétection est l'outil que nous avons utilisé pour suivre la dynamique de la prolifération des plantes envahissantes sur le lac. L'indice de végétation NDVI a été utilisé pour mener cette étude en suivant la phénologie des plantes sur le lac. Il a été extrait de 411 images NDVI du produit MOD13Q1 du satellitaire MODIS. Pour chaque pixel des images MODIS de l'emprise du lac, nous avons utilisé une valeur seuil d'indices de végétation NDVI (> 0.3) à partir de laquelle nous avons estimé l'étendue de la couverture végétale sur le lac.

Dans notre démarche méthodologique, nous avons étudié la dynamique intra et interannuelle de la prolifération du couvert végétal sur le plan d'eau du lac de Tengréla de 2000 à 2017, puis la dynamique saisonnière de la variation de la couverture végétale sur le lac.

Il ressort de cette analyse que la dynamique de la prolifération des végétaux sur le lac est contrastée d'une année à une autre. Cependant, au cours de notre étude on note une forte ampleur de la présence de couvert végétal sur lac. Le taux de la couverture végétale moyenne annuelle reste de façon permanente au-dessus de 70% avec une couverture moyenne mensuelle supérieure à 60% de la surface du lac. En plus, l'étendue du couvert végétal est fortement liée à la pluviométrie. Lorsque la saison des pluies s'installe, on assiste à une augmentation progressive de la couverture végétale sur le lac jusqu'à atteindre sa surface maximale au cours des mois d'août-octobre, qui correspondent aux périodes de fortes pluies. A la fin de la saison des pluies à partir du mois d'octobre, on assiste à un effet inverse avec un rétrécissement progressif de la portion du couvert végétal sur le lac jusqu'à atteindre sa couverture minimale en mars.

Au regard de certaines limites de l'étude et dans le but de proposer des pistes de solution pour la gestion des zones humides, une série de recommandations a été formulée. Certaines recommandations concernent le recensement exhaustif des plantes aquatiques envahissantes nuisibles au Burkina Faso afin de mieux comprendre leur cycle végétatif avant de planifier les actions de luttés, la mise en place de système de lutte curative adapté au contexte de chaque plan d'eau (type de plantes envahissantes, régime hydrologique, ...) et la mise en place de système d'alerte précoce de réapparition de certaines plantes nuisibles.

Mots clés : couverture végétale, plantes envahissantes, lac de Tengréla, télédétection, NDVI, MODIS.