



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering



***CARACTERISATION HYDROLOGIQUE DES SOUS-BASSINS DE LA SANDOUGOU EN
VUE DE LA DEFINITION D'ESPACES DE GESTION ET DE VALORISATION DES
RESSOURCES EN EAU AU PROFIT DES COMMUNAUTES.***

***MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER SPECIALISE EN GESTION
INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU***

Présenté et soutenu publiquement le 23 Septembre 2011 par

Sompohi Guy Pacôme ZADE

Travaux dirigés par :

Matar NDAO
*Coordonnateur Projet GWI-Sénégal
Consortium (CRS&UICN)*

et

Dr. Harouna KARAMBIRI
*Enseignant-chercheur au 2iE
UTER: GVEA*

Jury d'évaluation du stage :

*Président : Dr Harouna KARAMBIRI
Membres et correcteurs :
Marcelin KOUAKOU
Angelbert BIAOU*

Promotion 2010-2011

DEDICACES

A la mémoire de mon regretté grand frère

A mon père et à ma mère : Sans vous rien n'aurait pu être fait

A mes sœurs : Paule-Andrée, Marie-Joëlle et Reine-Edwige

A mon frère : Justin-Gérald

A mon fils : Marc-Yvon

A mes nièces et à mon neveu : Ange-Christelle, Ange-Axelle, Ange-Morel, Marie-Saphira et Ange-Anielle.

Et c'est à la grande famille ZADE que je dédie ce travail

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord rendre gloire à YAHVE DIEU qui m'a donné la santé, la sagesse et l'intelligence et qui m'a soutenu de bout en bout tout au long de mes études et particulièrement pendant la rédaction de ce mémoire.

Ce travail de fin d'études est le fruit de la coopération entre le 2iE et le Programme Global Water Initiative Afrique de l'Ouest.

A terme, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce document.

En premier lieu, j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements aux autorités du consortium UICN-CRS (Mr Racine Kane et Mme Nicole POIRIER) et à l'équipe du projet GWI-Sénégal (*Matar NDAO, Paul DIOUF, Modou DIOUF, Ngatté DIOP, Demba AW, Famara Sambou*) qui ont accepté volontiers de nous accueillir en stage et ont mis à notre disposition les moyens matériels et financiers pour le bon déroulement de notre stage.

Je voudrais particulièrement adresser mes remerciements à *M. Matar NDAO* qui en dépit de ses multiples occupations professionnelles, a bien voulu prendre en main la co-direction des travaux de ce mémoire. Ses idées, ses explications et ses critiques ont insufflé de l'élan à ce travail. Merci pour nous avoir fait découvrir le projet et mettre à notre disposition les moyens pour la réalisation ce travail.

Je voudrais exprimer ma gratitude à mon encadreur Dr. Harouna KARAMBIRI qui, de bout en bout a suivi mes travaux malgré la distance nous séparant. Ses encouragements et suggestions à travers les mails m'ont permis d'avancer et peaufiner avec assurance ce mémoire.

Je remercie la Direction Régionale de l'Hydraulique de Tambacounda, particulièrement M. Djibril SOKHNA, chef de la brigade d'hydrologie et M. Yaya SOUANE, chef de brigade des puits et forages, pour les données, les discussions instructives et conseils qu'ils nous ont apportés.

Je souhaite remercier l'administration, les enseignants et tous mes camarades de la promotion de Master Spécialisé GIRE 2010/2011 du 2iE pour leur disponibilité, la qualité de la formation, la compréhension, l'entraide et le compagnonnage.

Je tiens aussi à remercier M. Augustin GANSORE à Ouagadougou qui a accepté sans réserve de nous accueillir sous son toit et de nous accorder l'hospitalité durant notre séjour au pays des hommes intègres.

Merci à l'Union Européenne pour le financement de la formation.

Merci à l'Office Allemand d'Echanges Universitaires (DAAD) qui m'a octroyé une bourse, lequel soutien m'a permis de mener à bien cette formation.

RESUME

Ce présent travail de mémoire de fin d'études intitulé « Caractérisation hydrologique des sous-bassins de la Sandougou en vue de la définition d'espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés » vise à contribuer à la connaissance de la situation actuelle des ressources en eau dans ledit bassin versant avec une perspective d'élaboration d'un plan d'aménagement et de gestion. Il s'agit, dans un premier temps de délimiter le bassin de la Sandougou en sous bassin, dans un second temps de faire une étude hydroclimatique du bassin, dans un troisième temps d'évaluer les ressources en eau souterraine à l'aide du SIG et dans un quatrième temps d'évaluer la qualité des ressources en eau souterraine dans le bassin.

Une approche méthodique basée principalement sur la collecte des données et des entretiens, mais aussi sur la consultation documentaire a permis de mener à bien cette étude.

Le bassin versant de la Sandougou a été délimité en quatre sous-bassins qui définissent des espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés, en tenant compte des critères hydrologiques, géomorphologiques et socioéconomiques.

L'étude des paramètres climatiques a montré que leur fluctuation mensuelle permet de dire que le bassin est soumis à un climat à deux saisons ; une saison sèche plus longue de novembre à avril et une saison pluvieuse courte de mai à octobre.

L'étude hydrologique a montré que les débits des eaux de surface se caractérisent par des modules faibles (inférieurs à $1\text{m}^3/\text{s}$) et variables dans le temps.

Le SIHRS a rendu possible la cartographie thématique des ressources en eau souterraine en relation avec le réseau hydrographique caractéristique du drainage en surface. Cette étude révèle que dans le bassin de la Sandougou les ressources en eau souterraine sont disponibles et accessibles car 54 % et 85 % du territoire présente respectivement une bonne disponibilité et une bonne accessibilité. Aussi ces ressources disponibles et accessibles sont mal exploitées avec 77 % de la superficie présentant une exploitabilité des ressources en eau souterraine mauvaise et médiocre.

L'étude de la qualité des eaux souterraines a montré que les eaux sont de bonne qualité physicochimique mais sur le plan microbiologique des indices de pollution existent au niveau de certains ouvrages.

Mots clés: Sandougou, sous-bassins, hydrologie, système d'information géographique, ressources en eau.

SUMMARY:

This work is based on the characterization of hydrologic sub-basins of the definition given in Sandougou space management and utilization of water resources for communities. This work aims to contribute to the knowledge of the current situation of water resources in that basin with a view to developing a management plan and management. He acts as a first step to define the basin Sandougou in sub-basin, in a second time to study the hydro-pool, in a third time to evaluate the groundwater resources using the GIS and a fourth time to evaluate the quality of groundwater resources in the basin.

A systematic approach based primarily on data collection and interviews, as well as the consultation document has to carry out this study.

The watershed was delineated Sandougou into four sub-basins that define space management and utilization of water resources for communities, taking into account the criteria hydrological, geomorphological and socioeconomic backgrounds.

The study of climatic parameters showed that their monthly fluctuation can say that the basin is subject to a climate with two seasons, longer dry season from November to April and a short rainy season from May to October.

The hydrological study showed that the flow of surface water modules is characterized by low (less than $1\text{m}^3 / \text{s}$) and time-varying.

The GIS has made possible the thematic mapping of groundwater resources in relation to the drainage characteristic of the surface drainage. This study shows that in the basin of the Sandougou the groundwater resources are available and accessible for 54% and 85% respectively of the territory has good availability and good accessibility. As these resources are poorly utilized and available with 77% of the area with an exploitable groundwater resource of poor and mediocre.

The study of groundwater quality has shown that the waters are of good quality but in terms of physicochemical indicators of microbiological pollution exist in some works.

Keywords: Sandougou, sub-basins, hydrology, GIS, water resources.

LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ANSD: Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

BRH: Brigade Régionale de l'Hygiène

CRS: Catholic Relief Services

CSE: Centre de Suivi Ecologique

DEM : Digital Elevation Model

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

GDEM : Global Digital Elevation Model

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

GVEA : Gestion Valorisation de l'Eau et Assainissement

GWI : Global Water Initiative

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NASA : National Aeronautics and Space Administration

OMD : Objectif du Millénaire pour le Développement

PEPAM : Programme National d'Eau Potable et de l'Assainissement du Millénaire

PRDI : Plan Régional de développement Intégré

RFU : Réserve Facilement Utilisable

SIG : Système d'Information Géographique

SIHRS : Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

UTER : Unité Thématique d'Enseignement et de Recherche

WIST: Warehouse Inventory Search Tool

SOMMAIRE

DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
RESUME	iv
Liste des abréviations.....	vi
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xi
CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE.....	1
1.1 Contexte général de l'étude.....	2
1.2 Problématique.....	2
1.3 Objectifs de l'étude.....	3
1.3.1 Objectif principal.....	3
1.3.2 Objectifs spécifiques.....	3
1.4 Intérêt de l'étude.....	4
1.5 Limite de l'étude.....	4
CHAPITRE II : CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DE LA ZONE D'ETUDE.....	5
2.1 Situation géographique et localisation.....	5
2.2 Milieu biophysique du bassin versant.....	6
2.2.1 Relief.....	6
2.2.2 Hydrologie.....	7
2.2.3 Géologie et Hydrogéologie.....	8
2.2.3.1 Géologie.....	8
2.2.3.2 Hydrogéologie.....	8
2.2.4 Pédologie.....	9
2.2.5 Végétation.....	10
2.2.6 Climat.....	11
2.3 Milieu humain.....	11
2.3.1 Population.....	11
2.3.2 Activités économiques.....	12
2.4 Conclusion partielle.....	12

CHAPITRE III : MATERIEL ET APPROCHE METHODOLOGIQUE	13
3.1 Données et matériels utilisées	13
3.1.1 Collecte des données.....	13
3.1.2 Matériels.....	14
3.2 Approche méthodologique pour le découpage du bassin de la Sandougou en sous-bassins....	14
3.2.1 Le Système d'Information Géographique (SIG).....	15
3.2.2 Méthode de délimitation du bassin versant et de ses sous-bassins élémentaires selon les critères hydrologiques.....	15
3.2.3 Agrégation des sous-bassins élémentaires en sous-bassins versants selon des critères hydrologiques, géomorphologiques et socioéconomiques.....	16
3.3. Etude hydroclimatologique du bassin de la Sandougou.....	18
3.4 Evaluation des ressources en eau.....	18
3.5 Etude hydrologique des sous bassin de la Sandougou.....	19
3.6 Evaluation des ressources en eau souterraine du bassin à l'aide du SIHRS.....	20
3.6.1 Conception et mise en place de la base de données hydrogéologiques utilisées dans l'élaboration du SIHRS.....	20
3.6.2 Choix des critères.....	20
3.6.3 Classification des critères.....	20
3.6.4 Cartographie thématique des ressources en eau souterraine du bassin de la Sandougou.....	21
3.7 Etude de la qualité des ressources en eau souterraine.....	23
CHAPITRE IV: RESULTATS ET INTERPRETATIONS	24
4.1 Paramètres de forme et analyse du réseau hydrographique du bassin de la Sandougou.....	24
4.2 Délimitation des sous bassins élémentaires.....	25
4.3 Agrégation des sous-bassins élémentaires en sous-bassins versants selon des critères hydrologiques, géomorphologiques et socioéconomiques.....	26
4.4 Etudes des paramètres climatiques.....	27
4.4.1 Les pluies mensuelles	29
4.4.2 Diagramme Ombrothermique	30
4.4.3 Conclusion partielle	30
4.5 Résultat de l'étude de l'évapotranspiration.....	31
4.5.1 Comparaison entre la pluviométrie, l'ETP et l'ETR.....	31
4.5.2 Calcul du bilan hydrologique sur le bassin de la Sandougou.....	32
4.5.2.1 Calcul de l'infiltration à partir de l'équation du bilan.....	33

4.5.2.2 Discussion des résultats du bilan hydrologique.....	34
4.6 Résultat de l'étude hydrologique.....	35
4.6.1 Régime mensuel et annuel des débits.....	35
4.6.2 Interprétation de l'étude hydrologique.....	37
4.7 Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale (SIHRS).....	37
4.7.1 Carte de densité de drainage.....	37
4.7.2 Carte du niveau statique.....	38
4.7.3 Carte des débits d'exploitation.....	39
4.7.4 Carte de profondeurs des forages.....	40
4.7.5 Cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité.....	41
4.7.5.1 La carte de disponibilité des ressources en eau	41
4.7.5.2 La carte d'accessibilité des ressources en eau.....	43
4.7.5.3 La carte d'exploitabilité des ressources en eau.....	44
4.7.5.4 Carte des potentialités en eau souterraine.....	45
4.7.6 Discussion des résultats de la cartographie thématique.....	46
4.7.7 Conclusion partielle.....	46
4.8 Qualité des ressources en eau souterraine.....	47
4.9 Conclusion partielle.....	47
CHAPITRE V : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	48
5.1 Conclusions.....	48
5.2 Recommandations.....	49
5.2.1 Recommandations aux pouvoirs politiques.....	49
5.2.2 Recommandations pour les travaux futurs.....	49
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	50
ANNEXE 1 :	52
ANNEXE 2 :	53
ANNEXE 3 :	54
ANNEXE 4 :	55
ANNEXE 5 :	61

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la zone d'étude	5
Figure 2: Carte topographique issue du MNT du bassin de la Sandougou.....	6
Figure 3: Carte du réseau hydrographique du bassin de la Sandougou	7
Figure 4: Carte des aquifères captés par les forages dans le bassin de la Sandougou	9
Figure 5: Esquisse pédologique du bassin de la Sandougou	10
Figure 6: méthode de délimitation du bassin versant et des sous bassins élémentaires	16
Figure 7: Organigramme générale pour le découpage du bassin de la Sandougou en sous bassins..	17
Figure 8: Organigramme de mise en place du SIHRS.....	22
Figure 9: Hiérachisation du réseau hydrographique du bassin de la Sandougou.	21
Figure 10: Carte des sous bassins élémentaires de la Sandougou	25
Figure 11: Découpage du bassin de la Sandougou en sous bassins.....	26
Figure 12: Variation des paramètres climatiques à Tambacounda (1991-2007).	27
Figure 13: Variation des paramètres climatiques à Goudiry (1991-2007)	28
Figure 14: Pluies mensuelles à Tambacounda et à Goudiry (1991-2007).....	29
Figure 15 : Digramme Ombrothermique à Tambacounda et à Goudiry (1991-2007).....	30
Figure 16 : Variation mensuelle de la pluviométrie, de l'ETP et de l'ETR à Tambacounda et à Goudiry (1991-2007)	31
Figure 17 : Débit moyen mensuel et annuel dans le bassin de la Sandougou (1973-2000).....	35
Figure 18 : Volume d'eau (m3) aux stations de Koussanar et Sinthiou Malème (1973-2000).....	36
Figure 19 : Carte de densité de drainage dans le bassin de la Sandougou	38
Figure 20 : Carte des niveaux statiques de l'eau dans les forages	39
Figure 21 : Carte des débits d'exploitation	41
Figure 22 : Carte des profondeurs de forage	42
Figure 23 : Carte de disponibilité des ressources en eau souterraine	42
Figure 24 : Carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine	43
Figure 25 : Carte d'exploitabilité des ressources en eau souterraine	44
Figure 26 : Carte de potentialité des ressources en eau souterraine	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Stations hydrométriques du bassin de la Sandougou	19
Tableau 2: Classification des critères par classe	21
Tableau 3: Attribution de poids aux différents critères	22
Tableau 4: Caractéristiques morphométriques du bassin de la Sandougou.....	24
Tableau 5: Bilan hydrologique de Thornthwaite à Tambacounda et à Goudiry (1991-2007).....	32
Tableau 6: Débits moyens annuels et mensuels (m ³ /s) à Koussanar et à Sinthiou Malème... ..	35

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

1.1 Contexte général de l'étude

Pays sahélien et en voie de développement, le Sénégal dispose de nombreuses ressources en eau fortement tributaires des conditions pluviométriques et mal réparties.

C'est à ce titre que le Sénégal a, assez tôt, fait de la maîtrise de l'eau une sur-priorité, bien avant que la communauté internationale ne soit résolument acquise à cette cause majeure et l'inscrive en très bonne place parmi les huit Objectifs du Millénaire pour le Développement(OMD), contre la pauvreté. C'est ainsi que l'État sénégalais a mené depuis plusieurs décennies, une politique de maîtrise de l'eau visant à mettre à la disposition des divers utilisateurs une eau en quantité suffisante et de qualité appropriée selon les usages. Et face à cette impérieuse nécessité de redresser la situation, le Sénégal s'est engagé depuis 2007 dans une politique de gestion intégrée de ses ressources en eau afin de corriger les tendances lourdes du secteur, de satisfaire les diverses sollicitations accrues des ressources en eau nécessaires dans les années à venir, de pouvoir répondre aux besoins en eau des générations futures, d'adapter les politiques actuelles inadéquates, et d'intégrer les sous secteurs négligés dans le domaine.

C'est dans cette optique que le « Global Water Initiative » (GWI) qui est un programme financé par la Fondation Howard G. Buffett a décidé d'accompagner le Sénégal dans la mise en œuvre de la GIRE. L'objectif du GWI est d'appuyer l'approvisionnement en eau potable des communautés vulnérables de façon durable et équitable dans les zones arides et semi-arides dans 13 pays de l'Amérique Centrale, l'Afrique de l'Est et l'Afrique de l'Ouest.

Au Sénégal, GWI a mis en place un consortium constitué de Catholic Relief Services (CRS) et l'UICN, pour la mise en œuvre du Projet «Apprendre à tous les niveaux en commençant par le village : La gestion communautaire des ressources en eau et de l'assainissement dans la région de Tambacounda ». Ce projet vise à améliorer de façon durable la qualité de vie des populations, par l'appropriation de la gestion intégrée des ressources en eau du bassin de la Sandougou.

Le projet cible en particulier les Communautés Rurales de Makacoulibatang et Ndogo Babacar, où les besoins d'accès à l'eau potable, à l'assainissement et hygiène sont prononcés.

Or l'application effective de l'approche « gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) » dans le bassin de la Sandougou exige une meilleure connaissance et une caractérisation de ce

bassin. C'est-à-dire faire l'état des lieux des ressources en eau (état actuel au double plan quantitatif et qualitatif, fonctionnement du système d'écoulement, gestion et contraintes).

C'est dans ce cadre que le projet GWI Sénégal en collaboration avec le 2iE a jugé nécessaire de formuler cette thématique : « **Caractérisation du comportement hydrologique des sous-bassins du cours d'eau Sandougou en vue de la définition d'espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés** », comme un sujet de mémoire de fin d'études afin de contribuer à la mise en œuvre de la GIRE dans le bassin versant de la Sandougou.

1.2 Problématique

Au Sénégal, l'accès à l'eau constitue un handicap majeur pour le monde rural. En effet, les populations sont confrontées à la fois à la rareté des points d'eau potable et de la pénibilité de l'exhaure et du transport. Pour améliorer les conditions de vie des populations en zone rurale, les autorités sénégalaises, avec le PEPAM, ont élaboré un plan de restructuration et de développement des points d'alimentation en eau potable des populations. Les objectifs du PEPAM visent à accroître l'accès à l'eau potable dans les zones rurales de 67% à 82% et l'accès à l'assainissement de 17% à 59% d'ici à 2015. En considérant ces objectifs du PEPAM et en se référant au rapport d'évaluation de l'UICN (2007), Kolda avec 45%, Tambacounda 51% et Ziguinchor 52% constituent le trio ayant le plus faible taux d'accès à l'eau potable.

La région de Tambacounda est confrontée à de réelles difficultés d'approvisionnement en eau et d'assainissement. Le taux de 51% au niveau régional, contraste avec le faible taux d'accès à l'eau (4%) de certaines communautés tandis que le taux d'assainissement régional de 17% est en deçà de la moyenne nationale (ANSD, 2010). Alors que la région se caractérise par une indisponibilité d'une ressource en eau de qualité, il existe une demande en eau croissante aussi bien pour le bétail que les humains.

L'accès à la ressource se caractérise par une multitude d'usages tels que l'alimentation en eau des populations, l'abreuvement du bétail, la pêche, la confection de briques, la cueillette, la poterie, et, dans une moindre mesure, le maraîchage et la riziculture.

Dans la région de Tambacounda, plusieurs acteurs interviennent dans le secteur de l'eau et l'assainissement. La plupart de ces intervenants sont engagés dans des projets

d'assainissement et d'approvisionnement en eau avec un accent marqué sur la gestion intégrée des ressources en eau.

Malgré les efforts déployés par ces différents acteurs, la région de Tambacounda présente de faibles indicateurs sociaux de santé, d'éducation (23% alphabètes), et d'assainissement (17%). L'accès à l'eau potable (51%) demeure encore faible malgré les efforts en cours.

Dans le cadre du projet GWI, le défi majeur va consister à développer une stratégie GIRE et à instaurer des mécanismes organisationnels favorisant une gestion rationnelle et durable des ressources pour les divers usages.

L'application effective de l'approche « gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) » dans le bassin de la Sandougou passe nécessairement par la réponse aux questions suivantes :

Sur quels critères doit-on se baser pour découper le bassin en sous bassins en vue de la définition d'espace de gestion et de valorisation des ressources en eau ?

Quelle est la disponibilité des ressources en eau de surface et en eau souterraine du bassin ?

Quelle est la qualité des ressources en eau au niveau du bassin?

Quels sont les usages actuels et potentiels de l'eau au niveau du bassin ?

1.3 Objectifs de l'étude

1.3.1 Objectif principal

Etudier l'hydrologie des sous bassins de la Sandougou pour une meilleure gestion et valorisation des ressources en eau.

1.3.2 Objectifs spécifiques

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- Déterminer les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de la Sandougou ;
- Discrétiser le bassin versant de la Sandougou en sous-bassins en fonction des réalités hydrologiques et socioéconomiques ;
- Faire une étude hydroclimatique du bassin de la Sandougou ;

- Evaluer la disponibilité des ressources en eau et leur qualité au niveau du bassin de la Sandougou.

1.4 Intérêt de l'étude

La finalité de cette étude est d'introduire les principes de la GIRE dans la gestion des ressources en eau au niveau du bassin de la Sandougou afin de contribuer à l'exploitation efficiente des ressources naturelles du bassin et de répondre aux OMD liés à l'eau. L'évaluation des ressources en eau dans le bassin versant et la connaissance du fonctionnement hydrologique de celui-ci permettront aux décideurs politiques et aux responsables qui y sont à la charge d'envisager d'autres utilisations et de prévenir les éventuels conflits liés à l'utilisation des ressources en eau. Ce travail permettra aussi d'améliorer l'état des connaissances des ressources en eau dans le bassin.

1.5 Limite de l'étude

Les principales limites de l'étude ont été :

- Le manque de données hydrométriques sur toute la période choisie pour évaluer l'impact des variations climatiques sur les ressources en eau dans le bassin versant de la Sandougou ;
- Le manque de données piézométriques n'a pas permis d'estimer les quantités d'eau souterraines dans les nappes souterraines.

Pour chacun de nos objectifs, nous avons recensé les principales sources de collecte des données et élaborer des méthodes et techniques appropriées pour les acquérir. Une recherche documentaire nous a permis d'avoir des données secondaires. La démarche adoptée s'est effectuée en étapes par la collecte des données, des entretiens avec des personnes ressources, une synthèse documentaire et le dépouillement et traitement des données collectées.

Nous avons subdivisé le travail en cinq chapitres. Après le chapitre introductif, nous avons fait une présentation de la zone d'étude au chapitre 2. Le chapitre 3 est consacré aux matériels et méthodes utilisés pour mener cette étude. Le chapitre 4 regroupe les résultats obtenus et les discussions menées sur les différents aspects. Nous avons achevé par une conclusion et des recommandations.

CHAPITRE II : CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DE LA ZONE D'ETUDE

2.1 Situation géographique et localisation

La Sandougou dernier grand affluent de rive droite du fleuve Gambie a un bassin versant de 11 900 km² et est situé entre les latitudes 13°27 et 14°36 Nord et les longitudes 12°42 et 14°32 Ouest. Le bassin versant a une forme ovale grossièrement orientée Nord et Sud-Ouest. Il est partagé entre l'Etat du Sénégal où il prend sa source à environ 75m d'altitude dans le département de Bakel à l'Est, et la Gambie où il se jette dans le bief maritime du fleuve Gambie. Cependant, la majeure partie du bassin se situe en territoire sénégalais (Fig.1).

Au plan administratif, le bassin versant de la Sandougou est entièrement situé dans la région de Tambacounda au Sud-est du Sénégal, il est à cheval sur 5 départements.

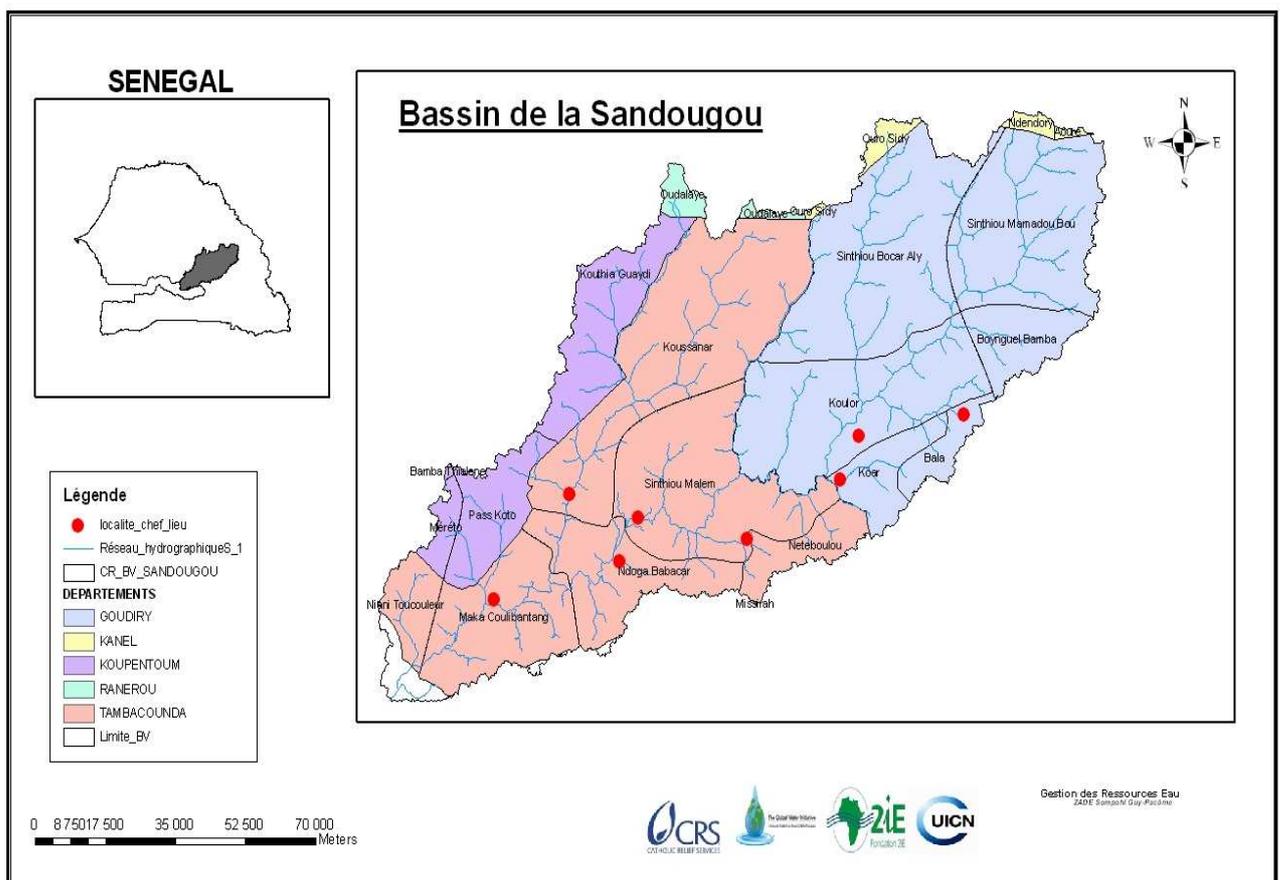


Figure 1 : Localisation du Bassin de la Sandougou (CSE, 2005)

2.2 Milieu biophysique du bassin versant

2.2.1 Relief

Le bassin versant de la Sandougou s'étend sur une région dont les altitudes diminuent considérablement du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Cette décroissance des altitudes permet de découper le bassin en deux domaines:

- le cours supérieur où les altitudes varient entre 57 et 96 m et correspond au domaine des contreforts septentrionaux du Fouta-Djalon. On y trouve des buttes témoins et des inselbergs sur les hauts reliefs. Les pentes sont très fortes et donnent des vallées encaissées. Au sortir de cette zone, on s'approche des 200m d'altitude où on trouve des plateaux aux pentes relativement faibles.
- La moyenne et basse Sandougou où les altitudes sont inférieurs à 57 m et permettent à la plaine de s'étaler largement.

Dans l'ensemble, le bassin versant est caractérisée par un relief plat entrecoupé par de légères dépressions. Ces dépressions sont des vallées fossiles du système de la rivière Sandougou, et de quelques mares, entre autres.

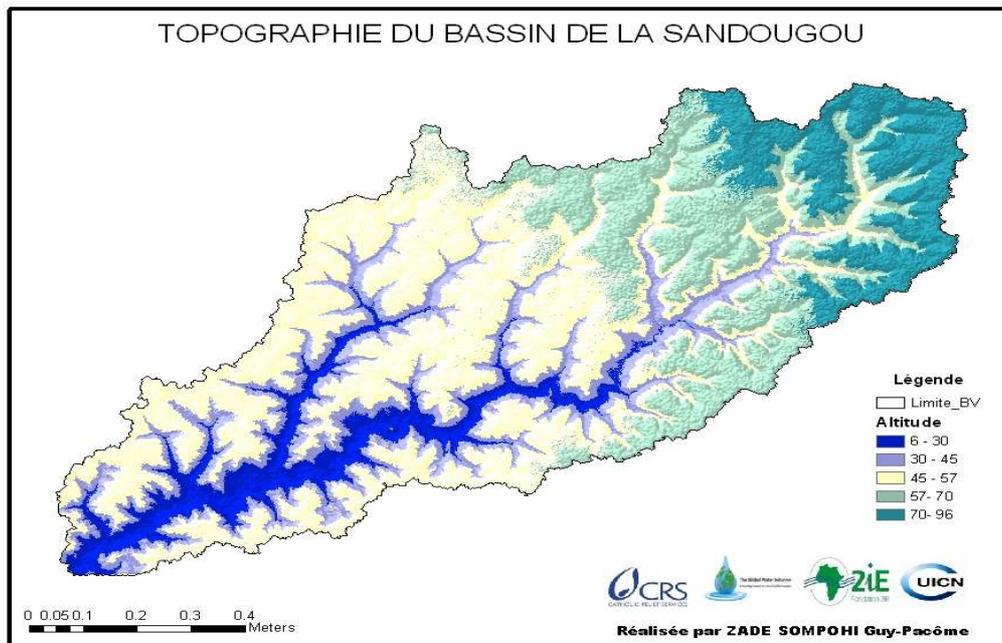


Figure 2 : Carte topographique issue du MNT du bassin de la Sandougou (ASTER GDEM, 2009)

2.2.2 Hydrologie

Le bassin versant de la Sandougou est caractérisé par un potentiel hydrographique important. Ce potentiel provient essentiellement d'un réseau hydrographique relativement dense avec de larges ramifications. Ce réseau hydrographique est constitué essentiellement de la rivière Sandougou et de ses principaux affluents que sont Koussanar, Mamacounda, Badiara et Koungala.

Le régime hydrologique des cours d'eau du bassin est marqué par une période de hautes eaux pendant l'hivernage et une période de basses eaux pendant la saison sèche. Outre le réseau hydrographique, il existe un bon maillage du bassin par des mares et marigots qui représentent une source importante d'eau de surface pour l'alimentation du bétail et dans une moindre mesure pour l'agriculture. Ces mares sont alimentées par les précipitations, la Sandougou et ses affluents en période de crue et ne tarissent qu'aux mois de janvier et février.

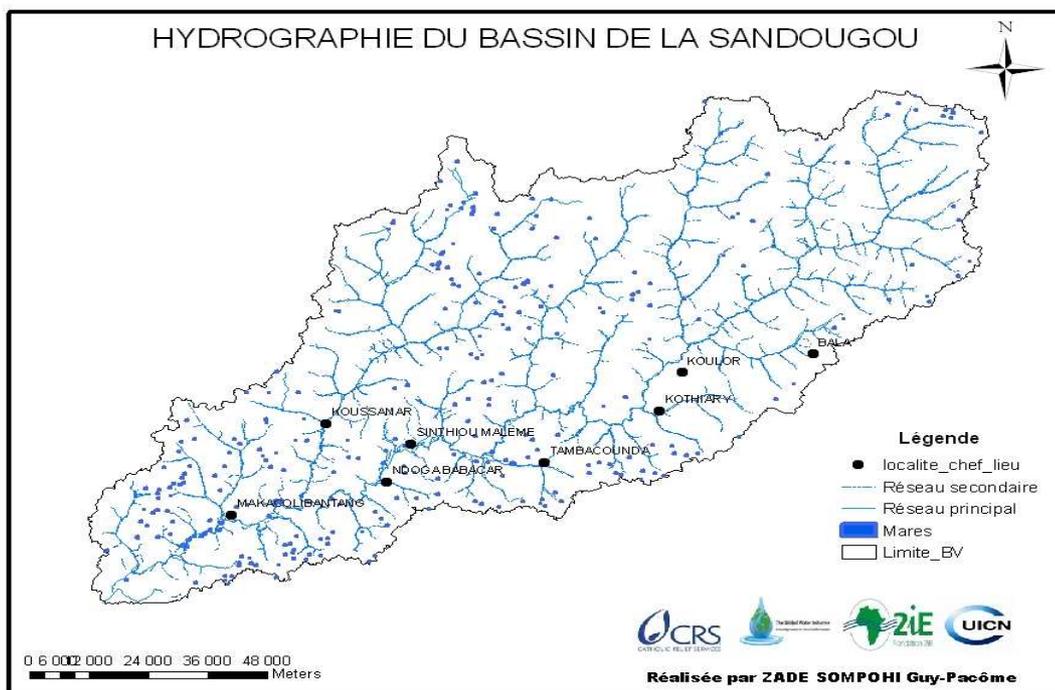


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin de la Sandougou issue du MNT (ASTER GDEM, 2009)

2.2.3 Géologie et Hydrogéologie

2.2.3.1 Géologie

La majeure partie du bassin de la Sandougou appartient au grand bassin sénégal-mauritanien où se sont accumulées les dépôts du Secondaire et du Tertiaire alors que le socle précambrien formé de roches magmatiques et métamorphiques affleure au Sud-est du bassin (Ndour, 1990 cité par Coly, 2009).

2.2.3.2 Hydrogéologie

Les ressources en eaux souterraines dans le bassin versant de la Sandougou sont constituées principalement par quatre types de systèmes aquifères :

- La **nappe phréatique** du Continental Terminal et l'Oligo-Miocène est contenue dans des horizons sablo-argileux et des niveaux latéritiques perméables. Le potentiel en eau est intéressant du point de vue qualitatif (résidu sec entre 200 et 600 mg/l) et quantitatif (débits ponctuels de 40 à 80 m³/h). La profondeur des nappes varie de 30 m à plus de 60 m (PRDI, 2001)
- L'**Eocène** qui renferme la nappe intermédiaire est constitué de grès calcaires faiblement fissurés et de sables coquilliers. Il est capté pour l'alimentation en eau potable de la ville de Tambacounda avec des débits de 20 à 50 m³/h.
- Le **Maastrichtien** qui renferme la nappe profonde est constitué de sables et de grès repose directement sur le socle. Son toit se situe entre 150 et 300 mètres. Son eau est de bonne qualité (résidu sec inférieur à 500 mg/l) et des débits pouvant atteindre 24 m³/h.
- Dans le **Socle ancien**, les nappes sont très localisées et dispersées avec de faibles débits. Elles se caractérisent par une grande variabilité de leurs paramètres hydrodynamiques. Les nappes présentes dans cet environnement cristallin ont une profondeur variant entre 40 et 60 m (PRDI, 2001). Le niveau d'exploitation des ressources dans cette zone éco-géographique est faible et l'eau y est de bonne qualité.

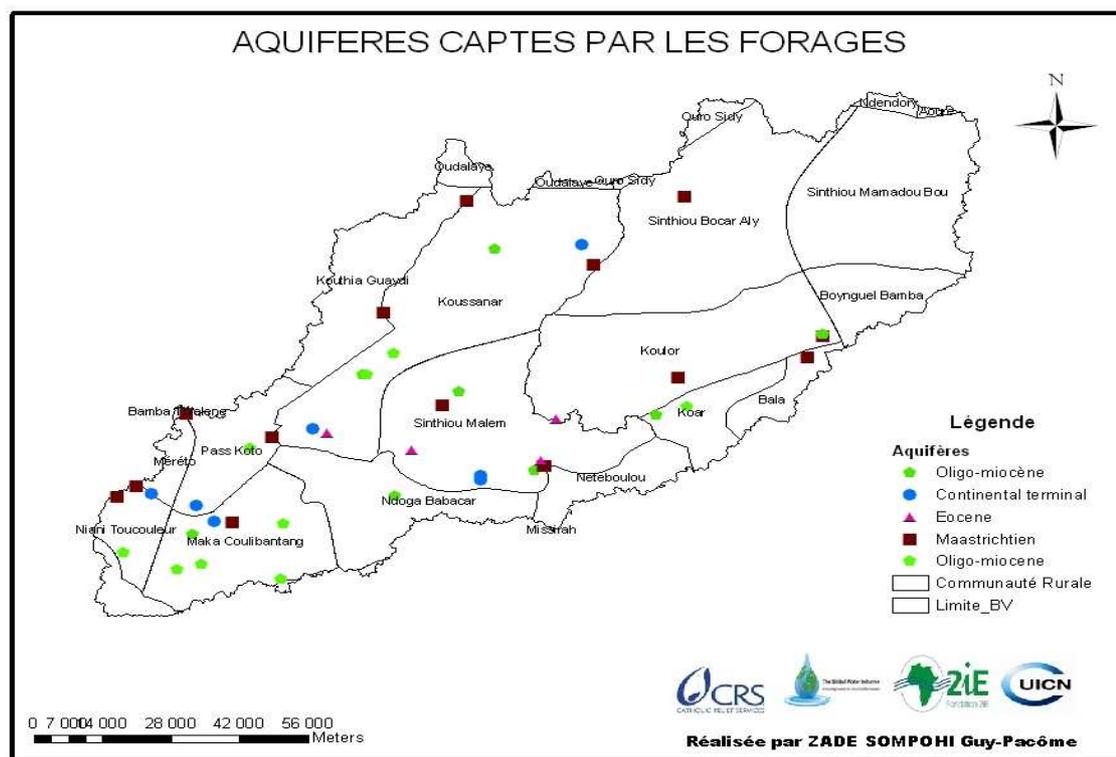


Figure 4: Aquifères captés par les forages dans le bassin de la Sandougou

2.2.4 Pédologie

Les sols sont essentiellement de type faite de sols ferrugineux tropicaux, lessivés, remaniés, sur colluvio-alluvions sur les terrasses, peu évolués d'apport colluvial sur les versants et hydromorphes d'apport alluvio-colluvial au niveau des vallées/ dépression. Ils sont de textures respectivement sablo-argileuses et argilo-limono-sableuses, avec une perméabilité moyenne à faible (Badiane, 1999).

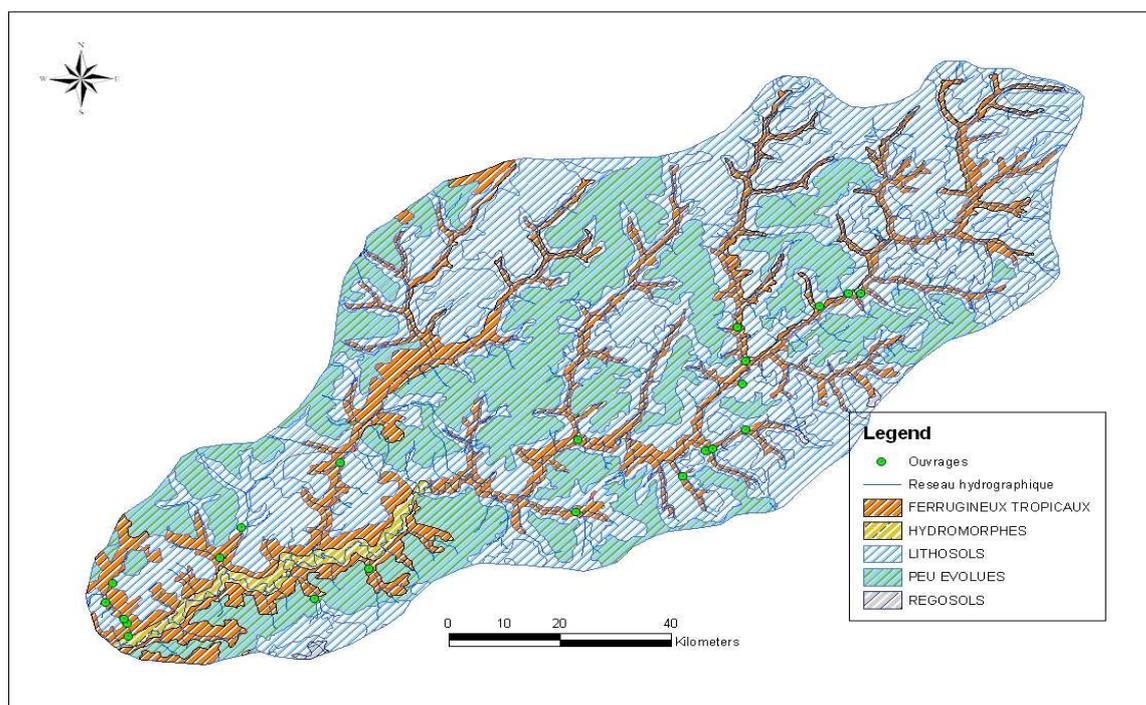


Figure 5 : Esquisse pédologique du bassin de la Sandougou (Badiane, 1999)

2.2.5 Végétation

La végétation typique du bassin de la Sandougou est une savane qui va de la savane boisée à la savane arbustive développées sur sols gravillonnaire des plateaux et les sols ferrugineux plus riches des vallées (CSE, 2005)

- La savane boisée : c'est la formation la plus étendue dans le bassin. Elle occupe les plateaux et les fonds des vallées. Les arbres et les arbustes y forment un couvert clairsemé avec une strate arborée. La couverture herbacée est composée de graminées mais de nombreuses espèces non graminéennes parsèment les graminées
- La savane arborée et boisée : elle occupe le nord du bassin et est incluse entièrement dans le domaine soudano-sahélien de transition.
- La savane arbustive et arborée et la savane arborée : elles sont très peu étendues et apparaissent surtout par taches. Ce sont des savanes d'origine anthropiques développées dans les vallées basses et larges sur sols ferrugineux et parfois sur les plateaux.

2.2.6 Climat

Il est de type sahélo soudanien et se caractérise par deux saisons : Une saison pluvieuse de Mai à Octobre et une saison sèche, plus longue, pour le reste de l'année, allant ainsi de novembre à avril et caractérisée par l'harmattan, vent assez fort, chaud et sec s'accompagnant avec du sable. Dans la zone souffle aussi l'Alizé vent continental caractérisé par de basses températures. Notons également la présence de la Mousson qui apporte la pluie.

La pluviométrie est relativement bonne du fait de la position du bassin dans l'isohyète comprise entre 500 et 1000 mm. La pluviométrie se caractérise par une grande variabilité annuelle et mensuelle. Les mois d'Août et septembre sont les plus pluvieux.

En ce qui concerne les températures, on distingue deux grandes périodes de régime thermique. Il s'agit notamment : de la période de basses températures, allant de juillet à février avec des températures moyennes variant de 25 à 28 °C et de la période de hautes températures se situant entre mars et juin avec des températures moyennes variant de 29 à 40 °C.

L'insolation moyenne annuelle dépasse 3000 heures, soit environ 8 à 9 heures d'ensoleillement par jour. Le mois d'août reçoit la durée d'insolation la plus courte. La nébulosité est maximale pendant l'hivernage.

2.3 Milieu humain

2.3.1 Population

En 2009, le bassin comptait environ 349 549 habitants et un taux de croissance annuel de 3% (ANSD, 2010). La population est inégalement répartie sur le bassin avec une forte concentration (41% de la population) dans le département de Tambacounda qui est ainsi le plus peuplé. De plus 79% de la population totale du bassin est essentiellement rurale contre 21% d'urbains.

Sur le plan ethnique et linguistique, le bassin se caractérise par une certaine diversité avec une majorité de bambaras dans le département de Tambacounda, des halpulars, des sarakholés et des wolofs. Comme pour la plupart du Sénégal, la population est essentiellement musulmane (96%).

2.3.2 Activités économiques

Les populations rurales du bassin de la Sandougou pratiquent essentiellement l'agriculture pluviale et/ou l'élevage. Les spéculations pratiquées sont:

- les cultures céréalières (maïs, riz, mil, sorgho, niébé, fonio);
- les cultures annuelles de rente (coton, arachide, cultures maraîchères);
- l'élevage de bovins, caprins, équins et les asins.

L'agriculture et l'élevage cohabite dans cet espace sous la forme de l'agropastoralisme.

La pêche a une importance économique très faible. Les prises sont destinées à la consommation locale et dépendent de la mise en eau de la rivière Sandougou dont l'assèchement pendant une bonne partie de l'année est défavorable à la pêche continentale (ANSD, 2010).

2.4 Conclusion partielle

Le bassin versant de la Sandougou situé entre les latitudes 13°27 et 14°36 Nord et les longitudes 12°42 et 14°32 Ouest dans la région de Tambacounda au Sud-Est du Sénégal regroupe une population estimée à plus de 349 549 habitants avec une superficie de 11 900 km². Il est soumis à seul régime climatique caractérisé une courte saison de pluie et une longue saison sèche, avec une végétation qui va de la savane boisée à la savane arbustive développées sur sols gravillonnaire des plateaux et les sols ferrugineux plus riches des vallées.

Au plan hydrologique, le bassin est bien drainé et la totalité des cours d'eau présentent un régime d'intermittence caractérisé par un assèchement total en saison sèche et une reprise des écoulements en saison humide.

Au plan hydrogéologique, deux types d'aquifères sont le plus exploités dans le bassin. Il s'agit de l'aquifère détritique du continental terminal constitué par des grés argileux et des sables et de l'aquifère des sables et grés du maestrichtien.

CHAPITRE III: MATERIEL ET APPROCHE METHODOLOGIQUE

Ce chapitre regroupe toutes les données utilisées et les méthodes qui seront appliquées pour le découpage du bassin versant en sous-bassins et pour l'étude hydroclimatologique et hydrogéologique du bassin de la Sandougou.

3.1 Données et matériels utilisés

3.1.1. Collecte des données

Dans le cadre de cette étude, la base de données constituée renferme des données provenant de différentes sources. Ce sont essentiellement des données cartographiques, des données numériques, des données hydroclimatiques et hydrogéologiques.

Les données cartographiques ont été fournies par le Centre de Suivi Ecologique(CSE) de Dakar qui est un partenaire technique du projet Global Water Initiative Sénégal pour l'élaboration du SIG à l'échelle du bassin versant de la Sandougou. Ces données cartographiques sont essentiellement des données vectorielles sous forme de shapefile du réseau hydrographique du Sénégal, des limites administratives (région, département, arrondissement, communauté rurale, village, chef lieu), des zones protégées, des mares et des ouvrages hydrauliques.

Les données numériques concernent les données ASTER GDEM développées conjointement par le Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie du Japon et la NASA. Ces données, couvrant 99% de la surface du globe et ayant une résolution de 30m, ont été gratuitement rendues disponibles en 2009. Ainsi le choix de ces données se justifie aisément par rapport aux données SRTM qui a une résolution de 90 m. Pour notre zone d'étude, elles ont été téléchargées sur le site WIST de la NASA.

Les données hydrométriques, au pas de temps mensuel et annuel ont été recueillies auprès de la Brigade de l'Hydrologie de la Division Régionale de l'Hydraulique de Tambacounda. Ces données vont de 1973 à 2000 (27 ans) (Annexe 2, Tab. 1 et 2). Elles ont été mesurées à deux stations : Sinthiou Malem et Koussanar.

Les données hydrogéologiques mises à notre disposition par la Brigade des Puits et Forages de la Division Régionale de l'hydraulique de Tambacounda concernent essentiellement les données de base d'hydrauliques villageoises. Ce sont : les valeurs des débits d'exploitation, le niveau statique, la profondeur de l'ouvrage, la nature géologique de l'aquifère, etc.

Les données climatiques ont été fournies par la Division Régionale de la Météorologie de Tambacounda et proviennent de la station synoptique de Tambacounda et de la station de Goudiry. Ces données comprennent les valeurs de précipitations (en mm), de la température (en degré Celsius), de l'humidité relative (en %), de l'évaporation (en mm), de la vitesse du vent (en m/s) et de l'insolation (en heure/jour). Ces données sont au pas de temps mensuel et couvrent la période de 1991 à 2007, soit une durée de 16 ans (Annexe 1, Tabl. 1).

3.1.2 Matériels

Pour parvenir aux objectifs fixés, plusieurs matériels ont été utilisés. Ils se composent essentiellement d'ordinateur, d'imprimante et de logiciels :

- L'ordinateur pour le traitement et le stockage des données ;
- L'imprimante pour les impressions ;
- Les logiciels utilisés lors de cette étude sont Arc Hydro, ArcGIS 9.3, Excel et Word.

Le logiciel Arc Hydro sera utilisé pour l'extraction du réseau hydrographique du bassin versant de la Sandougou à partir du MNT et pour la délimitation des sous-bassins élémentaires.

Le logiciel ArcGIS 9.3 est utilisé pour la création, l'importation, l'édition, les requêtes, l'analyse, la publication des données géographiques, la cartographie thématique des eaux souterraines et l'élaboration du SIHRS. Excel pour les traitements statistiques et les représentations graphiques et Word pour le traitement de texte.

3.2 Approche méthodologique pour le découpage du bassin de la Sandougou en sous-bassins

Pour la mise en œuvre des principes de la GIRE et la valorisation des ressources en eau dans le bassin de la Sandougou il est important de faire un découpage du bassin en sous bassins en tenant compte des critères hydrologiques et socioéconomiques pertinents, dans le but de définir de véritable espace de gestion intégrée de la ressource en eau.

3.2.1 Le Système d'Information Géographique (SIG)

Pour mener à bien la caractérisation du bassin versant de la Sandougou, nous avons eu recours à un Système d'Information Géographique pour la cartographie.

Un Système d'Information Géographique (SIG) est un système informatique permettant de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser, d'élaborer, de croiser et de présenter des informations localisées géographiquement de différentes sources contribuant ainsi à la gestion de l'espace. Ces données sont restituées sous forme de couches d'informations issues des cartes thématiques qui peuvent décrire : la topographie, la pente, la nature du sol, le couvert végétal, le climat, la population, les limites administratives, les infrastructures, etc.

Le SIG est donc un dispositif composite réunissant des matériels informatiques, des logiciels d'analyse spatiale, de données géographiques et numériques pour traiter et gérer des données géoréférencées, en les transformant en information utile à l'analyse et à la décision, restituées généralement sous forme de carte.

Les paramètres qui caractérisent un bassin versant (paramètres géomorphologiques, hydrologiques, climatiques, et socioéconomiques) seront donc considérés comme les principaux critères à prendre en compte dans le découpage du bassin en sous bassin versant. Ces différents critères ont été traduits en données cartographiques vectorielles ou raster et intégrées dans le SIG afin d'être croisées afin d'aboutir à un découpage du bassin en tenant compte des critères hydrologiques et socioéconomiques pertinents. Pour cela il était nécessaire de délimiter le bassin versant et ses sous bassins élémentaires et ensuite agréger les sous bassins élémentaires en des ensembles plus grands (sous bassins) et homogènes en tenant compte des critères cités ci-dessus.

3.2.2 Méthode de délimitation du bassin versant et de ses sous-bassins élémentaires selon les critères hydrologiques

Le bassin versant et les sous-bassins élémentaires sont délimités à partir du MNT déduit de l'image ASTER GDEM (résolution 30mx30m) suivant les étapes successives du module Terrain Preprocessing du logiciel Arc Hydro Tools. L'outil Arc Hydro utilise la méthode D8 pour déterminer la direction du flux à partir des MNT (Demargne, 2001).

Ces différentes étapes représentées par la figure 6 sont :

- filtrage du MNT et élimination des dépressions ;
- détermination du sens d'écoulement des eaux de surface;
- détermination de l'accumulation d'écoulement ;
- extraction du réseau de drainage ;
- extraction du bassin versant ;
- extraction des sous-bassins élémentaires

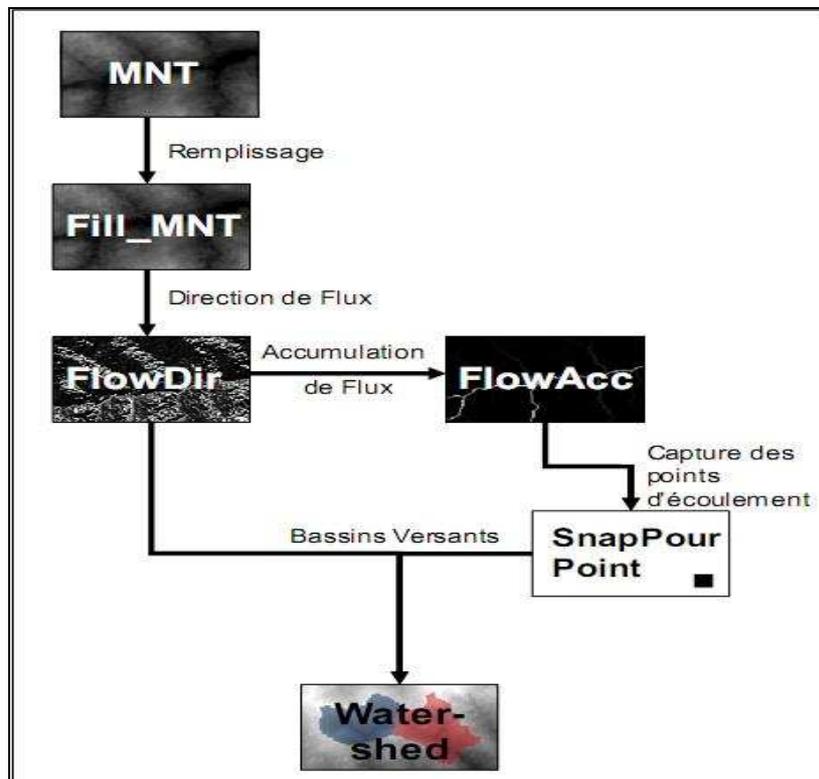


Figure 6 : Méthode de délimitation de bassin versant et des sous bassins élémentaires

3.2.3 Agrégation des sous-bassins élémentaires en sous-bassins versants selon des critères hydrologiques, géomorphologiques et socioéconomiques

Nous avons effectué une agrégation des sous-bassins élémentaires en sous-bassins versant afin de définir des espaces cohérents et appropriés pour la gestion intégrée des ressources en eau. Cette agrégation s'est appuyée avant tout sur les principaux affluents de la Sandougou, les stations de mesure de débits existante et les points de confluences sur le réseau hydrographique.

Nous avons ensuite tenu compte des zones de relief ayant, des caractéristiques climatiques et hydrogéologiques particulières, ainsi que des facteurs spécifiques influençant le fonctionnement hydrologique du bassin (retenue d'eau ...) et des usages de l'eau par les populations. La figure 7 présente la démarche adoptée pour le découpage du bassin de la Sandougou en sous bassins

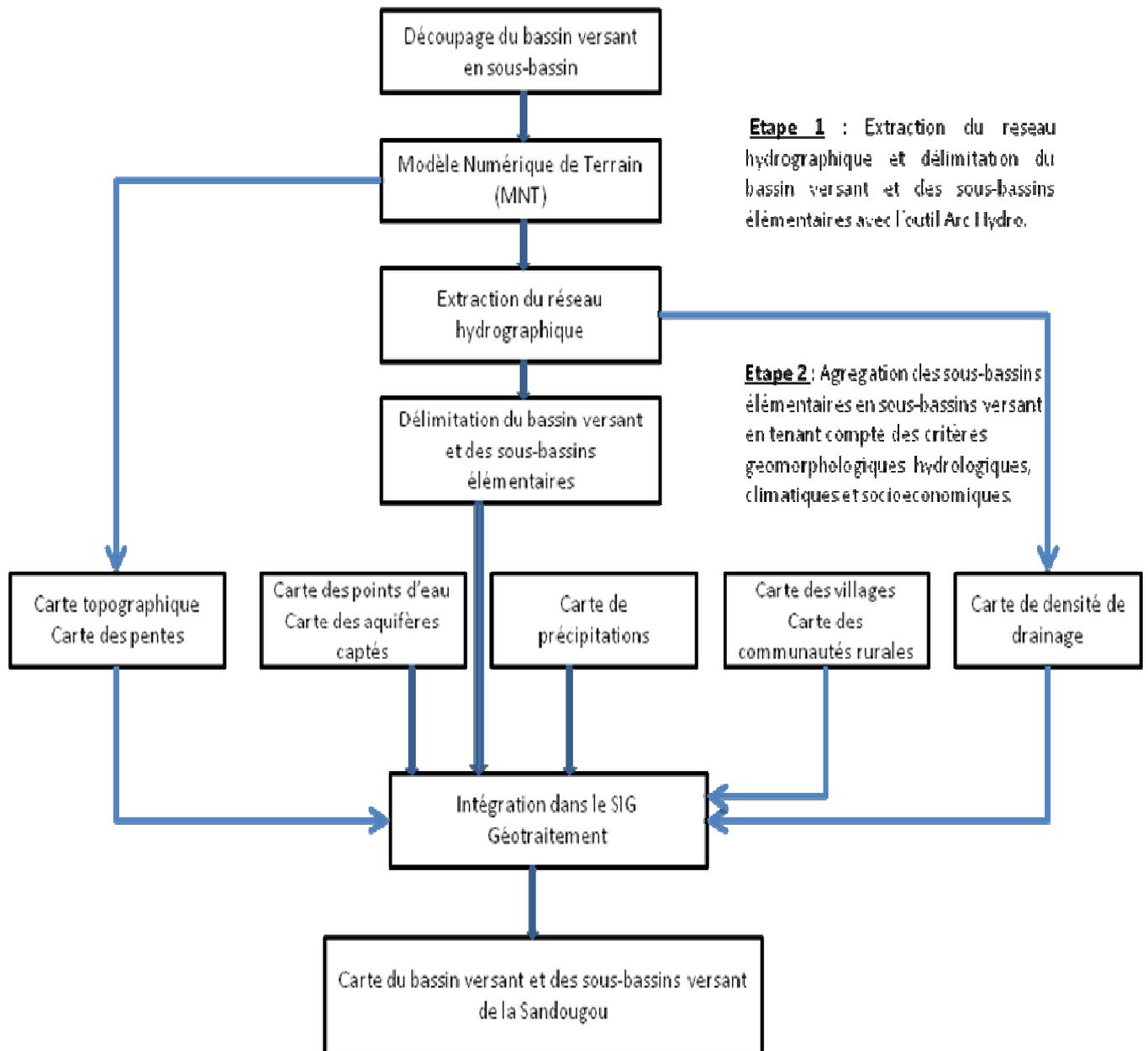


Figure 7: Organigramme générale pour le découpage du bassin de la Sandougou en sous-bassins versant

3.3. Etude hydroclimatologique du bassin de la Sandougou

Nous avons fait une analyse des ressources hydriques par une étude de la climatologie ; connaissance des précipitations et leurs régimes. Ce qui nous permettra de faire un inventaire des eaux de surface et souterraines.

Pour cette étude, nous avons utilisé les données climatiques mises à notre disposition par la Direction Régionale de la Météorologie de Tambacounda. Pour leurs interprétations, ces données ont été analysées statistiquement et les variations représentées sur des graphes.

3.4 Evaluation des ressources en eau

Un bilan global des ressources en eau a été fait. Nous avons utilisé le réseau hydrométrique du bassin versant pour l'évaluation quantitative des eaux de surface.

➤ Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle désigne la quantité maximale d'eau pouvant être reprise par évaporation et transpiration des plantes sur un sol saturé en eau dans des conditions climatiques imposées par la nature. Les méthodes qui permettent l'évaluation de cet paramètre sont nombreuses et variées, entre autres, les méthodes de Turc, Thornthwaite, de Penman et Coutagne, parmi les quelles nous avons retenu celle de Thornthwaite (Annexe 3-I).

➤ Evaluation du bilan d'eau par la méthode de Thornthwaite

La méthode du bilan hydrique de Thornthwaite retrace le schéma des échanges et du transfert des eaux à l'intérieur d'une région. Elle a été utilisée par plusieurs auteurs en Afrique de l'Ouest pour le calcul du bilan hydrologique.

Elle repose sur une estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et permet une estimation globale de l'infiltration sur la zone d'étude.

Pour la période 1991-2007, nous avons choisi le mois de septembre comme point de départ de l'année hydrologique pour la simple raison que le mois d'août étant le plus pluvieux les réserves sont à saturation et donc connue et égale à 100 mm qui représente la RFU.

Selon Thornthwaite, la quantité d'eau que peut emmagasiner le sol pour porter ses réserves superficielles à saturation est de 100 mm. Deux cas de figures peuvent se présenter :

Si $P > ETP$, alors :

- $ETP = ETR$, il reste un excédent ($P - ETP$) qui est affecté en premier lieu à la RFU, et, si la RFU est complète, à l'écoulement Q (l'écoulement de surface et souterrain).

Si $P < ETP$:

L'évapotranspiration va se réaliser non seulement sur la totalité des pluies mais encore sur les réserves du sol : $ETR = P + RFU$. Mais une fois les réserves (RFU) épuisées, l'évapotranspiration ne pourra se réaliser que sur les pluies effectivement tombées (d'où $ETR = P$). Il en résultera un déficit du bilan ($Da = ETP - ETR$) qui représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

Le ruissellement et l'infiltration ont été estimés à partir du bilan de l'eau (Annexe 3-II)

3.5 Etude hydrologique des sous bassin de la Sandougou

L'évaluation des ressources en eau de surface se fera par l'analyse des données de débits annuels et mensuels disponible qui vont de 1973 à 2000 avec 31 % de lacune station de Koussanar et 46 % de lacune pour Sinthiou Malem. C'est sur la base de ces données que les disponibilités en eau seront évaluées.

Tableau 1 : Stations hydrométriques du bassin de la Sandougou

Longitude	Latitude	Id Station	Capteur	date début	date fin	% lacunes
-14.08	13.87	Koussanar	J1	01/01/1973	29/09/2000	31.76
-13.91	13.81	Sinthiou Malem	J1	17/06/1973	03/10/2000	46.53

3.6 Evaluation des ressources en eau souterraine du bassin à l'aide du SIHRS

L'élaboration du SIHRS nous permet de réaliser des cartes indiquant les zones à potentialités hydriques de notre secteur d'étude.

3.6.1 Conception et mise en place de la base de données hydrogéologiques utilisées dans l'élaboration du SIHRS

La base de données utilisée dans l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale est essentiellement composée de données hydrogéologiques citées plus haut (voir Chapitre 3.1.1 et Annexe 4).

3.6.2 Choix des critères

Plusieurs critères ou facteurs sont utilisés dans la conception d'un SIHRS. Les critères retenus dans notre étude sont ceux utilisés par Savané (1997) et Saley (2003) :

- Critère Débit d'exploitation : ce critère important renseigne sur la quantité d'eau disponible ;
- Critère Densité de drainage ou « Taux d'infiltration »: plus celui-ci est important, plus il ya accumulation des eaux ;
- Critère Profondeur de l'ouvrage qui influence le débit et le coût de l'ouvrage, plus l'ouvrage est profond on obtient un débit important, plus il coûte cher.
- Critère Niveau statique de la nappe, plus celui-ci est faible plus la ressource en eau est facilement accessible.

3.6.3 Classification des critères

La classification consiste à regrouper les valeurs en un certain nombre de classes. Les valeurs limites choisies ne sont pas nécessairement équidistantes mais elles sont significatives du point de vue des applications pratiques (Saley, 2003). Le choix des valeurs limites est lié d'une part à la faculté de discernement de l'opérateur et de son sens de jugement, et d'autre part, aux valeurs affichés par les histogrammes des critères. Ce choix est guidé par les objectifs que l'opérateur lui-même se fixe dans l'exécution du projet.

Dans notre étude, nous avons déterminé cinq (5) classes données par le tableau 2.

Tableau 2 : Classification des critères

Critères	Classes				
	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Densité de drainage (% de longueur cumulée de cours au km ²)		[0,1-0,2]	[0,3-0,4]	[0,5-0,7]	[0,8-0,9]
Profondeur (m)		[85-90[[95-135[[140-250[[260-500[
Débit d'exploitation (m ³ /h)		[5-15[[20-30[[40-70[[80-100[
Niveau statique (m)	< 15	[15-25[[30-40[[45-50[[55-60[

3.6.4 Cartographie thématique des ressources en eau souterraine du bassin de la Sandougou

La réalisation des cartes thématiques a obéi à une méthodologie de pondération des critères. La pondération consiste à affecter un poids à chaque critère dont la valeur dépend de l'importance du critère dans l'évaluation du résultat final.

La somme de ces poids doit être égale à 1. Ce qui suppose que le poids affecté est un chiffre compris entre 0 et 1 (Saley, 2003). L'assignation des poids à chaque critère doit se faire avec le maximum d'objectivité et en gardant à l'esprit le contexte général de l'étude. Le poids sera d'autant plus élevé que son importance est plus grande.

Ainsi la combinaison obtenue avec cette méthode est estimée de la façon suivante :

$S = \sum W_i X_i$ avec S le résultat de la combinaison, W_i le poids du facteur i et X_i la valeur du critère de facteur i. Ce principe de pondération a guidé la confection de nos différentes cartes thématiques. Le tableau 3 donne le poids affecté à chaque critère selon son importance.

Tableau 3: Attribution de poids aux différents critères selon la nature de la carte.

CARTE DE	CRITERES	POIDS	TOTAL
DISPONIBILITE	Densité de drainage	0,6	1
	Niveau statique	0,4	
ACCESSIBILITE	Profondeur du forage	0,8	1
	Niveau statique	0,2	
EXPLOITABILITE	Débit d'exploitation	0,7	1
	Niveau statique	0,3	
POTENTIALITE	Niveau statique	0,3	1
	Carte de disponibilité	0,2	
	Carte d'accessibilité	0,2	
	Carte d'exploitabilité	0,3	

La méthodologie utilisée est résumée dans l'organigramme suivant (Fig.8)

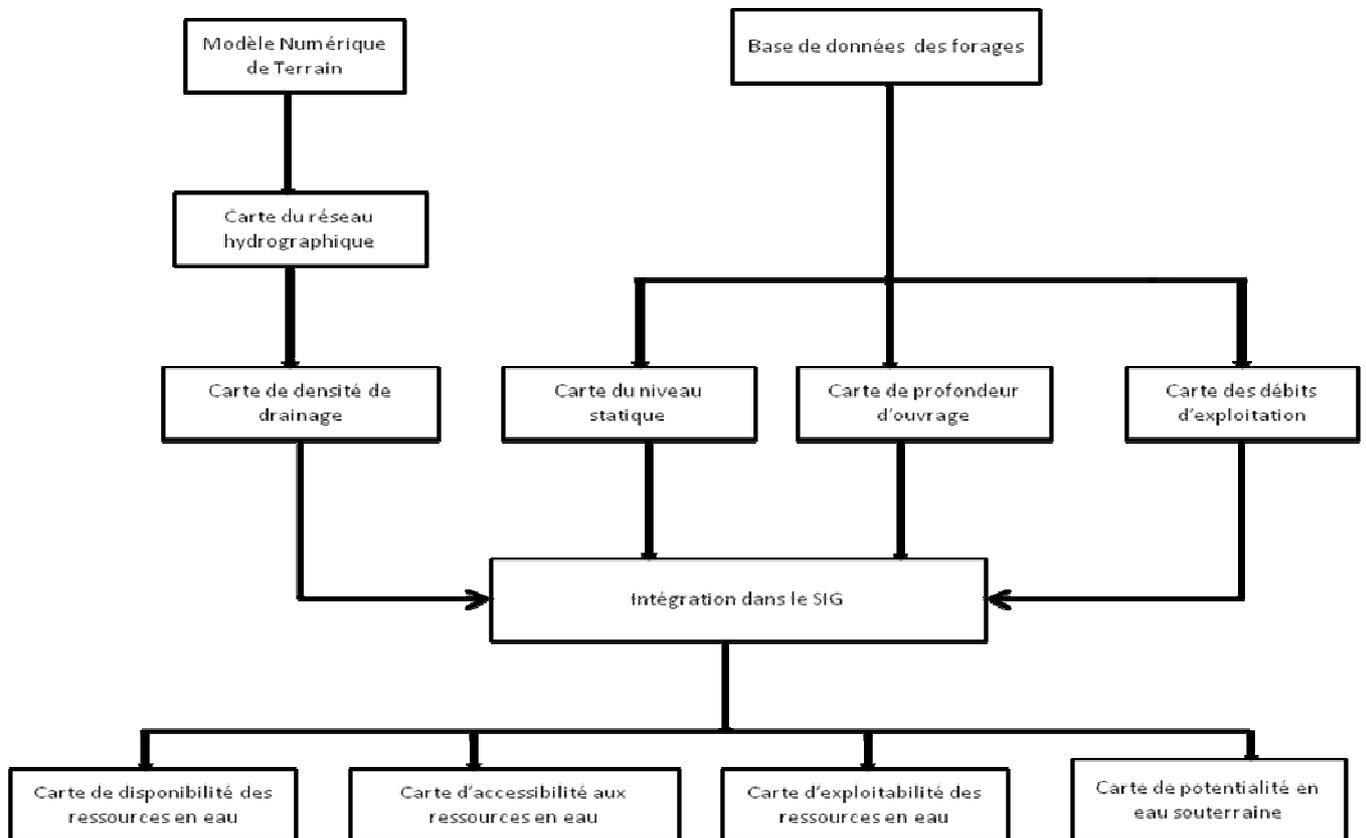


Figure 8: Organigramme de mise en place du SIHRS

3.7 Etude de la qualité des ressources en eau souterraine

Pour l'aspect qualité de l'eau dans le bassin versant de la Sandougou, le temps imparti ne nous permettant pas de faire les analyses, nous avons utilisé les résultats des analyses microbiologique et physico-chimique des eaux de boisson effectués par le Projet GWI Sénégal en collaboration avec le laboratoire d'analyse des eaux de la CARITAS de Kaolack en mars 2010 et ceux effectués par la Brigade Régionale de l'Hygiène de Tambacounda en septembre 2010.

Les échantillons pour analyses ont été prélevés dans :

- les villages situés dans les Communautés rurales cibles où les populations s'approvisionnent à partir de forages ou de puits modernes ;
- Dans tous les centres ruraux équipés de forages avec adduction d'eau, deux sites de prélèvement (01 au début de réseau et au bout de réseau) ;
- toute localité où l'approvisionnement en eau potable se fait à partir des puits ; le puits moderne le plus utilisé par les ménages est ciblé dans cette campagne de suivi de la qualité de l'eau de boisson.

Sur chaque site de prélèvement, deux (02) analyses ont été effectuées : une pour la bactériologie et une autre pour les paramètres physicochimique tels que le PH, de la conductivité et la turbidité ;

Les analyses bactériologiques ont été accentuées sur deux paramètres : les coliformes totaux et coliformes fécaux. Les analyses physicochimiques concernent l'aspect, l'odeur, la turbidité, la température, le PH, la conductivité, les nitrates, les nitrites, l'ammonium et éventuellement l'arsenic.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 Paramètres de forme et analyse du réseau hydrographique du bassin versant

Les données morphométriques conditionnent les modalités de l'écoulement sur un bassin versant. Ce sont essentiellement le relief, la pente, la pente et le réseau hydrographique. Ces caractéristiques ont été déterminées à partir du MNT à l'aide du logiciel ArcGIS et sont consignés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques morphométriques du bassin de la Sandougou

Caractéristiques	Unités	Symboles	Valeurs
Surface	Km ²	S	11900
Périmètre	Km	P	500
Altitude maximale	m	Hmax	96
Altitude minimale	m	Hmin	6
Indice de compacité		K _c	1,28
Dénivelée	m	D	90
Indice de pente moyenne	m/km	I _m	0,82

La valeur de l'indice de compacité ou coefficient de Gravelius nous permet de dire que le bassin est allongé. D'après l'analyse cartographique, l'eau qui circule dans le bassin versant de la Sandougou prend sa source à 75m (altitude la plus élevée du réseau) et se jette dans le bief maritime du fleuve Gambie à 3m soit une dénivellation de 72m d'altitude. La hiérarchisation du réseau hydrographique (Fig.9) laisse apparaître des cours d'eau de plusieurs ordres. Le réseau hydrographique est de type dendritique et constitué d'innombrables branches à écoulement temporaire.

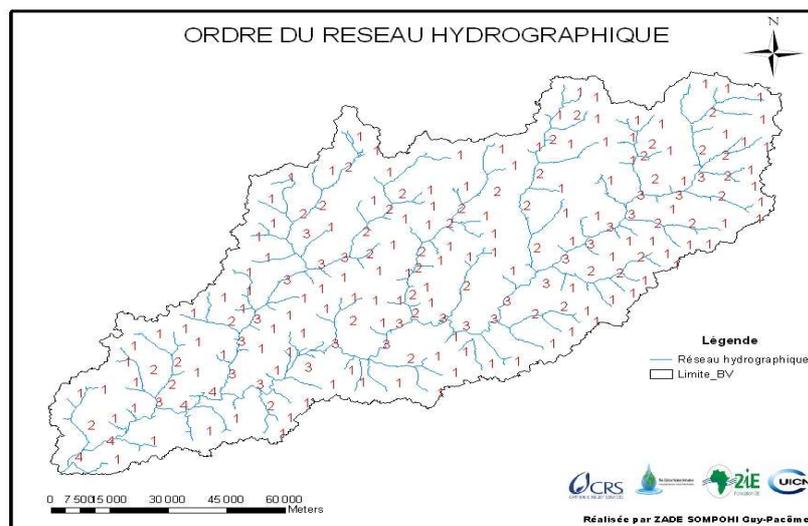


Figure 9 : Hiérarchisation du réseau hydrographique du bassin de la Sandougou

4.2 Délimitation des sous bassins élémentaires

Les sous-bassins élémentaires ont été délimités avec le logiciel Arc Hydro à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) du bassin de la Sandougou. Ces sous-bassins élémentaires représentent la plus petite représentation de l'espace et peuvent être définis comme étant les sous-bassins d'un tronçon de cours d'eau (Nguetora et al, 2000). Ils représentent l'entité spatiale de base et leur agrégation conduit nécessairement à des niveaux plus élevés et permettent d'avoir des ensembles homogènes et cohérents tant du point de vue hydrologique, géomorphologique et socioéconomique. La figure 10 présente les trente deux (32) sous-bassins élémentaires du bassin de la Sandougou.

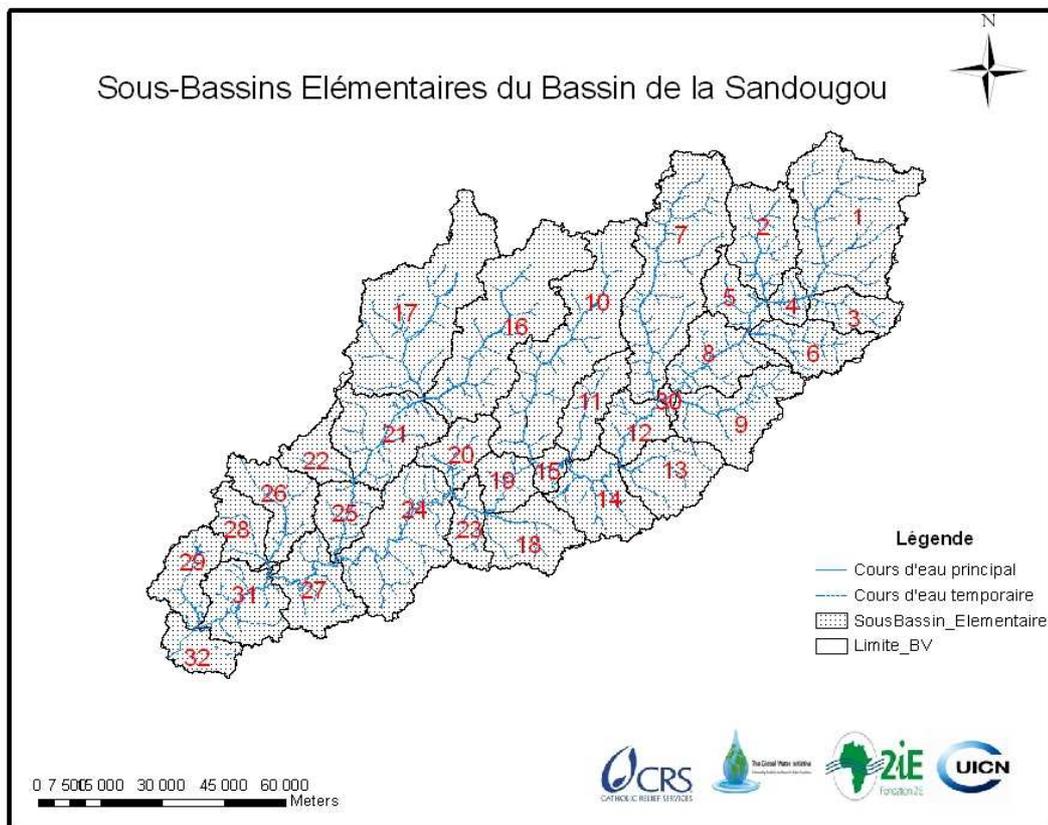


Figure 10 : Carte des sous-bassins élémentaires de la Sandougou

4.3 Agrégation des sous-bassins élémentaires en sous-bassins versants selon des critères hydrologiques, géomorphologiques et socioéconomiques

Un découpage du bassin de la Sandougou en quatre (04) sous-bassins a été réalisé en s'appuyant sur les principaux affluents du cours d'eau principal, les stations hydrométriques existantes, les points de confluence du réseau hydrographique, les caractéristiques topographiques et les facteurs socioéconomiques. Nous avons agrégés les trente deux sous-bassins élémentaires en de grands ensembles homogènes qui définissent des espaces de gestion en tenant compte des principaux critères cités. La figure 11 présente les principaux les sous-bassins de la Sandougou.

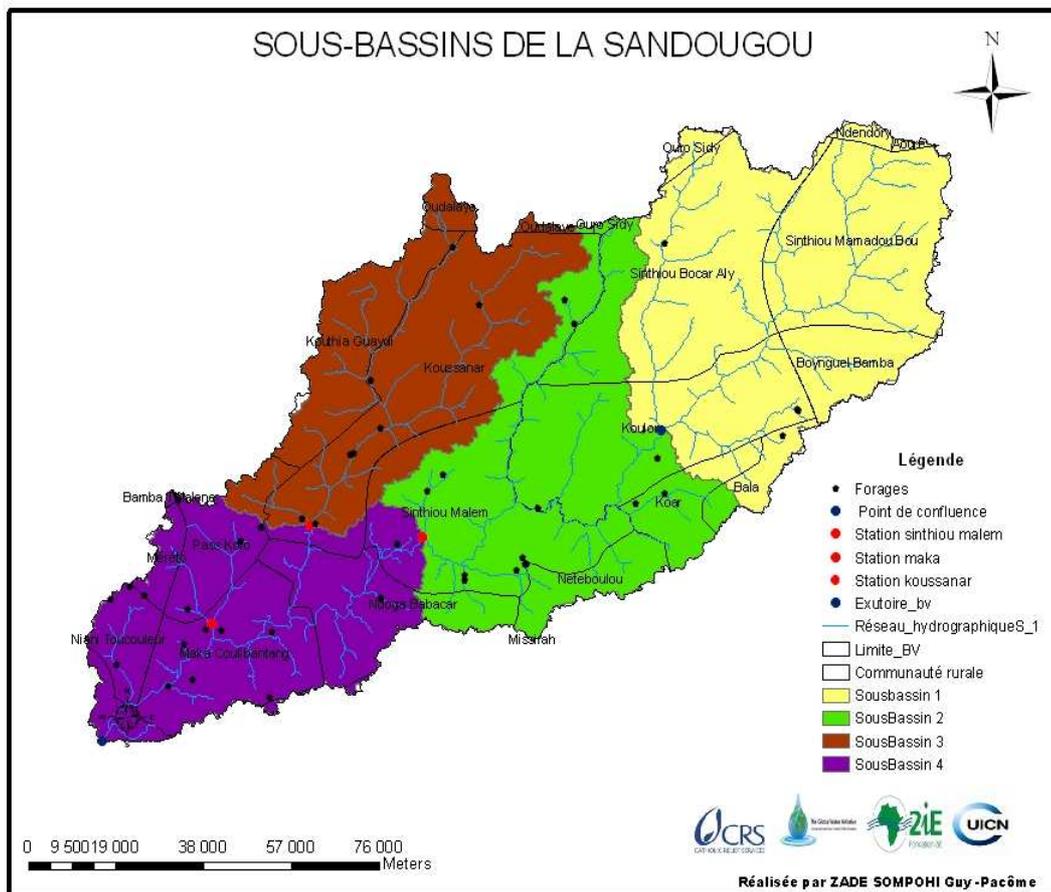


Figure 11 : Découpage du bassin de la Sandougou en sous-bassins

4.4 Études des paramètres climatiques

Les paramètres climatiques utilisés sont ceux observés à partir des stations synoptiques de Tambacounda et de Goudiry. Pour chaque paramètre nous avons procédé au calcul des moyennes mensuelles selon la durée d'observation dudit paramètre et les résultats consignés dans les tableaux 1 (Annexe 1) puis rendus sous forme de graphiques (Fig. 12 et Fig.13). Elle montre la division de l'année en deux parties :

- De novembre à avril : la saison sèche avec l'augmentation de la température moyenne annuelle, l'évapotranspiration potentielle et l'insolation
- De mai à octobre : la saison des pluies avec une chute brutale de l'insolation, de l'évapotranspiration potentielle et une forte augmentation de l'humidité relative consécutive à celle de la couverture nuageuse.

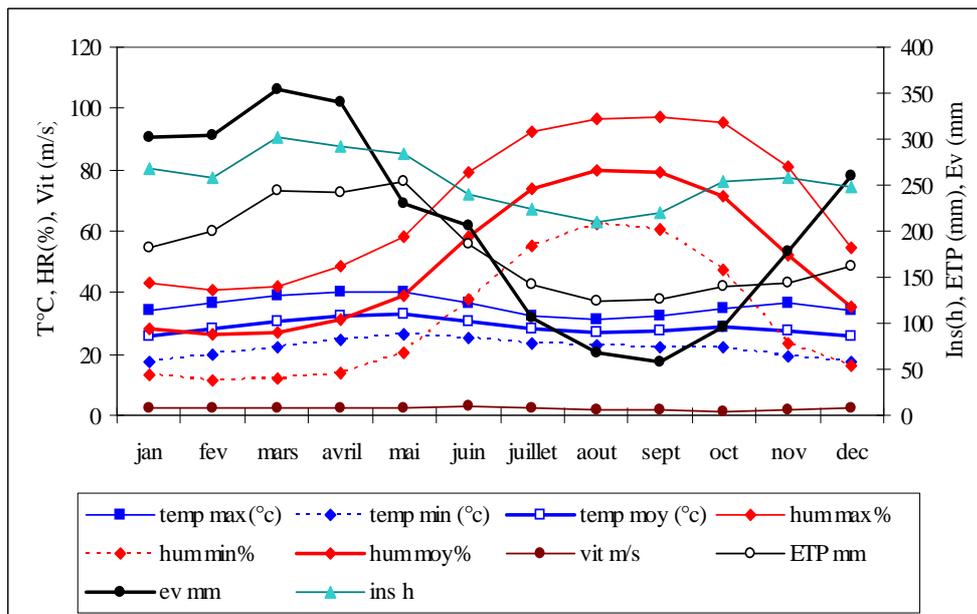


Figure 12 : Variations des paramètres climatiques à Tambacouda (période 1991-2007)

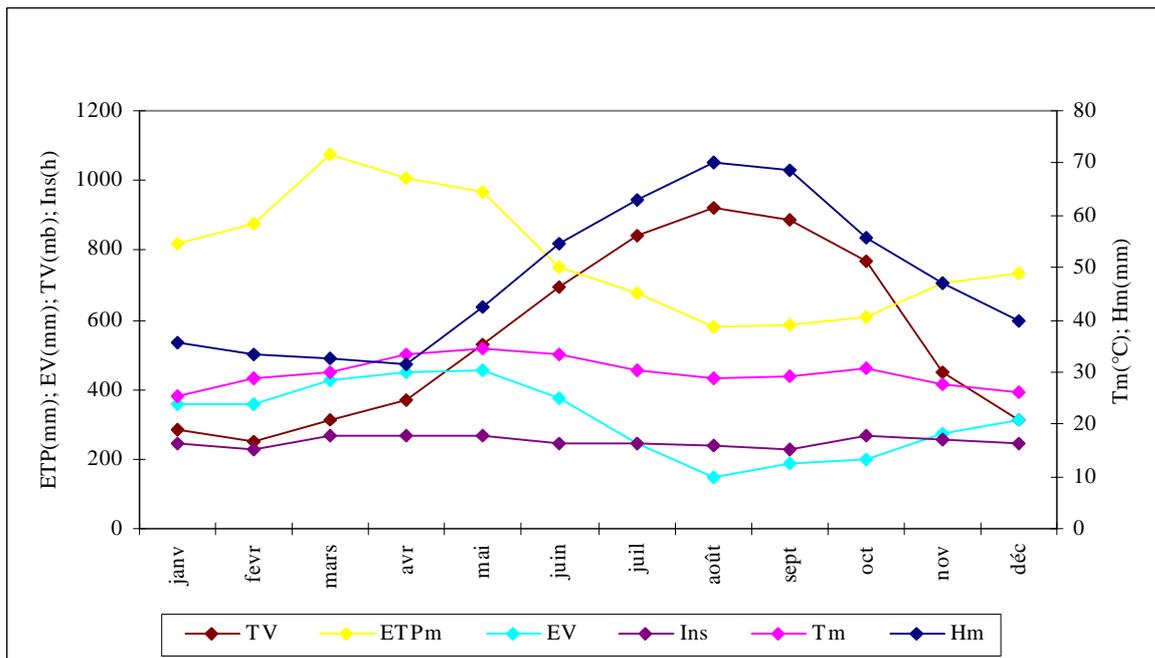


Figure 13 : Variation des paramètres climatiques à Goudiry (période 1991-2007)

A Tambacounda, les températures moyennes mensuelles ne dépassent pas 41°C (maximum 40.5°C en avril), alors qu'à Goudiry il atteint 45.5°C en mai. Le minimum à Tambacounda est de 17.1°C (décembre) et 13.5°C à Goudiry (janvier). D'une manière générale on remarque que les températures restent importantes. L'évolution générale des moyennes mensuelles des températures (maximales, minimales, moyennes) est bimodale avec un maximum et un minimum principal, et un maximum et un minimum secondaire. Leurs fluctuations plus ou moins importantes, déterminent le régime thermique qui sévit dans le bassin.

D'après les travaux de Diop K.N (2005) cité par Andrien Coly (2009) illustration de la rose des vents de la station de Kédougou situé à proximité du bassin de la Sandougou montre une nette division de l'année en deux saisons : de janvier à avril, la circulation est d'orientation Est, commandée par l'anticyclone libyen. A partir du mois de mai la circulation d'Ouest apparaît et s'affirme de plus en plus durant toute la saison des pluies surtout en juillet et août. Dès septembre, elle s'inverse en revenant à l'Est.

4.4.1 Les pluies mensuelles

Les valeurs de la pluviométrie moyenne mensuelle correspondante à la période 1991-2007 sont consignées dans le tableau 2 (Annexe1). L'analyse de l'histogramme des hauteurs de pluies mensuelles (Fig.14) nous montre que le bassin de la Sandougou subit deux principales saisons :

- Une saison de pluie de mai à octobre avec un maximum pluviométrique se situant toujours en août (avec des décalages possibles en juillet ou en septembre)
- Une saison sèche de novembre à avril avec des mois secs de janvier à avril.

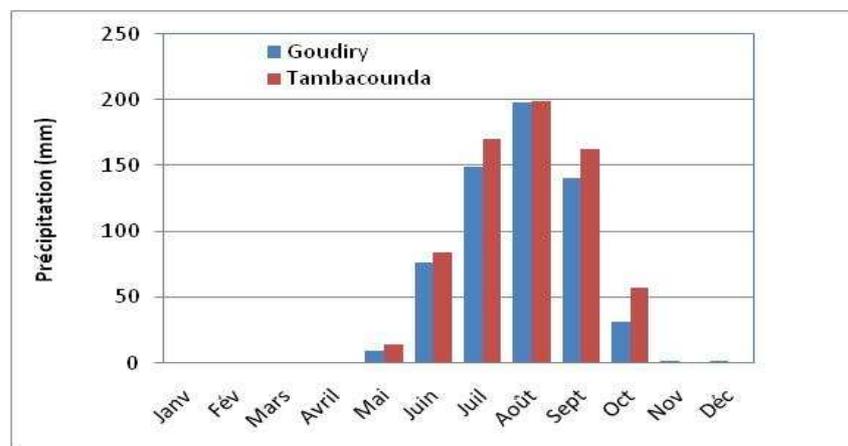


Figure 14 : Pluies mensuelles (mm) dans le bassin de la Sandougou (période 1991-2007)

La comparaison de la pluviométrie moyenne mensuelle à la station de Tambacounda et à la station de Goudiry nous indique que ces deux stations sont soumises au même régime pluviométrique mais que la pluviométrie diminue sensiblement dans le bassin de la Sandougou du Sud vers le Nord c'est-à-dire de la basse et moyenne Sandougou vers la haute Sandougou.

La longueur de la saison des pluies dans le bassin ne permet pas une alimentation permanente du réseau hydrographique ce qui conduit à des écoulements intermittents des différents sous bassins et l'importance de ces écoulements dépend de l'abondance des pluies.

4.4.2 Diagramme Ombrothermique

La combinaison des deux principaux facteurs climatiques, la température et les précipitations est intéressante dans la mesure où elle permet de déterminer les mois véritablement secs.

Cette relation permet d'établir un graphe dit Ombrothermique sur le quel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations (Fig.15). Nous constatons que les stations Tambacounda et Goudiry sont caractérisées par une période sèche qui s'étale sur plus de six mois, et qui s'étend du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril. La détermination de cette période est d'une grande importance pour l'hydrologie à fin de pouvoir estimer les besoins en eau.

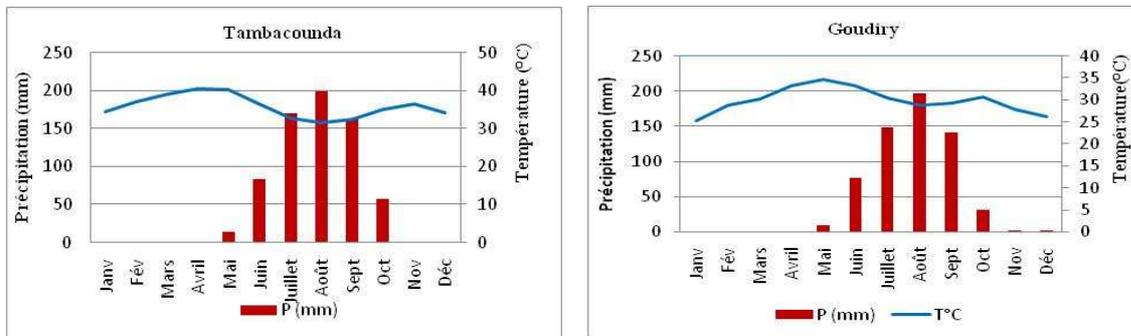


Figure 15 : Diagramme Ombrothermique à Tambacounda et à Goudiry (période 1991-2007)

4.4.3 Conclusion partielle

L'étude des différents paramètres climatiques sur le bassin de la Sandougou montre la division de l'année en deux parties :

- De novembre à avril : la saison sèche avec l'augmentation de la température moyenne annuelle, l'évapotranspiration potentielle et l'insolation
- De mai à octobre : la saison des pluies avec une chute brutale de l'insolation, de l'évapotranspiration potentielle et une forte augmentation de l'humidité relative consécutive à celle de la couverture nuageuse.

4.5 Résultat de l'étude de l'évapotranspiration

4.5.1 Comparaison entre la pluviométrie, l'ETP et l'ETR

La figure 16 représente la variation moyenne mensuelle de la pluviométrie, de l'ETP et de l'ETR au cours de la période 1991-2007 à Tambacounda et à Goudiry.

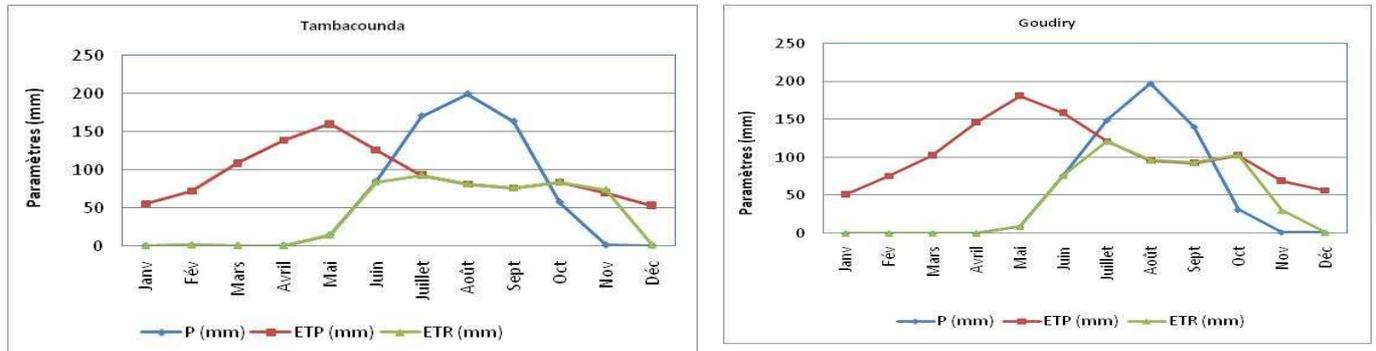


Figure 16 : Variation moyenne mensuelle de la pluviométrie, de l'ETP et de l'ETR à Tambacounda et à Goudiry (période 1991-2007)

L'analyse de cette figure montre que :

- L'examen de l'ETP à l'échelle mensuelle, montre l'existence de deux saisons bien distinctes l'une pendant laquelle la pluviométrie est supérieure à l'ETP (juillet à septembre), et la seconde on a l'inverse allant d'octobre à juin.
- D'octobre à juin, la courbe représentative de l'ETP est au-dessus de celle de la pluviométrie. Quand à la courbe représentative de l'ETR, elle se confond à celle de la pluviométrie de décembre à juin. A partir de juillet, elle se confond à celle de l'ETP jusqu'au mois d'octobre. C'est-à-dire que pendant cette période, le sol est abondamment pourvu d'eau.
- Au mois de juillet, puis d'août à septembre, la courbe représentative de la pluviométrie est au dessus de celle de l'ETP tandis que celle de l'ETR et de l'ETP se confondent. Cela signifie que le sol pendant ces mois possède des réserves en eau si bien que pendant le mois d'octobre où la pluviométrie est inférieure à l'ETP, les courbes représentatives de l'ETR et de l'ETP se confondent.

4.5.2 Calcul du bilan hydrologique sur le bassin de la Sandougou.

Nous avons établi le bilan hydrique moyen sur le bassin de la Sandougou par la méthode de Thornthwaite de 1991 à 2007. Les résultats de nos calculs sont consignés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Bilan hydrologique à Tambacounda (A) et à Goudiry (B) par la méthode de Thornthwaite

A) Tambacounda	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
P (mm)	0	1	0	0	14	84	170	199	163	57	1	1	691
ETP (mm)	55	72	109	139	160	126	93	81	76	84	70	53	1117
ETR (mm)	0	1	0	0	14	84	93	81	76	84	74	1	508
Réserve du sol (mm)	0	0	0	0	0	0	77	100	100	73	0	0	350
Variation de RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	77	23	0	73	-84	0	89
Surplus (mm)	0	0	0	0	0	0	0	95	87	0	0	0	182
Déficit du bilan ETP-ETR (mm)	55	71	109	139	146	42	0	0	0	0	-4	52	610
Excédent du bilan P-ETR (mm)	0	0	0	0	0	0	77	118	87	-27	-73	0	182

B) Goudiry	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
P (mm)	0	0	0	0	9	76	149	198	141	31	2	1	607
ETP (mm)	51	76	103	146	181	159	121	96	93	103	69	56	1255
ETR (mm)	0	0	0	0	9	76	121	96	93	103	30	1	529
Réserve du sol (mm)	0	0	0	0	0	0	28	100	100	28	0	0	256
Variation de RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	28	72	0	-72	72	-72	28
Surplus (mm)	0	0	0	0	0	0	0	30	48	0	0	0	78
Déficit du bilan ETP-ETR (mm)	51	75	103	146	172	83	0	0	0	0	39	55	724
Excédent du bilan P-ETR (mm)	0	0	0	0	0	0	28	102	48	-72	-28	0	78

Les valeurs moyennes interannuelles de l'ETR s'élève 508 mm, soit 73,5% des précipitations à Tambacounda et à 529 mm, soit 87,14% des précipitations à Goudiry. C'est le déficit d'écoulement.

L'analyse de ce tableau permet de faire les observations suivantes :

- Aux mois de décembre, janvier, février, mars, avril, mai et juin, les hauteurs de pluies P sont inférieures aux valeurs d'ETP correspondantes. Elles sont donc totalement reprises par évaporation, d'où $ETR = P$. On observe alors un déficit du bilan ou déficit agricole ETP-ETR qui est respectivement de 52, 55, 71, 109, 139, 146 et 42 mm à Tambacounda et de 55, 51 75, 103, 146, 172 et 83 mm à Goudiry pour les mois considérés.

- Au mois de juillet (la saison des pluies), les pluies P enregistrées à Tambacounda et à Goudiry dépassent l'évapotranspiration potentielle ETP. L'évapotranspiration se réalise normalement; $ETR=ETP$. La quantité d'eau restante ($P-ETR= 77\text{mm}$ à Tambacounda et 28 mm à Goudiry) sert à humecter le sol, autrement dit participe à la reconstitution de la réserve en eau facilement utilisable du sol.
- En août et septembre les pluies sont largement supérieures à l'ETP. Le phénomène se déroule comme en juillet et $ETR=ETP$. On enregistre un excédent du bilan appelé encore pluie efficace ($P-ETR = 118$ et 87 mm à Tambacounda et 102 et 48 mm à Goudiry) dont une partie participera à la reconstitution des réserves jusqu'à la saturation complète du sol ($RFU=100\text{ mm}$). Le surplus ($S=P-ETR-RF= 95$ et 87 mm à Tambacounda et 30 et 48 mm à Goudiry) disponible s'écoulera soit les nappes souterraines soit vers les cours d'eau.
- L'excédent d'eau, se répartissant entre le ruissellement et l'infiltration est de 182 mm , soit $26,33\%$ des précipitations à Tambacounda et 78 mm Goudiry, soit $12,85\%$ des précipitations. Cet excédent faible voudrait à Goudiry dire que les conditions de recharge des nappes souterraines sont mauvaises dans le Haut bassin de la Sandougou.

4.5.2.1 Calcul de l'infiltration à partir de l'équation du bilan

$P = 691\text{ mm}$ dans le Moyen et Bas bassin (Tambacounda) et $P = 607$ dans le Haut bassin (Goudiry)

$E = 508\text{ mm}$ à Tambacounda et 529 mm à Goudiry

$(R+I) = 182\text{ mm}$ à Tambacounda et 78 mm à Goudiry.

La valeur du ruissellement calculé par la méthode de Tixeront et Berkaloff est respectivement de 88 mm à Tambacounda et 47 mm à Goudiry.

D'où une infiltration $I = 182 - 88 = 94\text{ mm}$ soit $13,60\%$ des précipitations à Tambacounda;

$I = 78 - 47 = 31\text{ mm}$ soit $5,10\%$ des précipitations Goudiry.

Le bilan de l'eau calculé selon la méthode de Thornthwaite sur la période 1991-2007 donne le tableau récapitulatif suivant :

Tambacounda	
P (mm)	691
ETP (mm)	1117
ETR (mm)	508
Déficit ETP-ETR (mm)	610
Excédent P-ETR (mm)	182
Ruissellement (mm)	88
Infiltration (mm)	94
Goudiry	
P (mm)	607
ETP (mm)	1255
ETR (mm)	529
Déficit ETP-ETR (mm)	724
Excédent P-ETR (mm)	78
Ruissellement (mm)	47
Infiltration (mm)	31

4.5.2.2 Discussion des résultats du bilan hydrologique

A l'issue de l'étude du bilan hydrique, nous retiendrons que la recharge des nappes s'effectue essentiellement pendant la saison des pluies plus particulièrement en août et septembre. Les conditions de cette recharge semblent meilleures dans le moyen et bas bassin que dans le haut bassin de la Sandougou. La méthode du bilan de Thornthwaite demande beaucoup de prudence dans la manipulation des résultats car son application demande une longue période d'observation. De plus, le choix de la hauteur d'eau maximale qui s'ajoute parfois à l'humidité du sol étant assez arbitraire celle-ci peut être source d'erreurs sur les excédents et les déficits (Remenieras, 1972)

La répartition de l'excédent d'eau entre l'écoulement superficiel et la percolation profonde, reste très arbitraire et ne permet pas une prédétermination relativement précise du débit des cours d'eau.

Malgré les réserves émises sur les résultats obtenus, il convient de ne pas en sous-estimer la portée. La méthode de Thornthwaite reste une méthode efficace puisqu'elle permet de donner un intervalle de grandeurs des différents paramètres intervenant dans l'estimation des réserves du sol, et avec peu de moyens.

4.6 Résultat de l'étude hydrologique

4.6.1 Régime mensuel et annuel des débits

Les courbes des débits moyens mensuels et annuels (Fig. 17), ont été obtenues à partir des données des stations de Koussanar et de Sinthiou Malène de 1973 à 2000. Le tableau 6 donne les valeurs des débits moyens mensuels et les coefficients mensuels de débits aux différentes stations.

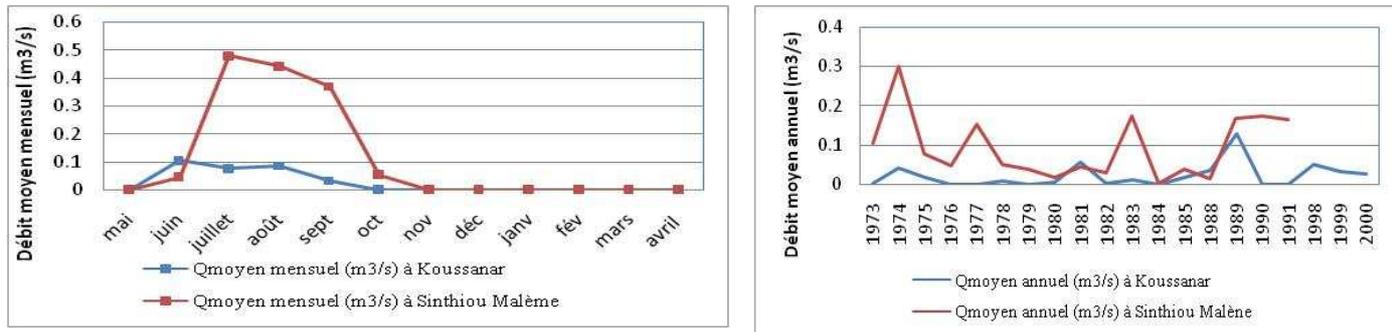


Figure 17: Débit moyen mensuel et annuel dans le bassin versant de la Sandougou

Tableau 6: Débits moyens mensuels (m³/s) à la station de Koussanar et à Sinthiou Malène (période 1991-2007)

Koussanar	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	janv	fév	mars	avril	Module
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moy	0	0.106	0.077	0.086	0.032	0.001	0	0	0	0	0	0	0.025
Max	0	1.714	0.451	0.506	0.163	0.004	0	0	0	0	0	0	0.13
CMD	0	4.4	3.2	3.6	1.3	0	0	0	0	0	0	0	

Sinthiou M	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	déc	janv	fév	mars	avril	Module
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moy	0	0.045	0.479	0.441	0.369	0.054	0	0	0	0	0	0	0.10
Max	0	0.302	1.961	1.643	1.376	0.37	0.005	0	0	0	0	0	0.301
CMD	0	0.4	4.7	4.4	3.7	0.5	0	0	0	0	0	0	

L'analyse des données du tableau suivant montre que l'écoulement débute en juin au niveau des deux stations, un mois après le début de la saison pluvieuse. Cet écoulement dure cinq mois et va de juin à octobre. Il est centré dans la saison des pluies qui s'étend de mai à octobre. Les débits mensuels sont très faibles, aucun module mensuel ne dépasse l'unité (1m³/s).

L'analyse des coefficients mensuels de débits (CMD) révèle que cette évolution consacre néanmoins trois mois de hautes eaux (juillet, août et septembre) conforme au régime pluvial tropical pur.

Le maximum hydrologique situé en juillet (tableau 6) intervient un mois avant le maximum pluviométrique qui lui se localise en moyenne en août. Ceci peut être dû selon Ndour (1990) cité par Andrien Coly (2009) au fait que les averses de juillet parfois importantes peuvent favoriser le développement de la végétation qui par la suite limite et gêne considérablement l'écoulement les mois suivants même si d'autres précipitations importantes tombent. L'évolution des débits mensuels, traduit la modicité des modules enregistrés durant la période d'étude et l'arrêt de l'écoulement pendant de nombreux mois de l'année qui sont liés en grande partie à la péjoration pluviométrique due à la sécheresse mais aussi à la forte évaporation due aux températures élevées et la faiblesse des vitesses d'écoulement et de ruissellement liée à celle des pentes d'où une ponction des lames d'eau précipitées par évaporation. On note par ailleurs une faiblesse des réserves capables de soutenir les débits d'étiage.

L'étude des disponibilités annuelles révèle la faiblesse et la modicité des débits de la Sandougou aussi bien pour la station de Sinthiou Malem que pour la station de Koussanar. Ainsi à Koussanar (Fig.18) le volume moyen annuel n'atteint pas le million de m³ d'eau par contre à Sinthiou Malem ce volume est un peu plus important et tend vers trois millions de m³ d'eau. A cela, on constate une grande variabilité des disponibilités en eau d'une année à une autre qui traduit le régime des pluies seule source d'alimentation du bassin.

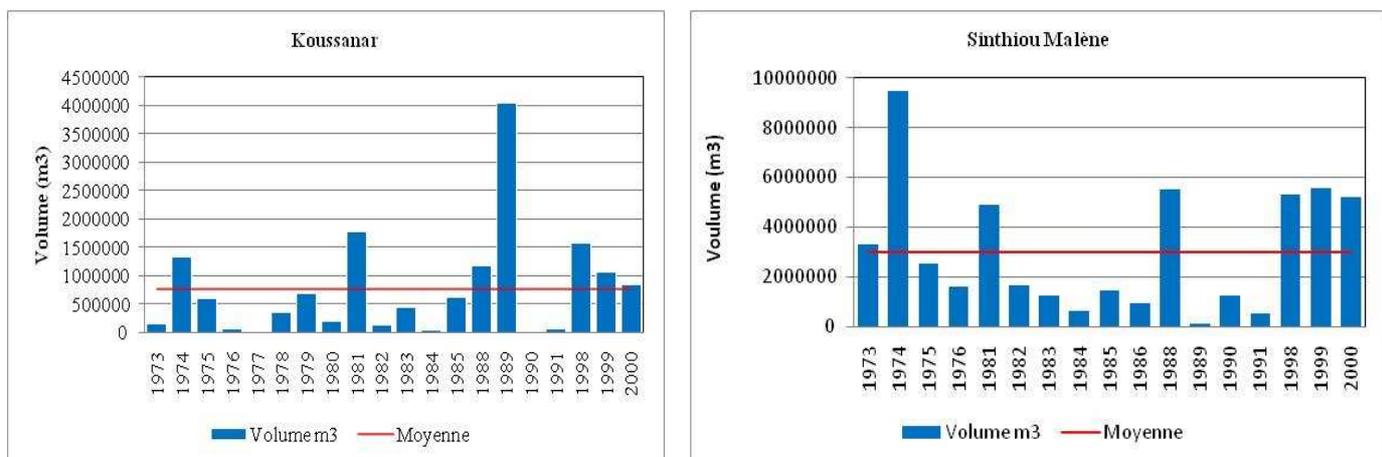


Figure 18 : Volume d'eau (m³) aux stations de Koussanar et Sinthiou Malène (période 1973-2000)

4.6.2 Interprétation de l'étude hydrologique

L'étude des écoulements sur deux sous-bassins de la Sandougou montre que les débits annuels varient fortement d'une année à une autre. Ces débits sont en grande partie faibles. L'analyse des débits mensuels montre que l'écoulement dans le bassin de la Sandougou ne dure que 5 mois c'est-à-dire de juin à octobre qui correspond à la saison des pluies.

Les ressources en eau de surface dans le bassin de la Sandougou ne sont disponibles que durant une période de l'année c'est-à-dire la saison des pluies et c'est à cette période qu'on peut les stocker pour leur éventuelle utilisation durant les périodes de pénuries.

4.7 Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale (SIHRS)

L'aboutissement d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale est la réalisation des descripteurs. En effet la combinaison des critères deux par deux ou trois par trois permet d'apprécier les différents facteurs dans une même carte. L'interprétation devient alors aisée. L'objectif du SIHRS qui est de fournir aux décideurs un outil d'appréciation, rend ainsi compte des zones à potentialités en y intégrant le coût de production (Savané, 1997 cité par Saley, 2003).

Nous présenterons ci-dessous les cartes thématiques suivies des quatre descripteurs ou indicateurs qui permettent de cerner les potentialités en eaux souterraines du bassin de la Sandougou.

4.7.1 Carte de densité de drainage

La densité de drainage se définit comme étant la longueur des cours d'eau par unité de surface. L'observation de cette carte montre que le bassin versant de la Sandougou est fortement drainée en eau de surface. Les fortes et très fortes densités de drainage occupent 57 % du secteur et se répartissent régulièrement sur l'ensemble de la zone. Ces densités sont présentes dans toute la partie centrale, au Sud, au Sud-Ouest et un peu au Nord-Est. La forte densité de drainage de la région impliquerait que le phénomène d'infiltration et d'accumulation des eaux souterraines soit accentué du fait des pentes qui sont faibles dans le bassin. Les densités faibles et moyennes de drainage occupent 43% du bassin et sont localisées principalement au Nord-Est, au Sud-Est et à l'Ouest.

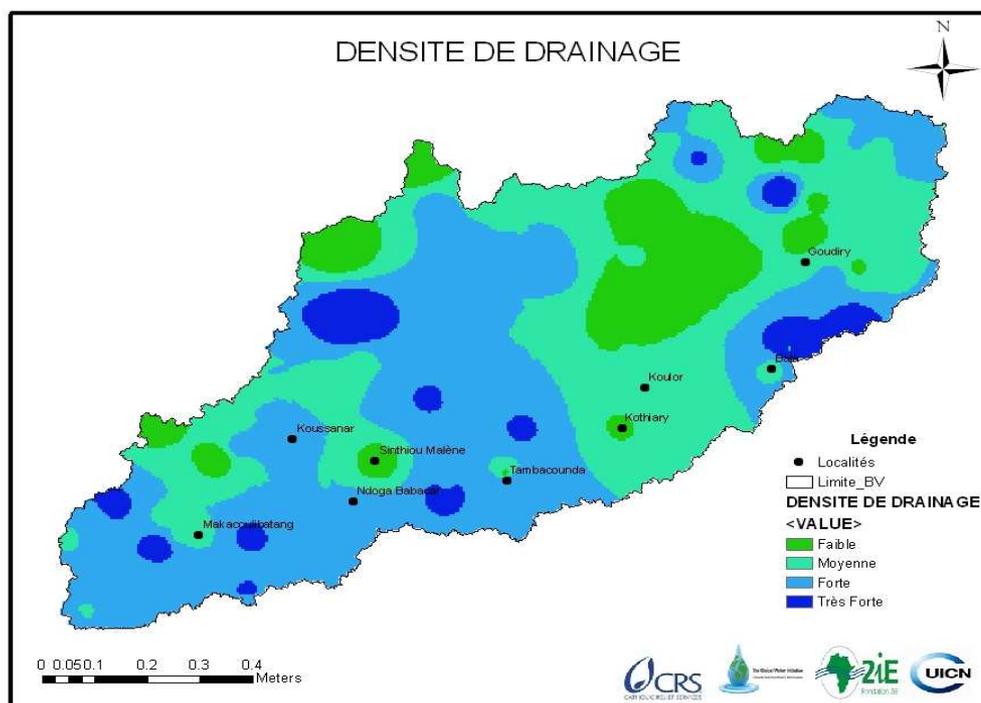


Figure 19: Carte de densité de drainage du bassin de la Sandougou.

4.7.2 Carte du niveau statique

La carte du niveau statique de l'eau dans les forages est présentée à la figure 20. L'analyse de cette carte montre que les niveaux statiques sont plus ou moins liés au réseau de drainage. En effet, les zones à forts et très forts niveaux statiques qui occupent 20 % du domaine se situent dans des zones où le drainage est intense. Ces zones se situent au Sud du bassin (Tambacounda, Ndogo Babacar et Sinthiou Malem) au Sud-Ouest à Makacoulibatang et un peu au Nord-Est. Les faibles et moyens niveaux statiques qui constituent la classe dominante avec 80 % de la superficie du bassin se trouvent essentiellement au Nord et Nord-Est à Goudiry.

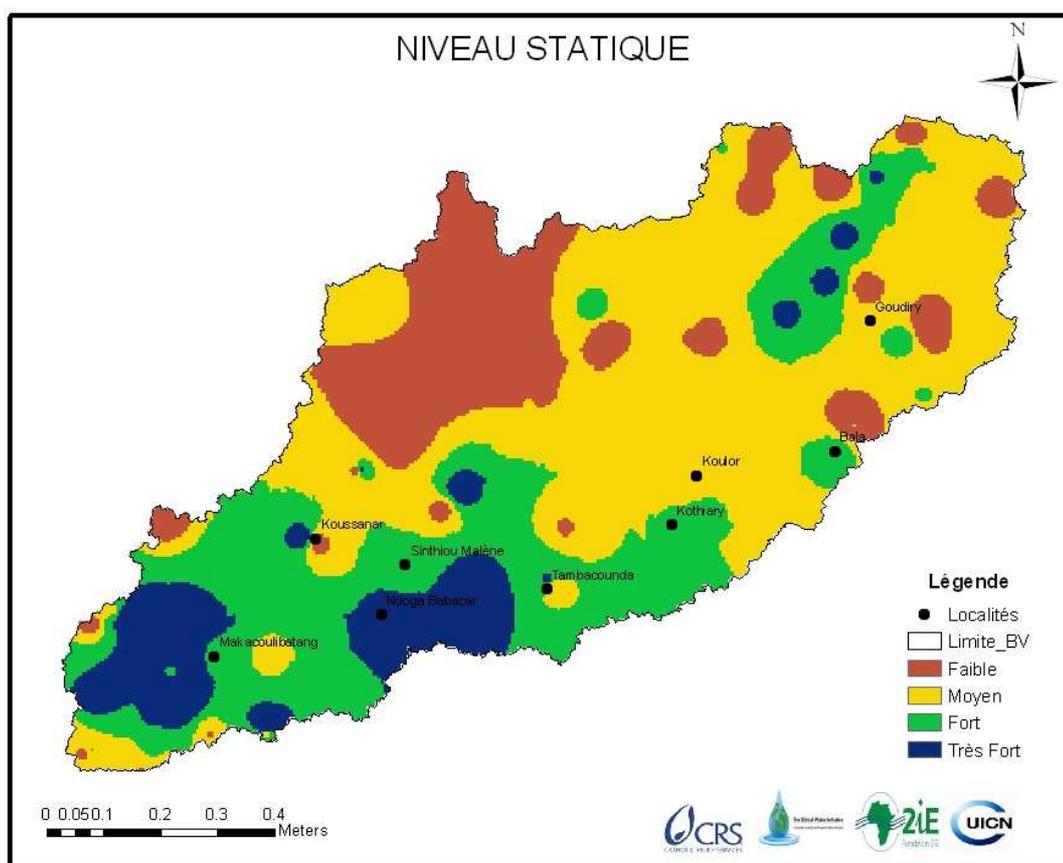


Figure 20: Carte des niveaux statiques de l'eau dans les forages dans le bassin de la Sandougou

4.7.3 Carte des débits d'exploitation

L'analyse de la carte des débits d'exploitation à la figure 21 montre que les débits moyens et forts sont dominants sur le bassin avec 75 % de la superficie. Ces débits sont localisés un peu partout dans le bassin mais plus particulièrement au Sud-Ouest, au Centre et au Nord-Est.

Les faibles débits avec 24 % de la surface du bassin se situent au Sud autour de Tambacounda et Ndogo Babacar et au Nord-Ouest. Les très forts débits avec 1% de la superficie du bassin se localisent à l'extrême Nord-Est autour de la communauté rurale de Bala.

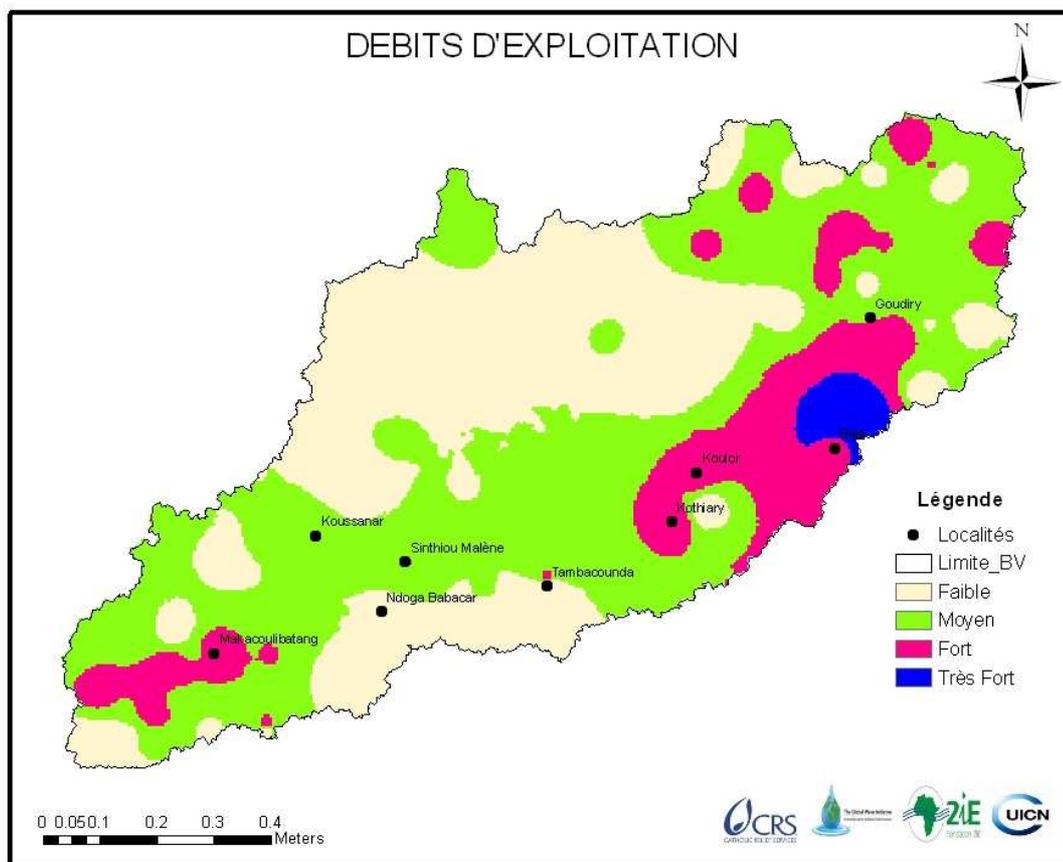


Figure 21 : Carte des débits d’exploitation des forages dans le bassin de la Sandougou

4.7.4 Carte de profondeurs des forages

La figure 22 montre que près de 68 % de la zone présente des profondeurs de forages moyennes et fortes (Centre, Sud et Sud-Ouest du bassin). Quant aux faibles profondeurs elles représentent environ 4 % des superficies concernées et se rencontrent un peu partout dans le bassin. Les très fortes profondeurs sont situées au Nord-Est à Goudiry, au Nord et au Sud-Ouest occupent 28 % du bassin.

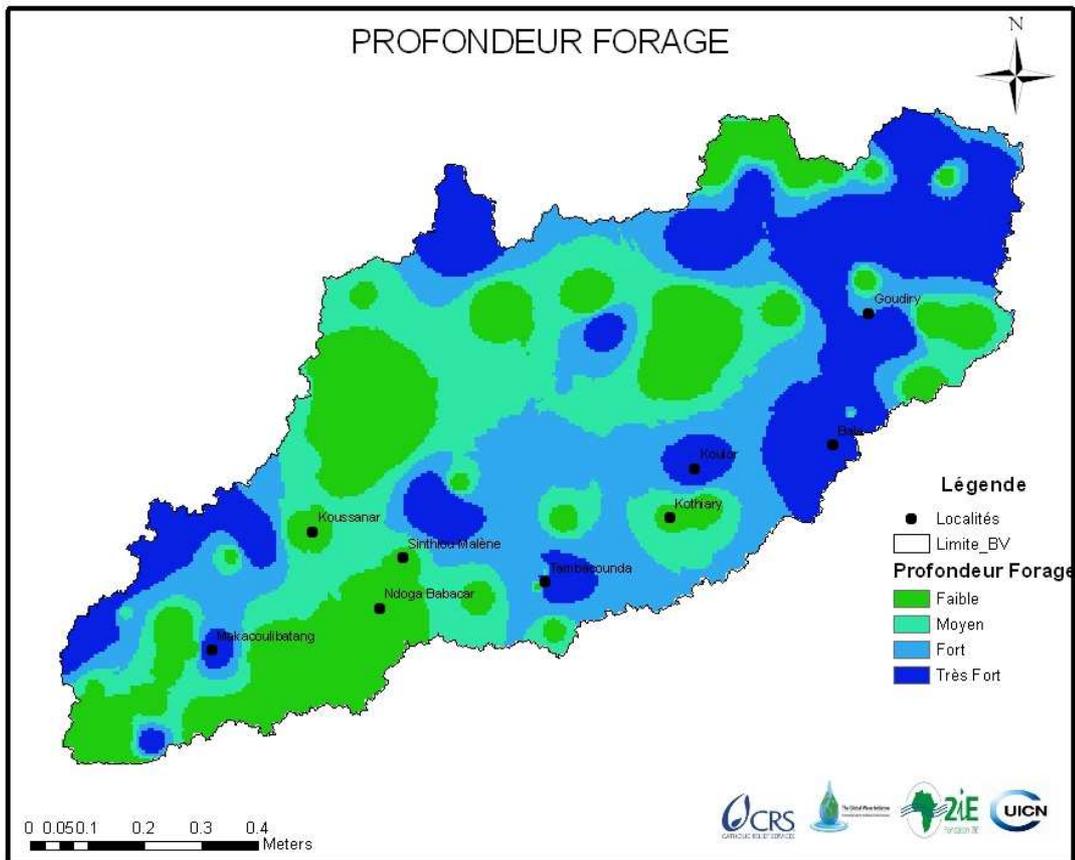


Figure 22: Carte des Profondeurs de forage dans le bassin de la Sandougou

4.7.5 Cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité

La réalisation de ces cartes a nécessité la conception d'un SIHRS et l'intégration des paramètres hydrogéologiques dans celui-ci. Ces paramètres ont servi à la réalisation de la cartographie thématique des ressources en eau souterraine du bassin de la Sandougou selon le principe de l'analyse multicritère. Ainsi, nous avons pu réaliser les cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité des ressources en eau souterraine du bassin de la Sandougou.

4.7.5.1 La carte de disponibilité des ressources en eau :

La réalisation de la carte de disponibilité en eau souterraine a tenu compte des paramètres tels que la carte de densité de drainage et la carte du niveau statique. Leur combinaison s'est faite dans le logiciel ArcGIS et nous a permis d'obtenir cette carte (Fig.23).

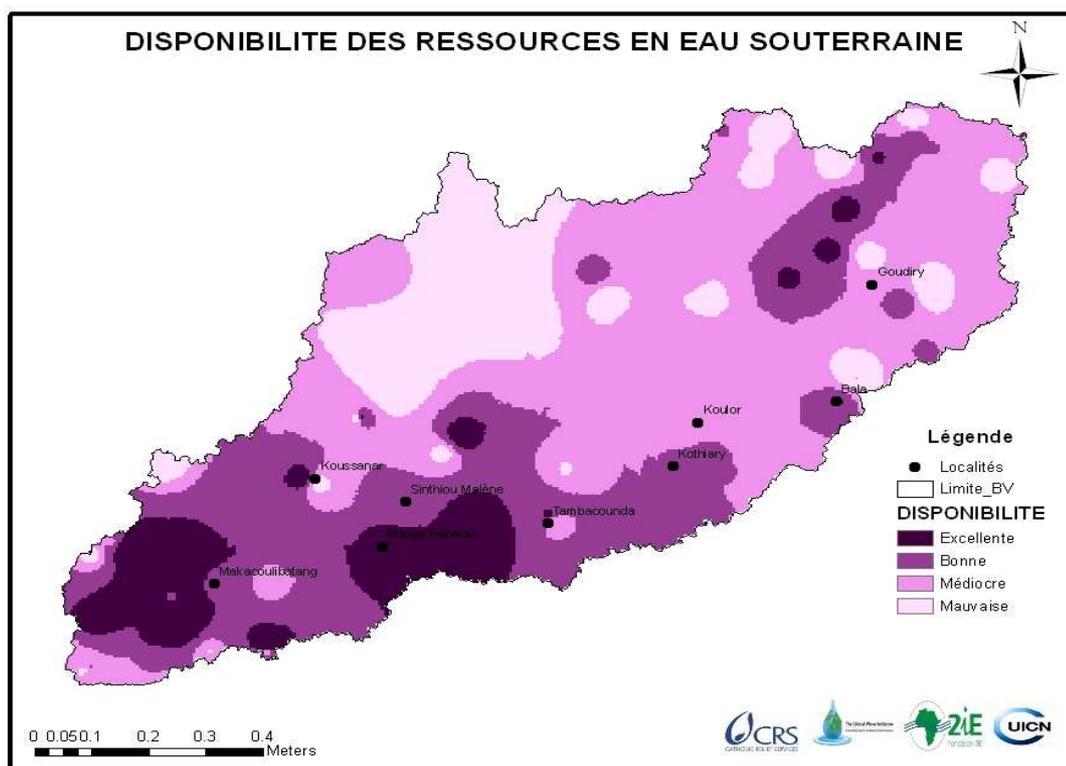


Figure 23: Carte de disponibilité des ressources en eau souterraine du bassin de la Sandougou

Elle se caractérise par quatre classes. Les disponibilités mauvaise et médiocre occupent 43 % du domaine et caractérisent les zones à faible densité de drainage. Ces zones se localisent au Nord, au Nord-Est et au Nord-Ouest du bassin. Les classes de disponibilité bonne (54 %) et excellente (3 %) caractérisent les zones favorables à l’implantation des forages. Elles traduisent une bonne alimentation des nappes ; la densité de drainage est forte et comme les pentes sont en général faibles dans le bassin cela facilite l’infiltration et l’accumulation des eaux et participe à la recharge de la nappe souterraine. Ces zones sont situées au Sud, au Sud-Ouest du bassin.

Dans l’ensemble le bassin présente une bonne disponibilité en ressources en eau souterraine.

4.7.5.2 La carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine :

La carte d'accessibilité (Fig.24) est le résultat de la synthèse des facteurs profondeur du forage et niveau statique. Les classes d'accessibilité bonne et excellente dominent sur le bassin. Elles présentent une très bonne répartition et couvre près de 85 % de la zone. Cela signifie que dans ces zones les profondeurs des forages sont moyennes et faibles, ce qui pourrait entraîner un grand pourcentage de succès au niveau des forages. Ces zones sont mieux indiquées pour l'implantation de forages.

Les classes de mauvaise accessibilité (5 %) et médiocre accessibilité (10 %) sont caractérisées par des profondeurs de foration élevées. L'aquifère est profond et la ressource en eau souterraine n'est pas facilement accessible. Il se posera un problème de coût pour l'implantation d'un forage et le captage sera à risque. Ces zones se situent essentiellement au Nord-Est du bassin.

Le bassin de la Sandougou présente dans l'ensemble une bonne accessibilité en eau souterraine.

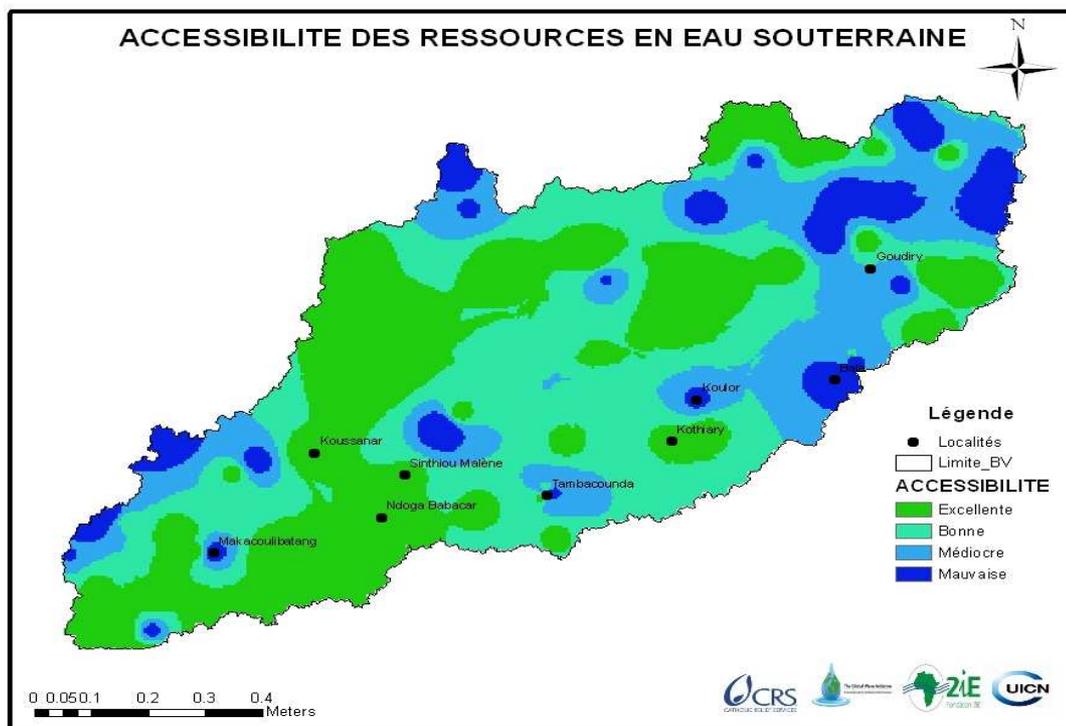


Figure 24 : Carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine du bassin de la Sandougou

4.7.5.3 La carte d'exploitabilité des ressources en eau souterraine:

L'exploitabilité des ressources en eau est guidée par le débit de l'eau que l'on peut tirer et le niveau piézométrique (niveau statique de la nappe dans notre cas) selon Saley (2003). La carte d'exploitabilité des ressources (Fig.25) résulte donc de la combinaison de ces deux critères. Elle permet d'avoir une idée du coût d'exploitabilité connaissant la profondeur (collin et *al.*, cités par Savané, 1997). Quatre classes que nous pouvons regrouper en deux caractérisent cette carte. Les exploitabilités mauvaise et médiocre occupent à elles seules 77 % du territoire et regroupent les zones à faibles et moyens débits. Ces zones se situent dans toute la partie centrale, au Nord, au Sud, au Nord-Est du secteur d'étude. Elles constituent le domaine favorable à l'hydraulique villageoise et le domaine de recherche des eaux de boisson selon Savané (1997). Les exploitabilités excellente et bonne occupent les secteurs périphériques avec 23 % de la superficie totale. Elles se localisent au Nord-Est (Bala, Koulor) et au Sud-Ouest à Makacoulibatang. Savané (1997) et Saley (2003) pensent que ces zones sont favorables à l'hydraulique urbaine, et à l'agriculture motorisée.

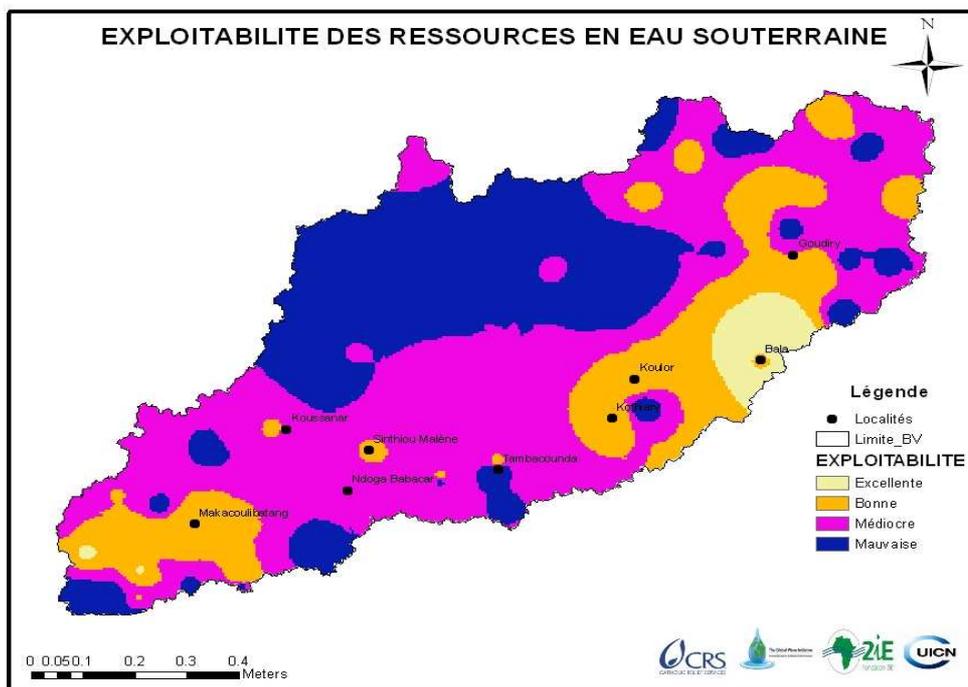


Figure 25: Carte d'exploitabilité des ressources en eau souterraine du bassin de la Sandougou

4.7.5.4 Carte des potentialités en eau souterraine

L'analyse de la carte des potentialités en eau souterraine (Fig.26) montrent que:

Les zones à indice de potentialité médiocre (50,4 % du domaine) et mauvais (24,6 % du territoire) sont réparties de manière régulière sur l'ensemble du bassin. Ces zones se caractérisent par de fortes et moyennes profondeurs d'ouvrages, de forts niveaux statiques et des débits faibles.

Les zones à bon et excellent indice de potentialité sont circonscrites en différents chefs lieux (Tambacounda, Makacoulibatang, Koulor, Bala...), au Sud-Ouest et au Nord-Est du bassin. Ces zones représentent 25 % du territoire et sont indiquées pour la recherche et l'implantation des sites de forage et prédisent des débits d'exploitation assez importants.

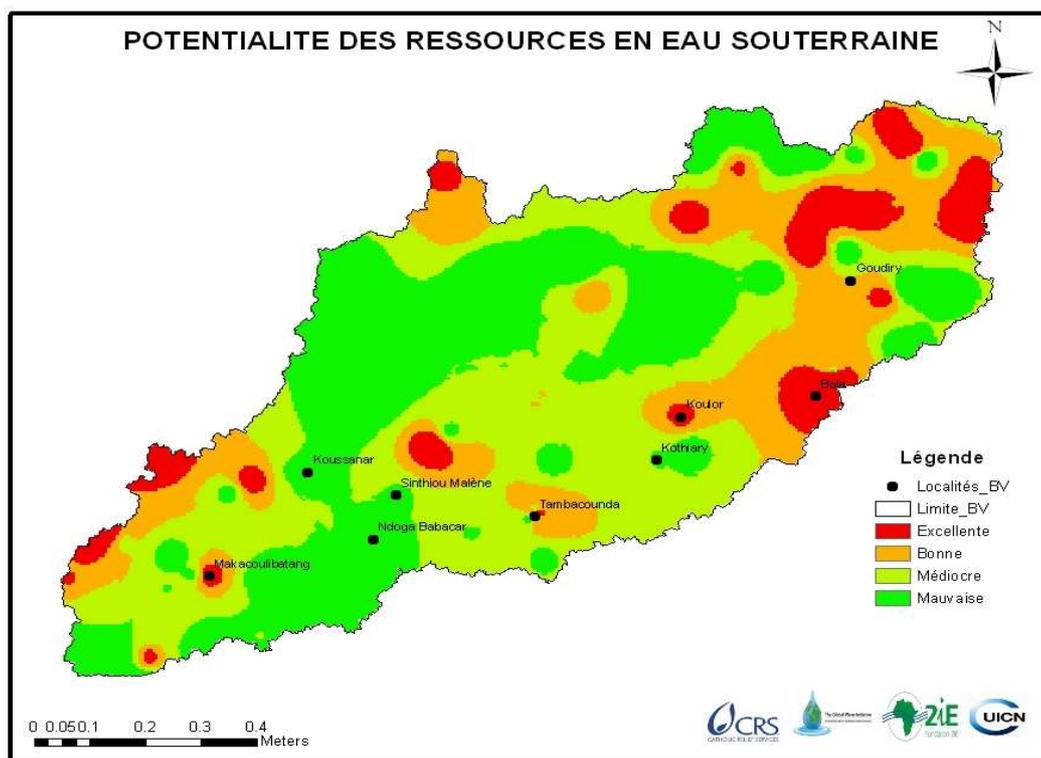


Figure 16 : Carte de potentialité des ressources en eau souterraine dans le bassin de la Sandougou

4.7.6 Discussion des résultats de la cartographie thématique

L'utilisation du SIHRS pour l'évaluation et la gestion des ressources en eau a permis, à partir des données hydrogéologiques préexistantes, la réalisation des cartes thématiques du bassin de la Sandougou. Les différentes cartes obtenues à l'issue de cette étude sont à considérer avec une certaine marge d'erreurs. Les cartes thématiques réalisées ne représentent en réalité qu'une évaluation relative des phénomènes (Saley, 2003). Or ces phénomènes sont évolutifs dans le temps et dans l'espace. L'analyse des cartes peut donc être faussée dans ces conditions.

Ce qui est cependant intéressant, c'est la capacité du SIHRS à pouvoir croiser toutes les données disponibles qui décrivent une réalité et à les afficher sous forme de carte de synthèse. Cette carte peut fournir des informations qui peuvent guider la prise de la bonne décision pour une gestion efficace des ressources en eau souterraine. Ainsi le SIHRS reste et demeure-t-il selon Saley (2003) l'un des meilleurs outils de résolution scientifique de nombreuses de nos préoccupations, d'où son apport dans les prises de décisions de développement.

4.7.7 Conclusion partielle

Les cartes thématiques des ressources en eau souterraine dans le bassin de la Sandougou établit à l'aide du système d'information hydrogéologique à référence spatiale (SIHRS) montre que dans l'ensemble les ressources en eau disponibles sont facilement accessibles. Cependant ces ressources sont mal exploitées puisque 77 % de la superficie du bassin présente une exploitabilité mauvaise et médiocre.

La carte de potentialité en eaux souterraines permettant de circonscrire les zones favorables à l'implantation d'ouvrage de captage indique que seulement 25 % de la région présentent une bonne potentialité des ressources en eaux. Les zones concernées se situent au Nord-Est et au Sud-Ouest du bassin.

Pour améliorer les résultats obtenus, nous recommandons d'associer la nature de la formation géologique car certaines formations sont plus productives que d'autres. En outre la connaissance de certains paramètres hydrodynamiques tels que la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement des formations pourraient donner des indices de présence des ressources en eaux souterraines.

4.8 Qualité des ressources en eau souterraine

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines sont consignés dans les tableaux 1, 2 et 3 en annexe 5.

L'analyse de ces résultats montre que :

- Les eaux de puits sont chaudes et acides avec des températures variant entre 27,9 °C et 40,7°C et des PH allant de 5,4 à 6,9. Ces eaux sont faiblement minéralisées avec une conductivité qui varie de 31 à 276 $\mu\text{s.cm}^{-1}$.
- Les eaux de forage sont parfois acides avec des températures qui varient entre 28,4 °C et 40,7°C. Ces eaux sont moyennement minéralisées avec une conductivité allant de 452 à 693 $\mu\text{s.cm}^{-1}$.
- Les eaux de forage présentent trois faciès distincts : un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, un faciès chloruré et nitraté calcique et magnésien et un faciès chloruré magnésien.

Les eaux souterraines du bassin de la Sandougou sont faiblement à moyennement minéralisées avec des pH neutres à légèrement acide dans l'ensemble. Elles ont des températures supérieures à celles recommandées par la communauté européenne, mais cela ne constitue pas de danger. En général, en Afrique de l'Ouest, la température moyenne des eaux souterraines est de 30°C (Rodier, 1996) à cause des conditions climatiques.

4.9 Conclusion partielle

L'analyse physicochimique des eaux souterraines dans le bassin de la Sandougou a montré que les eaux sont en général de bonne qualité physicochimique avec des teneurs en éléments chimiques inférieures aux normes de référence (OMS et directives européennes). Ces eaux sont potables pour la consommation humaine.

CHAPITRE V : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1 Conclusions

L'étude de la caractérisation hydrologique des sous-bassins de la Sandougou en vue de définition d'espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés nous permis d'obtenir plusieurs acquis. Ces acquis sont relatifs au découpage du bassin en sous-bassins, à l'étude hydroclimatique du bassin et à l'évaluation de la disponibilité et de la qualité des ressources en eau souterraine.

Ainsi, en ce qui concerne le découpage du bassin en sous-bassins, on retiendra que en tenant compte des critères hydrologiques, géomorphologiques et socioéconomiques le bassin de la Sandougou à été divisé en quatre sous-bassins qui définissent des espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés.

L'étude des paramètres climatiques à montré que leur fluctuation mensuelle permet de diviser l'année en deux parties : de novembre à avril ; c'est la saison sèche avec l'augmentation de la température moyenne annuelle, l'évapotranspiration potentielle et l'insolation.

De mai à octobre ; c'est la saison des pluies avec une chute brutale de l'insolation, de l'évapotranspiration potentielle et une forte augmentation de l'humidité relative consécutive à celle de la couverture nuageuse.

L'étude hydrologique a montré que les débits des eaux de surface se caractérisent par des modules faibles (inférieurs à $1\text{m}^3/\text{s}$) et variables dans le temps, mais toutefois ces quantités d'eau restent mobilisables pendant l'hivernage pour leur mise en valeur au profit des communautés.

L'utilisation du système d'information hydrogéologique à référence spatiale (SHIRS) pour évaluer les ressources en eau souterraine du bassin de la Sandougou nous a permis d'obtenir plusieurs cartes thématiques. Les cartes de disponibilité, d'accessibilité, d'exploitabilité des ressources en eau souterraine et la carte de potentialité de forages sont les résultats de cette méthodologie. Il ressort de cette étude que : les ressources en eau disponibles sont facilement accessibles. Cependant ces ressources sont mal exploitées puisque 77 % de la superficie du bassin présente une exploitabilité mauvaise et médiocre.

La carte de potentialité en eaux souterraines permettant de circonscrire les zones favorables à l'implantation d'ouvrage de captage indique que seulement 25 % de la région présentent une bonne potentialité des ressources en eaux. Les zones concernées se situent au Nord-Est et au Sud-Ouest du bassin.

L'étude de la qualité des eaux souterraines a montré que les eaux sont de bonne qualité physicochimique mais sur le plan microbiologique des indices de pollution existent au niveau de certains ouvrages.

5.2 Recommandations

Pour parvenir à mettre en pratique la nouvelle vision politique de la gestion intégrée de l'eau dans le bassin versant de la Sandougou, il est nécessaire :

- D'installer des stations hydrométriques sur les cours d'eau principaux en amont et à l'exutoire du bassin afin de faciliter le suivi des écoulements dans le bassin de la Sandougou ;
- Réhabiliter et veiller au bon fonctionnement des stations hydrométriques existantes sur le bassin de la Sandougou afin de faciliter les enregistrements des données hydrologiques nécessaires pour le suivi et la prévision des ressources en eau de surface.
- Renforcer les capacités des populations sur l'approche GIRE.
- Mettre en place des comités de gestion à l'échelle des sous-bassins.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

ABERGEL J. & DACOSTA H. Les écoulements non pérennes sur les petits bassins du Sénégal. *IAHS Publ. n°238, 1996 pp 139-156.*

ADAMOU M. (2010). Etude du sous bassin versant de la basse vallée de la Tarka (Niger) : Caractérisation et utilisation des ressources en eau. *Rapport final, 83 p.*

Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (2010). Situation économique et sociale de la région de Tambacounda. *Rapport final, 137 p.*

BADIANE A. (1999) : Gestion intégrée des sols pour une agriculture durable et la sécurité alimentaire, cas du Sénégal. *Rapport final, 175 p.*

Brigade Régionale de l'Hygiène (2010). Rapport définitif de la Campagne de Suivi de la Qualité de l'Eau de Boisson dans la Région de Tambacounda. Edition 2010,5 p.

Centre de Suivi Ecologique (2005). État de l'environnement au Sénégal. *Rapport final, 227 p.*

COLY A. (2009). Plan d'aménagement et de Gestion Intégrée des ressources en eau dans le bassin de la Sandougou. *Rapport final, 115 p.*

COULIBALY K.M. (1997) : Evaluation du bilan hydrologique, de la variabilité climatique et du tarissement des cours d'eau par l'application des méthodes mathématiques dans le bassin versant du fleuve Sanssadra (Région de Buyo). *Mémoire de DEA des Sciences de l'Environnement, Université d'Abobo-Adjamé, 81P*

DEMARGNE, C. (2001). La qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation des crues. *Thèse de Doctorat de l'Université de Marne-la vallée, 2001. 275p.*

DEZETTER A. (1996). Les enjeux de la gestion des ressources en milieu semi-aride. *XIIème journées hydrologique de l'ORSTOM, Montpellier, 10-11Oct. 1996.*

FAO-PNUD-OMVG. (1988). Pedological Study of the Sandougou, Gouloumbo, Kirili, Mako, Tomboronkoto, Bantako-Couta and Anambe plains in Senegal. *OMVG/UNDP/FAO*, 49 p.

KHOUMA M. (1995). Identification et évaluation des ressources en sols dans la moyenne vallée du fleuve Gambie et problématique de leur gestion par les systèmes d'information géographique. *Thèse de doctorat, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux.*

NDIAYE S. (2002). Développement d'un système d'information géographique « Ressources en Eau Souterraine » dans la zone de Mbour-Fatick. *Projet de fin d'études, Université Cheik Anta Diop de Dakar*, 74 p.

NGUETORA M., MUSY A. & CALOZ R. (2000). Modélisation d'un bassin versant pour la gestion des ressources en eau à l'aide d'un système d'information géographique. Application au bassin versant du Massili au Burkina Faso. *Sud sciences et technologies n°5 mars 2000*, pp 32-41

Plan Régional de Développement Intégré (2001). Bilan diagnostique du développement intégré de la région de Tambacounda, *rapport final*, 40 p

REMENIERAS G. (1976). L'hydrologie de l'ingénieur. *Édit. EYROLLES, Paris, deuxième édition*, 265 p.

RODIER J. (1996). L'analyse de l'eau. Eau naturelle, Eau résiduelle, Eau de mer. *Dunod techniques 8^{ème} édition*, 1384 p.

SAVANE I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. *Thèse d'état, Université de Cocody*, 396 p

SALEY M. B. (2003). Cartographie thématique des aquifères de fissures pour l'évaluation des ressources en eau. Mise en place d'une nouvelle méthode d'extraction des discontinuités images et d'un SIHRS pour la région semi-montagneuse de Man (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Thèse de Doctorat d'Université de Cocody-Abidjan*, 209 P

Sites internet

Site web ASTER GDEM: <https://wist.echo.nasa.gov>

ANNEXE 1

Tableau 1 : Paramètres climatiques à Tambacounda et à Goudiry (période 1991-2007)

Tambacounda	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T max °C	34.3	36.9	39	40.5	40.2	36.5	32.6	31.5	32.4	34.9	36.5	34.1
T min °C	17.4	19.7	22.3	24.8	26.4	25.2	23.4	22.9	22.5	22.5	19.2	17.1
T moy °C	25.85	28.3	30.7	32.65	33.3	30.9	28	27.2	27.5	28.7	27.9	25.6
H max (%)	43.2	41	42.1	48.4	58.1	78.9	92.3	96.6	97.2	95.3	81.3	54.9
H min (%)	13.07	11.7	12	13.94	20.39	37.74	55.34	62.6	60.61	47.6	23.11	15.96
H moy (%)	28.1	26.4	27.1	31.2	39.2	58.3	73.8	79.6	78.9	71.5	52.2	35.4
Evaporation (mm)	302.8	304	354	340.3	229.9	205.37	106.57	68.6	57.6	95.39	178.5	259.7
Vitesse vent (m/s)	2.7	2.6	2.5	2.3	2.7	2.8	2.3	1.9	1.5	1.5	1.5	2.3
Insolation (heures)	267.3	259	302	292.1	283.6	239.6	223.5	210	219.7	253.7	257.9	247.8

Goudiry	Janv	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T max °C	36.9	40.5	41.6	45	45.6	44.4	40.3	37.1	38.7	41.4	39.8	38.3
T min °C	13.58	17	18.6	21.4	23.6	22.01	20.51	20.2	19.88	19.87	15.9	13.9
T moy °C	25.24	28.8	30.1	33.2	34.6	33.21	30.41	28.6	29.29	30.63	27.8	26.1
H max (%)	62.6	60.2	57.9	56.2	75.3	94.9	99.2	99.4	99.7	96.6	82.1	68.9
H min (%)	8.6	6.9	7.3	6.9	9.8	14.6	26.7	40.6	37.5	15.1	11.7	10.6
H moy (%)	35.6	33.6	32.6	31.6	42.6	54.75	62.95	70	68.6	55.85	46.9	39.8
Evaporation (mm)	359.6	356	428	450	456	375	241.8	146	189	198.4	273	313
Vitesse vent (m/s)	3.5	3.6	3.6	3.4	3.9	3.4	3.5	2.9	2.4	2.1	2.5	2.9
Insolation (heures)	242.5	230	268	269	269	244.6	247	240	229	269.9	254	242

Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles à Tambacounda et à Goudiry (période 1991-2007)

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Goudiry	0	0	0	0	9	76	149	198	141	31	2	1	607
Tambacounda	0	1	0	0	14	84	170	199	163	57	1	1	691

ANNEXE 2

Tableau 1 : Débits moyens annuels Koussanar (période 1973-2000)

Année	Qmoy annuel (m ³ /s)	Volume (m ³)
1973	0.005	157800
1974	0.042	1325520
1975	0.019	599640
1976	0.002	63120
1977	0.001	31560
1978	0.011	347160
1979	0.002	694320
1980	0.006	189360
1981	0.056	1767360
1982	0.004	126240
1983	0.014	441840
1984	0.0015	47340
1985	0.02	631200
1988	0.037	1167720
1989	0.128	4039680
1990	0.001	31560
1991	0.002	63120
1998	0.05	1578000
1999	0.034	1073040
2000	0.027	852120

Tableau 2 : Débits moyens annuels à Sinthiou Malène (période 1973-2000)

Année	Qmoy annuel (m ³ /s)	Volume (m ³)
1973	0.105	3313800
1974	0.301	9499560
1975	0.08	2524800
1976	0.05	1578000
1981	0.155	4891800
1982	0.052	1641120
1983	0.04	1262400
1984	0.02	631200
1985	0.045	1420200
1986	0.03	946800
1988	0.174	5491440
1989	0.004	126240
1990	0.04	1262400
1991	0.017	536520
1998	0.168	5302080
1999	0.176	5554560
2000	0.165	5207400

ANNEXE 3

I-La Méthode de Thornthwaite

Cette formule tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle. La formule de l'ETP est la suivante :

$$ETP = 16 \left(\frac{10 \cdot T}{I} \right)^a \cdot F(\lambda)$$

Où:

ETP: Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm

T : température moyenne du mois considéré en °C.

a : Coefficient calculé par la formule suivante :

$$a = 1,6 \left(\frac{I}{100} \right) + 0,5$$

I : Indice thermique annuel qui est égal à la somme des douze valeurs de l'indice thermique mensuel. Cet indice est calculé par la formule suivante :

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

F(λ) : le facteur correctif qui est fonction de la latitude du lieu considéré et est donné par les tables de P. BROCHET et N. GERBIER (1968).

II -Estimation du bilan d'eau

La formule générale du bilan d'eau donne l'égalité des apports et des pertes évaluées sur de grandes périodes. Les précipitations qui tombent dans le bassin de la Sandougou sont partagées entre l'évaporation, l'écoulement de surface et l'infiltration, de sorte que l'équation du bilan hydrologique s'exprime par la relation suivante:

$$P = ETR + R + I + \Delta W$$

P: La hauteur de la précipitation moyenne annuelle en (mm).

R: Le ruissellement de surface moyen annuel en (mm).

ETR: L'évapotranspiration réelle moyenne annuelle en (mm).

I: L'infiltration moyenne annuelle (mm).

ΔW: La variation de réserves en (mm), souvent négligeable.

III-Estimation du ruissellement et de l'infiltration

Au niveau d'une zone, l'excédent du bilan hydrique est partagé entre l'infiltration (**I**) et le ruissellement (**R**). Ces lames d'eau qui s'écoulent en surface alimentent les eaux de surface qui recharge par endroit les nappes superficielles.

III-1 Le Ruissellement

Le ruissellement correspondant à la part des précipitations qui s'écoule directement sur le sol lors des précipitations. Il peut donc être connu d'une façon générale par analyse de l'hydrogramme d'un cours d'eau où à l'aide des méthodes empiriques qui donnent une valeur approchée. Parmi les méthodes empiriques on peut citer celle de Tixeront et Berkaloff. Ces auteurs ont établi une formule qui permet d'étudier le ruissellement moyen annuel. Cette formule tant qu'elle ne tient pas compte de la nature lithologique des terrains et l'influence de la perméabilité sur le ruissellement, elle reste toujours discutable. Elle s'écrit de la manière suivante:

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2}$$

Avec :

R: Le ruissellement moyen annuel en (mm).

P: La hauteur des précipitations annuelles en (mm).

ETP: L'évapotranspiration potentielle annuelle en (mm).

III-2 Estimation de la lame d'eau infiltrée

L'infiltration désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et du sous-sol, sous l'action de la gravité et effets de la pression. La lame d'eau infiltrée est souvent déduite à partir des autres paramètres à l'aide de la formule suivante:

$$I = P - (ETR + R)$$

$$I = (P - ETR) - R$$

ANNEXE 4 : Base de données hydrogéologiques de la région de Tambacounda (Direction Régionale de l'Hydraulique de Tambacounda)

Departement	Division_3	Désignation	xCoord	yCoord	Prof_Totale	Prof_Equipée	Type_Ouvrage	Niv_Statique	Débit_Exploitable	Aquifère	Residu_Sec	Cl	SO4	F
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	AINOUMANE	-14.6861	13.8328	134	131.27	Forage	53	44	Continental terminal	80			0.1
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	DAROU FALL	-14.4556	13.8944	85.9	79.18	Forage	60.6	6.6	Continental terminal	320	13.5	1.9	-0.1
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	NDIAWENE PEULH	-14.5950	13.8264	189	184.3	Forage	55.95	37.5	Continental terminal	48	6.4		0.1
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	DIAGLE SINE	-14.4458	13.8625	147	145	Forage	57.6	13.5	Continental terminal	118	3.5	1.9	-0.1
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	FASS NDIMBELANE	-14.5481	13.8369	178.4	175.3	Forage	58.1	42.8	Continental terminal	98	6.4		0.1
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	KEUR DAOUDA	-14.4500	13.8653	173	162.5	Forage	55.64	60	Oligo-miocène	90	6.4		0.2
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	KISSANG	-14.5869	13.8694	136.75	136.75	Forage	52.51	45	Continental terminal	80			0.1
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	KOUMARE	-14.3444	13.9028	460	456.06	Forage	34.85	72	Maastrichtien	356	19.8	17.3	0.5
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	KOUNDIAO SQUARE	-14.5167	13.8000	448	444	Forage-puits	22.9	39.5	Maastrichtien	376	22.7	55.7	0.4
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	MERETO DIALOUBE	-14.4417	13.8167	110.25	107.65	Forage	53.34	17.7	Continental terminal	88	5.7		
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	MERETO DIALOUBE	-14.3931	13.8361	461.87	460	Forage-puits	34.2	40.3	Maastrichtien	314	16.3	26.4	0.7
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	MISSIRAH KOLONTO	-14.7000	13.7833	159	152.74	Forage	47.53	71	Oligo-miocène	60	5		0.15
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	NDIAMBOUR	-14.4833	13.8514	160.6	152.4	Forage	51.95	40	Continental terminal	230			0.1
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	NDIAWENE PEULH	-14.5950	13.8264	189	184.3	Forage	55.95	37.5	Continental terminal	48	6.4		0.1
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	BAMBA NDIAYENE	-14.6167	13.8056	140.5	137.7	Forage	49.83	19.5	Continental terminal	50			0.1
TAMBACOUNDA	BAMBA NDIAYENE	DIAM DIAM DIAYENE	-14.6611	13.8583	184	174.8	Forage	54.42	32.9	Oligo-miocène	88	6.4		0.5

Caractérisation hydrologique des sous-bassins de la Sandougou en vu de définition d'espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés.

Departement	Division_3	Désignation	xCoord	yCoord	Prof_Totale	Prof_Equipée	Type_Ouvrage	Niv_Statique	Débit_Exploitable	Aquifère	Residu_Sec	Cl	SO4	F
TAMBACOUNDA	KOUMPENTOU M	DAROU NDIMBELANE	-14.5519	13.8786	177	172.9	Forage	56.6	74.3	Continental terminal	68	6.4		0.1
TAMBACOUNDA	KOUMPENTOU M	DAROU SALAM SINE 2	-14.4944	13.8858	171	152.18	Forage	57.66	72	Oligo-miocène	360	4.2	184.4	0.2
TAMBACOUNDA	KOUMPENTOU M	FASS GOUNASS	-14.5111	14.0694	159	146.22	Forage	42.41	69	Oligo-miocène	168	7.1		0.35
TAMBACOUNDA	KOUMPENTOU M	KOUMPENTOU M ESCALE	-14.5667	13.9750	103.75	102.5	Forage	40.85	12.8	Continental terminal	64	5	2.9	-0.1
TAMBACOUNDA	KOUMPENTOU M	TOUBA THIAMENE	-14.4869	13.9800	129	117	Forage	30.5	50	Oligo-miocène	120	5	0.5	-0.1
TAMBACOUNDA	KOUTHIBA OULOLOF	BOYNGUEL DADI	-14.3750	14.1333	465	463	Forage	37.92	40	Maastrichtien	315			
TAMBACOUNDA	KOUTHIBA OULOLOF	DAROU MANNA	-14.6181	14.3667	127.5	121.57	Forage	48.7	48.6	Continental terminal	180	7.1	2.9	0.3
TAMBACOUNDA	KOUTHIBA OULOLOF	DIOUGUEL	-14.4689	14.4158	92.8	92	Puits-forage	51.7	23.3	Oligo-miocène		18		0.3
TAMBACOUNDA	KOUTHIBA OULOLOF	LOUMBI GUELBASSO	-14.2694	14.4711	505	470	Forage	38.75	30	Maastrichtien	388			
TAMBACOUNDA	KOUTHIBA OULOLOF	MALEMBA	-14.3139	14.1903	189	180.45	Forage	65.78	78.5	Continental terminal	136	5.7	2.4	0.2
TAMBACOUNDA	KOUTHIBA OULOLOF	SYLL ESCALE	-14.5403	14.2111	446	444	Forage-puits	39.2	40	Maastrichtien	394	11.3	36	0.3
TAMBACOUNDA	KOUTHIBA OULOLOF	SYLL ESCALE	-14.5403	14.2111	446	444	Forage-puits	39.2	40	Maastrichtien	394	11.3	36	0.3
TAMBACOUNDA	MALEME NIANI	MALEME NIANI	-14.2964	13.9439	134	130.55	Forage	57.01	50	Continental terminal	68	3.5	1	0.2
TAMBACOUNDA	MALEME NIANI	NDOUGOUSSINE	-14.3250	13.6986	138	134.17	Forage	34.25	36	Continental terminal	182	7.8		0.1
TAMBACOUNDA	MALEME NIANI	NGANTHILANE DIADIE	-14.2228	13.8250	150	145.25	Forage	36.98	11.6	Oligo-miocène	88	19.8	4.8	0.15
TAMBACOUNDA	MALEME NIANI	LOFE	-14.0556	14.3489	491	489	Forage	37.6	40.5	Maastrichtien	272	9.9	13.4	0.25

Caractérisation hydrologique des sous-bassins de la Sandougou en vu de définition d'espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés.

Departement	Division_3	Désignation	xCoord	yCoord	Prof_Totale	Prof_Equipée	Type_Ouvrage	Niv_Statique	Débit_Exploitable	Aquifère	Residu_Sec	Cl	SO4	F
TAMBACOUNDA	MALEME NIANI	VELINGARA KOTO	-14.3514	14.0472	160	112.32	Forage	42.08	10.3	Oligo-miocène	102	7.1	1.4	0.1
TAMBACOUNDA	KOUSSANAR	DAVADI MEISSA PATHE	-13.9694	14.1250	529.5	528	Forage	19.93	40	Maastrichtien	360	10.6	22.6	0.3
TAMBACOUNDA	KOUSSANAR	KOUSSANAR ESCALE	-14.1036	13.8678	133	128.35	Forage	26.05	70	Continental terminal	94	4.3	4.8	0.2
TAMBACOUNDA	KOUSSANAR	SINTHIOU DEMBA DEME	-14.0014	13.9889	165	161.44	Forage	35.83	71.5	Oligo-miocène	300	17.7	11.5	0.45
TAMBACOUNDA	KOUSSANAR	TINKOLI MANDINGUE	-13.9500	14.0356	141	106.58	Forage	35.62	12	Oligo-miocène	120	7.8		0.3
TAMBACOUNDA	SINTHIOU MALEME	MAYEL DIBI	-13.6431	13.8861	222	174.34	Forage	15.76	12	Eocene	312	9.2		0.4
TAMBACOUNDA	SINTHIOU MALEME	SAMECOUTA PEULH	-13.7861	13.7625	222	99.11	Forage	21.66	13.3	Continental terminal	186	5.7		0.3
TAMBACOUNDA	SINTHIOU MALEME	FARICOUNDA	-13.8497	13.9631	591	590	Forage-puits	24.45	39.8	Maastrichtien	532	49.6	142.2	0.4
TAMBACOUNDA	SINTHIOU MALEME	SINTHIOU DIAOULI	-13.8583	13.9181	388	385.5	Forage	32.88	68.6	Maastrichtien	90	11.3		0.3
TAMBACOUNDA	SINTHIOU MALEME	SINTHIOU MALEME	-13.9167	13.8194	169	156.92	Forage	17.2	44	Eocene	440	5.7	0.5	0.9
TAMBACOUNDA	KAHENE	KABA	-14.8042	13.8056	171	160.77	Forage	53.2	66	Paléocène	80	8.9	6.7	0.15
TAMBACOUNDA	KAHENE	KAHENE	-14.7306	13.7500	169	160	Forage	36.66	49	Eocene	62	10.6		0.2
TAMBACOUNDA	KAHENE	KANTA	-14.7333	13.8014	170	164	Forage	52.88	30	Continental terminal	95	5		0.35
TAMBACOUNDA	KAHENE	KAOUSSARA	-14.7500	13.7306	185	185	Forage	50.58	28.5	Oligo-miocène	170	6.4		0.1
TAMBACOUNDA	KAHENE	KOUNTHIAO FODE THIAM	-14.4653	13.5944	160	131.94	Forage	21.24	12	Oligo-miocène	150	10.6		-0.1
TAMBACOUNDA	KAHENE	SINTHIOU TABANANI	-14.6611	13.6972	166	144.55	Forage	49.3	20.3	Oligo-miocène	70	14.2	5.3	0.2

Caractérisation hydrologique des sous-bassins de la Sandougou en vu de définition d'espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés.

Departement	Division_3	Désignation	xCoord	yCoord	Prof_Totale	Prof_Equipée	Type_Ouvrage	Niv_Statique	Débit_Exploitable	Aquifère	Residu_Sec	Cl	SO4	F
TAMBACOUNDA	MAKA	COLIBANTANG	-14.2592	13.6594	440	438	Forage	4.6	60	Maastrichtien	380	16.3	31.7	0.6
TAMBACOUNDA	MAKA	FADIACOUNDA	-14.1611	13.6569	104	93.4	Forage	15.25	40	Oligo-miocène	116	34		-0.1
TAMBACOUNDA	MAKA	FADIA KOUMDA	-14.1611	13.6569	88	84	Forage	15.19	40	Oligo-miocène	116			
TAMBACOUNDA	MAKA	PAKEBA	-14.3625	13.5556	129	93.92	Forage	14.93	12.9	Oligo-miocène	56	7.1		-0.1
TAMBACOUNDA	MAKA	SARE ELY	-14.1667	13.5333	141	125.54	Forage	40.63	12	Oligo-miocène	60	9.2	2.9	0.1
TAMBACOUNDA	DIALAKOTO	HAFIA THIerno DOURA	-12.7208	13.0778	60	23.3	Forage	11.05	9.1	Socle paléozoïque	266	7.1	6.7	0.3
TAMBACOUNDA	DIALAKOTO	BANTANKOUNTOU	-13.0694	13.2625	44.5	43.05	Forage	16.52	8.2	Oligo-miocène	120	11.3		0.1
TAMBACOUNDA	DIALAKOTO	BELLY WAMEDAKA	-12.5750	13.3639	45.1	45.1	Forage	14	9	Socle paléozoïque				
TAMBACOUNDA	DIALAKOTO	DALABA	-13.2750	12.7519	50	40	Forage	7.2	1	Socle paléozoïque	284	8.5	2.9	-0.1
TAMBACOUNDA	DIALAKOTO	DIALAKOTO	-13.2828	13.3197	161.58	161.41	Forage	21.3	25.5	Maastrichtien	330	3.5	1.6	-0.1
TAMBACOUNDA	DIALAKOTO	DIALACOTO	-13.2700	13.3267	181	162	Forage	22.36	36.7	Paléocène	560	15.9	72	0.1
TAMBACOUNDA	DIALAKOTO	DIALAMAKHA	-13.1014	13.3667	81.3	79.95	Forage	15.79	5.7	Socle paléozoïque	76	9.2	2.9	0.3
TAMBACOUNDA	MISSIRAH	GOULOUMBOU	-13.7139	13.4703	104	101.97	Forage	19.01	62	Oligo-miocène	320	10.6		0.15
TAMBACOUNDA	MISSIRAH	HAMDALLAYE TESSANG	-13.5167	13.6306	135	127.12	Forage	22.82	69.6	Oligo-miocène	400	15.9	5.8	0.1
TAMBACOUNDA	MISSIRAH	MISSIRAH	-13.5167	13.5250	41.3	41	Forage	13.8	16.4	Continental terminal	34	4.3	0.5	-0.1
TAMBACOUNDA	MISSIRAH	BAMBADINKA	-13.4139	13.5764	120	110.68	Forage	28.83	34	Oligo-miocène	90	8.9		0.4

Caractérisation hydrologique des sous-bassins de la Sandougou en vu de définition d'espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés.

Departement	Division_3	Désignation	xCoord	yCoord	Prof_Totale	Prof_Equipée	Type_Ouvrage	Niv_Statique	Débit_Exploitable	Aquifère	Residu_Sec	Cl	SO4	F
TAMBACOUNDA	MISSIRAH	VELINGARA PONT	-13.5944	13.6194	54	53.9	Forage	8.3	17	Continental terminal	80	5	0.5	-0.1
TAMBACOUNDA	NETTEBOULOU	NETTEBOULOU	-13.7833	13.5792	100	97	Forage	15.09	90	Eocene	250	4.2	9.6	0.2
TAMBACOUNDA	NETTEBOULOU	SITAOULE MANDINGUE	-13.7083	13.6467	222	105.1	Forage	32.16	11.3	Oligo-miocène	60	3.5	5.3	0.1
TAMBACOUNDA	NETTEBOULOU	SOUROYEL SALIF	-13.8633	13.5906	92	82.25	Forage	21.8	9.5	Oligo-miocène	76	8.5	1	0.3
TAMBACOUNDA	TAMBACOUNDA	TAMBACOUNDA	-13.6672	13.7819	148	143	Forage	27.75	40	Eocene	272	3.5	8.6	-0.1
TAMBACOUNDA	TAMBACOUNDA	TAMBACOUNDA	-13.6672	13.7819	178	169.75	Forage	34.4	51	Eocene	280	7.1	5.8	0.4
TAMBACOUNDA	TAMBACOUNDA	GOUREL DIAWALI	-13.6736	13.7944	180	171.2	Forage	36	15	Eocene	255	7.1	2.9	0.6
TAMBACOUNDA	TAMBACOUNDA	TAMBACOUNDA	-13.6681	13.7833	549	549	Forage	31.7	250	Maastrichtien	380	21.3		0.5

ANNEXE 5 :

Tableau 1 : Résultat des analyses microbiologiques (DRH Tambacounda, 2010)

Sources d'eau	phase	Nbre d'échantillons	Présence de CF	Absence de CF	Observations
Puits hydraulique	II	56	30	26	58.24 % sont contaminés par les CF
	I	35	23	12	
Forage rural	II	09	00	09	55.88 % sont contaminés par les CF
	I	25	19	06	
Pompes manuelles	II	04	01	03	73.33 % sont contaminés par les CF
	I	11	10	01	
TOTAUX		140	83	57	62.48 % des points d'eau visités sont contaminés par les CF

Tableau 2 : Résultat des analyses chimiques (DRH Tambacounda, 2010)

Sources d'eau	Paramètres	Normes directives européennes	Résultats obtenus		Qualité de l'eau
			Phase I	Phase II	
Puits	Température	25	35 (28.4 – 40.7)	56 (27.9 – 32.4)	Eaux chaudes
	PH	6.5 - 9	02 (6.9 – 7.4.) 33 (5.4 – 6.9)	Le pH-mètre est défectueux et subséquemment aucune mesure n'a été réalisée	La quasi totalité des eaux sont acides
	Turbidité	< 5	17 (< 5) 18 (8 – 400)	28 (< 5) 28 (10- 150)	
	Conductivité	400	33 (< 400) (33 - 174) 02 (> 400) (855 - 889)	56 (< 400) (31 - 276) 00 (> 400)	
Forage rural	Température	25	25 (28.4 – 40.7)	09 (27.5 – 32.5)	Eaux chaudes
	PH	6,5-9	13 (4.8 – 6.2) 12 (6.5 - 7.4)	Le pH-mètre est défectueux et subséquemment aucune mesure n'a été réalisée	Parfois acide
	Turbidité	< 5 NTU	22 (< 5) 03 (10 – 95)	05 (< 5) 04 (15 – 50)	Eaux limpides
	Conductivité	400	17 (< 400) (24 - 371) 08 (> 400) (452 – 1466)	08 (< 400) (46 - 332) 01 (> 400) (693)	Les deux tiers des eaux moyennement minéralisées
Pompe manuelle	Température	25	11 (28.6 – 36.3)	04 (29.8. – 32.6)	
	PH	6,5-9	03 (5.1 – 5.9) 08 (6.5 – 7.4)	Le pH-mètre est défectueux et subséquemment aucune mesure n'a été réalisée	eau acide
	Turbidité	<5	10 (< 5) 01 (45)	03 (< 5) 01 (10)	
	Conductivité	400	03 (< 400) (45 - 162) 08 (> 400) (448 - 915)	04 (< 400) (96 - 368) 00 (> 400) (00)	Eaux fortement minéralisées
	Chlore total		0,1 0,1	0,1 0,1	

Tableau 3 : Résultats des analyses des eaux des puits des villages du projet GWI

Paramètre des puits	Temp (°C)	Chlorures (mg/l)	Fluor (mg/l)	Nitrates (mg/l)	Coliformes fécaux
1) Sitacourou Sara	28,5	9	0	10,7	+++
2) Saré Walom	28	11	0	13,5	0
3) Thiara Oumar Diao	28,5	19	Traces	26,5	+++
4) Sinthiou Bocar Diallo	30	9	Traces	8,1	+++
5) Thiangaly	31	12	Traces	20	++
6) Ngassing Peulh	30,5	9	0,03	3,2	+++
7) Sinthiou Diecka	31	8	0,03	1,4	+++
8) Sinthiou Sibacouda	31	18	0,04	76	26
9) Diallassaba	31	5	0,06	2,8	12
10) Tomborong	30	10	0,04	3,5	+++
11) Gangady	29	17	0,12	9	+++
12) Madina Wouly	29	9	0,01	14,5	29
13) Saré Mody Diallo	29	9	0,04	11,4	+++
14) Tinkoly Gawlel	29	7	0,03	7,7	+++
15) Sankabary Manding	26	13	0,09	11	+++
16) Véingara Dioute Diallo	30	13	0,04	22,5	+++
17) Katop	30	14	0,05	20,5	+++
18) Ngolol Manding	29	17	0,04	15,7	62
19) Samba Diouka	30	6	0,04	0,6	50
20) Sinthiou Ngaba Bâ	29,5	10	0,05	13,4	+++
21) Saré Datty Thiacké	30	7	0,03	2,6	++
22) Saré Bamol	30	7	0,04	0,3	18
23) Samba Khorédia Wolof	29,5	9	0,07	16,5	+++
24) Seworocoto Peulh	28	10	0,14	8,6	+++
25) Saré Sidy	29	7	0,07	6,9	+++
26) Saré Niana	29,5	7	Traces	9,1	+++
27) Temassou	30	7	0,01	0,9	+++
28) Boba Manding	30	6	Traces	2	+++
29) Sinthiou Ndioba SANE	30	7	Traces	0,5	102
30) Kanapé Peulh	29,5	11	0,1	2,4	+++
Normes	—	250	1,5	50	0cf/100ml
Légende :					
+ : peu pollué					
++ : assez pollué					
+++ : pollution importante					