



TAUX D'EXPLOITATION ET DURABILITE DE LA RESSOURCE EN EAU DES AQUIFERES ALLUVIAUX DU KOU ET DE KARFIGUELA

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES /

AEP-EAUX SOUTERRAINES

Présenté et soutenu publiquement le 21/07/2015 par

Djamilatou Mody DAO

Travaux dirigés par : Nestor Fiacre COMPAORE

Coordonnateur du projet PADI-BF 101

Dr Mahamadou KOITA

Enseignant chercheur au GCH de la

Fondation 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Angelbert BIAOU

Membres et correcteurs : Dr Mahamadou KOITA

Dr Dial NIANG

Dr Fowe TAZEN

Promotion [2014/2015]

DEDICACE

Je rends grâce à **DIEU**, l'Omniscient et l'Omnipotent, pour chaque bribe de ce mémoire qui n'aurait jamais pu voir le jour sans Sa miséricorde. Louanges à Lui, le Détenteur des plus beaux noms et attributs.



Je dédie ce mémoire ... ✍

- ✚ **A Feu DAO Baba Mody, mon père chéri**, pour tout l'amour et les efforts déployés pour mon éducation et mon instruction dont il n'a pas pu voir l'aboutissement. Personne ne meurt lorsque son souvenir reste à jamais gravé dans nos cœurs. Que DIEU, gloire et pureté à LUI, t'agrée dans son Paradis. Amen.
- ✚ **A DAO née DIABY Safiatou, ma douce mère** pour son abnégation, sa tendresse et ses conseils. Je t'aime Maman.
- ✚ **A DAO Chérifatou Mody, ma petite sœur et DAO Iskandhar, mon petit frère.** Je vous embrasse.
- ✚ **A mon oncle DAO Boubacar**
- ✚ **A ma tante OUEDRAOGO née COULIDIATY Armande** et son entourage
- ✚ **A mes grands-parents DIABY Fatogoma, feu DIABY née DIALLO Kadidjatou, DAO Tiémoko et feu DAO née KONATE Mariam**
- ✚ **A mon futur époux BADO Ahmed Bagnini** et ses proches
- ✚ **Au reste de ma famille paternelle et maternelle et de mes amis** qui m'ont soutenue

REMERCIEMENTS

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il apparaît opportun de commencer ce document par des remerciements, d'une part à toute l'équipe pédagogique de 2iE et les intervenants professionnels responsables de la formation en Master Infrastructures et Réseaux Hydrauliques, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

D'autre part, je remercie particulièrement mon maître de stage, **Mr Nestor Fiacre COMPAORE**, qui m'a formée et accompagnée tout au long de cette période de contact avec le milieu professionnel avec beaucoup de patience et de pédagogie. Mes remerciements s'adressent aussi au **Dr Mahamadou KOITA**, mon encadreur interne, dont les précieux conseils et critiques ont guidé la rédaction du présent mémoire.

Par ailleurs, j'aimerais remercier l'ensemble de l'équipe du PADI- BF 101 notamment **Mr KAM Ahmed, Mr FOFANA Yacouba, Mr BADO Alfred**, pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée au cours de cette période de stage.

Merci à mon promotionnaire et ami **NDJOMO Tsimi Pierrick**, avec lequel j'ai partagé maintes craintes et interrogations ayant trait à la rédaction de nos mémoires respectifs.

Ma gratitude va enfin à l'endroit de tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin de cycle master et qui n'ont pu être cités ici.

RESUME

Les nappes alluviales des régions des Hauts Bassins et des Cascades au Burkina Faso sont de plus en plus sollicitées pour les besoins de l'agriculture irriguée. Malgré leur importance capitale pour les exploitants agricoles, le taux d'exploitation de ces nappes et leurs stocks d'eau sont inconnus. Un travail de recherche portant sur le taux d'exploitation des nappes des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla a donc été initié dans le cadre d'une meilleure gestion des ressources en eau souterraine du Sud-Ouest du Burkina Faso. Le calcul du taux d'exploitation exige l'évaluation des prélèvements qui ont été déterminés par deux méthodes dont la première est basée sur la quantification des volumes prélevés et la seconde est basée sur les besoins en eau des cultures. La recharge annuelle, qui a été estimée par la méthode du bilan de THORNTHWAITE et celle des fluctuations piézométriques constitue aussi un paramètre important de la formule de calcul du taux d'exploitation. Les hauteurs d'eau rechargées obtenues, respectivement égales à 26,13 mm/ an et 40,54 mm/an pour la plaine alluviale du Kou et celle de Karfiguéla sont acceptables au regard des données disponibles. L'étude a montré que la nappe alluviale du Kou, avec un taux d'exploitation égal à 278,72% est surexploitée par des prélèvements excessifs et que sa durabilité est en péril. La nappe alluviale de Karfiguéla,, dont le taux d'exploitation est de 10,60% est quant à elle faiblement utilisée et est capable de compenser largement les prélèvements d'eau en son sein par sa recharge annuelle.

Mots Clés :

1 – Nappe alluviale

2 – Taux d'exploitation

3 - Prélèvements

4 - Recharge

5 - Durabilité

ABSTRACT

Groundwater of the alluvial plains of Hauts Bassins and Cascades regions in Burkina Faso is increasingly requested for the needs of irrigation. Despite the fact that this groundwater has a crucial importance for farmers, its rate of exploitation and water stocks that alluvial aquifers contain are unknown. Researches on the values of the rates of exploitation in the alluvial plains of Kou and Karfiguéla were thus initiated to enable a better management of groundwater in the South-West of Burkina Faso. The calculation of the rate of exploitation requires evaluation of water withdrawals that have been determined by two methods: one is based on the quantification of drawn water volumes and the other one on the water needs of crops. The annual recharge, estimated by Thornthwaite balance method and piezometric fluctuations method is also necessary to find the rate of exploitation. The values of recharge, which are equal to 26, 13 mm/ year for the alluvial plain of Kou and 49, 54 mm/ year the alluvial plain of Karfiguella., are acceptable in light of available data relating to these two alluvial plains. The study showed that the groundwater of Kou alluvial aquifer which rate of exploitation is equal to 278, 72 % is overexploited and its sustainability is at risk. But the groundwater of alluvial aquifer of Karfiguéla, with a rate of exploitation of 10,60 % is poorly used and it can largely compensate water withdrawals by its annual recharge.

Key words:

1 – Alluvial plain

2 – Rate of exploitation

3 – Water withdrawals

4 - Recharge

5 – Sustainability

LISTE DES ABREVIATIONS

APEFE : Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger

CSLP : Cadre Stratégique de Lutte contre la Pauvreté

DADI : Direction du Développement de l'Irrigation du Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique

DCRM : Direction de la Climatologie et du Réseau Météorologique

DGADI : Direction Générale des Aménagements et du Développement de l'Irrigation

DRARHASA : Direction Régionale de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques, de l'Assainissement et de la Sécurité Alimentaire

DSDR : Document de Stratégie de Développement Rural

GE Eau : projet de renforcement structurel de la gestion des ressources en eau pour l'agriculture irriguée du Kou

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

INSD : Institut National de la Statistique et de la Démographie

PADI : Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation

PAGIRE : Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau

SDR : Stratégie de Développement Rural

SNDDAI : Stratégie Nationale de Développement Durable de l'Agriculture Irriguée

SNSA : Stratégie Nationale de Sécurité Alimentaire

SOGREAH : Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques

WBI : Wallonie - Bruxelles International

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX.....	8
LISTE DES FIGURES	9
AVANT PROPOS.....	10
INTRODUCTION.....	1
I. PRESENTATION DE LA THEMATIQUE D'ETUDE.....	2
I.1 Objectifs et résultats attendus de l'étude	2
I.2 Organisation du rapport	3
II. GENERALITES.....	4
II.1 Notion de plaine alluviale.....	4
II.2 Présentation des zones d'étude	6
II.2.1 Situation géographique des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla	6
II.2.2 Climat des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla	8
II.2.3 Relief et pédologie des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla.....	9
II.2.4 Végétation des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla.....	10
II.2.5 Occupation des terres des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla.....	13
II.2.6 Contexte hydrographique des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla	14
II.2.7 Géologie des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla.....	18
II.2.8 Contexte hydrogéologique des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla.....	23
III. MATERIEL ET METHODES.....	28
III.1 Approche de la thématique d'étude	28
III.2 Calcul du taux d'exploitation.....	28
III.2.1 Estimation des prélèvements	29
III.2.2 Evaluation de la recharge	41
III.3 Calcul des réserves d'eau souterraine	49
III.4 Bases des conclusions sur la durabilité des nappes alluviales	50
VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	52
IV.1 Taux d'exploitation.....	52
IV.1.1 Estimation des prélèvements	52
IV.1.3 Evaluation de la recharge	65
IV.1.4 Taux d'exploitation des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla.....	64
IV.2 Réserves en eau exploitable	66

VI.2.1 Réserve en eau exploitable de l'aquifère alluvial du Kou	66
VI.2.2 Réserve en eau exploitable de l'aquifère alluvial de Karfiguéla	66
V. DISCUSSIONS SUR LA DURABILITE DES RESSOURCES EN EAU	67
CONCLUSION.....	69
BIBLIOGRAPHIE	70
Annexes.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Volumes prélevés calculés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés dans la plaine alluviale du Kou.....	53
Tableau 2 : Volumes prélevés calculés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés dans la plaine alluviale de Karfiguéla.....	54
Tableau 3: Valeurs calculées de l'évapotranspiration maximale en fonction des cultures dans la plaine alluviale du Kou.....	57
Tableau 4: Valeurs calculées de l'évapotranspiration maximale en fonction des cultures dans la plaine alluviale de Karfiguéla.....	58
Tableau 5: Valeurs de la réserve utile RU du sol en fonction du groupe de culture.....	58
Tableau 6: Superficies totales dédiées à chaque groupe de culture.....	58
Tableau 7: Valeurs de l'efficience de distribution pour l'irrigation gravitaire.....	59
Tableau 8: Valeurs de l'efficience d'application pour l'irrigation gravitaire.....	59
Tableau 9: Volumes prélevés estimés par la méthode d'évaluation des besoins en eau des cultures dans la plaine alluviale du Kou.....	60
Tableau 10 : Volumes prélevés estimés par la méthode d'évaluation des besoins en eau des cultures dans la plaine alluviale de Karfiguéla.....	61
Tableau 11 : Valeurs de hauteurs de pluie efficace obtenues par la méthode du bilan de THORNTHWAITE pour l'aquifère alluvial du Kou.....	66
Tableau 12 : Valeurs de hauteurs de pluie efficace obtenues par la méthode du bilan de THORNTHWAITE pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla.....	67
Tableau 13: Valeurs de hauteurs annuelles d'eau rechargées calculées par la méthode des fluctuations piézométriques dans la plaine alluviale du Kou.....	73
Tableau 14: Valeurs de hauteurs annuelles d'eau rechargées calculées par la méthode des fluctuations piézométriques dans la plaine alluviale de Karfiguéla.....	76

LISTE DES FIGURES

<u>Figure 1</u> : Schéma d'une plaine alluviale type avec ses différentes unités.....	5
<u>Figure 2</u> : Carte de localisation de la plaine alluviale du Kou	6
<u>Figure 3</u> : Carte de localisation de la plaine alluviale de Karfiguéla	7
<u>Figure 4</u> : Carte de la végétation de la plaine alluviale du Kou	11
<u>Figure 5</u> : Carte de la végétation de la plaine alluviale de Karfiguéla	13
<u>Figure 6</u> : Carte géologique de la plaine alluviale du Kou.....	19
<u>Figure 7</u> : Carte géologique de la plaine alluviale de Karfiguéla.....	22
<u>Figure 8</u> : Carte de l'hydrographie du bassin versant du Kou	Erreur ! Signet non défini.
<u>Figure 9</u> : Carte de l'hydrographie de la plaine alluviale de Karfiguéla.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 10: Diagramme circulaire 3D des pourcentages par localités (de la plaine alluviale du Kou) du volume total prélevé calculé par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés	53
Figure 11 : Diagramme circulaire 3D des pourcentages par localités (de la plaine alluviale du Kou) du volume total prélevé calculé par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés	55
Figure 13 Courbes comparatives des valeurs de l'évapotranspiration de référence dans la plaine alluviale du Kou	Erreur ! Signet non défini.
Figure 12: Courbes comparatives des valeurs de l'évapotranspiration de référence dans la plaine alluviale de Karfiguéla	Erreur ! Signet non défini.
Figure 14: Diagramme circulaire 3D montrant la répartition des volumes bruts d'eau d'irrigation en fonction des cultures dans la plaine alluviale du Kou	61
Figure 15: Diagramme circulaire 3D montrant la répartition des volumes bruts d'eau d'irrigation en fonction des cultures dans la plaine alluviale de Karfiguéla.....	63
Figure 16: Histogramme groupé comparant les valeurs de volumes prélevés obtenus par les deux méthodes d'estimation	64
Figure 17: Hydrogramme des crues de la plaine alluviale du Kou	65

AVANT PROPOS

Le Burkina Faso a entrepris depuis le milieu des années 1990 avec l'appui de ses partenaires au développement, un vaste processus de réforme du cadre institutionnel du secteur de l'eau qui consacre désormais la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) comme voie de résolution des questions liées à l'eau.

Les cadres stratégiques sectoriels en rapport avec la thématique de la présente étude sont nombreux. En effet, en 2000, le Gouvernement Burkinabé a adopté le Cadre Stratégique de Lutte contre la Pauvreté (CSLP) comme cadre de référence de toutes les interventions de l'Etat. La mise en œuvre du CSLP dans le secteur du développement rural s'est traduite par l'adoption en 2003 de la Stratégie Nationale de Développement Durable de l'Agriculture Irriguée (SNDDAI) et en janvier 2004 de la Stratégie de Développement Rural (SDR) dont l'objectif à l'horizon 2015 est d'assurer une croissance soutenue du secteur rural en vue de contribuer à la lutte contre la pauvreté, au renforcement de la sécurité alimentaire et à la promotion d'un développement durable. Par ailleurs, la Stratégie Nationale de Sécurité Alimentaire (SNSA), en cohérence avec le CSLP, s'est donnée pour finalité de construire à l'horizon 2015, les conditions d'une sécurité alimentaire durable et de contribuer structurellement à réduire les inégalités et la pauvreté au Burkina Faso.

La SNDDAI, dont l'objectif général est de faire jouer à l'irrigation un rôle significatif pour l'accroissement et la sécurisation de la production agricole, l'augmentation de la valeur ajoutée, l'amélioration de l'emploi et des revenus en milieu rural ainsi que la préservation des ressources naturelles et du capital productif s'inscrit par conséquent dans la SNSA, la SDR et le programme cadre de développement rural.

Un projet dénommé « Projet d'appui au Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique (MAH) pour la mise en œuvre de la politique nationale de développement de l'agriculture irriguée », promu par le MAH en collaboration avec l'Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger (APEFE) et Wallonie Bruxelles International (WBI) fut réalisé au cours des années 2008-2010. Les années 2011-2013 ont vu un renouvellement de l'accompagnement de l'APEFE et de WBI au MAH à travers la mise en place d'un programme plus vaste axé sur la Recherche-Développement et le renforcement des compétences, le «Programme d'Appui au Développement de l'Agriculture Irriguée (PADI)».

Les résultats du PADI s'inscrivent dans la SNDDAI qui a pour objectifs spécifiques de :

- Contribuer à la satisfaction des besoins alimentaires et de la petite industrie locale à partir des produits agricoles, y compris ceux de l'élevage et de la pêche.
- Contribuer à la lutte contre la pauvreté à travers l'accroissement de l'emploi et des revenus de toutes les couches de la population. Les technologies à développer seront adaptées aux types d'irrigants, à leurs modes d'organisation et à leur niveau de vulnérabilité.
- Promouvoir une utilisation durable des ressources naturelles en respectant l'environnement.
- Contribuer à l'équilibre entre les différentes régions du Burkina Faso, certaines étant plus propices que d'autres pour les cultures pluviales ou de bas-fonds.
- Respecter les accords internationaux, aussi bien sur l'utilisation des ressources naturelles que pour les produits agricoles.
- Augmenter et diversifier les exportations pour équilibrer la balance commerciale du Burkina Faso.

Le programme PADI démarré en 2011 prit fin en décembre 2013. Mais au regard des acquis importants enregistrés par le programme, des quelques retards pris dans la mise en œuvre de certaines activités planifiées dans le cadre de la Recherche-Développement, l'APEFE et WBI, ont marqué leur accord pour la reconduction du Programme pour une phase de trois ans à partir du début de l'année 2014 (soit de 2014 à 2016) qui sera dénommée PADI Phase II.

Le PADI Phase I et le PADI Phase II regroupent quatre projets :

- Le projet PADI-BF101, branche du programme PADI qui promeut le développement de l'agriculture irriguée par les eaux souterraines et qui constitue le cadre pédagogique de ce stage de fin d'études.
- Le projet PADI-BF102, branche du programme PADI qui promeut le développement de l'agriculture irriguée par les eaux de surface.
- Le projet PADI-BF103, branche du programme PADI qui promeut le développement de l'agriculture irriguée par l'étude des phénomènes d'ensablement des barrages.
- Le projet PADI-BF104, branche du PADI qui promeut le développement de l'agriculture irriguée par le renforcement des capacités des ressources humaines.

INTRODUCTION

Situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest, le Burkina Faso est un pays enclavé et sahélien couvrant environ 274 000 Km². Sa population était estimée en 2010 à 15 370 000 habitants avec un taux de croissance annuel de 3.1% (INSD, 2010).

L'économie Burkinabè est principalement basée sur le secteur primaire. En effet, ce secteur fournit près de 80 % des recettes du pays liées aux exportations, occupe environ 86 % de la population active et contribue pour 40 % au Produit Intérieur Brut dont 30.7 % pour le seul sous-secteur de l'agriculture (MAH,2010). En dépit de son importance relative pour l'économie, l'agriculture Burkinabè est confrontée aux aléas climatiques qui entraînent de fortes fluctuations de la production agricole d'une année à l'autre. C'est pourquoi les gouvernements successifs du Burkina Faso ont engagé de fortes actions en faveur du domaine de l'irrigation. En effet, l'irrigation apparaît comme une des alternatives pour minimiser l'influence des facteurs climatiques limitants de l'agriculture pluviale traditionnelle Burkinabè à travers une production supplémentaire en saison sèche et une sécurisation de la production hivernale par des compléments d'eau.

La plupart des cours d'eau du Burkina Faso tarissant en saison sèche, l'exploitation des cours d'eau pérennes et des eaux souterraines pour l'irrigation serait judicieuse. Les plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla, localisées respectivement dans les régions des Hauts-Bassins et des Cascades sont des zones à fortes potentialités aquifères, et de ce fait propices à la pratique de l'agriculture irriguée en saison sèche. Les nappes alluviales y sont facilement accessibles et utilisées par de nombreux exploitants agricoles. Pourtant, le taux d'exploitation de ces nappes alluviales n'est pas encore connu. C'est dans le cadre de la mise en place d'une gestion durable des ressources en eau souterraine des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla qu'une étude portant sur leurs taux d'exploitation et leur durabilité a été initiée.

La détermination du taux d'exploitation et de la durabilité de la ressource en eau souterraine des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla nécessite entre autres la connaissance de leur recharge annuelle, des volumes d'eau prélevés en leur sein, des réserves en eau renfermées par ces aquifères.

I. PRESENTATION DE LA THEMATIQUE D'ETUDE

La thématique TAUX D'EXPLOITATION ET DURABILITE DE LA RESSOURCE EN EAU DES AQUIFERES ALLUVIAUX DU KOU ET DE KARFIGUELA est rattachée à différents objectifs et plusieurs résultats sont attendus à l'issue de cette étude.

I.1 Objectifs et résultats attendus de l'étude

L'**objectif général** de cette étude est la **connaissance du taux d'exploitation des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla et de la durabilité de la ressource en eau contenue dans ces aquifères.**

Les **objectifs spécifiques** liés à la réalisation de cet objectif général sont :

- La connaissance des **réserves en eau des aquifères alluviaux** du Kou et de Karfiguéla
- La connaissance de la **recharge des aquifères alluviaux** du Kou et de Karfiguéla
- La connaissance des **volumes prélevés dans les aquifères alluviaux** du Kou et de Karfiguéla

Au terme de l'étude du taux d'exploitation et de la durabilité des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla, les résultats suivants devraient être atteints :

- les **stocks d'eau des aquifères alluviaux** du Kou et de Karfiguéla sont évalués
- les **volumes annuels d'eau agricole** prélevée dans les aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla sont évalués
- les **volumes annuels d'eau infiltrée** dans les aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla sont évalués
- les **taux d'exploitation** des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla ont été calculés
- les **durabilités des ressources en eau** des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla sont déterminées

I.2 Organisation du rapport

Après l'introduction générale qui clarifie le contexte général ainsi que la problématique, ce rapport est subdivisé en cinq parties :

- La partie I qui contient la présentation de la thématique d'étude en termes d'objectif général et d'objectifs spécifiques
- La partie II concerne les généralités sur la notion de plaine alluviale ainsi que des informations sur la géologie, le climat, la végétation, l'occupation des terres, l'hydrographie et le contexte hydrogéologique des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla.
- La partie III expose le matériel et les méthodes de calcul du taux d'exploitation et de la réserve en eau souterraine des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla. En outre, les différentes hypothèses liées à l'application des méthodes de calcul y sont énoncées.
- La partie IV présente les résultats obtenus à l'issue de l'application des méthodes présentées. Des interprétations de ces résultats y sont aussi effectuées.
- La partie V porte sur les analyses et discussions sur la durabilité des nappes alluviales du Kou et de Karfiguéla. Par ailleurs, des recommandations pour une gestion durable des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla y figurent.

II. GENERALITES

II.1 Notion de plaine alluviale

Une plaine alluviale est une surface topographique à faible dénivelée, située en fond de vallée, constituée d'alluvions (galets, graviers, sables, argiles, limons...) et assimilable à la zone inondable d'un cours d'eau (SAURET, 2013). Ce cours d'eau coule généralement sur ses alluvions (grains fins ou grossiers alternativement déposés ou repris par le courant) qui recouvrent le substratum rocheux formé d'une roche dure ou bien d'une roche plus ou moins tendre (schistes, grés, marnes...). Les rives du cours d'eau d'une plaine alluviale sont bordées par une formation végétale naturelle appelée ripisylve. L'étendue de cette formation végétale est variable car elle peut être limitée à un cordon arboré étroit qui longe le chenal du cours d'eau ou bien elle peut être une véritable forêt, riche en termes de diversité floristique, qui peut s'étendre sur plusieurs dizaines voire centaines de mètres de part et d'autre du chenal du cours d'eau.

Les principales unités hydro géomorphologiques d'une plaine alluviale sont le lit mineur et le lit majeur (Cf. Figure 1).

Le lit mineur (ou lit ordinaire) d'un cours d'eau est l'espace occupé par l'écoulement pour des crues courantes et est constitué d'un ou plusieurs chenaux bien marqués. On y observe parfois des bancs de sable, de gravier ou de galets qui émergent lors de la période des plus basses eaux (étiage).

Le lit majeur d'un cours d'eau est son champ d'inondation ; ces parties extrêmes ne sont mises en eau que pour des crues exceptionnelles. Les vitesses d'écoulement y sont faibles et les particules les plus fines (limons, argiles) se déposent par sédimentation. A l'intérieur du champ d'inondation, des terrasses alluviales forment parfois des niveaux étagés dont la submersion est de moins en moins fréquente lorsqu'on s'élève au-dessus du lit ordinaire. On distingue donc quelquefois un lit majeur ordinaire, encore appelé **lit moyen (ou lit intermédiaire)** par certains auteurs, submergé fréquemment voire annuellement, et un lit majeur exceptionnel, submergé plus rarement, par exemple seulement par des crues décennales ou plus fortes (BIAOU, 2014).

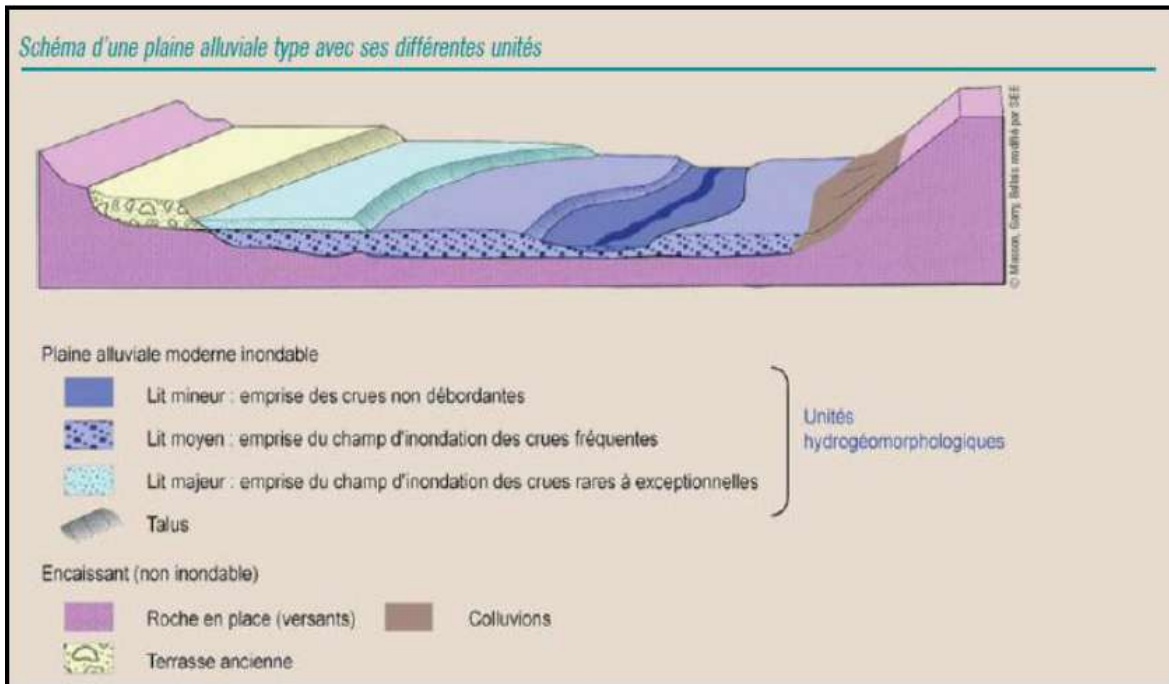


Figure 1: Schéma d'une plaine alluviale type avec ses différentes unités

Ainsi, la plaine alluviale est modelée par le passage à répétitions de crues de différentes intensités. La morphologie du lit mineur d'un cours d'eau est, elle, régie par des phénomènes hydrologiques (débits morphogènes parvenus depuis le bassin versant), naturels (variables de contrôle et de réponse) et anthropiques (dérivations, barrages, prélèvements) plus complexes qui remanient fréquemment l'équilibre dynamique de ce cours d'eau.

Par ailleurs, l'aquifère de plaine alluviale, lorsqu'il existe reste la source d'eau souterraine la plus accessible car il fournit des quantités d'eau importantes à faible profondeur. En effet, les matériaux des nappes alluviales, contrairement aux autres aquifères plus profonds, sont faciles à creuser, même avec des moyens rudimentaires (pelle, pioche...). L'eau contenue dans les aquifères alluviaux et les aquifères souterrains profonds forme dans une région à potentialité aquifère l'ensemble des eaux souterraines que l'on peut exploiter pour des besoins divers (eau de consommation, eau agricole, eau industrielle par exemple).

II.2 Présentation des zones d'étude

Les zones d'étude sont situées dans la partie occidentale du Burkina Faso et sont composées de deux sites d'intervention du projet PADI-BF101 : la plaine alluviale du Kou et celle de Karfiguéla.

II.2.1 Situation géographique des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla

✚ Situation géographique de la plaine alluviale du Kou

La plaine alluviale du Kou est située dans la province du Houet entre les longitudes 4°28'0"W et 4°23'0"W et les latitudes 11°20'0"N et 11°11'0"N (Cf. Figure 2). Elle s'étend sur environ 31.625 km de long et couvre une superficie de 72.017 km². De plus, la plaine alluviale du Kou est accessible à partir de la capitale du Burkina Faso par la route nationale RN1 qui relie Ouagadougou à Bobo Dioulasso puis par la route nationale RN9 qui relie Bobo Dioulasso à Faramana jusqu'à Bama dans sa partie aval et par une route départementale qui relie Bobo Dioulasso à Banzon dans sa partie amont.

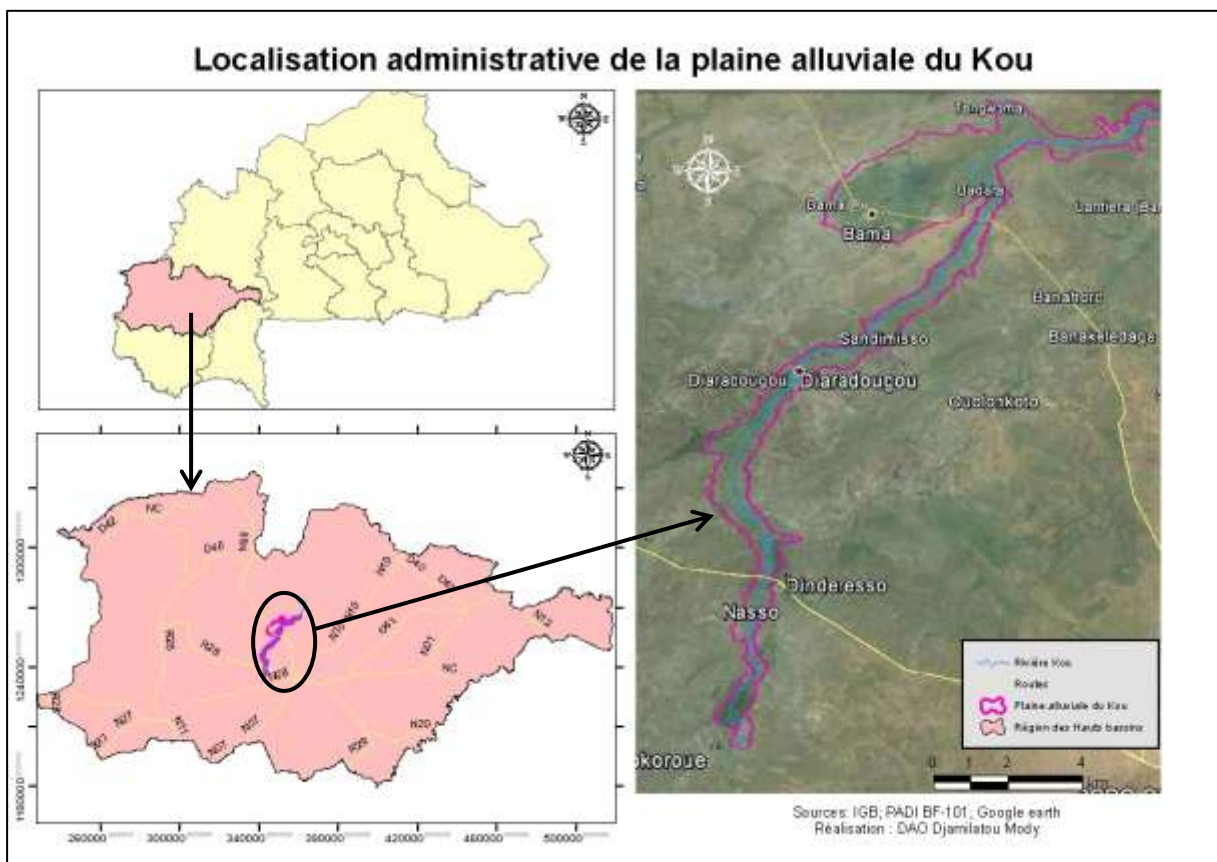


Figure 2: Situation géographique de la plaine alluviale du Kou

✚ Situation géographique de la plaine alluviale de Karfiguéla

Située dans la région des cascades à l'extrême Sud-ouest du Burkina Faso, et à environ 10 km au Nord-Ouest du chef-lieu de la province de la Comoé, Banfora, la plaine alluviale de Karfiguéla se situe entre les longitudes $4^{\circ}50'0''$ W et $4^{\circ}42'0''$ W et les latitudes $10^{\circ}44'0''$ N et $10^{\circ}28'0''$ N (Cf. Figure 3). Elle couvre une superficie de 46,496 km² et s'étend sur 28 km de long. En outre la plaine alluviale de Karfiguéla abrite les localités de Karfiguéla, Tengréla, Nafona, Lémouroudougou, Kribina-Lèna, Tiékouna, Niankar, Bounouna, Kossara, Diarabakoko, Sitiéna et Banfora. Elle est accessible à partir de la capitale du Burkina Faso par la route nationale RN1 qui relie Ouagadougou à Bobo Dioulasso et Banfora puis par la piste rurale reliant Banfora à Karfiguéla de praticabilité difficile en saison hivernale.

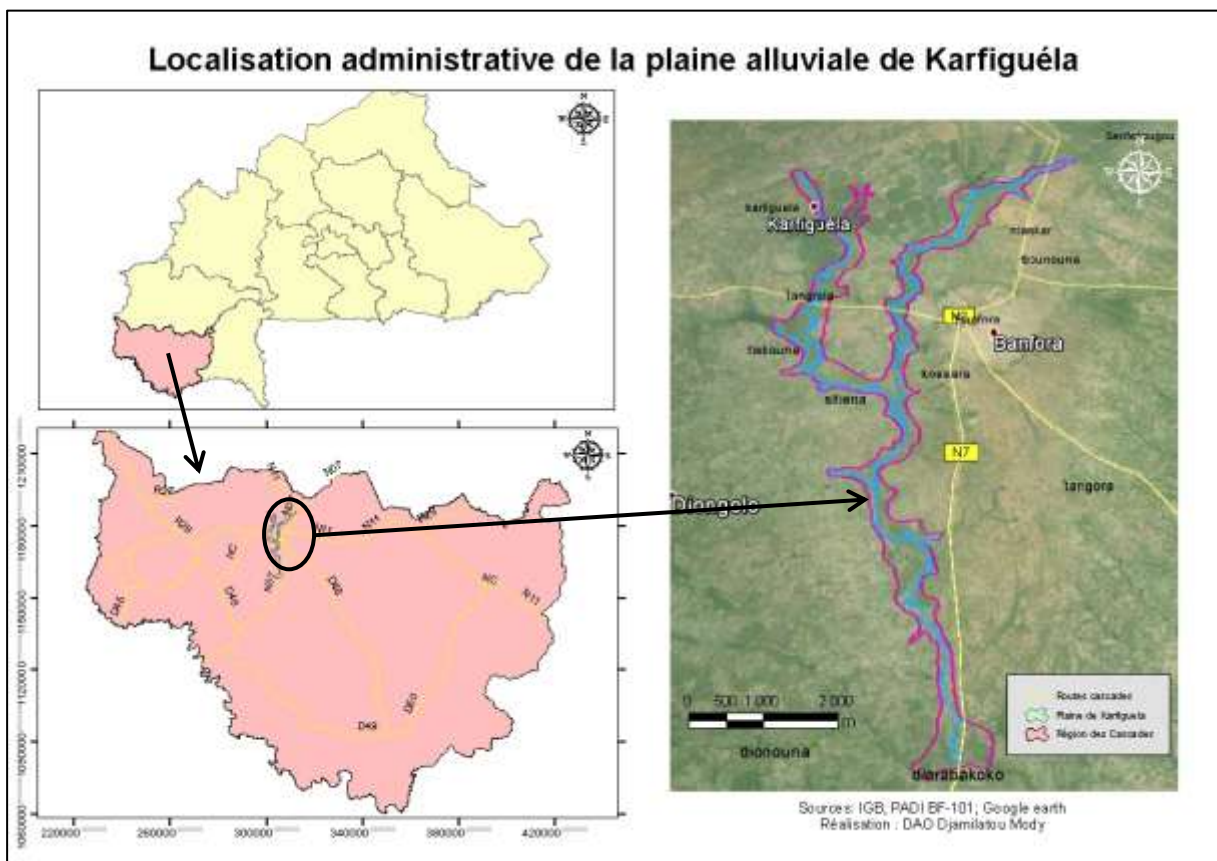


Figure 3: Situation géographique de la plaine alluviale de Karfiguéla

II.2.2 Climat des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla

Situées dans la zone soudanienne, les plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla font respectivement partie du bassin versant du Kou et du bassin versant de la Comoé dont les climats sont caractérisés par l'alternance de deux saisons due à l'influence du Front Inter Tropical (FIT):

- Une saison sèche qui dure environ 8 mois (Octobre à mai)
- Une saison pluvieuse qui dure environ 4 mois (juin à septembre)

Les principaux facteurs influençant le climat sont la pluviométrie, les températures, les vents, le rayonnement solaire, l'hygrométrie et l'évapotranspiration.

Climat de la plaine alluviale du Kou

La particularité climatique et topographique de la région des Hauts Bassins, fait du bassin du Kou un véritable « château d'eau ». C'est dans cette région que les principaux fleuves (le Mouhoun, le Banifing et le Tuy (Grand Balé)) du Burkina prennent leur source (MAMADOU, 2006). Les pluviométries annuelles varient entre 800 mm et 1200 mm (SAURET, 2008). La température est maximale de mars à mai (Température moyenne maximale : 37°C) et minimale en janvier et décembre (Température moyenne minimale : 20°C). L'humidité relative de l'air est très faible en saison sèche (20% à 40%) tandis qu'en saison des pluies elle peut atteindre 70% à 80%. La durée moyenne d'ensoleillement (de l'année 1981 à l'année 2010) est de 7 h 30 mn.

Climat de la plaine alluviale de Karfiguéla

Dans la plaine alluviale de Karfiguéla, la pluviométrie moyenne annuelle des trente-trois dernières années (1981 à 2014) s'élève à 1034,833 mm. La somme des précipitations mensuelles de 2014 est égale à 1240,5 mm dont 258,9 mm relevés en Août, le mois le plus pluvieux. Les températures moyennes annuelles sont comprises entre 17°C et 36°C, soit une amplitude thermique de 19° C (GIRE, 2001). L'humidité relative de l'air est variable en

saison sèche (20% à 80%) tandis qu'en saison des pluies elle peut atteindre une moyenne de 94,04%.

II.2.3 Relief et pédologie des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla

Relief et pédologie de la plaine alluviale du Kou

Le relief de la plaine alluviale du Kou se caractérise par des altitudes comprises entre 315 m et 355 m et des pentes de l'ordre de 2% (PADI, 2014). La plupart des sols rencontrés dans la plaine alluviale du Kou sont de texture argilo limoneuse.

Cinq types de sols sont répertoriés dans le bassin du Kou (PADI, 2014) :

- les sols peu évolués d'érosion sur matériaux gravillonnaires
- les vertisols sur alluvions ou matériaux argileux
- les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériaux sablo-argileux, argilo-sableux,
- les sols ferralitiques
- les sols hydromorphes

De plus, selon leur profondeur (SAURET, 2013) on distingue :

- **les sols profonds (> 100 cm)** constitués de :
 - Sols argilo-sableux en surface, argileux en profondeur,
 - Sols limono-argileux en surface, argileux en profondeur,
 - Sols sableux en surface, argileux en profondeur

- **les sols peu profonds (< 40 cm)** : ce sont les sols gravillonnaires.

Relief et pédologie de la plaine alluviale du Karfiguéla

Les sols généralement rencontrés dans le bassin de la Comoé sont de quatre types (PADI, 2014) :

- les sols kaolinitiques, du type ferrugineux tropical de couleur rouge ocre, qui assurent un bon drainage
- les sols montmorillonitiques de couleur brune sur lesquels le drainage est imparfait
- les sols argilo-sableux qui assurent un drainage moyen ;
- les sols hydromorphes inondés en saison humide.

Par ailleurs, selon les critères de profondeur et de position physiographique, la région des Cascades se compose de divers types de sols. Au niveau de la plaine de Karfiguéla, les sols sont généralement profonds de type ferrugineux tropical (PADI, 2014). Les logs des micros piézomètres résumés dans le rapport de mise en place du réseau de surveillance de la plaine alluviale de Karfiguéla montrent que la plupart des sols de la plaine sont de texture argilo-limoneuse en surface. Ces sols sont en majorité légers et sensibles à l'érosion qui est accélérée par l'action anthropique (les systèmes de production extensifs ; la coupe abusive du bois de chauffe; l'occupation anarchique des terres).

II.2.4 Végétation des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla

Végétation du bassin versant du Kou

D'après des études faites par TRAORE en 2007 et SAURET en 2008, la végétation du bassin du Kou est composée de divers types de formations végétales. Il existe une forme de végétation spécifique au milieu aquatique des lits ordinaires des cours d'eau tels que le Kou, dominée par *Nymphaea lotus* et *Potamogeton octandrus*. La ripisylve de ces cours d'eau est formée par des forêts galeries constituées de plus de 250 essences dont une grande partie joue un rôle important dans la pharmacopée locale.

De façon plus générale, la végétation dans le bassin versant du Kou est caractérisée par le grand développement d'un tapis graminéen continu à prédominance de savane et de forêts claires (Cf. Figure 4). Les espèces ligneuses sont très répandues ; des îlots de forêts (forêts classées des sources du Kou, de Koulina et de Dinderesso) et quelques surfaces reboisées par les services forestiers sont aussi présents dans le bassin. Ces forêts d'une superficie de 10.400ha constituent un milieu protecteur pour les eaux souterraines car leur coefficient de ruissellement encore faible favorise l'infiltration de l'eau dans la nappe

alluviale. La strate arborée de la végétation est constituée de *Butyrespermum Parkii*, *Parkia Biglobosa*, *Bombax Costatum*, et d'*Elacis Guinensis*. A côté de ces espèces naturelles, les services des eaux et forêts et de l'environnement ont introduit des espèces exotiques comme le teck, l'eucalyptus, le gmélinas, le neem... Les zones inondables du bassin sont très peu fournies en arbres.

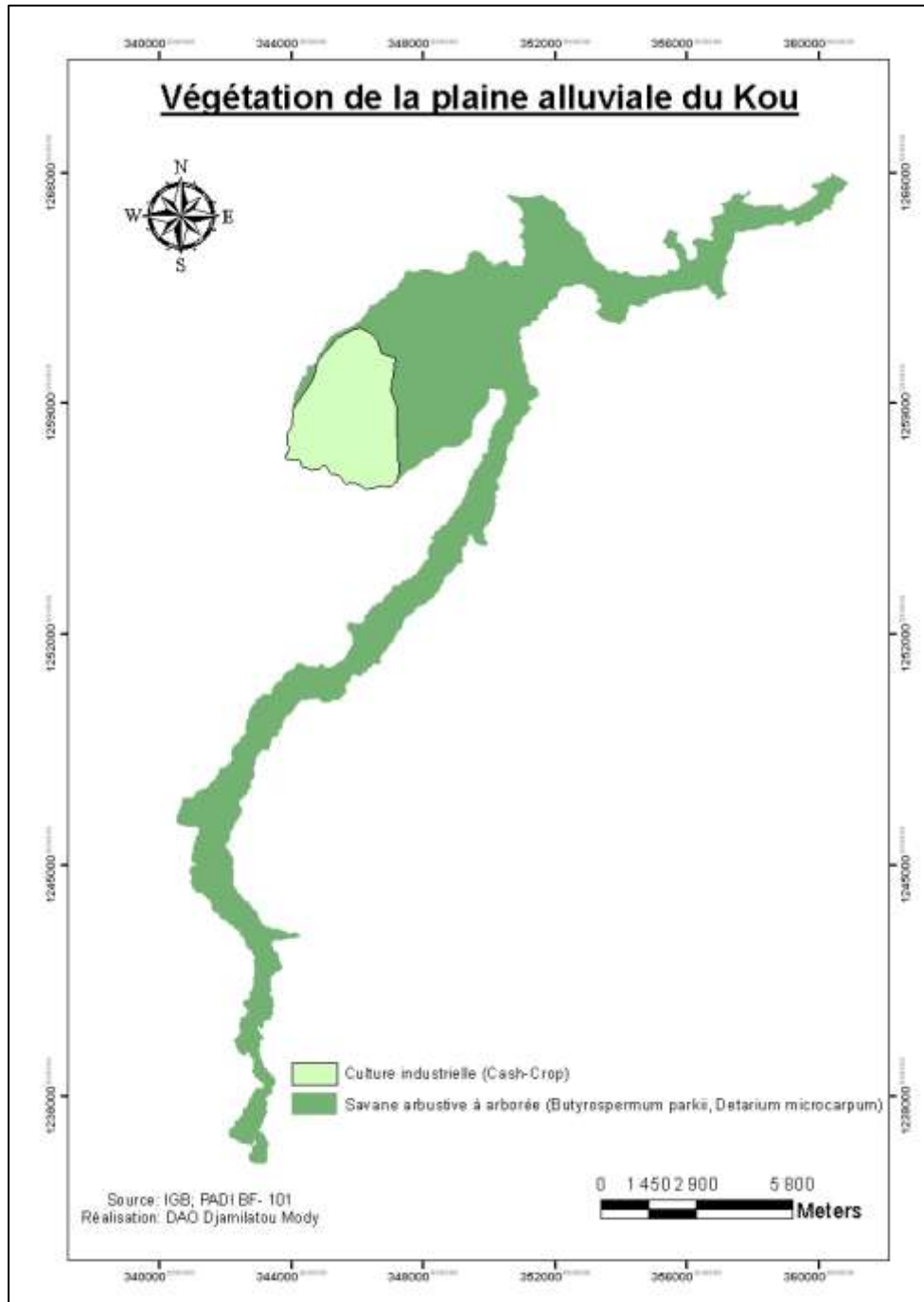


Figure 4: Espèces végétales de la plaine alluviale du Kou

Végétation du bassin versant de la Comoé

Le bassin de la Comoé dont fait partie la plaine alluviale de Karfiguéla étant situé dans la zone Sud-Soudanienne, la végétation de la plaine comprend des espèces variées et caractéristiques de la savane arborée à boisée (Cf.Figure5). Les espèces ligneuses et les tapis herbacés graminéens sont abondants du fait de l'importance des précipitations. De plus, la savane boisée s'étend dans les régions du Centre et du Sud-Ouest du bassin dont une partie est incluse dans la plaine alluviale tandis que la savane arborée se retrouve dans les régions Nord, Nord-Ouest et sur le plateau gréseux. Des forêts classées occupent environ 15,79 % des terres (14 forêts classées) et des formations végétales de type forêts claires et forêts galeries sont rencontrées le long des cours d'eau (PADI, 2014).

Par ailleurs, on note la présence d'espèces végétales introduites par l'Homme représentées par les peuplements de rôniers, les plantations de Jatropha curcas, d'eucalyptus, d'anacardiers, de palmier et les nombreux vergers (bananiers, papayers, manguiers, agrumes...).

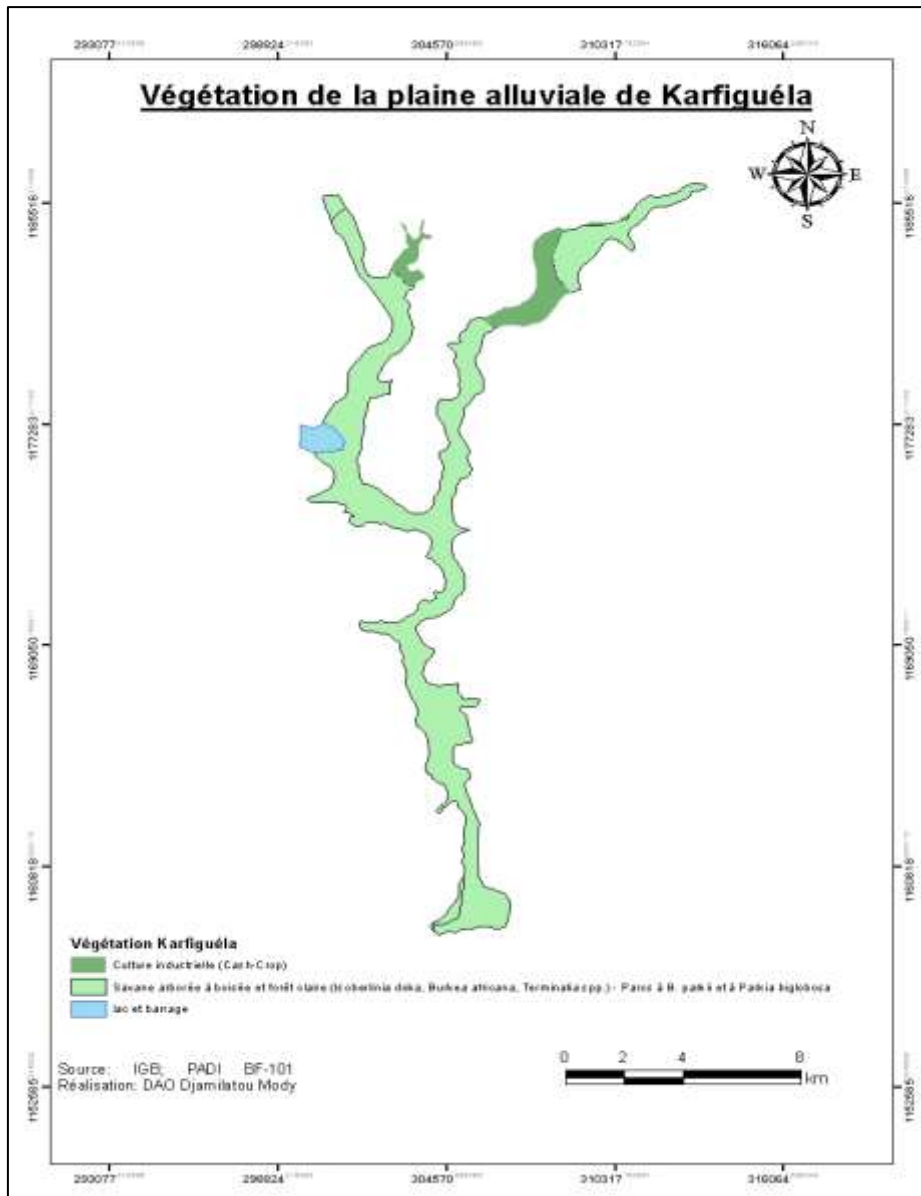


Figure 5: Espèces végétales de la plaine alluviale de Karfiguéla

II.2.5 Occupation des terres des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla

✚ Occupation des terres de la plaine alluviale du Kou

Le bassin du Kou connaît une croissance démographique soutenue causée par de fortes activités agropastorales et industrielles. Les terres du bassin versant du Kou sont principalement réparties entre les zones de cultures, la plaine, les zones urbaines (principalement la ville de Bobo Dioulasso, dont les limites se sont étendues au cours des

dernières années), les zones de forêts classées et de formations végétales naturelles (SAURET, 2013).

La majeure partie de la plaine alluviale (71,6% des terres) est dédiée à l'agriculture dont les sources d'approvisionnement en eau varient en fonction des saisons. Pendant l'hivernage, les apports en eau aux cultures proviennent principalement des précipitations et le riz est la principale spéculature. En revanche, entre octobre et mai, les cultures maraîchères généralement entreprises sont irriguées. L'eau utilisée pour l'irrigation est alors prélevée dans les cours d'eau (principalement le Kou), ainsi que dans la nappe alluviale exploitée par de nombreux puisards.

Occupation des terres de la plaine alluviale de Karfiguéla

Tout comme la plaine alluviale du Kou, la plaine alluviale de Karfiguéla est à majorité occupée par des aires dédiées à l'agriculture (69.4% des terres). La culture prédominante en saison hivernale est le riz. Les cultures maraîchères telles que le chou, le concombre, l'aubergine, le piment et les cultures comme le maïs, le sorgho, les arachides sont aussi très développées dans la plaine de Karfiguéla durant la saison sèche (PADI, 2014).

Les besoins en eau pour l'agriculture sont satisfaits grâce aux prélèvements d'eau de surface (le fleuve Comoé et ses affluents) par un canal d'amenée et d'eau souterraine (aquifère alluvial de Karfiguéla) par des puits et puisards.

II.2.6 Contexte hydrographique des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla

Contexte hydrographique de la plaine alluviale du Kou

La rivière Kou appartient au sous-bassin du Kou à Nasso et s'étend sur 394 km² (SAURET, 2008). Elle prend sa source à Kodara au Sud-Ouest de Bobo Dioulasso à une altitude de plus de 500 m et draine les eaux de surface de plusieurs sous-bassins. On distingue :

- en amont de la rivière Kou, les sous bassins du Yengué, Suo, Farakoba et du Kiéné,
- en aval, les sous bassins du Bango, du Wé, du Niamé et du Yakouba (Cf. Figure 6).

L'ensemble de ces sous bassins contient des cours d'eau temporaires. Les quatre (04) cours d'eau Suo, Farakoba, Kiéné et Yengué s'ajoutent aux sources de la Guinguette, de l'ONEA I et II pour constituer la sous-unité Ouest de la rivière Kou, séparée d'une unité Nord constituée par le Niamé, le Wé, le Bingbélé, et la source de Pésso. Ces deux sous-unités sont séparées par le massif de Wolankoto.

Au niveau des sources de la Guinguette le débit d'étiage est de l'ordre de 10.000 m³/h. En aval, au niveau des sources de Pésso/Désso il est de 400 m³/h (SOGREAH, 1994).

Une autre rivière, le Wolo, de faible débit, draine aussi une partie des eaux de surface à l'Est de la rivière Kou.

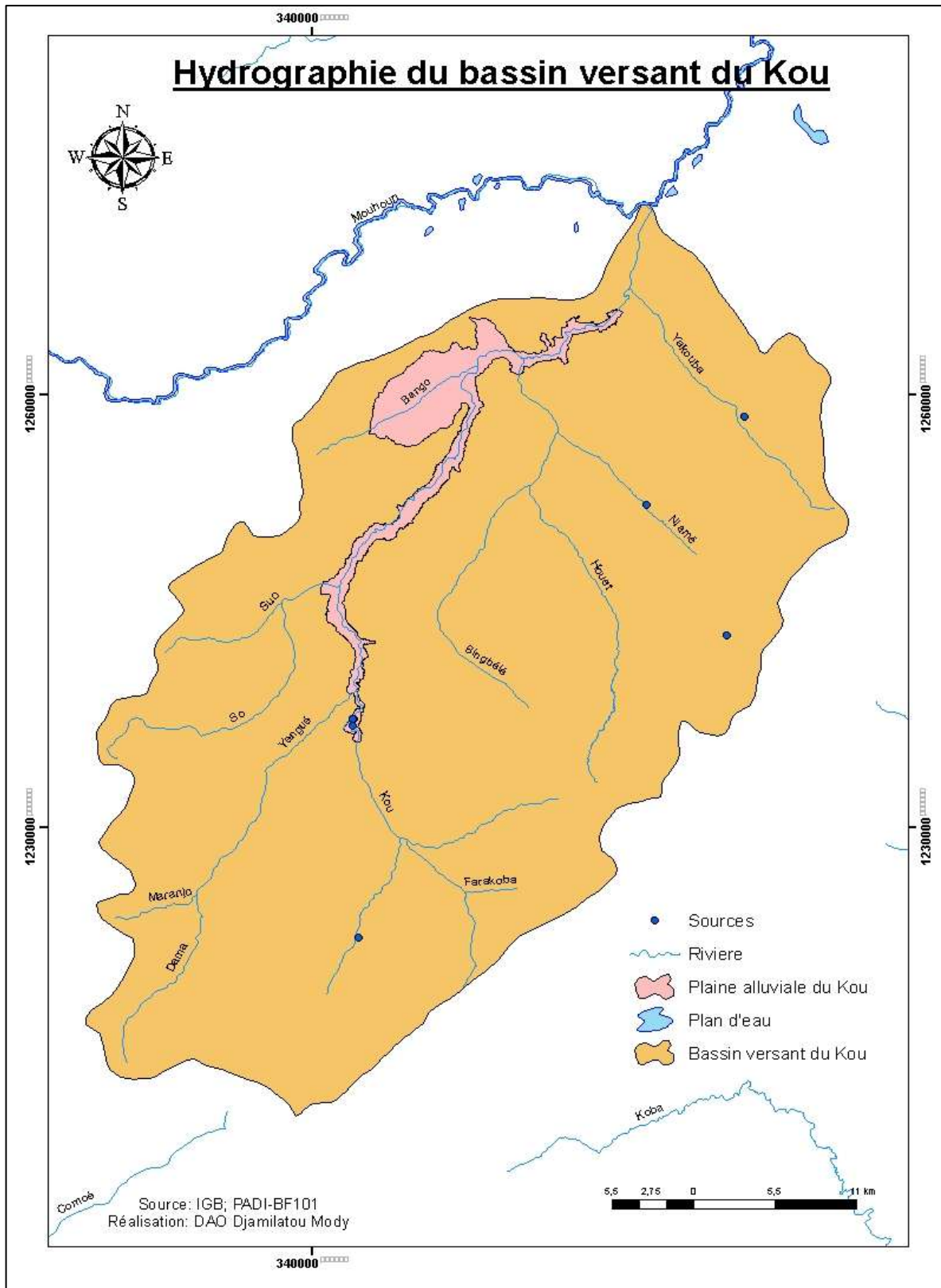


Figure 6: Contexte hydrographique de la plaine alluviale du Kou

✚ Contexte hydrographique de la plaine alluviale de Karfiguéla

La région des cascades est située dans le bassin versant de la Comoé et dispose de deux fleuves qui coulent de façon permanente :

- **Le fleuve Comoé :**

La Comoé est un cours d'eau pérenne qui prend sa source dans la partie septentrionale de la province de la Comoé. Ses principaux affluents sont le Lakoba et le Pa. La plaine alluviale de Karfiguéla constitue le lit majeur de la Comoé sur une longueur de 28 km environ (COMPAORE, 2012).

- **Le fleuve Léraba,**

Il est constitué de deux branches essentielles que sont la Léraba orientale et la Léraba occidentale (Cf. Figure 7).

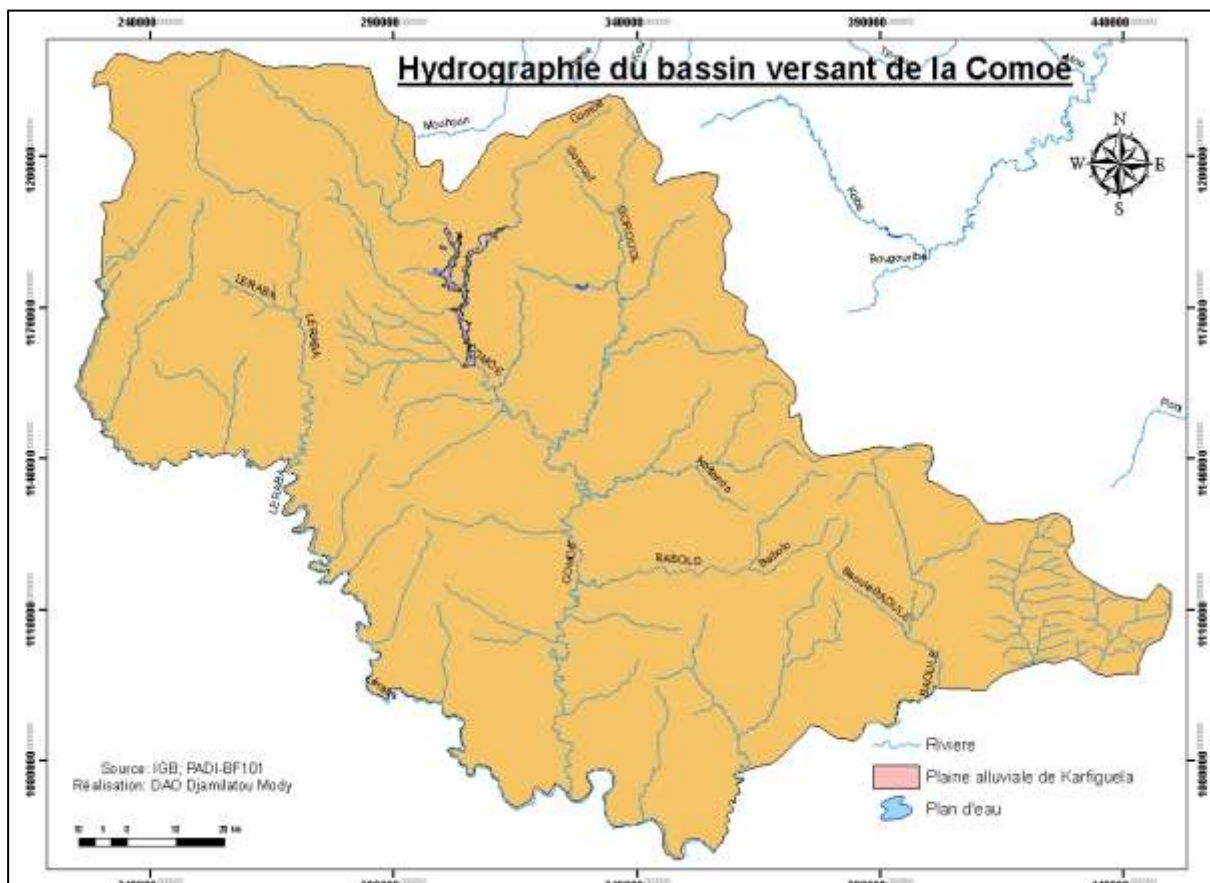


Figure 7: Contexte hydrographique de la plaine alluviale de Karfiguéla

II.2.7 Géologie des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla

Géologie de la plaine alluviale du Kou

Les formations géologiques rencontrées dans la plaine alluviale du Kou sont constituées de Silstones Argilites Carbonates et d'une mince couche de Grès à Granules de Quartz au niveau de la rivière Kou (OGOU, 2008).

Les Silstones Argilites Carbonates débutent au contact des Grès à Granules de Quartz par des grès fins roses à passées de grès grossiers et de minces niveaux d'argilites. L'épaisseur de la formation des Silstones Argilites Carbonates est estimée à 300 m.

La formation géologique de Grès à Granules de Quartz (Cf. Figure 8) est composée de grès quartzite fin à moyen avec des passés de grès grossiers à gros galets. Elle est marquée par la présence de granules de quartz et est de plus bien fracturée. Son épaisseur est comprise entre 300 et 600 m (SAURET, 2007).

Les formations superficielles sont représentées par les latérites, les alluvions argileux ou sablo-argileux et les formations de recouvrement. Les formations de recouvrement sont des formations de décomposition du substratum gréseux. Elles sont constituées de sables plus ou moins argileux, à argiles plus ou moins sableuses avec une épaisseur valant 40 m par endroits.

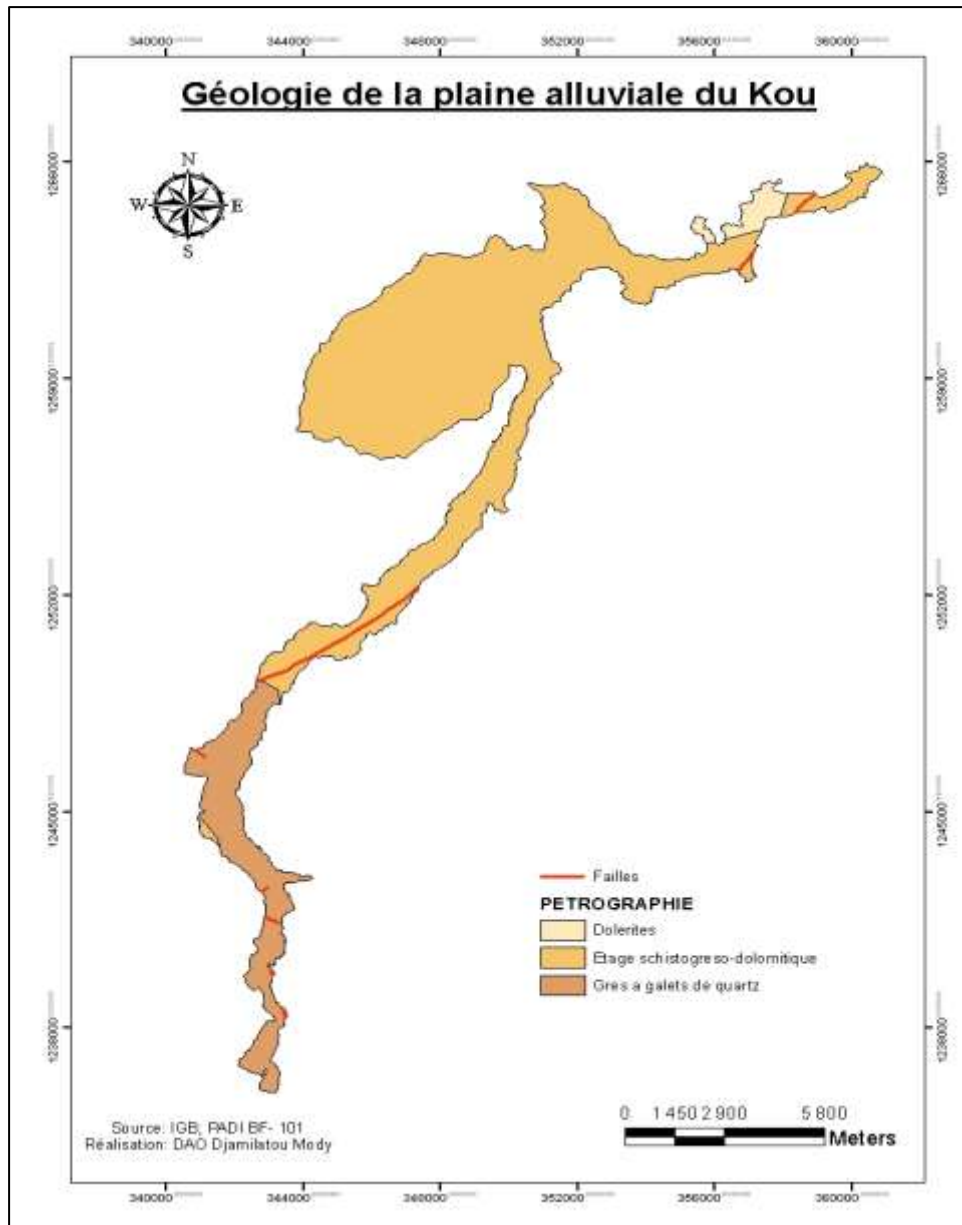


Figure 8: Contexte géologique de la plaine alluviale du Kou

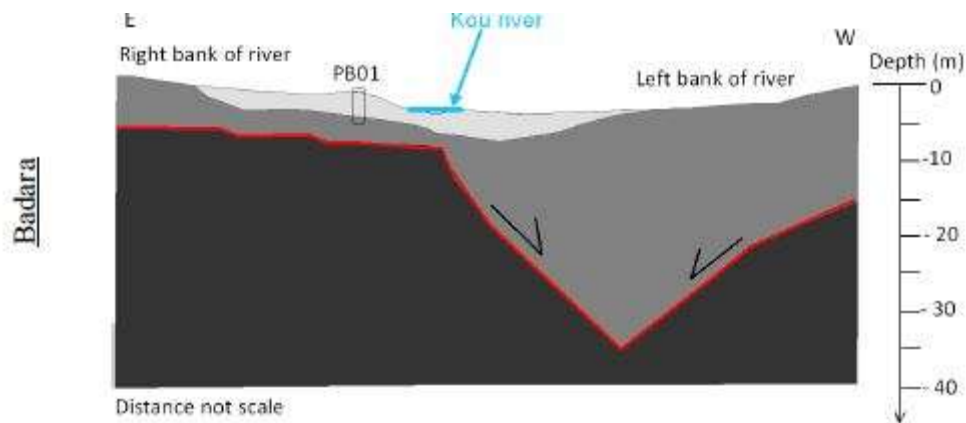


Figure 9: Coupe géologique de la plaine alluviale du Kou (Zone de BADARA)

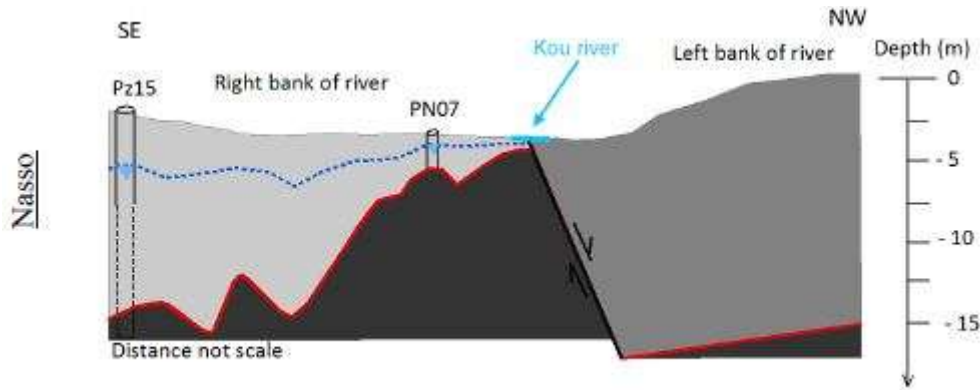


Figure 10: Coupe géologique de la plaine alluviale du Kou (Zone de Nasso)

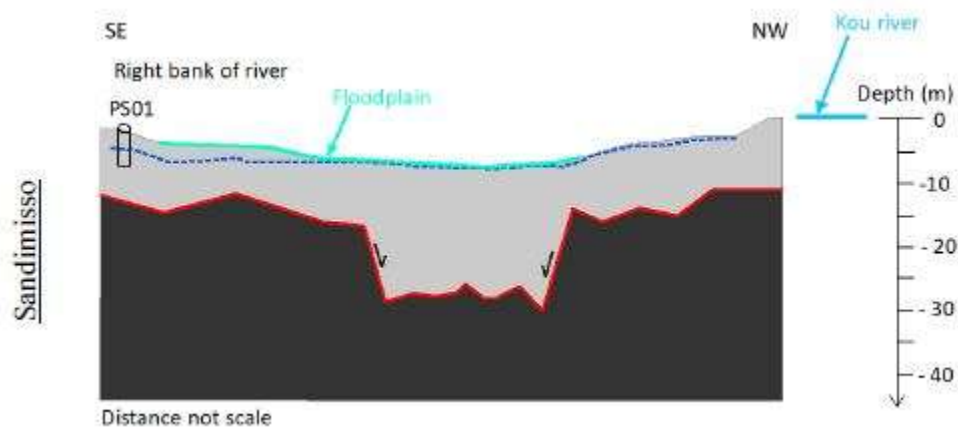


Figure 11: Coupe géologique de la plaine alluviale du Kou (Zone de Sandimisso)

🚧 Géologie de la plaine alluviale de Karfiguéla

Les formations géologiques suivantes peuvent être répertoriées dans la plaine alluviale de Karfiguéla :

- Un ensemble tonalitique constitué de granodiorite, de tonalite et diorite à quartz
- La formation des Grès de Kawara-Sindou (GKS) formée par des sables grossiers conglomératiques. D'une épaisseur variant de 60 à 350 m, elle repose en discordance sur les Grès Inférieurs
- La formation des Grès Inférieurs (Cf. Figure 9) d'une épaisseur variant de 50 à 300 mètres. Ces grès inférieurs se succèdent de la manière suivante : grès rouges fins arkosiques, grès quartzites fins, grès roses à débit schisteux

- Un ensemble formé de schistes et de volcano-sédiments tels que les pélites, les schistes gréseux, les schistes lustrés gris-noir, les schistes tuffacés ainsi que de rares horizons quartzitiques

En outre, tous ces terrains sont recouverts par des formations meubles plus récentes qui supportent les sols favorables aux cultures. Il s'agit de sédiments alluviaux récents (dans les fonds de vallées) ou anciens (sur les « plateaux ») ainsi que de dépôts colluviaux à la base des reliefs.

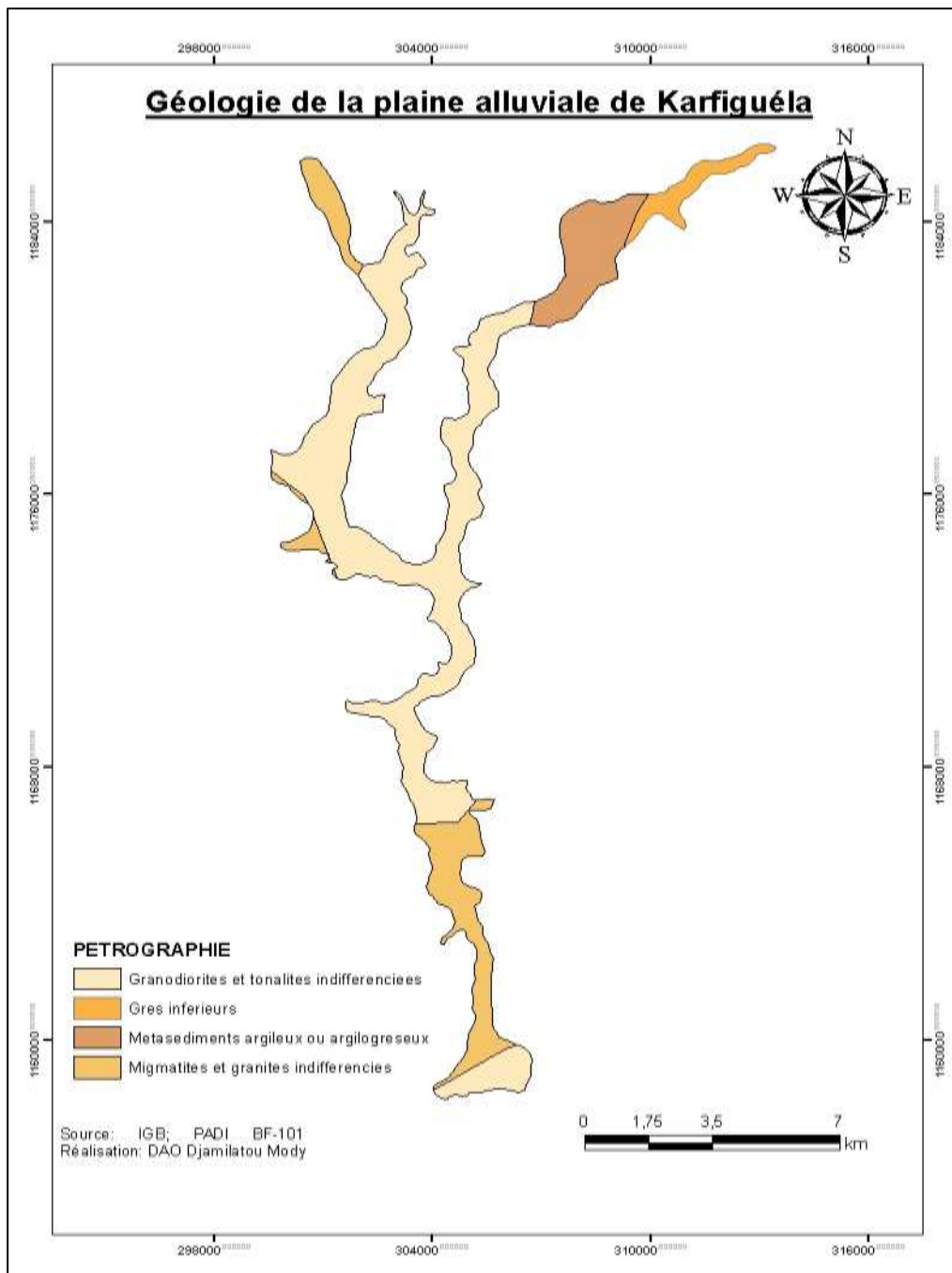


Figure 12: Contexte géologique de la plaine alluviale de Karfiguéla

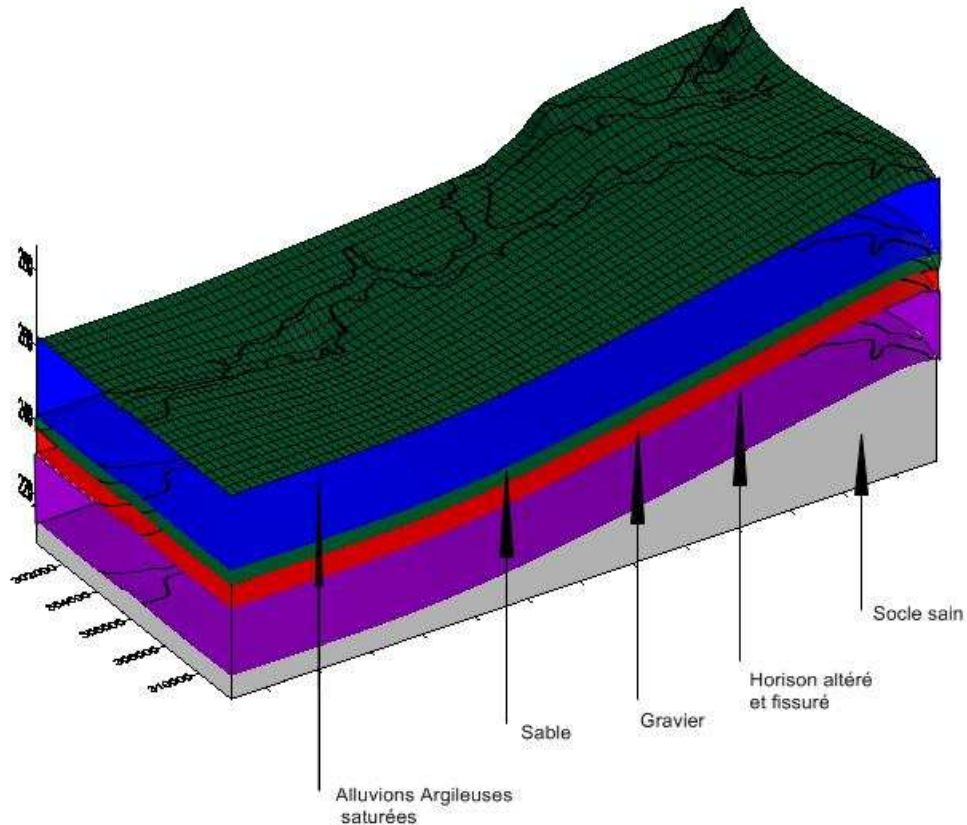


Figure 13: Modèle géologique 3D de la plaine alluviale de Karfiguéla

II.2.8 Contexte hydrogéologique des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla

On distingue au Burkina Faso, le système aquifère de la zone de socle et le système aquifère de la zone du sédimentaire ancien et récent (Continental Terminal). En fonction de la porosité, ces systèmes aquifères sont classés en:

- Aquifères discontinus : la ressource est localisée et circule à travers les failles/fractures des roches massives du socle: granites, dolérites, calcaires, silexites, grès, ou dans les roches plastiques
- Aquifères semi-continus : la ressource est localisée dans le milieu poreux, et circule dans les fractures et les joints de liage de grès, de roches carbonatées, des cuirasses, et des schistes
- Aquifères continus : les eaux circulent à travers les pores inter-granulaires et microfissures issus de l'altération : altérites surmontant le socle, alluvions, sables, grès friables.

Contexte hydrogéologique de la plaine alluviale du Kou

Dans le bassin du Kou on ne rencontre que le système aquifère de la zone du sédimentaire ancien et récent. Les nappes des systèmes aquifères du sédimentaire ancien et du Continental terminal sont pourvues de porosité d'interstices et de perméabilités importantes (PADI, 2014). A ce titre, elles sont les plus productives. On distingue du bas vers le haut la succession suivante:

- la roche saine ou dure
- la zone altérée
- l'horizon latéritique.

Ces trois niveaux différencient deux types de systèmes aquifères : un système superficiel et un système profond.

• Le système aquifère superficiel

Il est représenté généralement par le complexe fluvio-lacustre du Continental Terminal qui forme une nappe très régulière et de grande extension du Burkina. Son épaisseur varie de 10 m à 30 m. Dans la zone d'étude, cette nappe est exploitée par les populations à l'aide de puits traditionnels qu'on retrouve dans les localités.

• Le système aquifère profond

Il correspond à la partie fissurée et fracturée par un réseau de méga-linéaments traversant les grès, calcaires, silexites et schistes. Ces formations sont compartimentées par des réseaux de failles ouvertes (perméables) de direction Nord-Ouest –Sud Est et de failles étanches de direction Sud-Ouest-Nord Est.

A ce titre, le système aquifère profond est considéré comme discontinu. Dans la zone d'étude il est représenté par les grès de Bobo (aquifère des Grès à Granules de Quartz).

Dans le bassin du Kou, le nombre exact et l'extension des formations aquifères restent une énigme. Actuellement aucun forage profond n'a traversé toute la série sédimentaire pouvant donner des informations précises sur la puissance des formations aquifères et leurs limites. L'hypothèse retenue jusqu'ici par les acteurs serait l'existence d'une nappe d'eau unique hébergée au sein d'un aquifère multicouche.

Les différentes couches aquifères du bassin du Kou qui sont décrites dans ce paragraphe sont celles qui ont été reconnues par les études antérieures. On observe, du bas vers le haut :

• **L'aquifère des Grès de Kawara Sindou (GKS)**

Il repose soit sur des schistes très peu perméables, soit sur des granites du socle, en fonction de la morphologie du substratum ou de l'érosion. Les roches réservoirs sont composées essentiellement de grès et le toit de la nappe est constitué par des formations marines très peu perméables. Les mesures effectuées sur les piézomètres montrent des fortes hétérogénéités de conductivités électriques.

• **L'aquifère des Grès Fins Glauconieux (GFG)**

Il constitue le rebord supérieur de la falaise de Banfora. Il est formé au sommet par une couche imperméable d'argiles à passées gréseuses. Cette couche constitue le toit d'une série gréseuse (grès très fins) épaisse d'environ 100 à 150 m et perméable, limitée à la base par des argiles ocres de couleur rouge ou verte imperméables. Son épaisseur moyenne est de 94 m. Cette série gréseuse renferme une nappe captive, sollicitée par l'ensemble des industries de la ville. Elle est très étendue et s'étale depuis la région de Sindou au Sud Sud-Ouest du pays jusqu'à Tougan au Nord. D'après les rapports d'études de la SOGREAH en 1994, le débit d'exploitation de la nappe est de l'ordre de 50 à 80 m³/h pour un rabattement de 50 à 100 m et un rayon d'influence de 500m. La profondeur des eaux par rapport au sol varie de 6 à 16 m. Elle s'étend de Sindou au Nord de Tougan sur près de 450 km.

• **L'aquifère des Grès à Granules de Quartz (GGQ)**

Les études de la SOGREAH datant de 1994 montrent qu'il existerait deux niveaux aquifères au sein de cette formation « dite détritique » séparés l'un de l'autre par une couche lenticulaire d'argile discontinue, favorisant ainsi une connexion hydraulique entre ces deux niveaux. Les données de campagne de diagraphies réalisées confirment l'existence, par endroits, d'une couche argileuse entre ces deux niveaux de 15 m d'épaisseur environ. L'épaisseur moyenne de la nappe des GGQ est de 70 m. Un essai de débit longue durée a permis de trouver une transmissivité de l'aquifère de l'ordre de $6.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. L'aquifère des GGQ s'étale de Sindou au Sud du pays au Nord sur plus de 300 km.

• **L'aquifère des Silstones Argilites et Carbonates de Guéna SourouKoudinga (SAC1)**

Cet aquifère est séparé des GGQ par une série d'argiles rouges ou jaunes d'épaisseurs variables (plus de 100 m sur les piézomètres Pz3 et Pz19 et quelques dizaines de mètres sur les piézomètres Pz21 et Pz12). Cette série argileuse disparaît au voisinage des sources où une faille d'effondrement Nord Nord-Ouest Sud Sud- Est met en contact hydraulique les SAC1 et les GGQ.

Toutefois, elle constitue le mur d'une nappe puissante dont le réservoir est constitué par des grès rouges très grossiers et glauconieux. Le toit de la nappe est constitué par une épaisse couche de calcaires dolomités, imperméables et sans aucun signe de karstification (SOGREAH, 1994). L'épaisseur moyenne de la nappe est estimée à 82 m. Le débit à la foration est de l'ordre de 40 m³/h. C'est donc l'un des aquifères les plus productifs de l'ensemble de la série sédimentaire. Il s'étendrait depuis Sintasso (Nord-Ouest de Orodara) jusqu'à Kassoum (Ouest de Tougan) où le SAC1 affleure.

• L'aquifère des Grès fins roses (GFR)

De faibles extensions, l'aquifère des GFR est constitué de grès quartzites très fins, micacés et glauconieux, de couleur rose dominante. Il serait le réservoir d'une nappe peu épaisse et moins profonde (la profondeur des eaux par rapport au sol est de l'ordre de 11 m (DAKOURE, 2003) que celle des SAC1. Cette nappe est captée par des puits traditionnels villageois dans les départements de Bama, Sakaby...

Les différentes formations aquifères décrites présentent un pendage de 2 à 3% orienté vers le Nord-Ouest et larges du Nord Est au Sud-Ouest.

• Le système de fractures

Une fracture d'effondrement orientée Sud-Ouest Nord-Est met en contact hydraulique l'aquifère des SAC1 et des GGQ au niveau des sources de Nasso. Elle entraîne à son voisinage des perméabilités très fortes, et serait à l'origine de la genèse des sources de Nasso et par prolongement celles de Pésso/Desso. D'autres failles orientées Nord-Ouest, Sud Est sont associées à celles-ci et induisent des directions privilégiées d'écoulement (SOGREAH, 1993) : un écoulement lent et dispersé dans les grès non fracturés et un écoulement rapide et concentré dans les zones de fractures et les niveaux de galets de quartz.

• Les aquifères superficiels de la plaine alluviale

Ils sont représentés par les latérites, les alluvions de texture argileuse ou sablo-argileuse et les formations de recouvrement. Les formations de recouvrement sont des formations de décomposition du substratum gréseux. Elles sont constituées de sables plus ou moins argileux avec une épaisseur atteignant 40m par endroits.

Contexte hydrogéologique de la plaine alluviale de Karfiguéla

La région des Cascades, dans laquelle est située la plaine alluviale de Karfiguéla comprend deux entités hydrogéologiques principales:

- **L'entité des zones sédimentaires**

La zone sédimentaire est constituée d'une épaisse série de roches qui contient plusieurs niveaux aquifères. Il s'agit d'un bassin sédimentaire essentiellement gréseux d'âge très ancien. Certains niveaux aquifères fournissent des débits très importants de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres cubes par heure (GIRE, 2001).

- **L'entité des zones de socle**

La zone de socle cristallin est à dominance granitique avec des schistes, des roches vertes et des dolérites. Les débits exploitables sont modestes. Les ressources en eau se situent soit dans la zone altérée et plus ou moins ameublie pour les roches granitiques (arènes), soit dans la roche fracturée (GIRE, 2001).

Par ailleurs des études hydrogéologiques faites par le programme de Valorisation des Ressources en Eau du Sud-Ouest du Burkina Faso (RESO) en 1998 montrent que la répartition des réserves aquifères est très inégale. En effet la zone sédimentaire qui couvre 20% du bassin renferme plus de la moitié des réserves aquifères.

III. MATERIEL ET METHODES

III.1 Approche de la thématique d'étude

L'étude de la thématique du taux d'exploitation et de la durabilité de la ressource en eau des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla s'est déroulée en trois phases principales.

Au cours de la première phase, une collecte de données physiques sur les aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla a été effectuée. Il s'agissait spécifiquement :

- de cartes géologiques et de coupes géologiques montrant une section verticale (épaisseur), les limites et les frontières du système.
- de cartes iso contours montrant le nivellement de l'aquifère, le niveau du substratum et les niveaux confinés.

Ensuite la seconde phase a permis de recueillir les données sur la structure hydrogéologique du milieu:

- les zones et les taux de décharges
- la distribution spatiale et temporelle des taux d'évapotranspiration, de la recharge de la nappe, les interactions eau souterraine - eau de surface, les zones et les quantités de recharge de la nappe.
- l'évaluation des différents prélèvements.

Enfin la troisième phase a concerné le calcul du taux d'exploitation de l'aquifère alluvial et les discussions sur la durabilité de la ressource en eau souterraine

III.2 Calcul du taux d'exploitation

Le taux d'exploitation d'une nappe d'eau souterraine, défini comme le rapport entre le volume annuel prélevé au sein de cette nappe d'eau souterraine et le volume annuellement renouvelé par la recharge pluviométrique, est fréquemment utilisé comme indicateur quantitatif du degré d'exploitation de la ressource en eau souterraine. Cet indicateur laisse penser qu'une exploitation durable de la ressource en eau souterraine consiste à ne pas dépasser son taux de renouvellement annuel, en négligeant le fait que l'eau souterraine assure

de nombreux autres usages essentiels, tel que le débit minimal des cours d'eau à l'étiage ou encore l'alimentation des sources d'eau souterraines.

L'alternative serait d'estimer au mieux le taux d'exploitation durable de la ressource en eau souterraine en retranchant de la recharge pluviométrique effective une estimation du volume annuel minimum d'eau souterraine nécessaire pour assurer de manière durable et non compromettante ses autres fonctions naturelles. Pourtant, malheureusement, cet indicateur est inexistant à l'heure actuelle, étant donné l'absence de données permettant de le calculer.

La formule suivante permettra par conséquent le calcul du taux d'exploitation :

$$\text{TE (\%)} = \frac{\text{VAP (m}^3\text{)}}{\text{VAR (m}^3\text{)}} \times 100 \quad (\text{Equation N}^\circ 1)$$

Avec

TE : Taux d'exploitation de la ressource en eau souterraine

VAP : Volume annuel prélevé de la ressource en eau souterraine

VAR : Volume annuel d'eau souterraine rechargé

III.2.1 Estimation des prélèvements

III.2.1.1 Quantification des volumes d'eau prélevés

✚ Principe de la méthode basée sur la quantification des volumes d'eau prélevés

La méthode basée sur la quantification des volumes d'eau prélevés utilise **la sommation des volumes d'eau pompés et extraits manuellement dans la nappe alluviale pendant la période sèche annuelle par les agriculteurs de la plaine alluviale**. Les moyens d'exhaure sont des motopompes, des pompes à pédales et des arrosoirs.

❑ **Formule principale de calcul**

La formule principale de calcul de la méthode d'estimation des volumes prélevés basée sur les quantités d'eau prélevées s'énonce comme suit :

$$\mathbf{VAP (m^3) = V_{mp} (m^3) + V_{pp} (m^3) + V_{ar} (m^3)} \quad (\text{Equation N}^\circ 2)$$

Avec

VAP : volume annuel d'eau souterraine prélevé

V_{mp} : volume annuel d'eau souterraine prélevé avec motopompes

V_{pp} : volume annuel d'eau souterraine prélevé avec pompes à pédales

V_{ar} : volume annuel d'eau souterraine prélevé avec arrosoirs

❑ **Formules intermédiaires de calcul**

Les formules intermédiaires rattachées à l'application de la formule principale sont :

- **Pour l'estimation des volumes prélevés avec des motopompes**

$$V_{mp} (m^3) = \sum (V_{mps} (m^3)) = \sum (V_{mph} (m^3) \times N_s) \text{ (Equation N°3)}$$

Avec

V_{mp} : volume annuel d'eau souterraine prélevé avec motopompes

V_{mps} : volumes d'eau souterraine prélevés pendant la période de sécheresse avec motopompes

V_{mph} : volumes hebdomadaires d'eau souterraine prélevés en période de sécheresse avec motopompes

N_s : nombre de semaines de la période de sécheresse

Or pour une exploitation agricole, on peut écrire que :

$$V_{mph} (m^3) = V_{mpj} (m^3) \times N_j \text{ (Equation N°4)}$$

Avec

V_{mpj} : volume journalier d'eau souterraine prélevé en période de sécheresse avec motopompes

N_j : nombre de jours d'irrigation hebdomadaire

Et

$$V_{mpj} (m^3) = \sum (Q_{mp} (m^3/h) \times N_{mp} \times N_h) \text{ (Equation N°5)}$$

Avec

Q_{mp} : débits unitaires des motopompes

N_{mp} : nombre de motopompes

N_h : nombre d'heures de pompage journalier respectifs

- **Pour l'estimation des volumes prélevés avec des pompes à pédales**

$$V_{pp} (m^3) = \sum(V_{pps} (m^3)) = \sum(V_{pph} (m^3) \times N_s) \text{ (Equation N°6)}$$

Avec

V_{pp} : volume annuel d'eau souterraine prélevé avec pompes à pédales

V_{pps} : volumes d'eau souterraine prélevés pendant la période de sécheresse avec pompes à pédales

V_{pph} : volumes hebdomadaires d'eau souterraine prélevés en période de sécheresse avec pompes à pédales

N_s : nombre de semaines de la période de sécheresse

Or pour une exploitation agricole, on peut écrire que :

$$V_{pph} (m^3) = V_{ppj} (m^3) \times N_j \text{ (Equation N°7)}$$

Avec

V_{ppj} : volume journalier d'eau souterraine prélevé en période de sécheresse avec pompes à pédales

N_j : nombre de jours d'irrigation hebdomadaire

Et

$$V_{ppj} (m^3) = \sum(Q_{pp} (m^3/h) \times N_{pp} \times N_h) \text{ (Equation N°8)}$$

Avec

Q_{pp} : débits unitaires des pompes à pédales

N_{pp} : nombre de pompes à pédales

N_h : nombre d'heures de pompage journalier respectifs

- **Pour l'estimation des volumes prélevés avec des arrosoirs**

$$V_{ar} (m^3) = \sum (V_{ars} (m^3)) = \sum (V_{arh} (m^3) \times N_s) \text{ (Equation N°9)}$$

Avec

V_{ar} : volume annuel d'eau souterraine prélevé avec arrosoirs

V_{ars} : volumes d'eau souterraine prélevés pendant la période de sécheresse avec arrosoirs

V_{arh} : volumes hebdomadaires d'eau souterraine prélevés en période de sécheresse avec arrosoirs

N_s : nombre de semaines de la période de sécheresse

Or pour une exploitation agricole on peut écrire que :

$$V_{arh} (m^3) = V_{arj} (m^3) \times N_j \text{ (Equation N°10)}$$

Avec

V_{arj} : volume journalier d'eau souterraine prélevé en période de sécheresse avec arrosoirs

N_j : nombre de jours d'irrigation hebdomadaire

Et

$$V_{arj} (m^3) = V_a \times N_{ar} \times N_{ARj} \text{ (Equation N°11)}$$

Avec

V_a : volume d'un arrosoir en m^3

N_{ar} : nombre d'arrosoirs

N_{ARj} : nombre d'allers et retours journaliers pour l'arrosage

✚ **Matériel de mise en œuvre de la méthode basée sur la quantification des volumes d'eau prélevés**

La mise en œuvre de cette méthode d'estimation des volumes prélevés nécessite des données et informations sur:

- le nombre des motopompes pour chaque exploitation agricole, le débit des motopompes et les calendriers d'arrosage pour chaque spéculation
- Le nombre des pompes à pédales pour chaque exploitation agricole, le débit des pompes à pédales et les calendriers d'arrosage pour chaque spéculation
- Le nombre d'arrosoirs utilisés, leurs volumes respectifs, le nombre d'allers et retours journaliers et le nombre de jours d'arrosage hebdomadaire

Le PADI- BF 101 dispose d'une base de données dont les informations indispensables à la mise en œuvre de la méthode ont été extraites. Quatre-vingt-dix-sept (97) agriculteurs dont quatre-vingt-onze (91) à l'aide de motopompes, deux (2) à l'aide de pompes à pédales et quatre (4) à l'aide d'arrosoirs exploitent l'eau de l'aquifère alluvial du Kou. Les agriculteurs exploitant l'eau de l'aquifère alluvial de Karfiguéla sont beaucoup moins nombreux : sept (7) se servent de motopompes pour les prélèvements, cinq (5) utilisent des arrosoirs et aucun agriculteur muni de pompe à pédales n'a été recensé. (Cf. Annexes I et II)

✚ **Hypothèses et limites d'application de la méthode basée sur la quantification des volumes d'eau prélevés**

Les hypothèses établies pour le calcul des volumes prélevés sont les suivantes :

- **Hypothèse 1** : La période de sécheresse s'étend sur une durée de 8 mois, d'Octobre à Mai, permettant ainsi de mener deux (2) campagnes agricoles de contre saison.
- **Hypothèse 2** : Pour le cas des exploitations à calendrier d'arrosage variable (lié à la pluralité des cultures en présence dans ces exploitations), le plus grand nombre d'heures d'irrigation journalier ainsi que le plus grand nombre de jours d'arrosage sont considérés pour les calculs.
- **Hypothèse 3** : Les débits de motopompes manquants dans les données de recensement sont remplacés par une valeur moyenne de débit (issue de la combinaison des 3 gammes de débits de motopompes de marque Honda, marque la plus répandue dans les exploitations du Kou et de Karfiguéla) égale à $\frac{(200+100+60)}{3} = 120 \text{ m}^3/\text{h}$

- **Hypothèse 4** : toutes les pompes à pédales utilisées sont de marque KICKSTAR

Les hypothèses mises en place pour compenser les données de recensement manquantes au niveau de certaines exploitations, susceptibles de créer une légère surestimation des résultats, constituent la limite d'application principale de la méthode basée sur la quantification des volumes pompés pour l'estimation des volumes prélevés dans les aquifères alluviaux du Kouet de Karfiguéla.

III.2.1.2 Evaluation des besoins en eau des cultures

La forme d'irrigation pratiquée par les exploitants des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla est l'irrigation de surface ou irrigation gravitaire.

Principe de la méthode basée sur l'évaluation des besoins en eau des cultures

Cette méthode permet d'estimer les volumes prélevés **en les assimilant aux volumes bruts d'eau d'irrigation indispensables aux différentes cultures en présence dans les exploitations agricoles.**

Divers types de cultures sont rencontrées dans les exploitations agricoles des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla, incluant des cultures vivrières telles que le riz, le sorgho, le maïs et des cultures maraîchères comme le chou, le piment ou le poivron. Par ailleurs l'arboriculture est aussi répandue dans ces plaines, en témoignent les nombreux vergers et plantations d'arbres exploités pour la qualité de leurs bois.

Formule principale de calcul

La formule principale de calcul pour la méthode d'estimation des volumes prélevés par l'évaluation des besoins en eau des cultures est :

$$\mathbf{VAP (m^3) = \sum (V_b(m^3)) = \sum \left(\frac{V_p(m^3)}{(\%)} \right) = \sum \left(\frac{10 * A(\text{ha}) * D_p(\text{mm})}{(E_d(\%) * E_a(\%))} \right)}$$

(Equation N°12)

Avec

VAP : volume annuel d'eau souterraine prélevé

V_b : volumes bruts d'eau d'irrigation dédiés aux cultures

V_p : volumes pratiques nets d'eau d'irrigation dédiés aux cultures

E_i : efficacité d'irrigation globale

E_d : efficacité de distribution des canaux

E_a : efficacité d'application aux cultures

A : aire dédiée aux cultures à arroser

Formules intermédiaires de calcul

Les formules intermédiaires rattachées à l'application de la formule principale sont :

- **Pour le calcul de la dose brute D_b**

$$\mathbf{D_b(mm) = \frac{D_p(mm)}{E_{ig}(\%)} \quad (\text{Equation N°13})}$$

Avec D_p : dose pratique d'irrigation

E_{ig} : efficacité d'irrigation globale

- **Pour le calcul de la dose pratique d'irrigation D_p**

La dose pratique d'irrigation est la hauteur d'eau qui doit être appliquée pour compenser l'évapotranspiration de la plante. Son calcul requiert des paramètres divers dont les valeurs sont répertoriées dans les annexes. (Cf. Annexe III)

$$Dp(\text{mm}) = \text{RFU}(\text{mm}) = p \times \text{RU}(\text{mm}) = p \times [Z_r(\text{mm}) \times (\theta_{fc} - \theta_{wp})]$$

(Equation N°14)

Avec

RFU : Réserve Facilement Utilisable du sol

RU : Réserve Utile du sol

p : Facteur de tarissement dépendant du type de culture et du climat donc de l'ETM (Evapo Transpiration Maximale)

θ_{fc} : Humidité volumétrique à la capacité au champ

θ_{wp} : Humidité volumétrique au point de flétrissement

Z_r : profondeur racinaire de la culture

- **Pour le calcul de l'Evapotranspiration Maximale ETM**

L'évapotranspiration est la quantité d'eau consommée qui comprend l'eau transpirée par la plante et l'évaporation directe à la surface du sol.

D'après le bulletin numéro 56 de la Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO), l'évapotranspiration de la culture de référence (Et_o), parfois désignée par le terme « évapotranspiration potentielle », est la quantité d'eau évapo transpirée par une culture de référence (le gazon) couvrant totalement le terrain de culture (couvert continu et homogène), ayant une hauteur de quelques centimètres (de taille entre 8 et 15cm), à son stade de développement maximal (pleine croissance), dont l'alimentation en eau n'est pas limitante (suffisamment pourvue en eau proche de la capacité de rétention mais sans excès d'eau) et qui n'est soumise à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique.

L' Et_o peut s'évaluer par des méthodes directes ou des méthodes indirectes (qui seront utilisées pour les calculs du présent mémoire).

Les **méthodes indirectes** d'estimation de l'évapotranspiration de référence prennent en compte divers paramètres climatiques dans un certain nombre de leurs formules :

➤ La formule de Blaney et Criddle

Elle présente l'avantage de n'exiger que la connaissance de la température et de la durée d'insolation.

$$ET_{o \text{ Blaney et Criddle}} (\text{mm}) = (15 + 0.84 t) \times \frac{H}{100} \quad (\text{Equation N}^\circ 15)$$

Avec t : température moyenne en °C

H : durée en heures du jour en heures pendant la période considérée

➤ La formule de Thornthwaite

$$ET_{o \text{ Thornthwaite}} (\text{mm}) = 16 \times \left(\frac{10 \times t}{I} \right)^a \times F(\lambda) \quad (\text{Equation N}^\circ 16)$$

Avec t : température moyenne mensuelle du mois considéré en °C

I : indice thermique annuel ; $I = \sum_{m=1}^{12} i_m$ où $i_m = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$

a : facteur égal à $0,016 I + 0,5$

F(λ) : facteur dépendant de la latitude λ (Cf. Annexe IV)

➤ La formule de Turc

$$ET_{o \text{ Turc}} (\text{mm}) =$$

❑ Si Hr > 50 %

$$ET_o = C \times \frac{t}{t+15} (\text{Rg}+50) \quad (\text{Equation N}^\circ 17)$$

❑ Si Hr ≤ 50 %

$$ET_o = C \times \frac{t}{t+15} (\text{Rg}+50) \left(\frac{120-Hr}{70} \right)$$

Avec

t : température moyenne pendant la période considérée en °C

Rg : rayonnement global (cal. cm-2. j)

Hr : humidité relative de l'air en %

C : coefficient de pondération

= 0,13 pour une estimation décadaire

= 0,4 pour une estimation de 30 jours.

➤ La formule de Penman modifiée

$$ET_o \text{ Penman modifiée (mm/j)} = C \times R_n + (1+W) \times f(U) \times (e_a - e_d) \text{ (Equation N°18)}$$

Avec

ET_o est en mm/j

C : un facteur de correction pour comparer les conditions météo diurnes et nocturnes.

R_n : rayonnement net, en évaporation équivalente (mm/j)

W : facteur de pondération lié à la température


f (U) : facteur lié à la vitesse du vent

$e_a - e_d = P(T_a) - P(T_r) = D_a$ = déficit hydrique de l'air ; P(T_a) est la pression de vapeur saturante et P(T_r) la pression de la vapeur d'eau

L'ETM est la valeur maximale de l'évapotranspiration pour une culture donnée, à un stade végétatif donné et quand l'alimentation en eau n'est pas limitante, sous un climat donné. La valeur de l'ETM se calcule à partir de la référence que constitue l'ET_o par la

$$ETM \text{ (mm)} = K_c \times ET_o \text{ (Equation N°19)}$$

Avec K_c : coefficient cultural variant au cours du cycle végétatif

 **Matériel de mise en œuvre de la méthode basée sur l'évaluation des besoins en eau des cultures**

La mise en œuvre de la méthode basée sur l'évaluation des besoins en eau des cultures nécessite l'utilisation de nombreux paramètres climatiques surtout pour la détermination de l'évapotranspiration de référence à travers les différentes formules énoncées. Le PADI- BF 101 dispose d'une station météorologique déplacée du Kou à Karfiguéla depuis 2013 et située à 10°41'35'' de latitude Nord et 4°48'45'' de longitude Ouest. Cependant, pour plus de précision, des séries de données météorologiques sur une période plus longue (1981 à 2010) que celles disponibles au niveau de la station du PADI ont été collectées auprès de la DCRM

et de la DRARHASA pour calculer les besoins en eau des cultures dans les plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla.

✚ Hypothèses et limites d'application de la méthode basée sur l'évaluation des besoins en eau des cultures

Les hypothèses établies pour le calcul des volumes prélevés par la méthode de quantification des volumes d'eau pompés sont les suivantes :

- **Hypothèse 1** : La période de sécheresse s'étend sur une durée de 8 mois, d'Octobre à Mai, permettant ainsi de mener deux (2) campagnes agricoles de contre saison.
- **Hypothèse 2** : Les cultures en présence dans les exploitations agricoles des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla sont regroupées en 5 groupes (**groupe de la banane** : comprend la banane et la papaye ; **groupe du chou** : comprend le chou, l'oignon, le piment, l'oseille, l'aubergine, le poivron ; **groupe du maïs** : comprend le maïs, le sorgho, le haricot, la patate, l'arachide ; **groupe du riz** : comprend le riz qui n'est pas cultivé en saison sèche ; **groupe des vergers** : comprend les arbres fruitiers et les arbres exploités pour leur bois qui ne sont pas irrigués en saison sèche)
- **Hypothèse 3** : Les superficies unitaires pour chaque groupe de culture irriguée en saison sèche sont égales à **1 ha par exploitation pour le groupe de la banane, 0,5 ha par exploitation pour le groupe du chou, 0,5 ha par exploitation pour le groupe du maïs.**
- **Hypothèse 4** : L'évapotranspiration de référence utilisée pour les calculs est celle calculée par la formule de Penman Modifiée (Cf. Annexes V et VI)

Les nombreuses difficultés de détermination des superficies respectives dédiées à chaque culture limitent le calcul des volumes prélevés par la méthode d'évaluation des besoins en eau car les suppositions effectuées sur les superficies unitaires restent seulement approximatives. De plus, certains paramètres climatiques manquants pour la détermination de l'évapotranspiration de référence sont approximés dans les calculs.

III.2.2 Evaluation de la recharge

La recharge ou l'alimentation d'une nappe peut être défini comme étant l'apport d'eau externe, de toutes origines, à un aquifère (Ndiaye, 2008). Le processus de recharge est étroitement lié au cycle de l'eau qui est composé de la pluviométrie, de l'infiltration, du ruissellement et de l'évapotranspiration. Il existe des mécanismes de recharge directe et indirecte.

La quantité d'eau précipitée, après interception se répartit en ruissellement, écoulement hypodermique et infiltration. L'infiltration est un phénomène de propagation verticale de l'eau de pluie vers les tranches de sols profondes et les nappes : il s'agit d'un mécanisme de recharge directe qui sera étudié dans les prochains paragraphes. D'après les travaux de Ndiaye en 2008, l'effet de la recharge directe sur le niveau piézométrique de la nappe se fera sentir avec une remontée du niveau piézométrique dans le temps par rapport à la pluie advenue.

III.2.2.1 Bilan de THORNTHWAITE

Principe de la méthode du bilan de THORNTHWAITE

La méthode du bilan de THORNTHWAITE utilise la notion de « bilan hydrique à l'échelle d'un bassin versant » c'est-à-dire qu'elle est fondée sur l'hypothèse selon laquelle pendant un intervalle de temps donné, le total des apports d'eau dans un bassin versant est égal au total des sorties d'eau à l'intérieur de ce bassin versant sommé à la variation positive ou négative du volume d'eau stocké dans le bassin.

Ce bilan peut s'écrire sous la forme d'une équation faisant intervenir divers paramètres :

$$P = E + I + R + \Delta S \quad (\text{Equation N}^\circ 20)$$

Avec

P : valeur des hauteurs des précipitations en mm

E : valeur de l'évapotranspiration potentielle en mm

I : valeur de la hauteur d'eau infiltrée qui recharge la nappe en mm

R : valeur de la hauteur d'eau ruisselée en mm

Cette même équation peut se réécrire en d'autres termes faisant intervenir la réserve facilement utilisable du sol RFU :

$$RFU_{i-1} + P_i - ETo_i - RFU_i = I_i + R_i \quad (\text{Equation N}^\circ 21)$$

Avec

RFU_{i-1} : Valeur de la Réserve Facilement Utilisable du mois précédent en mm

P_i : Valeur de la somme des précipitations du mois de calcul considéré en mm

ETo_i : Valeur de l'Evapo Transpiration Potentielle du mois de calcul considéré en mm

RFU_i : Valeur de la Réserve Facilement Utilisable du mois de calcul considéré en mm

I_i : Valeur de la hauteur d'eau infiltrée (rechargée) du mois de calcul considéré en mm

Dans les plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla, la RFU maximale du sol de texture argilo limoneuse est égale à 100 mm/m et le mois de début des calculs est celui où la RFU du sol est maximale. Ce mois de début des calculs, correspondant au mois d'Août pour les deux zones d'étude, possède la plus grande valeur positive du calcul de l'expression P-ETo.

La résolution de cette équation nous permet d'une part de trouver les valeurs d'évapotranspiration réelle pour chaque mois :

❑ Si $RFU_i > 0$ alors $ETR_i = ETo_i$

❑ Si $RFU_i = 0$ alors $ETR_i = P_i + RFU_i$

D'autre part, elle nous permet de trouver la valeur annuelle de la hauteur de pluie efficace de laquelle la part de ruissellement doit être déduite pour trouver la valeur réelle de la hauteur d'eau infiltrée dans l'aquifère alluvial concerné suivant la formule :

$$\text{Recharge (I)} = (\text{I} + \text{R}) - \text{R} \quad (\text{Equation N}^\circ 22)$$

Avec

I: Valeur de la hauteur d'eau infiltrée (rechargée) annuellement en mm

R: Valeur de la hauteur d'eau ruisselée annuellement en mm

La part d'eau ruisselée peut être déterminée à partir de la formule de calcul du coefficient de ruissellement C_r qui est le rapport entre la lame d'eau tombée participant au ruissellement et la pluie effectivement tombée sur le sol :

$$C_r = \frac{L_{eR}}{L_{eP}} \leftrightarrow L_{eR} = R = C_r \times L_{eP} \quad (\text{Equation N}^\circ 23)$$

Avec

C_r : Coefficient de ruissellement en pourcentage

L_{eR} : lame d'eau tombée participant au ruissellement en mm

L_{eP} : lame d'eau précipitée effectivement tombée sur le sol

Le calcul du coefficient de ruissellement pour une période donnée passe par la décomposition d'hydrogrammes des crues tracés à partir des données collectées par les stations de jaugeage de la zone étudiée.

Le but de l'utilisation de la méthode du bilan de THORNTHWAITE étant de connaître la valeur de la hauteur annuelle d'eau rechargée dans les aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla, les volumes annuels d'eau rechargés dans ces aquifères seront obtenus à partir de l'application de la formule finale suivante :

$$\text{VAR (m}^3\text{)} = S_{\text{aq}} \text{ (m}^2\text{)} \times \text{Hr}_{\text{THORNTHWAITE}} \text{ (m)} \text{ (Equation N}^\circ\text{24)}$$

Avec

VAR : volume annuel d'eau souterraine rechargé

S_{aq} : superficie de l'aquifère alluvial

Hr_{THORNTHWAITE} : hauteur annuelle d'eau souterraine rechargée obtenue par la Méthode du bilan de THORNTHWAITE

✚ Matériel de mise en œuvre de la méthode du bilan de THORNTHWAITE

La connaissance des valeurs moyennes interannuelles de la RFU, des précipitations, de l'évapotranspiration de référence dans les zones d'étude sont essentielles à la mise en œuvre de la méthode du bilan de THORNTHWAITE. Les rapports pédologiques du BUNASOL relatifs aux régions des Cascades et des Hauts bassins instruisent sur la nature et les caractéristiques des sols en présence dans les plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla, sols qui ont été décrits plus haut (dans la partie I.2.4). Les données météorologiques sur une période de 30 ans (1981 à 2010) collectées auprès de la DCRM et de la DRARHASA et celles plus récentes tirées de la base de données du PADI- BF 101 fournissent des informations relatives à l'évapotranspiration et aux précipitations interannuelles.

✚ Hypothèses et limites d'application de la méthode du bilan de THORNTHWAITE

Le calcul de la recharge des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla par la méthode du bilan de THORNTHWAITE prend en compte les différentes hypothèses qui suivent :

- **Hypothèse 1** : Les sols en présence dans les plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla étant à dominance argilo-limoneuse, la Réserve Facilement Utilisable maximale considérée pour les calculs est prise égale à la Réserve Facilement Utilisable des sols argilo- limoneux

$$\text{RFU}_{\text{max}} = \text{RFU}_{\text{sol argilo-limoneux}} = 2/3 \text{RU}_{\text{sol argilo limoneux}}$$

- **Hypothèse 2** : l'Evapotranspiration de référence prise en compte pour les calculs est celle calculée par la formule de Penman modifiée
- **Hypothèse 3** : Le mois de début des calculs de recharge est le mois où la Réserve Facilement Utilisable est maximale et ce mois correspond au mois où la valeur (P-ET_o) est maximale

L'hétérogénéité des sols des plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla entrave la connaissance plus précise de leur Réserve Facilement utilisable, influant donc sur l'exactitude des résultats des calculs de recharge par la méthode du bilan de THORNTHWAITE.

II.2.2.2 Fluctuations piézométriques

✚ Principe de la méthode des fluctuations piézométriques

Le niveau piézométrique d'une colonne d'eau peut être défini comme étant le niveau de la colonne d'eau qui équilibre la pression hydrostatique régnant au bas de cette même colonne. Il se calcule de la manière suivante :

$$H (m) = Z (m) - n (m) \text{ (Equation N°25)}$$

Avec

H : niveau piézométrique ou charge piézométrique

Z : altitude de l'ouvrage

n : profondeur de l'eau dans cet ouvrage

La méthode des variations piézométriques utilise pour l'estimation de la recharge **la moyenne interannuelle des sommes des variations mensuelles positives des niveaux statiques des piézomètres alluviaux**. Pour une année donnée, on effectue en premier lieu pour chaque piézomètre la somme des variations mensuelles positives des charges piézométriques. Ensuite une moyenne tenant compte des superficies zones d'influence de chaque piézomètre est calculée pour trouver la hauteur d'eau infiltrée dans les plaines alluviales.

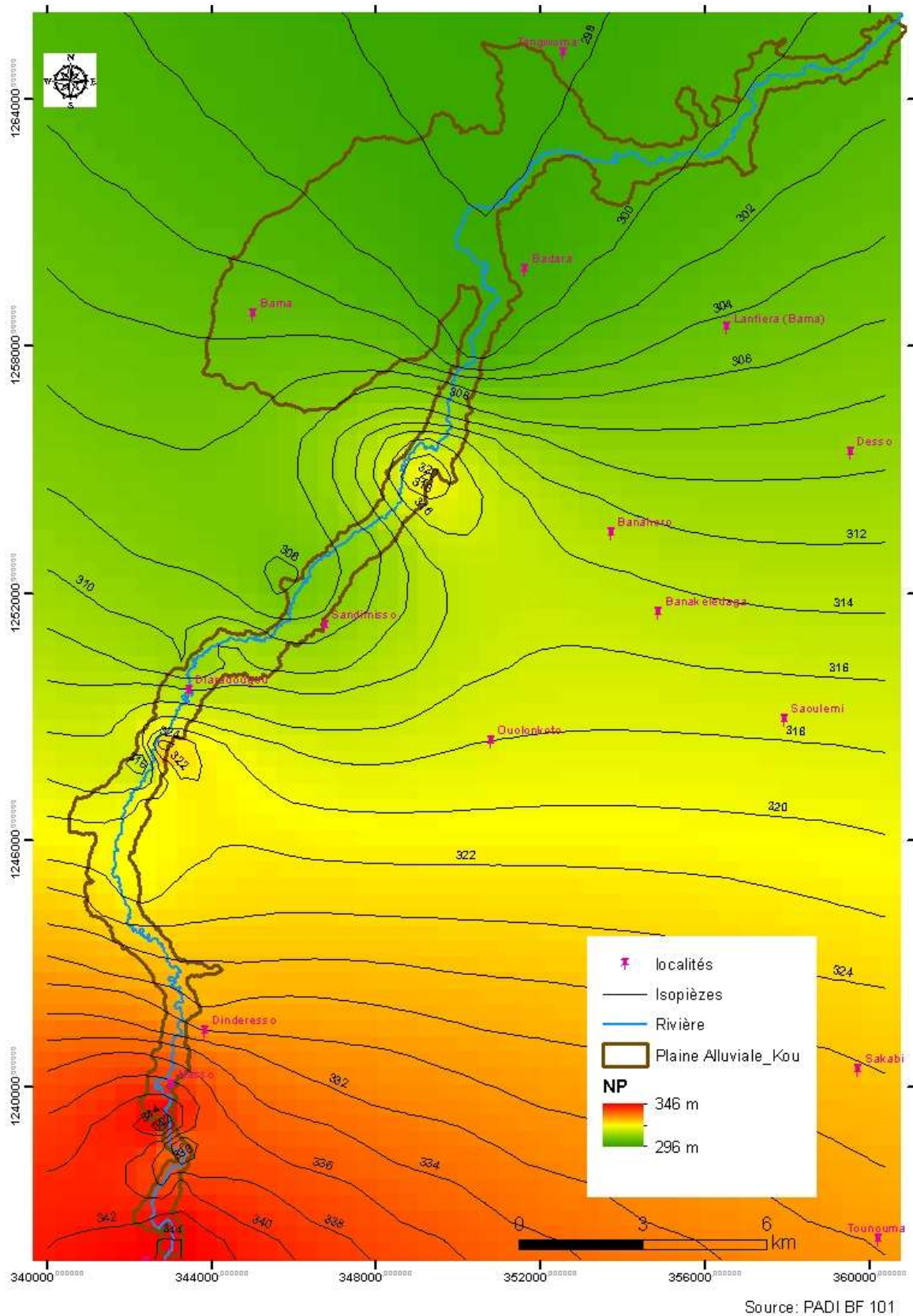


Figure 14: Carte piézométrique de la plaine alluviale du Kou

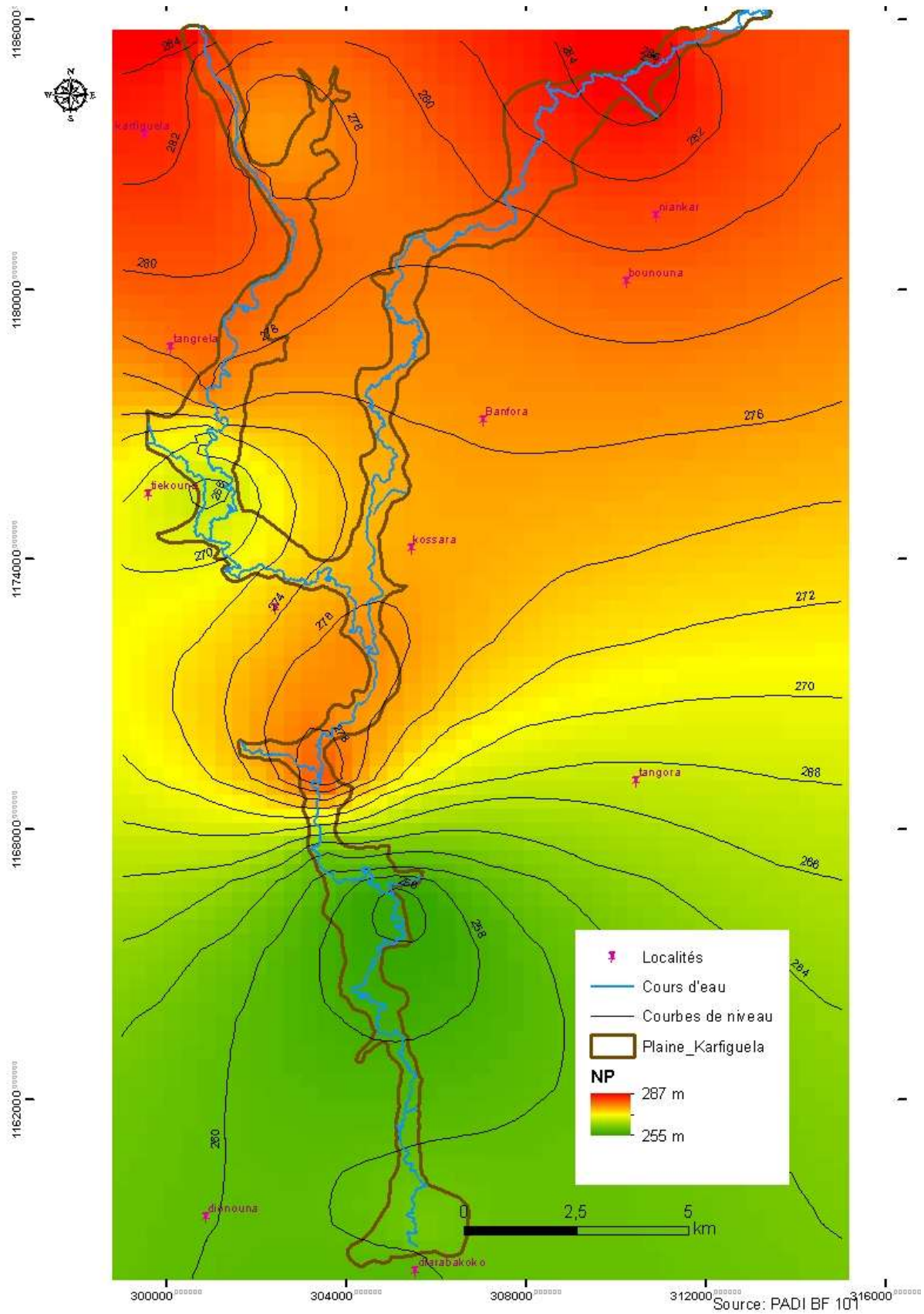


Figure 15: Carte piézométrique de la plaine alluviale de Karfiguéla

En effet, pour une différence mensuelle ΔH des niveaux piézométriques en mètres entre une valeur de niveau statique H_2 relevée au mois i et une valeur de niveau statique H_1 relevée au mois $i-1$ et pour une porosité de drainage η_e de l'aquifère alluvial considéré :

- Si $H_2 > H_1$, il y a augmentation de la charge piézométrique

Alors **Recharge (m) = $\Delta H (m) \times S = (H_2 - H_1) (m) \times S$**

- Si $H_2 \leq H_1$, il y a vidange ou constance de la charge piézométrique

Alors **Recharge(m) = 0**

La formule de calcul de la recharge par la méthode des fluctuations piézométriques s'écrit par conséquent comme suit :

$$\mathbf{VAR (m^3) = S_{aq} (m^2) \times M (m) \times \eta_e}$$

VAR : volume annuel d'eau souterraine rechargé

S_{aq} : superficie de l'aquifère alluvial

M : moyenne interannuelle des variations mensuelles piézométriques positives

η_e : porosité de drainage moyenne de l'aquifère alluvial

Mise en œuvre de la méthode des fluctuations piézométriques

La connaissance des porosités efficaces des aquifères alluviaux et des niveaux statiques relevés mensuellement au niveau des piézomètres alluviaux (disponibles dans la base de données du PADI- BF101) est indispensable à l'application de la méthode des fluctuations piézométriques pour le calcul de la recharge.

Les porosités efficaces par zones de l'aquifère alluvial de Karfiguéla et celui du Kou ont été déterminées par différents auteurs à travers des essais de nappe (ou essais longue durée). En tenant compte des superficies respectives des zones concernées par les essais, moyenne des coefficients d'emmagasinement trouvés dans la plaine alluviale de Karfiguéla est égale à 0.849% (PADI-BF101, 2015) et la moyenne des coefficients d'emmagasinement trouvés dans la plaine alluviale du Kou est égale à 0.850% (NDIAYE, 2008).

✚ Hypothèses et limites d'application de la méthode des fluctuations piézométriques

Les données essentielles à l'application de cette méthode étant disponibles, l'émission d'hypothèses spécifiques ne semble pas nécessaire.

L'utilisation d'une moyenne tenant compte des superficies d'influence relève d'une simplification des propriétés physiques réelles des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla.

III.3 Calcul des réserves d'eau souterraine

La réalimentation de la nappe introduit les termes de ressource et de réserve qui qualifient des volumes d'eau dans l'aquifère.

Le terme « réserve totale » désigne pour les aquifères alluviaux étudiés la somme de leur « ressource renouvelable » et de leur « réserve permanente ». Elle est aussi égale au produit de l'épaisseur saturée de l'aquifère alluvial, de sa porosité de drainage et de sa superficie.

La « ressource renouvelable » est le volume d'eau souterraine rechargé et est donc variable en fonction des années.

La « réserve permanente » représente le volume d'eau souterraine déjà stocké dans l'aquifère.

La réserve en eau exploitable est la part de la réserve en eau totale de l'aquifère alluvial qu'il est possible de prélever sans modifier ses caractéristiques hydrodynamiques. **La réserve exploitable d'eau souterraine est donnée par la différence du niveau piézométrique actuel avec le niveau auquel on accepte de rabattre la nappe, multiplié ensuite par sa surface et sa porosité de drainage.**

Dans le cadre du calcul de cette réserve exploitable pour les aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla qui renferment des nappes libres, nous ferons l'hypothèse que le niveau

piézométrique actuel est égal à la moyenne des niveaux piézométriques relevés dans les piézomètres.

Le niveau auquel on accepte de rabattre la nappe est celui correspondant au niveau de crise pour un aquifère alluvial c'est-à-dire le niveau qu'il atteindrait pour une sécheresse de période de retour de 10 ans¹.

III.4 Bases des conclusions sur la durabilité des nappes alluviales

La durabilité de la ressource en eau souterraine des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla dépend de nombreux facteurs internes et externe. Un bilan ΔQ des entrées et des sorties dans ces aquifères, mis en relation avec le volume de la ressource exploitable pourrait permettre d'estimer le nombre d'années d'exploitation à venir :

¹ Source : bulletin règlementaire de sécheresse N°6 de la région de Champagne-Ardenne

$$\Delta Q = (V_R + V_{Ri_P} + V_{Ap_P} + V_{L_P}) - (V_P + V_{P_Ri} + V_{P_la})$$

Avec

V_R : volume de la recharge en m^3

V_{Ri_P} : volume déchargé dans l'aquifère de la plaine alluviale par la rivière en m^3

V_{Ap_P} : Volume parvenant à l'aquifère alluvial provenant de l'aquifère profond en m^3

V_{L_P} : Volume parvenant à l'aquifère alluvial provenant des pertes par irrigation en m^3

V_P : volume des prélèvements en m^3

V_{P_Ri} : Volume apporté à la rivière par l'aquifère de la plaine alluviale en m^3

V_{P_la} : Volume perdu de façon latérale en m^3

$$X = \frac{V_{RESE}}{|\Delta Q|}$$

Avec

X : le nombre d'années d'exploitation à venir

V_{RESE} : le volume de la ressource en eau exploitable en m^3

Et en supposant les composantes du bilan sont stationnaires

Les données nécessaires à la mise en œuvre du bilan d'eau des aquifères sont tous disponibles pour l'aquifère alluvial du Kou. Par contre pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla, seuls les volumes rechargés et prélevés sont disponibles.

VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 Taux d'exploitation

IV.1.1 Estimation des prélèvements

IV.1.1.1 **Volumes prélevés estimés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés**

Les résultats de l'estimation des volumes prélevés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés dans la plaine alluviale du Kou sont répertoriés dans les tableaux et figurent qui suivent (les détails des calculs figurent aux annexes VII et VIII).

Les deux campagnes agricoles de la période de sécheresse s'étendent sur une durée de 8 mois. Cependant on observe un ralentissement du rythme de pompage vers la fin du cycle cultural, période où les cultures tendent à la maturité. Afin de prendre en compte cette diminution des prélèvements, une période de 28 semaines soit 7 mois de pompage effectif a été considérée dans les deux plaines alluviales.

Aquifère alluvial du Kou

De façon générale, les résultats obtenus prouvent que les paysans de la plaine alluviale du Kou exploitent de grandes quantités d'eau souterraine pour l'agriculture irriguée car le volume total prélevé est de l'ordre de $4.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Cf. Tableau I). Les valeurs obtenues montrent aussi que la quasi-totalité des prélèvements d'eau souterraine dans l'aquifère alluvial du Kou s'effectuent par des motopompes. Les pompes à pédales et les arrosoirs se révèlent comme les moyens d'exhaure d'eau souterraine les moins utilisés avec respectivement 0,08 % et 0,02 % des prélèvements. De plus, ces prélèvements d'eau souterraine concernent une partie des localités hébergées dans la plaine alluviale du Kou à savoir Sandimisso, Sonsogona, Nasso, Dinderesso et Kokoroué.

Tableau I: Volumes prélevés calculés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés dans la plaine alluviale du Kou

Volumes calculés	Valeurs en m ³ pour l'aquifère alluvial du Kou	Pourcentages
Volume prélevé par semaine par les motopompes	163 767,90	
Volume prélevé pendant 7 mois de sécheresse par les motopompes	4 585 501,20	99,91 %
Volume prélevé par semaine par les pompes à pédales	132,68	
Volume prélevé pendant 7 mois de sécheresse par les pompes à pédales	3 715,04	0,08 %
Volume prélevé par semaine par les arrosoirs	4,40	
Volume prélevé pendant 7 mois de sécheresse par les arrosoirs	123,20	0,002 %
Volume total prélevé pendant 7 mois de sécheresse	4 589 339,44	100 %

Les plus grandes quantités d'eau souterraine prélevées dans l'aquifère alluvial du Kou sont tirées par les agriculteurs des villages de Diaradougou, Dinderesso et Sandimisso (Cf. Figure 10) tandis que les exploitants des villages de Nasso, Sonsogona et Kokoroué ont les consommations les plus faibles.

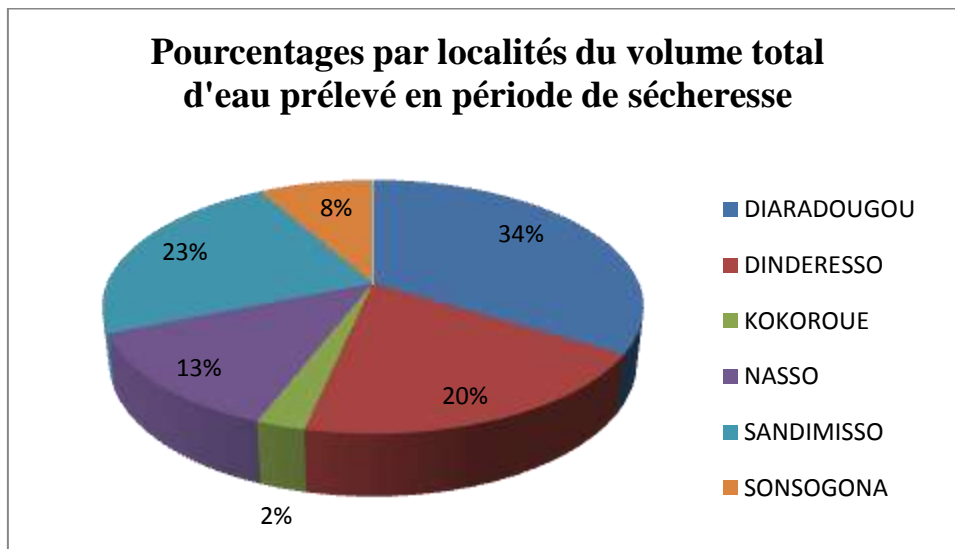


Figure 16: Diagramme circulaire 3D des pourcentages par localités (de la plaine alluviale du Kou) du volume total prélevé calculé par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés

Aquifère alluvial de Karfiguéla

Dans la plaine alluviale de Karfiguéla, l'eau souterraine est peu exploitée avec une quantité totale prélevée de l'ordre de $1,8 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ (Cf. Tableau II). Les localités qui exploitent l'eau souterraine dans la plaine alluviale de Karfiguéla sont les villages de Karfiguéla, Kitobama, Lemouroudougou et Siniena. De plus les motopompes sont les moyens d'exhaure les plus utilisés car elles permettent de prélever environ 99.92 % des volumes d'eau souterraines. Les arrosoirs sont peu utilisés dans la plaine alluviale de Karfiguéla (0.08 % des prélèvements).

Tableau II : Volumes prélevés calculés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés dans la plaine alluviale de Karfiguéla

Volumes calculés	Valeurs en m^3 pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla	Pourcentages
Volume prélevé par semaine par les motopompes	6240,00	
Volume prélevé pendant 7 mois de sécheresse par les motopompes	174 720,00	99,92 %
Volume prélevé par semaine par les pompes à pédales	0,00	
Volume prélevé pendant 7 mois de sécheresse par les pompes à pédales	0,00	0,00 %
Volume prélevé par semaine par les arrosoirs	4,75	
Volume prélevé pendant 7 mois de sécheresse par les arrosoirs	133,00	0,08 %
Volume total prélevé pendant 7 mois de sécheresse	174 853,00	100 %

Dans la plaine alluviale de Karfiguéla, les agriculteurs des villages de Karfiguéla et Lemouroudougou prélèvent le plus de la quantité d'eau souterraine dédiée à l'irrigation avec respectivement 41 % et 42 % des prélèvements (Cf. Figure 10). Les agriculteurs de Siniena et Kitobama ont des pourcentages d'exploitation d'eau souterraine plus faibles.

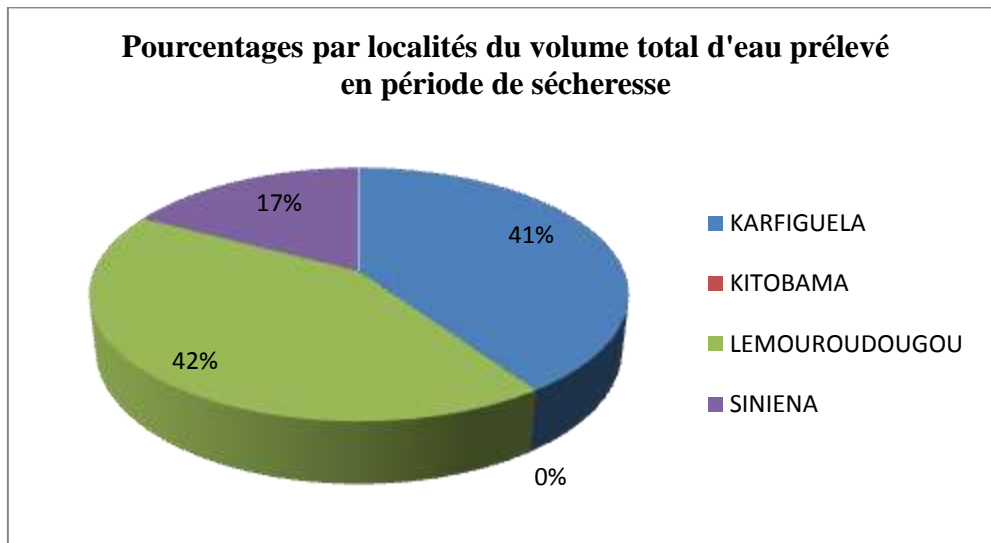


Figure 17 : Diagramme circulaire 3D des pourcentages par localités (de la plaine alluviale du Kou) du volume total prélevé calculé par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés

IV.1.1.2 Volumes prélevés estimés par la méthode basée sur l'évaluation des besoins en eau des cultures

L'estimation des prélèvements par la méthode basée sur l'évaluation des besoins en eau des cultures commence par le calcul de l'évapotranspiration de référence par différentes formules (Cf. annexes).

Les graphiques comparatifs (Cf. Figure 12 et Figure 13) traduisent bien une supériorité des valeurs de l'évapotranspiration de référence calculée par la formule de Penman modifiée. Néanmoins, les valeurs d'ET₀ obtenues par la formule de Penman modifiée sont les plus fiables car prenant en compte le plus de paramètres climatiques (vitesse du vent, rayonnements net et global, pression de vapeur...) et recommandées par la FAO. Une sous-estimation de l'évapotranspiration de référence dans nos zones d'étude par les formules de Turc et de Blaney et Criddle apparaît aussi dans les résultats.

L'évapotranspiration de référence calculée dans les deux zones d'étude avec la formule de Thornthwaite n'utilise que la température et un facteur dépendant de la latitude, ce

qui peut expliquer l'imprécision de ses résultats qui sous estiment eux aussi l'évapotranspiration de référence dans les plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla.

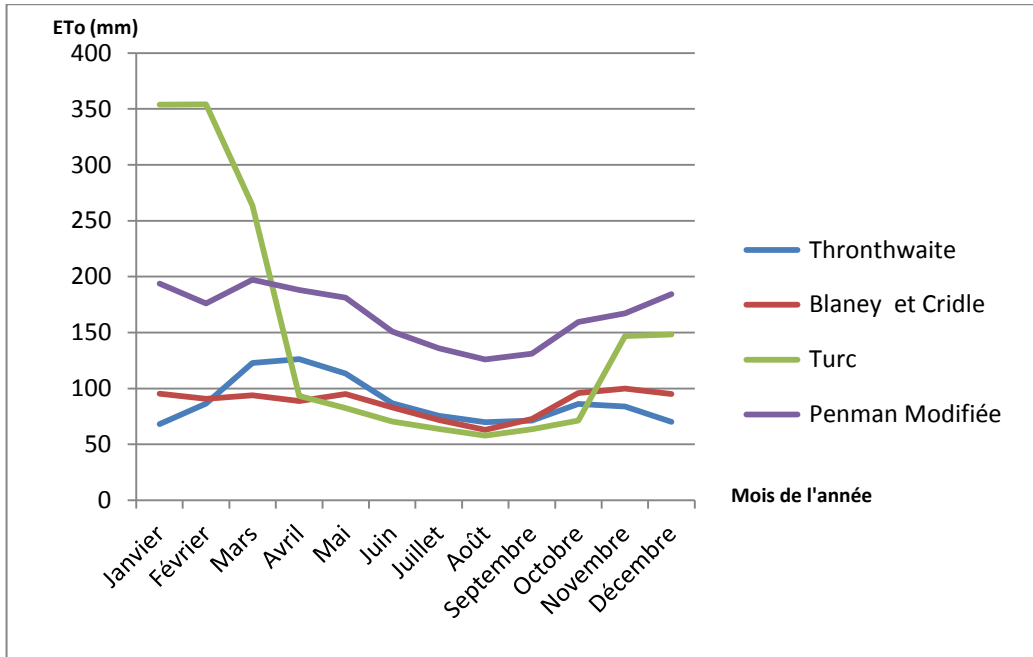


Figure 18: Courbe comparative des valeurs de l'évapotranspiration de référence dans la plaine alluviale du Kou

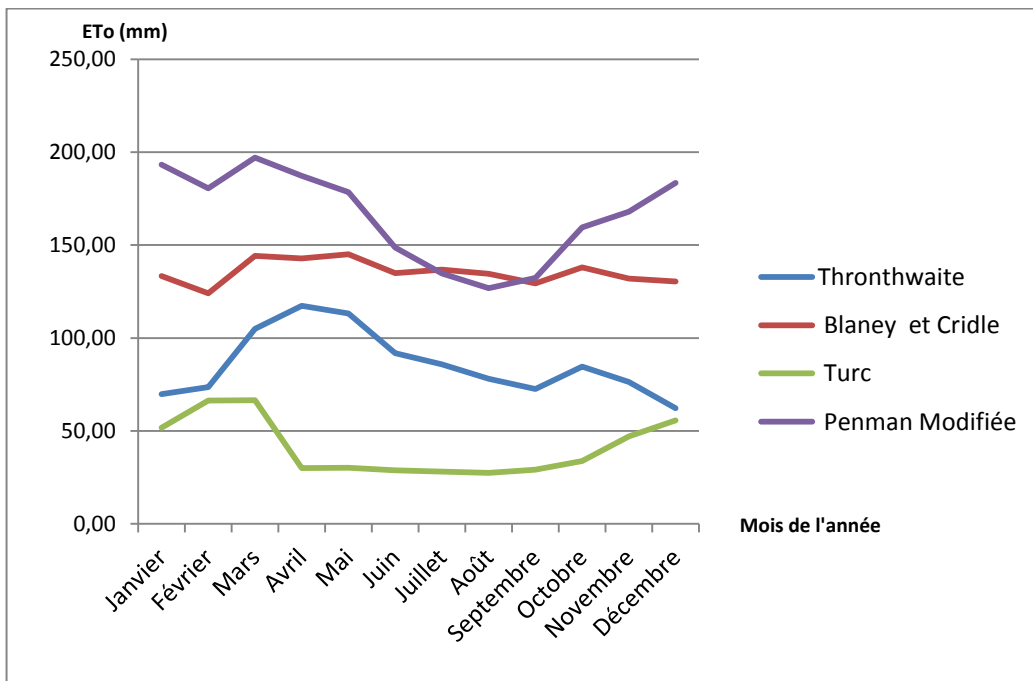


Figure 19: Courbe comparative des valeurs de l'évapotranspiration de référence dans la plaine alluviale du Karfiguéla

L' ET_0 Penman modifiée multipliée par les coefficients culturaux a servi à calculer les valeurs de l'évapotranspiration maximale mensuelle pour toute la période de sécheresse dans les plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla.

Les résultats des calculs de l'ETM montrent pour la plaine alluviale du Kou des valeurs d'évapotranspiration maximale en Octobre pour les pieds de banane et en Avril pour les cultures du chou et du maïs (Cf. Tableau III). Cela peut s'expliquer par les fortes températures et la sécheresse de l'air à ces périodes de l'année.

Tableau III: Valeurs calculées de l'évapotranspiration maximale en fonction des cultures dans la plaine alluviale du Kou

Mois de sécheresse	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
Eto Penman modifiée	159.427	167.297	184.313	193.897	176.030	197.280	188.017	181.087
Kc Banane	1.100	0.900	0.800	0.400	0.400	0.450	0.500	0.600
ETM Banane (mm)	175.369	150.567	147.451	77.559	70.412	88.776	94.008	108.652
ETM Banane (mm/j)	5.657	5.019	4.756	2.502	2.515	2.864	3.134	3.505
Kc Chou	0.460	0.750	0.990	0.950	0.450	0.730	0.970	0.960
ETM Chou (mm)	73.336	125.473	182.470	184.202	79.214	144.014	182.376	173.843
ETM Chou (mm/j)	2.366	4.182	5.886	5.942	2.829	4.646	6.079	5.608
Kc Maïs	0.500	0.790	1.130	0.850	0.470	0.780	1.110	0.900
ETM Maïs (mm)	79.713	132.164	208.274	164.812	82.734	153.878	208.699	162.978
ETM Maïs(mm/j)	2.571	4.405	6.719	5.317	2.955	4.964	6.957	5.257

Dans la plaine alluviale de Karfiguéla, les pics de l'ETM apparaissent aux mêmes périodes que celles du Kou (Cf. Tableau IV) c'est-à-dire au cours du mois d'Octobre pour la banane et au cours du mois d'Avril pour le chou et le maïs.

Tableau IV: Valeurs calculées de l'évapotranspiration maximale en fonction des cultures dans la plaine alluviale de Karfiguéla

Mois de sécheresse	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
Eto Penman modifiée	159.478	168.056	183.467	193.299	180.537	197.079	187.203	178.559
Kc Banane	1.100	0.900	0.800	0.400	0.400	0.450	0.500	0.600
ETM Banane (mm)	175.426	151.251	146.774	77.319	72.215	88.685	93.601	107.136
ETM Banane (mm/j)	5.659	5.042	4.735	2.494	2.579	2.861	3.120	3.456
Kc Chou	0.460	0.750	0.990	0.950	0.450	0.730	0.970	0.960
ETM Chou (mm)	73.360	126.042	181.633	183.634	81.242	143.867	181.586	171.417
ETM Chou (mm/j)	2.366	4.201	5.859	5.924	2.901	4.641	6.053	5.530
Kc Maïs	0.500	0.790	1.130	0.850	0.470	0.780	1.110	0.900
ETM Maïs (mm)	79.739	132.764	207.318	164.304	84.852	153.721	207.795	160.703
ETM Maïs (mm/j)	2.572	4.425	6.688	5.300	3.030	4.959	6.926	5.184

L'ETM permet de choisir le facteur de tarissement p. Selon WHITERS et VIPOND (KEITA, 2013), la réserve utile pour un sol argilo-limoneux est égale à **150 mm/m**. Par conséquent, pour chaque groupe de cultures pratiquées en saison sèche et en fonction de la profondeur maximale de la culture concernée, on peut calculer les valeurs de RU correspondantes. Les valeurs de RU pour la banane, le chou et le maïs sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau V: Valeurs de la réserve utile RU du sol en fonction du groupe de culture

Groupe de culture	Profondeur maximale d'enracinement Zr(m)	Valeurs de RU (mm)
Banane	0.9	135
Chou	0.5	75
Maïs	1.7	255

La base de données dont dispose le PADI permet de trouver les superficies totales dédiées à chaque culture (Cf. Tableau VI) en additionnant les superficies unitaires considérées pour chaque groupe de culture.

Tableau VI: Superficies totales dédiées à chaque groupe de culture

Groupes de cultures	Superficies totales pour la plaine alluviale de Karfiguéla (ha)	Superficies totales pour la plaine alluviale du Kou (ha)
Banane	0.00	116.00
Chou	4.00	75.00
Maïs	2.50	113.50

L'efficacité globale d'irrigation est égale au produit de l'efficacité d'application (Cf. Tableau VIII) par l'efficacité de distribution (Cf Tableau VII).

On a donc pour des canaux en terre creusés dans un sol argilo-limoneux une efficacité d'irrigation globale E_{ig} égale à $\frac{(80\%+85\%)}{2} \times 60\% \approx 53\%$.

Tableau VII: Valeurs de l'efficacité de distribution pour l'irrigation gravitaire

Types de sol	Valeurs de E_d			
	Canaux en terre			Canaux revêtus
	Sable	Limon	Argile	
Longueur de canal				
Importante (> 2000 m)	60%	70%	80%	95%
moyenne (200-2000m)	70%	75%	85%	95%
faible (< 200 m)	80%	85%	90%	95%

Tableau VIII: Valeurs de l'efficacité d'application pour l'irrigation gravitaire

Méthode	E_a (%)
Irrigation de surface	60
Irrigation par aspersion	75
Irrigation goutte à goutte	90

Les résultats définitifs obtenus pour l'estimation des volumes prélevés par la méthode basée sur l'évaluation des besoins en eau des cultures sont consignés deux tableaux.

Le premier tableau présenté (Cf. Tableau IX) résume les besoins en eau d'irrigation des cultures de la plaine alluviale du Kou. Nous remarquons que le besoin total en eau est considérable car il est de l'ordre de $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Tableau IX: Volumes prélevés estimés par la méthode d'évaluation des besoins en eau des cultures dans la plaine alluviale du Kou

Mois de sécheresse	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	TOTAL
ETM Banane (mm/j)	5.66	5.02	4.76	2.50	2.51	2.86	3.13	3.50	
p Banane	0.35	0.35	0.40	0.58	0.58	0.58	0.48	0.48	
RU (mm)	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	
Dp Banane (mm)	47.25	47.25	54.00	77.63	77.63	77.63	64.13	64.13	509.63
A (ha)	116.00	116.00	116.00	116.00	116.00	116.00	116.00	116.00	
Vp Banane (m³)	54810.00	54810.00	62640.00	90045.00	90045.00	90045.00	74385.00	74385.00	591165.00
E_{ig}	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	
Vb Banane (m³)	104400.00	104400.00	119314.29	171514.29	171514.29	171514.29	141685.71	141685.71	1126028.57
ETM Chou (mm/j)	2.37	4.18	5.89	5.94	2.83	4.65	6.08	5.61	
p Chou	0.58	0.40	0.35	0.35	0.58	0.40	0.33	0.35	
RU (mm)	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	
Dp Chou (mm)	43.13	30.00	26.25	26.25	43.13	30.00	24.38	26.25	249.38
A (ha)	51.00	51.00	51.00	51.00	51.00	51.00	51.00	51.00	
Vp Chou (m³)	21993.75	15300.00	13387.50	13387.50	21993.75	15300.00	12431.25	13387.50	127181.25
E_{ig}	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	
Vb Chou (m³)	41892.86	29142.86	25500.00	25500.00	41892.86	29142.86	23678.57	25500.00	242250.00
ETM Maïs (mm/j)	2.57	4.41	6.72	5.32	2.95	4.96	6.96	5.26	
p Maïs	0.80	0.60	0.50	0.55	0.80	0.60	0.50	0.55	
RU (mm)	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	
Dp Maïs (mm)	204.00	153.00	127.50	140.25	204.00	153.00	127.50	140.25	1249.50
A (ha)	113.50	113.50	113.50	113.50	113.50	113.50	113.50	113.50	
Vp Maïs (m³)	231540.00	173655.00	144712.50	159183.75	231540.00	173655.00	144712.50	159183.75	1418182.50
E_{ig}	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.45
Vb Maïs (m³)	441028.57	330771.43	275642.86	303207.14	441028.57	330771.43	275642.86	303207.14	2701300.00
Somme des volumes pratiques (Vp) de la banane, du chou et du maïs									2136528.75
Somme des volumes bruts (Vb) de la banane, du chou et du maïs									4069578.57

De façon plus détaillée, nous pouvons noter que le groupe du Maïs qui englobe les cultures céréalières constitue le groupe le plus consommateur d'eau dans la plaine alluviale du Kou (Cf. Figure 14). En effet les trois dernières années précédant notre étude ont été des années de promotion de la semence améliorée de maïs appelée « MAIS BONDOFA », ce qui a poussé les agriculteurs à augmenter les superficies dédiées au maïs.

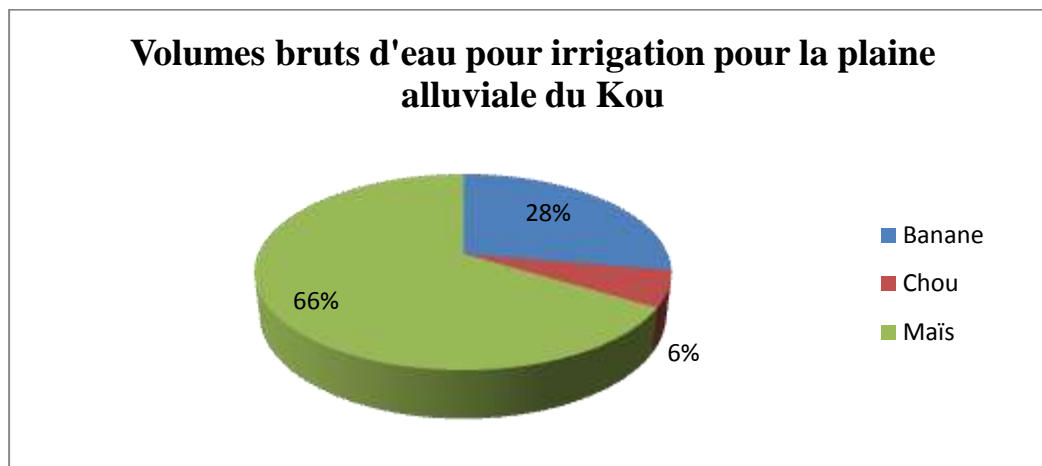


Figure 20: Diagramme circulaire 3D montrant la répartition des volumes bruts d'eau d'irrigation en fonction des cultures dans la plaine alluviale du Kou

En outre, dans la plaine alluviale du Kou, les cultures fruitières requièrent de grandes quantités d'eau et se classent en 2^{ème} position après les cultures céréalières. Les cultures maraîchères représentées par le groupe du chou sont les moins consommatrices d'eau dans la plaine du Kou.

Le deuxième tableau présenté (Cf. Tableau X) résume quant à lui les besoins en eau d'irrigation des cultures de la plaine alluviale de Karfiguéla. Nous remarquons que le besoin total en eau est moins grand que celui de la plaine alluviale du Kou. Il est de l'ordre de $8 \cdot 10^4 \text{ m}^3$. Cela est dû au peu de superficies dédiées à l'agriculture irriguée par les eaux souterraines.

Tableau X : Volumes prélevés estimés par la méthode d'évaluation des besoins en eau des cultures dans la plaine alluviale de Karfiguéla

Mois de sécheresse	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	TOTAL
ETM Banane (mm/j)	5.66	5.04	4.73	2.49	2.58	2.86	3.12	3.46	
p Banane	0.35	0.35	0.40	0.58	0.58	0.58	0.48	0.48	
RU (mm)	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	
Dp Banane (mm)	47.25	47.25	54.00	77.63	77.63	77.63	64.13	64.13	509.63
A (ha)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Vp Banane (m³)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
E_{ig}	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	
Vb banane (m³)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETM Chou (mm/j)	2.37	4.20	5.86	5.92	2.90	4.64	6.05	5.53	
p Chou	0.58	0.40	0.35	0.35	0.58	0.40	0.33	0.35	
RU(mm)	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	
Dp Chou (mm)	43.13	30.00	26.25	26.25	43.13	30.00	24.38	26.25	249.38
A (ha)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	
Vp Chou (m³)	1725.00	1200.00	1050.00	1050.00	1725.00	1200.00	975.00	1050.00	9975.00
E_{ig}	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	
Vb chou (m³)	3285.71	2285.71	2000.00	2000.00	3285.71	2285.71	1857.14	2000.00	19000.00
ETM Maïs (mm/j)	2.57	4.43	6.69	5.30	3.03	4.96	6.93	5.18	
p Maïs	0.80	0.60	0.50	0.55	0.70	0.60	0.50	0.55	
RU (mm)	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	
Dp Maïs (mm)	204.00	153.00	127.50	140.25	178.50	153.00	127.50	140.25	1224.00
A (ha)	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	
Vp Maïs (m³)	5100.00	3825.00	3187.50	3506.25	4462.50	3825.00	3187.50	3506.25	30600.00
E_{ig}	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
Vb Mais (m³)	9714.286	7285.714	6071.429	6678.571	8500.000	7285.714	6071.429	6678.571	58285.714
Somme des volumes pratiques (Vp) de la banane, du chou et du maïs									40575.000
Somme des volumes bruts (Vb) de la banane, du chou et du maïs									77285.714

Dans la plaine alluviale de Karfiguéla également le groupe des cultures céréalières est celui qui consomme le plus d'eau (Cf. Figure 15). Viennent ensuite le groupe des cultures maraîchères dont les besoins en eau représentent 25 % du besoin total. La quasi-totalité des cultures fruitières représentées par le groupe de la banane est arrosée par les eaux de surface, raison pour laquelle leurs besoins en eau souterraine sont quasi nuls.

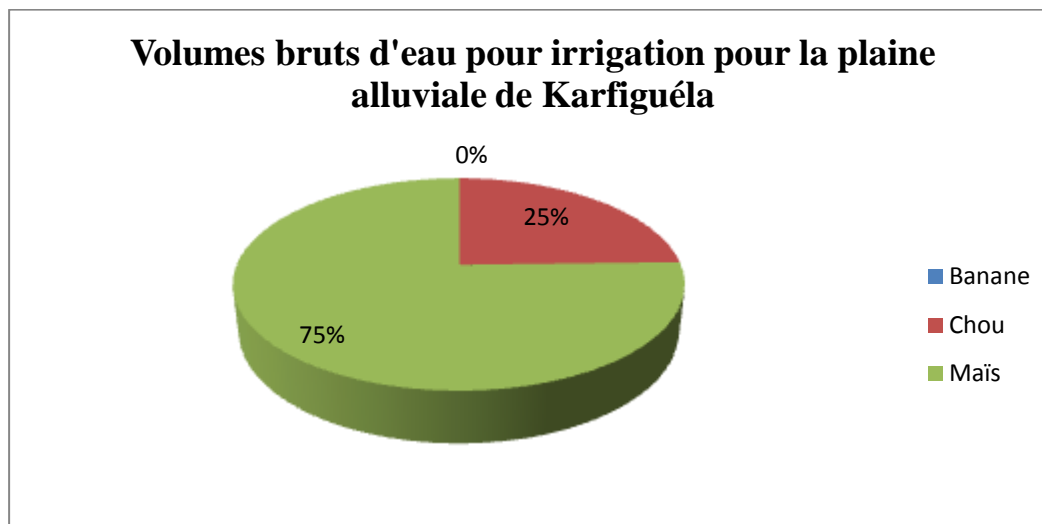


Figure 6: Diagramme circulaire 3D montrant la répartition des volumes bruts d'eau d'irrigation en fonction des cultures dans la plaine alluviale de Karfiguéla

La comparaison des volumes prélevés calculés par les deux méthodes d'estimation montre pour l'aquifère alluvial du Kou une différence brute (Cf. Tableau XI et Figure 16) de volumes égale à $519\,760,87\text{ m}^3$ d'eau (soit 11,32 %) et $97\,567,29\text{ m}^3$ (soit 55,79 %) pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla. Nous avons considéré dans la partie Matériel et Méthodes une efficacité de distribution des canaux égale à 82,5% afin de déterminer l'efficacité d'irrigation globale. Cela revient donc à dire que 7,5 % des volumes bruts d'eau (soit $38\,982,07\text{ m}^3$ d'eau pour le Kou et $7317,55\text{ m}^3$ d'eau pour Karfiguéla) transportés par les canaux sont susceptibles de retourner à l'aquifère alluvial par infiltration.

En dépit de ce phénomène qui réduit la différence de volume entre les deux méthodes d'estimation à $480\,778,80\text{ m}^3$ d'eau pour la plaine alluviale du Kou et à $90\,431,74\text{ m}^3$ d'eau pour la plaine alluviale de Karfiguéla, ces valeurs demeurent alarmantes et témoignent du gaspillage de l'eau souterraine dans les plaines alluviales du Kou et de Karfiguéla.

Tableau XI : Tableau comparatif des résultats des deux méthodes d'estimation des prélèvements utilisées

Aquifères alluviaux	Quantification des volumes prélevés	Besoins en eau des cultures	Différence en %
Aquifère alluvial du Kou	4,589 10 ⁶ m ³	4,070 10 ⁶ m ³	11,32 %
Aquifère alluvial de Karfiguéla	1,175 10 ⁵ m ³	7,729 10 ⁴ m ³	55,79 %

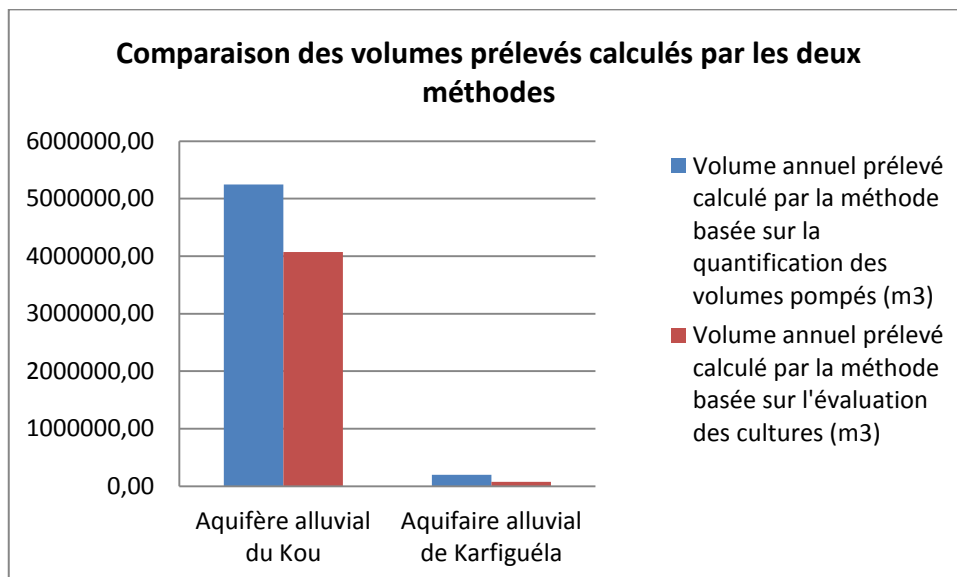


Figure 22: Histogramme groupé comparant les valeurs de volumes prélevés obtenus par les deux méthodes d'estimation

Le taux d'exploitation sera calculé à partir des volumes prélevés calculés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés car ils traduisent les prélèvements réels effectués par les agriculteurs dans les deux aquifères alluviaux. Néanmoins les valeurs des prélèvements obtenues par la méthode basée sur l'évaluation des besoins en eau des cultures correspondent aux volumes d'eau optimaux, volumes qui devraient normalement être prélevés des aquifères alluviaux et qui peuvent servir de repère pour la gestion des nappes alluviales du Kou et de Karfiguéla.

IV.1.3 Evaluation de la recharge

IV.1.3.1 Méthode du bilan de THORNTHWAITE

Aquifère alluvial du Kou

L'estimation de la recharge de l'aquifère alluvial du Kou par la méthode de Thornthwaite a nécessité le calcul préalable du coefficient de ruissellement à cause de la dégradation du couvert végétal du bassin versant.

La décomposition de l'hydrogramme des crues suivant, tracé avec la moyenne des données des dix dernières années (2000 à 2014) permet d'estimer la lame d'eau moyenne ruisselée :

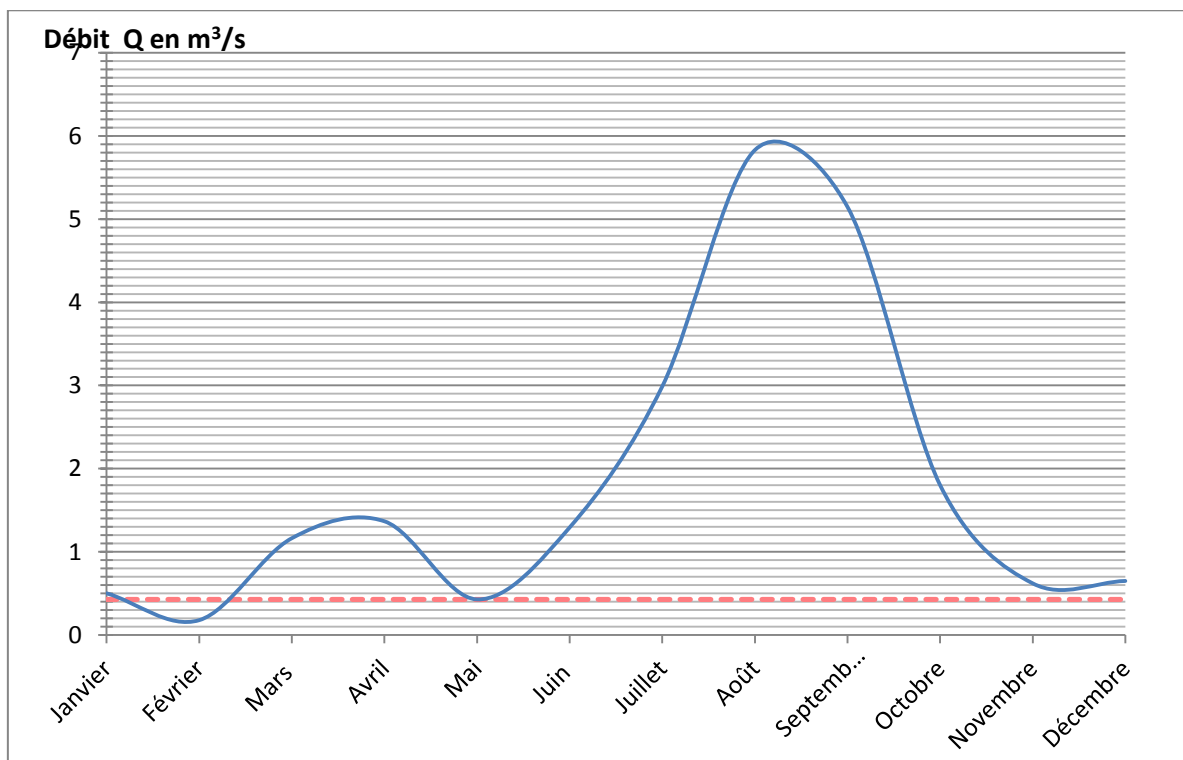


Figure 7: Hydrogramme des crues de la plaine alluviale du Kou

Le débit à l'exutoire $Q_{\text{exutoire}} = 21.969 \text{ m}^3/\text{s}$ soit une quantité totale d'eau écoulée de $692\,808\,494 \text{ m}^3$. Le débit de base Q_{base} tiré graphiquement du tracé de l'hydrogramme est égal à $0.428 \text{ m}^3/\text{s}$ soit $13\,497\,408 \text{ m}^3$ par an.

Le volume d'eau ruisselée, différence des deux volumes précédents ($Q_{\text{exutoire}} - Q_{\text{base}}$) s'élève à $679\,311\,086 \text{ m}^3$ d'eau. Cette quantité d'eau ruisselée rapportée à la superficie de la plaine alluviale (72.019 Km^2) nous donne une lame d'eau ruisselée égale à 9432.649 mm .

La lame d'eau moyenne précipitée ces dix dernières années (2000 à 2014) est égale à 941.145 mm d'où : $C_r = \frac{9432.649}{941.145} \leftrightarrow C_r = 10.023 \%$.

Les résultats du calcul de la hauteur annuelle de pluie efficace à partir de la méthode de Thornthwaite figurent dans le tableau suivant :

Tableau XII : Valeurs de hauteurs de pluie efficace obtenues par la méthode du bilan de THORNTHWAITE pour l'aquifère alluvial du Kou

Mois	ETP (mm)	P (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	I+R (mm)
Janvier	193.897	1.840	0.000	1.840	0.000
Février	176.030	2.413	0.000	2.413	0.000
Mars	197.280	7.843	0.000	7.843	0.000
Avril	188.017	37.797	0.000	37.797	0.000
Mai	181.087	80.973	0.000	80.973	0.000
Juin	150.830	131.703	0.000	131.703	0.000
Juillet	136.013	191.443	55.430	136.013	0.000
Août	125.810	260.220	100.000	125.810	89.840
Septembre	131.157	160.967	101.347	131.157	29.810
Octobre	159.427	53.717	0.000	153.717	0.000
Novembre	167.297	4.033	0.000	4.033	0.000
Décembre	184.313	0.097	0.000	0.097	0.000
Total (mm/an)		933.047			119.650

La **lame d'eau annuelle ruisselée** obtenue à partir de la hauteur annuelle totale d'eau précipitée et du coefficient de ruissellement est égale à **93. 519 mm/ an**. Cette valeur soustraite de la hauteur annuelle de pluie efficace (I+R) nous permet de trouver une hauteur annuelle d'eau souterraine rechargée égale à **26.130 mm / an**.

Par conséquent, pour l'aquifère alluvial du Kou :

<p>VAR méthode de Thornthwaite</p> <p>= 72 017 000 m² × 0.026130 m</p> <p>= 1 881 832.136 m³</p>
--

Aquifère alluvial de Karfiguéla

Le coefficient de ruissellement de l'aquifère alluvial de Karfiguéla est égal à 9.830 % (SANKANDE, 2012).

La hauteur annuelle de pluie efficace calculée à partir de la méthode de Thornthwaite figure dans ce tableau :

Tableau XIII : Valeurs de hauteurs de pluie efficace obtenues par la méthode du bilan de THORNTHWAITE pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla

Mois	ETP (mm)	P (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	I+R (mm)
Janvier	193.299	1.155	0.000	1.155	0.000
Février	180.537	1.797	0.000	1.797	0.000
Mars	197.079	16.770	0.000	16.770	0.000
Avril	187.203	60.670	0.000	60.670	0.000
Mai	178.559	101.888	0.000	101.888	0.000
Juin	148.607	145.530	0.000	145.530	0.000
Juillet	134.796	184.233	49.438	134.796	0.000
Août	126.758	265.458	100.000	126.758	88.137
Septembre	132.314	186.439	100.000	132.314	54.126
Octobre	159.478	62.236	2.758	159.478	0.000
Novembre	168.056	7.194	0.000	9.952	0.000
Décembre	183.467	1.464	0.000	1.464	0.000
Total (mm/an)		1034.833			142.263

La **lame d'eau annuelle ruisselée** obtenue à partir de la hauteur annuelle totale d'eau précipitée et du coefficient de ruissellement est égale à **101.724 mm/ an**. Cette valeur soustraite de la hauteur annuelle de pluie efficace (I+R) nous permet de trouver une hauteur annuelle d'eau souterraine rechargée égale à **40.539 mm / an**.

Par conséquent, pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla :

<p>VAR méthode de Thornthwaite</p> <p>= 46 496 000 m² × 0.040539 m</p> <p>= 1 884 891.950 m³</p>
--

IV.1.3.2 Méthode des fluctuations piézométriques

Aquifère alluvial du Kou

Les résultats de l'utilisation de la méthode des fluctuations piézométriques dans la plaine alluviale du Kou montrent que la moyenne interannuelle des variations piézométriques positives est égale à 1660 mm (Cf. Tableau XIV).

Le volume annuel d'eau souterraine rechargé peut donc être trouvé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{VAR}_{\text{méthode des fluctuations piézométriques}} \\ &= 72\,017\,000 \text{ m}^2 \times 1.660 \text{ m} \times 0.00850 \\ &= \mathbf{1\,016\,159.870 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

Tableau XIV: Valeurs de hauteurs annuelles d'eau rechargées calculées par la méthode des fluctuations piézométriques dans la plaine alluviale du Kou

Mois	P Nas 01		P Nas 02		Cumuls des variations piézométriques positives en m/an/piézomètre		Cumuls des variations piézométriques positives en mm/an/piézomètre		Moyenne des cumuls des variations piézométriques positives en mm/an
	Valeurs de H	ΔH	Valeurs de H	ΔH	P Nas 01	P Nas 02	P Nas 01	P Nas 02	
Janvier	337.17		336.565						
Février	336.8	0.37	336.365	0.2					
Mars	337.05	-0.25	336.485	-0.12					
Avril	336.65	0.4	336.305	0.18					
Mai	336.56	0.09	336.235	0.07					
Juin	336.56	0	336.265	-0.03					
Juillet	336.65	-0.09	336.305	-0.04					
Août	337.52	-0.87	336.985	-0.68					
Septembre	337.52	0	336.965	0.02					
Octobre	337.52	0	336.915	0.05					
Novembre	336.41	1.11	337.165	-0.25					
Décembre	336.58	-0.17	336.335	0.83	1.97	1.35	1970	1350	1660

Aquifère alluvial de Karfiguéla

Les résultats de l'utilisation de la méthode des fluctuations piézométriques dans la plaine alluviale de Karfiguéla montrent que la moyenne interannuelle des variations piézométriques positives est égale à 4804.745 mm (Cf. Annexe XI).

Le volume annuel d'eau souterraine rechargé peut donc être trouvé de la manière suivante :

VAR méthode des fluctuations piézométriques = 46 496 000 m ² × 4.804745 m × 0.00849 = 1 896 678,086 m³
--

La méthode du bilan de THORNTHWAITE et la méthode des fluctuations piézométriques donnent des résultats sensiblement égaux pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla car les volumes d'eau souterraine rechargés respectifs obtenus sont 1 884 891,950 m³ et 1 896 678,086 m³ soit une différence de 0,6%.

Par contre ces deux méthodes montrent une différence plus grande, 46%, pour l'aquifère alluvial du Kou dont le volume d'eau souterraine rechargé calculé par la méthode de THORNTHWAITE est égal à 1 881 832.136 m³ et celui calculé par la méthode des fluctuations piézométriques est égal à 1 016 159.870 m³. Cette différence pourrait s'expliquer par la plus faible densité du réseau piézométrique de la plaine alluviale du Kou par rapport à celui de Karfiguéla, faible densité qui affecte l'exactitude des moyennes des variations piézométriques positives par l'insuffisance des données.

Au regard de ces chiffres pour les aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla, les résultats de la méthode du bilan de THORNTHWAITE semblent les plus indiqués pour le calcul du taux d'exploitation. En effet, les données mises en œuvre dans le cadre cette méthode au calcul de la recharge des aquifères alluviaux sont suffisantes et fiables.

IV.1.4 Taux d'exploitation des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla

IV.1.4.1 Taux d'exploitation de l'aquifère alluvial du Kou

Le taux d'exploitation de l'aquifère alluvial du Kou a été calculé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{TE (\%)} &= \frac{\text{VAP calculé par la méthode basée sur quantification des volumes pompés (m}^3\text{)}}{\text{VAR calculé par la méthode du bilan de THORNTHWAITE (m}^3\text{)}} \times 100 \\ &= \frac{4\,589\,339,440}{1\,881\,832,136} \\ &= \mathbf{243,88 \%} \end{aligned}$$

Cette valeur de taux d'exploitation supérieure à 100% témoigne d'une nette surexploitation de l'eau souterraine de l'aquifère alluvial du Kou. Elle est principalement liée à la supériorité des volumes prélevés par rapport au volume de la recharge. Cette quantité énorme d'eau souterraine prélevée pourrait provenir de diverses sources hormis l'aquifère alluvial lui-même.

L'une de ces sources de prélèvements pourrait être l'échange de flux d'eau entre la rivière Kou et l'aquifère alluvial du Kou. Les résultats des quantifications de ces échanges qui figurent dans la thèse du Docteur SAURET Elie montrent après des mesures directes par seepage meter et des bilans d'eau que la rivière Kou reçoit en amont (sources de Nasso à Dinderesso) de l'aquifère alluvial 11 000 000 m³ d'eau et décharge en aval (Dinderesso à Diaradougou) environ 14 000 000 m³ d'eau. qui alimentent de ce fait l'aquifère aluvial.

En outre, des visites de terrain ont permis de constater que certains exploitants agricoles de la plaine alluviale du Kou exploitent excessivement l'eau souterraine par des pompages de grande puissance et de longue durée. En parallèle à ce gaspillage de la ressource en eau souterraine, l'eau de surface et l'eau souterraine sont parfois simultanément utilisées à travers des dérivations de l'eau de la rivière Kou dans des puits ou puisards.

Enfin, la drainance de l'aquitard qui sépare l'aquifère alluvial du Kou de l'aquifère profond, drainance caractérisée dans les travaux de ZERBO en 2013 pourrait aussi être l'une des causes de l'importance des volumes prélevés. Le flux vertical moyen dirigé de l'aquifère profond vers l'aquifère alluvial à travers l'aquitard est égal à $1.27 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{ml}$. La quantité d'eau totale véhiculée par ce flux pendant la saison sèche est égale à 2018.995 m^3 soit environ 2019 m^3 en considérant 12 heures de pompage au maximum par jour pendant 5 jours et une épaisseur de l'aquitard égale à 23m.

IV.1.4.2 Taux d'exploitation de l'aquifère alluvial de Karfiguéla

Le taux d'exploitation de l'aquifère alluvial du Karfiguéla a été calculé de la même manière que celui du Kou :

$$\begin{aligned} \text{TE (\%)} &= \frac{\text{VAP calculé par la méthode basée sur quantification des volumes pompés (m}^3\text{)}}{\text{VAR calculé par la méthode du bilan de THORNTHWAITE (m}^3\text{)}} \times 100 \\ &= \frac{174\ 853,00}{1\ 884\ 891,95} \\ &= \mathbf{9,28\ \%} \end{aligned}$$

Ce taux d'exploitation égal à 9,28% témoigne d'une faible utilisation des eaux souterraines dans la plaine alluviale de Karfiguéla. En effet, parmi les 212 exploitants agricoles de la plaine alluviale de Karfiguéla figurant dans la base de données du PADI- BF 101, seulement 12 exploitants agricoles utilisent l'eau souterraine pour l'irrigation de leurs cultures. Ces chiffres sont liés à la facilité d'accès à l'eau de surface dans la plaine alluviale de Karfiguéla. En effet, un canal d'amenée alimenté par une prise d'eau dans la Comoé dessert les périmètres irrigués en eau de surface qui reste suffisamment abondante malgré la multitude des exploitants et les aléas climatiques.

Par ailleurs, l'exploitation de l'eau souterraine dans la plaine alluviale de Karfiguéla est freinée par les coûts de réalisation des puits et puisards relativement élevés.

IV.2 Réserves en eau exploitable

VI.2.1 Réserve en eau exploitable de l'aquifère alluvial du Kou

VOLUME ANNUEL DE LA RESERVE TOTALE D'EAU SOUTERRAINE

$$= 30 \text{ m} \times 72\,017\,000 \text{ m}^2 \times 0,00850$$

$$= \mathbf{18\,364\,335,000 \text{ m}^3}$$

VOLUME ANNUEL DE LA RESERVE PERMANENTE D'EAU SOUTERRAINE

$$= 18\,364\,335,500 \text{ m}^3 - 1\,881\,832,136 \text{ m}^3$$

$$= \mathbf{16\,482\,502,860 \text{ m}^3}$$

VOLUME ANNUEL DE LA RESERVE EXPLOITABLE D'EAU SOUTERRAINE

$$= 1,285 \text{ m} \times 10 \times 72\,017\,000 \text{ m}^2 \times 0,00850$$

$$= \mathbf{7\,866\,056,800 \text{ m}^3}$$

VI.2.2 Réserve en eau exploitable de l'aquifère alluvial de Karfiguéla

VOLUME ANNUEL DE LA RESERVE TOTALE D'EAU SOUTERRAINE

$$= 37,3 \text{ m} \times 46\,496\,000 \text{ m}^2 \times 0,00849$$

$$= \mathbf{14\,724\,213,790 \text{ m}^3}$$

VOLUME ANNUEL DE LA RESERVE PERMANENTE D'EAU SOUTERRAINE

$$= 14\,724\,213,790 \text{ m}^3 - 1\,884\,891,950 \text{ m}^3$$

$$= \mathbf{12\,839\,321,840 \text{ m}^3}$$

VOLUME ANNUEL DE LA RESERVE EXPLOITABLE D'EAU SOUTERRAINE

$$= 3,400 \text{ m} \times 10 \times 46\,496\,000 \text{ m}^2 \times 0,00849$$

$$= \mathbf{13\,421\,535,36 \text{ m}^3}$$

V. DISCUSSIONS SUR LA DURABILITE DES RESSOURCES EN EAU

Les prélèvements d'eau souterraine effectués dans l'aquifère alluvial du Kou sont nettement supérieurs à la recharge annuelle, ce qui augure une exploitation limitée dans le temps pour cet aquifère. De plus, les risques d'exploitation de cet aquifère alluvial au-delà des capacités de sa ressource en eau exploitable sont importants car l'utilisation de la plaine alluviale du Kou à des fins agricoles connaît une croissance exponentielle depuis ces dix dernières années.

Les pertes de façon latérales n'ayant pas pu être estimées faute de données sur les gradients horizontaux des différentes couches, le bilan d'eau pour l'aquifère alluvial du Kou donne les résultats suivants :

$$\Delta Q = (1\ 881\ 832,136 + 14\ 000\ 000 + 2019) - (4\ 589\ 339,44 + 11\ 000\ 000 + 38\ 832,07)$$

$$\Delta Q = 255\ 679,626\ \text{m}^3$$

$$X = \frac{7\ 866\ 056,8}{|255\ 679,626|} = 30,84 \approx 31\ \text{ans}$$

La durée de vie de l'aquifère alluvial du Kou à ce rythme d'exploitation est donc d'environ 31 ans. Au-delà de ce nombre d'années les eaux de la réserve permanente de l'aquifère alluvial seront affectées par les quantités d'eau souterraines pompées, ce qui est susceptible de perturber l'équilibre hydrogéologique de la zone. L'une des solutions palliatives à l'épuisement de la ressource serait l'engagement des exploitants agricoles à optimiser leurs prélèvements dans la nappe alluviale du Kou en adaptant les quantités d'eau prélevées aux besoins réels des plantes cultivées. De plus l'utilisation de la ressource en eau souterraine en combinaison avec l'eau de surface pourrait répartir les prélèvements d'eau en faveur de l'irrigation et ainsi participer à l'équilibre de l'aquifère alluvial et de la rivière Kou.

Et enfin une amélioration de la recharge par la mise en place de check dams le long du cours d'eau et la restauration du couvert végétal de l'aquifère alluvial seront un atout de durabilité.

Au niveau de l'aquifère alluvial de Karfiguéla les prélèvements d'eau souterraine effectués sont minimes par rapport à la recharge annuelle. Cette recharge annuelle compense largement les quantités d'eau prélevées par les exploitants agricoles et la durabilité de la ressource en eau de l'aquifère alluvial de Karfiguéla n'est pas menacée à l'heure actuelle. Cependant, la modification du rythme d'exploitation par intensification des prélèvements provoquée par la venue de nouveaux exploitants doit être régulée par des actions de sensibilisation de proximité et des visites de terrain pour gérer au mieux la ressource en eau souterraine. La protection de l'environnement peut en outre contribuer à une gestion durable en préservant le couvert végétal qui joue un rôle important dans le ruissellement et l'infiltration des quantités d'eau prélevées. Par ailleurs, des études plus poussées sur l'aquifère alluvial de Karfiguéla portant notamment sur les échanges nappe/rivière pourraient permettre une gestion durable.

CONCLUSION

En définitive, l'étude du taux d'exploitation et de la durabilité des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla a nécessité l'évaluation de la recharge annuelle de ces aquifères et l'estimation des prélèvements effectués en leur sein. La recharge annuelle a été déterminée par deux méthodes, celle des fluctuations piézométriques et celle du bilan de Thornthwaite. Les prélèvements quant à eux ont été estimés par la méthode basée sur les volumes prélevés et celle basée sur les besoins en eau des cultures. La valeur du taux d'exploitation de l'aquifère alluvial du Kou supérieure à 100% témoigne de sa surexploitation et du danger qui menace sa ressource en eau. Par contre, l'aquifère alluvial de Karfiguéla dispose d'une recharge suffisante pour compenser les prélèvements donc la durabilité de sa ressource n'est pas menacée tant qu'une gestion adaptée lui sera appliquée.

La caractérisation complète de la nappe étudiée est un atout dans la recherche de son taux d'exploitation et facilite les déductions portant sur sa durabilité. Les travaux menés au cours de ce mémoire de fin d'études montrent que la gestion durable de la ressource en eau souterraine des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla passe par l'union des parties prenantes à leur exploitation à savoir les exploitants agricoles, l'Etat Burkinabè et ses partenaires au développement.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

Amadou KEITA (2013), Cours d'Irrigation gravitaire, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Angelbert Chabi BIAOU (2014), Cours d'Hydraulique fluviale, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Chérif MAMADOU (2006), Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou, Mémoire de master, Groupe des écoles EIER-ETSHER.

COMPAORE (2012), Synthèse des mesures piézométriques et hydrométriques réalisées dans la plaine alluviale de Karfiguéla, Rapport.

Constant OGOU (2008), Étude des potentialités aquifères de la plaine alluviale du Kou entre Nasso et Diaradougou, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Dame NDIAYE (2008), Description et évaluation de la réalimentation des aquifères de la région de Bobo Dioulasso, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Denis DAKOURE (2003), Étude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso - mali) - essai de modélisation, thèse de doctorat, Université Paris VI.

Elie SAURET (2009), Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou, DEA, Université de Liège.

Elie SAURET (2013), Étude des potentialités hydrogéologiques de la plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso) thèse de doctorat, Université de Liège.

Farid Traoré (2007), Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso, DEA, Université de Liège.

GIRE (2006), Gestion Intégrée des ressources en eau du bassin du Kou, Rapport.

Inoussa ZERBO (2013), Détermination des paramètres hydrodynamiques d'une plaine alluviale et d'un aquifère sédimentaire profond: étude de la connectivité hydraulique, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Laouali HALADOU (2013), Caractérisation des matériaux et de la puissance de la plaine alluviale de Karfiguéla par des investigations géophysiques, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Noël BETAN (2014), Caractérisation de l'hydrodynamisme de la plaine alluviale de Karfiguéla, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

PADI -BF 101 (2014), Synthèse des mesures piézométriques et hydrométriques réalisées dans la plaine alluviale de Karfiguéla, Rapport.

PADI -BF 101 (2014), Synthèse des mesures piézométriques et hydrométriques réalisées dans le bassin versant du Kou, Rapport.

Philippe GOMBERT (1998), Synthèse sur la Géologie et l'hydrogéologie de la série sédimentaire du sud-ouest du Burkina Faso, Rapport.

Rokiatou CARABIRI (2009), Interaction eau souterraine-eau alluviale- eau de surface, mémoire de master, École Nationale d'Ingénieurs de Bamako (ENI).

SOGREAH (1994), Hydrogéologie du bassin du Kou, Rapport.

Soumahila SANKANDE (2014) , Établissement du bilan hydrologique du bassin versant de la Haute Comoé et Analyse critique des principaux composants dans un contexte de données fragmentées (Burkina Faso) ,mémoire de master , AGRHYMET.

Yacouba SIB (2012), Modélisation hydrogéologique de la vallée alluviale du bassin versant du Kou, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Sites internet

www.environnement.wallonie.be/de/eso/atlas , consulté le 20 mai 2015.

www.fao.org/nr/water/eto.htm , consulté le 07 mai 2015.

Annexes

Sommaire

Annexe I : Exploitants agricoles de l'eau souterraine de la plaine alluviale du Kou.....	78
Annexe II: Exploitants agricoles de l'eau souterraine de la plaine alluviale de Karfiguéla ...	81
Annexe III: Tableaux de choix de p, RU et Z_r	82
Annexe IV: Table des valeurs du facteur $F(\lambda)$	84

Annexe V: Valeurs d'ET _o calculées par la formule de Penman Modifiée pour l'aquifère alluvial du Kou	85
Annexe VI: Valeurs d'ET _o calculées par la formule de Penman Modifiée pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla	86
Annexe VII: Détails des volumes prélevés calculés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés dans la plaine alluviale du Kou	87
Annexe VIII: Détails des volumes prélevés calculés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés dans la plaine alluviale de Karfiguéla.....	90
Annexe IX: Détails des valeurs d'évapotranspiration de référence calculées par différentes formules pour l'aquifère alluvial du Kou	91
Annexe X: Détails des valeurs d'évapotranspiration de référence calculées par différentes formules pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla	94
Annexe XI : Valeurs de hauteurs annuelles d'eau rechargées calculées par la méthode des fluctuations piézométriques.....	

Annexe I : Exploitants agricoles de l'eau souterraine de la plaine alluviale du Kou

- **Exploitants agricoles avec motopompes**

N° Ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Débit des motopompes en m3/h	Nombre de motopompes	Nombre d'heures de pompage par jour ²	Nombre de jours de pompage ³
1	SANOU	PAUL	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2
2	SAWADOGO	FRANÇOIS	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2

² Tiré du rescencement hydro agricole du projet GE Eau

³ Tiré du rescencement hydro agricole du projet GE Eau

3	SANOU	SIAKA	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2
4	SANOU	SIAKA	DIARADOUGOU	60	2	7.195	2
5	SANOU	ALPHONSE	DIARADOUGOU	60	2	8.605	3
6	SANOU	SALIA	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2
7	SANOU	ADAMA	DIARADOUGOU	60	1	8.605	3
8	SANOU	SIDIKI	DIARADOUGOU	60	1	3	4
9	SANOU	ZAKARIA	DIARADOUGOU	60	1	3	4
10	SANOU	GAOUSSOU	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2
11	SANOU	SITAPHA	DIARADOUGOU	60	1	8.605	2
12	SANOU	MADOU	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2
13	SANOU	GAOUSSOU	DIARADOUGOU	60	2	7.195	2
14	SANOU	LASSINA	DIARADOUGOU	60	1	8.605	4
15	SANOU	BAKARY	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2
16	SANOU	BOUKARY	DIARADOUGOU	60	1	8.605	3
17	SANOU	LASSINA	DIARADOUGOU	60	1	3	4
18	SANOU	LASSINA	DIARADOUGOU	60	1	8.605	3
19	SANOU	BAKARY	DIARADOUGOU	60	1	8.605	3
20	SANOU	YACOUBA	DIARADOUGOU	60	1		
21	SANOU	SAÏDOU	DIARADOUGOU	60	1		
22	SANOU	MOULAYE	DIARADOUGOU	60	1		
23	SANOU	SOUMANA	DIARADOUGOU	60	1	8.605	3
24	SANOU	MOUSSA	DIARADOUGOU	60	1	8.605	3
25	KABORÉ	BOUREIMA	DIARADOUGOU	60	3	7.195	2
26	OUATTARA	SAÏDOU	DIARADOUGOU	60	1	8.605	3
27	SANOU	GAOUSSOU	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2
28	OUATTARA	TOGO ADAMA	DIARADOUGOU	60	1	3	4
29	SANOU	HAMIDOU	DIARADOUGOU	60	2	7.195	2
30	COULIBALY	BAKARY	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2

N° Ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Débit des motopompes en m3/h	Nombre de motopompes	Nombre d'heures de pompage par jour	Nombre de jours de pompage
31	SANOU	SITAPHA	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2
32	SANOU	DAOUDA	DIARADOUGOU	60	1	7.195	2
33	SANOU	SOUNGALO	DIARADOUGOU	60	1	3	4
34	OUATTARA	ABDOULAYE	DIARADOUGOU	60	2	7.195	2
35	YAMBA	DRISSA	DINDÉRESSO	60	1	8.605	3
36	SANON	JEAN BOSCO	DINDÉRESSO	60	1	7.195	2
37	YÉRÉ	KARIM	DINDÉRESSO	60	1	8.605	3
38	OUSMANE		DINDÉRESSO	60	1	7.195	2
39	SANOU	SITÉLÉ	DINDÉRESSO	60	1	8.605	3
40	MME	KASSONGO SYLVIE	DINDÉRESSO	60	3	7.195	2
41	SANOU	SOLO	DINDÉRESSO	60	1	7.195	2
42	GANI		DINDÉRESSO	60	1	7.195	2
43	SANOU	SOUNSOU	DINDÉRESSO	60	1	7.195	2
44	KABORÉ	MATHIEU	DINDÉRESSO	60	3	7.195	2
45	SANOU	DAVID	DINDÉRESSO	60	1	8.605	3
46	SANOU	DAMOUSSIRA	DINDÉRESSO	60	1	3	4
47	OUATTARA	ISSOUF	DINDÉRESSO	60	3	8.605	3
48	SANOU	IBRAHIM	DINDÉRESSO	60	1	7.195	2
49	NADEMBEIGA	ROLAND	DINDÉRESSO	60	1	8.605	3
50	GNOUMOU	DAOUDA	DINDÉRESSO	60	1	7.195	2
51	POUSGA	MOUSSA	DINDÉRESSO	60	1	7.195	2
52	SANOU	BAKARY	DINDÉRESSO	60	4	7.195	2
53	SANOU	BAKARY	DINDÉRESSO	60	1	7.195	2
54	SANOU	CLÉMENT	KOKOROUÉ	60	1	7.195	2
55	SANOU	PASCAL	KOKOROUÉ	60	1	8.605	3
56	DEMBÉLÉ	DRISSA	NASSO	60	1	7.195	2
57	SANOU	MAMADOU	NASSO	60	1	8.605	3
58	SANOU	PASCAL	NASSO	60	1	8.605	3
59	OUATTARA	DO	NASSO	60	1	8.605	3
60	SANOU	SITILÉ	NASSO	60	1	7.195	2
61	IRA	IBRAHIM	NASSO	60	1	8.605	3
62	SANOU	MATURIN	NASSO	60	1	8.605	3
63	SANOU	ABIÉL	NASSO	60	1	8.605	3
64	SANOU	DIBI	NASSO	60	1	8.605	3
65	SANOU	MARTIN	NASSO	60	1	8.605	3
66	SANOU	NESSOU	NASSO	60	1	8.605	3
67	SANOU	ZÉZOUMA VALENTIN	NASSO	60	1	8.605	3
68	SANOU	ROLAND DOKIÉ	NASSO	60	1	8.605	3

N° Ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Débit des motopompes en m3/h	Nombre de motopompes	Nombre d'heures de pompage par jour	Nombre de jours de pompage
69	SANO	MAMOIROU	SANDIMISSO	60	1	8.605	3
70	SANO	ISSIAKA	SANDIMISSO	60	1	3	4
71	SANO	ABDOULAYE	SANDIMISSO	60	1	3	4
72	SANO	ALI	SANDIMISSO	60	1	3	4
73	SANO	MADOU	SANDIMISSO	60	2	8.605	3
74	SANO	GNAPÉGUÉ SIRA	SANDIMISSO	60	1	3	4
75	SANO	DRISSA	SANDIMISSO	60	1	3	4
76	SANO	GNAPÉGUÉ	SANDIMISSO	60	1	7.195	2
77	SANO	SIKA	SANDIMISSO	60	1	8.605	3
78	SANO	DRISSA	SANDIMISSO	60	1	7.195	2
79	SANO	FATOGOMA	SANDIMISSO	60	2	8.605	3
80	BARRO	BÉMA	SANDIMISSO	60	1	7.195	2
81	SANO	SIKA	SANDIMISSO	60	1	7.195	2
82	DEMBÉLÉ		SANDIMISSO	60	1	7.195	2
83	SANO	BAKARY	SANDIMISSO	60	1	7.195	2
84	SANO	LASSINA	SANDIMISSO	60	1	8.605	3
85	SANO	MICHEL	SONSOGONA	60	1	8.605	3
86	OUATTARA	ALI	SONSOGONA	60	1	7.195	2
87	SIDIBÉ	MAMADOU	SONSOGONA	60	1	8.605	3
88	OUATTARA	SAÏDOU	SONSOGONA	60	1	8.605	3
89	SIDIBÉ	FOUSSÉNI	SONSOGONA	60	1	8.605	3
90	KONATÉ	DAOUDA	SONSOGONA	60	1	7.195	2
91	DEMBÉLÉ	OUSSENI	SONSOGONA	60	1	8.605	3

• **Exploitants agricoles avec pompes à pédales**

N° ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Nombre de pompes à pédale	Nombre d'heures de pompage	Nombre de jours de pompage par semaine
1	SANO	ARSÈNE	KOKOROUÉ	1	8.605	3
2	SANO	SIKA	SANDIMISSO	1	7.195	2

• **Exploitants agricoles avec arrosoirs**

N° ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Nombre d'arrosoirs	Nombre d'allers retours par jour	Volume d'un arrosoir (10l) en m3	Nombre de jours d'arrosage
	SANO	LASSINA	SANDIMISSO	2	20	0.01	4
	SANO	BRECIN	SANDIMISSO	2	20	0.01	4
	SANO	ABDOULAYE	SANDIMISSO	1	20	0.01	4
	SANO	IBRAHIM	SANDIMISSO	1	10	0.01	4

Annexe II: Exploitants agricoles de l'eau souterraine de la plaine alluviale de Karfiguéla

- **Exploitants agricoles avec motopompes**

N° ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Nombre de motopompes	Débit en m ³ /h	Nombre d'heures de pompage par jour	Nombre de jours de pompage par semaine
1	SAGNON	DÉSSANA	KARFIGUELA	1	120	4	2
2	HILOU	SEYDOU	LEMOURODOUGOU	1	120	4	2
3	TOU	KALIFA	LEMOURODOUGOU	1	120	4	2
4	TOU	MOGOMAKÈ	SINIENA	1	120	9	1
5	TOU	FATOGOMA	KARFIGUELA	1	120	5	1
6	SAGNON	KALIFA	KARFIGUELA	1	120	4	2
7	TOU	BAKARY	LEMOURODOUGOU	1	120	3	2

- **Exploitants agricoles avec arrosoirs**

N° ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Nombre d'arrosoirs	Volume d'un arrosoir (10l) en m ³	Nombre d'allers et retours par jour	Nombre de jours d'arrosage par semaine
1	SIRIMA	MALONBIÈ	KITOBAMA	1	0.01	15	2
2	SAGNON	DÉSSANA	KARFIGUELA	2	0.01	20	2
3	TOU	MOULEY	KARFIGUELA	4	0.01	40	2
4	HILOU	SEYDOU	LEMOURODOUGOU	1	0.01	15	2
5	TOU	MOGOMAKÈ	SINIENA	1	0.01	15	1

Annexe III: Tableaux de choix de p, RU et Z_r

• Tableau de choix du facteur de tarissement p⁴

Group	Valeurs de ETm (mm/day)								
	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1	0.500	0.425	0.350	0.300	0.250	0.225	0.200	0.200	0.175
2	0.675	0.575	0.475	0.400	0.350	0.325	0.275	0.250	0.225
3	0.800	0.700	0.600	0.500	0.450	0.425	0.375	0.350	0.300
4	0.875	0.800	0.700	0.600	0.550	0.500	0.450	0.425	0.400
Group	Crops								
1	Oignon, poivre, pomme de terre								
2	Banane, choux, vigne, pois, tomate								
3	blé, Luzerne, haricot, citron, arachide, pomme, tournesol, pastèque								
4	Coton, maïs, olive, carthame, sorgho, soja, betterave sucrière, canne à sucre, tabac								

• Tableau de choix de la réserve utile du sol RU⁵

Selon Israelson et Hansen (1967)		Selon Withers et Vipond (1974)	
Type sol	RU (mm/m)	Type sol	RU(mm/m)
Sableux	70-100	Sableux	55
Sablo-limoneux	90-150	Sable fin	80
Limoneux	140-190	Sablo-limoneux	120
Argilo-limoneux	170-220	Argilo-limoneux	150
Limono-argileux	180-230	Argileux	235
Argileux	200-250		

⁴ Tiré de la version 2013 du cours d'irrigation gravitaire du Dr Amadou Keita

⁵ Tiré de la version 2013 du cours d'irrigation gravitaire du Dr Amadou Keita

• Tableau de choix de la profondeur d'enracinement de la culture⁶

Plante	Profondeur d'enracinement Zr (m)	Plante	Profondeur d'enracinement Zr(m)
Luzerne	1.0 -2.0	Melons	1.0-1.5
Banane	0.5-0.9	Olives	1.2-1.7
Orge	1.0-1.5	Oignons	0.3-0.5
Haricot	0.5-0.7	Palmiers	0.7-1.1
Betterave	0.6-1.0	Pois	0.6-1.0
Choux	0.4-0.5	Poivre	0.5-1.0
Carotte	0.5-1.0	Pomme	0.3-0.6
Celeri	0.3-0.5	Pomme de terre	0.4-0.6
Citron	1.2-1.5	Carthame	1.0-2.0
Trèfle	0.6-0.9	Sisal	0.6-1.3
Cacao	> 1.5	Sorgho	1.0-2.0
Coton	1.0-1.7	Soja	0.6-1.3
Concombre	0.7-1.2	Epinards	0.3-0.5
Dattes	1.5-2.25	Fraises	0.2-0.3
Vergers	1.0-2.0	Betterave sucrière	0.7-1.2
Lin	1.0-1.5	Canne à sucre	1.2-2.0
Petits grains	0.9-1.5	Tournesol	0.8-1.5
Grains d'hiver	1.5-2.0	Patates douces	1.0-1.5
Vigne	1.0-2.0	Tabac précoce	0.5-1.0
Herbes	0.5-1.5	Tabac tardif	0.5-1.0
Arachides	0.5-1.0	Tomates	0.7-1.5
Laitue	0.3-0.5	Maraichage	0.3-0.6
Mais	1.0-1.7	Blé	1.0-1.5

⁶ Tiré de la version 2013 du cours d'irrigation gravitaire du Dr Amadou Keita

Annexe IV: Table des valeurs du facteur $F(\lambda)$

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
Lat. S.												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	1.00	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	.95	.92	.85	.90	.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

Annexe V: Valeurs d'ET₀ calculées par la formule de Penman Modifiée pour l'aquifère alluvial du Kou

Années	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc
1981	207.90	160.00	196.10	195.30	170.20	161.00	140.20	130.90	134.70	171.40	168.60	175.40
1982	180.10	133.30	179.30	170.70	179.40	146.90	141.20	127.20	136.80	151.10	148.30	163.20
1983	180.80	149.20	201.80	176.10	184.10	144.90	137.50	122.30	139.10	165.90	164.40	172.50
1984	178.90	184.70	174.40	179.10	136.60	104.50	100.50	108.90	115.80	149.80	160.40	174.60
1985	206.10	183.70	191.70	166.60	148.20	105.90	87.40	95.70	111.50	149.40	167.80	186.40
1986	172.70	133.50	167.90	179.20	169.20	154.30	139.40	127.30	130.70	156.50	160.50	167.60
1987	177.40	145.70	153.90	186.60	201.60	140.50	150.10	127.50	138.50	154.20	169.50	172.10
1988	182.10	150.00	198.30	182.60	200.50	149.20	133.60	120.70	124.60	155.50	153.80	179.50
1989	183.30	138.70	169.00	184.60	199.70	159.20	132.70	121.30	128.10	152.70	158.20	166.70
1990	176.60	143.00	196.00	187.90	190.60	149.00	134.90	129.80	138.30	170.10	162.30	166.90
1991	172.70	164.60	179.50	176.80	144.60	145.60	123.60	119.70	135.60	147.40	150.00	164.50
1992	172.90	169.10	185.20	177.80	177.30	143.20	132.50	121.70	133.10	157.60	146.60	158.90
1993	170.20	153.60	176.90	185.60	191.50	159.90	139.40	130.90	126.50	151.40	156.00	165.90
1994	181.00	151.70	189.00	195.10	183.90	159.50	137.90	121.40	129.70	142.00	155.90	173.00
1995	177.20	170.90	196.90	170.20	174.10	156.20	139.80	125.80	137.00	158.40	170.10	196.80
1996	207.80	194.00	203.30	190.40	181.50	161.60	148.00	130.00	123.30	163.00	182.20	197.20
1997	214.00	210.30	229.20	182.90	175.50	145.30	146.60	138.50	129.40	160.00	179.00	188.30
1998	203.70	204.20	228.80	194.00	179.60	154.90	139.80	132.70	127.70	163.80	179.40	185.40
1999	189.60	166.40	194.40	180.80	181.00	160.80	131.60	118.20	122.30	149.30	158.00	185.80
2000	180.00	188.10	199.20	208.70	187.10	153.50	132.90	132.30	134.40	156.50	178.60	196.30
2001	212.20	216.20	221.20	207.50	196.00	164.00	148.10	133.00	136.40	174.10	174.60	218.30
2002	218.00	203.40	211.30	199.30	204.50	164.50	148.50	134.50	149.20	174.10	178.80	196.30
2003	201.70	190.90	213.90	209.00	202.70	152.20	139.60	127.80	129.50	173.90	172.60	201.10
2004	214.50	200.00	203.50	188.90	186.60	158.70	132.30	131.70	137.70	167.40	170.40	181.60
2005	209.80	185.90	200.90	201.50	180.70	148.80	137.40	125.30	131.80	167.60	174.10	210.00
2006	215.40	198.90	223.60	193.10	176.00	152.10	145.50	136.60	134.00	158.00	176.20	192.60
2007	203.30	193.90	217.40	178.70	180.90	169.10	136.10	119.80	135.80	166.00	168.00	187.10
2008	207.10	203.50	213.50	207.60	189.50	155.60	136.90	*****	126.40	159.70	183.70	199.80
2009	201.10	189.20	199.80	194.20	193.80	156.60	146.00	130.60	130.70	160.90	173.00	205.60
2010	218.80	204.30	202.50	189.70	165.70	147.40	140.40	126.40	126.10	155.10	177.90	200.00
Moyenne	193.90	176.03	197.28	188.02	181.09	150.83	136.01	125.81	131.16	159.43	167.30	184.31

Annexe VI: Valeurs d'ET_o calculées par la formule de Penman Modifiée pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla

Années	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1981	207.90	184.72	196.10	195.30	170.20	161.00	140.20	130.90	134.70	171.40	168.60	175.40
1982	180.10	154.50	179.30	170.70	179.40	146.90	141.20	127.20	136.80	151.10	148.30	163.20
1983	180.80	162.84	196.10	181.88	184.10	144.90	143.20	133.45	139.10	165.90	164.40	172.50
1984	178.90	184.70	174.40	179.10	136.60	104.50	100.50	108.90	115.80	149.80	160.40	174.60
1985	206.10	183.70	185.10	166.60	148.20	105.90	87.40	95.70	111.50	149.40	167.80	186.40
1986	172.70	153.10	167.90	179.20	169.20	154.30	139.40	127.30	130.70	156.50	160.50	167.60
1987	177.40	157.61	176.61	186.60	201.60	140.50	150.10	127.50	138.50	138.50	169.50	172.10
1988	182.10	180.45	198.40	182.70	198.40	150.00	132.60	119.80	125.00	156.40	154.80	179.70
1989	183.80	149.62	170.00	185.00	199.40	156.80	131.70	123.30	128.10	153.70	158.80	166.70
1990	175.70	163.63	198.00	185.40	191.50	148.90	133.30	130.00	139.70	171.20	161.10	167.20
1991	174.70	163.60	178.70	175.80	142.40	147.30	123.90	119.40	136.80	147.30	150.10	164.50
1992	173.60	168.50	186.00	178.60	176.20	141.70	133.10	120.90	133.40	158.10	146.10	160.60
1993	169.60	153.80	177.60	183.50	193.60	158.40	139.40	128.50	129.20	151.70	155.70	166.30
1994	180.60	151.20	190.30	195.60	183.70	157.00	139.40	120.10	130.90	140.70	157.10	173.20
1995	177.40	170.60	195.90	172.40	173.70	153.40	141.10	126.20	136.90	160.00	170.00	197.30
1996	208.20	192.70	204.60	189.60	180.60	160.10	147.70	129.80	124.80	163.30	182.30	199.30
1997	212.90	211.10	228.10	183.40	173.70	145.70	144.50	138.80	131.40	160.60	178.80	187.50
1998	205.60	206.00	225.30	194.40	176.90	156.70	139.00	133.30	128.40	162.40	181.20	185.30
1999	188.90	168.20	194.10	181.00	180.20	159.60	129.50	120.40	122.90	149.50	156.70	185.90
2000	182.50	187.60	200.60	206.70	187.10	151.70	133.70	131.60	135.60	156.30	180.40	196.60
2001	213.70	216.20	219.90	207.20	193.60	165.60	147.10	132.20	137.80	173.60	176.80	217.60
2002	218.50	202.40	212.20	198.90	202.70	165.90	146.10	136.20	149.30	174.80	178.60	197.00
2003	201.30	192.60	213.40	208.80	201.30	151.50	139.50	126.00	131.30	174.40	173.30	194.20
2004	216.40	197.70	202.50	190.30	185.40	159.30	132.10	131.60	137.90	168.40	169.20	183.30
2005	211.20	183.50	202.10	200.50	181.00	147.40	137.80	124.00	131.10	170.90	174.10	211.10
2006	215.40	198.10	222.00	193.20	176.00	150.30	147.10	134.10	136.40	158.70	176.90	192.30
2007	203.40	196.00	215.40	176.90	183.50	166.30	135.20	118.80	138.90	166.20	167.50	188.30
2008	207.70	203.50	213.60	206.10	189.20	154.00	137.70	147.78	125.30	161.80	184.40	200.60
2009	201.10	189.20	199.80	194.20	193.80	156.60	146.00	130.60	130.70	160.90	173.00	205.60
2010	218.80	204.30	202.50	189.70	165.70	147.40	140.40	126.40	126.10	155.10	177.90	200.00
2011	216.40	215.00	222.50	196.50	150.80	112.40	99.80	103.70	125.60	156.00	194.80	208.80
2012	226.60	214.50	203.60	176.20	140.00	108.40	90.50	101.00	114.50	153.90	177.50	204.90
2014	108.85	96.54	150.98	165.70	182.75	173.63	178.06	177.58	171.25	174.27	149.25	108.82
Moyenne	193.30	180.54	197.08	187.20	178.56	148.61	134.80	126.76	132.31	159.48	168.06	183.47

Annexe VII: Détails des volumes prélevés calculés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés dans la plaine alluviale du Kou

• **Exploitants agricoles avec motopompes**

N° Ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Volume en m ³ prélevé par semaine
1	SANOU	PAUL	DIARADOUGOU	1726.80
2	SAWADOGO	FRANÇOIS	DIARADOUGOU	1726.80
3	SANOU	SIKA	DIARADOUGOU	1726.80
4	SANOU	SIKA	DIARADOUGOU	3453.60
5	SANOU	ALPHONSE	DIARADOUGOU	6195.60
6	SANOU	SALIA	DIARADOUGOU	863.40
7	SANOU	ADAMA	DIARADOUGOU	1548.90
8	SANOU	SIDIKI	DIARADOUGOU	720.00
9	SANOU	ZAKARIA	DIARADOUGOU	720.00
10	SANOU	GAOUSSOU	DIARADOUGOU	863.40
11	SANOU	SITAPHA	DIARADOUGOU	1032.60
12	SANOU	MADOU	DIARADOUGOU	863.40
13	SANOU	GAOUSSOU	DIARADOUGOU	1726.80
14	SANOU	LASSINA	DIARADOUGOU	2065.20
15	SANOU	BAKARY	DIARADOUGOU	863.40
16	SANOU	BOUKARY	DIARADOUGOU	1548.90
17	SANOU	LASSINA	DIARADOUGOU	720.00
18	SANOU	LASSINA	DIARADOUGOU	1548.90
19	SANOU	BAKARY	DIARADOUGOU	1548.90
20	SANOU	YACOUBA	DIARADOUGOU	0.00
21	SANOU	SAÏDOU	DIARADOUGOU	0.00
22	SANOU	MOULAYE	DIARADOUGOU	0.00
23	SANOU	SOUMANA	DIARADOUGOU	1548.90
24	SANOU	MOUSSA	DIARADOUGOU	1548.90
25	KABORÉ	BOUREIMA	DIARADOUGOU	5180.40
26	OUATTARA	SAÏDOU	DIARADOUGOU	1548.90
27	SANOU	GAOUSSOU	DIARADOUGOU	1726.80
28	OUATTARA	TOGO ADAMA	DIARADOUGOU	1440.00
29	SANOU	HAMIDOU	DIARADOUGOU	3453.60
30	COULIBALY	BAKARY	DIARADOUGOU	863.40
31	SANOU	SITAPHA	DIARADOUGOU	863.40

N° Ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Volume en m ³ prélevé par semaine
32	SANOU	DAOUDA	DIARADOUGOU	863.40
33	SANOU	SOUNGALO	DIARADOUGOU	1440.00
34	OUATTARA	ABDOULAYE	DIARADOUGOU	3453.60
35	YAMBA	DRISSA	DINDÉRESSO	1548.90
36	SANON	JEAN BOSCO	DINDÉRESSO	863.40
37	YÉRÉ	KARIM	DINDÉRESSO	1548.90
38	OUSMANE		DINDÉRESSO	863.40
39	SANOU	SITÉLÉ	DINDÉRESSO	1548.90
40	MME	KASSONGO SYLVIE	DINDÉRESSO	5180.40
41	SANOU	SOLO	DINDÉRESSO	863.40
42	GANI		DINDÉRESSO	863.40
43	SANOU	SOUNSOU	DINDÉRESSO	863.40
44	KABORÉ	MATHIEU	DINDÉRESSO	2590.20
45	SANOU	DAVID	DINDÉRESSO	1548.90
46	SANOU	DAMOUISSIRA	DINDÉRESSO	720.00
47	OUATTARA	ISSOUF	DINDÉRESSO	4646.70
48	SANOU	IBRAHIM	DINDÉRESSO	863.40
49	NADEMBEIGA	ROLAND	DINDÉRESSO	1548.90
50	GNOUMOU	DAOUDA	DINDÉRESSO	863.40
51	POUSGA	MOUSSA	DINDÉRESSO	863.40
52	SANOU	BAKARY	DINDÉRESSO	3453.60
53	SANOU	BAKARY	DINDÉRESSO	863.40
54	SANOU	CLÉMENT	KOKOROUÉ	863.40
55	SANOU	PASCAL	KOKOROUÉ	3097.80
56	DEMBÉLÉ	DRISSA	NASSO	1726.80
57	SANOU	MAMADOU	NASSO	1548.90
58	SANOU	PASCAL	NASSO	1548.90
59	OUATTARA	DO	NASSO	1548.90
60	SANOU	SITILÉ	NASSO	863.40
61	IRA	IBRAHIM	NASSO	1548.90
62	SANOU	MATURIN	NASSO	1548.90
63	SANOU	ABIEL	NASSO	1548.90
64	SANOU	DIBI	NASSO	1548.90
65	SANOU	MARTIN	NASSO	1548.90
66	SANOU	NESSOU	NASSO	1548.90
67	SANOU	ZÉZOUMA VALENTIN	NASSO	1548.90
68	SANOU	ROLAND DOKIÉ	NASSO	3097.80
69	SANOU	MAMOUROU	SANDIMISSO	3097.80
70	SANOU	ISSIAKA	SANDIMISSO	1440.00
71	SANOU	ABDOULAYE	SANDIMISSO	1440.00
72	SANOU	ALI	SANDIMISSO	1440.00

N° Ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Volume en m ³ prélevé par semaine
73	SANOU	MADOU	SANDIMISSO	6195.60
74	SANOU	GNAPÉGUÉ SIRA	SANDIMISSO	1440.00
75	SANOU	DRISSA	SANDIMISSO	1440.00
76	SANOU	GNAPÉGUÉ	SANDIMISSO	1726.80
77	SANOU	SIKA	SANDIMISSO	3097.80
78	SANOU	DRISSA	SANDIMISSO	1726.80
79	SANOU	FATOGOMA	SANDIMISSO	6195.60
80	BARRO	BÉMA	SANDIMISSO	1726.80
81	SANOU	SIKA	SANDIMISSO	1726.80
82	DEMBÉLÉ		SANDIMISSO	1726.80
83	SANOU	BAKARY	SANDIMISSO	1726.80
84	SANOU	LASSINA	SANDIMISSO	1548.90
85	SANOU	MICHEL	SONSOGONA	3097.80
86	OUATTARA	ALI	SONSOGONA	863.40
87	SIDIBÉ	MAMADOU	SONSOGONA	1548.90
88	OUATTARA	SAÏDOU	SONSOGONA	1548.90
89	SIDIBÉ	FOUSSÉNI	SONSOGONA	1548.90
90	KONATÉ	DAOUDA	SONSOGONA	1726.80
91	DEMBÉLÉ	OUSSENI	SONSOGONA	3097.80
Volume total prélevé par semaine par les motopompes				163767.90
Volume total prélevé pendant 8 mois de sécheresse par les motopompes				5240572.80

- **Exploitants agricoles avec pompes à pédales**

N° ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Volume en m ³ prélevé par semaine
1	SANOU	ARSÈNE	KOKOROUÉ	85.19
2	SANOU	SIKA	SANDIMISSO	47.49
Volume total prélevé par semaine par les pompes à pédales				132.68
Volume total prélevé pendant 8 mois de sécheresse par les pompes à pédales				4245.65

- **Exploitants agricoles avec arrosoirs**

N°Ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Volume en m ³ prélevé par semaine
1	SANOU	LASSINA	SANDIMISSO	1.60
2	SANOU	BRECIN	SANDIMISSO	1.60
3	SANOU	ABDOULAYE	SANDIMISSO	0.80
4	SANOU	IBRAHIM	SANDIMISSO	0.40
Volume total prélevé par semaine par les arrosoirs				4.40
Volume total prélevé pendant 8 mois de sécheresse par les arrosoirs				140.80

Annexe VIII: Détails des volumes prélevés calculés par la méthode basée sur la quantification des volumes pompés dans la plaine alluviale de Karfiguéla

• **Exploitants agricoles avec motopompes**

N° ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Volume en m ³ prélevé par semaine
1	SAGNON	DÉSSANA	KARFIGUELA	30720.00
2	HILOU	SEYDOU	LEMOUROUDOUGOU	30720.00
3	TOU	KALIFA	LEMOUROUDOUGOU	30720.00
4	TOU	MOGOMAKÈ	SINIENA	34560.00
5	TOU	FATOGOMA	KARFIGUELA	19200.00
6	SAGNON	KALIFA	KARFIGUELA	30720.00
7	TOU	BAKARY	LEMOUROUDOUGOU	23040.00
Volume total prélevé par semaine par les motopompes				6240.00
Volume total prélevé pendant 8 mois de sécheresse par les motopompes				199680.00

• **Exploitants agricoles avec arrosoirs**

N° ordre	Nom	Prénoms	Village de rattachement du site	Volume en m ³ prélevé par semaine
1	SIRIMA	MALONBIË	KITOBAMA	0.30
2	SAGNON	DÉSSANA	KARFIGUELA	0.80
3	TOU	MOULEY	KARFIGUELA	3.20
4	HILOU	SEYDOU	LEMOUROUDOUGOU	0.30
5	TOU	MOGOMAKÈ	SINIENA	0.15
Volume total prélevé par semaine par les arrosoirs				4.75
Volume total prélevé pendant 8 mois de sécheresse par les arrosoirs				152.00

Annexe IX: Détails des valeurs d'évapotranspiration de référence calculées par différentes formules pour l'aquifère alluvial du Kou

• Formule de Thornthwaite

Mois	Températures moyennes	im	l	a	Facteur λ	Eto Thornthwaite
Janvier	25.717	11.935	159.864	3.058	0.994	68.054
Février	28.629	14.040	159.864	3.058	0.910	86.489
Mars	30.832	15.708	159.864	3.058	1.030	122.802
Avril	31.083	15.902	159.864	3.058	1.032	126.129
Mai	29.521	14.707	159.864	3.058	1.086	113.369
Juin	27.235	13.018	159.864	3.058	1.064	86.810
Juillet	25.834	12.018	159.864	3.058	1.088	75.531
Août	25.306	11.648	159.864	3.058	1.072	69.866
Septembre	25.900	12.064	159.864	3.058	1.020	71.365
Octobre	27.566	13.258	159.864	3.058	1.018	86.183
Novembre	27.707	13.361	159.864	3.058	0.974	83.754
Décembre	26.100	12.205	159.864	3.058	0.978	70.055

• Formule de Turc

Mois	T_m^7 (°C)	$T_m+15^\circ\text{C}$	$T_m/(T_m+15)$	R_g^8 (W/m ²)	R_g (cal/cm ² /jour)	H_r^9 (%)	Eto TURC
Janvier	25.717	40.717	0.632	260.000	536.900	23.000	353.742
Février	28.629	43.629	0.656	248.000	512.120	22.000	354.104
Mars	30.832	45.832	0.673	186.000	384.090	32.000	263.652
Avril	31.083	46.083	0.675	143.000	295.295	51.000	93.161
Mai	29.521	44.521	0.663	126.000	260.190	63.000	82.272
Juin	27.235	42.235	0.645	108.000	223.020	72.500	70.422
Juillet	25.834	40.834	0.633	98.000	202.370	78.500	63.866
Août	25.306	40.306	0.628	87.000	179.655	81.500	57.675
Septembre	25.900	40.900	0.633	97.000	200.305	78.500	63.402
Octobre	27.566	42.566	0.648	109.000	225.085	67.500	71.259
Novembre	27.707	42.707	0.649	108.000	223.020	45.000	146.762
Décembre	26.100	41.100	0.635	98.000	202.370	28.000	148.359

⁷ Températures moyennes

⁸ Rayonnement global

⁹ Humidité relative de l'air

- Formule de Blaney et Criddle

Mois	Tm	U	Hr	Ra	N	n	Rs	C	W	ea	ed	n/N	Rnl	Rn
------	----	---	----	----	---	---	----	---	---	----	----	-----	-----	----

Mois	Températures moyennes	15+0.84× Températures moyennes	Nombre jours/mois	Nombre d'heures d'ensoleillement par jour	Nombre d'heures d'ensoleillement
Janvier	25.717	36.602	31.000	8.400	2
Février	28.629	39.048	28.000	8.300	2
Mars	30.832	40.899	31.000	7.400	2
Avril	31.083	41.110	30.000	7.200	2
Mai	29.521	39.798	31.000	7.700	2
Juin	27.235	37.877	30.000	7.300	2
Juillet	25.834	36.701	31.000	6.300	1
Août	25.306	36.257	31.000	5.600	1
Septembre	25.900	36.756	30.000	6.600	1
Octobre	27.566	38.155	31.000	8.100	2
Novembre	27.707	38.274	30.000	8.700	2
Décembre	26.100	36.924	31.000	8.300	2

- Formule de Penman modifiée

« Taux d'exploitation et durabilité de la ressource en eau des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla »

Janvier	20.22	0.427	44	13	11.54	11	9.446	1.05	0.69	23.4	10.296	0.953	0.58	201.
Février	26.68	0.438	41	14.05	11.76	11	10.08	1.05	0.76	35.7	14.637	0.935	0.47	198.
Mars	29.34	0.494	45	15.2	12	12	11.4	1.05	0.775	40.1	18.045	1	0.38	253.
Avril	29.95	0.493	50	15.7	12.34	12	11.56	1.05	0.78	42.4	21.2	0.972	2.16	195.
Mai	29.11	0.546	63	15.6	12.64	12	11.31	1.1	0.775	40.1	25.263	0.949	0.24	255.
Juin	27.19	0.468	72	15.4	12.76	12	11.09	1.1	0.76	35.7	25.704	0.94	0.23	242.
Juillet	25.51	0.328	82	15.4	12.66	12	11.15	1.1	0.75	33.6	27.552	0.948	0.2	253.
Août	24.84	0.254	88	15.55	12.44	12	11.39	1.1	0.74	31.7	27.896	0.965	0.18	259.
Septembre	25.09	0.263	91	15.25	12.12	12	11.36	1.1	0.74	31.7	28.847	0.99	0.17	250.
Octobre	25.61	0.274	89	14.55	12.56	12	10.59	1.1	0.75	33.6	29.904	0.955	0.16	241.
Novembre	23.02	0.189	73	13.45	11.56	12	10.34	1.1	0.72	28.1	20.513	1.038	0.29	224.
Décembre	21.22	0.251	58	12.7	11.44	12	9.836	1.1	0.7	24.9	14.442	1.049	0.46	214.

Annexe X: Détails des valeurs d'évapotranspiration de référence calculées par différentes formules pour l'aquifère alluvial de Karfiguéla

• Formule de Thornthwaite

Mois	Tm	im	l	a	F(λ)	Eto Thornthwaite
Janvier	24.8	11.2968993	148.633208	2.87813133	1	69.8283368
Février	26.1	12.2054316	148.633208	2.87813133	0.91	73.6097677
Mars	28.28	13.7815871	148.633208	2.87813133	1.03	104.954775
Avril	29.4	14.6162941	148.633208	2.87813133	1.03	117.368163
Mai	28.56	13.9886992	148.633208	2.87813133	1.08	113.214923
Juin	26.74	12.6614014	148.633208	2.87813133	1.06	91.9349066
Juillet	25.94	12.0923289	148.633208	2.87813133	1.08	85.8285268
Août	25.19	11.56695	148.633208	2.87813133	1.07	78.1482207
Septembre	24.96	11.4074273	148.633208	2.87813133	1.02	72.5554773
Octobre	26.33	12.3686418	148.633208	2.87813133	1.02	84.6176421
Novembre	25.76	11.9655163	148.633208	2.87813133	0.98	76.3361379
Décembre	23.9	10.682031	148.633208	2.87813133	0.99	62.1529871

• Formule de Turc

Mois	Tm	Tm+15	Tm/(Tm+15)	Rg(W/m ²)	Rg(cal/cm ²)	Hr(%)	Eto Turc
Janvier	24.800	39.800	0.623	23.890	49.333	43.810	51.706
Février	26.100	41.100	0.635	31.030	64.077	29.620	66.391
Mars	28.280	43.280	0.653	33.810	69.818	41.270	66.539
Avril	29.400	44.400	0.662	30.810	63.623	65.570	30.095
Mai	28.560	43.560	0.656	31.690	65.440	77.920	30.275
Juin	26.740	41.740	0.641	30.320	62.611	90.520	28.857
Juillet	25.940	40.940	0.634	29.400	60.711	93.610	28.059
Août	25.190	40.190	0.627	28.750	59.369	96.120	27.420
Septembre	24.960	39.960	0.625	32.330	66.761	95.980	29.173
Octobre	26.330	41.330	0.637	39.910	82.414	90.600	33.743
Novembre	25.760	40.760	0.632	34.220	70.664	81.920	47.097
Décembre	23.900	38.900	0.614	29.280	60.463	46.360	55.706

• Formule de Blaney et Criddle

Mois	Températures moyennes	Facteur = (15+0.84Tm)	Nombre jours/mois	Nombre d'heures d'ensoleillement par jour	Nombre d'heures d'ensoleillement
Janvier	24.800	35.832	31.000	8.400	
Février	26.100	36.924	28.000	8.300	
Mars	28.280	38.755	31.000	7.400	
Avril	29.400	39.696	30.000	7.200	
Mai	28.560	38.990	31.000	7.700	
Juin	26.740	37.462	30.000	7.300	
Juillet	25.940	36.790	31.000	6.300	
Août	25.190	36.160	31.000	5.600	
Septembre	24.960	35.966	30.000	6.600	
Octobre	26.330	37.117	31.000	8.100	
Novembre	25.760	36.638	30.000	8.700	
Décembre	23.900	35.076	31.000	8.300	

• Formule de Penman modifiée

Mois	Tm	U en m/s	Hr(%)	Ra	N	n	Rs	C	W	ea	ed	n/N	Rnl	Rn
Janvier	24.800	0.500	43.810	13.200	11.600	11.000	9.559	1.050	0.740	31.700	13.888	0.948	2.704	138.4
Février	26.100	0.660	29.620	14.200	11.800	11.000	10.169	1.000	0.750	33.600	9.952	0.932	3.105	126.5
Mars	28.280	0.460	41.270	15.300	12.000	12.000	11.475	1.050	0.770	37.800	15.600	1.000	2.640	184.9
Avril	29.400	0.640	65.570	15.700	13.300	12.000	11.008	1.100	0.775	40.100	26.294	0.902	1.813	193.2
Mai	28.560	0.550	77.920	15.500	12.600	12.000	11.256	1.100	0.770	40.100	31.246	0.952	1.505	215.0
Juin	26.740	0.470	90.520	15.300	12.700	12.000	11.053	1.100	0.760	35.700	32.316	0.945	1.377	207.4
Juillet	25.940	0.410	93.610	15.300	12.600	12.000	11.111	1.100	0.760	33.600	31.453	0.952	1.468	212.8
Août	25.190	0.390	96.120	15.500	12.400	12.000	11.375	1.100	0.740	31.700	30.470	0.968	1.498	218.0
Septembre	24.960	0.330	95.980	15.300	12.100	12.000	11.412	1.100	0.740	31.700	30.426	0.992	1.550	210.2

Octobre	26.330	0.330	90.600	14.700	11.800	12.000	11.150	1.100	0.760	33.600	30.442	1.017	1.646	208.1
Novembre	25.760	0.270	81.920	13.600	11.600	12.000	10.434	1.100	0.740	33.600	27.525	1.034	1.733	182.7
Décembre	23.900	0.600	46.360	12.900	11.500	12.000	9.955	1.050	0.720	29.800	13.815	1.043	2.877	142.2

Annexe XI: Valeurs de hauteurs annuelles d'eau rechargées calculées par la méthode des fluctuations piézométriques dans la plaine alluviale de Karfiguéla

Piézomètres		Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	N
PzRd 03	Valeurs de H	256.822	256.452	256.322	255.842	256.602	257.522	258.212	260.492	260.492	259.262	259.262
	Δ H		-0.37	-0.13	-0.48	0.76	0.92	0.69	2.28	0	-1.23	
PzRd 04	Valeurs de H	254.155	253.295	253.735	253.175	253.855	254.955	255.395	256.895	256.895	256.695	256.695
	Δ H		-0.86	0.44	-0.56	0.68	1.1	0.44	1.5	0	-0.2	
PzRd 06	Valeurs de H	253.779	253.279	252.819	252.319	253.339	255.179	254.959	257.679	257.679	257.199	257.199
	Δ H		-0.5	-0.46	-0.5	1.02	1.84	-0.22	2.72	0	-0.48	
PzRd 07	Valeurs de H	259.471	258.811	258.471	258.071	259.901	260.651	252.151	259.4	259.4	260.151	260.151
	Δ H		-0.66	-0.34	-0.4	1.83	0.75	-8.5	7.249	0	0.751	
PzRd 08	Valeurs de H	252.133	251.903	251.403	250.903	252.123	254.803	253.403	254.873	254.873	254.583	254.583
	Δ H		-0.23	-0.5	-0.5	1.22	2.68	-1.4	1.47	0	-0.29	
PzRd 10	Valeurs de H	266.227	265.307	265.147	264.867	265.587	266.807	265.817	267.497	267.497	266.147	266.147
	Δ H		-0.92	-0.16	-0.28	0.72	1.22	-0.99	1.68	0	-1.35	
PzRd 11	Valeurs de H	265.713	265.313	265.153	264.613	265.573	266.093	265.933	267.343	267.343	266.793	266.793
	Δ H		-0.4	-0.16	-0.54	0.96	0.52	-0.16	1.41	0	-0.55	
PzRd 12	Valeurs de H	268.613	267.493	267.353	267.493	267.913	269.893	267.973	270.793	270.793	268.353	268.353
	Δ H		-1.12	-0.14	0.14	0.42	1.98	-1.92	2.82	0	-2.44	
PzRd 13	Valeurs de H	267.163	265.823	265.683	265.663	266.463	268.603	266.383	269.523	269.523	266.763	266.763
	Δ H		-1.34	-0.14	-0.02	0.8	2.14	-2.22	3.14	0	-2.76	
PzRd 14	Valeurs de H	269.833	269.073	268.893	268.673	268.973	271.373	269.453	272.543	272.543	270.293	270.293
	Δ H		-0.76	-0.18	-0.22	0.3	2.4	-1.92	3.09	0	-2.25	
PzRd 15	Valeurs de H	276.241	275.381	275.201	274.961	275.821	278.241	275.851	278.981	278.981	276.741	276.741
	Δ H		-0.86	-0.18	-0.24	0.86	2.42	-2.39	3.13	0	-2.24	

« Taux d'exploitation et durabilité de la ressource en eau des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguêla »

PzRd 19	Valeurs de H	277.517	277.117	276.937	275.597	275.957	279.997	278.497	280.17	280.17	279.817	279.817
	Δ H		-0.4	-0.18	-1.34	0.36	4.04	-1.5	1.673	0	-0.353	-0.353
PzRd 21	Valeurs de H	278.703	278.523	278.443	278.133	278.063	278.623	278.543	282	282	279.743	279.743
	Δ H		-0.18	-0.08	-0.31	-0.07	0.56	-0.08	3.457	0	-2.257	-2.257
PzRd 22	Valeurs de H	279.041	279.001	279.161	278.781	278.581	278.891	278.761	281.44	281.44	281.141	281.141
	Δ H		-0.04	0.16	-0.38	-0.2	0.31	-0.13	2.679	0	-0.299	-0.299
PzRd 23	Valeurs de H	277.213	276.593	276.683	276.573	276.813	278.613	276.953	279.753	279.753	277.353	277.353
	Δ H		-0.62	0.09	-0.11	0.24	1.8	-1.66	2.8	0	-2.4	-2.4
PzRd 24	Valeurs de H	279.557	279.917	279.517	279	278.897	280.327	278.657	281.25	281.25	279.557	279.557
	Δ H		0.36	-0.4	-0.517	-0.103	1.43	-1.67	2.593	0	-1.693	-1.693
PzRd 25	Valeurs de H	278.078	277.858	277.828	277.798	277.918	279.498	278.078	279.6	279.6	278.238	278.238
	Δ H		-0.22	-0.03	-0.03	0.12	1.58	-1.42	1.522	0	-1.362	-1.362
PzRd 26	Valeurs de H	276.691	276.551	276.501	276.531	276.771	278.251	276.891	278.75	278.75	277.051	277.051
	Δ H		-0.14	-0.05	0.03	0.24	1.48	-1.36	1.859	0	-1.699	-1.699
PzRd 27	Valeurs de H	276.979	276.839	276.859	276.879	276.879	278.059	276.899	279.12	279.12	277.079	277.079
	Δ H		-0.14	0.02	0.02	0	1.18	-1.16	2.221	0	-2.041	-2.041
PzRd 29	Valeurs de H	274.35	274.28	274.06	271.64	273.84	274.28	274.41	276.3	276.3	275.88	275.88
	Δ H		-0.07	-0.22	-2.42	2.2	0.44	0.13	1.89	0	-0.42	-0.42
PzRd 31	Valeurs de H	276	275.6	275.42	275.04	275.9	276.76	276.7	277.74	277.74	276.98	276.98
	Δ H		-0.4	-0.18	-0.38	0.86	0.86	-0.06	1.04	0	-0.76	-0.76
PzRd 32	Valeurs de H	275.93	275.53	275.37	275.01	275.61	276.2	276.61	277.62	277.62	277.01	277.01
	Δ H		-0.4	-0.16	-0.36	0.6	0.59	0.41	1.01	0	-0.61	-0.61
PzRd 33	Valeurs de H	275.87	275.48	275.2	274.6	275.98	276.74	276.34	277.58	277.58	276.66	276.66
	Δ H		-0.39	-0.28	-0.6	1.38	0.76	-0.4	1.24	0	-0.92	-0.92
PzRd 34	Valeurs de H	276.11	275.69	275.41	274.73	276.11	277.41	276.47	277.43	277.43	276.91	276.91
	Δ H		-0.42	-0.28	-0.68	1.38	1.3	-0.94	0.96	0	-0.52	-0.52
PzRg 01	Valeurs de H	258.321	258.081	257.871	257.411	257.371	257.691	258.871	260.161	260.161	260.191	260.191
	Δ H		-0.24	-0.21	-0.46	-0.04	0.32	1.18	1.29	0	0.03	0.03
PzRg 02	Valeurs de H	250.404	249.674	249.054	247.214	249.274	250.254	251.134	253.204	253.204	253.234	253.234
	Δ H		-0.73	-0.62	-1.84	2.06	0.98	0.88	2.07	0	0.03	0.03
PzRg 03	Valeurs de H	251.819	250.659	250.039	250.919	250.059	251.849	253.499	255.499	255.499	255.579	255.579
	Δ H		-1.16	-0.62	0.88	-0.86	1.79	1.65	2	0	0.08	0.08
PzRg 04	Valeurs de H	258.82	258.42	258.14	257.82	259.34	261.32	259.86	261.49	261.49	261	261
	Δ H		-0.4	-0.28	-0.32	1.52	1.98	-1.46	1.63	0	-0.49	-0.49
PzRg 07	Valeurs de H	275.955	275.635	274.815	274.175	274.395	275.585	275.615	276.745	276.745	276.435	276.435
	Δ H		-0.32	-0.82	-0.64	0.22	1.19	0.03	1.13	0	-0.31	-0.31
PzRg 08	Valeurs de H	272.761	272.041	271.591	270.941	271.461	273.361	272.721	274.681	274.681	274.161	274.161
	Δ H		-0.72	-0.45	-0.65	0.52	1.9	-0.64	1.96	0	-0.52	-0.52
PzRg 09	Valeurs de H	269.89	268.93	268.77	268.89	269.83	272.05	269.61	271.65	271.65	269.91	269.91
	Δ H		-0.96	-0.16	0.12	0.94	2.22	-2.44	2.04	0	-1.74	-1.74
PzRg 10	Valeurs de H	266.188	264.768	264.418	264.448	265.448	267.528	265.488	267.978	267.978	265.888	265.888
	Δ H		-1.42	-0.35	0.03	1	2.08	-2.04	2.49	0	-2.09	-2.09
PzRg 11	Valeurs de H	277.502	276.662	276.142	275.802	275.782	281.42	279.582	280.952	280.952	279.422	279.422
	Δ H		-0.84	-0.52	-0.34	-0.02	5.638	-1.838	1.37	0	-1.53	-1.53
PzRg 12	Valeurs de H	276.572	276.162	275.772	275.272	273.392	278.472	278.272	280.362	280.362	278.452	278.452

« Taux d'exploitation et durabilité de la ressource en eau des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguêla »

	Δ H		-0.41	-0.39	-0.5	-1.88	5.08	-0.2	2.09	0	-1.91	
PzRg 13	Valeurs de H	278.957	278.477	283.797	275.997	275.597	278.417	280.197	281.697	281.697	280.857	27
	Δ H		-0.48	5.32	-7.8	-0.4	2.82	1.78	1.5	0	-0.84	
PzRg 14	Valeurs de H	275.744	275.384	276.364	274.294	274.084	276.764	276.924	278.314	278.314	279.304	27
	Δ H		-0.36	0.98	-2.07	-0.21	2.68	0.16	1.39	0	0.99	
PzRg 15	Valeurs de H	276.193	275.883	275.633	275.233	275.113	276.073	276.973	279.473	279.473	277.293	27
	Δ H		-0.31	-0.25	-0.4	-0.12	0.96	0.9	2.5	0	-2.18	
PzRg 16	Valeurs de H	275.974	275.474	275.074	274.594	274.954	275.834	276.214	278.374	278.374	277.154	27
	Δ H		-0.5	-0.4	-0.48	0.36	0.88	0.38	2.16	0	-1.22	
PzRg 17	Valeurs de H	275.175	274.925	274.725	275.115	275.515	276.285	275.075	277.215	277.215	275.715	27
	Δ H		-0.25	-0.2	0.39	0.4	0.77	-1.21	2.14	0	-1.5	
PzRg 19	Valeurs de H	273.257	272.957	273.157	272.837	273.677	274.837	274.017	276.497	276.497	274.237	27
	Δ H		-0.3	0.2	-0.32	0.84	1.16	-0.82	2.48	0	-2.26	
PzRg 20	Valeurs de H	275.11	274.55	274.41	274.27	274.41	277.31	274.87	277.54	277.54	275.05	27
	Δ H		-0.56	-0.14	-0.14	0.14	2.9	-2.44	2.67	0	-2.49	
PzRg 21	Valeurs de H	275.892	275.552	275.212	274.732	275.412	276.792	276.452	276.982	276.982	276.972	27
	Δ H		-0.34	-0.34	-0.48	0.68	1.38	-0.34	0.53	0	-0.01	
PzRg 22	Valeurs de H	276.333	275.993	275.633	275.373	275.833	278.773	277.673	278.043	278.043	278.273	27
	Δ H		-0.34	-0.36	-0.26	0.46	2.94	-1.1	0.37	0	0.23	
PzRg 24	Valeurs de H	275.436	274.59	274.4	274	275.44	278.9	276.08	278.37	278.37	277.04	27
	Δ H		-0.846	-0.19	-0.4	1.44	3.46	-2.82	2.29	0	-1.33	
PzRg 26	Valeurs de H	275.841	274.85	274.61	274.15	275.27	276.31	276.32	278.07	278.07	277.81	27
	Δ H		-0.991	-0.24	-0.46	1.12	1.04	0.01	1.75	0	-0.26	
PzRg 28	Valeurs de H	276.973	275.75	275.43	274.72	275.36	276.36	275.42	278.11	278.11	278.4	27
	Δ H		-1.223	-0.32	-0.71	0.64	1	-0.94	2.69	0	0.29	
PzRg 29	Valeurs de H	275.618	274.89	274.63	274.05	275.43	277.15	275.83	277.1	277.1	276.03	27
	Δ H		-0.728	-0.26	-0.58	1.38	1.72	-1.32	1.27	0	-1.07	
PzRg 30	Valeurs de H	274.762	274	273.68	273.14	274.26	277.2	275.06	276.79	276.79	275.3	27
	Δ H		-0.762	-0.32	-0.54	1.12	2.94	-2.14	1.73	0	-1.49	
PzRg 31	Valeurs de H	276.513	275.91	275.6	274.81	276.15	277.17	276.95	277.42	277.42	277.17	27
	Δ H		-0.603	-0.31	-0.79	1.34	1.02	-0.22	0.47	0	-0.25	
PzRg 32	Valeurs de H	276.992	276.55	276.2	275.46	276.92	276.08	277.4	277.42	277.42	276.88	27
	Δ H		-0.442	-0.35	-0.74	1.46	-0.84	1.32	0.02	0	-0.54	
PzRg 33	Valeurs de H	276.274	275.65	275.19	274.45	276.65	277.53	276.43	277.5	277.5	277.59	27
	Δ H		-0.624	-0.46	-0.74	2.2	0.88	-1.1	1.07	0	0.09	
TOTAL												