DYNAMIQUE ENVIRONNEMENTALE ET VULNÉRABILITÉ DE LA ZONE HUMIDE DU LAC DEM ENTRE 2000 ET 2024 AU BURKINA FASO

ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND VULNERABILITY OF THE LAKE DEM WETLAND BETWEEN 2000 AND 2024 IN BURKINA FASO

SANKARA Souleymane, *Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso, Email: sankarasouleymane164@gmail.com, Tel: (+226) 73130136*

OUEDRAOGO Hubert, *Université Joseph-KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso, Email: hubert.ouedraogoh@gmail.com, Tel: (+226) 73887673*

ZOUNGRANA Benewindé Jean-Bosco, *Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso, Email: beneboscoh@gmail.com, Tel: (+226) 76271220*

Résumé

Les zones humides jouent un rôle essentiel dans la conservation de la biodiversité, la régulation hydrologique et le maintien des activités socio-économiques. Ces écosystèmes connaissent aujourd'hui, une transformation profonde de leurs ressources sous l'effet conjugué des pressions anthropiques et des variations climatiques. C'est ainsi que cette recherche cherche à comprendre, comment les facteurs climatiques et anthropiques influencent la vulnérabilité des écosystèmes de la zone humide du lac Dem. Elle vise à analyser l'impact de ces facteurs sur la dynamique des ressources naturelles. De ce fait, elle a nécessité une démarche méthodologique composée de traitements d'images satellitaires, des enquêtes de focus groups, des entretiens, des consultations d'experts et des observations directes de terrain. Les résultats montrent une dégradation progressive des ressources, caractérisée par une réduction des surfaces en eau (-17,15%) ; de la forêt galerie (-17,08%) ; de la savane arbustive (-19,77%) et de la savane arborée (-73,87%) entre 2000 et 2024. Cette dynamique régressive des ressources naturelles est influencée par plusieurs facteurs d'origine naturelle et humaine. L'analyse participative de la vulnérabilité montre que la sécheresse (50,85), l'inondation/pluies intenses (41,85) et la déforestation (40,30) sont les principaux facteurs de vulnérabilité des ressources. Les terres agricoles, les formations végétales et les eaux de surface sont les ressources les plus menacées de la zone humide. Les populations locales dépendent de l'exploitation de ces ressources pour leur subsistance. Ainsi, elles mettent en œuvre diverses stratégies visant à limiter les pressions afin de renforcer leur résilience.

Mots-clés : Dynamique environnementale, vulnérabilité, zone humide, Lac Dem, Burkina Faso.

Abstract

Wetlands play an essential role in the conservation of biodiversity, hydrological regulation and the maintenance of socio-economic activities. These ecosystems are currently undergoing profound changes in their resources as a result of the combined effects of anthropogenic pressures and climatic variability. This research therefore seeks to understand how climatic and anthropogenic factors influence the vulnerability of the ecosystems of the lake Dem wetland. It aims to analyze the effects of these pressures on dynamic natural resources. It required a methodological approach combining satellite image processing, focus group discussions, interviews, expert consultation and direct field observations. The results show a progressive degradation of resources, characterized by a reduction in water surfaces (-17.15%); gallery forest (-17.08%); shrub savannah (-19.77%) and tree savannah (-73.87%) between 2000 and 2024. This regressive dynamic of natural resources is influenced by several factors of natural and human origin. The participatory vulnerability analysis shows that drought (50.85), flooding (41.85) and deforestation (40.30) are the main factors of resource vulnerability. Agricultural land, vegetation and surface water are the wetland's most threatened resources. Local populations depend on the exploitation of these resources for their livelihood. They therefore implement various strategies aimed at limiting pressures in order to strengthen their resilience.

Key words: Environmental dynamics, vulnerability, wetlands, Lake Dem, Burkina Faso

1. Introduction

Les zones humides sont parmi les milieux les plus productifs du monde (CONVENTION RAMSAR, 2004, p8). Elles offrent plusieurs services aux humains et à l'environnement. Elles soutiennent la vie de plusieurs personnes dans le monde en raison de la diversité des biens et services qu'elles fournissent, et abritent plus de 40 % des espèces animales et végétales (CONVENTION RAMSAR, 2018, p6-11). De plus, elles participent à la régulation climatique et hydrologique grâce à leur capacité à stocker le carbone et à réguler les crues (G. BERGKAMP et B. ORLANDO 1999, p4-5). Malgré leurs multiples avantages écologiques et socioéconomiques, les zones humides figurent parmi les écosystèmes les plus menacées au monde, avec un taux annuel de disparition estimé à 0,5 % (CONVENTION RAMSAR, 2025, p9). Cette régression s'accompagne d'une dégradation de leurs fonctions et services écosystémiques, dont les principaux facteurs sont les pressions anthropiques et les changements climatiques. Le drainage, la conversion des formations végétales, l'expansion agricole et l'urbanisation dans ces milieux détruisent leurs caractéristiques écologiques (CONVENTION RAMSAR, 2018, P46-49). Par ailleurs, les modifications du régime des précipitations et la hausse des températures perturbent leur fonctionnement hydrologique et favorisent la prolifération d'espèces exotiques envahissantes (W. MOOMAW et *al.*, 2018, p6).

Au Burkina Faso, les zones humides sont très convoitées par de nombreux acteurs du fait de leurs énormes potentialités. Elles constituent des espaces privilégiés pour le développement de nombreuses activités socioéconomiques et culturelles. Toutefois, ces activités, lorsqu'elles sont exercées de manière intensive et non maîtrisées, peuvent entraîner une surexploitation et une dégradation progressive de leurs services écosystémiques. À cela s'ajoutent les facteurs d'origine naturelle. Le pays est sujet à de fortes variations climatiques qui impactent négativement les ressources naturelles des zones humides (S. ROUAMBA, 2024, p253).

La zone humide du lac Dem revêt un intérêt particulièrement indispensable pour la biodiversité et les communautés riveraines. Elle permet aux populations de pratiquer plusieurs activités socioéconomiques (agriculture pluviale et irriguée, élevage, pêche) et leur fournit de nombreux services écosystémiques (eau douce, produits forestiers non ligneux, ressources biologiques et halieutiques). Elle abrite en sus, une faune et une flore très riches et diversifiées. Au regard de ses nombreux avantages, elle a été inscrite sur la liste Ramsar des zones humides d'importance internationale en 2009. Bien qu'il soit classé site Ramsar, ce patrimoine naturel fait l'objet d'une dégradation sans cesse sous l'effet probable des pressions d'ordre naturel et humain. L'aridité historique du climat de la zone a favorisé une forte concentration humaine autour du lac qui vivent essentiellement de l'exploitation de ses ressources. Cette forte démographie et l'urbanisation croissante de la ville de Kaya exercent une forte pression sur les terres et entraînent une surexploitation des ressources de cet écosystème. À cela s'ajoutent les pressions d'ordre naturel et les problèmes de gestion et de gouvernance. De nombreux efforts de conservation et de restauration sont mis en œuvre par les acteurs et les populations locales : la charte foncière locale et le plan de gestion du site en 2014 ; le Programme de réhabilitation et le schéma d'aménagement de l'espace naturel du lac en 2018. Malgré ces ambitions, les ressources de cet hydrosystème demeurent vulnérables face aux diverses pressions. Dès lors, il apparaît ainsi nécessaire de porter un regard critique sur leur état et leur évolution afin de mieux caractériser la vulnérabilité de la zone humide. C'est dans ce contexte que se situe la présente recherche qui cherche à répondre à la question suivante : comment les pressions climatiques et anthropiques influencent-elles la vulnérabilité des écosystèmes de la zone humide du lac Dem ? Il s'agit d'analyser l'impact des aléas climatiques et des actions anthropiques sur la dynamique des ressources de la zone humide.

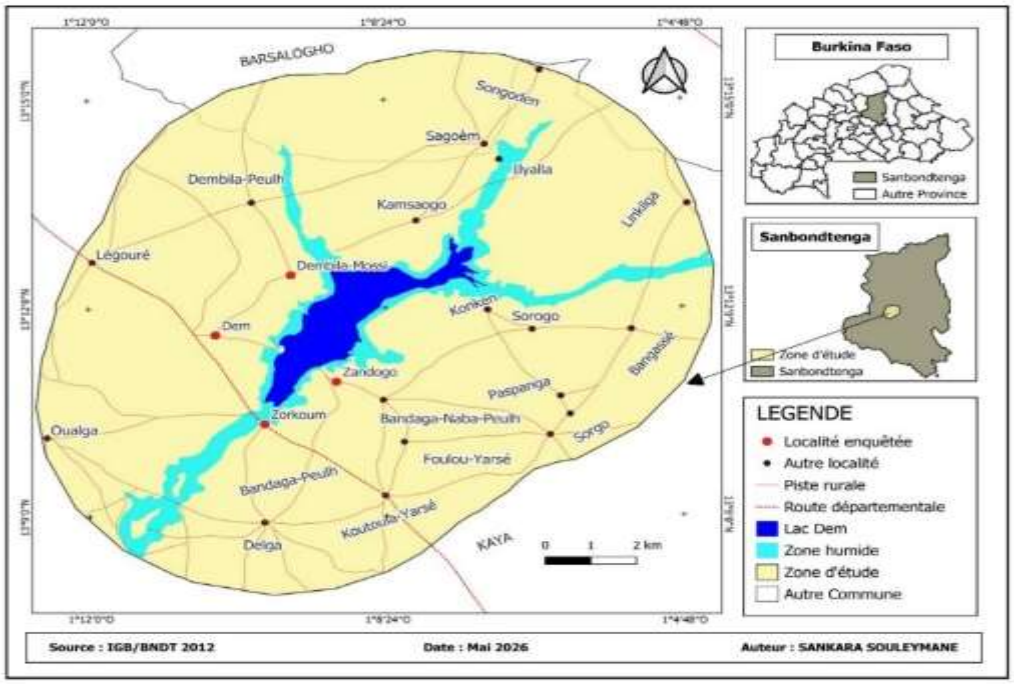
2. Méthodologie

Cette étude de la vulnérabilité repose sur une approche participative visant à associer les connaissances scientifiques aux perceptions des communautés locales, pour évaluer l'impact des facteurs sur les ressources et les moyens d'existence. Ainsi, l'approche méthodologique adoptée dans le cadre de cette étude est inspirée du guide méthodologique pour l'analyse de la vulnérabilité au niveau communautaire de M. BOUREIMA et *al.* (2012).

2.1. Présentation de la zone d'étude

La zone humide du lac Dem est située dans la région administrative des Koulsé. Le lac est localisé dans la commune de Kaya aux coordonnées 13°09'00'' ; 13°15'00'' de latitude nord et 1°4'48'' ; 1°12'00''de longitude ouest. Cette recherche a nécessité la délimitation d'une zone d'étude matérialisée par une zone tampon de 5 km de part et d'autre des berges du lac (carte n°1). Cette distance permet de percevoir les activités humaines plus proches qui impactent le lac, tout en restant cohérente avec les méthodes d'analyse spatiale et les standards scientifiques utilisés dans des études similaires (S. ROUAMBA, 2024 ; N. NDOUR et *al.,* 2024).

La zone humide du lac Dem est soumise à un climat tropical soudano-sahélien, marqué par une longue saison sèche de novembre à juin et une courte saison pluvieuse de juillet à septembre, avec des hauteurs de pluie fluctuant entre 500 et 900 mm par an. Son réseau hydrographique peu dense, est alimenté par plusieurs cours d'eau temporaires. Les sols ferrugineux tropicaux occupent plus de 40 % de la zone. Quant au relief, il est relativement plat avec une altitude moyenne de 300 m, dominé par des modelés de collines birimiennes. La végétation est typique du secteur subsahélien, dominée par la savane parc avec des espèces telles que *Vitellaria paradoxa, Acacia albida, Tamarindus indica, Sclerocarya birrea et Parkia biglobosa.* Elle comprend également des savanes arbustives, des galeries forestières le long des berges, des parcs agroforestiers et quelques îlots forestiers, dont la forêt classée de Dem qui couvre 350ha. Sur le plan démographique, la zone connaît une structure spatiale peu peuplée avec une forte croissance de sa population. Elle est passée de 9 856 habitants en 2006 à plus de 22 423 habitants en 2022 (INSD, 2022, p7). L'agriculture pluviale est la principale activité des populations, suivie du maraîchage en saison sèche, de l'élevage et de la pêche.



Carte n° 1 : Localisation de la zone d'étude

2.2. Collecte des données

Cette étude a nécessité l'utilisation des données socioéconomiques collectées sur le terrain ainsi que des données cartographiques et spatiales.

Pour les données de terrain, quatre techniques de collecte ont été utilisées : des entretiens semi-directifs, des observations directes, des focus groups et des consultations d'experts.
Premièrement, des entretiens semi-directifs réalisés à l'aide d'un guide d'entretien ont été menés auprès des personnes-ressources issues des services techniques déconcentrés de l'État, impliquées dans la gestion des ressources de la zone humide. Ces entretiens ont porté sur les principaux facteurs de vulnérabilité et les stratégies de protection, de conservation et de gestion de la zone humide.
Deuxièmement, des observations directes sur le terrain ont permis d'apprécier l'état des ressources, les transformations environnementales et les stratégies de préservation mises en œuvre dans la zone.
Troisièmement, des focus groups ont été menés auprès des populations locales riveraines du lac qui exploitent les berges pour évaluer la vulnérabilité des ressources. Ainsi, une technique d'échantillonnage spatiale raisonnée a été adoptée pour le choix des localités pour la tenue des focus groups. Ce sont quatre localités riveraines du lac, dont deux sur la rive droite et deux sur la rive gauche qui ont été retenues. Il s'agit des villages de Dem, Dembila-Mossi, Zandogo et Zorkoum. Le choix de ces sites a été fait en tenant compte des critères tels que l'accessibilité et la proximité par rapport à la retenue d'eau, le droit traditionnel ou territorial. En effet, le lac relève du domaine territorial des villages de Dem et Dembila, ils disposent ainsi d'une influence politique et traditionnelle par rapport aux autres villages.
La constitution des groupes de discussion a reposé sur des critères d'âge, de diversité socioprofessionnelle et de genre. Les participants âgés de 32 ans ou plus ont été sélectionnés en raison de leur expérience sur les transformations et les pratiques d'exploitation des ressources de la zone humide. Ils appartenaient à différentes catégories socioprofessionnelles, notamment des chefs de village, des agriculteurs, des éleveurs et des pêcheurs. Afin d'avoir des perceptions variées qui tiennent compte des rôles et responsabilités sociaux, le genre a été privilégié. Au total, huit focus groups ont été réalisés, dont quatre avec les femmes (Photo A) et quatre avec les hommes (photo B). L'effectif moyen était de douze (12) participantes par groupe de femmes et de seize (16) par groupe d'hommes, calculé en rapportant le nombre total de participants de chaque catégorie au nombre de groupes correspondants. La planche photographique illustre la tenue des groupes de discussion.



Source : Travaux terrains, Septembre 2025

Planche photographique n° 1 : Séances de focus-groups pour l'analyse participative

Les discussions ont été menées en séances plénières, au cours desquelles chaque réponse était soumise à l'appréciation de l'ensemble des participants et validée à l'issue d'un échange collectif. Cette approche a permis d'identifier les principales ressources de la zone humide, d'énumérer les facteurs susceptibles d'accroître leur vulnérabilité et d'évaluer le niveau de

sévérité de ces facteurs sur les différentes ressources à partir d'une grille de notation commune présentée dans le tableau n° 1.

Score de sévérité			Seuil de vulnérabilité	
0	Pas de sévérité	Absence d'impact	[0-15[	Ressource non vulnérable
1	Faible sévérité	Impact limité	[15-30[	Ressource faiblement vulnérable
2	Sévérité moyenne	Impact modéré	[30-45[	Ressource Moyennement Vulnérable
3	Forte sévérité	Impact critique	[45-60[	Ressource fortement vulnérable

Sources : M. Boureima et *al.* (2012)

Tableau n° 1 : Grille d'évaluation de la vulnérabilité

Cette grille de notation a également facilité l'identification des stratégies d'adaptation. Si la sévérité d'un facteur sur une ressource était jugée forte (score 3) ou moyenne (score 2), les participants sont tenus de donner les stratégies qu'ils mettent en place pour s'adapter face à la menace. Si la sévérité était jugée faible (score 1) ou absente (score 0), il n'est plus nécessaire de lister les stratégies.
Quatrièmement, l'analyse participative de la vulnérabilité se veut complémentaire si elle touche les visions communes de plusieurs acteurs sur le terrain. Pour cela, dix (10) experts issus de diverses institutions et de domaines différents (agriculture, élevage et environnement) ont été consultés en vue de compléter les données. Sélectionnés pour leurs compétences et leurs connaissances sur le fonctionnement et la gestion des écosystèmes de la zone humide, ces experts ont également évalué la sévérité des facteurs sur les ressources identifiées à l'aide de la même grille de notation (tableau 1). Le nombre d'experts consultés s'appuient sur les travaux de R. CAMPAGNE et P. ROCHE et *al.* (2018, p6) qui préconise un panel de dix à vingt experts pour obtenir des résultats stables.

Les données cartographiques proviennent de la Base Nationale de Données Topographiques de l'Institut Géographique du Burkina (IGB). Quant aux données spatiales, elles sont issues des images satellitaires Landsat 7 (ETM+), Landsat 8 et 9 (OLI/TIRS) des années 2000, 2013 et 2024, obtenues via le catalogue de données de la plateforme Google Earth Engine. Ces dates ont été retenu pour analyser l'évolution des ressources avant et après l'inscription du lac comme site Ramsar. Les images de novembre ont été privilégiées, cette période est favorable à une bonne discrimination des unités (B. J-B. ZOUNGRANA et *al.*, 2015, p. 1280).

Traitement et analyse des données

Le traitement des données de terrain et l'élaboration des graphiques sont faits via le tableur Excel 2016. Le calcul des différentes matrices de sévérité a consisté à faire la moyenne des scores de chaque facteur sur l'unité d'exposition correspondante. La somme des moyennes pour les trois catégories d'acteurs (homme, femme et expert) détermine alors le niveau de vulnérabilité globale de chaque ressource par rapport à l'aléa correspondant.
Le traitement des images satellitaires pour la création des cartes d'occupation du sol a été effectué sur la plateforme Google Earth Engine. À cet effet, des points de référence ont été collectés sur Google Earth et lors des travaux de terrain à l'aide d'un GPS Garmin 30, puis séparés en sites d'entraînement et de test. Le modèle de classification supervisée non paramétrique « ***Random Forest (RF)*** » a été choisi pour conduire la classification. Le choix de cet algorithme se justifie par sa forte précision et sa meilleure performance. Sept (07) types d'unités d'occupation ont été repérés en composition colorée proche infrarouge. Il s'agit des plans d'eau ; la forêt galerie ; les zones de culture (champs) ; les sols nus ; les zones d'habitation ; la savane arbustive et la savane arborée. Une analyse post-classification a été effectuée pour

comparer les cartes avec les données de terrain (points GPS) et évaluer les indices statistiques de validation : la précision globale et le coefficient Kappa, qui étaient de 93%, 96% et 95%. La finalisation et la conception des cartes ont été faites avec le logiciel QGIS 3.34.

Dans le cadre de l'analyse des résultats, cette étude sur l'évaluation participative s'appuie sur le modèle DPSIR (Facteurs-Pressions-État-Impacts-Réponses) développé par l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) en 1990 (S. JABBAR et C. CRUZ, 2025, p4). C'est un outil permettant d'identifier les forces motrices à l'origine des transformations environnementales, de caractériser les pressions exercées sur les écosystèmes et d'analyser les impacts et les réponses mises en œuvre par les communautés pour y faire face.

3. Résultats

3.1. Dynamique de l'occupation du sol de la zone humide

Le traitement des images satellitaires Landsat des années 2000, 2013 et 2024 a permis d'obtenir des cartes d'occupation du sol de la zone délimitée. La comparaison et l'observation visuelle de ces cartes ont fourni des informations précises sur la répartition et le taux d'évolution des unités d'occupation entre 2000 et 2024.

3.1.1. Répartition spatiale des unités d'occupation

La planche cartographique illustre la répartition spatio-temporelle des unités d'occupation du sol de la zone humide en 2000, 20213 et 2024.

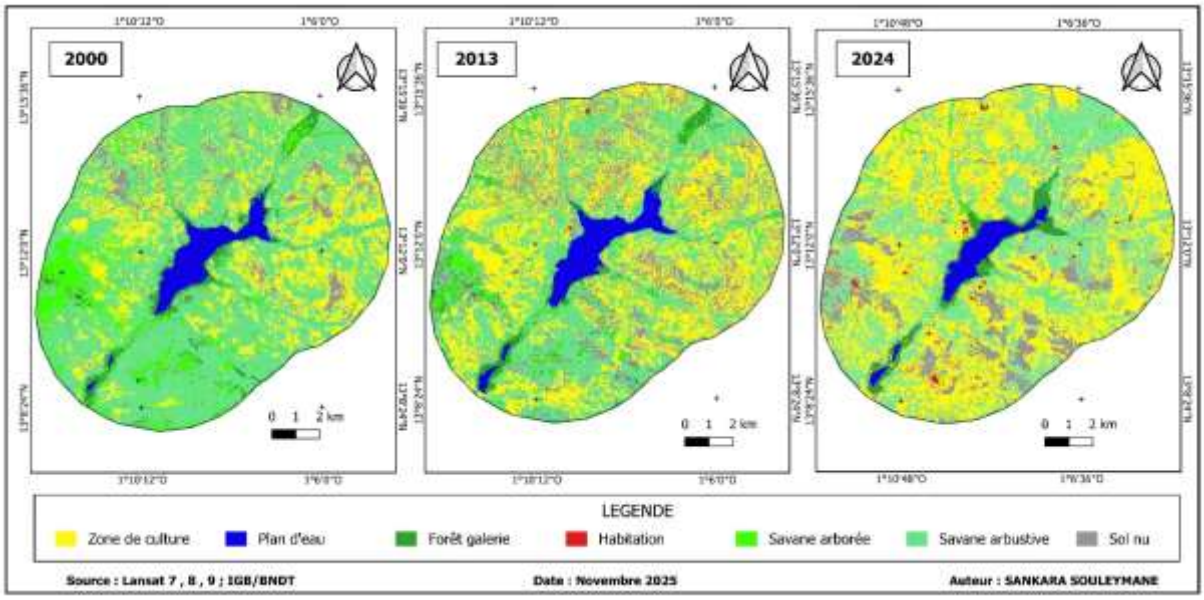


Planche cartographique n° 1 : Occupation du sol entre 2000, 2013 et 2024

L'analyse de cette cartographie multi-date met en évidence une nette mutation des modes d'occupation du sol entre. En 2000, la zone était majoritairement colonisée par des formations végétales. En effet, la savane arborée, la forêt galerie et la savane arbustive occupaient plus de 70,52%, soit près des 3/4 de la zone. La savane arbustive est l'unité la plus représentée avec 57,38%, suivie des zones de culture et de la savane arborée avec respectivement 20,09% et 8,65%. Pour l'année 2013, un changement s'observe par rapport à la période précédente. Les surfaces cultivées ont presque doublé de superficie. Elles sont passées de 20,09% en 2000 à 34,09% en 2013. Il en est de même pour les sols nus et les plans d'eau qui ont connu une évolution positive. En revanche, les formations végétales révèlent une évolution dégradante. En 2024, tous les biomes végétaux ont connu une régression importante. De 47,03% en 2013,

ces formations végétales ne peuplent que 42,92% de la zone en 2024. La diminution du couvert végétal entre 2013 et 2024 s'explique par l'extension des zones anthropisées, comme en témoigne la progression continue des surfaces cultivées (+9,5 %) et des zones bâties (+18,22%).

Le tableau n° 2 donne les proportions des unités d'occupation de la zone d'étude.

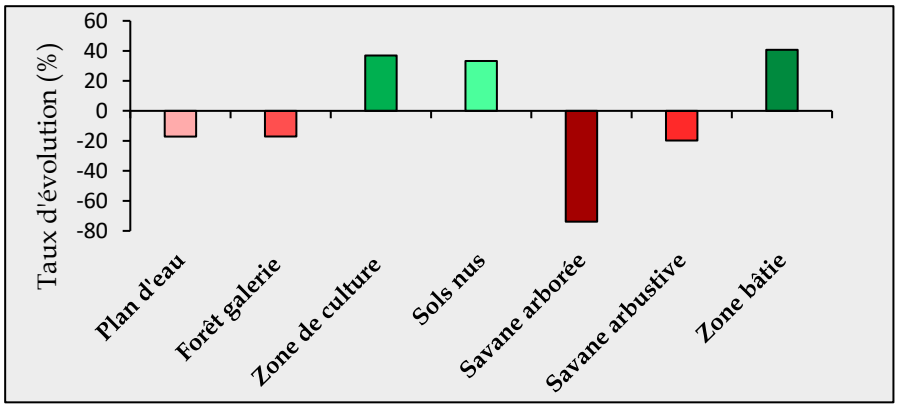
Unités d'occupation	2000		2013		2024	
	Superficie(ha)	%	Superficie(ha)	%	Superficie (ha)	%
Plan d'eau	665,33	4,2	785,32	4,96	469,62	2,97
Forêt galerie	711,36	4,49	580,59	3,67	503,42	3,18
Zone de culture	3179,69	20,09	5396,85	34,09	6901,4	43,59
Sols nus	753,29	4,76	2093,44	13,22	1503,92	9,5
Savane arborée	1369,37	8,65	528,31	3,34	205,78	1,3
Savane arbustive	9084,68	57,38	6335,54	40,02	6085,82	38,44
Habitat	68,56	0,43	112,28	0,7	162,32	1,02
Total	**15832,28**	**100**	**15832,28**	**100**	**15832,28**	**100**

Source : Traitement des images Landsat 7 ; 8 et 9

Tableau n° 2 : Proportion des unités d'occupation du sol de 2000, 2013 et 2024

3.1.2. Taux d'évolution des unités d'occupation

L'analyse diachronique de l'occupation du sol entre 2000 et 2024 révèle une dynamique hétérogène des unités. Le graphique n° 1 donne le taux d'évolution des unités d'occupation entre 2000 à 2024 dans la zone humide.



Sources : Traitement des images Landsat 7 ; 8 et 9

Graphique n° 1 : Taux d'évolution de l'occupation du sol entre 2000 et 2024

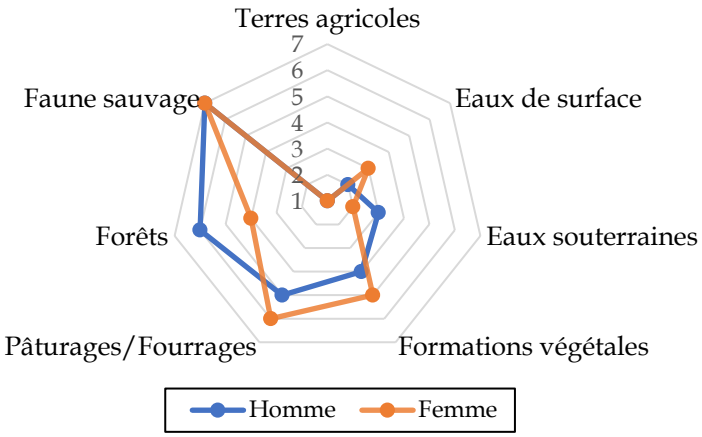
L'analyse du graphique montre que les espaces anthropisés ont progressé de 36,90% pour la zone de culture, 40,69% pour l'habitat et 33,24% pour le sol nu. Cette évolution serait due à la croissance démographique qui a probablement entraîné l'extension des superficies agricoles et des zones d'habitation. « À contrario », la végétation naturelle et les plans d'eau, ont connu une régression. Cette perte concerne 19,77% de la savane arbustive, 73,87% de la savane arborée et 17,08% de la forêt galerie. La dégradation des formations végétales pourrait être associée à plusieurs facteurs, notamment les mauvaises pratiques agricoles et l'exploitation du bois-énergie à des fins domestiques et commerciales. Par ailleurs, la baisse de (-17,15%) des plans d'eau sur la même période serait due principalement d'une part, aux déficits pluviométriques et aux fortes températures d'autre part, à la forte réduction de la superficie du lac due au comblement progressif de la retenue, aux prélèvements d'eau d'irrigation et de production d'eau potable par l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA).

3.2. Évaluation de la vulnérabilité des ressources naturelles de la zone humide

Les résultats du processus participatif de la vulnérabilité des ressources se présentent en quatre étapes : l'inventaire des ressources, l'identification des facteurs de vulnérabilité, l'appréciation de la sévérité de ces facteurs et les stratégies d'adaptation développées.

3.2.1. Inventaire des ressources naturelles

Les groupes de discussion ont permis d'identifier les principales ressources naturelles de la zone humide, contribuant aux moyens de subsistances et au développement socioéconomique des populations. Ces ressources citées sont similaires dans toutes les quatre localités, en raison de la proximité du lac et de leur dépendance aux mêmes services écosystémiques. Toutefois, leur importance diffère selon le genre. En effet, les hommes mentionnent respectivement les terres agricoles, les eaux de surface et les formations végétales (hors forêts), tandis que les femmes en plus des terres agricoles accordent une importance aux eaux souterraines et les eaux de surface. Le graphique n° 2 illustre les ressources inventoriées par les populations.



Source : Enquêtes terrains, Septembre 2025

Graphique n° 2 : Ordre d'importance des ressources naturelles selon le genre

3.2.2. Identification des facteurs de vulnérabilité

Les facteurs de vulnérabilité ont été identifiés à partir des entretiens et des focus groups. La démarche a consisté à recenser tous les facteurs influençant la dynamique des ressources, puis évaluer leur fréquence et les dommages qu'ils occasionnent afin de retenir les plus pertinents. Étant donné que toutes les localités se partagent les mêmes ressources, les facteurs retenus ont été validés dans chaque localité. Ce processus a permis d'identifier et d'élaborer la liste des principaux facteurs de vulnérabilité dans le tableau n° 3.

Facteurs de vulnérabilité des ressources naturelles	
Aléas climatiques	**Actions anthropiques**
Sécheresse	Feux de brousse
Vague de chaleur	Croissance démographique
Inondation (Pluie intense)	Surpâturage
Vent violent	Déforestation

Source : Enquêtes terrain, Septembre 2025

Tableau n° 3 : Facteurs de vulnérabilité des ressources naturelles

Le terme « inondation » cité par les populations, renvoie aux épisodes de fortes pluies qui surviennent régulièrement durant la saison humide, qui selon eux sont susceptible d'entrainer de fortes érosions hydriques, des submersions de parcelles ou des dégâts sur les cultures et les infrastructures. Ces facteurs ont été évaluer par les populations et des experts selon leur niveau d'influence sur chaque ressource naturelle.

Matrice de sévérité selon les femmes

Le tableau n° 4 illustre la matrice de sévérité élaborée selon la perception des femmes

Ressources Naturelles	Facteurs de vulnérabilité									
	Sécheresse	Vent violent	Feux de brousse	Croissance démographique	Inondation	Déforestation	Forte Chaleur	Surpâturage	Score de gravité	Rang
Eaux de surface (lac)	3	2,5	2,25	2	3	1,25	2,75	1,75	**18,5**	1
Eaux souterraines	2	0,5	1,75	1,75	0,75	0,5	2,25	0,5	**10**	6
Terres agricoles	2,5	2,75	2,25	2	2,75	2,25	2,25	1,5	**18,25**	2
Faune sauvage	1,25	1,25	1,5	1,25	1	1,25	1,25	0,75	**9,5**	7
Pâturages/ Fourrages	2,5	1,75	1,5	0,75	2,75	1	1,5	1,75	**13,5**	5
Formations végétales	2,25	2,75	1,25	2	2,75	1,5	2,25	2,25	**17**	3
Forêt classée	2,5	3	0,5	1,5	1,75	1,75	1,5	1,25	**13,75**	4
Indicateur d'impact	**16**	**14,5**	**11**	**12,25**	**14,75**	**9,5**	**13,75**	**9,75**		

Source : Enquêtes terrains, Septembre 2025

Tableau n° 4 : Matrice de sévérité selon les femmes

L'analyse de cette matrice montre que les facteurs n'ont pas le même niveau d'influence sur les ressources. En retour, les ressources subissent de façon différente les menaces. En tenant compte de leurs indicateurs d'impact, les facteurs les plus sévères sont respectivement la sécheresse, les inondations, et les vents violents. En ce qui concerne les ressources les plus menacées, l'eau de surface occupe le premier rang avec un score (18,5), suivie des terres agricoles et les formations végétales. Les eaux souterraines et la faune sont les moins menacées.

Matrice de sévérité selon les hommes

Ressources Naturelles	Facteurs de vulnérabilité									
	Sécheresse	Vents violents	Feux de brousse	Croissance démographique	Inondation	Déforestation	Forte Chaleur	Surpâturage	Score de gravité	Rang
Eaux de surface (lac)	2,5	2,5	0	2	2,5	1,75	2	2,5	**15,75**	3
Eaux souterraines	2	0,5	0	2	1	1	1	1,25	**8,75**	6
Terres agricoles	3	2,5	1	2	2,75	2	2	2,75	**18**	1
Faune sauvage	2,5	1,75	1	2	1,5	2,75	1,25	0,75	**13,5**	5

Pâturages/ Fourrages	2,25	1,75	1	1,25	2	2,25	0,75	1,75	**13**	5
Formations végétales	2,5	2,5	1,5	2,75	2,25	2	1,25	1,5	**16,25**	2
Forêt classée	2,5	2	1	1	2	2,75	1	1,25	**13,5**	4
Indicateur d'impact	**17,25**	**13,5**	**5,5**	**13**	**14**	**14,5**	**9,25**	**11,75**		

Le tableau n° 5 donne la matrice de sévérité élaboré selon la perception des hommes.

Source : Enquêtes terrains, Septembre 2025

Tableau n° 5 : Matrice de sévérité selon les hommes

L'analyse de la matrice des hommes révèle que la sécheresse, la déforestation et les inondations sont aléas les plus influents avec des indicateurs d'impact respectifs de 17,25 ; 14,5 et 14. La terre agricole est la plus menacée, suivie des formations végétales affectées par la croissance démographique et les vents violents. Les eaux de surface (lac) occupent le troisième rang, dont le surpâturage, la sécheresse et les fortes chaleurs en sont les principaux responsables. Enfin, on note une sévérité plus ou moins faible des forêts et de la faune.

Matrice de sévérité selon les experts

Le tableau n° 6 illustre la matrice de sévérité issus de la consultation des experts

Ressources Naturelles	**Facteurs de vulnérabilité**									
	Sécheresse	**Vents violents**	**Feux de brousse**	**Croissance démographique**	**Inondation**	**Déforestation**	**Forte Chaleur**	**Surpâturage**	**Score de gravité**	**Rang**
Eaux de surface (lac)	2,9	1,5	0,8	2	1,9	1,9	2,9	1,6	**15,5**	4
Eaux souterraines	2,1	0,4	0,4	1,8	1,3	1,7	2	1,1	**10,8**	7
Terres agricoles	2,6	2,1	2	2,3	2,5	2,3	2,1	1,9	**17,8**	2
Faune sauvage	2,5	1,6	2,6	2,4	1,9	2,6	2	1,8	**17,4**	3
Pâturages/ Fourrages	2,4	1	2,4	1,9	1,6	2,1	1,7	2,2	**15,3**	5
Formations végétales	2,7	2,5	2,5	2,5	2	3	1,9	2,3	**19,4**	1
Forêt classée	2,4	1,9	2,4	2,3	1,9	2,7	1,7	1,8	**13,1**	6
Indicateur d'impact	**17,6**	**11**	**13,1**	**15,2**	**13,1**	**16,3**	**14,3**	**12,7**		

Source : Enquêtes terrains, Septembre 2025

Tableau n° 6 : Matrice de sévérité selon les experts

La matrice des experts montre que la sécheresse, la déforestation et la croissance démographique sont les facteurs de vulnérabilité les plus menaçants avec des indices d'impact respectifs de 17,6, 16,3 et 15,2. Selon eux, les formations végétales, les terres agricoles et la faune sauvage sont les ressources les plus menacées. Par contre, les eaux souterraines et la forêt classée sont les moins affectées. En effet, la végétation est plus menacée par la déforestation, la sécheresse, les vents et la croissance démographique. Quant aux terres agricoles, elles sont plus influencées par les sécheresses et les inondations.

En gros, l'analyse des résultats des matrices selon les trois groupes d'acteurs (hommes, femmes et experts) révèle des différences de perception sur l'influence des facteurs et l'identification des ressources les plus vulnérables. Les trois catégories d'acteurs s'accordent sur le rôle suprême de la sécheresse comme l'aléa le plus influent. Cette perception conjointe

témoigne d'une vision partagée du stress hydrique et ses impacts directs sur les écosystèmes de la zone humide. Toutefois, les hommes ont identifié la terre agricole comme la ressource la plus vulnérable et associent principalement les menaces aux sécheresses et à la déforestation. Tandis que les femmes, en plus des sécheresses et des vents violents, insistent sur les inondations et estiment que l'eau de surface est la ressource la plus menacée. Cette différence de perception selon le genre pourrait s'expliquer par le niveau de dépendance aux ressources et leur importance dans les activités quotidiennes, ainsi que les responsabilités sociales et économiques. En effet, dans les communautés rurales, les hommes et les femmes ne sont pas impliqués de manière identique dans l'exploitation des ressources et dans les activités du ménage. Ainsi, les différences de rôle et la nature des activités exercées peuvent influencer les perceptions. Quant aux experts, ils adoptent une large vision en associant également la croissance démographique comme un facteur crucial en plus de la sécheresse et de la déforestation. Ils notent en sus la faune sauvage (3e) parmi les ressources vulnérables. La divergence entre les perceptions des populations et celles des experts peut également être liée à l'appartenance socioprofessionnelle et au niveau d'observation. Les populations locales évaluent les impacts des facteurs en se basant sur leurs expériences quotidiennes et leurs interactions directes avec leur environnement. Les experts, quant à eux, s'appuient sur leurs connaissances techniques et leurs expériences professionnelles. Ces perceptions, bien que différentes, s'avèrent complémentaires et montrent que la vulnérabilité de la zone humide résulte d'une interaction entre les extrêmes climatiques et les pressions anthropiques.

Après l'analyse des résultats obtenus pour chaque catégorie d'acteurs, il convient de les combiner afin d'établir un profil global de vulnérabilité des écosystèmes de la zone humide. Ainsi, la sommation des scores de sévérité par ressource, par facteur et par acteur a permis d'obtenir des scores globaux par ressource et par aléa. Le tableau n° 7 illustre la matrice globale de vulnérabilité des ressources.

Ressources Naturelles	Sécheresse	Vents violents	Feux de brousse	Croissance démographique	Inondation	Déforestation	Forte Chaleur	Surpâturage	Score global de criticité	Niveau de Vulnérabilité
Les terres agricoles	8,1	7,35	5,25	6,3	8	6,55	6,35	6,15	**54,05**	**Forte vulnérabilité**
Formations végétales	7,45	7,75	5,25	7,25	7	6,5	5,4	6,05	**52,65**	
Eaux de surface	8,4	6,5	3,05	6	7,4	4,9	7,65	5,85	**49,75**	
Forêts	7,4	6,9	3,9	4,8	5,65	7,2	4,2	4,3	**44,35**	**Moyenne vulnérabilité**
Pâturages/ Fourrages	7,15	4,5	4,9	3,9	6,35	5,35	3,95	5,7	**41,8**	
La faune sauvage	6,25	4,6	5,1	5,65	4,4	6,6	4,5	3,3	**40,4**	
Eaux souterraines	6,1	1,4	1,9	5,55	3,05	3,2	5,25	2,85	**29,3**	**Faible Vulnérabilité**
Indice d'impact global	**50,85**	**39**	**29,35**	**39,45**	**41,85**	**40,3**	**37,3**	**34,2**		

Source : Enquêtes terrains, Septembre 2025

Tableau n° 7 : Matrice globale de vulnérabilité des ressources naturelles

La matrice globale de vulnérabilité a permis d'apprécier le niveau d'influence des facteurs. La sécheresse avec un indice d'impact global de 50,85 est l'aléa le plus représentatif qui menace les ressources. Ce constat met en évidence sa forte fréquence ainsi que sa gravité sur les écosystèmes. Elle est suivie respectivement par les inondations/Pluie intense (41,85), la déforestation (40,3) et dans une moindre mesure, la croissance démographique (39,45) et les vents violents (39). Les feux de brousse s'illustrent comme le facteur le moins menaçant. Cela

pourrait être associé à leur caractère saisonnier et leur pratique relativement maîtrisée dans la zone. Cette matrice révèle en sus le degré de vulnérabilité des ressources. Ainsi, trois catégories de ressources sont mises en exergue selon leurs niveaux de vulnérabilité. D'abord, les ressources fortement vulnérables (terres agricoles, formations végétales et eaux de surface) avec un score global de criticité allant de 49 à 54. Ensuite, les ressources moyennement vulnérables dont le score varie de 40 à 44 incluent les forêts, les pâturages/fourrages et la faune sauvage. Enfin, l'eau souterraine est la moins vulnérable, avec un score global de 29,3. Cette faible vulnérabilité résulte de leur faible exposition aux principaux facteurs identifiés et la faible profondeur de la nappe liée à la proximité du lac.

3.3. Stratégie d'adaptation des populations face aux facteurs de vulnérabilité

Les populations locales vivent essentiellement de l'exploitation des ressources naturelles pour leur subsistance. Conscientes que la vulnérabilité des ressources est irréversible sur leurs moyens d'existence, les populations ne sont pas restées passives. Elles ont développé plusieurs stratégies tant individuelles que collectives basées sur des connaissances endogènes et externes pour atténuer les pressions sur les ressources. Ces stratégies ont été identifiées à partir des groupes de discussion et des observations directes sur le terrain. Ainsi leur analyse repose sur une démarche qualitative visant à décrire les pratiques et les réponses locales face à la vulnérabilité des ressources. Le tableau n° 8 propose une synthèse descriptive de ces stratégies.

Facteurs de vulnérabilité	Ressources les plus affectées	Menaces observées Par les populations	Stratégies d'adaptation des populations
Sécheresse	Terre agricole Eaux de surface Formation végétale	-Baisse des rendements agricoles, Assèchement des points d'eau -Dessèchement et mort naturelle des arbres -Modification des périodes de semis	- Adoption des techniques de CES/DRS : Zaï, cordons pierreux, demi-lune, fumure organique, jachère, Association culturale, Recours aux variété précoces ou améliorées, -Adoption de systèmes de labour : billonnage et Scarifiage, Fixation et végétalisation des berges, Développement de systèmes d'irrigation
Inondation (Pluie Intense)	Terre agricole Eau de surface	-Comblement du lac due à l'érosion hydrique -Dégradation des terres -Destruction des cultures et infrastructures sociales	-Labour par Billonnage suivants les courbes de niveau, abandon des champs submersibles -Recours aux variétés résistantes et adaptées -Aménagement des bas-fonds en zone rizicole -Gestion des eaux de ruissellements, curage et renforcement de la digue du lac.
Déforestation	Forêt Faune sauvage Formation végétale	-Déboisement -Indisponibilité des PFNL, Destruction des habitats fauniques -Perte de la biodiversité	-Reboisement, Régénération naturelle assistée, Agroforesterie -Création de bosquets villageois et forêts sacrées, Lutte contre la coupe du bois et le braconnage, Mise en défens et sécurisation foncière des aires protégées et forêts classées.
Croissance démographique	Formation végétale Terre agricole Eau de surface	-Dégradation de la végétation, Surexploitation des terres, Conflit d'usage autour des ressources	-Gestion intégrée de l'eau, sensibilisation du comité local de l'eau, diversification des sources de revenus, sécurisation des terres agricoles, adoption d'une charte foncière locale.
Vent violent	Formation végétale Forêt Terre agricole	-Chute des cultures -Déracinement d'arbres -Cassure des branches et chute de fruits non mûrs	-Brise-vents et haie vive autour des champs, -Association culturales -Labour de billonnage
Forte chaleur	Eau de surface Terre agricole Eau souterraine	Tarissement précoce des points d'eau et Stress thermique des cultures	-Paillage ou mulch des sols, associations culturales, Développement des points d'eau modernes (forages, puits à grand diamètres)

Surpâturage	Terre agricole Eaux de surface Pâturage/Fourrage	-Comblement du lac Pollution de l'eau Conflit d'usage Dégradation des terres	-Conservation du fourrage (résidus des récoltes), recours à l'élevage d'embouche, transhumance, aménagement de points d'eau pastorales et sécurisation des zones pastorales
Feux de brousse	Formation végétale -Forêts	-Destruction du couvert végétal, perte de la biodiversité faunique	-Sensibilisation et création de comité villageois de lutte contre les feux

Source : Travaux terrain, Septembre 2025

Tableau n° 8 : Matrice des stratégies d'adaptations

4. Discussion

L'étude de la dynamique environnementale autour du lac Dem a mis en évidence une modification du milieu naturel. L'approche spatiale (télédétection et SIG) a permis d'apprécier la dynamique de l'occupation du sol et les changements intervenus dans la zone entre 2000 et 2024. Cette dynamique se traduit par une transition environnementale des zones boisées vers un paysage plus anthropisé. Les résultats de l'analyse diachronique des états de surface montrent une dégradation notable des formations végétales et des ressources en eau. La forêt galerie est réduite de -17,08% ; -73,87% pour la savane arborée et -19,77 % pour la savane arbustive entre 2000 et 2024. Les surfaces en eau ont régressé de -17,15 % sur la même période. Cependant, on observe une expansion soutenue des superficies des terres agricoles, des zones bâties et des sols nus. La dégradation des formations naturelles au profit des formations anthropiques dans les zones humides a également été mise en évidence par D. TRAORE (2022, p42) et S. ROUAMBA (2024, p221) au Burkina Faso et M. MAGASSA (2021, p143) au Mali. Cependant, B. J-B ZOUNGRANA (2024, p1043) a observé une amélioration positive du couvert végétal sur la période 2000-2023 dans la zone humide du fleuve Mouhoun à l'Ouest du Burkina Faso. Cette divergence pourrait s'expliquer par les différences de contexte climatique et de pression anthropique entre les deux localités d'étude. En effet, la zone humide du Mouhoun appartient au climat nord-soudanienne et bénéficie de la présence d'espaces protégés (Forêts classées), susceptible de limiter la pression anthropique sur les formations végétales. Cette situation témoigne donc de l'impact des différentes pressions sur ces écosystèmes naturels et souligne de ce fait la nécessité d'une gestion durable de leurs ressources naturelles.

L'analyse participative de la vulnérabilité a permis de mettre en exergue la sensibilité des écosystèmes de la zone humide du lac Dem face aux différentes pressions. En effet, cette étude a montré, en premier lieu, que cet écosystème joue un rôle fondamental dans le maintien de la biodiversité et procure un nombre diversifié de ressources naturelles qui constituent le socle fondamental du développement des activités socioéconomiques des communautés qui l'habitent. Cette multifonctionnalité de ces milieux confirme leur importance socio-écologique dans les régions sahéliennes (A. ZARE, 2015, p6). Cependant, ces ressources naturelles sont fortement vulnérables face aux effets combinés des actions climatiques et anthropiques. Le résultat des matrices d'impacts selon le genre montre une différence dans l'appréciation de l'influence des facteurs de vulnérabilité sur les ressources. Cette divergence dans la perception confirme les observations formulées par J. SOMDA et *al.* (2014, p23) et J. EGAH et *al.* (2024, p20). Ces auteurs soulignent respectivement l'existence de différences genrées dans l'appréciation de l'influence des aléas climatiques sur les écosystèmes. Ces résultats démontrent, d'une part, que la vulnérabilité perçue peut être socialement influencée par le genre, les rôles et les responsabilités dans une communauté ; d'autre part, ils soulignent l'importance d'intégrer le genre dans l'évaluation de la vulnérabilité, l'adoption des stratégies

d'adaptation et la gestion durable des ressources. La sécheresse est l'aléa qui menace le plus les ressources avec un indice d'impact global de 50,85. Cela s'explique par sa probabilité d'occurrence élevée, ainsi que par la gravité de ses impacts. Ce résultat est similaire à ceux trouvés par J. SOMDA et *al*. (2014, p23) ; M. MAGASSA, (2021, p148) ; E. H. SOW et O. BATHIERY (2022, p88) ; M. ACHBAH et *al.* (2024, p75). Ces auteurs soulignent dans leurs études que la sécheresse est considérée comme le principal facteur qui impacte les écosystèmes et les moyens d'existence des populations. Trois catégories de ressources sont identifiées selon leur degré de vulnérabilité : les ressources très vulnérables, moyennement vulnérables et faiblement vulnérables. Parmi elles, les terres agricoles sont les ressources les plus menacées. Ces conclusions vont dans le même sens que celles d'E. H. SOW et O. BATHIERY (2022, p88) et M. ACHBAH et *al.* (2024, p72) qui ont montré également la forte sensibilité des systèmes agricoles face aux pressions environnementales. Ces résultats soulignent ainsi la nécessité d'orienter les efforts de planification et d'intervention sur les facteurs les plus influents et les ressources les plus vulnérables.

5. Conclusion

Cette étude a permis de caractériser la dynamique environnementale de la zone humide du lac Dem et d'évaluer la vulnérabilité de ses écosystèmes face aux pressions qui l'affectent. Le traitement des images satellitaires Landsat sur la période 2000 à 2024 met en évidence une dégradation des composantes environnementales marquée par une régression des formations végétales naturelles et des plans d'eau au détriment des espaces anthropisés, notamment les champs, les zones d'habitation et les sols nus. Cette dynamique est influencée par la combinaison de plusieurs facteurs climatiques et anthropiques qui accentue la vulnérabilité de la zone humide. L'analyse participative montre que la zone est très vulnérable à la sécheresse, à l'inondation et à la croissance démographique. Les ressources les plus affectées par ces facteurs sont les terres agricoles, les formations végétales et les ressources en eau de surface. Dans ce contexte, la préservation et la gestion durable de cette zone humide apparaissent alors comme une priorité majeure. La compréhension de la dynamique environnementale et des facteurs de vulnérabilité constitue dès lors une feuille de route pour la mise en œuvre des stratégies d'adaptation ainsi que pour les projets de gestion durable et intégrée des ressources de cet écosystème.

6. Références Bibliographiques

ACHBAH Mounia, KHATTABI Abdellatif, PRUNEAU Diane, BOUMEAZA Taieb, 2024 : « *Évaluation de la vulnérabilité des communautés de montagne face au changement climatique. Région Beni Mellal-Khénifra, Maroc* ». https://doi.org/10.4000/12pp9

BERGKAMP Ger, ORLANDO Brett, 1999, Les zones humides et les changements climatiques, 37p.

BOUREIMA Moussa, TOUGIANI Abasse, MONTES Carmen Sotelo, WEBER John C., KATKORE Boubacar, MOUNKORO Bayo, 2012, Analyse participative de la vulnérabilité et de l'adaptation aux changements climatiques : Un guide méthodologique. Nairobi, World agroforesty, centre, 21 p.

CAMPAGNE Sylvie, ROCHE Phylippe, 2018, *May the matrix be with you! Guidelines for the application of expert-based matrix approach for ecosystem services assessment and mapping*. One Ecosystem, 3, e24134.

CONVENTION RAMSAR, 2004, Guide de la Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran, 1971), 3e éd. Gland, Suisse : Secrétariat de la Convention, 108p.

CONVENTION RAMSAR, 2018, Convention de RAMSAR sur les zones humides : Perspectives mondiales des zones humides : état des zones humides à l'échelle mondiale et des services qu'elles fournissent à l'humanité, Suisse : Secrétariat de la Convention, 86p.

CONVENTION RAMSAR, 2025, Perspectives mondiales des zones humides 2025 : Valoriser, conserver, restaurer et financer les zones humides, Gland, Suisse : Secrétariat de la Convention sur les zones humides, 80p.

EGAH Janvier, Elodie DIMON, ODOU Johnson, HOUNGUE Ezékiel, BACO Mohamed Nasser, 2024 : « *Analyse genrée de la vulnérabilité et du mécanisme d'adaptation au changement climatique au Nord-Bénin* », https://doi.org/10.4000/vertigo.42852

INSTITUT NATIONALE DE LA STATISTIQUE ET DE LA DEMOGRAPHIE, 2022, Monographie de la région du Centre-Nord, 143p.

JABBAR Samir, CRUZ Christophe, 2025, Le modèle DPSIR : analyse et application dans le contexte environnemental. Université Bourgogne Europe, https://hal.science/hal-05340458v1.

MAGASSA Modibo, 2021, « *Gestion adaptative des zones humides : une approche de réduction de la vulnérabilité des populations riveraines face aux effets des changements climatiques : exemple du lac Wégnia dans la région de Koulikoro, au Mali* », Thèse de doctorat, Faculté de foresterie, de géographie, et de géomatique, Université Laval, Québec, Canada, 305 p.

MOOMAW William, CHMURA Gail DAVIES Gillian, FINLAYSON Max, MIDDLETON Beth, NATALI Susan, PERRY James, ROULET Nigel, SUTTON-GRIER Ariana, 2018, « *Wetlands in a changing climate: Science, policy and management*. Wetlands, 38(2), 183–205 » https://doi.org/10.1007/s13157-018-1023-8.

NDOUR Niokhor, NDIAYE Cheikh, SY Thierno Bachir, KANE Aliou, 2024, « *Dynamique de l'occupation du sol autour du lac de Guiers (Sénégal) de 1980 à 2020 : enjeux et perspectives pour une Gestion Intégrée des Ressources en Eau* », Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture ; 7(1), p.18- 27

ROUAMBA Songnaba, 2024, « *Potentialités et menaces sur les zones humides du barrage de Ziga au Burkina Faso* », p.219-237.

SOMDA Jaque, SAWADOGO Issa, SAVADOGO Moumouni, ZOUGMORE Robert, BATIONO B. André, MOUSSA Abdoulaye, NAKOULMA Goama, BARRY Salimana, SANOU Adja, SOME Leopold, 2014, Analyse participative de la vulnérabilité et planification de l'adaptation au changement climatique dans le Yatenga, Burkina Faso. Programme de Recherche du CGIAR sur le Changement Climatique, l'Agriculture et la Sécurité Alimentaire, 43p.

SOW El Hadji, BATHIERY Ousmane, 2022, « *Vulnérabilité de la commune de Djilor (Fatick, Sénégal) aux changements climatiques et stratégies d'adaptation des communautés* », ISSN : 2657-2664, Vol.6 : https://doi.org/10.48346/IMIST.PRSM/ajlp-gs.v5i1.28121.

TRAORE Dramane, 2022, « *Problématique de la dynamique spatiale de la dégradation des terres autour du Barrage de Samandeni* », Mémoire de Master recherche en Géographie, option Gestion des Ressources Naturelles, Université Joseph KI ZERBO, 113p.

ZARE Aida, 2015, « *Variabilité climatique et gestion des ressources naturelles dans une zone humide tropicale : une approche intégrée appliquée au cas du delta intérieur du fleuve Niger (Mali)* », Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 214 p.

ZOUNGRANA Benewindé Jean-Bosco, 2025, « *Tendance du couvert végétal dans la zone humide riveraine du fleuve Mouhoun à Boromo, Burkina Faso* », Revue Internationale du chercheur « Volume 5 : Numéro 4 », p.1037-1052.

ZOUNGRANA Benewindé Jean-Bosco, CONRAD Christopher, AMEKUDZI Leonard, THIEL Michael, DA Evariste Dapola, FORKUOR Gerald, LÖW Fabian, 2015: « *Multi-Temporal Landsat Images and Ancillary Data for Land Use/Cover Change LULCC Detection in the Southwest of Burkina Faso, West Africa* », Remote Sensing, 7, 9, p.12076-12102 www.mdpi.com/journal/remotesensing.