

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Ecole Doctorale « Eau, Qualité et Usages de l'Eau »
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Hydrogéologie

Année académique : 2015-2016 N° d'ordre : xxxx

Présentée par :

Ibrahima MALL

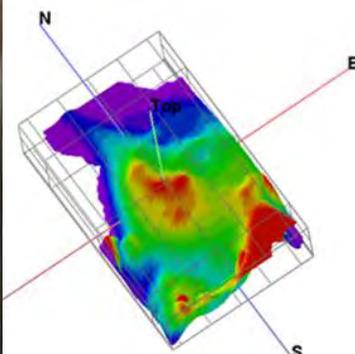
Titre

Evaluation des ressources en eau dans le Sénégal oriental : Apports des outils Géochimiques, Géostatistiques, de la Télédétection et des SIG

Soutenue publiquement le 28 janvier 2016 devant le jury composé de:

Président	Mr. Cheikh Becaye GAYE	Professeur UCAD
Rapporteur	Mr. Dinna Pathe DIALLO	Maître de conférences UCAD
Rapporteur	Mr. Amadou Zanga TRAORE	Professeur ENI-ABT/Mali
Examineur	Mr. Papa Moussa NDIAYE	Professeur UCAD
Examineur	Mr. Raymond MALOU	Maître de conférences UCAD
Directeur de thèse	Mr. Serigne FAYE	Professeur UCAD
Codirecteur	Mr. Papa Malick NGOM	Professeur UCAD

:



Liste des abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales
ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
ASTER : Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CAH : Classification Ascendante Hiérarchique
CCT : Centre Canadien de Télédétection
CEFIGRE : Centre de Formation International à la Gestion des Ressources en Eau
CGSO : Cartographie géologique du Sénégal oriental
CIRC : Centre international de Recherche sur le Cancer
CLP : Classification Labelling and Packaging
CSE : Centre de Suivi Ecologique
DMG : Direction des Mine et de la Géologie
ETM : Eléments traces métalliques
ETM⁺ : Enhanced Thematic Mapper
ETP : Evapotranspiration Potentielle
ETR : Evapotranspiration Réelle
FIT : Front Intertropical
GPS : Global Positioning System
ICP-MS : Inductively Coupled Plasma Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
IREF : Inspection Régionale des eaux et forêts
MTZ : Main transcurrent Zone
NDVI : Normalized difference vegetation index
OJVG : d'Oromin Joint-Venture
ONG : Organisation non gouvernementale
PASMI : Projet d'Appui au Secteur Minier
RFU : Réserve Facilement Utilisable
RU : Réserve Utile
SDT : Stratégie de Développement de Teranga
SIG : Systèmes d'Informations Géographiques
SPOT : Satellite pour l'Observation de la Terre
SRSD : Service Régional de la Statistique et de la Démographie
SDT : Stratégie de Développement de Téranga
SRTM : Shuttle Radar Topography Mission
UNEP : United Nation Environment Protection
US EPA, United States Environment Protection Agency
USAID : United States Agency for International Development
WGS : World Geodesic System

AVANT-PROPOS

Ce travail est le fruit de plusieurs années de recherche passées dans le département de géologie de l'UCAD, je tiens tout d'abord à remercier tous ceux qui ont contribué par leurs enseignements, leur appui et leur amitié à l'élaboration de ce travail.

*Je remercie très sincèrement le **Professeur Serigne Faye** qui a initié et encadré de la confiance qu'il m'a toujours accordée depuis mon D.E.A, mais des efforts personnels et l'appui financier qu'il a eu à mobiliser pour l'aboutissement de cette thèse. Je tiens à le dire parce qu'il a personnellement financé mes campagnes de terrains et les frais analytiques. C'était certes très difficile à un moment du parcours, mais je savais que c'était un défi que nous devions relever ensemble et le résultat est là aujourd'hui. Merci pour tout professeur.*

*Également, mes remerciements vont à l'endroit du **Professeur Papa Malick NGOM** qui a aussi encadré ce travail. Il reste et restera pour moi une référence de tous les jours, sa sagesse et son ouverture d'esprit m'ont toujours fascinées. Il a guidé mes pas dans la connaissance de la géologie du Sénégal oriental depuis le D.E.A. Il nous a accompagné sur le terrain, je me souviens encore du cours que vous nous aviez fait sur les QFP dans le camp de Oromin. Je tiens ici à rendre un hommage à l'homme de sciences par sa rigueur et vous dis merci pour tout car les mots me manquent pour exprimer toute ma reconnaissance envers vous.*

*Le **Professeur Cheikh Bécaye GAYE** m'a initié à l'hydrochimie et à la géochimie isotopique. Malgré vos lourdes charges administratives en tant que directeur général de la recherche au Sénégal, vous avez accepté de juger ce travail et de présider mon jury de thèse. J'ai beaucoup appris à vos côtés, car très tôt vous m'avez accordé votre confiance en m'impliquant dans un projet mondial d'évaluation des aquifères transfrontaliers (TWAP) ce qui m'a permis de développer mes compétences et mes connaissances dans ce domaine. Je n'oublie pas non plus ce séjour agréable passé ensemble au Mali dans le cadre d'une formation que l'UNESCO avait organisé sur la recharge des aquifères et dont vous étiez le facilitateur principal.*

*Je remercie le **Dr Dinna Pathé DIALLO** d'avoir bien voulu être rapporteur de ce manuscrit. Tâche relativement difficile, car nécessitant beaucoup de temps de lecture et de correction. Vu votre*

expérience du Sénégal oriental, vos suggestions et corrections nous ont été très utiles dans la rédaction du document final.

*Je suis très reconnaissant du Professeur **Amadou Zanga TRAORE de l'ENI-ABT** du Mali par sa qualité de rapporteur de ce manuscrit. Il a su apporter une contribution significative dans l'amélioration du document final. J'ai eu la chance de le côtoyer à travers le TWAP, mais également à Bamako et il a toujours montré une grande générosité dans sa connaissance exhaustive de l'hydrogéologie dans le Sahel. Que Dieu vous donne la force à mener encore à main de maître vos responsabilités administratives.*

*Je remercie le **Dr Raymond MALOU**, chef de département de Géologie, un maître qui nous a enseigné et fait aimer l'hydrologie. Malgré vos tâches administratives, vous avez accepté de juger ce travail. C'est un honneur pour moi de vous avoir comme membre de mon jury de thèse.*

*Je remercie le **Papa Professeur Moussa NDIAYE** enseignant au département de géologie que j'ai eu la chance de côtoyer un mois durant sur les terrains du Sénégal oriental de Guémédji à Diawara dans le cadre du PASMI. Je suis très reconnaissant de votre apport et appui scientifique que vous nous avez procuré durant cette mission de reconnaissance hydrogéologique. Je suis honoré que vous ayez accepté de juger ce travail.*

*Je suis particulièrement reconnaissant à un ami, un frère, un conseiller le **Dr Moctar DIAW** qui a toujours manifesté une grande générosité à mon égard. Il a été d'un grand apport dans l'interprétation de mes résultats. Sa passion pour l'hydrochimie a toujours alimenté nos débats au bureau. Il a toujours su rester l'ami fidèle et un compagnon dans les instants heureux comme pendant les moments difficiles. Merci pour tout.*

***Dr Hélène Diakher Madioune** pour sa générosité et ses encouragements sans limites. Elle a su partager avec moi ses connaissances dans le domaine des SIG et également apporter des corrections dans le manuscrit.*

*Pensées affectueuses à deux personnes qui me sont très chères : le **Dr Marthe Diouf et Abibatou Camara**. Vous avez toujours été là à me soutenir et j'avoue que parfois j'en avais vraiment besoin. Merci pour tout.*

Je voudrais encore remercier le **Dr Seyni Sané** pour m'avoir aidé à me familiariser avec le logiciel statistique R qui m'a été très utile et même indispensable dans les traitements de mes données.

Dr Mame Samba MBAYE, Chef de Département de Biologie végétale de la confiance qu'il a toujours eue à mon égard en me confiant les cours de SIG et de Télédétection pour les Masters I et II Tabec.

Le professeur **Robert Moritz** de l'université de Genève et **Dr Birane Niane** avec qui nous avons eu à mener deux missions conjointes dans le cadre de nos thèses. Je me souviens des moments parfois critiques que nous avons ensemble passés sur le terrain. Merci du partage.

J'ai bénéficié de l'appui du Centre de suivi écologique (CSE) à travers un stage de 4 mois. Par ces quelques mots, je dis merci à la direction du CSE et particulièrement mon maître de stage **Mr Ousmane Bocoum** qui m'a initié au traitement d'image et le **Dr Moussa SALL** géographe environnementaliste.

Je n'oublie pas non plus la Direction des mines et de la géologie (DMG) et toutes les sociétés minières qui ont facilité nos séjours sur le terrain particulièrement ; la société **Randgold resources** avec à sa tête **Mr David Mbaye** et la société **Ormin**. Vous nous avez tout le temps réservé un accueil chaleureux dans un environnement très cordial et convivial. Merci pour tout.

À **Mme DIAW** de l'accueil qu'elle m'a toujours réservé chez elle, du soutien et du réconfort moral dont elle a toujours manifesté à mon égard.

Aux Enseignants du Département de Géologie je veux nommer les Dr Fatou Diop Ngom, Dr Seynabou Cissé Faye, Dr Abdoul Khadre Fofana, Dr Abdoul Kader Bâ, le Dr Samba Cissokho, le Dr Moussa Dabo, le Mr Famara Diatta, le Dr Mathias Diedhiou, le Dr Ousmane Coly Diouf, Dr Abdoulaye Ndour, Dr Ada Ndiaye, Mr Adrien Gozo, Dr Abdoulaye Ndiaye, pour leur sympathie et générosité à mon égard.

À mes plus que frères Saliou Faye, Issa Ndoye, Ousmane Ndiaye, Alhamdou, Mansour, El Hadji Malick, Nassirou, Babacar, Hamidou Gueye, Mignane, Déthié Sarr qui m'ont toujours soutenu moralement.

À tout le personnel technique et administratif du département de géologie particulièrement Mr Moussa Sow et Adja qui ont réalisé toutes mes analyses d'eau concernant les éléments majeurs et Mr Babacar Diop que je remercie pour ses encouragements et pour sa sympathie de tous les jours. Je n'oublie pas non plus les secrétaires Aminata et Maguette, je les ai souvent sollicitées et elles m'ont toujours rendu service.

À mes collègues et doctorants (Ndèye Maguette Dieng, Mariama Kaba, Banna Tabaski Sambou, Bator Sène, Nafi Racine Sow, Lamine, Abacar, Terrence, Huguette,) des relations fraternelles et une collaboration très sincère qu'on a eues à entreprendre tout au long de notre parcours. Que Dieu vous donne les moyens et la force de terminer vos travaux dans de très bonnes conditions.

Cependant, je n'oublierai jamais mes compagnons de route avec lesquels j'ai eu à accumuler beaucoup de souvenirs du terrain dans une ambiance conviviale et très relaxe. À toi Momadou Konté Djoliba « l'Homme de Mouran » à Tidjane Diabaté « Tidjani merci beaucoup » à Salif Gueye l'infatigable à Matar Cissokho sans oublié nos guides à Sabodala.

Je réserve cependant, une place de choix à mes parents et toute ma famille auxquels je dois tout. C'est à eux que je dédie ce mémoire.

Merci à tous.

Table des matières

TITRE	
RESUME	XIII
INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES SUR LA REGION DE SOCLE DU SENEGAL ORIENTAL	I
CHAPITRE I : CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DE LA REGION DE SOCLE DU SENEGAL ORIENTAL	4
I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	4
I.2. POPULATION ET ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES.....	5
I.3.1. EXPLOITATION ARTISANALE (ORPAILLAGE).....	7
I.4. GÉOMORPHOLOGIE.....	7
I.4.1. LE RELIEF.....	7
I.4.2. LES PENTES.....	9
I.4.3. LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE.....	10
I.5. LA VÉGÉTATION.....	12
I.6. LA FAUNE.....	14
I.7. CONCLUSION.....	14
CHAPITRE II CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE	15
II.1 PRÉSENTATION DU CRATON OUEST-AFRICAIN.....	15
II.2. DESCRIPTION GÉNÉRALE DE LA BOUTONNIÈRE DE KÉDOUGOU-KÉNIÉBA.....	16
II.2.1. LES FORMATIONS BIRIMIENNES.....	19
II.2.1.1. LES GRANITISATIONS.....	20
II.2.2. TERRAINS DU SUPERGROUPE DES MAURITANIDES.....	22
II.3. LA TECTONIQUE.....	27
II.4. LES ALTÉRITES.....	28
II.4.1. ALTÉRITES SUR LES ROCHES VOLCANIQUES BASIQUES.....	28
II.4.2. ALTÉRITES SUR LES TERRAINS GRANITIQUES.....	30
II.5. LES SOLS.....	30
II.6. CONCLUSION.....	31
CHAPITRE III. APERÇU SUR L'HYDROGEOLOGIE EN ZONE DE SOCLE	33
INTRODUCTION.....	33
III. 1. LES AQUIFÈRES DU SOCLE CRISTALLIN ET DU SÉDIMENTAIRE ANCIEN.....	33
III. 1.1. DESCRIPTION DES RÉSERVOIRS :.....	33
III. 1.1.1. RÉSERVOIR SUPÉRIEUR D'ALTÉRITES :.....	33
III. 1.1.2. RÉSERVOIRS INFÉRIEURS.....	35
III. 1.1.2.1 LES RÉSERVOIRS DE FISSURES :.....	35
III. 1.1.2.2 LES RÉSERVOIRS DE FAILLES OU DE FRACTURES MAJEURES.....	36
III.2. LES DÉPÔTS ALLUVIAUX.....	37
III.3. SÉDIMENTS CONSOLIDÉS.....	38
III.4. LES GRÈS.....	38
III.5. SCHISTES ET SILTITES.....	39
III.6. CONCLUSION.....	41
CHAPITRE IV : ETUDE DES PARAMETRES CLIMATIQUES ET LEURS IMPACTS SUR LES RESSOURCES EN EAU.	40
IV.1. GÉNÉRALITÉS SUR LE CLIMAT DE LA RÉGION.....	40
IV.2. LA PLUVIOMÉTRIE.....	42
IV.3. LA TEMPÉRATURE.....	44
IV.4. L'HUMIDITÉ RELATIVE.....	44
IV.5. L'ÉVAPORATION.....	45
IV.6. CALCUL DU BILAN HYDROLOGIQUE.....	46
IV.7 CONCLUSION :.....	51

DEUXIÈME PARTIE : EVALUATION QUANTITATIVE DES RESSOURCES EN EAU DANS LES TERRAINS BIRIMIENS DU SENEGAL ORIENTAL	II
CHAPITRE V : EVALUATION QUANTITATIVE DES RESSOURCE EN EAU DANS LE BIRIMIEN	53
V.1 GÉNÉRALITÉ SUR LA TÉLÉDÉTECTION ET DES SIG	53
V.1.1. DÉFINITION	53
V.1.2. PRINCIPE DE LA TÉLÉDÉTECTION.....	54
V.1.3. LES CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES	56
V.2.LE RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE	57
V.2.1. LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE.....	57
V.2.2. LES BANDES SPECTRALES :	58
V.2.3. LA RÉOLUTION SPATIALE (TAILLE DU PIXEL):	59
V.2.4 RÉOLUTION SPECTRALE.....	60
V.2.5. RÉOLUTION TEMPORELLE	61
V.2.6. RÉOLUTION RADIOMÉTRIQUE.....	62
V.3. LE SIG (SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE)	63
V.4. LES AVANTAGES DES OUTILS SIG	64
V.6. PERTINENCE DES OUTILS TÉLÉDÉTECTION ET SIG DANS L'ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU	65
V.7. DONNÉES SATELLITAIRES	66
V.7.1 DESCRIPTION DES DONNÉES SATELLITAIRES	67
V.7.2. LES IMAGES MAGNÉTIQUES	67
V.7.3. LE TRAITEMENT DES DONNÉES	69
V.7.3.1. LES PRÉTRAITEMENTS DES IMAGES	69
V.7.3.2. LE GÉO-RÉFÉRENCIEMENT DES IMAGES	69
V.7.3.3. CORRECTIONS GÉOMÉTRIQUES	70
V.8. LE TRAITEMENT DES IMAGES LANDSAT ET ASTER.....	70
V.8.1. LES FILTRAGES LAPLACIENS ET DIRECTIONNELS SOBEL.....	70
V.8.1.1. FILTRES LAPLACIENS DE REHAUSSEMENT DES CONTOURS	71
V.8.1.2. FILTRES DIRECTIONNELS DE TYPE SOBEL.....	71
V.8.2. CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL.....	73
V.8.3. CALCUL D'INDICE (NDVI)	75
V.8.4. EXTRACTION DU RELIEF ET DES PENTES.....	76
V.8.5. EXTRACTION DU RÉSEAU DE DRAINAGE.....	76
V.8. 6 ANALYSE MULTICRITÈRE	78
PREMIERE METHODE : EVALUATION QUANTITATIVE DES RESSOURCES EN EAU DANS LE BIRIMIEN DU SENEGAL ORIENTAL PAR APPROCHE COMBINEE DES TECHNIQUES SIG ET DE LA TELEDETECTION.....	79
V.9. INTRODUCTION	79
V.10. MÉTHODES ET OUTILS.....	81
V.11. LES DONNÉES	82
V.11.1. LA PLUVIOMÉTRIE.....	82
V.11.2. GÉOLOGIE	83
V.11.3. LINÉAMENTS.....	85
V.11.4. LES PENTES	88
V.11.5. LE RÉSEAU DE DRAINAGE.....	89
V.12. RESULTATS ET DISCUSSION	92
V.13. CONCLUSION	96
DEUXIEME METHODE : EVALUATION DES POTENTIALITES AQUIFERE PAR ANALYSE MULTICRITERE SIG INTEGRANT LES PARAMETRES INTRINSEQUES DE LA MATRICE AQUIFERE ET DE LA PLUVIOMETRIE.....	97
V.14. INTRODUCTION	97
V.15. MÉTHODOLOGIE.....	97
V.16. RÉSULTATS	102
V.16.1. REPRÉSENTATION DE L'INCERTITUDE ET LIMITE DE LA MÉTHODE	110
V.17. CONCLUSION.....	113
TROISIEME PARTIE : EVALUATION QUALITATIVE DES RESSOURCES EN EAU DANS LES TERRAINS BIRIMIEN DU SENEGAL ORIENTAL ;.....	III

CHAPITRE VI : HYDROCHIMIE DES EAUX DANS LES TERRAINS BIRIMIEN DU SENEGAL ORIENTAL	114
VI.1. INTRODUCTION	114
VI.2. ETUDE DES PROCESSUS GÉOCHIMIQUES PAR LES MÉTHODES HYDROCHIMIQUES CLASSIQUES (DIAGRAMMES BINAIRES, DIAGRAMME DE GIBBS ET INDICES DE SATURATION)	116
VI.2.1. LE DIAGRAMME DE PIPER	116
VI.2.2. DIAGRAMMES BINAIRES	121
VI.2.2.1. L'ALTÉRATION DES SILICATES	121
VI.2.2.2. DIAGRAMMES DE GIBBS	124
VI.2.2.3. LES ÉCHANGES DE BASE	126
VI.3. APPROCHE THERMODYNAMIQUE : LES INDICES DE SATURATION	129
VI.3. LES NITRATES	132
VI.4. LES ÉLÉMENTS TRACES	136
VI.4.1. LE CONTRÔLE GÉOCHIMIQUE DE L'OCCURRENCE DES ÉLÉMENTS TRACES	136
VI.4.1.1. SPÉCIATION	136
VI.4.1.2. RELATION AVEC LE POTENTIEL REDOX	137
VI.4.1.3. EN FONCTION DE LA SAISON	138
VI.5. ETUDE DES PROCESSUS GÉOCHIMIQUES PAR LES MÉTHODES STATISTIQUES (ANALYSE MULTIVARIÉE (ACP) ET CLASSIFICATION HIÉRARCHIQUE (CHA)	142
VI.5.1. DESCRIPTION ET PERTINENCE DES MÉTHODES STATISTIQUES EN HYDROCHIMIE	142
VI.5.2. MATÉRIELS ET MÉTHODES	143
VI.5.3. RESULTATS ET DISCUSSION	146
VI.5.3.1. PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES	146
VI.5.3.2. <i>Hydrochimie des ions majeurs et processus géochimiques par approche géostatistique</i>	147
VI.5.3.3. <i>Hydrochimie des éléments traces et processus géochimiques par approche géostatistique</i> :	155
VI.6. <i>Conclusion</i>	162
CHAPITRE VII : POLLUTION DES EAUX DU SENEGAL ORIENTAL PAR LES ACTIVITES D'ORPAILLAGE	164
VII.1. INTRODUCTION	164
VII.2. LES GISEMENTS D'OR DU SÉNÉGAL ORIENTAL	165
VII.2.1. LES GISEMENTS PRIMAIRES	165
VII.2.2. LES GISEMENTS ÉLUVIONNAIRES	166
VII.2.3. LES GISEMENTS ALLUVIONNAIRES	167
VII.3. GÉNÉRALITÉ SUR MERCURE ET L'ARSENIC	167
VII.3.1. LE MERCURE	167
VII.3.1.1. GÉNÉRALITÉS – PRINCIPALES UTILISATIONS – CLASSIFICATION	167
VII.3.1.2. TOXICOCINÉTIQUE DU MERCURE	168
VII.3.1.3. TOXICITÉ AIGUË	169
VII.3.1.4. TOXICITÉ CHRONIQUE	170
VII.3.1.5. L'UTILISATION DU MERCURE DANS L'ASGM	170
VII.3.1.6. L'EXPOSITION AU MERCURE DANS L'ORPAILLAGE	172
VII.3.2. L'ARSENIC	175
VII.3.2.1. Sources liées aux mines	176
VII.3.2.2. Sources naturelles	176
VII.4. Toxicocinétique	178
VII.4.1. Toxicité aiguë de l'Arsenic	178
VII.4.2. Toxicité chronique de l'Arsenic	178
VII.5. Méthodologie	180
VII.6. Résultats et discussion	181
VII.6.1. Le Mercure	181
VII.6.2. L'Arsenic	186
VII.7. CONCLUSION	190
CONCLUSION GENERALE	192
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	197

Liste des figures

Figure 1 Carte de situation de la zone d'étude	4
Figure 2. Répartition des altitudes du Sénégal oriental (SRTM)	9
Figure 3. Répartition des pentes au Sénégal oriental (SRTM)	10
Figure 4. Réseau hydrographique et morphologie des terrains du Sénégal oriental.....	11
Figure 5. Principaux bassins versants du Sénégal oriental extraits à partir de l'image SRTM	12
Figure 6. Schéma géologique des principaux domaines du craton ouest-africain (Bessole, 1977).....	16
Figure 7. Carte géologique de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba (Bassot 1966)	17
Figure 8. Grandes entités géologiques du Sénégal oriental (Théveniaut et al., 2010)	18
Figure 9. Distinction cartographique de la chaîne des Mauritanides et de son avant-pays, en domaines autochtone (jaune), parautochtone (vert) et allochtone (bleu) (Théveniaut et al., 2010).	23
Figure 10. Coupe schématique des terrains selon la ligne des puits 141 à 150 (Blot, 1980)	30
Figure 11. Coupe schématique des puits KN13 à KN15 (Blot, 1980).....	31
Figure 12. Coupe schématique des formations aquifères en région granitique (Guiraud, 1975)	34
Figure 13. Coupe schématique de la tranche d'altération superficielle en région schisteuse (Guiraud 1975).....	34
Figure 14 Schéma conceptuel moderne d'un système aquifère de socle (Wyns, Lachassagne & al., 2005)	40
Figure 15. Déplacements du Front Intertropical pendant l'année (MICHEL, 1973).	41
Figure 16. Pluviométrie moyenne mensuelle à Kédougou de 1970 à 2009	42
Figure 17. Écarts pluviométriques annuels dans les stations de Kédougou, Tambacounda et Bakel (1970-2009).....	43
Figure 18. Évolution des températures moyennes mensuelles à Bakel, Tambacounda et Kédougou (1970-2009)	44
Figure 19. Évolution de l'humidité relative moyenne mensuelle dans les stations de Bakel, Tambacounda et Kédougou (1970-2009)	45
Figure 20. Évolution de l'évaporation moyenne mensuelle à Bakel, Tambacounda et Kédougou (1970-2009)	45
Figure 21. Principaux paramètres du bilan hydrologique moyen à Kédougou (1970-2009).....	47
Figure 22. Principaux paramètres du bilan hydrologique moyen à Bakel (1970-2009).....	48
Figure 23. Débits moyens mensuels de la Gambie à la station de Kédougou (2001-07) (Source DGPRE).....	50
Figure 24. Cotes moyennes journalières du fleuve Sénégal à la station de Bakel de (2000 à 2011) (Source DGPRE)	50
Figure 25. Profondeur de l'eau par rapport au sol en m de Janvier et Novembre 2011	51
Figure 26. Principe de fonctionnement de la Télédétection optique (passive).....	55
Figure 27. Principe de fonctionnement du Radar (active).....	56
Figure 28. LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE http://e-cours.univ-paris1.fr	57
Figure 29. La résolution spatiale d'un capteur passif	60
Figure 30. Différence dans les signatures spectrales	61
Figure 31. Caractéristiques numériques des images	63
Figure 32. Linéaments structuraux mis en évidence par l'image magnétique	68
Figure 33. Organigrammes et les différentes tâches exécutées pour le traitement des données	69
Figure 34. Filtres Laplaciens	71
Figure 35 Filtres directionnels Sobel	72
Figure 36. Filtre directionnel Sobel E-O qui met en évidence les linéaments N-S.....	72
Figure 37. Filtre directionnel Sobel NO-SE qui met en évidence les linéaments NE-SO	73
Figure 38. Différentes combinaisons de compositions colorées sur l'image Landsat ETM+ (avril 2010) du secteur de Sabodala (Sénégal).....	74
Figure 39. (a) Composition colorée 'vraies couleurs' réalisée à partir des bandes 543, (b) Infrarouge 'fausses couleurs' 432 ETM+ du mois d'Avril 2010 dans le secteur de Sabodala.....	75
Figure 40. Détermination des directions d'écoulement à partir d'image ASTER	77
Figure 41. Détermination des zones d'accumulation et d'écoulement à partir d'image ASTER	78
Figure 42. Carte de situation et occupation du sol.....	80
Figure 43. Distribution des isohyètes dans la zone d'étude (MEPNBRLA, 2009).....	83
Figure 44. Entités hydrogéologiques (Wuilleumier & al 2010).....	85
Figure 45. Rose diagramme de la distribution des linéaments (longueur et nombre).	86
Figure 46. linéaments et densité des linéaments	87
Figure 47. Répartition des pentes dans la zone d'étude.....	88
Figure 48. Le réseau de drainage et la densité de drainage.	89
Figure 49. Organigramme des paramètres intégrés (Pluviométrie, densité de linéament, Géologie, Pente, Densité de drainage) et leur pourcentage de Pondération.	90

Figure 50. Modèle utilisé pour la réalisation de carte de potentialité aquifère des terrains du Birimien du Sénégal Oriental.	91
Figure 51. Carte des potentialités aquifères.....	94
Figure 52. NDVI (Landsat ETM+ image 04/2010).....	95
Figure 53. Analyse en composantes principales intégrant les paramètres qui influencent les débits	99
Figure 54. Organigramme de la méthodologie de l'analyse multicritère dans le SIG	102
Figure 55. Coupes indiquant les variations des différentes lithologies en fonction de terrains et des latitudes ..	104
Figure 56. Carte de potentialité aquifère générée par le SIG	105
Figure 57. Classes de débits superposés sur la carte des potentialités aquifères	106
Figure 58. Pourcentage des classes de potentialités dans la zone d'étude	108
Figure 59. Répartition des débits de forages sur la carte linéamentaire.....	109
Figure 60. Histogramme des effectifs en fonction des classes de débits	111
Figure 61. Répartition des sites échantillonnés en novembre 2011.....	115
Figure 62. Répartition des faciès chimiques des eaux sur diagramme de Piper (Campagne Novembre 2011) ...	116
Figure 63. Répartition des faciès chimique dans la zone d'étude (Novembre 2011)	117
Figure 64 a-b-c-d-e-f. Diagramme binaires (Ca+Mg vs HCO ₃ Ca+Mg vs SO ₄ + HCO ₃ ; Na+K vs TC ; TC vs HCO ₃ Ca+Mg vs TZ ⁺)	122
Figure 65- a-b-c-d. Diagramme binaires (Ca+Mg vs HCO ₃ ; Ca+Mg vs Na+K ; Ca/Mg vs ID).....	124
Figure 66. Diagramme de Gibbs	125
Figure 67. Répartition des eaux sur diagramme de stabilité des eaux du Sénégal oriental	126
Figure 68 diagramme (Na+K)-Cl vs (Ca+Mg)-(HCO ₃ +SO ₄)	127
Figure 69 Indices chloroalcalins	128
Figure 70. Indices de saturation des eaux par rapport au Quartz et à la Calcédoine ; Calcite ; Dolomite ; Aragonite et Halite.	131
Figure 71. Répartition spatiale des concentrations en nitrate	133
Figure 72. Distribution des éléments en fonction des potentiels redox.....	138
Figure 73. Box plot montrant l'évolution des éléments en fonction des saisons	139
Figure 74. Distribution des éléments en fonction de la saison.....	140
Figure 75. Localisation des échantillons des campagnes de Janvier 2011 (a) et JUIN 2014 (b) dans le diagramme de Ficklin.....	141
Figure 76. Carte des unités hydrogéologiques et de localisation des sites échantillonnés	145
Figure 77. Boxplot indiquant la répartition de la composition en ions majeurs des eaux des différents réservoirs échantillonnés. (Vs. = Schistes et Volcano-sédiments ; V B. = Volcaniques basiques ; E S. = Eaux de surface)	151
Figure 78. a-b. Analyse des composantes principales (ACP) des ions majeurs (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Si ⁴⁺)	152
Figure 79 a-b: Différents types d'eau selon le dendrogramme et le diagramme de Piper (Janvier 2011)	153
Figure 80. CAH des différents groupes d'eau issus des différents réservoirs tenant compte de leur composition en ions majeurs (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Si ⁴⁺)	155
Figure 81. Boxplot des éléments traces des différents réservoirs échantillonnés (Gr. = Granites ; S & Vs. = Schistes et Volcano-sédiments ; V B. = Volcaniques basiques ; E S. = Eaux de surface)	158
Figure 82 a-b. Analyse des composantes principales (ACP) des éléments traces (Ni, Cr, Al, Mn, Co, Cd, Fe, Zn, Pb) des eaux issues des différents réservoirs (les numéros représentent les ouvrages échantillonnés : se référer au tableau 3).	160
Figure 83. CAH des différents groupes d'eau issus des différents réservoirs tenant compte de leur composition en éléments traces (Ni, Cr, Al, Mn, Co, Cd, Fe, Zn, Pb)	161
Figure 84. Distribution globale des émissions anthropiques du mercure dans l'air en 2010 (UNEP, 2013).	168
Figure 85. Les voies d'expositions potentielles dans le cycle géochimique terrestre pouvant provenir d'une grande variété de sources naturelles ou anthropiques (Plumlee, 2003).	169
Figure 86. Vue généralisée de la biogéochimie du mercure dans les environnements aquatiques. Les processus dominants sont étiquetés (Hudson et al., 1994)	171
Figure 87. Procédés de traitement du minerai dans l'orpaillage et l'exploitation minière à petite échelle (photo Mall).....	174
Figure 88. Spéciation des différentes espèces d'arsenic en fonction du pH (INERIS, 2006)	175
Figure 89 Répartition des teneurs en mercure dans les sites d'orpaillage (Juin 2014)	182
Figure 90. Boxplot indiquant la distribution des concentrations en mercure par village [µg/L] (Juin 2014).....	185
Figure 91. Répartition des teneurs en Arsenic dans les sites d'orpaillage (Juin 2014).....	186
Figure 92. Boxplot indiquant la distribution des concentrations en Arsenic par village [µg/L] (Juin 2014)	189

Figure 93. Distribution des concentrations en As et Hg dans les zones orpaillées (Juin 2014) 190

Liste des tableaux

Tableau 1. Moyenne pluviométrique décennale au niveau des stations de Bakel Tambacounda et Kédougou	43
Tableau 2. Bilan hydrologique à la station de Kédougou	47
Tableau 3. Tableau. Bilan hydrologique à la station de Bakel.....	48
Tableau 4. Caractéristiques des satellites Landsat et TERRA et de leurs images dérivées	67
Tableau 5. Paramètres d'acquisition des images magnétiques	68
Tableau 6. Différentes combinaisons de bandes et leur intérêt en cartographie.....	74
Tableau 7. Grille d'identification et d'interprétation des principaux types de surface pour chacune des combinaisons des figures ci-dessus	74
Tableau 7. Classification des facteurs impliqués dans la mise en place de réserve d'eau souterraine et leur pourcentage d'influence (Al Saoud, 2010 modifié).	90
Tableau 9. Contribution des axes factoriels.....	99
Tableau 10. Résultats du modèle de régression	100
Tableau 11. Classification des facteurs impliqués dans la mise en place de réserve d'eau souterraine et leur pourcentage d'influence.	101
Tableau 12. Statistique des superficies des classes de potentialités	107
Tableau 13. Fréquence de correspondance des classes de débits avec les différentes prédictions	111
Tableau 14. Matrice d'erreur.....	111
Tableau 15. Chimie des eaux Campagne Novembre 2011.	118
Tableau 16. statistiques sur les concentrations en NO ₃ des différents réservoirs (novembre, 2011)	135
Tableau 10. Statistique des paramètres physico-chimique (CE, pH, T°C, O ₂ , Eh).....	147
Tableau 11. Chimie et minéralogie des types de roches représentatives des milieux cristallins (<i>analyses normalisées à 100%, y compris MnO, P₂O₅, l'eau libre, les oxydes sont en% en poids</i>).	147
Tableau 12. Statistique sur les teneurs ions majeurs des eaux au niveau des différents réservoirs [mg.L ⁻¹]......	150
Tableau 13. Composition chimique des eaux en éléments majeurs [mg/L]	150
Tableau 14. Statistique sur les teneurs en éléments traces des eaux au niveau des différents réservoirs	157
Tableau 15. Composition chimique des eaux en éléments traces [µg. L ⁻¹] et la déviation standard en % par rapport à la répétabilité des mesures.....	159
Tableau 23. Concentration en métaux et métalloïdes définissant les limites de qualité d'une eau potable (Législation Française, OMS) (INERIS, 2006)	179
Tableau 24. Récapitulatif des différents effets de l'exposition chronique à l'As sur la Santé (Mandal et Suzuki, 2002, et Ng et al., 2003)	180
Tableau 25. Concentration de quelques traces dans les eaux (juin 2014)	181
Tableau 26. Statistiques sur les concentrations [µg. L ⁻¹] de mercure par village au Sénégal oriental (Juin 2014)	183
Tableau 27. Statistiques sur les concentrations [µg/L] d'Arsenic par village au Sénégal oriental (Juin 2014)	187

Planches

Photo 1. Usine de traitement et Mine à ciel ouvert de Teranga Gold (MALL, Janvier, 2011).....	6
Photo 2. Végétation clairsemée constituée de plantes épineuses dans la partie Nord vers Bakel	13
Photo 3. Végétation dense dans la partie Sud vers Mako avec la présence de Bambou dans les dépressions (photo Mall).....	13
Photo 4. Affleurement de roche fracturée fissuré vers Gamon	35
Photo 5. Affleurement montrant des fractures conductrices vers Bakel à gauche et une faille à Soréto Sabouciré à droite	37
Photo 6. Affleurement d'alluvions sur la rive gauche de la Gambie à Samékouta et au niveau de Sayansoutou rive gauche de la Falémé	38
Photo 7. Affleurement de grès de la Falémé et des grès rouges du Boundou	39
Photo 8. Schiste vers Sounkounkoun et Schistes altérés vers Gamon	40
Photo 9. Pollution par les déchets solides autour des ouvrages hydrauliques (à gauche enclos du forage de Sounkounkoun et à droite le forage de Bantako).....	134
Photo 10. Site d'exploitation de gisement d'or primaire à Sounkounkoun et à Kérékounda (photo Mall)	166
Photo 11. Site d'exploitation d'or éluvionnaire sur la route de Douta (Photo Moritz 2011).....	166
Photo 12. Site d'exploitation d'or alluvionnaire à Tinkoto et à Sayansoutou (photo Mall)	167
Photo 13. Enfants exposés à des risques de contamination au mercure (photo gauche à Tinkoto et à droite à Bantako).....	172
Photo 14. Le lavage du minerai avec le Trommel et sur placette couverte d'une moquette retenant les pépites d'or encerclées en rouge (photo Mall).	173
Photo 15. Lavage du minerai au niveau de différents points d'eau (photo Mall, 2011).....	185

Résumé

L'objectif de cette thèse est d'améliorer l'état des connaissances sur les ressources en eau du Sénégal oriental. Le travail s'est basé sur deux approches : (1) une évaluation quantitative des potentialités aquifères de terrains cristallins et (2) une approche qualitative basée sur l'évaluation de la qualité des ressources en eau dans cette région soumise à une forte pression de pollution anthropique liée aux activités d'orpaillage. L'évaluation quantitative a été menée en utilisant une approche combinant les outils de télédétection et des SIG. Cette technique a pu montrer une grande efficacité dans l'évaluation des potentialités aquifères dans ces types de terrains. Les résultats générés par les outils SIG comparés aux débits des forages ont montré qu'il y'a une bonne corrélation entre les forages présentant de très bons débits et les zones à très bonne et bonne potentialités identifiées par les résultats du modèle restitué par les SIG. Ces zones sont essentiellement localisées dans la partie sud du bassin versant de la Gambie, le long du fleuve Gambie, sur la MTZ et sur une petite portion du granite de Saraya. Par contre, les zones à potentialité aquifère faible à très faible sont essentiellement observées dans la partie nord de la zone d'étude et sur une bonne partie des granites de Saraya et de Sandikounda Soukouta. Les potentialités modérées sont retrouvées sur tous les types de terrain aussi bien au sud que dans la partie nord de la zone. Les résultats générés par l'analyse multicritère SIG à partir des deux modèles développés dans cette thèse sont concordants et montrent que la partie sud et la MTZ constituent les zones les plus favorables à l'implantation de forage d'eau. Cependant, en ce qui concerne la chimie des eaux, les analyses chimiques réalisées à partir de données collectées pendant 3 campagnes ont montré que les eaux des aquifères de socle sont faiblement minéralisées concernant les éléments majeurs et les eaux sont caractérisées par un faciès HCO₃-Ca-Mg dominant. L'analyse géostatistique multivariée montre deux sources de minéralisation des eaux. Une première source naturelle caractérisée par des eaux à faciès HCO₃-Ca-Mg et HCO₃-Na issues des forages et eaux de surface non polluées et un deuxième groupe caractérisé par des eaux polluées par les nitrates présentant un faciès NO₃-Cl-Na ou NO₃-Cl-Ca-Mg observé essentiellement au niveau des puits villageois captant la nappe d'altérite et certains forages localisés dans la partie nord. Par contre, concernant les ETM, l'analyse géostatistique a montré trois groupes d'eau : les eaux présentant des concentrations en ETM très faibles, proches du fond géochimique naturel, rencontrées au niveau des forages et des eaux de surface; les eaux présentant des valeurs en ETM relativement importantes notamment Al rencontrées dans les zones d'orpaillage et enfin les eaux polluées par le Ni, le Co, le Mn et le Cr observées uniquement au niveau du village de Sabodala. Cependant, la pollution mercurielle affecte tous les puits et forages dans les zones orpaillées avec des teneurs en Hg dissous largement supérieures aux normes OMS (1µg.L⁻¹). L'arsenic est également présent à des concentrations supérieures aux normes à Sambarabougou et à Sounkounkoun. Cette situation provoquée par l'orpaillage incontrôlé et l'usage du mercure par les orpailleurs dans le traitement du minerai d'or par la formation de l'amalgame constitue une menace très sérieuse sur la santé publique dans le Sénégal oriental pouvant affecter toutes les composantes terrestres et aquatiques des écosystèmes.

Mots clés : Eau souterraine ; Télédétection ; SIG ; ETM ; Géostatistique ; socle cristallin ; pollution ; Mercure ; Arsenic.

Abstract

This Thesis aims to improve knowledge on water resources in the southeastern part of the Senegal. This work were based on two approaches: (1) a quantitative assessment of aquifer potential in crystalline rocks and (2) a qualitative approach in assessment of water resources quality under strong anthropogenic pollution pressure from gold mining activities. The quantitative evaluation was conducted using an approach which combines Remote Sensing and GIS tools. This technique showed a good effectiveness in groundwater potential mapping in these kinds of rocks. Results generated by the GIS tools compared to borehole productivities showed that there is a good correlation between high borehole productivities with zones presenting good and very good groundwater potentials identified through results from GIS models. These areas are mainly located in the southern part of the Gambia River watershed, along the Gambia River, on the MTZ and in some areas on the granite of Saraya. Nevertheless, zones with low groundwater potential were observed mainly in the northern part of the study area and largely on granites of Saraya and Sandikounda-Soukouta. Moderate potentials are found on all terrain types as well as in the southern and northern part of the study area. These concurring results generated from multicriteria GIS analysis showed that the south part of the study area and the MTZ constitute the most favorable zones for productive borehole location. However, assessment of water quality based on chemical analysis through data collected during three campaigns showed that in the southeastern of Senegal waters are weakly mineralized regarding major ions and the HCO₃-Ca-Mg is the dominant water type. The multivariate geostatistical analysis showed two majors water mineralization sources: a first one characterized by HCO₃-Ca-Mg and HCO₃-Na from borehole and unpolluted surface water and a second group characterized by NO₃-Cl-Na or NO₃-Cl-Ca-Mg observed mainly in wells which tape the weathered aquifer systems and in some boreholes located in the northern part of the study area. Concerning trace elements, geostatistical analysis showed three water groups: waters with very low trace element contents that indicate the natural geochemical background; waters with relatively high trace metal contents such as Al encountered in zones affected by traditional gold mining activities; and polluted waters by Ni, Co, Mn and Cr observed only in Sabodala village. However, mercury contamination affects wells and boreholes in traditional gold mining area with dissolved mercury contents which exceed largely the WHO guidelines (1µg.L⁻¹). Arsenic is also present in concentrations exceeding the WHO guideline for drinking water at Sambarabougou and Sounkounkoun villages. This situation provoked by uncontrolled traditional mining activities and use of mercury by ASGM communities in ore processing by amalgamation, constitute a serious public health problem, which can affect all terrestrial and aquatic ecosystem components in the south eastern Senegal.

Key words: Groundwater; Remote Sensing; GIS; MTE; Geostatistic; crystalline basement; pollution; Mercury; Arsenic.

INTRODUCTION GENERALE

La région naturelle du Sénégal oriental au relief relativement marqué par rapport au reste du pays connaît aujourd'hui une grande attractivité du fait de ses nombreuses ressources minérales, de l'exploration et l'exploitation de ses mines d'or. Cette ruée vers l'or a aujourd'hui favorisé le développement de villages tels que : Sabodala, Tinkoto, Bantako, Diabougou, Sambarabougou pour ne citer que ceux-là qui accueillent un afflux massif de population venant des pays limitrophes et de la sous-région ouest-africaine. Cette situation fait que la demande pour l'approvisionnement en eau potable (AEP) des communautés est plus que prioritaire et reste un défi pour l'état du Sénégal et ses partenaires au développement pour l'atteinte des objectifs du millénaire pour le développement (OMD) transformés en objectifs de développement durable (ODD) après 2015. Dans cette région caractérisée par l'absence de nappe d'eau généralisée et des taux d'échec de forage relativement élevés, les principales ressources en eaux souterraines sont les nappes d'altérites, de fractures et les nappes alluviales à faible extension qui jalonnent les cours d'eau. Ces nappes très peu productives et difficiles à localiser font l'objet d'une grande pression liée à l'activité d'orpaillage qui est aujourd'hui répandue sur toute la région. Cette activité forte consommatrice d'eau impacte sur la qualité et sur la quantité des ressources en eau souterraine du Sénégal oriental dont les réserves sont peu connues. Ce qui n'est pas sans conséquence sur les ressources en eau dans la région. L'hydrogéologie de cette région du Sénégal oriental a seulement fait l'objet de quelques travaux pionniers (Wakermann, 1975, Blot, 1980 ; Travi, 1983 ; Diouf, 1999 ; Mall, 2009 et Wuilleumier, 2010). Ces auteurs ont pour l'essentiel tenté de caractériser l'hydrochimie des eaux en tenant compte de la nature pétrographique des formations géologiques, mais également d'évaluer les potentialités aquifères des terrains cristallins et cristallophylliens. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes focalisés sur les aspects quantitatifs et qualitatifs des ressources en eau du Sénégal oriental. L'objectif premier était de développer un outil pertinent, très peu coûteux permettant de manière rapide de mettre en évidence la présence de zones favorables à l'implantation de forages par l'utilisation combinée des techniques de télédétection et des SIG validées sur le terrain par des données de débits de forages. Cela a nécessité une étude exhaustive des entités hydrogéologiques du Sénégal oriental dans son ensemble. Cet aspect du travail a pu être mené au cours de la campagne régionale d'inventaire des ressources en eau sur l'ensemble des terrains du Sénégal oriental initiée par la direction des mines et de la

géologie (DMG) dans le cadre du projet de cartographie géologique du Sénégal oriental (CGSO) réalisé par le bureau de recherche géologique et minière (BRGM). Ma participation à ce projet comme expert hydrogéologue nous a permis d'orienter et d'affiner notre recherche sur les potentialités aquifères des différentes entités hydrogéologiques du Sénégal oriental dans son ensemble. L'approche méthodologique a consisté à explorer les avantages des outils SIG combinés à la télédétection pour la délimitation des zones favorables à l'implantation de forage dans ce contexte d'aquifère de socle. Ces préoccupations peuvent donner lieu à des questions «scientifiques» complexes, il est donc important de noter que les communautés qui dépendent de ces ressources en eau souterraine vivent dans la pauvreté et l'enclavement et l'accès aux ressources en eau souterraine reste du coup très limité dans certaines zones. A cela s'ajoute la problématique de la qualité des ressources en eau du Sénégal oriental qui subissent les impacts anthropiques liés surtout aux activités d'orpaillage et les risques de contamination des eaux par les éléments traces, mais également par le mercure introduit dans le milieu par les orpailleurs pour le traitement du minerai d'or. Ce manuscrit se focalise donc, au-delà de l'aspect quantitatif de la qualité des ressources en eau du Sénégal oriental en essayant d'apporter des éléments de réponse sur certaines questions à savoir: quelle est la qualité des ressources en eau du Sénégal oriental ? Comment les facteurs naturels et anthropiques affectent-ils la qualité de ces ressources en eau aussi bien souterraine comme de surface, et comment évolue-t-elle dans le temps? Où est-ce que les effets de pollution sont-ils plus prononcés ? En combinant les informations géologiques, les activités anthropiques particulièrement l'orpaillage et les facteurs physiques du milieu, nous avons tenté par une approche pluridisciplinaire intégrant les SIG, la Géostatistique et les méthodes hydrochimiques classiques de comprendre et d'évaluer les processus qui contrôlent la chimie des eaux dans le Birimien du Sénégal oriental. Cette connaissance de la qualité des ressources en eau revêt une importance capitale du fait de ses potentiels effets sur la santé humaine et des organismes aquatiques et les coûts substantiels sur la gestion, la régulation et la conservation des ressources en eau et des sols. Cependant, la compréhension des facteurs environnementaux et régionaux qui affectent la concentration des éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines est un préalable essentiel pour la gestion et la protection de ces ressources ainsi que la santé humaine. Ce travail constitue alors un outil qui aide à la compréhension du public et des scientifiques sur l'état actuel des ressources en eau du Sénégal oriental pour déterminer les caractéristiques naturelles de ces ressources en eau et l'impact des influences anthropiques sur cette ressource. Globalement, cette étude a permis de faire l'état des lieux sur la qualité chimique des eaux dans les différents

réservoirs aquifères du Sénégal oriental, mais également de déceler les types de pollution qui affectent les eaux dans les zones d'orpaillage, souvent très densément peuplées. Cette thèse est divisée en trois parties pour une compréhension plus facile du document.

Une première partie consacrée aux généralités sur la région de socle qui comprend 4 chapitres et une deuxième partie qui correspond à l'évaluation quantitative des ressources en eau dans le Birimien du Sénégal oriental et une troisième partie consacrée à l'évaluation qualitative des ressources en eau qui est subdivisée en deux chapitres.

Le premier chapitre intitulé généralités sur la zone d'étude développe les aspects socio-économiques et géomorphologiques de la zone de socle du Sénégal oriental. Il met en évidence tous les atouts naturels et socio-économiques de la région.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la géologie. Il fait une synthèse globale de la géologie du Sénégal oriental.

Le troisième chapitre porte sur l'hydrogéologie de la zone, mais également aborde les différents concepts d'aquifère en milieu de socle et leur mode de gisement.

Le quatrième chapitre fait état de l'impact des facteurs climatiques dans l'alimentation des nappes de socle. A travers ce chapitre, nous avons tenté de faire le bilan hydrologique à partir des données météorologiques des stations de Tambacounda Kédougou et Bakel sur une période de quarante ans allant de 1970 à 2009.

Le chapitre 5 constitue une des parties majeures de cette thèse portant sur l'évaluation quantitative des ressources en eau dans les terrains birimiens du Sénégal oriental. Cette évaluation est basée sur les techniques combinant les SIG et la télédétection et est axée sur deux approches méthodologiques à partir de l'analyse multicritère par les SIG. Il met en évidence l'apport de ces outils dans la prospection hydrogéologique en milieu de socle.

Le chapitre 6 est consacré à l'étude hydrochimique et fait appel aux techniques hydrochimiques classiques et à la géostatistique, pour évaluer les caractéristiques chimiques des eaux à travers les différentes formations réservoirs des terrains birimiens du Sénégal oriental. Nous avons à travers ce chapitre essayé d'identifier les différents processus impliqués dans l'acquisition de la minéralisation des eaux.

Enfin, le chapitre 7 aborde la problématique de la pollution liée à l'activité d'orpaillage dans la zone. Il se focalise surtout sur la pollution des eaux par rapport au mercure et à l'arsenic au niveau des villages d'orpaillage aidant ainsi à comprendre les différentes sources de contamination et les types de pollution affectant les eaux dans les terrains birimiens du Sénégal oriental sous influence d'une forte pression anthropique.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES SUR LA REGION DE SOCLE DU SENEGAL ORIENTAL

CHAPITRE I : CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DE LA REGION DE SOCLE DU SENEGAL ORIENTAL

I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La zone socle du Sénégal oriental est située dans la partie la plus orientale du Sénégal ; elle coïncide avec les régions administratives de Tambacounda et de Kédougou (Fig.1). Elle est comprise entre les latitudes 12°30 et 15° nord et les Longitudes 11° et 14° ouest. Elle dessine un triangle dont les côtés sont constitués par la frontière sénégalo-guinéenne au sud, la rivière Falémé et le fleuve Sénégal à l'est et au nord et le bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien à l'ouest. Il s'agit de l'une des régions les moins peuplées du pays. Les villes les plus importantes sont la capitale régionale Kédougou, Bakel, Saraya et à un degré moindre, Kéniéba, Kossanto et Salémata.



Figure 1 Carte de situation de la zone d'étude

I.2. Population et activités économiques

Le Sénégal Oriental est caractérisé par une grande diversité ethnique composée des Manding (Soninké, Malinké, Diakhanké, Dialonké et Bambara), les peulhs, extrêmement disséminés à l'intérieur du pays, arrivent à égalité avec les Malinkés vers le Sud. Les Bassaris, les Bédiks et Coniaguais, sont aussi présents à l'ouest de Kédougou dans les villages perchés sur les monts Bassari. La population de la région de Kédougou est estimée en 2013 à 151.357 habitants avec 75,2% de la population qui est rurale et seulement 24,8% urbaine. L'économie de la région repose sur l'agriculture, caractérisée par une relative diversité des cultures (maïs, fonio, arachide, riz, sorgho, sésame, etc.) et la présence de bas-fonds (riziculture) et la culture de décrue. Elle occupe actuellement plus de 70% de la population régionale. Du fait des potentialités agricoles, la région bénéficie de beaucoup de programmes avec l'appui des partenaires financiers et techniques pour la revalorisation de l'agriculture qui constitue un levier important pour sortir la région de la pauvreté (ANSD/SRSD, 2010). Les principales cultures sont : l'arachide, le coton, le mil, le riz, et le maïs. L'élevage qui constitue un secteur florissant est également pratiqué en association avec l'agriculture. Par contre, le secteur industriel qui était à l'état embryonnaire connaît aujourd'hui un essor avec l'implantation des sociétés minières pour l'exploitation et l'exploration des ressources aurifères. Ce qui fait qu'aujourd'hui, l'orpaillage est devenu la principale source de revenus et intègre toutes les couches de la population. Le secteur touristique reste un atout certain pour la région avec le développement du tourisme cynégétique et même de découverte.

I.3. Mine et orpaillage

I.3.1. L'activité minière industrielle

La région de Kédougou recèle un potentiel minier énorme. Durant l'année 2010, les exportations d'or industriel ont atteint 101 milliards 453 millions de FCFA pour une quantité de 8 tonnes contre 85 milliards 403 millions en 2009. En effet, les cours de l'or ont progressé de 29% en se hissant à 1.422,35 dollars l'once. Les réserves minières en or sont estimées à plus de 300 tonnes pour le moment. L'or occupe la quatrième position dans la valeur totale des exportations du Sénégal en 2010, soit 9,9%. Il y'a 20 projets de recherche d'or qui sont exécutés dans la région. En 2010, il y' a eu 15 permis d'exploitation qui ont été octroyés. D'autres réserves de minerais sont trouvées dans la zone et sont estimées comme suit : 800 millions de tonnes de minerais de fer de bonne qualité, 700.000 tonnes prouvées de marbre et 1.067.148 tonnes estimées à Ibel, Ndébou et Bandafassi (ANDS, 2011).

Selon le rapport de la stratégie de développement de Teranga (SDT, 2014) aujourd'hui, Teranga Gold Corporation (Teranga) est la seule compagnie minière canadienne qui exploite la mine d'or de Sabodala. Teranga sollicite actuellement neuf différents permis d'exploration, lesquels couvrent une zone d'environ 1055 km² située autour du territoire d'exploitation actuel de la mine. La Mine d'Or de Sabodala a été construite en 2008 et la première coulée d'Or a eu lieu en mars 2009. C'est la seule grande mine d'or en exploitation au Sénégal. Avec l'achèvement de l'extension de l'usine de traitement à la mi-2012, la capacité de celle-ci a atteint la valeur nominale de 3,5 millions de tonnes de roches par an. Avec l'acquisition réussie d'Oromin Joint-Venture Group, Teranga a largement doublé ses réserves (2,8 millions d'onces) et ses ressources (6,2 millions d'onces). Il existe deux villages et un hameau à l'intérieur de la concession minière. Le village de Sabodala est situé à approximativement deux kilomètres au sud du puits de la mine Sabodala tandis que le village adjacent de Faloumbo et le hameau de Dambankoto se trouvent au nord-est de celui-ci. Aujourd'hui, Teranga est le plus gros employeur de la région. Elle fournit plus de 1.100 emplois directs, employés et contractuels confondus, dont environ 90% sont de nationalité sénégalaise. Par ailleurs, elle embauche 120 personnes supplémentaires comme main d'œuvre temporaire sur une base mensuelle. La récente acquisition de OJVG et une extension de l'usine de traitement ont permis à Teranga de faire passer les niveaux de production à plus de 200.000 onces d'or par an. En tirant parti de l'ensemble de l'usine et de la concession existante, le projet pour cette première phase prévoit de faire passer la production annuelle à 250.000 – 350.000 onces par an. Une deuxième phase de développement pourrait faire passer la production annuelle à 400.000 - 500.000 onces. Cette phase nécessitera une nouvelle extension de l'usine.



Photo 1. Usine de traitement et Mine à ciel ouvert de Teranga Gold (MALL, Janvier, 2011)

I.3.1. Exploitation artisanale (Orpillage)

Outre l'exploitation industrielle, il existe l'orpillage, c'est-à-dire l'exploitation de l'or de façon artisanale. Elle se définit comme toute exploitation dont les activités consistent à extraire et concentrer des substances minérales et à récupérer les produits marchands en utilisant des méthodes et des procédés manuels et traditionnels. Les sites d'exploitation appelés localement « dioura » constituent un véritable fait de société. D'après les estimations du service régional de la statistique et de la démographie (SRSD) de Kédougou, plus de 15.000 personnes s'activent dans l'orpillage qui représente la première source de revenu devant l'agriculture (ANDS, 2011). C'est le secteur le plus dynamique de la région ; il implique 80% de la population locale. Depuis quelques années, l'exploitation a pris des proportions inquiétantes notamment avec l'afflux de ressortissants de la sous-région entraînant ainsi, un développement incontrôlé de l'activité d'orpillage. Cette dernière devient de plus en plus mécanisée avec l'utilisation de détecteurs de métaux, de concasseurs motorisés et de produits chimiques dangereux (le cyanure, le mercure, etc.) pour le traitement du minerai.

I.4. Géomorphologie

I.4.1. Le relief

Le relief du Sénégal oriental est beaucoup plus marqué que celui du reste du pays. La plaine couvre une grande partie de la région étudiée avec des altitudes comprises entre 140 et 240 m (Fig.2). Jusqu'à la 14^{ème} parallèle, les formations géologiques sont masquées par la couverture latéritique cuirassée ou remaniée. Les seuls reliefs importants sont constitués par les collines des Bassarides, et les pointements doléritiques de Baraboye et Ndébou. Au sud, les contreforts du massif du Fouta Djallon jalonnent la frontière sénégal-guinéenne avec des altitudes qui sont comprises entre 340 à 700 m. C'est dans ce secteur que se situe le point culminant du pays à 581 m d'altitude (Mt Sambagalou).

Les plateaux recouverts de latérite sont limités par un escarpement d'une hauteur de 200 m qui domine le socle birimien. De petits massifs, alignés SSO-NNE, dominent ces bas pays. Ils sont constitués de roches du socle ou de coulées volcaniques (sills de dolérites). L'ensemble de ces reliefs est couvert par de la latérite, et des colluvions tandis que les sols se rencontrent plutôt sur les bas versants et les piémonts (Théveniaut et al., 2010).

Le réseau hydrographique a entaillé les cuirasses latéritiques. Cependant, de vastes glacis se sont développés par érosion aréale et se disposent souvent en plusieurs niveaux :

- le haut glacis,
- le moyen glacis ;
- le bas glacis.

Le haut glacis et le moyen glacis se différencient nettement du bas glacis ; ils sont toujours cuirassés et les niveaux indurés par les oxydes de fer affleurent ou ne sont couverts que d'une mince couche de débris ferrugineux associés à des argiles grises. Ces niveaux présentent souvent une texture gravillonnaire ou même conglomératique. Ils contiennent surtout des débris d'anciennes cuirasses, de tailles très variables, quelquefois des fragments de roche notamment, de quartz filoniens et des grès quartzites. Par endroits, le caractère détritique du matériel cimenté est peu apparent en surface, mais s'accroît en profondeur. L'épaisseur et la dureté du revêtement ferrugineux dépendent de divers facteurs : lithologie, topographie locale, position générale. Souvent, le haut glacis connaît une ablation mécanique très importante. La cuirasse « sensu stricto », y est très érodée et le niveau sous-jacent moins compact et plus tendre, appelé carapace, peut apparaître à sa surface. Par contre, le bas glacis, se distingue des glacis les plus anciens surtout par l'absence d'une cuirasse ferrugineuse continue et par la faible épaisseur des formations meubles masquant le substratum rocheux. Des débris de cuirasses et de gravillons ferrugineux s'éparpillent souvent sur des terrains sableux ou sablo-argileux. Ce n'est qu'en quelques rares endroits qu'apparaît en surface un cuirassement local, sous forme de plaques ferrugineuses ou en mince biseau de cuirasse à l'extrémité du glacis. C'est le cas qui a été observé près de Samékouta aux environs de Kédougou (Michel 1973). La carte de répartition des altitudes (Fig.2) montre que la partie sud du Sénégal oriental est caractérisée par un relief marqué dont les altitudes dépassent 500 m sur les terrains sédimentaires du supergroupe de Ségou Madinakouta le long de la frontière Sénégal-Guinéenne. Cependant, dans la partie nord les altitudes diminuent et sont comprises entre 9 et 90 m le long de la Falémé et du fleuve Sénégal. Cette configuration de la géomorphologie des terrains favorise l'écoulement de la Falémé et du Sénégal qui se fait suivant une direction nord-sud. Il existe également un alignement de collines orienté N-S sur l'axe Saraya-Sabodala qui constitue la ligne de crête qui sépare les bassins de la Gambie et de la Falémé. D'autre part, des collines isolées caractérisent le relief de la zone vers Ndébou (Dolérite) et Mako (ultrabasiques) avec des altitudes comprises entre 200 et 300 m.

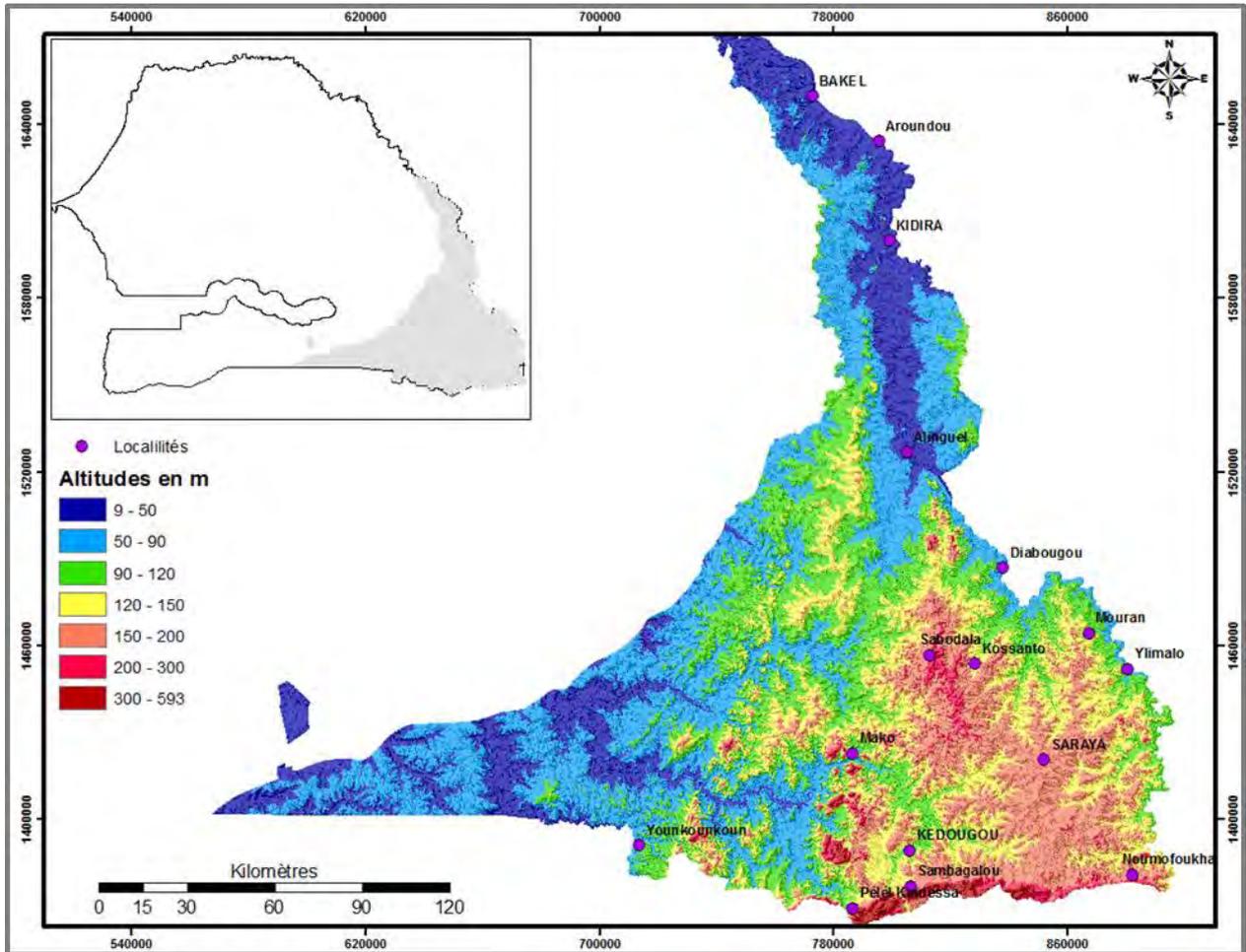


Figure 2. Répartition des altitudes du Sénégal oriental (SRTM)

I.4.2. Les pentes

Dans la zone, les pentes varient entre 0 et 72%. Les pentes sont très marquées dans la partie sud de la région dans les terrains du supergroupe de Ségou Madinakouta qui constituent la frontière avec la Guinée. Les valeurs de pentes dans cette partie peuvent être supérieures à 30%, mais dans l'ensemble les plateaux couvrent l'essentiel de la zone avec de faibles pentes comprises entre 0 et 6%. Les terrains qui bordent la chaîne des Mauritanides peuvent présenter des pentes relativement importantes suivant un alignement NE-SO variant entre 3 et 15% (Fig.3)

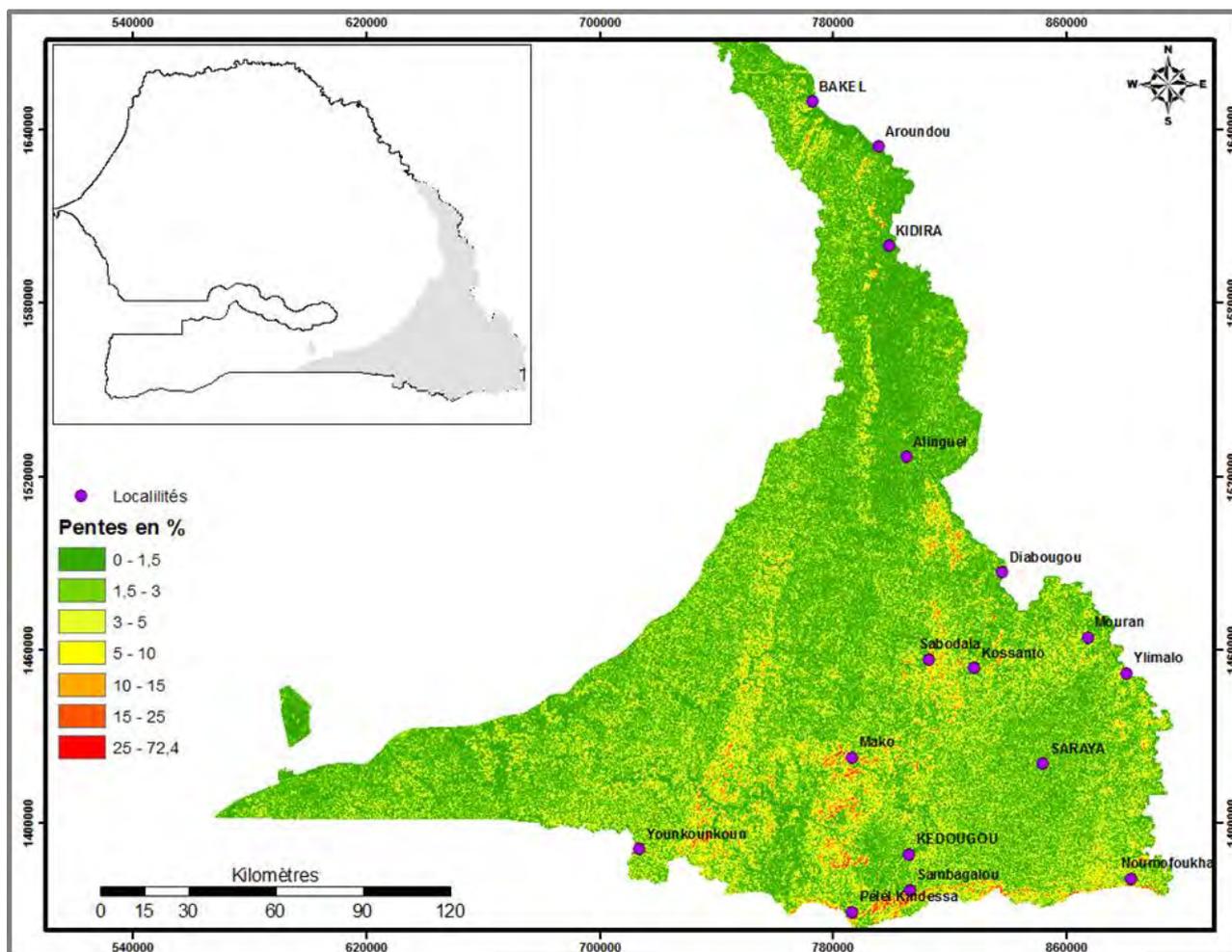


Figure 3. Répartition des pentes au Sénégal oriental (SRTM)

I.4.3. Le réseau hydrographique

Le fleuve Gambie

La Gambie et ses affluents dont les principaux sont le Niokolo-Koba, le Koulountou et le Nieriko, drainent toute la moitié sud du Sénégal Oriental (Fig.4). Leur réseau hydrographique forme un chevelu très dense et très hiérarchisé, indice de la faible perméabilité des terrains (Martin, 1962). Le Niokolo-Koba, le koulountou et le Nieriko tarissent pendant les trois derniers mois de la saison sèche.

La Falémé

Les affluents de son cours supérieur s'enchevêtrent avec ceux de la Gambie et ces derniers, cessent de couler avant la fin de la saison sèche. La Falémé, avec un débit moyen atteignant 900m³/s en septembre à Kidira, se tarit pratiquement pendant les deux derniers mois de la saison sèche (2 et 1 m³/s en avril et mai). Cependant, la plus grande partie de la région est drainée par la Gambie et la Falémé ; la ligne de partage des eaux correspond grossièrement à

l'axe Bambou Saraya. Outre ces deux grandes voies d'eau, il existe un réseau très dense de marigots dont les tracés sont excessivement sinueux.

Le fleuve Sénégal

Les affluents du fleuve Sénégal que sont : Banin-kolé, Gourang-kolé, coulent dans les dépressions sablo-argileuses comprises entre les chaînons de collines quartzitiques (Martin, 1962).

Du fait des variations pluviométriques interannuelles très fortes, les débits moyens varient dans un rapport de 1 à 6 entre l'année la plus humide et la plus sèche (Wuillemiet et al., 2010). C'est ainsi que, les 95% du débit des fleuves Sénégal, Gambie et de la rivière Falémé se concentrent sur une période de cinq mois, généralement de juillet à novembre (Fig.4). Ces cours d'eau majeurs sont liés à un réseau de drainage très dense dont l'architecture dépend étroitement du relief et des types de terrains.

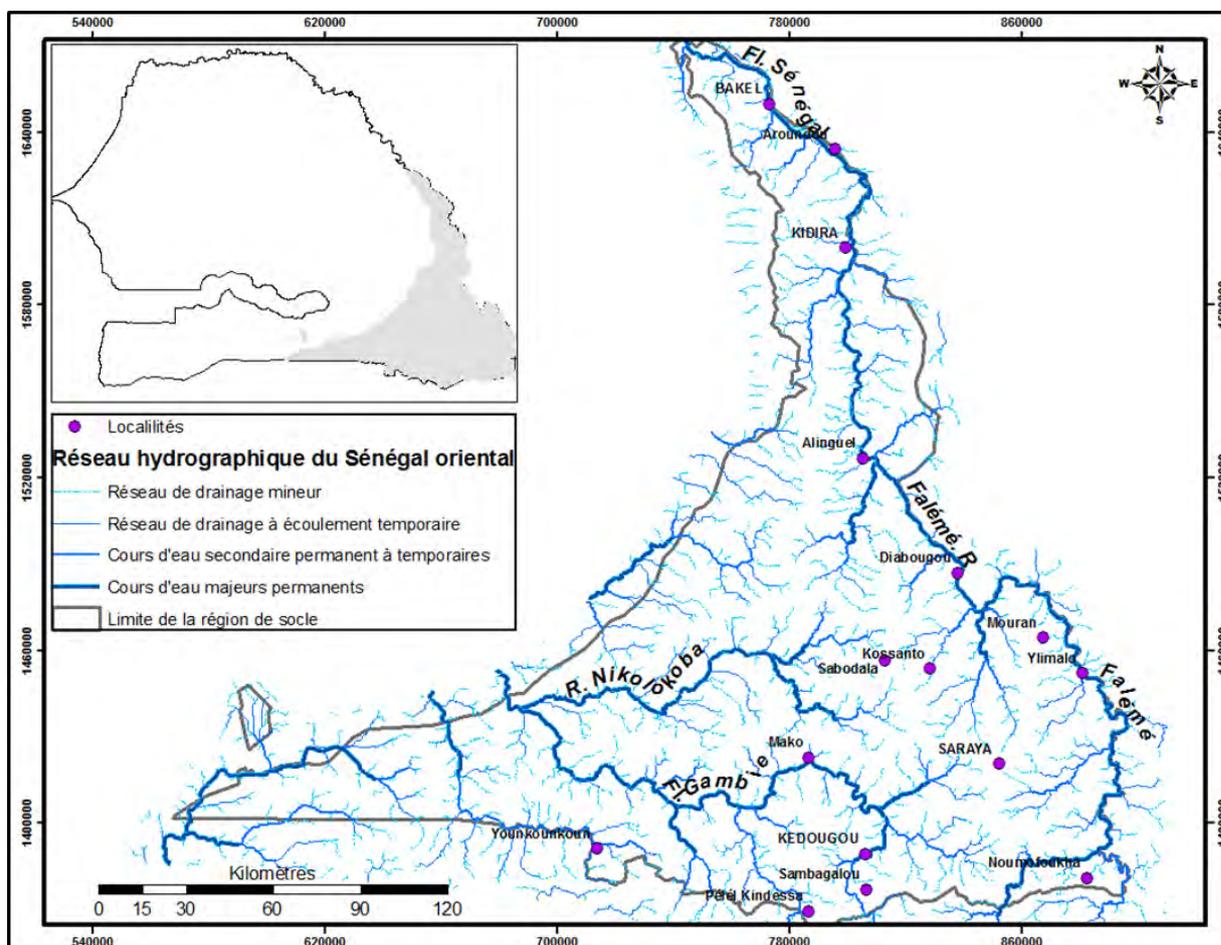


Figure 4. Réseau hydrographique et morphologie des terrains du Sénégal oriental

- Les principaux bassins versants

Le Sénégal oriental est situé dans les bassins hydrographiques des fleuves Sénégal et Gambie qui drainent plus de 79% de la surface totale de la région. Ces deux grands fleuves sont séparés par une dorsale qui s'étend, dans une direction NNO-SSE, depuis la frontière guinéenne et la

ville de Toubacouta, en passant par Saraya, Sabodala puis à Koussane vers le nord. Le fleuve Gambie fait une grande boucle à l'intérieur de la région. Ses affluents importants sont les rivières Koulountou, Niokolo-Koba, Sandougou, Thiankoye et le Niériko, toutes aux écoulements intermittents (Théveniaut et al., 2010). La Gambie constitue le seul fleuve à écoulement pérenne et traverse toute la région de socle d'est en ouest. Le bassin de la Gambie occupe une superficie de 12581,2 Km² soit 39,2% de la superficie totale de la zone ; par contre, le bassin de la Falémé et du Sénégal draine une superficie de 12740,7 Km² soit 39,7% de la superficie totale de la zone (Fig.5).

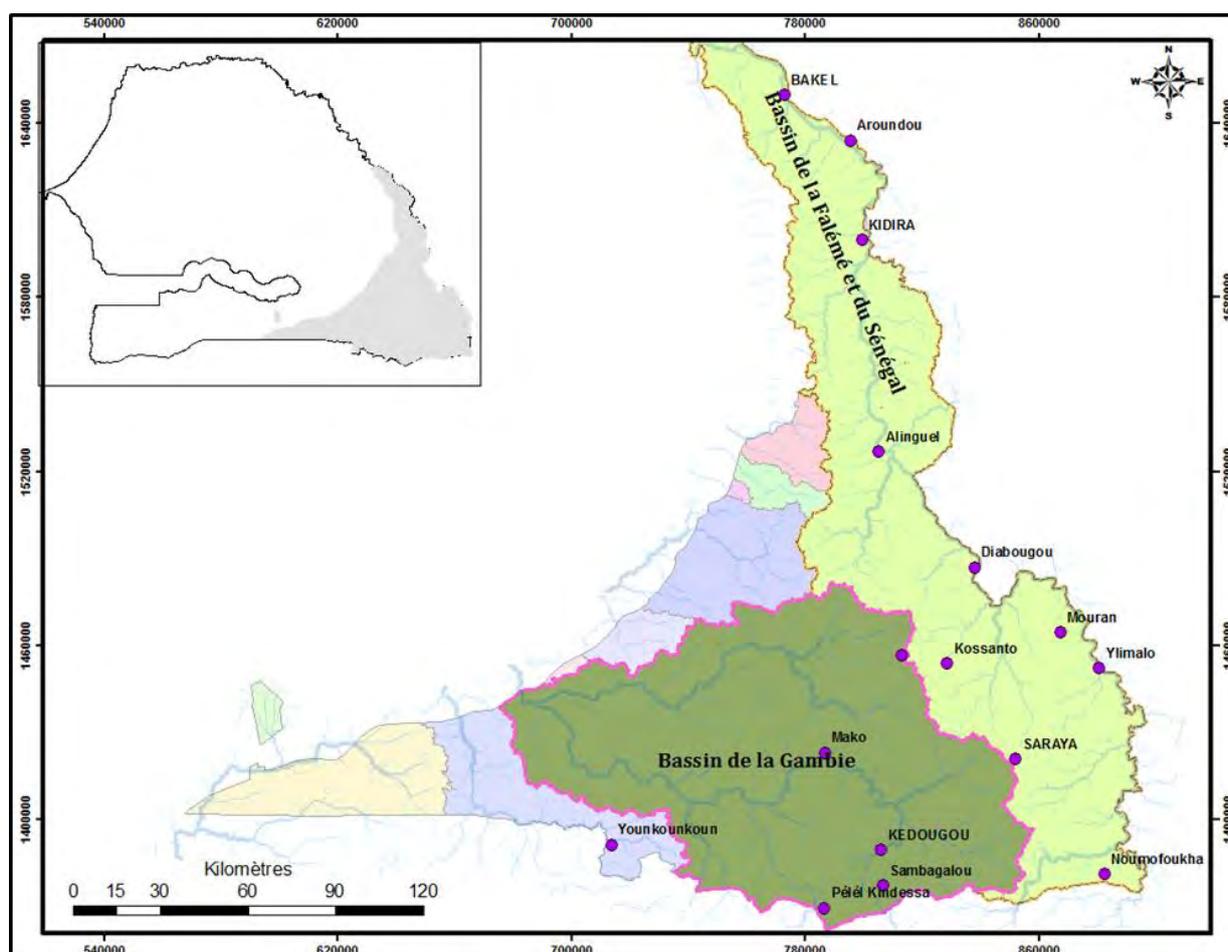


Figure 5. Principaux bassins versants du Sénégal oriental extraits à partir de l'image SRTM

I.5. La végétation

La région renferme les formations végétales les plus riches et les plus variées du Sénégal. Elles couvrent une superficie de 1 606 514 ha, soit 95% du territoire régional (IREF, 2012 ; In USAID, 2014). Les principales formations végétales rencontrées sont : la steppe, la savane, la forêt claire, la forêt-galerie, les prairies marécageuses. Intimement liée au climat et en particulier à la pluviométrie, la végétation diffère sensiblement entre le Nord et le Sud. Cette différence est surtout accentuée par la répartition des pluies qui augmentent du nord vers le sud de la zone.

La partie nord vers Bakel du fait de la faible pluviométrie, est le domaine de la steppe arbustive qui est surtout caractérisée par la présence d'une végétation clairsemée dominée par les épineux du genre *Acacia* et le genre *Balanites*. Le tapis herbacé est surtout formé de graminées, cypéracées et papilionacées. Ces espèces s'adaptent mieux aux conditions de sécheresse qui sévissent dans la zone.



Photo 2. Végétation clairsemée constituée de plantes épineuses dans la partie Nord vers Bakel
Vers le Sud, on passe progressivement de la savane boisée, les épineux sont subordonnés aux figuiers *Ficus glumosa*, *Ficus locardii*, au faux kapokier *Bambax costatum*, au fromager *Ceiba pentandra*, au karité *Batyrospermum parkii* et plus rarement le Néré *Parkia biglobosa*, et au tamarinier *Tamarindus indica*. Les bambousaies sont communes. Le domaine soudanien est celui de la savane dominée par des arbres et des arbustes (*Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, *Parkia bigobosa*, *Acacia raddiana*, *Combretum glutinosum*), surplombant un tapis de grandes herbes. Dans les vallées apparaissent des peuplements homogènes de rôniers (*Borassus aethiopicum* et *Borassus flabellifer*) et parfois de bambous (Bassot, 1966).



Photo 3. Végétation dense dans la partie Sud vers Mako avec la présence de Bambou dans les dépressions (photo Mall)

I.6. La faune

La région abrite le plus grand parc du Sénégal (le Parc du Niokolo Koba) qui renferme un grand nombre d'espèces sauvages avec notamment : des lions, des panthères, des hyènes, des buffles noirs, des Lycaons mais aussi de nombreuses antilopes (Elan de Derby, Cobes de Buffon, etc.) et des hippopotames dans le fleuve Gambie. Ailleurs, il n'est pas rare de rencontrer des phacochères, des singes et de la famille des cynocéphales, et aussi de nombreux oiseaux (pintades, francolins, tourterelles, et de nombreuses petites espèces au plumage aux teintes vives). Des serpents sont aussi présents avec le python, le naja, des vipères et des couleuvres (Théveniaut et al., 2010).

I.7. CONCLUSION

Le Sénégal oriental, une région à grande potentialité économique et culturelle regorge un patrimoine culturel et touristique très important du fait de ces sites de découvertes (Dindéfelo, Pays Bassaris) et de son paysage très spécifique qui lui confèrent un caractère écotouristique merveilleux. La région de Kédougou présente l'avantage d'être traversée par les deux plus grands cours d'eau qui arrosent le Sénégal (la Gambie et la Falémé) et le caractère spécifique de son relief, lui offre de réelles potentialités agricoles du fait de ces nombreux bas-fonds très fertiles. La grande biodiversité animale comme végétale associée aux potentiels miniers font de cette partie du pays un lieu privilégié pour l'Etat du Sénégal à la promotion et au développement du tourisme cynégétique et de découverte. Selon ANSD (2011), le taux d'urbanisation de la région reste encore très faible 16%. Cependant, avec le regain des activités aurifères, l'installation de nouvelles sociétés minières, des services étatiques, des services financiers, etc., la région pourrait offrir à moyen terme des perspectives démographiques sans précédent. La demande sociale dans la commune de Kédougou qui devient de plus en plus forte mérite une attention particulière. L'accès aux services sociaux de base reste encore faible, mais pourrait être amélioré avec les perspectives économiques prometteuses de la région. Cependant, l'enclavement et la spécificité de son relief, font que la région présente une handicap dans certains domaines socio-économiques tels que : l'éducation et l'accès aux services de santé.

CHAPITRE II CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE

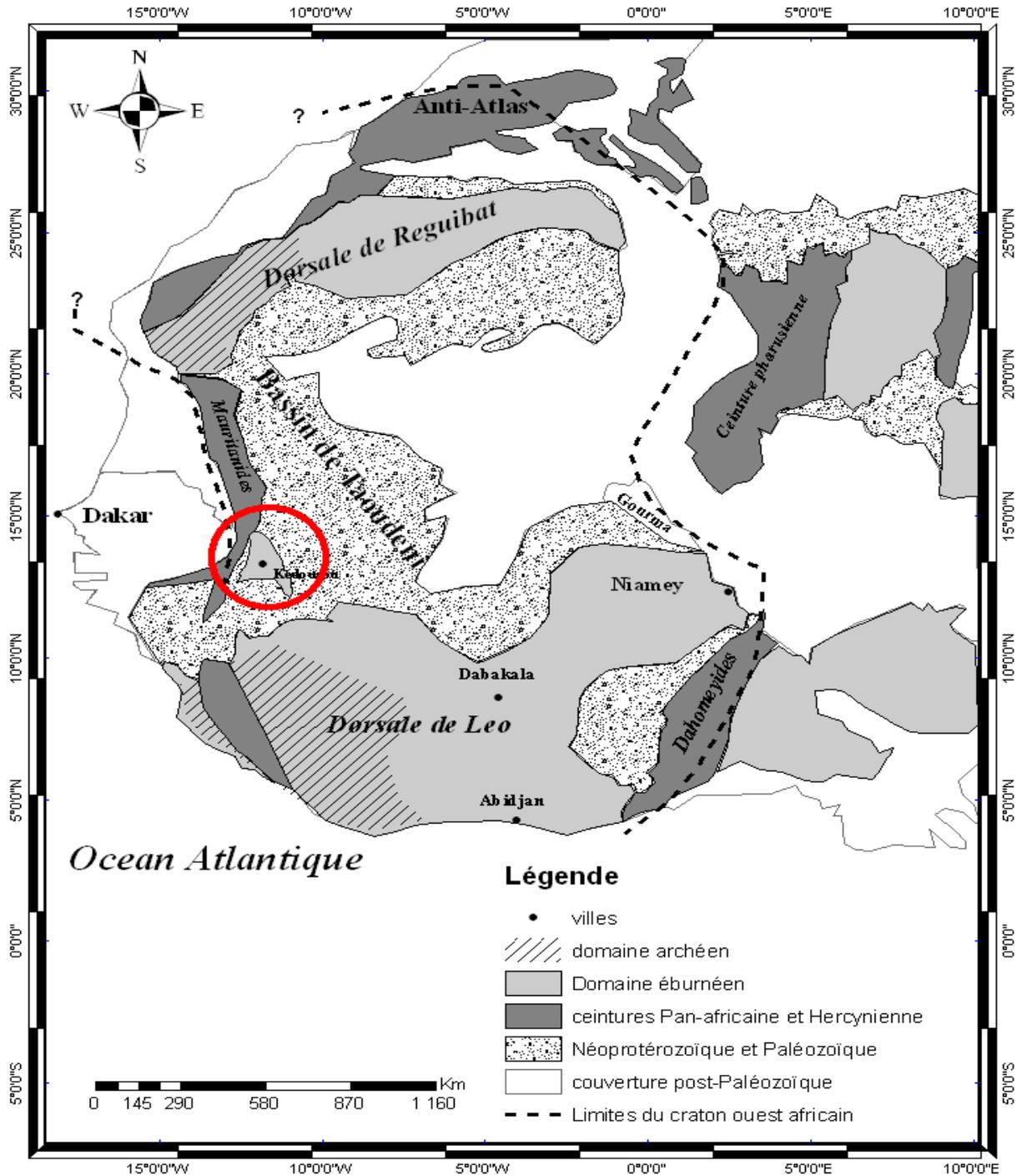
II.1 Présentation du craton ouest-africain

La géologie du Sénégal oriental s'intègre dans la géologie du craton ouest-africain. Ce craton est limité au Nord par l'Anti-Atlas, à l'Est par la zone mobile de l'Afrique centrale et à l'ouest par la zone mobile de l'Afrique de l'ouest (fig. 6). Il est caractérisé par une évolution polycyclique comprenant des terrains précambriens Archéens et du Protérozoïque inférieur.

Le craton ouest-africain peut être subdivisé en trois unités majeures :

- la dorsale Réguibat au Nord composée par des terrains archéens à l'Ouest et Birimiens à l'Est. Ces terrains sont rencontrés en Mauritanie et au Sahara occidental,
- la dorsale de Léo au Sud formée par le domaine de Man d'âge archéen et Baoulé Mossi d'âge Birimien. Elle couvre la Guinée, le Siéra Léone, la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Burkina Faso et le Mali;
- les boutonnières de Kédougou-Kéniéba et de Kayes entre les deux où n'affleurent que des formations birimiennes.

Cet ensemble est en grande partie recouvert par les bassins sédimentaires d'âge Néoprotérozoïque à Paléozoïque de Taoudéni, de Tindouf et de Volta (Bessoles, 1977). Ces formations constituent de vastes bassins sédimentaires tabulaires (bassin voltaïen au Ghana, Haute-Volta Niger, Bénin et Togo ; bassin de Taoudenni en Mauritanie, Mali, Sénégal, Guinée et Burkina Faso). Elles sont parfois plissées et métamorphisées (Dahoméyides, Gourma) (CEFIGRE, 1990)



II.2. Description générale de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba

La boutonnière de Kédougou-Kéniéba, localisée dans la partie orientale du Sénégal (fig.7), est constituée de formations cristallines anciennes représentant le socle du Sénégal. Elle est formée de deux ensembles bien distincts ; les formations birimiennes d'âge Paléoprotérozoïque d'une

part, la chaîne des Mauritanides et les bassins sédimentaires d'âge Néoprotérozoïque à Paléozoïque d'autre part.

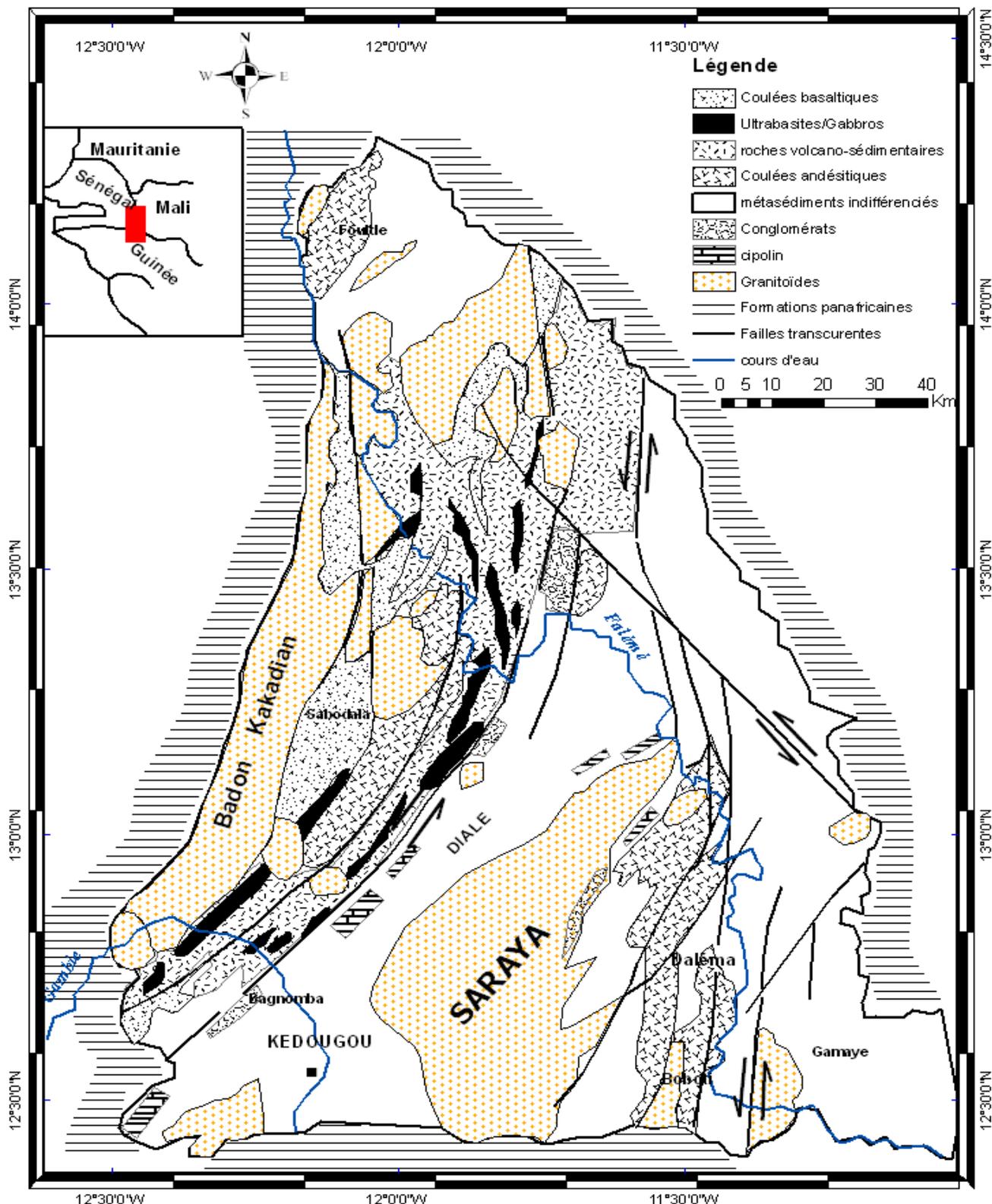


Figure 7. Carte géologique de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba (Bassot 1987, Ledru et al., 1991 modifiée)

Une nouvelle cartographie du Sénégal oriental subdivise le socle en deux entités géologiques majeures (Fig.8) avec le Domaine du Birimien qui débute au Paléoprotérozoïque et le Domaine des Mauritanides qui couvre le Néoprotérozoïque et le Paléozoïque (Théveniaut et al., 2010).

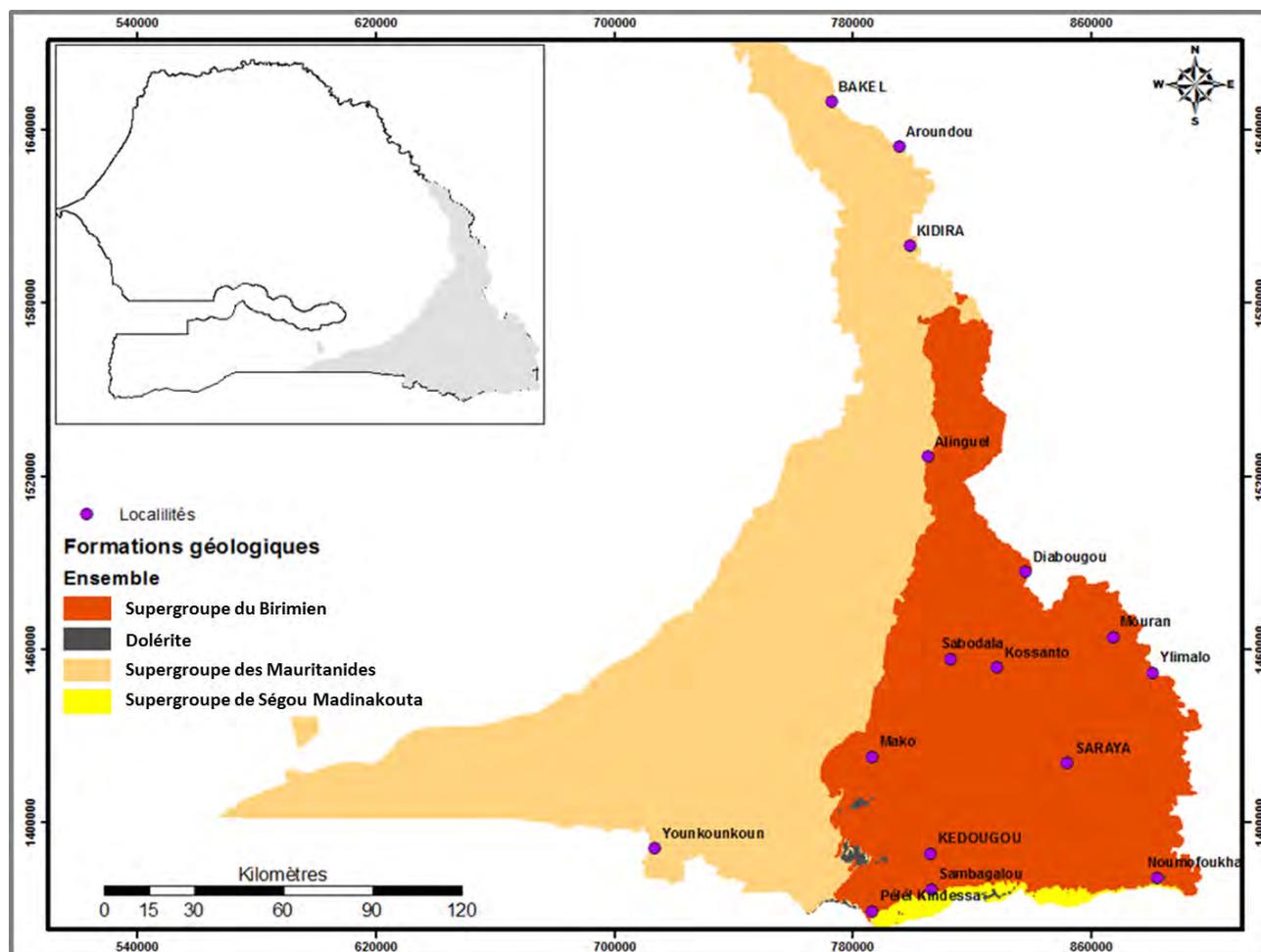


Figure 8. Grandes entités géologiques du Sénégal oriental (Théveniaut et al., 2010)

Ces terrains de socle sont limités à l'ouest par le bassin sédimentaire cénozoïque. Selon Théveniaut et al., (2010), la géologie du Sénégal oriental reflète une histoire qui débute vers 2 milliards d'années. Les formations à dominante basique, avec quelques occurrences sédimentaires du Groupe de Mako témoignent de l'existence, vers 2.25-2.20 Ga, d'une croûte océanique, et donc d'un socle birimien juvénile produit par extraction mantellique. L'installation d'un contexte géodynamique en subduction, aboutit à la formation de la Suite magmatique de Sandikounda-Soukouta ex Badon Kakadian, par fusion des termes basiques juvéniles. Majoritairement granodioritique, cette Suite évolue depuis des termes migmatitiques datés à 2.17 Ga, jusqu'aux stades de formation de massifs circonscrits vers 2.14 Ga. Ce diapirisme majeur éo-éburnéen est à l'origine de déformations gravitaires périplutoniques, témoins des stades tectoniques les plus précoces. La formation du bassin silicoclastique du Groupe de Dialé-Daléma vers 2.1 Ga reflète un stade de distension auquel succède, dans

l'intervalle 2.1-2.06 Ga, un épisode de raccourcissement N-S caractérisé par une tectonique transcurrente éburnéenne d'axe NE-SO, et un magmatisme granitique dominant (Suites de Saraya et de Boboti). De grands cisaillements conjugués NO-SE et NE-SO, traduisent en contexte encore ductile, les effets d'une direction de raccourcissement régionale E-O tardiéburnéenne.

II.2.1. Les formations birimiennes

Elles ont été subdivisées en deux ensembles (Bassot, 1987) : Le supergroupe de Mako et le supergroupe de Dialé-Daléma.

- Le supergroupe de Mako formé d'épaisses coulées volcaniques basiques, de massifs ultrabasiques, de gabbros et de coulées andésitiques interstratifiés avec des quartzites, des calcaires. Ce complexe est recouvert par des roches volcanodétritiques à détritiques constituées de pyroclastites, de grauwackes, de grès et de pélites (Bassot, 1966). La Mission Sénégal-Soviétique (Chtocolov et Korj, 1973) propose de subdiviser le Supergroupe de Mako en trois termes:

- le Groupe de Kossanto, le plus ancien comprend pour l'essentiel des roches sédimentaires et volcano-sédimentaires ;
- le Groupe de Bérola qui est également dominé par les mêmes termes que le groupe de Kossanto ;
- le Groupe de Ouassa dans lequel prédominent des roches volcaniques.

Debat et al. (1984) mettent en évidence une série magmatique basique atectonique dans la partie méridionale du Groupe de Mako. Ngom (1985) reconnaît, dans la région de Sabodala, deux ensembles magmatiques distincts. Une série basale de roches volcaniques basiques qui est surmontée par une série de roches volcaniques intermédiaires à acides associées à des plutonites allant des gabbros aux granodiorites. Dioh (1986) distingue dans la région de Sonfara-Laminia-Madina-Foulbé, deux ensembles: un premier à roches basiques qui présente des caractères de type MORB et un second qui est formé de granitoïdes de nature calco-alkaline.

- Les supergroupes de Dialé-Daléma sont composés de cipolins surmontés par des quartzites, des grauwackes, des grès et des pélites qui sont interstratifiés avec les coulées andésitiques de la Daléma.

Le groupe du Dialé est déversé vers le sud-est avec des plissements dissymétriques dont le plan axial présente un fort pendage vers le nord-ouest. Les terrains du supergroupe de Mako le chevauchent à l'ouest. Le Groupe de Dialé-Daléma est référencé comme Supergroupe dans certaines études. Les travaux de la mission Sénégal-Soviétique (Chtocolov et Korj, 1973)

permettent de le subdiviser en une partie inférieure à dominante arkosique et une partie supérieure à dominante grauwakeuse. [Walter et Chantraine \(1974\)](#) distinguent dans la partie orientale deux domaines séparés par le granite de Boboti : un domaine occidental schisto-grauwakeux et un domaine oriental, dans lequel se sont mis en place plusieurs types de volcanisme.

[Valero et al. \(1985\)](#) ont noté que le batholite de Saraya résulte de la coalescence de plusieurs plutons. L'étude structurale révèle que les foliations y dessinent une structure en dôme dissymétrique avec un déversement vers le sud-est. Les structures planaires du granite se trouvent dans la prolongation de la schistosité de l'encaissant. [Ndiaye \(1986\)](#) et [Ndiaye et al. \(1989\)](#) soulignent que les formations du Groupe de Dialé-Daléma ont été plissées isoclinalement et schistosées au cours d'une phase de déformation qui s'est accompagnée d'un métamorphisme régional de faible degré qui est plus jeune que la mise en place du granite de Saraya. [Ledru et al. \(1991\)](#) font la synthèse structurale des séries de Dialé, de la Daléma et de Mako. Ils s'inscrivent dans la logique B1 versus B2 de [Milési et al. \(1989\)](#) sur la base d'une déformation tangentielle précoce affectant les séries Dialé-Daléma et non retrouvée dans la série de Mako. Ils attribuent ainsi les formations clastiques de Dialé-Daléma à la base du Birimien et les interprètent comme des dépôts de bassins intracratoniques.

II.2.1.1. Les granitisations

Environ 30% de la province birimienne est occupée par des granites ou des granitoïdes. Selon [Bassot \(1966\)](#), ces roches présentent de grandes hétérogénéités au point de vue gisement, pétrographie, et structure. Il les regroupe ainsi en trois types : type Baoulé (concordants, syntectoniques), type Boboti (concordant syn ou tarditectoniques), type Bondoukou (discordants et post-tectoniques)

Granites de type Baoulé :

Il s'agit de batholites de composition très hétérogène, d'extension régionale et concordantes à la structure régionale. Ce sont les batholites de Badon-Kakadian et de Saraya.

Le batholite de Badon-Kakadian (suite magmatique de Sandikounda-Soukouta) :

C'est un massif allongé de plus de 120 km orienté NS à NNE parallèlement aux formations encaissantes du supergroupe de Mako. Nouvellement appelé suite magmatique de Sandikounda-Soukouta datée entre 2170-2140 Ma, il regroupe tous les termes plutoniques antérieurement rattachés au batholite « Badon-Kakadian » ainsi que des termes plus basiques (gabbros) intrusifs dans le Groupe de Mako. Il est composé d'un ensemble granito-gneissique,

granodioritique à tonalitique associé à un complexe gabbroïque lité et renfermant des xénolites amphibologneissiques. Ces ensembles sont constitués de plutons à dominante granodioritique, formés d'associations magmatiques plutoniques allant des termes gabbroïques aux termes granitiques et comprenant des gabbro-diorites et des tonalites. Plusieurs générations de plutons, dont certains syntectoniques précoces allongés et d'autres tardi-tectoniques concordants sub-arrondis, constituent ces complexes. Les granodiorites sans phénocristaux constituent cependant l'essentiel des faciès granodioritiques à amphibole avec du plagioclase abondant. Des enclaves microgrenues peuvent, localement, être abondantes (Théveniaut et al., 2010).

Le batholite de Saraya (Suite de Saraya)

C'est un massif allongé d'une centaine de kilomètres de long de direction NE-SW concordant avec les formations volcano-sédimentaires à sédimentaires de Dialé - Daléma. Il s'agit d'un syénogranite qui comprend un faciès à biotite riche en muscovite qui occupe le centre et le Nord du massif et le faciès à biotite pauvre en muscovite qui occupe toute la partie Sud-Ouest du massif. Il imprime un métamorphisme de contact très net avec l'encaissant sédimentaire (N'diaye et al., 1997). Selon Théveniaut et al., (2010), les formations de la Suite magmatique de Saraya d'âge (2100-2060 Ma) sont constituées de massifs cogénétiques imbriqués qui forment le Batholite de Saraya sensu stricto ainsi que de massifs circonscrits qui sont intrusifs dans les Groupes de Mako et de Dialé-Daléma.

Certains faciès épigénitisés sont minéralisés en uranium. Ce batholite renferme des enclaves sédimentaires contrairement au premier précité qui ne contient que des enclaves magmatiques.

Granites de type Boboti / Suite de Boboti (2080-2060 Ma)

C'est un massif allongé Nord-Sud formé en réalité d'une multitude de petits massifs alignés le long du même axe que le volcanisme calco-alcalin de la Daléma. Il a une composition granodioritique renfermant des clinopyroxènes. Les contacts avec l'encaissant sont nets avec un métamorphisme thermique bien développé avec les roches sédimentaires encaissantes. Cette formation, antérieurement définie comme le « type Boboti » affleure essentiellement à la limite sud-est du Sénégal oriental. Elle est constituée par plusieurs massifs allongés suivant une direction nord-sud, recoupés par de grands cisaillements dextres NE-SO. Le plus important s'étend en position méridionale, entre le Groupe de Ségou et le sud de Bambadji, à hauteur de la localité de Boboti. Le second massif, de forme plus circonscrite, affleure au niveau de Bambadji. Le troisième massif est celui de Balangouma (Théveniaut et al., 2010). Le faciès le

plus représentatif est constitué par des termes granodioritiques à amphibole, qui se caractérisent sur le terrain par un débit en masses ovoïdes très compactes et par une texture grenue, souvent porphyroïde. D'un point de vue pétrographique, le faciès dominant de granodiorite passe latéralement à des monzodiorites (Bassot, 1987).

Granites de types Bondoukou

Ce sont des intrusions circonscrites de faibles dimensions. Ces granites ne sont pas déformés et recourent l'encaissant dans toutes les directions. Leur composition est hétérogène et de nature granodioritique. Ils auraient été accompagnés de gabbros comagmatiques (Ngom 1985).

II.2.2. TERRAINS DU SUPERGROUPE DES MAURITANIDES

Longue de plus de 2000 km, cette chaîne est constituée de formations précambriennes et paléozoïques déformées et métamorphisées au cours des orogénèses panafricaine et hercynienne (Lille, 1967 ; Lécorché, 1980 ; Le Page, 1983 ; Dia, 1984 ; Villeneuve et Dallmeyer, 1987 ; Lécorché *et al.*, 1989). D'orientation subméridienne, elle borde à l'ouest, le craton ouest-africain et le bassin de Taoudéni. A l'ouest, la chaîne des Mauritanides disparaît sous les formations sédimentaires des bassins côtiers du Sahara occidental, de la Mauritanie et du Sénégal. Du point de vue structural Bassot (1966), subdivise le domaine des Mauritanides, en une branche occidentale (« branche de Koulountou ») et une branche orientale (« branche des Bassarides »), toutes deux séparées par le bassin peu déformé de Youkounkoun et par le domaine plutono-volcanique de Niokolo-Koba. Plus à l'est, un bassin sédimentaire peu déformé et non-métamorphique (le groupe basal de Falémé et le groupe supérieur du Mali) est considéré comme l'avant-pays. Théveniaut *et al.*, (2010) subdivisent le Supergroupe des Mauritanides en trois domaines structuraux: un domaine autochtone à parautochtone, un domaine parautochtone et un domaine parautochtone à allochtone (Fig.9).



Figure 9. Distinction cartographique de la chaîne des Mauritanides et de son avant-pays, en domaines autochtone (jaune), parautochtone (vert) et allochtone (bleu) (Théveniaut et al., 2010).

- le domaine autochtone à parautochtone

Il s'agit de terrains sédimentaires peu déformés et peu ou pas métamorphiques situés au front des chevauchements externes de la chaîne des Mauritanides. Ces unités sont considérées comme des équivalents localement déformés, et parfois légèrement métamorphisés, des formations qui constituent plus à l'est le remplissage sédimentaire du Bassin de Taoudéni. Cinq Groupes distincts sont rattachés à ce domaine autochtone à parautochtone : trois Groupes d'âge néoprotérozoïque (le Groupe de Walidiala (MWa), le Groupe de Soukouta (MSo) et le Groupe de Mali (MMI)), et deux Groupes paléozoïques (le Groupe de Sandaraboki (MSa) et le Groupe de Boundou (MBo)). Ils sont interprétés comme appartenant au remplissage sédimentaire du bassin de Taoudéni, plus ou moins affecté par la mise en place des nappes associées à la structuration des Mauritanides.

- le domaine parautochtone

Le domaine parautochtone est constitué par des roches charriées vers l'est, donc pour la plupart en contact tectonique. La partie basale de la succession comprend des roches essentiellement magmatiques et témoignant d'un arc continental néoprotérozoïque (Groupe du Niokolo-Koba). Au-dessus, se mettent en place des unités sédimentaires (Groupes de Marsa-Termessé et d'Oudiourou), volcano-clastiques et volcaniques (Groupe de Termessé). Les unités sommitales du domaine, d'âge paléozoïque probable, correspondent essentiellement à des roches sédimentaires (Groupe de Youkounkoun, de Pita et de Massa Ya Toumba). Le Groupe de Nandoumba démontre l'existence d'un évènement volcanique silurien, tardif dans l'histoire de la chaîne des Mauritanides.

Le domaine parautochtone est séparé du domaine autochtone par un chevauchement d'échelle régionale qui s'étend d'Aïkoun au nord (confluence de la Falémé et du fleuve Sénégal) à la Guinée au sud.

Les relations géométriques sur le terrain et les données géochronologiques disponibles ou acquises ont permis de reconstituer une succession stratigraphique relative des unités représentées dans ce domaine. Cette succession est relative, car la position de certaines unités reste encore incertaine.

L'unité la plus ancienne consiste en des roches surtout magmatiques témoignant d'un arc volcanique continental néoprotérozoïque (Groupe du Niokolo-Koba). Au-dessus, se mettent en place des unités à faciès sédimentaires (Groupes de Marsa et d'Oudiourou), volcano-clastiques et volcaniques (Groupe de Termessé) en contexte d'arrière arc. Les unités sommitales du domaine, d'âge paléozoïque probable sont composées principalement de roches sédimentaires (Groupe de Youkounkoun, de Pita et de Moussa Ya Toumba). Le Groupe de Niokolo-Koba est

essentiellement composé de roches felsiques et volcaniques avec de rares intercalations de roches volcano-clastiques et épicastiques.

- le domaine parautochtone à allochtone

Le domaine parautochtone à allochtones est subdivisé en quatre sous-domaines qui correspondent aux branches de Koulountou (Villeneuve, 1984), à une partie du groupe de Guinguan (Chiron, 1964 ; Bassot, 1966 ; Villeneuve, 1984 ; Brinkmann et Meinhold, 2007), au Complexe de Diana et enfin au Complexe de nappes de Bakel. Du point de vue structural, ces unités sont caractérisées par une schistosité pénétrative, un bas degré de métamorphisme (schiste vert) et un mouvement principal vers l'est et le sud-est.

Le Complexe de nappes de Koulountou contient des roches volcano-sédimentaires et plutoniques reliées à un système d'arc actif (680-600 Ma).

Les terrains du Complexe de Nappes de Guinguan sont composés de meta-sédiments marins fins, de roches volcaniques basiques (affinité géochimique de type N-MORB) et de quelques écaillés d'orthogneiss (dérivant probablement de l'arc actif néoprotérozoïque).

Le complexe de Diana comprend le gneiss de Baile et des métasédiments.

Le Complexe de nappes de Bakel est constitué de nombreux groupes méta-volcaniques et métasédimentaires d'unités allochtones.

- Complexe de nappes de Bakel

Le Complexe de nappe de Bakel qui occupe la partie la plus septentrionale du domaine des Mauritanides au Sénégal oriental est constitué de plusieurs groupes de nature géologique souvent différente :

Groupe de Fete Galambi Ce Groupe comprend des argilites et des grès, très peu métamorphiques, autrefois inclus dans la sous-unité d'Oursoulé de la nappe de Gabou (Le Page, 1983).

Groupe de Béma

Constitue une des unités allochtones du Complexe de nappes de Bakel, localisée en position externe. Il correspond à un ensemble de métasédiments disposé en 2 bandes séparées par le chaînon de grès-quartzites de l'Aïré Diabal. Les rares affleurements correspondent à des schistes très fins, satinés, caractérisés par la présence de lentilles centimétriques à décimétriques de quartz fibreux.

Groupe de Oundoubaba

Le Groupe de Oundoubaba correspond à une des unités allochtones localisées en position interne du Complexe de nappes de Bakel.

Ce Groupe représente une petite écaille tectonique de 30 km² pincée entre les groupes de Bakel et de Moudéri. Il comprend des roches intrusives et des roches volcaniques acides.

Groupe de Sintiou Fissa

Ce Groupe constitue une longue unité subméridienne bordée, à l'est et à l'ouest, par les formations du Groupe de Termessé qu'il surmonte. Les conditions d'affleurement de cette unité sont particulièrement médiocres et aucune coupe continue n'a pu être réalisée.

Groupe de Gadel

Il représente une des unités externes du Complexe de nappes de Bakel et correspond à une écaille de socle polymétamorphique localisée au front du Groupe de Bakel, probablement arrachée au substratum lors de la mise en place du Groupe de Bakel.

Groupe de Moudéri

Ce Groupe, représentant une unité interne du Complexe de nappes de Bakel, forme une unité géologique majeure (>3750 km²) avec des zones pénéplanées et quelques collines de quartzite. Les affleurements sont donc très rares, discontinus. Les travaux de [Le Page \(1983\)](#) permettent de décrire de façon succincte le Groupe de Moudéri.

Groupe de Tianiaf

Ce Groupe, qui matérialise une unité interne du Complexe de nappes de Bakel, se situe sous le Groupe de Oua-Oua et se juxtapose au Groupe de Moudéri le long d'un contact subvertical. Il est recouvert à l'ouest par le bassin sédimentaire cénozoïque.

Le Groupe de Tianiaf comprend trois faciès distincts :

- des schistes à quartz-biotite-feldspath ;
- des schistes à grenat et amphibole ;
- des schistes à grenat-quartz-chlorite-muscovite.

Groupe de Oua-Oua

C'est une unité interne du Complexe de nappes de Bakel et n'affleure que dans l'angle nord-ouest de la zone cartographiée. Il est en contact, à l'est, avec le Groupe de Tianiaf. Vers l'ouest, il s'ennoie rapidement sous les alluvions du fleuve Sénégal et sous les formations cénozoïques du bassin côtier.

Le Groupe de Oua-Oua est constitué pour l'essentiel de quartzites massifs constituant de longues crêtes subméridiennes (visibles clairement plus au nord en Mauritanie).

II.3. La tectonique

Les formations du socle birimien ont été affectées par la tectonique éburnéenne datée à 2100 Ma, responsable des différentes phases de granitisation et de la structuration de la lithologie birimienne. Parmi ces structures, la tectonique transcurrente est la plus caractéristique. Elle est marquée par des structures majeures, linéaires d'extension régionale et de largeur parfois kilométrique. La roche affectée est schistosée, mylonitisée, fracturée et parcourue par de nombreux filons de quartz, de microgranites ou de dolérites. Ces structures encore appelées shear zones, sont localisées au contact entre les formations lithologiques dont la plus importante, la Main Transcurrent Zone (MTZ) marque le contact entre le supergroupe de Mako et de Dialé. Dans l'ensemble, les failles sont rectilignes et subverticales, elles ont joué à diverses reprises, en décrochement et d'autres structures sont représentées par des failles normales qui affectent toutes les formations avec des rejets limités. Des rejeux ont pu se produire pendant le Pan africain et l'Hercynien dont les structures sont marquées par la mise en place des filons de dolérites (CEFIGRE, 1990). Selon Théveniaut et al., (2010), le diapirisme majeur éo-éburnéen est à l'origine des déformations gravitaires périplutoniques, témoins des stades tectoniques les plus précoces au Sénégal oriental. La formation du bassin silicoclastique du Groupe de Dialé-Daléma vers 2.1 Ga reflète un stade de distension auquel, succède dans l'intervalle 2.1-2.06 Ga, un épisode de raccourcissement N-S caractérisé par une tectonique transcurrente éburnéenne d'axe NE-SO, et un magmatisme granitique dominant (massif de Saraya et de Boboti). De grands cisaillements conjugués NO-SE et NE-SO, traduisent en contexte encore ductile, les effets d'une direction de raccourcissement régionale E-O tardiéburnéenne. Plusieurs intrusions de dolérite tardive d'âge mésoprotérozoïques à néoprotérozoïques ont affecté le socle du Birimien et sont respectivement datées vers 1.5 Ga (Suite de Noumoufoukha), 1.3 Ga (Suite de Kédougou), 1.15 Ga (Suite de Sambarabougou) et 1.0-0.8 Ga (Suite de Boundou Dioé). Ces suites sont les témoins d'étapes successives d'un cycle distensif qui va aboutir à l'initiation d'un grand bassin, dont le Supergroupe de Ségou/Madina-Kouta qui représente les premiers termes du remplissage sédimentaire. A partir du Néoprotérozoïque, la chaîne des Mauritanides et son avant-pays témoignent de l'extension vers le sud-ouest du grand bassin intracontinental de Taoudéni. On y trouve trois domaines structuraux distincts avec le domaine autochtone qui prolonge les dépôts sédimentaires au-dessus du Supergroupe de Ségou/Madina-Kouta, puis les domaines parautochtones et allochtones. Ils témoignent aussi le contexte d'arc et d'arrière arc développé à l'ouest du bassin de Taoudéni et de l'importance de l'orogénèse hercynienne qui l'affecte. De nombreux Groupes, Suites et Complexes constituent ce domaine des Mauritanides avec des

corrélations parfois délicates en raison du contexte de nappes qui est lié à cette orogénèse. Au Paléozoïque, après les dépôts des dernières formations du domaine autochtone du domaine des Mauritanides, seuls des évènements distensifs affectent le Sénégal oriental. La Suite de Bandafassi constituée de dykes et de sills présents au sud-est, et dans le domaine des Mauritanides à l'ouest, témoigne d'évènements liés à l'ouverture de l'océan Atlantique au Jurassique, mais aussi potentiellement d'évènements antérieurs d'âge paléozoïque.

Enfin il faut signaler la présence d'une microfracturation qui affecte les formations de socle et qui est répartie dans différents plans de l'espace. Ce qui se traduit par le découpage des roches rigides en blocs qui ont donné naissance à des structures en boule résultant des phénomènes d'altération météorique.

II.4. Les altérites

Ils forment un ensemble présentant une succession graduelle avec des horizons bien individualisés. Ainsi on peut distinguer d'une part les argiles et d'autre part les arènes, depuis le sommet des altérites sous le niveau ferrugineux vers le fond du profil.

- Les argiles sont définies par l'importance des minéraux silicatés argileux dans le matériau. La partie supérieure des argiles contient des nodules ou concrétions ferrugineuses. La partie inférieure est dépourvue de nodules, l'ensemble de l'horizon argileux est caractérisé par des couleurs contrastées par des taches ou trainées donnant un aspect tacheté ou bariolé avec des teintes grises, rouges, rouilles, gris-vert, ocres.

- L'arène est l'unité où l'on passe progressivement de l'argile à minéraux primaires dispersés à la roche par suite d'une diminution graduelle de l'altération argileuse, puis des diaclases. La morphologie et la structure de la roche guident cet horizon. La puissance des altérites est très variable, elle est estimée entre 15 et 30 m à partir des puits et sondages électriques.

II.4.1. Altérites sur les roches volcaniques basiques

Elles sont importantes dans le groupe de Mako qui est à dominante volcanique basique.

Les sols

[Wackermann \(1975\)](#) a identifié, à partir de différents profils se développant sur roche basique, des sols à kaolinite dominant qui se forment sur des buttes en relief et sur les plateaux des massifs granitiques. Il distingue :

- les sols ferrugineux tropicaux, dont la répartition coïncide avec les pentes des buttes-témoins et les surfaces tabulaires.

- les sols peu évolués d'érosion qui sont sur les pentes très fortes des buttes-témoins généralement à l'amont de la rupture de pente. Dans ces conditions, l'érosion élimine une partie importante des particules fines et donne naissance à des lithosols et des régosols peu épais.

-les sols ferrugineux hydromorphes, qu'on rencontre le long des axes alluviaux et dans les zones dépressionnaires des plateaux kaolinisés.

- Profil d'altération sur roche basique

L'altération sur roche basique a été étudiée par [Wackermann \(1975\)](#), qui à travers la description du sondage de Kanéméré, propose une subdivision des profils en quatre tranches principales. Cette description est basée sur la répartition des faciès et des microstructures. Ainsi, à une profondeur supérieure à 10 mètres, les assemblages de pyroxènes et de feldspaths sont prédominants. Des transformations minéralogiques locales donnent naissance à des plages microcristallines isolées ou en filonnets.

Entre 10 et 2,5 mètres, les transformations minéralogiques détruisent progressivement les assemblages cristallins initiaux tout en respectant l'architecture.

Entre le niveau 2,5 et 1 mètre, cette architecture est complètement effacée, mais le réseau de diaclases demeure conservé.

Au-dessus de 1 mètre de profondeur, la densité du chevelu racinaire et des galeries zoogènes détruisent le réseau des diaclases et une architecture fondée sur des agrégats pédologiques prédomine.

L'altération sur roches basiques notamment sur dolérite se manifeste de façon brutale «quelques millimètres seulement séparent la roche saine des produits de décomposition au milieu desquels il ne reste plus de traces de minéraux originels». Les squelettes des cristaux primitifs subsistent, mais les constituants essentiels sont la gibbsite et la goéthite. Ce niveau d'altération, résultat d'une hydrolyse profonde, se caractérise par sa faible densité, sa pulvérulence et sa couleur jaune-ocre : il présente ainsi l'aspect du pain d'épice ([Lacroix, 1914 in Michel 1973](#)).

Ce faciès « pain d'épice » jaune, à structure nettement conservée, tapisse le front de la roche en place, pénètre dans les fissures de la masse rocheuse et enrobe complètement les blocs et boules détachées. En s'éloignant de la zone de contact de la roche saine se produisent des affaissements, des tassements, facilités par les nombreux vides, si bien que la roche originelle perd sa structure primitive.

II.4.2. Altérites sur les terrains granitiques

Blot (1980), en étudiant les profils d'altération des granites à Saraya (fig. 10) a montré des altérites qui apparaissent comme des roches transformées, surmontées d'un horizon riche en oxydes et hydroxydes de fer et surmonté lui-même de sols riches en quartz ou arène granitique (Fig.9). L'altération sur roches acides, granites, gneiss, micaschistes, ne s'exerce pas d'une façon aussi brusque ; elle est au contraire très progressive. L'horizon de départ peut atteindre une épaisseur de 5 à 6 m. Si la roche in situ est un granite, des boules subsistent dans une arène rose ou rouge, parfois riche en kaolinite. Cet horizon marqué par la présence de boules de roche est d'autant mieux développé que les diaclases sont nettes et suffisamment espacées. Dans ce cas se produit une bonne percolation de l'eau et les masses rocheuses entre les diaclases autorisent la persistance de boules résiduelles (Michel 1973).

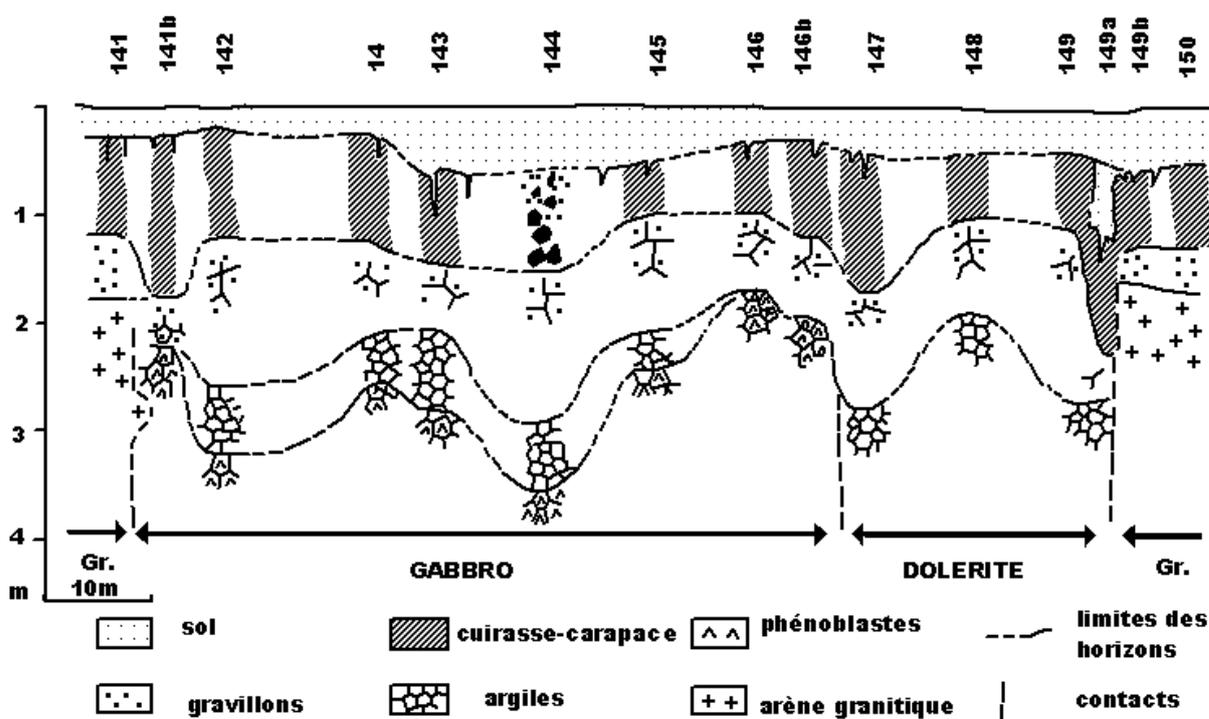


Figure 10. Coupe schématique des terrains selon la ligne des puits 141 à 150 (Blot, 1980)

II.5. Les sols

Partant du sommet du profil, les sols sur granite sont caractérisés par la succession de trois horizons:

- un horizon sableux humifère,
- un horizon sableux faiblement argileux ;
- un horizon sableux faiblement argileux à nodules ou concrétions ferrugineux.

Il s'agit d'un sol ferrugineux tropical lessivé d'une épaisseur moyenne de 0.5 à 0.8 m pouvant atteindre 2 m.

- L'horizon ferrugineux

L'horizon ferrugineux est caractérisé par l'abondance des hydroxydes et oxydes de fer, formant un horizon induré, dense caractéristique sur l'ensemble du profil par sa couleur rouge-brun-rouille, sa cohésion et sa dureté. Suivant le comportement physique on peut distinguer une cuirasse plus dure d'une carapace sous-jacente moins résistante. Cette succession de deux horizons n'est pas systématique, l'un ou les deux peuvent manquer. Ce niveau a une puissance moyenne de 0.5 à 1.0 m avec des extrêmes de 0 à 2.5 m. L'abondance des oxy-hydroxydes de fer provoque une induration du matériau.

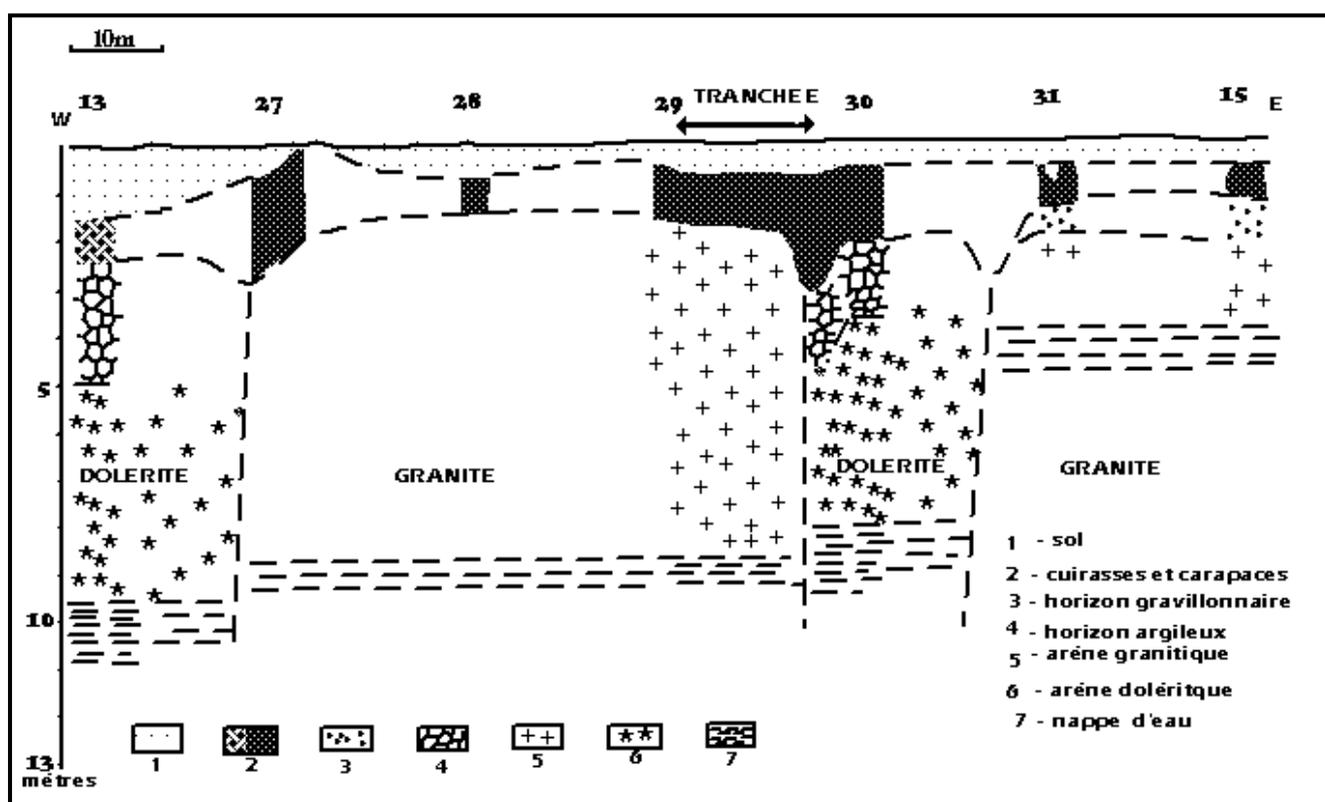


Figure 11. Coupe schématique des puits KN13 à KN15 (Blot, 1980)

II.6. Conclusion

L'histoire géologique précambrienne du Sénégal oriental était jusqu'à présent synonyme de « Birimien *sensu stricto* ». Ces formations ont été affectées par plusieurs évènements tectoniques, mais également ont été objet de manifestations magmatiques notamment doléritiques de plusieurs générations. Après la mise en place du socle Birimien, apparaissent plusieurs générations de dolérites mésoprotérozoïques à néoprotérozoïques, respectivement datées vers 1.5 Ga (Suite de Noumoufoukha), 1.3 Ga (Suite de Kédougou), 1.15 Ga (Suite de

Sambarabougou) et 1.0-0.8 Ga (Suite de Boundou Dioé). Ces suites sont les témoins d'étapes successives d'un cycle distensif qui va aboutir à l'initiation d'un grand bassin dont le Supergroupe de Ségou/Madina-Kouta qui représente les premiers termes du remplissage sédimentaire. Enfin, à partir du Néoprotérozoïque, la chaîne des Mauritanides et son avant-pays témoignent de l'extension vers le sud-ouest du grand bassin intracontinental du Taoudéni [Théveniaut et al., \(2010\)](#). Ces événements, associés à l'altération hydroclimatique ont rendu ces terrains aptes à être réservoir aquifère et dont la productivité est essentiellement contrôlée par leur degré de fracturation, d'altération et la nature pétrographique des terrains.

CHAPITRE III. APERÇU SUR L'HYDROGEOLOGIE EN ZONE DE SOCLE

Introduction

Plusieurs auteurs (Wakermann, 1975, Blot, 1980, Diouf, 1999, Mall, 2009) ont montré qu'au niveau de la zone de socle du Sénégal oriental, il n'y a pas d'aquifère généralisé, mais un réseau d'aquifères juxtaposés. Ils sont souvent en contact les uns avec les autres et présentent des caractéristiques communes. Il s'agit d'aquifères discontinus ou semi-continus représentés par les franges altérées des roches saines et /ou par les réseaux de fractures et de fissures affectant la partie supérieure de ces roches. En l'état actuel des connaissances, un système aquifère en domaine de socle est à la fois un réservoir capable d'emmagasiner de l'eau provenant des pluies infiltrées, et un système conducteur permettant à cette eau de s'écouler en profondeur et de vidanger progressivement ce réservoir vers ses exutoires naturels que sont les rivières.

III. 1. Les aquifères du socle cristallin et du sédimentaire ancien

III. 1.1. Description des réservoirs :

En milieu cristallin, cristallophyllien et sédimentaire ancien, on peut distinguer deux ou trois types de réservoirs aux caractéristiques physiques et hydrogéologiques différentes : le réservoir supérieur d'altérite, les réservoirs de fissures et les réservoirs de failles ou de fractures majeures (Fig. 11-12).

III. 1.1.1. Réservoir supérieur d'altérites :

Le socle sain est recouvert, d'un manteau d'altération quasi continu dont l'épaisseur atteint couramment plusieurs dizaines de mètres. L'altération se fait sous l'action de phénomènes physico-chimiques dont les facteurs essentiels sont la pluviométrie et la température. En effet, sous l'action du climat tropical, caractérisé par des températures élevées et l'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide, les roches éruptives et les roches métamorphiques subissent une altération météorique qui les transforme en un complexe plus ou moins hétérogène de sables et d'argiles, d'épaisseur variable au-dessus du socle sain (Orange, 1990). Ce sont ces altérites qui constituent des réservoirs d'eau potentiels et qui forment de bons aquifères si leur épaisseur atteint au moins une dizaine de mètres. Cependant, la désintégration et l'altération des roches de socle sont rendues possibles grâce au pouvoir de pénétration de

l'eau, favorisé par la fracturation. Les produits d'altération du socle sont communément appelés « altérites » ; terme général qui couvre tous les horizons des formations altérées meubles. Les roches de socle lorsqu'elles sont altérées peuvent contenir des réserves importantes en eau souterraine. Ainsi, l'ensemble des altérites contient une « nappe unique » exploitable à différents niveaux. La nappe imprégnant l'ensemble des formations altérées dans un secteur est considérée comme un système hydraulique unique. La puissance des altérites au-dessus du niveau statique équivaut à la puissance de la nappe. Cependant, cette nappe est caractérisée par une extrême irrégularité due à une variation verticale des caractéristiques hydrogéologiques (niveau à perméabilité variable) et surtout horizontale liée à la variation du toit du substratum. (Fig. 12. 13).

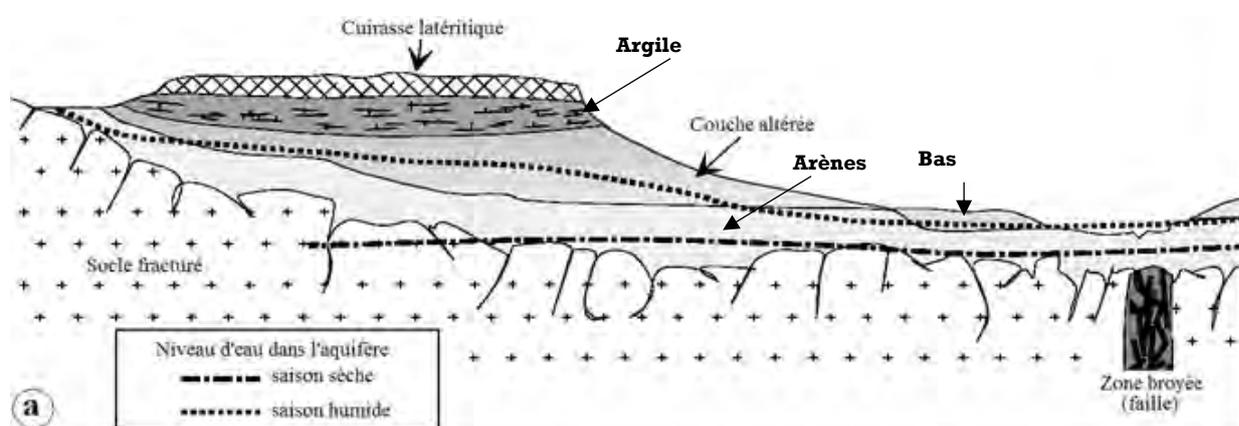


Figure 12. Coupe schématique des formations aquifères en région granitique (Guiraud, 1975)

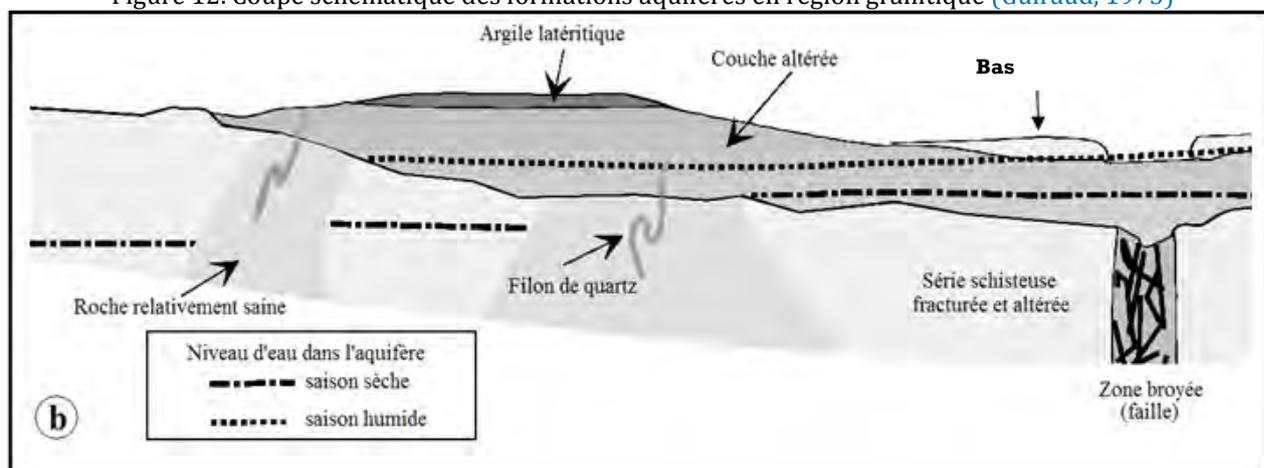


Figure 13. Coupe schématique de la tranche d'altération superficielle en région schisteuse (Guiraud 1975)

De l'examen des niveaux productifs, il ressort que les altérites en zone de socle renferment une nappe exploitable à différents niveaux. Dans le domaine granito-gneissique, les altérites contiennent des niveaux perméables qui peuvent être importants à l'échelle d'un village. Les altérites dans les terrains schisteux sont très argileuses et ne présentent pas d'intérêts majeurs, sauf cas d'existence d'intercalations détritiques (Compaoré, 1980.). Dans la majorité des cas,

les ouvrages qui exploitent les nappes d'altérites ne sont pas pérennes, car le niveau de l'eau descend très bas dans les zones fissurées pendant la saison sèche et elles sont couramment exploitées par les puits traditionnels.

III. 1.1.2. Réservoirs inférieurs

III. 1.1.2.1 Les réservoirs de fissures :

L'étude du profil d'altération a révélé que l'ensemble des altérites repose sur le substratum sain qui est fréquemment découpé sur une épaisseur variable par de nombreuses fissures. Ces fissures sont des micros fractures constituées de joints et de diaclases diverses qui emmagasinent l'eau. Les études et travaux effectués au cours de ces dernières années au Burkina et en Côte d'Ivoire ont montré clairement que les terrains métamorphiques et cristallins présentent presque tous, une frange superficielle dans laquelle des fissures décomprimées forment de bons aquifères lorsque les conditions topographiques sont favorables (CEFIGRE, 1990).



Photo 4. Affleurement de roche fracturée fissuré vers Gamon

La fissuration est un phénomène général dans le socle, elle peut affecter les terrains sur des épaisseurs variables en fonction de l'importance de la couverture altérée et de la tectonique locale. En effet, une fissuration importante sera observable au voisinage des fractures majeures. Les aquifères de fissures se comportent comme des milieux perméables « en grand », avec toutefois des perméabilités variables. Ainsi, dans ces aquifères on observe :

- des variations brusques du niveau dynamique qui traduisent l'existence de poches et de relations avec des réseaux secondaires. Ce dispositif rappelle un peu celui que l'on rencontre dans les aquifères de type karstique quoique la dissolution n'existe pas ici ;

-un niveau piézométrique complexe et virtuel. En effet, d'un système de fissure à un autre, il peut y avoir de grandes variations de perméabilité. La structure de l'aquifère explique les variations locales du niveau de l'eau d'un ouvrage à un autre (Compaoré, 1980).

III. 1.1.2.2 Les réservoirs de failles ou de fractures majeures

La présence de ces réservoirs est liée aux discontinuités affectant la roche. Ce terme générique utilisé ici pour inclure, les fractures, les plans de stratification, de clivages des roches, la schistosité, les zones de cisaillement, les failles et autres contacts géologiques, etc.

Nous nous intéressons ici aux nappes liées à la fracturation, en dehors des zones altérées et fissurées. En effet, l'étude de la fracturation a montré que les formations précambriennes sont par endroits, le siège d'accidents majeurs parfois jalonnés de filons. Ces accidents correspondent à des fractures multi kilométriques ou à des zones broyées dues à la tectonique. Les zones de discontinuité majeure constituent des zones de faiblesse ; elles correspondent à des axes drainants principaux et à perméabilité élevée, donc de bons aquifères (Compaoré, 1980). Du point de vue hydrogéologique, les fractures et discontinuités constituent les structures géologiques les plus importantes dans la circulation et le stockage des eaux en milieu de socle. La plupart des roches sont affectées par la fracturation liée aux failles et la présence de dykes qui peuvent jouer également un rôle de barrière à l'écoulement des eaux souterraines (Singhal et Gupta, 2010). Ces discontinuités (failles, joints, zones de cisaillement) constituent donc les principales voies d'écoulement des eaux dans les roches fracturées.

Les aquifères de fractures se comportent comme des milieux perméables « en grand ». Cependant, il y'a des variations liées à l'état de décomposition de la roche fracturée. En effet, il est généralement connu que l'altération progresse rapidement au droit des fractures, auquel cas on a d'épaisses altérites. Dans ces conditions, le milieu aquifère développe une perméabilité secondaire « en petit » liée à l'altération, mais l'écoulement souterrain est guidé par la fracture, ainsi, tout au long de la fracture le niveau piézométrique est continu. En ce qui concerne les zones broyées ou fissurées limitant les parois des failles, l'aquifère se comporte comme un aquifère de fissures.



Photo 5. Affleurement montrant des fractures conductrices vers Bakel à gauche et une faille à Soréto Sabouciré à droite

L'écoulement dans ces types de roche est essentiellement contrôlé par un certain nombre de facteurs tels que l'ouverture de la fracture, la rugosité des parois et l'interconnexion des fractures. Il est également noté que la perméabilité de la fracture baisse avec l'augmentation de la température. Lorsque la température augmente avec la profondeur, il se produit une dilatation thermique de la roche ce qui par voie de conséquence réduit l'ouverture de la fracture induisant ainsi une baisse de sa perméabilité. Outre la température, la perméabilité de la fracture est également affectée par : la cimentation, le remplissage secondaire, l'âge et l'altération de la roche (Singhal et Gupta, 2010).

Les fractures parallèles donnent une forte anisotropie à la masse rocheuse par contre, un grand nombre de fractures interconnectées tend à réduire l'anisotropie. Cependant, plus les paramètres, longueur, densité et ouverture des fractures sont importants, plus la conductivité hydraulique est élevée. Par conséquent, dans les études hydrogéologiques, il est extrêmement important de comprendre et de décrire la structure de la masse rocheuse et quantifier les types et la nature de ces discontinuités (van Golf-Racht 1982; Forte 1993; Lee et Farmer, 1993).

III.2. Les dépôts alluviaux

Les dépôts fluviaux sont caractérisés par des terrains typiques tels que : les cônes alluviaux, les plaines d'inondation, les terrasses alluviales, etc. Ils peuvent être identifiés sur les photos aériennes et les images satellitaires. Ces dépôts fluviaux forment des aquifères idéaux, car se localisant le long des vallées et dans les zones de même topographie présentant une recharge adéquate (Singhal & Gupta, 2010). Ils peuvent être constitués d'épais couches de gravier et de sable qui résultent du transport fluvial. Dans les zones arides ou semi-arides, ils peuvent posséder une humidité des sols relativement élevée et une végétation aux cimes vert sombre qui suivent les méandres des talwegs. Ces dépôts peuvent ainsi, constituer à l'échelle des

villages un niveau aquifère intéressant si les conditions topographiques sont favorables (pentes faibles). Dans certaines localités du Sénégal oriental, ils constituent les seules sources d'eau souterraine accessibles aux villageois à travers l'exploitation des « Céanes » ou (« bouli »).



Photo 6. Affleurement d'alluvions sur la rive gauche de la Gambie à Samékouta et au niveau de Sayansoutou rive gauche de la Falémé.

III.3. Sédiments consolidés

Ils regroupent le groupe des roches sédimentaires clastiques dont les plus communes sont : les grès, les siltites et les schistes. Elles se forment dans presque tous les environnements (maritime, fluvial, deltaïque, lacustre et éolien). Habituellement, les grès et les roches clastiques à grains fins (schistes et siltites) forment dans la plupart des séquences sédimentaires, des lits en alternance avec des épaisseurs variables. Bien que les grès étant plus perméables, ils ont un intérêt principal en tant que source d'approvisionnement en eau, mais leur potentiel ainsi que la qualité de l'eau sont fortement influencés par la composition du matériau de cimentation intergranulaire et les propriétés des schistes et siltites intercalées. Les grès étant les plus résistants à l'érosion forment généralement les collines, les crêtes et les escarpements tandis que les schistes s'érodent facilement pour former les pentes des collines et des vallées. Pour la même raison, les grès ont une densité de drainage faible à moyenne, mais dans les schistes la densité de drainage est élevée favorisant ainsi le développement d'un réseau de drainage de type rectangulaire ou angulaire en raison des discontinuités de la roche.

III.4. Les grès

Les propriétés hydrogéologiques (porosité et perméabilité) de grès dépendent de leurs caractéristiques, qui à leur tour sont influencées par les milieux de dépôt et les modifications ultérieures dues à la cimentation, la consolidation et la fracturation. La porosité, la conductivité hydraulique et le débit spécifique des grès sont inférieurs à celui des sables en raison de la

compaction et de la cimentation. Les matériaux de cimentation sont soit des argiles, les carbonates, de la silice ou des oxydes de fer. Cependant, la dureté des grès dépend du degré de compactage qui dépend de la profondeur d'enfouissement et de l'âge. Ainsi, la porosité des grès diminue systématiquement avec la profondeur et l'âge. Les grès mal cimentés peuvent avoir une porosité d'environ 35%. La conductivité hydraulique des grès peut varier de 1.10^{-6} à 1.10^{-4} m. s⁻¹ à 10^{-4} m. s⁻¹. Généralement, les grès âgés ont une plus faible porosité et une faible conductivité hydraulique due à une plus grande compaction et cimentation, mais il existe quelques exceptions. La stratification leur confère aussi une anisotropie ce qui fait que, la conductivité hydraulique le long du plan de stratification est généralement supérieure celle qui la traverse. Au niveau des grès de Bérée aux Etats-Unis par exemple, la perméabilité parallèle au litage est environ quatre fois plus élevée que la perméabilité à la normale du litage (Lee et Farmer, 1993). A d'autres endroits, la fracturation peut conférer une conductivité verticale élevée. Dans les grès bien cimentés, la perméabilité intergranulaire est négligeable, mais la perméabilité secondaire due à la fracturation peut être très importante. La fracturation des grès pourrait se développer en raison des mouvements tectoniques ou aux contacts avec des dykes de dolérite. Cependant, les grès du Sénégal oriental présentent les débits de forage les plus intéressants (10 m³/h en moyenne, 6,5 m³/h si on considère la valeur médiane). La minéralisation est très faible (143 mg/l en moyenne) et la profondeur de foration semble faible (43 m en moyenne ; cette valeur est à confirmer sur un nombre de forages plus important) (Wuillemier et al., 2010).



Photo 7. Affleurement de grès de la Falémé et des grès rouges du Boundou

III.5. Schistes et Siltites

Roches clastiques argileuses à grains fins, les schistes et siltites sont formés par compactage et lithification des dépôts d'argile et de boue. La porosité des argiles et boues fraîchement

déposées, est élevée (50-80 %), mais en raison du compactage à l'enfouissement, les porosités sont réduites à moins de 30%. Les schistes présentent généralement des porosités de l'ordre de 1,5 à 2,5 %. La perméabilité intergranulaire dans les schistes reste faible (10^{-13} - 10^{-9} m. s⁻¹), de sorte que la vitesse d'écoulement des eaux souterraines dans les schistes intacts reste très faible quelques centimètres par siècle (Singhal & Gupta, 2010). Les perméabilités des schistes dépendent de la porosité, de la minéralogie des argiles, leur teneur en argile et leur texture. Les perméabilités dépendent aussi de la composition du fluide qui affecte le gonflement des argiles. Les forages captant cette entité présentent un débit moyen de l'ordre de 4 m³/h en moyenne. Au niveau de ces formations, les valeurs maximales rencontrées sont sensiblement inférieures à celles rencontrées au niveau des formations gréseuses ce qui est cohérent avec la présence d'une épaisseur d'altérites argileuses plus importante.



Photo 8. Schiste vers Sounkounkoun et Schistes altérés vers Gamon

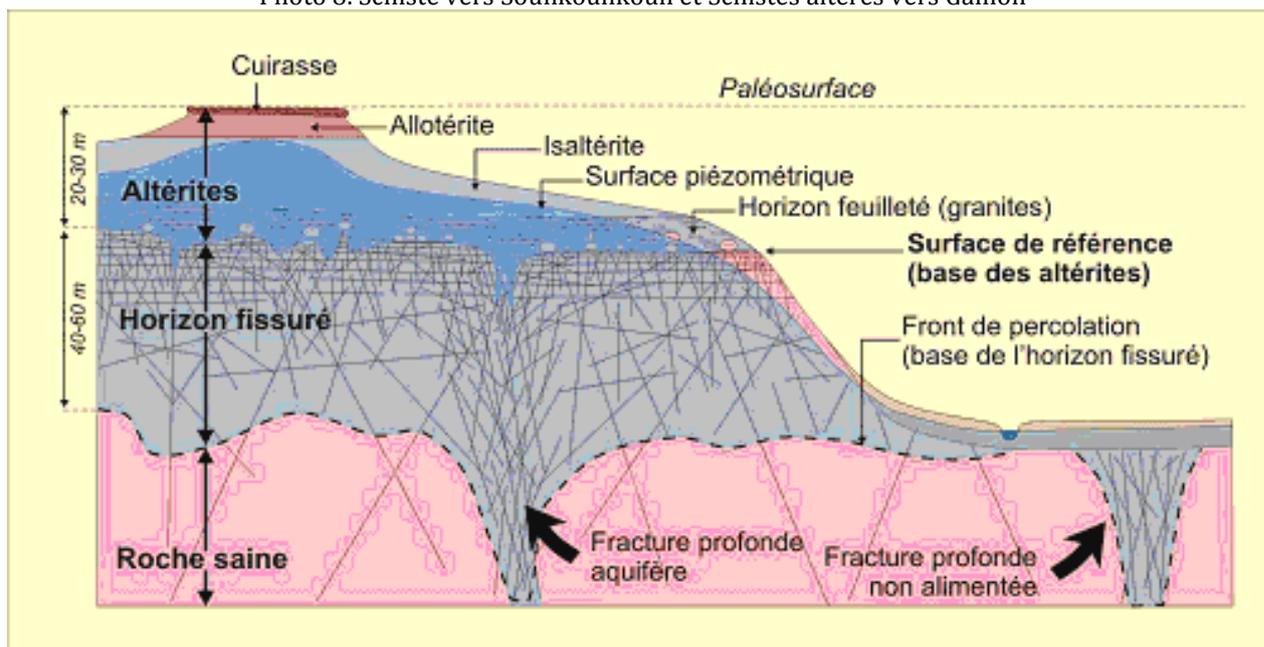


Figure 14 Schéma conceptuel moderne d'un système aquifère de socle (Wyns, Lachassagne & al., 2005)

III.6. CONCLUSION.

La conception moderne du fonctionnement des aquifères de socle développée par [Wyns et Lachassagne \(2005\)](#) (Fig.14), montre que ces deux niveaux (altérés et fissurés) conjuguent leurs deux fonctions conductrice et réservoir qui sont le plus souvent séparées :

- le rôle de réservoir assuré principalement par les produits de l'altération de la roche en place, commençant depuis le niveau du sol jusqu'à parfois plusieurs dizaines de mètres de profondeur (ce qu'on appelle les altérites, composées de matériaux argileux et sableux);
- le rôle de système conducteur assuré surtout par le réseau de fissures et de fractures existant au bas des altérites, dans la roche «saine», ou moins dégradée par l'altération.

En domaine de socle, les eaux souterraines sont donc situées au sein de ces deux unités aquifères superposées en contact permanent : celui des altérites et celui du milieu fissuré.

Ainsi, selon ces auteurs, dans les régions de socle, ces trois importantes zones aquifères (les zones d'altérites, de fissures et de fractures majeures) constituent un aquifère composite, dont les propriétés hydrodynamiques sont optimales dans les secteurs où les trois compartiments décrits sont présents et où ils combinent au mieux leurs caractéristiques hydrodynamiques. Ainsi, les différents niveaux aquifères observés en milieu de socle présentent des productivités très variables contrôlées par différents facteurs dont la tectonique et l'altération restent les plus importantes. Des gammes de perméabilités très variables sont souvent observées dans les mêmes types de formations géologiques ce qui explique que la nature lithologique du terrain n'est pas seulement le facteur déterminant dans la mise en place de réservoirs aquifère en milieu cristallin.

CHAPITRE IV : ETUDE DES PARAMETRES CLIMATIQUES ET LEURS IMPACTS SUR LES RESSOURCES EN EAU.

IV.1. Généralités sur le climat de la région

L'étude du climat d'une région est fondamentale dans l'évaluation de ses ressources en eau. Cependant, le climat d'une région est déterminé par la circulation des masses d'air qui contrôle la dynamique aérologique globale qui à son tour influe sur la répartition et la durée des saisons dans des latitudes données. Ainsi, l'Afrique de l'Ouest est caractérisée par une alternance de deux saisons : une saison sèche et une saison pluvieuse ou encore hivernage. La répartition de l'année en saisons est assujettie aux interactions de deux types de circulations aériennes : l'Harmattan, chaud et sec en provenance de l'anticyclone saharien, et la Mousson, chaude et humide issue de l'Atlantique sud. L'interface de ces deux masses d'air est le Front Intertropical (FIT) ; sa trace au sol constitue l'équateur météorologique. Les déplacements du FIT sont déterminés, au cours de l'année, par les positions respectives des centres de haute pression. Ils évoluent en un mouvement de bascule entre deux extrêmes (Orange, 1990) (fig.15). La région se trouve dans le domaine climatique soudano-guinéen. Elle est soumise à l'harmattan pendant 07 mois, de décembre à juin. Les températures dépassent très souvent les 40° à l'ombre au mois de mai. La saison des pluies ou hivernage débute à la mi-mai et se termine au mois de septembre, soit une durée de 5 mois.

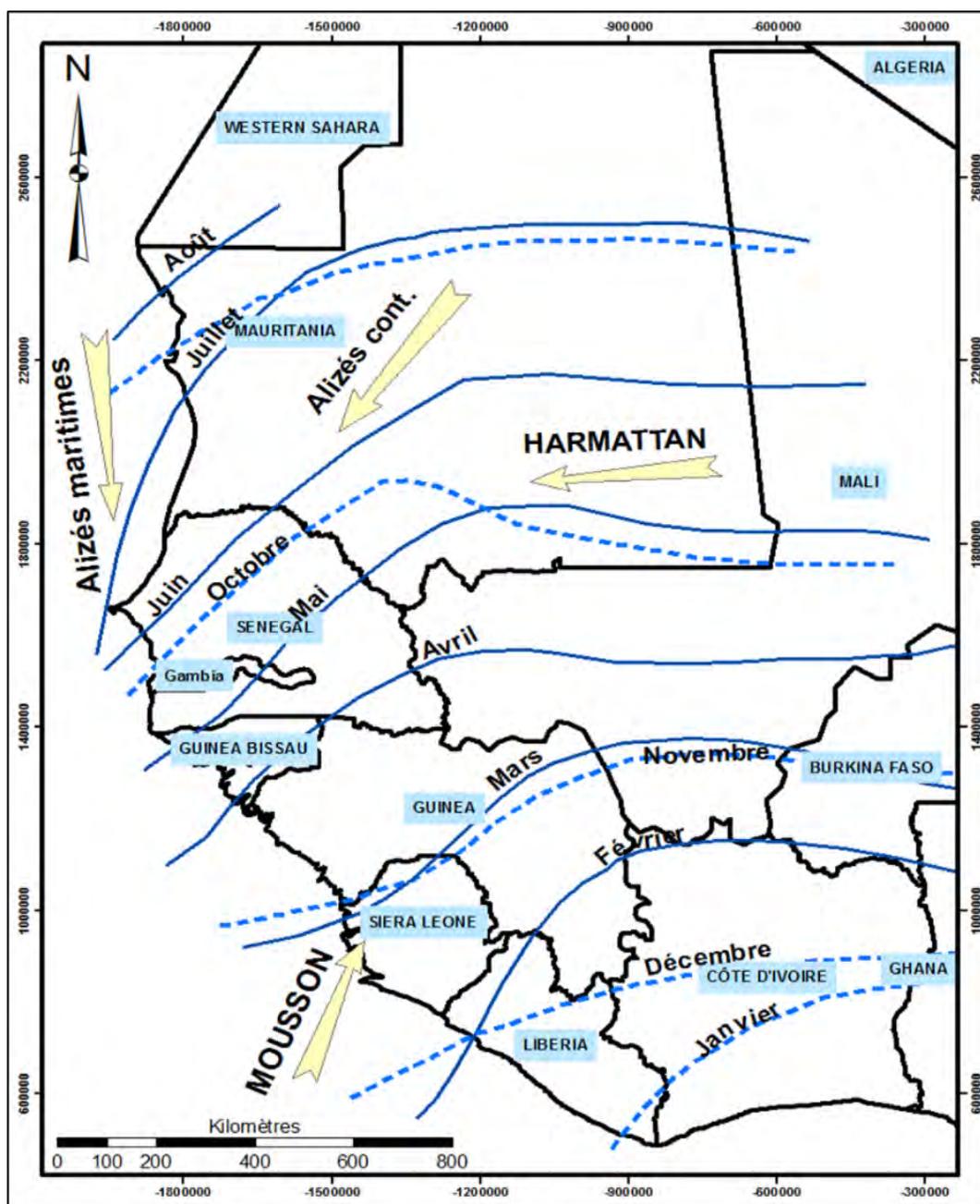


Figure 15. Déplacements du Front Intertropical pendant l'année (MICHEL, 1973).

Au Sénégal Oriental les pluies arrivent à partir de la fin du mois d'avril et se poursuivent jusqu'en fin octobre début novembre (Fig.15). La région est cependant, caractérisée par une zonalité climatique avec un passage progressif du sud au nord d'un climat soudanien vers un climat sahélo-soudanien.

-Le climat sahélo-soudanien qui règne au nord est marqué par une saison des pluies qui s'étend de juin à octobre, avec une pluviométrie de l'ordre de 500mm à Bakel dont le maximum d'intensité est observé en Août ;

-Au sud domine le climat soudanien caractérisé par une saison des pluies de juin à novembre et une pluviométrie de l'ordre de 1200 mm à Kédougou avec le maximum d'intensité des pluies

en août. La température suit à peu près les mêmes variations dans les deux provinces climatiques, avec des maxima plus élevés pour le type sahélo-soudanien. L'évaporation croît du sud vers le nord, et on assiste à un assèchement plus précoce des réserves de surface dans la province sahélo-soudanienne où les cours d'eau sont à sec, sans trace d'eau stagnante dès le mois de février. (Camus et Debuissou, 1964).

IV.2. La pluviométrie

La région est comprise entre les isohyètes 450 et 1200 mm, ce qui la place parmi les régions les plus pluvieuses du pays (ANSDS, 2010). Les données pluviométriques qui ont été recueillies à l'Agence nationale de la météorologie du Sénégal concernent la période 1970 à 2009. Les relevés mensuelles ont permis de calculer les moyennes pluviométriques mensuelles sur 40 années d'observation. Ainsi, les données de trois stations, Kédougou, Tambacounda et Bakel ont été utilisées pour caractériser l'évolution spatio-temporelle de la pluviométrie dans la zone d'étude. Cette pluviométrie montre une très grande irrégularité dans l'espace et dans le temps et est marquée par des variations interannuelles très nettes caractérisées par des alternances d'années excédentaires, normales et déficitaires (fig.16). Cette variabilité de la pluviométrie est observée au niveau des trois stations (Kédougou, Tambacounda et Bakel).

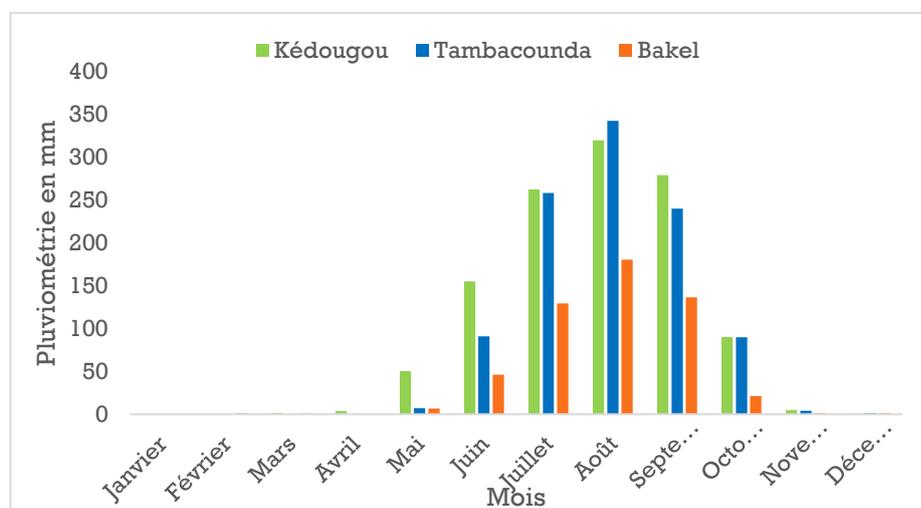


Figure 16. Pluviométrie moyenne mensuelle à Kédougou de 1970 à 2009

Globalement, la pluviométrie est plus importante à Kédougou qu'à Tambacounda et à Bakel durant tous les autres mois pluvieux. Toutefois, pendant le mois d'août, le maximum de précipitation est enregistré à la station de Tambacounda.

Le graphique des variations interannuelles pour les trois stations (fig. 17), permet de voir que les fluctuations des hauteurs annuelles ne sont pas uniformes et suivant les zones une même année peut être excédentaire à Kédougou et déficitaire à Bakel. C'est le cas de l'année 2001, elle

a été excédentaire à Kédougou mais très déficitaire à Tambacounda et normale à Bakel. Le calcul des écarts pluviométriques nous a permis également de délimiter les périodes normales, excédentaires, et déficitaires.

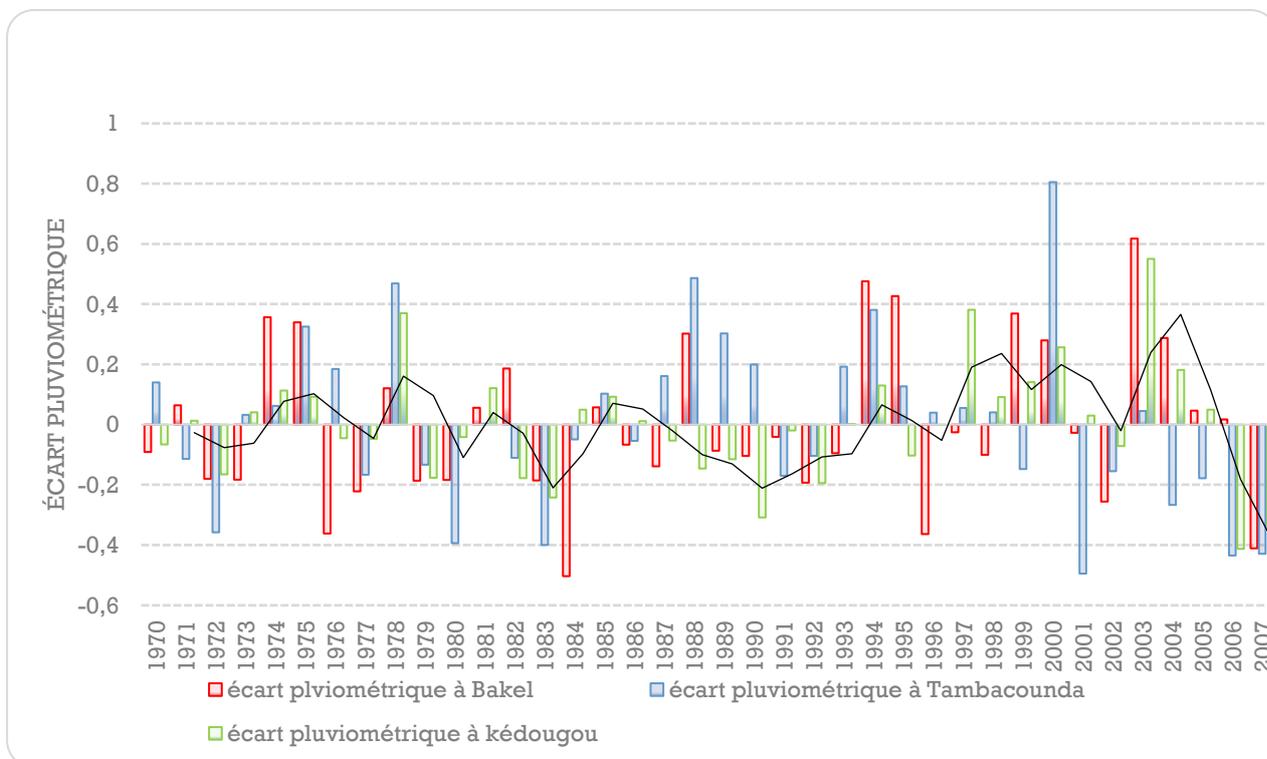


Figure 17. Écarts pluviométriques annuels dans les stations de Kédougou, Tambacounda et Bakel (1970-2009)

L'écart pluviométrique E est donné par la formule :

$$E = \frac{x - \bar{x}}{\bar{x}}$$

x = cumul pluviométrique annuel ;

\bar{x} = moyenne pluviométrique annuelle de la série

Tableau 1. Moyenne pluviométrique décennale au niveau des stations de Bakel Tambacounda et Kédougou

Moyennes	1970-79	1980-89	1990-99	2000-09	1970-09
Bakel	485	474	520	613	499
Tambacounda	1066	1026	1083	872	1060
Kédougou	1179	1106	1178	1198	1165

Les variabilités pluviométriques sont plus marquées dans le domaine sahélo-soudanien. Les moyennes décennales des pluies sont plus stables à la station de Kédougou qui montre de très faibles variations, alors qu'à Bakel les différences peuvent être très nettes c'est le cas de la décennie (1970-79) comparée à la décennie (2000-09).

IV.3. La Température

Les variations saisonnières des moyennes mensuelles de la température dans les trois stations permettent de diviser l'année en trois périodes :

Une période de saison sèche et fraîche allant de décembre à février,

Une période de saison sèche et chaude de mars à mai ;

Une période de saison des pluies de juin à novembre.

Les températures moyennes annuelles de la période 1970-2009 évoluent globalement entre 25 °C et 35 °C, avec une moyenne interannuelle égale à 25°C au cours des mois de décembre et janvier (saison sèche). Cependant l'arrivée des pluies contribue à adoucir les températures durant l'hivernage surtout pendant les mois de juillet et Août. En moyenne, les minima sont de l'ordre de 25 °C et les maxima tournent autour de 35 °C. On note cependant les plus faibles valeurs de Température en décembre janvier dans toutes les stations (Fig.18). Ces températures évoluent en fonction de la latitude. Elles restent plus élevées dans la partie nord du pays avec des pics de température pouvant atteindre 45°C pendant les mois d'avril et mai.

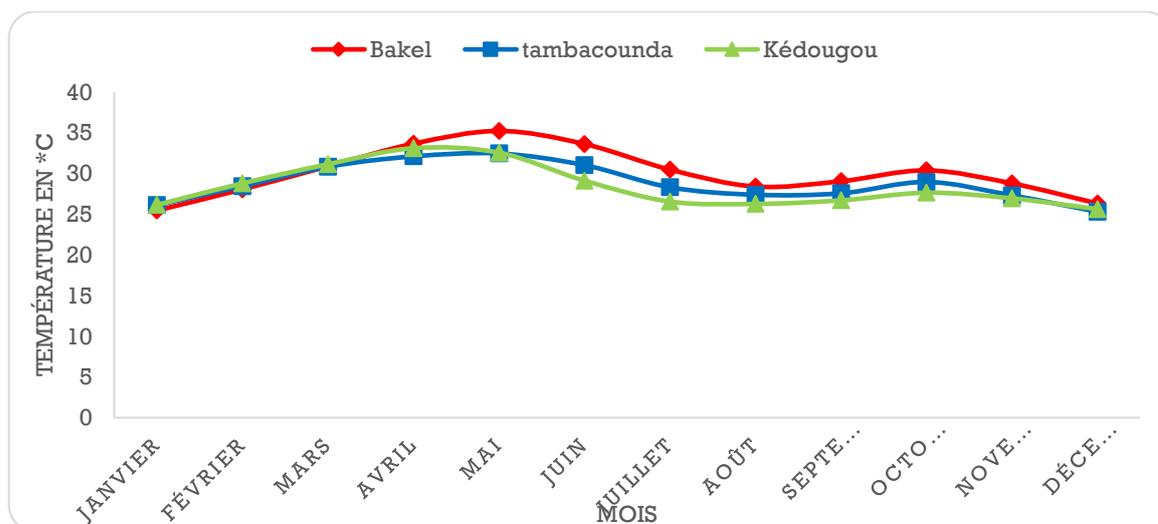


Figure 18. Évolution des températures moyennes mensuelles à Bakel, Tambacounda et Kédougou (1970-2009)

IV.4. L'humidité relative

L'évolution de l'humidité relative (Fig.19) au cours de l'année montre deux rythmes saisonniers. Pendant l'hivernage de juin à octobre, l'humidité est plus élevée avec une valeur maximale comprise entre 70 et 80 % en Août dans les trois stations (Kédougou, Bakel, Tambacounda). Cependant les minima sont observés durant la saison sèche (novembre à mai) et se situent entre 20 et 30 % de janvier à mars. Les valeurs d'humidité relative varient dans le même sens que celles des précipitations.

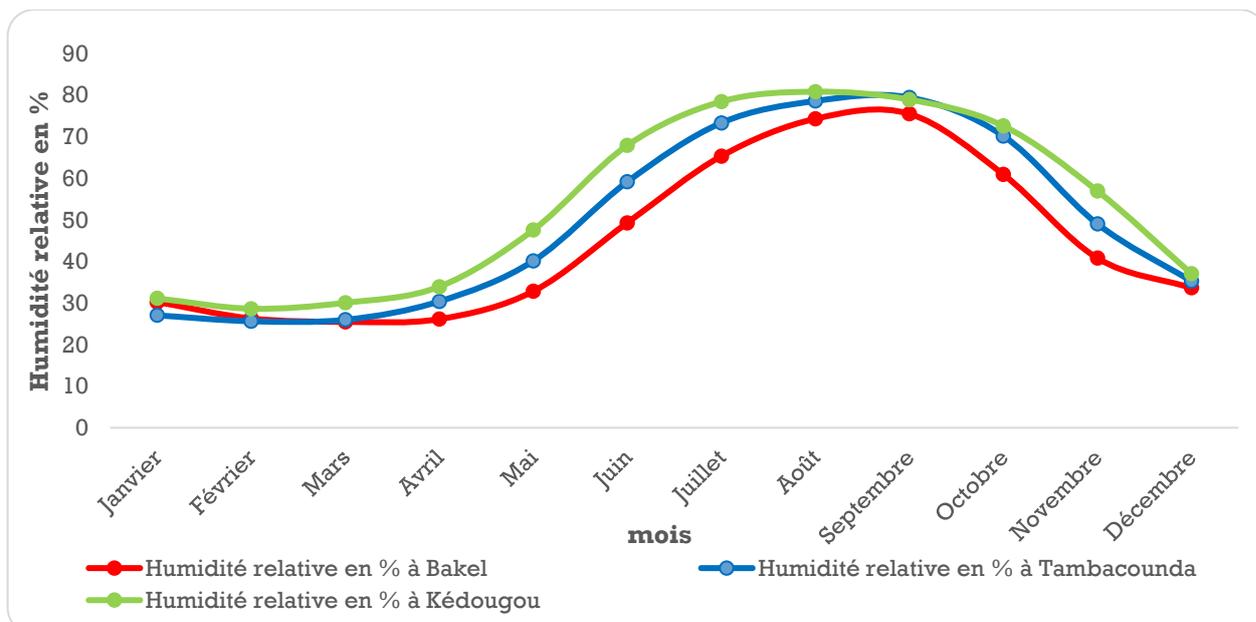


Figure 19. Évolution de l’humidité relative moyenne mensuelle dans les stations de Bakel, Tambacounda et Kédougou (1970-2009)

IV.5. L’évaporation

Les données enregistrées sur l’évaporation Piche (fig. 20) montrent que celles-ci croissent du sud au nord, et les minima se situent au cœur de l’hivernage tandis que les périodes d’évaporation maximale ont lieu en fin de saison sèche et sont plus marquées dans la province soudano-sahélienne. Elle peut atteindre 14 mm/Jour à la station de Bakel durant les mois d’avril et de mai (Fin de la saison sèche correspondant aux mois les plus chauds).

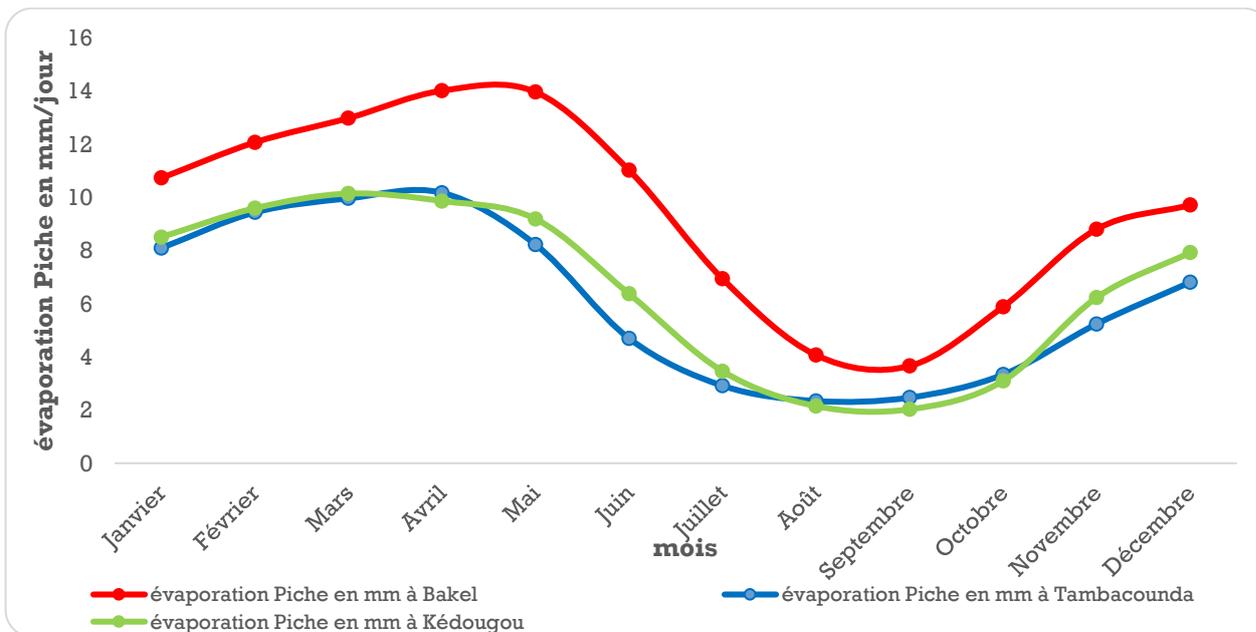


Figure 20. Évolution de l’évaporation moyenne mensuelle à Bakel, Tambacounda et Kédougou (1970-2009)

IV.6. Calcul du bilan hydrologique

Les méthodes de calcul de l'ETP se font le plus souvent en utilisant les méthodes de Penman et de Thornthwaite. Cependant, selon Remenieras (1980 In Kouamé, 1999), la méthode de Penman tend à surestimer l'évaporation. Quant à la méthode de Thornthwaite, elle n'est pas adaptée aux régions tropicales humides où les températures restent généralement stables. Les phénomènes d'évaporation sont par conséquent très influencés par les variations dues à la radiation solaire (Kouamé, 1999). Ainsi dans le cadre de cette thèse nous avons appliqué la méthode d'estimation de l'ETP développée par Camus et Debuissou (1964). Les valeurs moyennes d'ETP mensuelle nous ont permis d'estimer le bilan au niveau des stations de Kédougou au Sud et Bakel à l'extrême nord (Tableau. 2).

Les principaux éléments du bilan sont : la pluie P, l'ETR, l'ETP, la RU et RFU

Evapotranspiration réelle (ETR)

L'Evapotranspiration réelle (ETR) désigne la valeur effective de l'évaporation dans les conditions d'humidité du sol de la région. Elle est estimée à partir de la réserve utilisable du sol (RU). La réserve utilisable du sol (RU) est définie comme étant la quantité d'eau mobilisable par l'évapotranspiration. Ce paramètre possède deux limites. La limite supérieure représente la quantité maximale d'eau que le sol peut retenir par capillarité. Quant à la limite inférieure, elle correspond aux conditions dans lesquelles le point de flétrissement des végétaux est atteint. En effet, les forces de succion des racines sont insuffisantes pour l'extraction de l'eau contenue dans le sol. Lorsque l'effet de la sécheresse est très accentué, les plantes sont soumises à un stress hydrique et leur activité de transpiration baisse. Il faut donc définir la réserve facilement utilisable (RFU) par le couvert végétal. Cette réserve (RFU) varie en fonction du type de sol et correspond globalement à la moitié de la réserve utilisable du sol. Elle a été fixée à 100 pour le calcul du bilan hydrologique.

- Si $P < ETP$, l'évapotranspiration réelle (ETR) se fait, non seulement sur les précipitations, mais aussi sur les réserves d'eau facilement utilisables du sol. Cette situation correspond à la saison sèche qui s'étend de novembre à Mai Juin selon la station. Les précipitations moyennes mensuelles enregistrées au courant de ces mois sont de l'ordre de 0, 0, 1, 4, 50, 5 et 1 mm à Kédougou et 0, 1, 1, 0, 7, 46, 21, 1 et 1 mm à Bakel. Cependant, les valeurs de l'évapotranspiration ETP respective étant toujours supérieures sont estimées respectivement à 89, 78, 109, 115, 117, 82 et 74 mm à Kédougou et 150, 144, 183, 196, 203, 160, 85, 110 et 137 mm au niveau de Bakel. Dans ce cas les réserves facilement utilisables du sol sont partiellement,

puis totalement utilisées. De plus, les besoins en eau des plantes sont accentués par la forte transpiration.

- Si $P > ETP$ (P étant la précipitation), alors $ETR = ETP$. L'excédent des précipitations augmente les réserves du sol jusqu'à sa saturation. Le surplus de réserve utile S est utilisé pour l'alimentation des nappes d'eaux souterraines ou bien pour l'écoulement de surface. Cette situation prévaut durant la saison pluvieuse dans les deux stations, elle dure 5 mois à Kédougou ($P = 155, 262, 319, 279, 90$ mm à Kédougou) alors qu'elle est de 3 mois à Bakel avec ($P = 129, 180$ et 136 mm à Bakel) contre respectivement des valeurs d'ETP de $91, 91, 83, 70$ et 80 , mm à Kédougou et ETP à Bakel de $88, 66$ et 53 mm. Dans ce cas, l'évapotranspiration se réalise sans difficulté ($ETR = ETP$). Les réserves du sol se reconstituent pour atteindre la saturation qui dure 8 mois à Kédougou et 10 mois à Bakel. L'excédent de pluie se répartit en deux parts : une partie qui alimente le réseau hydrographique et une autre partie qui recharge les systèmes aquifères.

Tableau 2. Bilan hydrologique à la station de Kédougou

	Janv	Fev	mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
Précipitation	0	0	1	4	50	155	262	319	279	90	5	1	1166
ETP moyen (mm)	89	78	109	115	117	91	91	83	70	80	82	74	1007
ETR (mm)	0	0	1	4	50	91	91	83	70	80	82	24	578
Réserve du sol Ri (mm)	0	0	0	0	0	64	100	100	100	100	23	0	487
Variation de RFU	0	0	0	0	0	64	36	0	0	0	-77	-23	0
Déficit du bilan ETP-ETR	89	78	108	112	67	0	0	0	0	0	0	50	503
P-ETP	-89	-78	-108	-112	-67	64	170	236	209	10	-77	-73	86
Excédent du bilan P-ETR	0	0	0	0	0	64	170	236	209	10	-77	-23	589
Surplus S(mm)	0	0	0	0	0	0	134	236	209	10	0	0	589
Écoulement	0	0	0	0	0	0	67	151	179	95	0	0	492

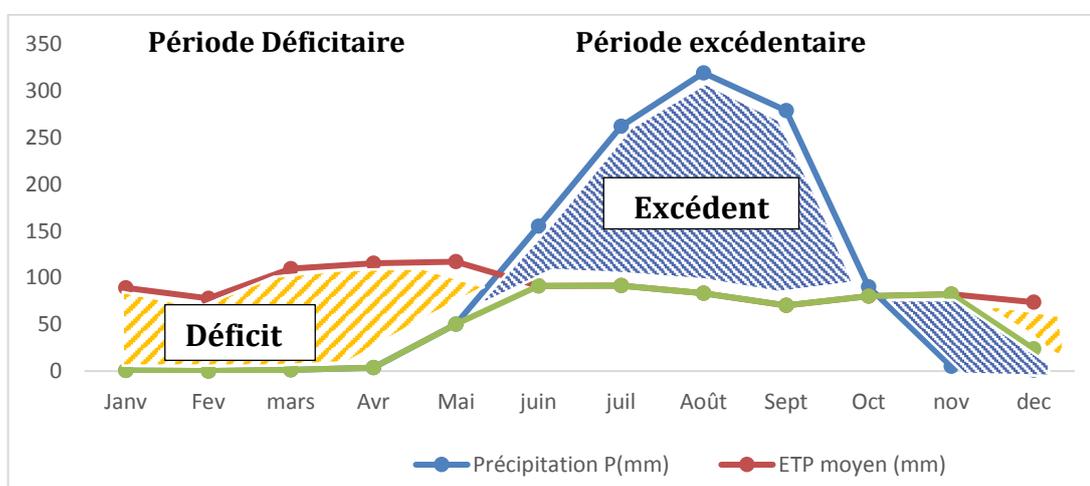


Figure 21. Principaux paramètres du bilan hydrologique moyen à Kédougou (1970-2009)

Tableau 3. Tableau. Bilan hydrologique à la station de Bakel

	Janv.	Fév.	mars	Avr.	Mai	juin	juil.	Août	Sept	Oct.	nov.	déc.	Total
Précipitation P	0	1	1	0	7	46	129	180	136	21	1	1	524
ÉTP moyen (mm)	150	144	183	196	203	160	88	66	53	85	110	137	1574
ETR (mm)	0	1	1	0	7	46	88	66	53	85	37	1	385
Réserve du sol Ri (mm)	0	0	0	0	0	0	41	100	100	36	0	0	277
Variation de RFU	0	0	0	0	0	0	41	59	0	-64	-36	0	0
Déficit du bilan ETP-ETR	150	143	182	196	196	114	0	0	0	0	73	136	1189
P-ETP	-150	-143	-182	-196	-196	-114	41	114	83	-64	-109	-136	-1050
Excédent du bilan P-ETR	0	0	0	0	0	0	41	114	83	-64	-36	0	138
Surplus S(mm)	0	0	0	0	0	0	0	56	83	0	0	0	138
Ecoulement	0	0	0	0	0	0	0	28	55	28	0	0	111

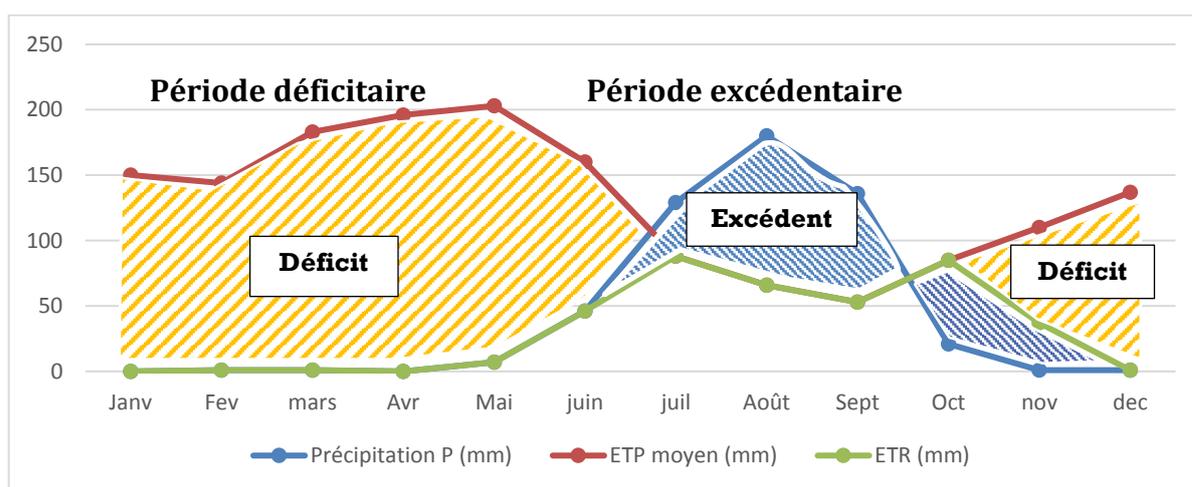


Figure 22. Principaux paramètres du bilan hydrologique moyen à Bakel (1970-2009)

Le bilan hydrologique (Tableaux 4-5) montre que le surplus est quatre fois supérieur à la station de Kédougou qu'à Bakel avec respectivement des valeurs 492 mm et 111 mm. Il constitue 42% des précipitations à Kédougou et 26% des précipitations à Bakel. Ces valeurs constituent la part des précipitations qui contribue l'écoulement de surface (ruissellement) et à la recharge des nappes. Ainsi, les résultats du bilan montrent que la partie sud de la zone de socle du Sénégal oriental constitue la zone privilégiée d'alimentation de ces nappes de socle dont la recharge reste très tributaire des facteurs hydroclimatiques principalement les précipitations, la recharge peut être ainsi estimée à 246 mm par an à Kédougou alors que dans la partie nord au niveau de Bakel elle n'est que de 55 mm par an. Cette recharge se fait

principalement durant les mois d'août, de septembre et d'octobre dans les deux provinces climatiques. Cela est confirmé par l'évolution des crues des fleuves Gambie et Sénégal au niveau des stations de Kédougou et Bakel (Fig.23-24). Les courbes de débits du fleuve Gambie à Kédougou et hauteurs de lame d'eau à Bakel montrent que l'essentiel de l'écoulement se produit entre juillet et Novembre, ce qui est en parfaite conformité avec les résultats du bilan qui montre que l'excédent du bilan apparaît dès juillet, mais l'écoulement véritable survient entre août, septembre et octobre durant lesquels le maximum est toujours noté en septembre aussi bien dans le sud à Kédougou qu'au nord à la station de Bakel. Les données montrent également une variabilité interannuelle, mensuelle et même journalière des écoulements enregistrés au niveau de ces deux grands cours d'eau qui sont fortement tributaires des précipitations dans la zone. Les années 2003-2004 et 2006-2007 ont été marquées par de grandes crues dans les deux stations par contre l'année 2000-2001 a été une année sèche où il a été noté les valeurs de crue les plus faibles dans les deux stations pour la période.

Concernant les eaux souterraines, la figure 25 montre une nette variation des niveaux de nappes entre le mois de janvier 2011 et Novembre 2011. Durant cette campagne de Novembre (fin saison pluvieuse), il y'a une remontée très nette des niveaux d'eau sur tous les ouvrages localisés sur la nappe d'altérite. Si nous considérons un transect SSO-NNE allant de Kédougou à Sabodala passant par Tinkoto, il apparaît une différence très nette des niveaux entre la partie sud où les niveaux dépassent rarement 10 m et la partie nord où les niveaux dépassent souvent 20 m au niveau de Sabodala. Les plus faibles niveaux observés à Tinkoto sont du fait que ces ouvrages captent la nappe alluviale et les niveaux d'eau sont toujours inférieurs à 5 m quelques soit la saison. Cette particularité observée à Tinkoto est expliquée par le fait que la rivière contribue à la recharge de cette nappe alluviale.

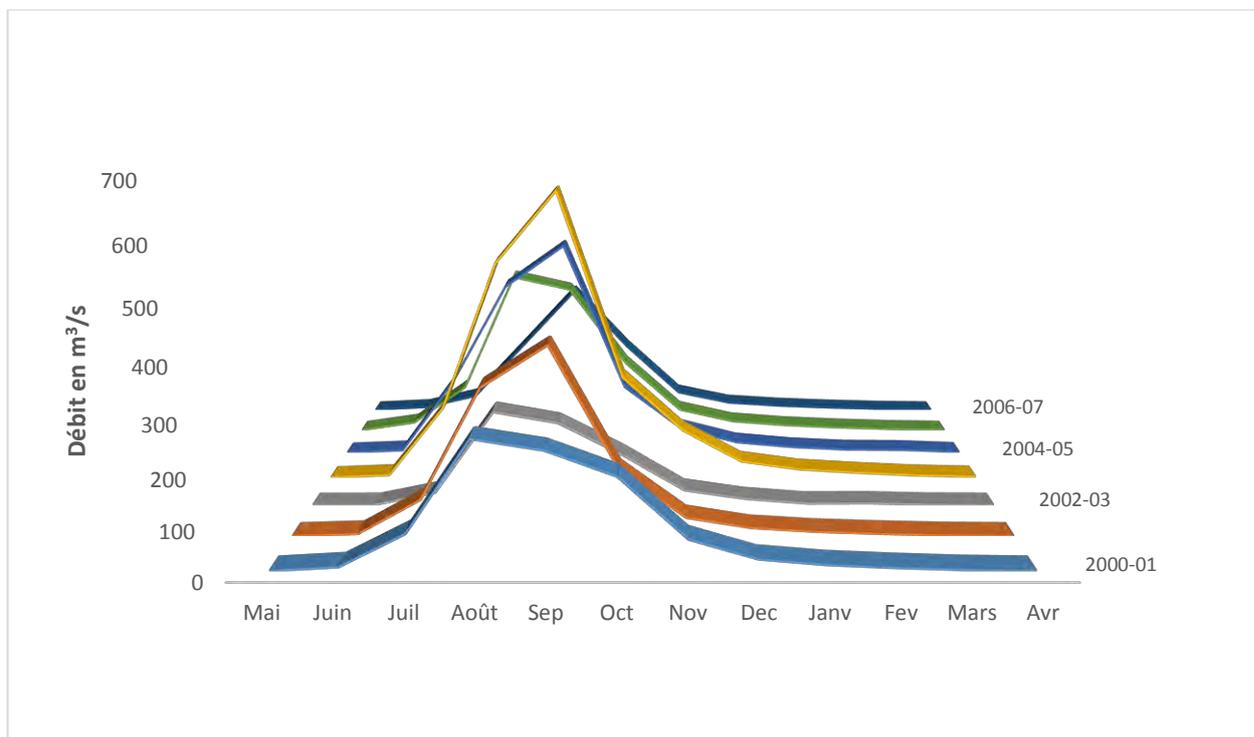


Figure 23. Débits moyens mensuels de la Gambie à la station de Kédougou (2001-07) (Source DGPRES)

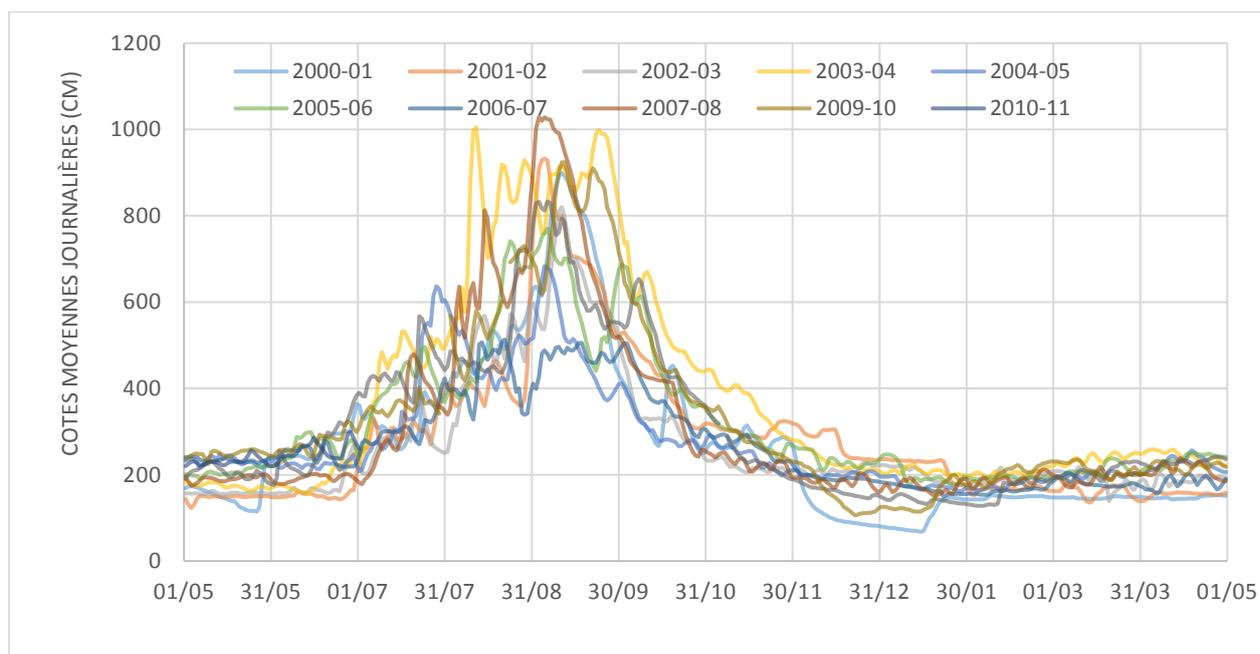


Figure 24. Cotes moyennes journalières du fleuve Sénégal à la station de Bakel de (2000 à 2011) (Source DGPRES)

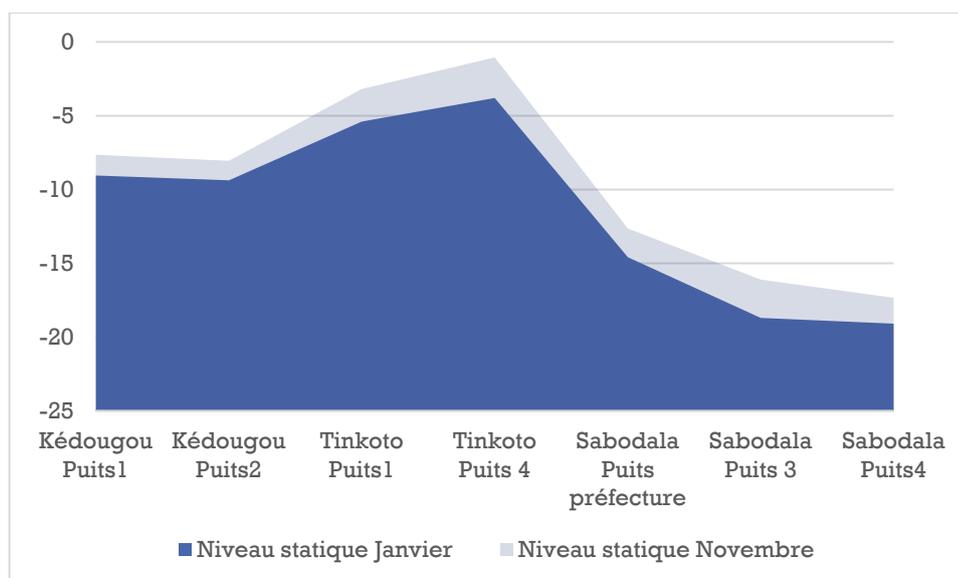


Figure 25. Profondeur de l'eau par rapport au sol en m de Janvier et Novembre 2011

IV.7 CONCLUSION :

Cette étude du bilan hydrologique au Sénégal oriental a pu mettre en évidence l'importance des pluies dans la constitution des réserves d'eau souterraine et leur contribution dans le maintien à un état permanent de l'écoulement des eaux de surface au niveau des grands bassins de la Gambie et du Sénégal. Les résultats montrent que les déficits sont moins marqués dans la zone soudano-sahélienne que dans la zone sahélienne où ils s'étalent sur une période de huit mois durant l'année hydrologique. Par contre, dans la zone soudano-sahélienne il s'étend sur six mois. Cependant, dans ces zones de socle, l'alimentation des nappes est fortement tributaire des facteurs climatiques. Selon Archambault (1974), au Sénégal Oriental les nappes se rechargent par infiltration directe à partir des pluies. Cependant, la tranche de pluies disponible à cet effet diminue très rapidement du Sud au Nord et les sept mois de saison sèche, se traduisent par une intense évapotranspiration. Selon Orange (1990), dans cette zone, pour que les nappes puissent se constituer et persister, il est nécessaire que la pluviométrie annuelle soit suffisante pour les recharger. Cette alimentation suppose que la hauteur des pluies excède la hauteur évapotranspirée en surface (interception par la végétation et évaporation au sol) et le déficit d'humidité du sous-sol dû à l'évaporation différée (prélèvements par les racines des végétaux, évaporation souterraine). En effet, toute la lame de pluie qui s'infiltré est vite absorbée par les capillaires fins tant que ceux-ci ne sont pas saturés : l'alimentation des nappes n'intervient qu'après la saturation des terrains qui les recouvrent et cette saturation consomme beaucoup d'eau dans les régions tropicales à longues saisons sèches. Le seuil de pluies annuelles à partir duquel l'infiltration alimente les nappes est variable selon les zones bioclimatiques. Il est minimum quand les pluies sont très concentrées dans le temps et que le

sol est à la fois nu et perméable (zones arides à placages superficiels de sable). Il est maximum quand les pluies sont étalées et que le sol est recouvert d'une végétation consommatrice de grosse quantité d'eau (zone tropicale humide forestière) (DEGALLIER, 1965 ; LELONG, 1966). Dans ce cas, la tranche de pluie qui contribue à la recharge des nappes doit elle-même être minorée puisqu'une partie de l'eau infiltrée est récupérée au cours de la saison sèche par l'atmosphère. Ce qui fait que l'évaluation de l'alimentation des nappes dans les régions sahéliennes nécessite une extrême prudence, d'où la nécessité de bien prendre en compte le facteur pluie dans l'étude des potentialités aquifère dans la zone de socle du Sénégal oriental.

**DEUXIÈME PARTIE : EVALUATION QUANTITATIVE DES
RESSOURCES EN EAU DANS LES TERRAINS BIRIMIENS DU
SENEGAL ORIENTAL.**

CHAPITRE V : EVALUATION QUANTITATIVE DES RESSOURCE EN EAU DANS LE BIRIMIEN.

Ce chapitre est consacré à l'évaluation des potentialités aquifère du Sénégal oriental et se base sur l'application combinée des outils de télédétection et des SIG pour mettre en évidence les zones favorables à l'implantation de forages. Cependant, avant d'aborder le sujet proprement dit, nous avons développé quelques généralités sur la télédétection et les SIG (principe de la télédétection et la mise en œuvre de l'analyse multicritère SIG).

V.1 Généralité sur la Télédétection et des SIG

V.1.1. Définition

La télédétection est définie de plusieurs manières, mais dans ce qui suit nous n'allons retenir que deux définitions qui relatent plus son objectif. Ainsi, selon [Lillsand et Kiefer \(1987\)](#), la télédétection est la science et l'art d'obtenir l'information sur un objet, surface ou phénomène à travers l'analyse des données acquises par un moyen qui n'est pas en contact avec l'objet, la surface ou le phénomène à étudier.

Une seconde définition proposée par le Centre Canadien de Télédétection (CCT) semble être plus complète et définit la télédétection comme étant une technique d'acquisition d'images qui permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. Ainsi, la télédétection offre une perspective unique sur la compréhension de l'évolution de l'occupation des sols, des phénomènes environnementaux, du climat et de l'utilisation des terres à travers l'analyse multitemporelle des images satellitaires. Elle permet de comparer l'état d'un même lieu à des dates différentes à partir d'images prises à des périodes différentes ([Smara, 2003](#)). Ce qui fait qu'elle reste un outil qui joue un rôle important dans la fourniture de données spatiales et dans la détermination et l'amélioration du suivi des ressources naturelles de la Terre. En télédétection les données peuvent être utilisées dans diverses applications notamment dans les domaines de l'agriculture, la foresterie, les ressources en eau, l'utilisation des terres, la dynamique urbaine, la géologie, l'environnement, les ressources marines, la surveillance et l'atténuation des catastrophes et le développement des infrastructures ([Lillesand et Kiefer, 2000](#)). L'intérêt des données de télédétection réside dans le fait qu'elles peuvent avoir une couverture répétitive par des capteurs calibrés pour détecter les

changements (observations répétitives allant de quelques minutes à quelques jours avec la possibilité d'avoir une couverture mondiale) et offrent une meilleure alternative pour la gestion des ressources naturelles par rapport aux méthodes traditionnelles (Chandra et Ghosh 2007; Ranganath et al. 2007; Mukherjee 2008).

V.1.2. Principe de la télédétection

En télédétection, les éléments essentiels pour l'acquisition d'image sont: (1) une plateforme pour porter l'instrument (2), l'objet qui représente la cible à observer et (3) l'instrument ou capteur pour observer la cible.

L'image satellitaire est obtenue en enregistrant le rayonnement renvoyé vers l'espace à l'aide de divers capteurs spatioportés. Présentement, les acquisitions d'images en télédétection se font par l'intermédiaire de deux catégories de capteurs : les capteurs passifs et les capteurs actifs. Les systèmes de télédétection passive englobent tous les processus qui consistent à capter et à enregistrer l'énergie solaire qui est soit réfléchi (la portion visible) ou absorbée et retransmise (infrarouge thermique) par la cible. Les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie disponible naturellement (rayonnement électromagnétique) sont des capteurs passifs. Ainsi, le capteur passif ne peut percevoir l'énergie réfléchi que lorsque le soleil illumine la Terre. Cette technologie ne peut pas enregistrer d'images la nuit (ce qui limite fortement le nombre de prises de vue). Cependant, l'énergie dégagée naturellement (l'infrarouge thermique) peut être enregistrée de jour comme de nuit. La position du soleil est également une limite pour les longueurs d'onde les plus fréquemment utilisées. Les systèmes de télédétection passive ne peuvent pas également enregistrer d'information sous une couverture nuageuse dense qui, pour toutes les longueurs d'onde le rayonnement électromagnétique (émis et réfléchi) est perturbé par l'atmosphère : c'est l'effet atmosphérique qui limite fortement la transmission du rayonnement électromagnétique.

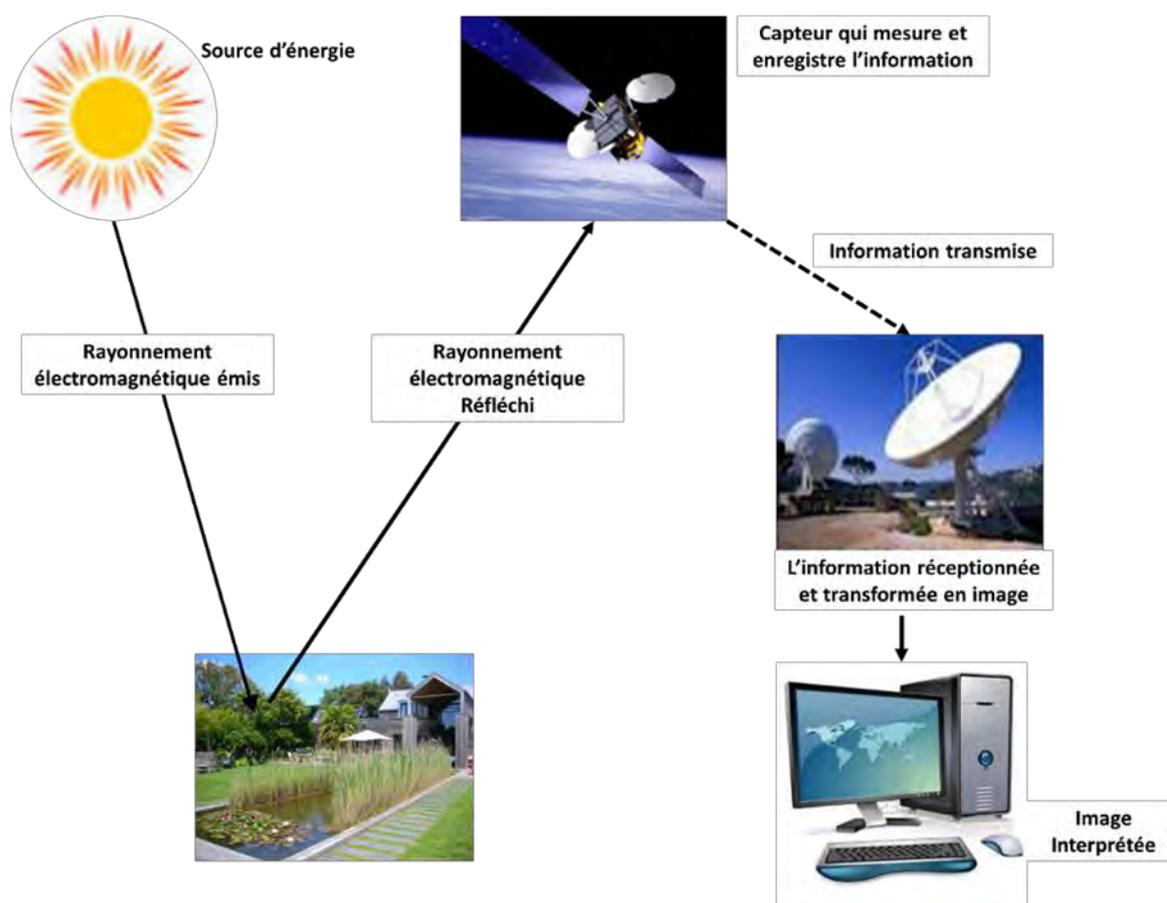


Figure 26. Principe de fonctionnement de la Télédétection optique (passive)

Le RADAR (Radio Detection and Ranging) est un système actif (Fig.24) qui fournit sa propre source d'énergie électromagnétique. Les détecteurs, qu'ils soient aéroportés ou spatioportés, émettent de la radiation micro-onde dans une série d'impulsions à partir d'une antenne qui est positionnée vers la surface, perpendiculaire à la direction du mouvement. Lorsque l'énergie atteint la cible, une portion de l'énergie est réfléchi vers le détecteur. La dispersion de la radiation micro-onde est alors détectée, mesurée et chronométrée. Le temps requis par l'énergie pour atteindre la cible et retourner au détecteur détermine la distance de la cible. En enregistrant le délai et l'amplitude de l'énergie réfléchi par toutes les cibles lors du passage du système, une image à deux dimensions de la surface est produite. Puisque le RADAR a sa propre source d'énergie, des images peuvent être obtenues de jour comme la nuit. Puisque l'énergie micro-onde peut également pénétrer à travers les nuages et la pluie, le RADAR est considéré comme un détecteur toutes saisons ([Centre Canadien de Télédétection](#)). Ainsi deux modes d'acquisitions sont employées par le RADAR : la polarisation parallèle (émission et réception identiques) et la polarisation croisée (émission et réception opposées). Ces différents modes d'émission/réception présentent des intérêts dans plusieurs domaines, selon la géométrie des

éléments étudiés. La polarisation VV (émission et réception verticale) est très sensible aux éléments verticaux, ce qui la rend très efficace pour les études de rugosité de la surface marine, et la détermination de la vitesse du vent. Par contre, le RADAR fonctionnant en mode HH procurera des informations plus pertinentes sur le sol situé sous une culture, tel que du blé, du fait de son fort pouvoir de pénétration dans un couvert végétal essentiellement vertical. Ce mode de polarisation donne de très bons résultats pour la détection de l'eau et la discrimination de la glace (ESA, 2002).

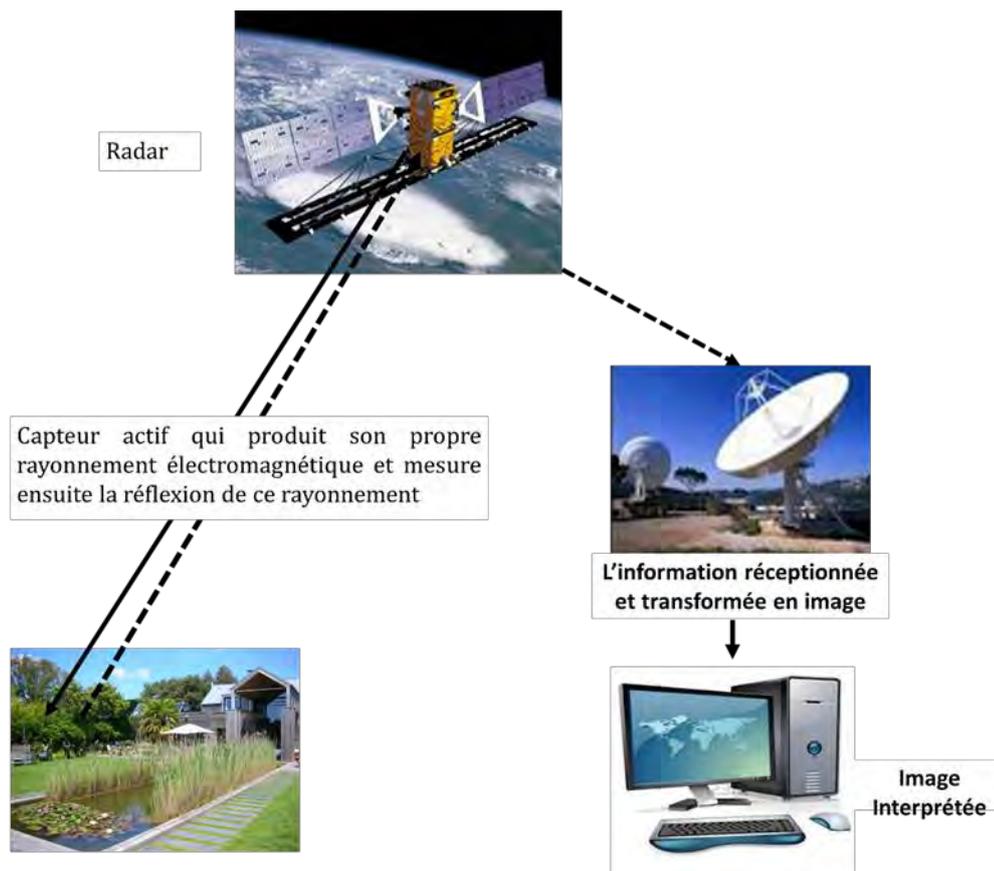


Figure 27. Principe de fonctionnement du Radar (active)

V.1.3. Les caractéristiques des images

L'énergie électromagnétique peut être perçue de façon photographique ou de façon électronique. Le processus photographique utilise une réaction chimique sur une surface sensible à la lumière pour capter et enregistrer les variations d'énergie. Il est important, en télédétection, de distinguer les termes "image" et "photographie". Une image est une représentation graphique, quel que soit la longueur d'onde ou le dispositif de télédétection qui a été utilisé pour capter et enregistrer l'énergie électromagnétique. Une photographie désigne spécifiquement toute image captée et enregistrée sur une pellicule photographique. Les

photographies enregistrent habituellement les longueurs d'onde entre 0,3 et 0,9 mm (les portions visible et infrarouge réfléchies). Avec ces définitions, nous constatons que toute photographie est une image, mais que les images ne sont pas toutes des photographies. À moins de parler d'images enregistrées par un procédé photographique, nous utilisons donc le terme image. Une photographie peut être présentée et affichée en format numérique en divisant l'image en petits morceaux de taille et de forme égales, que nous nommons pixels. La luminosité de chaque pixel est représentée par une valeur numérique. Chaque pixel est doté d'une valeur représentant les différents niveaux de luminosité. L'ordinateur affiche chaque valeur numérique comme un niveau de luminosité. Les capteurs enregistrent alors électroniquement l'énergie en format numérique (en rangées de chiffres).

V.2. Le rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique correspond à l'ensemble des radiations émises par une source qui peut être soit le soleil, soit la surface terrestre ou océanique ou l'atmosphère, ou bien encore le capteur satellitaire lui-même, sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules. Lorsque le satellite ne fait que capter le signal réfléchi, on parle de la télédétection passive et lorsque le satellite émet une onde vers la cible et enregistre l'écho, on parle de la télédétection active. Ces plates-formes peuvent être situées près de la surface terrestre, par exemple au sol, dans un avion ou un ballon ; ou à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, par exemple sur un véhicule spatial ou un satellite (Toumi, 2013). Le rayonnement électromagnétique est mesuré par les «cellules» du capteur (une cellule=1pixel) dans différentes bandes spectrales. Des images numériques sont ensuite composées à partir de ces valeurs mesurées.

V.2.1. Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (Fig.28).

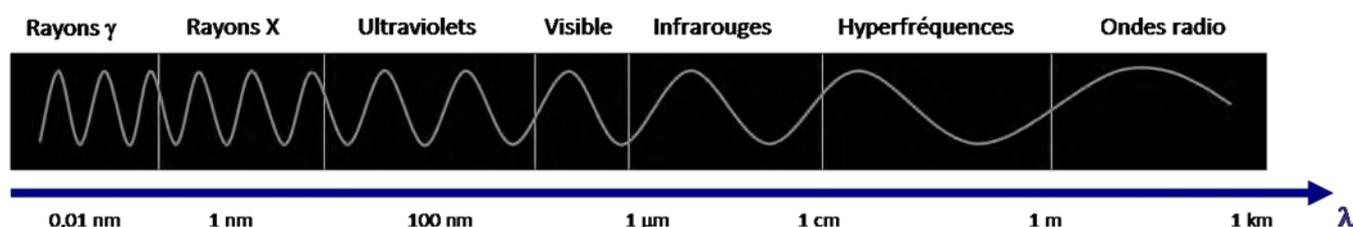


Figure 28. LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE <http://e-cours.univ-paris1.fr>

V.2.2. Les bandes spectrales :

Ce sont les zones du spectre électromagnétique dans lesquelles sont effectuées les mesures.

Le proche infrarouge

Le proche infrarouge (0,7 μ m à 1,6 μ m) est la partie du spectre électromagnétique qui vient juste après le visible (couleur rouge). Comme pour le visible, ce que le radiomètre mesure dans le proche infrarouge, c'est une luminance correspondant au rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre. Ce domaine du spectre électromagnétique est très utilisé en télédétection pour différencier les surfaces naturelles qui se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance à cette longueur d'onde. Il permet également l'étude des surfaces continentales, et notamment de distinguer les surfaces végétalisées des surfaces minérales, car les surfaces couvertes par la végétation se distinguent par une forte réflectance dans les longueurs d'onde du proche infrarouge, alors qu'elles réfléchissent peu le rayonnement dans le visible.

- L'infrarouge moyen

L'infrarouge moyen (1,6 μ m à 4 μ m) permet de façon générale d'étudier les teneurs en eau des surfaces. Il est très utilisé en foresterie et en agriculture, notamment pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique. L'atmosphère est en grande partie opaque aux rayonnements du moyen infrarouge qui sont absorbés par la vapeur d'eau. Seules quelques fenêtres atmosphériques permettent la transmission du rayonnement. Elles sont centrées sur les longueurs d'onde 2,5 μ m, 3,5 μ m et 5 μ m.

- L'infrarouge thermique

Dans ce domaine spectral (4 μ m à 15 μ m), le rayonnement dépend des propriétés d'émissivité des surfaces et les capteurs satellitaires mesurent la température apparente des objets. En effet, une partie du rayonnement visible et proche infrarouge atteignant la surface de la Terre est absorbée par les objets, puis réémise sous forme de chaleur à une plus grande longueur d'onde.

- L'infrarouge lointain

L'infrarouge lointain (15 μ m à 100 μ m) n'est utilisé ni pour l'observation de la terre, ni pour l'étude de l'atmosphère, mais pour étudier la formation des galaxies et des étoiles. Les détecteurs, appelés bolomètres utilisent cette gamme de longueurs d'onde pour mesurer l'intensité du rayonnement infrarouge émis par les corps célestes.

- Les hyperfréquences

Dans ce domaine spectral (1cm à 1m), les longueurs d'onde centimétriques sont grandes par rapport aux ondes visibles et infrarouges. Cela confère aux hyperfréquences des propriétés particulières et notamment la possibilité d'observer la surface de la Terre par tous les temps, de jour comme de nuit. L'atmosphère est en effet quasiment transparente à ces longueurs d'onde qui traversent sans problème les couches nuageuses. Ce domaine est celui des capteurs radars et des radiomètres à micro-ondes passives, utilisés notamment en océanographie pour l'étude des glaces de mer et la détection des nappes d'hydrocarbures.

V.2.3. La résolution spatiale (taille du pixel):

Elle correspond à la capacité de discerner 2 structures petites et proches sur une image, elle dépend de la taille du pixel. Plus elle est élevée, plus il est possible de zoomer l'image et d'identifier clairement des petites structures (rues, bâtiments, mobiliers urbains...). Le détail qu'il est possible de discerner sur une image dépend de la résolution spatiale du capteur utilisé. La résolution spatiale est fonction de la dimension du plus petit élément qu'il est possible de détecter. La résolution spatiale d'un capteur passif dépend principalement de son champ de vision instantané (CVI). Le CVI est défini comme étant le cône visible du capteur (A) et détermine l'aire de la surface "visible" à une altitude donnée et à un moment précis (B). La grandeur de cette aire est obtenue en multipliant le CVI par la distance de la surface au capteur (C) (Fig.29). Cette aire est appelée la superficie de résolution ou cellule de résolution et constitue une étape critique pour la détermination de la résolution spatiale maximale du capteur (CCT). La résolution spatiale dépend de l'altitude du capteur et de l'angle de prise de vue. Pour une même surface couverte, plus la résolution spatiale est élevée, plus l'image est «lourde».

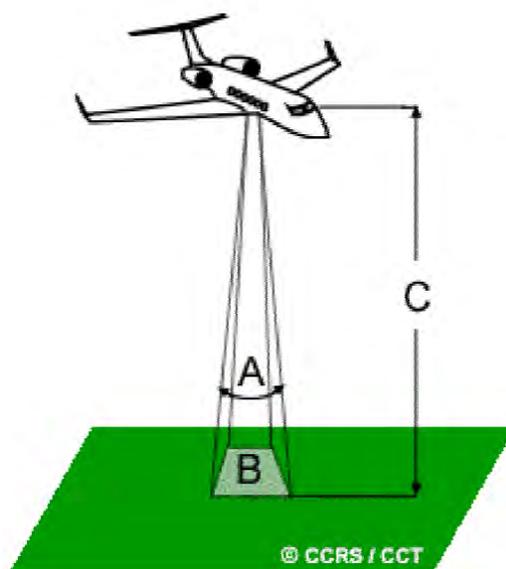


Figure 29. La résolution spatiale d'un capteur passif

Ainsi, les images sur lesquelles seuls les grands éléments sont visibles ont une résolution "grossière" ou "basse". Les images à résolution fine ou élevée permettent l'identification d'éléments de plus petites dimensions. Les capteurs utilisés par les militaires par exemple sont conçus pour obtenir le plus de détails possible.

V.2.4 Résolution spectrale

La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Plus la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites. Les courbes d'émissivité spectrale caractérisent une cible ou une surface pour un ensemble de longueurs d'onde. Il est souvent possible de distinguer des classes de caractéristiques et les détails dans une image en comparant leurs différentes réponses sur un ensemble de longueurs d'onde. Chaque surface possède ainsi une signature spectrale (quantité d'énergie émise ou réfléchie en fonction de la longueur d'onde) qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires <http://e-cours.univ-paris1.fr> (Fig.30). L'eau et la végétation peuvent être séparées en utilisant un intervalle de longueurs d'onde assez grand (le visible et l'infrarouge par exemple). Des classes plus spécifiques par exemple différents types de roche ne sont pas aussi faciles à différencier et nécessitent l'utilisation d'un intervalle de longueurs d'onde beaucoup plus fin. Pour ce faire, il faut utiliser un capteur ayant une résolution spectrale beaucoup plus grande.

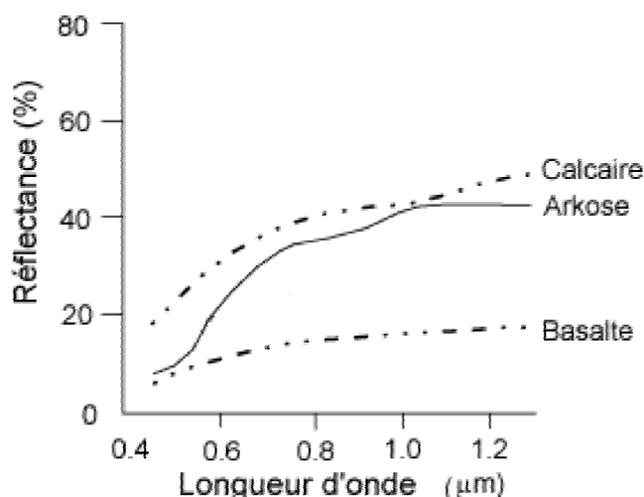


Figure 30. Différence dans les signatures spectrales

En ce qui concerne la signature spectrale des sols, on note un accroissement régulier de la réflectance au fur et à mesure qu'on se déplace vers les grandes longueurs d'onde. Les discontinuités que l'on observe dans le proche infrarouge et l'infrarouge moyen sont dues aux bandes d'absorption de l'eau. L'étude des propriétés spectrales des sols est toutefois particulièrement complexe, car elle doit tenir compte de la nature hétérogène du sol qui contient à la fois des matières minérales et organiques, mais aussi une composante liquide ; tous ces éléments vont influencer la réflexion du rayonnement. L'eau a une réflectance très faible dans toutes les longueurs d'onde, elle absorbe cependant un peu moins les ondes les plus courtes, d'où sa couleur bleue. Sa signature spectrale dépend à la fois des molécules qui la constituent, mais aussi des éléments dissous ou en suspension dans la colonne d'eau, comme les organismes phytoplanctoniques, les sédiments ou les substances jaunes. Plus l'eau est turbide, plus elle contient de matériaux sédimentaires, plus sa réflectance augmente dans toutes les longueurs d'onde et notamment pour les ondes les plus longues – rouge.

V.2.5. Résolution temporelle

La résolution temporelle est le temps que prend un satellite pour effectuer un cycle orbital complet. Cette période est généralement de quelques jours (3 à 30 jours pour les plus courants). Il faut donc quelques jours à un tel satellite pour qu'il puisse observer de nouveau exactement la même scène à partir du même point dans l'espace. La résolution temporelle absolue du système de télédétection est donc égale à cette période. Toutefois, certaines régions de la surface peuvent être observées plus fréquemment puisqu'il y a chevauchement entre les couloirs-couverts adjacents et que ces zones de chevauchement deviennent de plus en plus

grandes en s'approchant des pôles. Certains satellites ont aussi la possibilité de pointer leurs capteurs en direction du même point pour différents passages du satellite. La résolution temporelle effective du satellite dépend donc d'une variété de facteurs dont la grandeur de la zone de chevauchement entre les couloirs couverts adjacents, la capacité du satellite et de ses capteurs et également la latitude. Cependant, l'un des grands avantages de la télédétection satellitaire est sa capacité à amasser périodiquement de l'information d'une même région de la Terre. Les Changements dans les caractéristiques spectrales d'une région peuvent être observés dans le temps. Ainsi, la comparaison d'images multitemporelles permet de détecter ces changements. Par exemple, durant la période de croissance de la végétation, de nombreuses espèces se transforment continuellement et la capacité à détecter ces changements dépend de la fréquence avec laquelle les données sont recueillies. Ce qui fait qu'une collecte de données périodique et continue permet de suivre les changements qui surviennent à la surface de la Terre, qu'ils soient naturels (comme le développement de la végétation ou l'évolution d'une inondation) ou anthropiques (comme le développement des milieux urbains ou la déforestation) (CCT).

V.2.6. Résolution radiométrique

Les caractéristiques radiométriques décrivent l'information contenue dans une image. La résolution radiométrique d'un système de télédétection décrit sa capacité de reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique. Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue. La gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible se nomme plage dynamique. Les données images sont représentées par une valeur numérique variant entre 0 et 2 à une certaine puissance moins un. Cet intervalle correspond à un nombre de bits utilisés pour encoder des valeurs en format binaire. Chaque bit représente un exposant de la base 2 (par exemple, 1 bit = $2^1 = 2$). Le nombre maximum de niveaux d'intensité disponibles dépend du nombre de bits utilisés pour représenter l'intensité enregistrée. Par exemple, un capteur utilisant 8 bits pour enregistrer les données aura $2^8 = 256$ niveaux d'intensité disponibles, car il aura 256 valeurs numériques disponibles allant de 0 à 255. Si seulement 4 bits sont utilisés, alors seulement $2^4 = 16$ valeurs allant de 0 à 15 seront disponibles (Fig.29).

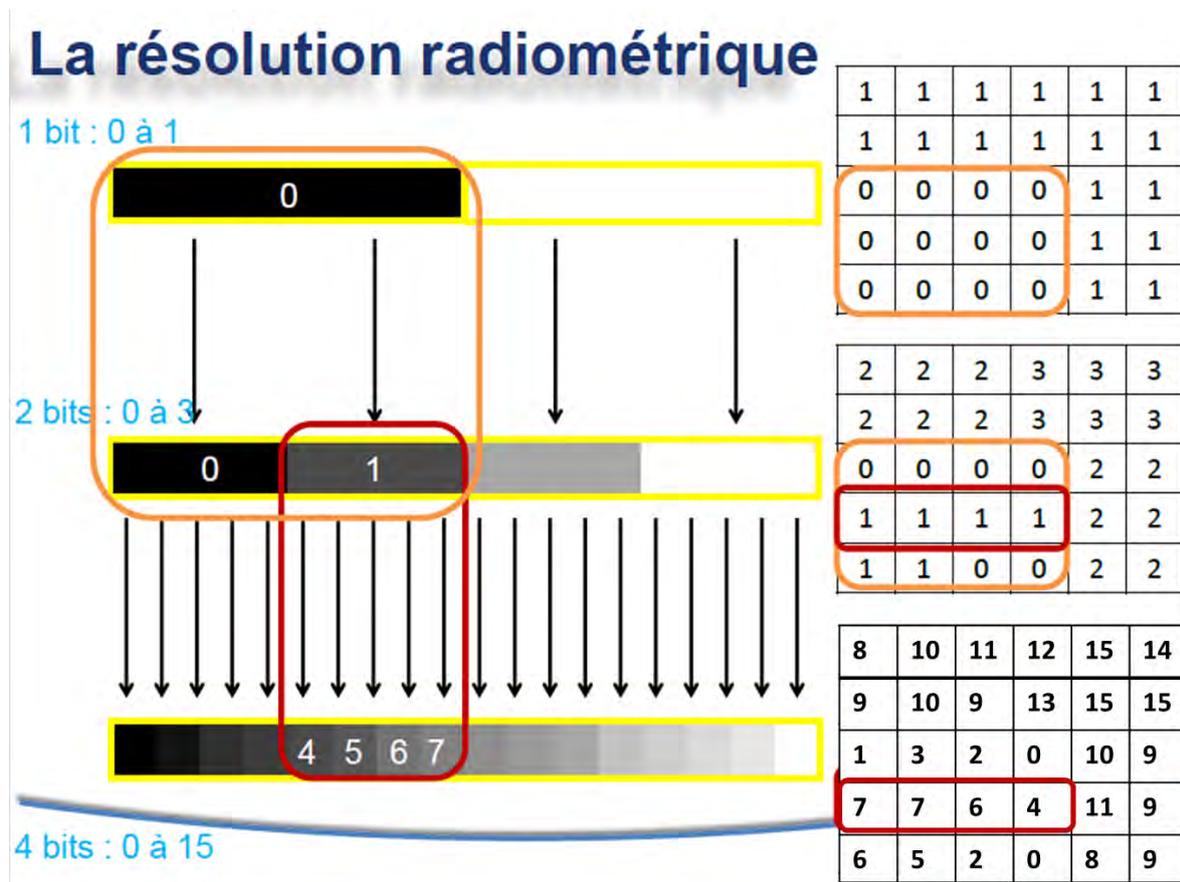


Figure 31. Caractéristiques numériques des images

V.3. Le SIG (Systèmes d'information géographique)

C'est un outil qui stocke les informations concernant le monde sous la forme de couches thématiques pouvant être reliées les unes aux autres par la géographie. Ce concept, à la fois simple et puissant a prouvé son efficacité pour résoudre de nombreux problèmes concrets (www.esrifrance.fr/sig3.aspx). Il fonctionne sur la base de deux modèles : le modèle vecteur et le modèle raster.

- **Le modèle vecteur**

Dans le modèle vecteur, les informations sont regroupées sous la forme de coordonnées x, y. Les objets de type ponctuel sont dans ce cas représentés par un simple point. Les objets linéaires (routes, fleuves...) sont eux représentés par une succession de coordonnées x,y. Les objets polygonaux (territoire géographique, parcelle...) sont, quant à eux, représentés par une succession de coordonnées délimitant une surface fermée. Le modèle vectoriel est particulièrement utilisé pour représenter des données discrètes.

- **Le modèle raster**

Le modèle raster, quant à lui, est constitué d'une matrice de points pouvant tous être différents les uns des autres. Il s'adapte parfaitement à la représentation de données variables continues telles que la nature d'un sol. Chacun de ces deux modèles de données dispose de ses avantages. Un SIG moderne se doit d'exploiter simultanément ces deux types de représentation. www.esrifrance.fr/sig3.aspx.

Ces deux types de données peuvent être restitués par la télédétection qui procure à l'analyse SIG des informations spatiales et numériques faisant l'objet d'analyse multicritère par les SIG.

V.4. Les Avantages des outils SIG

Les données géospatiales sont essentielles dans l'analyse des phénomènes naturels puisqu'aujourd'hui le besoin de production d'informations spatiales (occupation des sols, érosion côtière, dynamique de la biomasse, inondations, pollution, etc.) augmente considérablement avec la dynamique démographique en évolution croissante. A cet effet, ces systèmes constituent et demeurent une orientation nécessaire des décideurs de nos pays en développement pour juguler les problèmes socio-environnementaux dont ils font face. Ils appuient non seulement l'analyse et l'interprétation, mais aide également à la prise de décision à des temps courts et des coûts relativement bas. Ils ont surtout l'avantage d'offrir une possibilité de stocker (cataloguer) automatiquement les données et de les rendre accessibles à un public élargi par la possibilité de consulter, d'extraire et d'éditer ces données. Ils présentent également l'avantage de pouvoir mener des recherches pertinentes à partir d'un système qui centralise les données par la possibilité d'échange entre différents utilisateurs (Services publics et privés, ONG, chercheurs, etc.). Dans le cadre de cette thèse, deux approches d'analyse SIG seront utilisées dans l'évaluation des potentialités aquifères au Sénégal oriental, une première qui tient compte des paramètres du milieu (Pluviométrie, nature géologique des terrains, réseau de drainage, pente, densité de linéament) et une seconde qui se focalise aussi bien sur les paramètres du milieu, mais également sur les caractéristiques intrinsèques de la matrice aquifère (degré d'altération, degré de fracturation et le type d'altération). Les résultats des deux méthodes nous ont permis de pouvoir estimer la fiabilité des deux modèles en les validant par les données de débits de forages.

V.6. Pertinence des outils télédétection et SIG dans l'évaluation des ressources en eau

Aujourd'hui la télédétection et les SIG constituent de nouvelles techniques utilisées pour délimiter les réserves d'eau souterraine, mais aussi pour étudier les aspects et problèmes liés à l'eau souterraine. Selon [Ismail & Mallikarjuna \(2011\)](#), certains facteurs hydrologiques, géologiques et géomorphologiques jouent un rôle majeur dans la mise en place et l'écoulement des eaux souterraines dans les différents terrains géologiques. Ainsi, avec les progrès de la technologie spatiale et l'avènement des ordinateurs à grandes performances, les techniques d'évaluation du potentiel des ressources en eau souterraine ont évolué avec l'usage de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) qui aujourd'hui sont d'une grande importance dans la prospection hydrogéologique. Le processus d'évaluation comprend notamment la collecte de données de télédétection à partir de capteurs appropriés et la sélection de cartes thématiques telles que : les précipitations, la géologie, la lithologie, la géomorphologie, les sols, l'utilisation des sols / l'occupation des sols, les réseaux de drainage, la pente et les linéaments. Les données sont traitées en fonction de leur importance avec l'attribution de poids appropriés et intégrées dans un environnement SIG sophistiqué. Les données requises de télédétection et des SIG, couplées aux études de terrain nécessaires, permettent d'identifier de manière efficace les zones potentielles aquifères. Ainsi, différentes données de télédétection sont préparées sous forme de cartes thématiques en utilisant le système d'information géographique (SIG). Ces cartes thématiques sont ensuite intégrées à l'aide de l'outil «Spatial Analyst » avec des opérateurs mathématiques et Booléens et ensuite utilisées pour développer un modèle en fonction de l'objectif du problème à étudier. Ces progrès ont justifié le grand intérêt qu'un grand nombre de chercheurs tels que [Teeuw \(1995\)](#), [Shahid et Nath \(1999\)](#), [Goyal et al. \(1999\)](#), [Saraf et Choudhary \(1998\)](#) qui ont adopté l'approche de l'utilisation de la télédétection et des SIG pour l'exploration de l'eau souterraine et l'identification des sites de recharge artificielle. [Jaiswal et al. \(2003\)](#) [Hossam et al., \(2011\)](#) ont mené une étude de cartographie des ressources en eau souterraine dans la péninsule du Sinaï en Egypte en se basant sur les outils SIG via un système de modélisation des bassins versants par approche probabilistique (WSPM) weighed spatial probability modeling où ils ont utilisé huit couches thématiques auxquelles ils affectent une pondération appropriée. Ces couches intégrant les paramètres tels que : la pluviométrie, la recharge nette, la lithologie, la densité de linéaments, les pentes, la densité de drainage, la profondeur de l'eau et la qualité de l'eau. [Mashaël Al Saud \(2010\)](#) a utilisé une approche combinant les outils SIG et la télédétection pour

évaluer le potentiel des ressources en eau souterraine dans le bassin du Wadi Aurnah, dans la partie occidentale de la péninsule arabique couvrant une superficie de 3113 Km². A cet effet il a utilisé les images Landsat 7 ETM⁺, ASTER et SRTM pour extraire des cartes thématiques qui seront intégrées dans le SIG. Ces couches thématiques intègrent les paramètres tels que la pluviométrie, la lithologie, les fractures, les pentes, le réseau de drainage et l'occupation du sol. Dans ces dernières années, de nombreux chercheurs tels que Teeuw (1995), Shahid et Nath (1999). Krishnamurthy et al. (1996); Murthy (2000), Obi Reddy et al. (2000); Pratap et al. (2000); Singh et Prakash (2002), ont utilisé les SIG pour délimiter les zones potentielles aquifères. Le SIG a également été pris en considération pour l'analyse multicritère à l'évaluation des ressources en eau. Shahid et al. (2000) Boutt et al. (2001), El-Kadi et al. (1994) et Jacob Novaline et al. (1999), Saraf et al. (2004) ont réalisé la modélisation des eaux souterraines par l'utilisation des SIG. Mohammed Aslam et al. (2003) ont réalisé la cartographie hydrogéomorphologique en utilisant des techniques de télédétection pour la gestion des ressources en eau autour des paléocanaux. Le SIG a été appliquée à la modélisation du potentiel des eaux souterraines par Rokade et al. (2007). Dans cette étude, les données de télédétection du 7 Avril 2004 (IRS 1C LISS III), géocodées à l'échelle de 1: 50.000 et (SOI) des feuilles topographiques de l'Inde nos.56L / 9,56L / 13 ont été utilisées pour la préparation de diverses cartes thématiques telles que la géologie, linéament, la géomorphologie, la pente et le drainage densité. Ces cartes thématiques ont été converties en format raster de sorte qu'elles puissent être facilement intégrées dans la plateforme SIG. Chacune de ces cartes thématiques a été affectée d'un facteur de pondération approprié. Ces facteurs de pondération ont été choisis en tenant compte des travaux effectués par Srinivasa Rao et Jugran (2003), Krishnamurthy et al. (1996) et Saraf et Choudhary (1998). Ces cartes thématiques ont ensuite été intégrées en utilisant l'outil " Spatial Analyst " du SIG pour délimiter les zones potentielles aquifères. Ils ont ensuite utilisé les données de débit des forages à partir d'un suivi de débit sur un total 438 puits existants dans la zone d'étude pour valider la carte des potentialités en eau souterraine qui peut être très utile dans le choix des sites d'implantation de forage pour l'exploitation des eaux souterraines ou dans la mise en place de systèmes de gestion des eaux souterraines dans une région.

V.7. Données satellitaires

La scène 202-51 de l'image Landsat 7 provenant du capteur ETM⁺ (Enhanced Thematic Mapper) a été acquise le 21 Janvier 2010 avec la projection UTM zone 28N, sphéroïde datum

WGS84 (world geodesic system). A partir de cette image, les sept bandes 1, 2, 3, 4, 5, 7 et 8 ayant des résolutions différentes dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge lointain ont été utilisées dans les différents traitements et combinaisons. La résolution de ces bandes est de 30 m sauf la bande 8 panchromatique qui a une résolution de 15 m.

V.7.1 Description des données satellitaires

Tableau 4. Caractéristiques des satellites Landsat et TERRA et de leurs images dérivées

	LANDSAT 1, 2 et 3	LANDSAT 4 et 5	LANDSAT 7	TERRA (EOS-AM 1)
PAYS	États-Unis États-Unis	États-Unis États-Unis	États-Unis États-Unis	États-Unis
Année de lancement	1972, 1975 et 1978	1982 et 1984	1999	1999
ALTITUDE	705 km	705 km	705 km	705
CAPTEUR	MSS (Multispectral Scanner)	TM (Thematic Mapper)	ETM (Enhance Thematic Mapper)	ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)
TYPE	Radiomètre à balayage	Radiomètre à balayage	Radiomètre à balayage	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)
RÉSOLUTION SPECTRALE	V [0,5 - 0,6 µm] R [0,6 - 0,7 µm] IR [0,7 - 0,8 µm] IR [0,8 - 1,1 µm]	B [0,45 - 0,52 µm] V [0,52 - 0,60 µm] R [0,63 - 0,69 µm] IR [0,76 - 0,90 µm] IRM [1,55 - 1,75 µm] IRT [10,4 - 12,5 µm] IRM [2,08 - 2,35 µm]	B [0,45 - 0,52 µm] V [0,53 - 0,61 µm] R [0,63 - 0,69 µm] IR [0,78 - 0,90 µm] IRM [1,55 - 1,75 µm] IRT [10,4 - 12,5 µm] IRM [2,09 - 2,35 µm] Pan [0,52 - 0,90 µm]	1 (V) [0,52 - 0,60 µm] 2 (R) [0,63 - 0,69 µm] 3 (IR) [0,78 - 0,86 µm] 3B (IR) [0,78 - 0,90 µm] 4 (IRM) [1,60 - 1,70 µm] 5 (IRM) [2,145 - 2,185 µm] 6 (IRM) [2,185 - 2,25 µm] 7 (IRM) [2,235 - 2,85 µm] 8 (IRM) [2,295 - 2,365 µm] 9 (IRM) [2,36 - 2,43 µm] 10 (TIR) [8,125 - 8,475 µm] 11 (TIR) [8,475 - 8,25 µm] 12 (TIR) [8,925 - 9,275 µm] 13 (TIR) [10,25 - 10,95 µm] 14 (TIR) [10,95 - 11,65 µm]
RÉSOLUTION SPATIALE	60 x 80 m	Multispectral : 30 m Infra rouge thermique : 120 m	Multispectral : 30 m Infra rouge thermique : 60 m Panchromatique : 15 m	1, 2, 3 et 3B : 15 m 4 à 9 : 30 m 10 à 14 : 90 m
DIMENSION DE L'IMAGE	185 x 185 km	185 x 172 km	185 x 172 km	60 x 60 km
STÉRÉOSCOPIE	Non	Non	Non	Bandes 3 et 3B
FRÉQUENCE DE PASSAGE	18 jours	18 jours	18 jours	16 jours
APPLICATION	Occupation du sol et végétation	Occupation du sol et végétation	Occupation du sol et végétation	Occupation du sol et végétation
PARTICULARITÉ	En archive depuis 1972	Grande variété spatiale	Grande variété spatiale	Grande variété spatiale
SITE WEB	http://www.landsat.org/	http://www.landsat.org/	http://www.landsat.org/	http://terra.nasa.gov/

V.7.2. Les images magnétiques

Cette image magnétique (Fig.32) est issue de la géophysique aéroportée qui a également contribué à l'identification des linéaments régionaux et à la mise en évidence de la présence de dykes de dolérites et de diabases sur les terrains cristallins du Sénégal oriental. Ces images ont été acquises dans le cadre du projet PASMI 09 ACP SE09 de « géophysique aéroportée au

Sénégal oriental », par la compagnie FUGRO qui l’a réalisée durant le premier semestre de 2007 (20/03/2007 au 01/06/2007) une couverture de données de géophysiques aéroportées en magnétisme, en radiométrie recouvrant la majeure partie des formations du socle localisées dans la terminaison orientale du Sénégal ainsi que des données en électromagnétisme sur certaines zones. Cette acquisition a totalisé 133 817 km de lignes de vol, réalisés pour le compte de la direction des mines et de la géologie (maitre d’œuvre) sous la maitrise d’ouvrage du ministère des Finances et de l’Economie du Sénégal. Les spécifications des levées étaient les suivantes :

Tableau 5. Paramètres d’acquisition des images magnétiques

Espacement des lignes de vol	250 m
Espacement des lignes de contrôle	3000 m
Altitude des vols	80 m
Direction des lignes de vol	135 deg
Direction des lignes de contrôle	225 deg
Intervalle d’enregistrement des données	0,05 sec
Intervalle d’enregistrement des données spectrométriques	1 sec

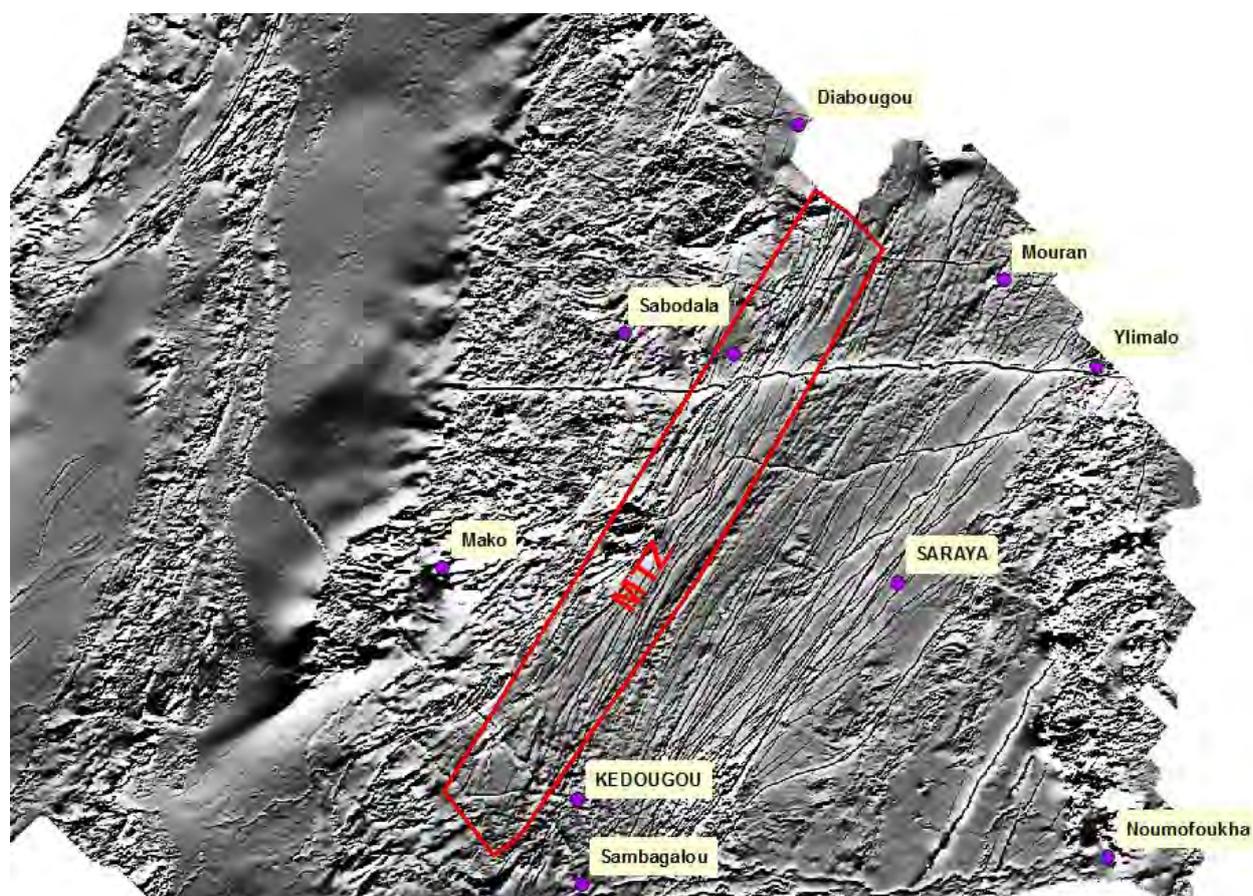


Figure 32. Linéaments structuraux mis en évidence par l’image magnétique

V.7.3. Le traitement des données

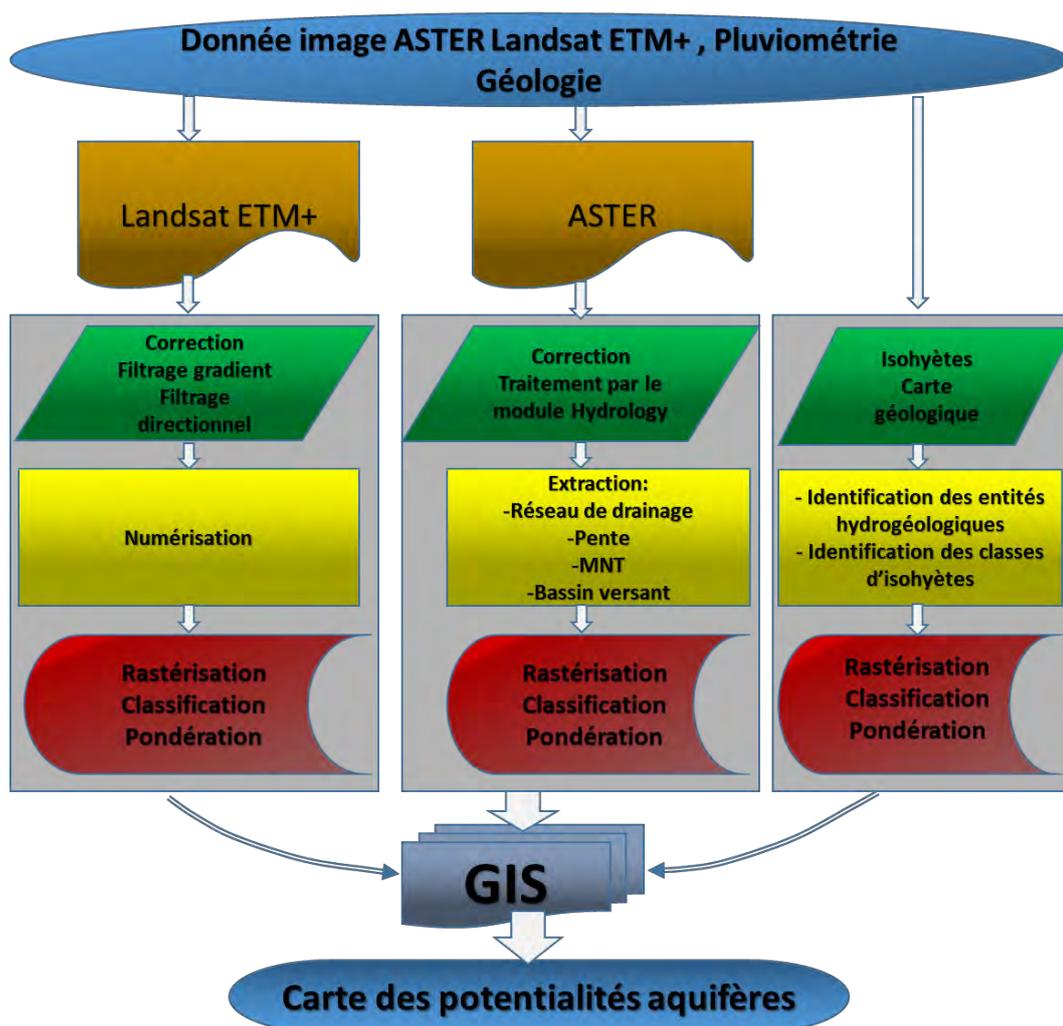


Figure 33. Organigrammes et les différentes tâches exécutées pour le traitement des données

V.7.3.1. Les prétraitements des images

Ils consistent au géoréférencement et à la correction géométrique des images :

V.7.3.2. Le géo-référencement des images

C'est un processus d'attribution d'un système de coordonnées à une image. Il permet de placer l'image dans un système de coordonnées donnée, dans notre cas nous avons utilisé le système UTM zone 28N WGS1984. Cette opération n'est pas réellement une correction, mais entre dans cette catégorie.

V.7.3.3. Corrections géométriques

L'objectif de la correction géométrique est de faire correspondre au mieux les coordonnées des «objets» contenus dans l'image avec les coordonnées de ces mêmes «objets» au sol. Cette étape a été entièrement réalisée dans Erdas IMAGINE 9.2.

Les divers capteurs satellitaires créent des images numériques déformées difficiles à superposer aux projections cartographiques courantes. Ces distorsions sont occasionnées par l'environnement observé (courbure de la Terre, variation d'altitude du sol, etc.), par des erreurs des systèmes de mesure et par le mouvement de la plate-forme des satellites (Bonn et Rochon, 1993). Ceci nous a amené à faire des transformations spatiales de ces images à l'aide de certaines méthodes de correction géométrique. La correction des images s'est faite à partir d'une image déjà corrigée (calage « image à image ») qui nous a été fournie par le CSE (Centre de Suivi Ecologique). La méthode de correction utilisée était basée sur la synchronisation des deux images par attribution des coordonnées exactes de l'image de référence sur l'image à corriger. Une vingtaine de points de contrôle répartis de manière homogène sur des positions particulières de l'image a servi de caler l'image. L'image satellitaire préalablement sélectionnée a été corrigée et redressée par calage cartographique à partir de ces points de contrôle géographiques connus. Une fonction mathématique polynomiale d'ordre 2 a été utilisée pour corriger l'effet du relief parfois très accidenté dans la zone d'étude. Le choix des points est fait de sorte que la précision sur l'erreur résiduelle au niveau du résultat final ne dépasse pas la demie pixel (15 m dans les cas des images Landsat).

V.8. Le traitement des images Landsat et ASTER

Il s'agissait surtout du filtrage des images, de l'extraction des paramètres géomorphologiques (relief, pentes, réseau de drainage) de la cartographie de l'occupation du sol et du calcul des indices (NDVI).

V.8.1. Les Filtrages Laplaciens et directionnels Sobel

L'application des filtres sur les bandes Landsat s'est faite à partir du module convolution dans Erdas IMAGINE 9.2 où les différents filtres sont édités et chaque filtre correspond à une matrice donnée. Les filtres gradients correspondent à des matrices 3x3 par contre s'agissant des filtres directionnels Sobel des matrices 7x7 ont été utilisées pour faire ressortir les discontinuités lithologiques et structurales selon les directions : E-O, N-S, NE-SO et NO-SE. La taille du filtre appliqué influence les longueurs des linéaments rehaussés. Selon Colwell (1983), seuls les

linéaments et les structures de taille supérieure ou égale à la moitié de la fenêtre de convolution (filtre) sont détectés, alors que ceux de taille inférieure se confondent avec le bruit de l'image. Sur les bandes ETM+ de Landsat, les linéaments et les structures particulières de taille hectométrique peuvent être détectés (Kouamé, 1999).

V.8.1.1. Filtres Laplaciens de rehaussement des contours

Ce sont des filtres 3X3 de type haute fréquence qui soulignent les zones à variation brusque d'intensité. Ces filtres sont appliqués aux images Landsat traitées (indices normalisés et synthèses d'images). Les néocanaux obtenus sont soit analysés directement soit combinés avec d'autres données brutes (Yésou et Rollet, 1990 ; Castaing et al., 1989). L'application du filtre Laplacien vrai entraîne une confusion visuelle au niveau des zones de variations brusques des niveaux de gris. En effet, les zones d'absorption telles que les fractures apparaissent très claires, tandis que les sols nus apparaissent sombres. L'inversion des tonalités est obtenue grâce à l'utilisation du filtre Laplacien modifié (Kouamé, 1999).

Laplacien modifié			Laplacien		
0	-1	0	0	1	0
-1	4	-1	1	-4	1
0	-1	0	0	1	0

Figure 34. Filtres Laplaciens

V.8.1.2. Filtres directionnels de type Sobel

Les filtres directionnels sont utilisés pour rehausser les caractéristiques linéaires d'une image comme les linéaments, les routes ou les limites des champs. Ces filtres peuvent aussi être conçus pour rehausser des caractéristiques ayant une certaine orientation dans l'image. Ces filtres ont de nombreuses applications en géologie pour la détection de structures géologiques linéaires (CCT). Parmi les plus utilisés, on peut noter les filtres directionnels Sobel.

L'application du filtrage directionnel de Sobel sur les images satellitaires consiste à mesurer la première dérivée des niveaux de gris de ces images dans des directions précises. Ainsi, la direction du filtre se manifeste par l'opposition des signes selon un axe de la matrice. Par exemple, la dérivée N-S accentue et facilite la perception des linéaments E-O et l'image filtrée présente un effet d'ombrage avec la partie nord éclairée, indiquant la provenance de la source de rayonnement (Kouamé, 1999).

Sobel NO-SE						
2	1	1	1	1	1	0
1	3	2	2	2	0	1
1	2	4	3	0	-2	-1
1	2	3	0	-3	-2	-1
1	2	0	-3	-4	-2	-1
1	0	-2	-2	-2	-3	-1
0	-1	-1	-1	-1	-1	-2

Sobel NE-SO						
0	1	1	1	1	1	2
-1	0	2	2	2	3	1
-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0

Sobel N-S						
1	1	1	2	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1

Sobel E-O						
-1	-1	-1	0	1	1	1
-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-1	-1	0	1	1	1

Figure 35 Filtres directionnels Sobel

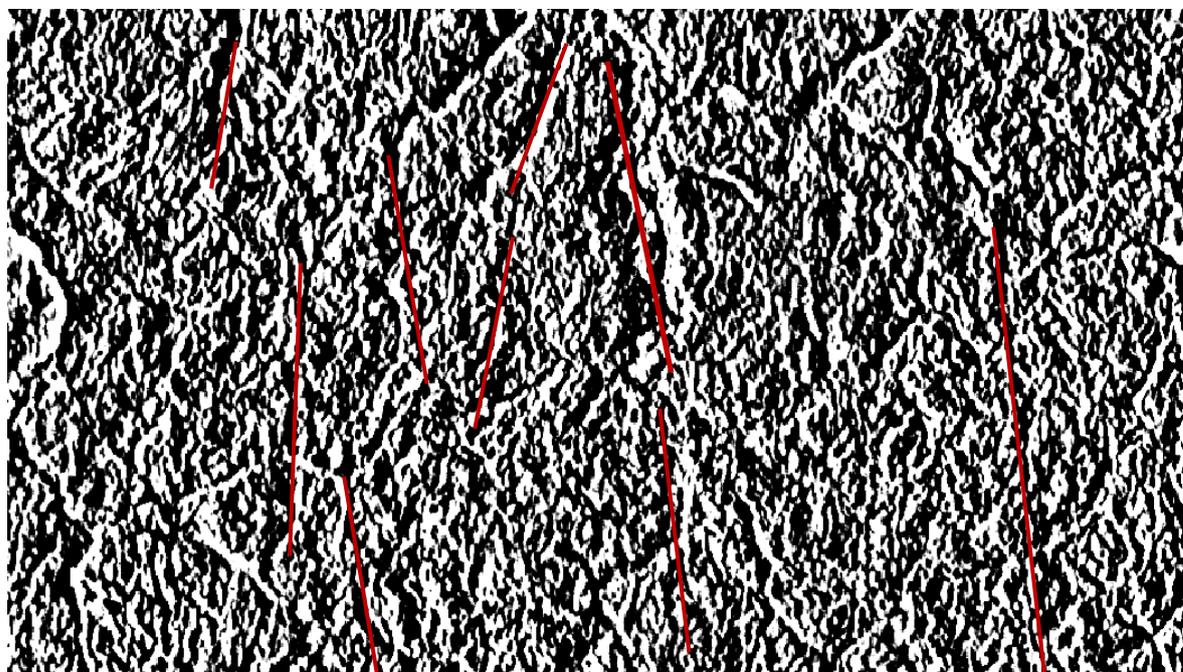


Figure 36. Filtre directionnel Sobel E-O qui met en évidence les linéaments N-S



Figure 37. Filtre directionnel Sobel NO-SE qui met en évidence les linéaments NE-SO

Les images filtrées résultantes (Fig.36-37) ont permis de relever par numérisation tous les linéaments dans les différentes directions mises en évidence par les filtres Sobel. Les images magnétiques (Fig.32) du Sénégal oriental acquises dans le cadre du projet cartographie géologique du Sénégal oriental (Théveniaut et al., 2010) ont permis également de mieux apprécier les linéaments structuraux et la présence de Dykes de dolérite et de diabase sur l'étendue de la région de socle du Sénégal oriental. Pour éviter de confondre les linéaments aux objets artificiels (routes et pistes), le Shape des routes et pistes a été superposé sur l'image filtrée avant la numérisation à l'écran des linéaments.

V.8.2. Cartographie de l'occupation du sol

Intérêt de la combinaison des bandes en cartographie

L'œil humain capte le rayonnement électromagnétique dans trois bandes spectrales (rouge, vert, bleu). Ainsi, à partir de la synthèse de ces trois couleurs, il est possible d'obtenir toutes les autres couleurs. Dans le cas de la synthèse additive, toutes les couleurs peuvent être formées à partir l'addition de ces trois couleurs primaires. Par contre, d'autres couleurs peuvent être formées par synthèse soustractive des trois couleurs primaires (cyan, magenta, jaune). Les compositions colorées par combinaisons des différentes bandes permettent de faire la discrimination des objets dans la cartographie de l'utilisation et de l'occupation des sols en

facilitant l'interprétation visuelle de l'image résultante. Cette image en couleur présente plus de possibilité dans l'identification des objets de la cible dont leurs couleurs sont fonction de leurs réponses spectrales dans les différents canaux du visible (RVB e.i, Rouge Vert ; Bleu). Ainsi, en utilisant la combinaison des bandes ratio en RVB 432 de Landsat 7 ETM+, nous avons pu mettre en évidence la végétation en couleur naturelle (Fig.39). Le tableau 8 fait la synthèse de quelques combinaisons de bande et leur intérêt cartographique dans l'occupation et l'utilisation des sols.

Tableau 6. Différentes combinaisons de bandes et leur intérêt en cartographie

Intérêt cartographique	Landsat 8	Landsat 7 ETM+
Couleur naturelle	4 3 2	3 2 1
Fausse couleur	7 6 4	7 5 3
Couleur infrarouge (Végétation)	5 4 3	4 3 2
Agriculture	6 5 2	5 4 1
Pénétration atmosphérique	7 6 5	7 5 4
Végétation saine	5 6 2	4 5 1
Sol/Eau	5 6 4	4 5 3
Naturel avec élimination de l'effet atmosphérique	7 5 3	7 4 2
Ondes courtes infrarouge	7 5 4	7 4 3
Analyse de la végétation	6 5 4	5 4 3

([kevin butler ,2013](#))

Ces compositions peuvent permettre d'apercevoir les différences dans la composition d'une eau (composition chimique, turbidité, présence de chlorophylle, etc.). Le cas du bassin de Cyanuration de l'usine de Sabodala est un exemple qui montre que ce bassin présente une signature spectrale totalement différente des autres plans d'eau avec la couleur Cyan bien visible sur la combinaison 542 (Fig.38-c). Ces différentes combinaisons ont permis de faire la classification des différentes entités d'occupation et d'utilisation des sols en faisant une numérisation directe sur l'écran de ces différentes unités. Ainsi, cela nous a permis de cartographier, les forêts galeries, les forêts dégradées, les plans d'eau et les sols nus (carte d'occupation des sols). Ces combinaisons permettent également de détecter directement les feux de forêts sur l'image mais aussi les zones brûlées. Ce qui nous a permis avec l'utilisation du NDVI, de déceler les anomalies responsables des faibles activités végétales dans certaines zones.

(c) Combinaison 542

(d) Combinaison 754

(e) Combinaison 435

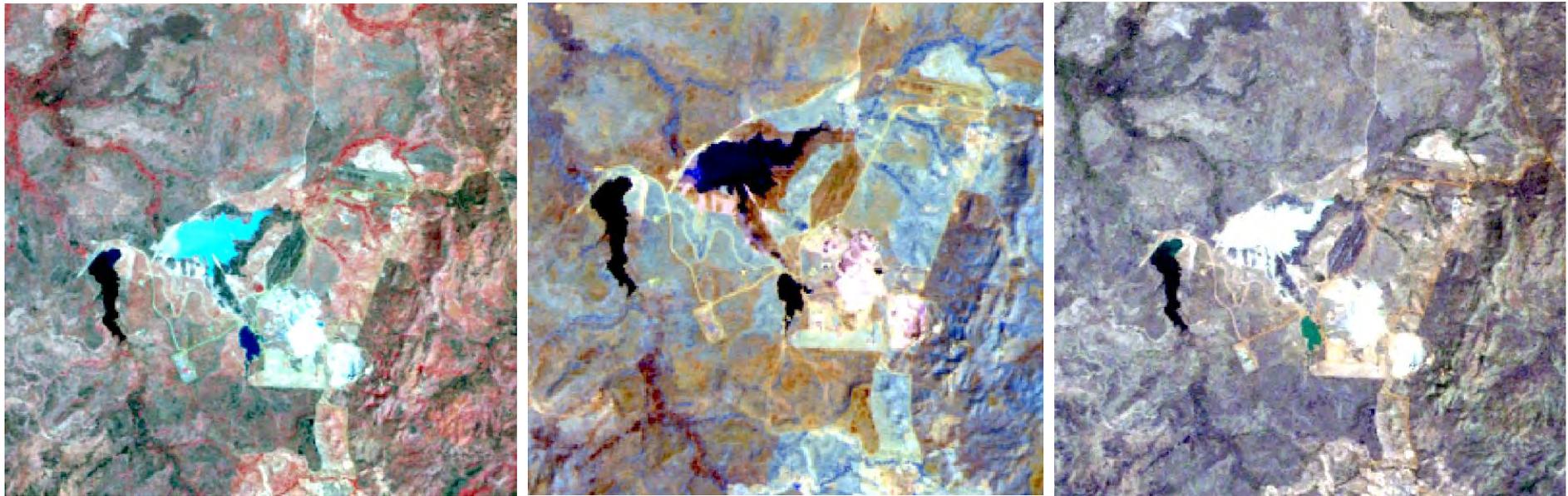


Figure 38. Différentes combinaisons de compositions colorées sur l'image Landsat ETM+ (avril 2010) du secteur de Sabodala (Sénégal)
Tableau 7. Grille d'identification et d'interprétation des principaux types de surface pour chacune des combinaisons des figures ci-dessus

Images	Couleur/Bande			Principaux types de milieux			
	Roug	Vert	Bleu	Eau	Végétation	Sols nus	Bâtis
a	5	4	3	Bleu foncé eau et bleu Cyan bassin de cyanuration	Vert foncé forêt-galerie	Rose sols nus	Blanc
b	4	3	2	Bleu foncé tirant vers le noir vert fluo correspond au bassin de cyanuration	Rouge vif correspond aux forêts galeries et le rouge claire à la savane	Rouge clair et rose sol nu	Blanc
c	5	4	2	Noir à bleu foncé eau bleu cyan bassin de	Rouge vif forêts galeries et rouge clair forêt dégradée	Gris foncé sols nus	Blanc
d	7	5	4	Noir eau	Bleu foncé forêts galeries, Bleu clair forêt dégradée	Rose piste latéritique ligne blanche conduite	Blanc
e	4	3	5	Bleu foncé eau du grand bassin et bleu clair eau du petit bassin, le bassin de cyanuration apparaît en blanc	Forêts galeries vert sombre et forêt dégradée grisâtre	Rose piste latéritique ligne blanche conduite d'eau	Blanc

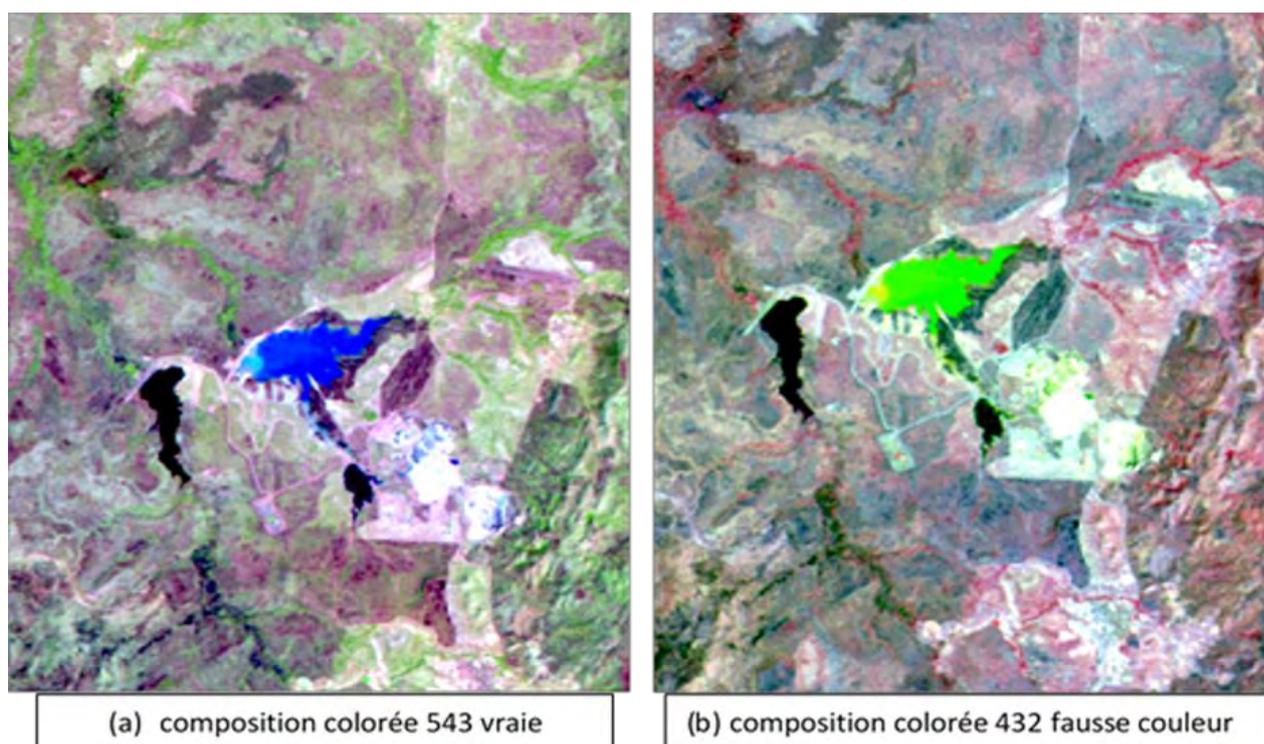


Figure 39. (a) Composition colorée 'vraies couleurs' réalisée à partir des bandes 543, (b) Infrarouge 'fausses couleurs' 432 ETM+ du mois d'Avril 2010 dans le secteur de Sabodala.

V.8.3. Calcul d'indice (NDVI)

L'Indice de végétation normalisé (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), proposé pour la première fois par Rouse et al. en 1973 in (Bannari et al., 1995) est un des indices de végétation les plus connus et les plus utilisés. Comme les autres indices de végétation, le NDVI est sensible à la présence de végétation verte. C'est un outil efficace pour la surveillance des cultures (Vogt, 1995) mais aussi pour la surveillance des précipitations et des sécheresses (Kogan, 1990; Unganai et Kogan, 1998; Viau et al., 2000; McVicar et Bierwirth, 2001; Boyd et al., 2002). Il utilise explicitement la grande différence entre les réflectances dans le rouge et le proche infrarouge. Cependant, cet indice n'est efficacement utilisable que pendant les périodes végétatives, lorsque l'activité chlorophyllienne est importante. L'avantage des indices de végétation se situe au niveau de la facilité des calculs. Ils offrent un outil de comparaison rapide et efficace de l'état de la végétation pour une aire géographique. Leur application est possible sur différentes échelles spatio-temporelles. Cependant, les indices de végétation sont tous influencés à différents degrés par l'angle d'illumination et l'angle de prise de vue. Ils sont aussi influencés par les changements de la couleur du sol ainsi que par les changements du signal au satellite causés par les composantes atmosphériques (McVicar et Jupp, 1998). Le NDVI est obtenu à partir du rapport de la différence des bandes spectrales rouge du visible et de la bande

du proche infrarouge sur la somme des deux dans le cas des images Landsat ETM+ correspondant respectivement aux bandes 4 et 3 de Landsat 7.

$$NDVI = \frac{ETM4-ETM3}{ETM4+ETM3} = \frac{PIR-R}{PIR+R} \text{ (Eq.1)}$$

PIR= Proche infrarouge

R=Rouge

V.8.4. Extraction du relief et des pentes

Le relief est généré à partir des images ASTER dans le module « spatial analyst » sous le menu « hillshade » et a permis de mettre en évidence la distribution des altitudes dans le Sénégal oriental. Le résultat de l'analyse géomorphologique à partir des images ASTER restitue une image 3D qui met en évidence le relief de la zone. Cependant, les pentes générées à partir des images ASTER peuvent être exprimées dans deux types d'unité soit en degré ou en pourcentage. Elles sont calculées à partir du relief « Hilshade » dans le module « spatial analyst » et dans le menu « slope » dans le module « spatial analyst ». Le calcul se base sur les valeurs d'altitude au sein des cellules raster dans chaque pixel autour d'une matrice 3x3.

V.8.5. Extraction du réseau de drainage

L'extraction du réseau s'est faite en deux étapes :

Une première étape qui consiste à déterminer les directions d'écoulement à partir des images ASTER. Les directions d'écoulement sont générées par application du menu « Flow direction » toujours dans l'outil « spatial analyst ». C'est un des outils clés pour extraire les caractéristiques hydrologiques de surface. Il a la capacité de déterminer les directions d'écoulement à partir de chaque cellule de l'image raster. Ceci est possible avec l'outil « Flow direction » (direction d'écoulement). L'outil considère le relief comme paramètre d'entrée et génère un raster de sortie qui montre les directions d'écoulement dans chaque cellule du raster. Il y'a dans ce raster de sortie, 8 directions de sortie liées aux des 8 pixels adjacents dans lesquels un écoulement pourrait être généré (Fig.40). Cette approche se réfère généralement du modèle d'écoulement à 8 directions de [Jenson et Domingue \(1988\)](#).

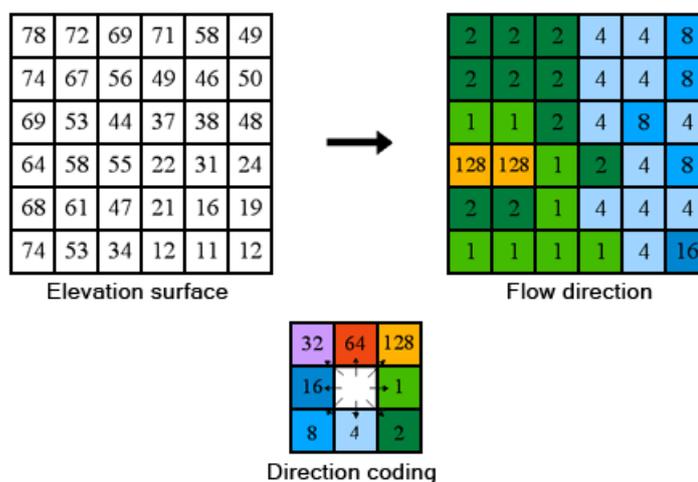


Figure 40. Détermination des directions d'écoulement à partir d'image ASTER

- La deuxième étape consiste à extraire les zones d'accumulations d'eau. L'extraction est faite par le traitement du raster direction d'écoulement « flow direction » sur lequel on applique le menu flow accumulation. L'outil évalue l'accumulation des écoulements sous forme de poids cumulés des écoulements au niveau de chaque pixel dans toutes les cellules dépressionnaires du raster de sortie. Si aucune pondération n'est attribuée, un poids de 1 est attribué à chaque cellule et la valeur de la cellule dans le raster de sortie est égale au nombre de cellule qui génère l'écoulement à l'intérieur de chaque pixel. Le résultat final est une image raster présentant le réseau de drainage (Jenson et Domingue, 1988). Celle-ci va subir d'autres traitements de reclassification et de conversion des rasters en ligne pour avoir le réseau sous un format de fichier de forme pouvant être modifié. Dans le schéma ci-dessous, l'image supérieure gauche indique les directions d'écoulement dans chaque pixel et à droite le nombre de cellules qui génère l'écoulement dans chaque pixel du raster. Les cellules avec des valeurs d'accumulation d'écoulement élevées sont des zones de concentrations et peuvent être utilisées pour identifier les lits des cours d'eau. Par contre, les cellules avec des valeurs d'accumulation d'écoulement nulles sont des zones à topographie localement élevée et peuvent être utilisées pour identifier les crêtes.

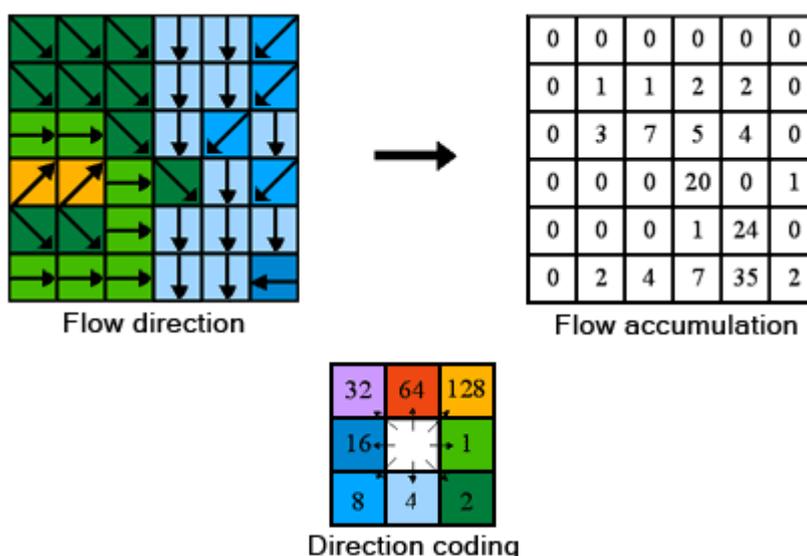


Figure 41. Détermination des zones d'accumulation et d'écoulement à partir d'image ASTER

Ces différentes données acquises par l'intermédiaire de la télédétection feront l'objet d'analyse dans un SIG (Système d'Information Géographique).

L'organigramme présenté dans la figure 50 montre toutes les étapes du modèle ayant permis la réalisation de la carte de zones potentielles aquifères ainsi que les traitements effectués sur les différentes données utilisées à partir de l'analyse multicritère.

V.8. 6 Analyse multicritère

C'est un outil efficace qui aide à la prise de décision et permet d'intégrer plusieurs paramètres dans l'analyse d'un phénomène. Dans notre cas d'étude basée sur la recherche de zone favorable à l'implantation de forage, cette analyse multicritère s'est faite par l'intermédiaire des SIG puisque selon [Drobne et Lisec \(2009\)](#), ces systèmes possèdent des capacités d'analyse, de gestion et d'automatisation hautement performantes et sont très utiles pour ce type de travail. La méthode de superposition pondérée a été utilisée comme approche, elle permet de standardiser, de comparer puis de combiner les paramètres choisis dans le modèle. A chaque paramètre un poids est attribué et ceci est fonction de son importance dans le problème étudié. L'analyse SIG fait la somme des paramètres et produit une carte finale de zone potentielle aquifère. La figure 50 illustre les différentes étapes dans le traitement et l'intégration des données dans le modèle.

PREMIERE METHODE : Evaluation quantitative des ressources en eau dans le Birimien du Sénégal oriental par approche combinée des techniques SIG et de la Télédétection.

V.9. Introduction

Dans les régions subsahariennes, les problèmes de disponibilité et de mobilisation des ressources en eau se font de plus en plus sentir particulièrement dans les régions de socle cristallin ou les nappes d'eau restent très peu productives. La région de Sabodala (Bouttonnière Kédougou Kéniéba) comme de nombreuses parties des régions de socle, appartient au domaine des roches du birimien caractérisé par la présence d'aquifères discontinus. Le système hydrogéologique est constitué d'aquifères fracturés et altérés dont, leur mise en place est fonction de la structuration tectonique et les effets climatiques sur ces formations cristallines (altération). Cependant, la disponibilité et l'accès aux ressources en eau souterraine dans le secteur constituent une grande préoccupation pour l'approvisionnement correct en eau de la population du fait des faibles débits forages et des taux élevés d'échec de forage. Aujourd'hui plusieurs auteurs ont montré la pertinence de l'imagerie satellitaire optique (Scanvic, 1983 ; Biémi, 1992 ; Mah et al., 1995 ; Biémi et al., 1998) ou radar (Blom et al., 1984 ; Gaddis et al., 1989) ou encore leur combinaison (Yésou, 1993) comme outil de cartographie en sciences de la terre (géologie, mine, géomorphologie, hydrogéologie, génie civil, géographie, etc.) d'identification de zones favorables à l'implantation de forage. Cette localisation des zones favorables à l'implantation de forage dans les terrains de socle cristallin nécessite l'intégration de deux technologies: la télédétection et les systèmes d'information géographiques (SIG). De nombreux auteurs ont démontré l'utilité de l'application des SIG et de télédétection dans la gestion des ressources naturelles et leur suivi. Selon Ismail (2011), l'utilisation des images satellitaires basée sur les techniques de télédétection permet de cartographier de vastes zones avec une plus grande précision pour l'évaluation et la gestion de diverses ressources. Teeuw (1995) a proposé une approche intégrée de la télédétection et des techniques de SIG pour améliorer la sélection de sites pour l'implantation de forages dans le bassin de la Volta au nord du Ghana. A cet effet, l'application de la technologie SIG permet une organisation rapide, la quantification et l'interprétation de grandes masses de données hydrogéologiques avec plus de précision et un risque minime d'erreur humaine (Pinder, 2002). Selon Sisay (2007), la technique de télédétection offre un avantage d'avoir une possibilité d'investigation sur une grande couverture, même dans des zones inaccessibles. Elle

reste un outil rapide et rentable dans la production de données précieuses sur la géologie, la géomorphologie, les linéaments, les pentes, etc., aidant ainsi, à la localisation de zones potentielles aquifères. L'intégration systématique de ces données, suivi d'investigations hydrogéologiques fournit une délimitation efficace, rapide et économique des zones potentielles aquifères. Aujourd'hui, malgré les recherches approfondies et les progrès technologiques, l'étude des eaux souterraines est restée plus qu'aléatoire, car il n'y a pas de méthode directe qui facilite l'observation de l'eau sous la surface du sol. Sa présence ou son absence ne peut être affirmée que par déduction indirecte basée sur l'étude des paramètres géologiques et des états de surface.

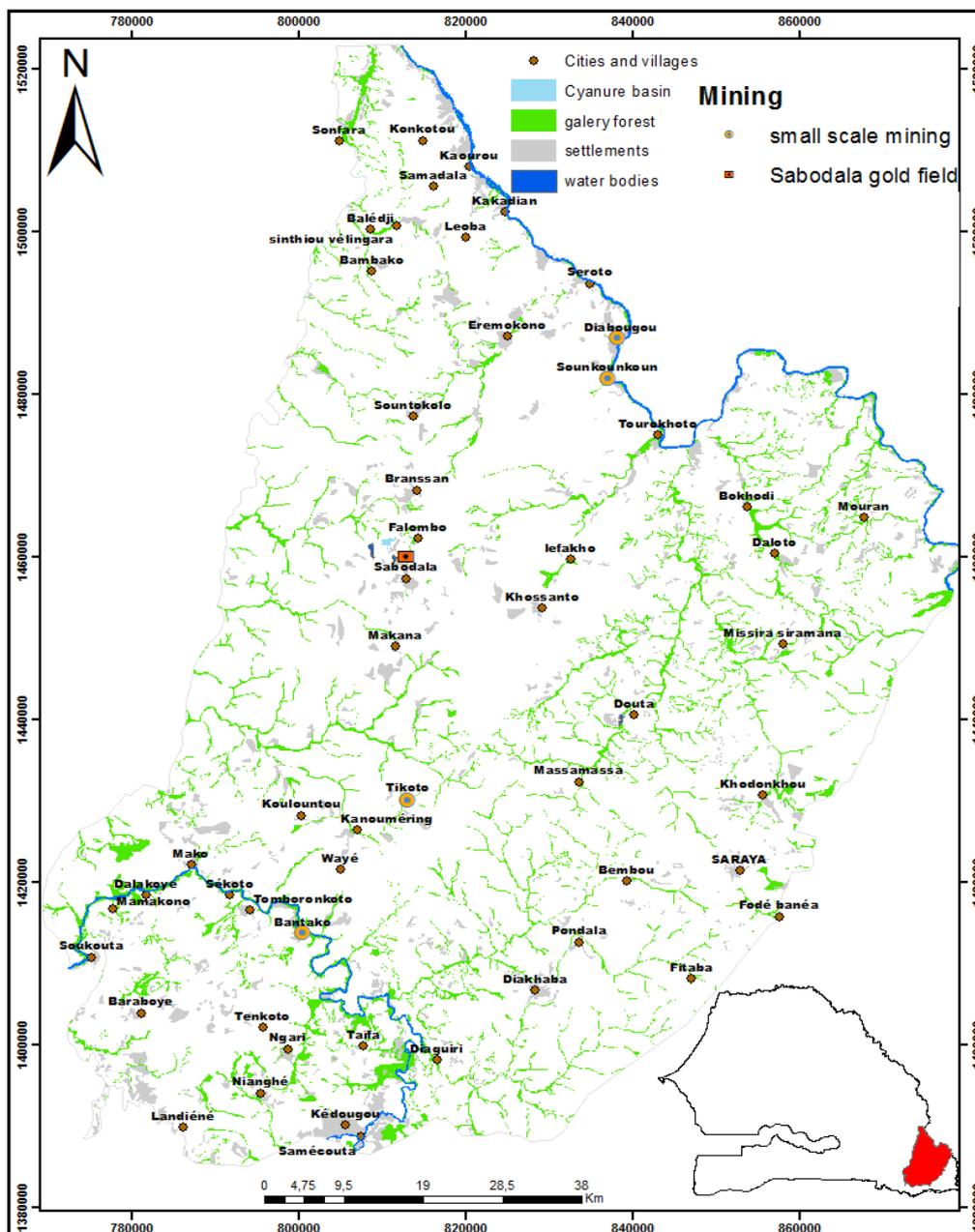


Figure 42. Carte de situation et occupation du sol.

V.10. Méthodes et Outils

Les images Landsat ETM + (avril 2010) et les images ASTER ont été respectivement traitées à l'aide Erdas Imagine 9.2 et par Arc GIS 9.3. Images Landsat ont été filtrées pour mettre en évidence les linéaments d'abord par les filtres low pass band (filtre 3x3) ensuite le filtrage directionnel (Sobel 7x7 de filtre) sont appliqués aux images. Le traitement des images ASTER a été réalisé sur Arc GIS 9.3 par le module hydrologie de l'outil « Spatial Analyst » qui a permis de générer le réseau de drainage et les pentes. Ainsi, la densité et la densité de linéament et du réseau de drainage sont réalisés à l'aide de l'outil « line density » qui calcule la densité d'éléments linéaires dans le voisinage de chaque cellule de sortie du raster. La densité est calculée en unités de longueur par unité de surface (Km/Km²). Tous les rasters d'entrée ont été générés, reclassés, pondérés et superposés en utilisant le module « Weighted overlay » (Superposition pondérée). Les outils de reclassement fournissent un moyen efficace pour le calcul de la conversion. A chaque valeur de classe dans un raster d'entrée est assignée une nouvelle valeur basée sur une échelle d'évaluation allant de 1 à 9. Ces nouvelles valeurs ont été calculées à partir des valeurs du raster d'entrée d'origine. Chaque raster d'entrée est pondéré en fonction de son importance ou de son pourcentage influence à la mise en place de réserve d'eau souterraine. Ainsi, le poids constitue un pourcentage relatif, et la somme des pourcentages d'influence des poids doit être égale à 100. La modification des échelles d'évaluation ou des pourcentages d'influences peut changer les résultats de l'analyse de la superposition pondérée (Silverman, 1986). Les données de sortie ont été combinées dans le modèle avec des paramètres qui influencent la mise en place de réserve d'eau souterraine que sont : les précipitations, les linéaments, la lithologie, la pente et le réseau de drainage (Al Saoud., 2010, Hossam., Et al, 2011). Ces paramètres ont été évalués en terme de 5 classes potentielles à savoir: de très bons potentiels, bons; modérée; faibles à très faibles potentiels et pondérés de 1 à 9 puis intégrés dans le SIG (Tableau 7). Chaque carte raster est reclassée en cinq classes de potentialité. L'analyse de superposition pondérée a été effectuée module « Spatial Analyst » d'Arc GIS 9.3 (Mehnaz, 2011), avec l'intégration de tous les paramètres de contrôle qui influencent plus sur la mise en place et le stockage des eaux souterraines dans la zone d'étude. Dans ce cas, si la pluie est considérée comme le paramètre le plus important dans la mise en place de réserve, un poids de 9 est attribué à la classe très bonne potentialité et son pourcentage d'influence est égale à 30%, ce qui fait que cette classe très bonne pluviométrie aura un poids relatif de $9 \times 0,3$ qui est égal à 2,7. La même opération est répétée pour toutes les classes de chaque paramètre en multipliant son poids par son pourcentage d'influence. Ainsi,

toutes les cartes thématiques reclassifiées (précipitations, géologie, densité de linéaments, pente, et densité de drainage), ont été intégrées dans le SIG pour gérer la carte unique des potentialités aquifères du Sénégal Oriental. Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de Landsat (ETM+, Avril 2010) qui est l'indice de l'activité végétale a été calculé à partir de bandes Landsat ETM+PIR (proche infrarouge ETM4+) et (R rouge ETM3+) et la formule est donnée dans (équation. 1). Son utilisation en télédétection permet d'évaluer la présence de végétation chlorophyllienne et déterminer l'intensité de l'activité végétale. En période de fin de saison sèche dans les zones sahéliennes à longue saison sèche (8 à 9 mois) où les nappes phréatiques sont peu profondes, la présence de végétation verte indique la disponibilité des eaux souterraines (National Remote Sensing Agency 2008). Dans cette étude, les débits de forages combinés avec les résultats du NDVI sont utilisés comme outils de validation des résultats du modèle généré par le SIG. L'organigramme ci-dessous (Fig.33) indique les différentes étapes de prétraitement et traitement des données utilisées dans cette étude.

V.11. Les données

V.11.1. La pluviométrie

C'est le paramètre le plus important dans la recharge des eaux souterraines. Dans la région, les pluies se concentrent principalement en période d'hivernage, qui commence à la fin du mois d'avril et se poursuit jusqu'à fin octobre début novembre dans la partie sud de la zone d'étude. Par contre dans la partie nord, les pluies commencent plus tard en fin juin et s'arrêtent généralement au début du mois d'octobre. Le maximum de précipitation est enregistré en août dans les deux provinces climatiques. Le secteur est caractérisé par un gradient pluviométrique nord-sud (Mall 2009). Ceci est illustré par une distribution spatiale des isohyètes montre un gradient qui augmentent du nord au sud. L'isohyète 1250 mm est observé dans la partie sud de Kédougou et vers la partie nord de la zone se trouve l'isohyète 650 mm. Ce contraste entre les provinces climatiques reflète également une différence dans la structure des communautés végétales. La partie sud est du domaine de la forêt avec une forte densité de la végétation parfois associée à des forêts galeries qui suivent les méandres des thalwegs. Ainsi, en remontant vers la partie nord de la zone d'étude, la forêt cède la place à la savane dominée par une végétation épineuse, bien adaptée aux conditions de sécheresse.

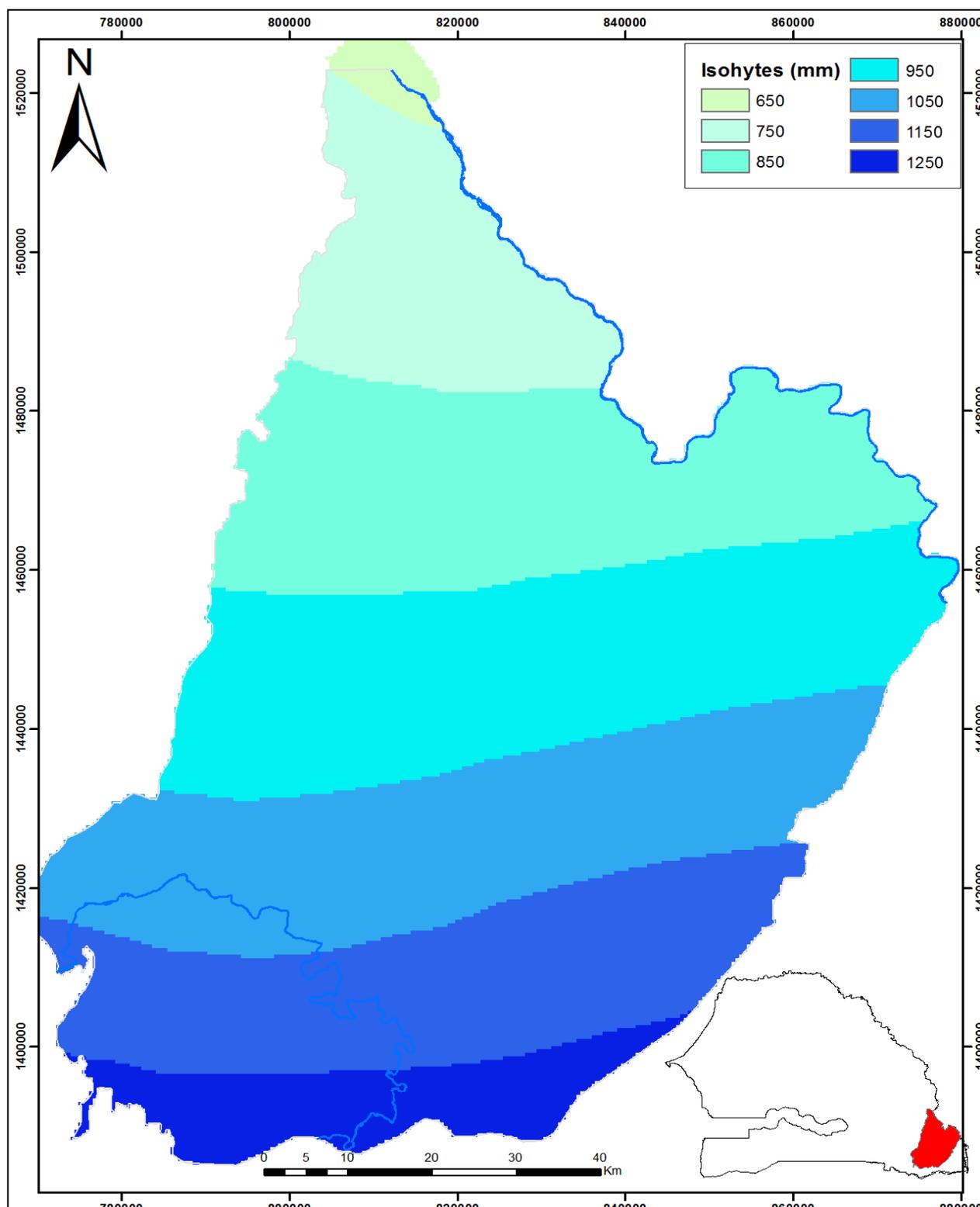


Figure 43. Distribution des isohyètes dans la zone d'étude (MEPNBRLA, 2009).

V.11.2. Géologie

Type de formation géologique est un facteur important dans le développement des réserves d'eau souterraine en milieu de socle cristallin. Leur pétrographie détermine le type et le profil

d'altération qui s'y développe. Ainsi, l'épaisseur de l'altérite est beaucoup plus importante sur les roches basiques et schistes que sur granites. Cependant, il se développe plus d'argile sur les roches de basique que sur les granites où les altérites sont plutôt sableuses. Ainsi, du fait de leur teneur élevée en Quartz, les granites sont beaucoup plus résistants à la désintégration mécanique et à l'altération que les autres types de roches. Donc les granites pourraient devenir bon aquifères s'ils sont bien affectés par des failles. Par contre, ils le deviennent moins s'ils sont peu structurés en raison de la forte résistivité des granites à l'altération liée à leur teneur élevée en quartz dans leurs structures pétrographiques. Les roches basiques et les schistes peuvent avoir de bon potentiel aquifère dû au fait que leur partie supérieure altérée est souvent très bien développée. Cette nappe d'altérite a surtout une fonction capacitive et joue un rôle important dans la recharge différée des eaux souterraines pouvant ainsi donc être utiles et souvent exploitée par les puits traditionnels villageois. Ainsi, les potentiels les plus intéressants sont enregistrés au niveau des formations basiques à ultrabasiques et les formations carbonatées. Les volcano-sédiments peuvent être de bons aquifères avec un bon potentiel en eaux souterraines. Cependant, les schistes présentent un potentiel modéré alors, que les faibles potentiels sont observés sur les granites et les roches volcaniques acides.

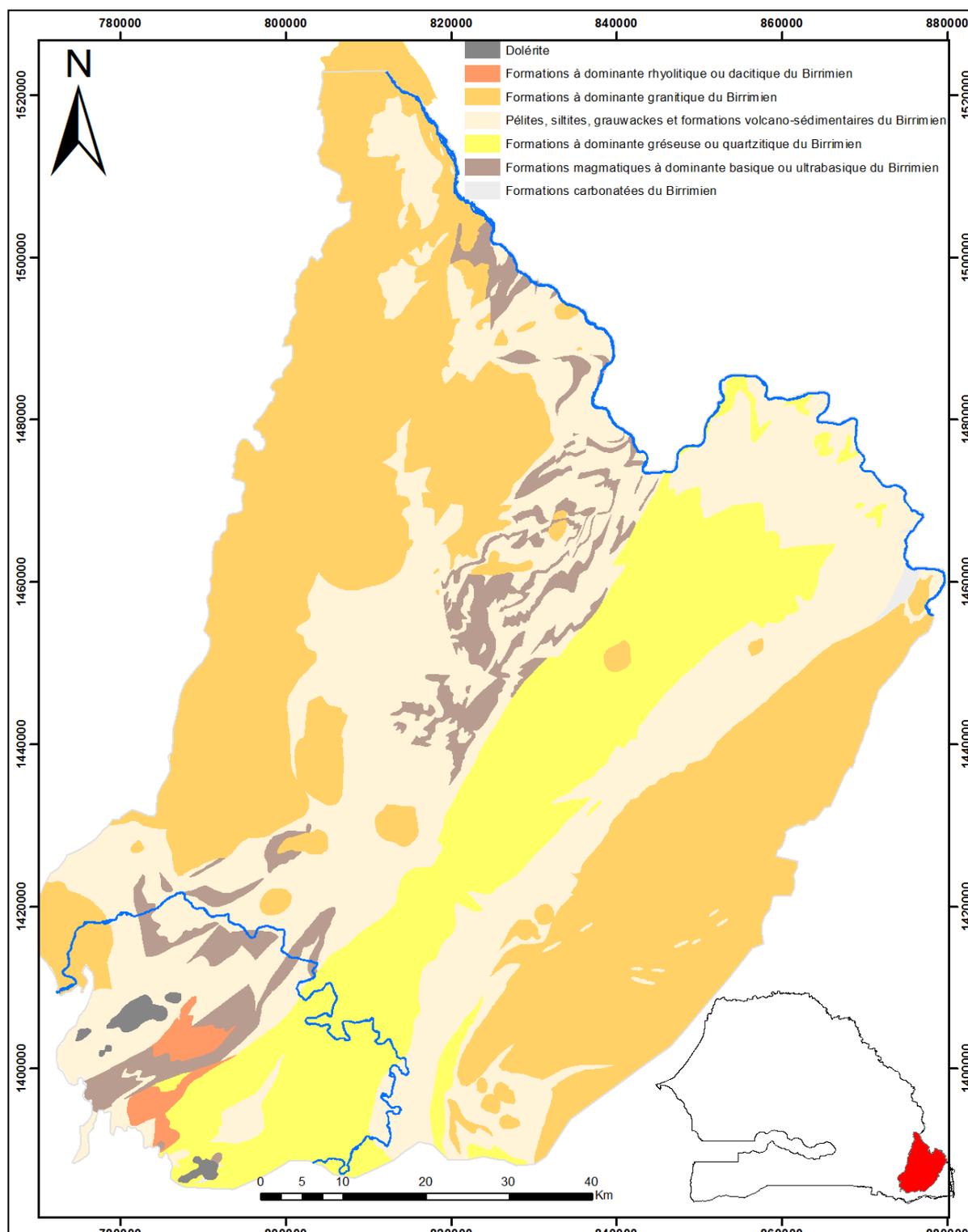


Figure 44. Entités hydrogéologiques (Wuilleumier & al 2010).

V.11.3. Linéaments

Ils ont fait l'objet de plusieurs études en Afrique de l'ouest (Biémi, Engelec, Kouamé, Savadogo Savané). Leur implication dans le domaine de la recherche de substance minérale et de zone favorable à l'implantation de forage productif est bien établie aujourd'hui. Sur l'imagerie satellitaire, les linéaments correspondent à des discontinuités image et sont exprimées par la

juxtaposition ou la superposition des éléments simples physiographiques ou natures variées composites (morphologie, hydrographie, végétation, différence de ton ...) où, les différentes parties sont relation rectilinéaire ou légèrement curvilinéaire (Kouamé, 1999). Sur le terrain il existe des discontinuités lithologiques (contact entre les différentes formations) ou structurales (failles, joint, diaclases ...) (GRONAYES et al.). Quatre grandes orientations de linéaments sont notées dans la région. Les directions N50-N60 et N60-N70 (Fig. 34) qui restent les plus représentatives avec respectivement 10,8% et 10,5% de la longueur des linéaments total, suivie par la N170-N180 et N0-N10 et finalement la direction N100 qui représente environ 8% de la longueur totale des linéaments. La prépondérance de la N60 et N50 est essentiellement due à un accident tectonique régionale appelée MTZ (zone de décrochement principal) qui représente une zone de cisaillement régionale qui a traversé l'ensemble de la région et se prolonge jusqu'au Mali.

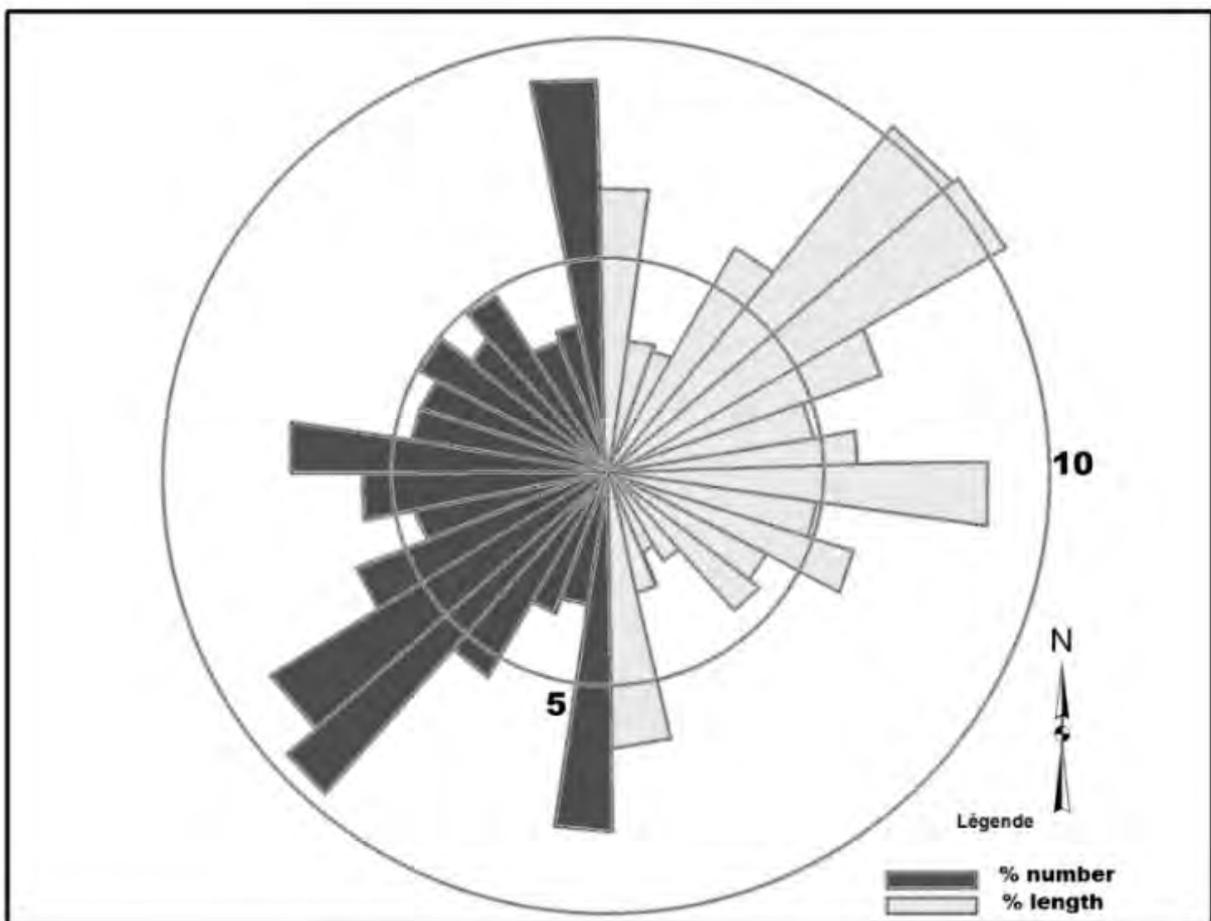


Figure 45. Rose diagramme de la distribution des linéaments (longueur et nombre).

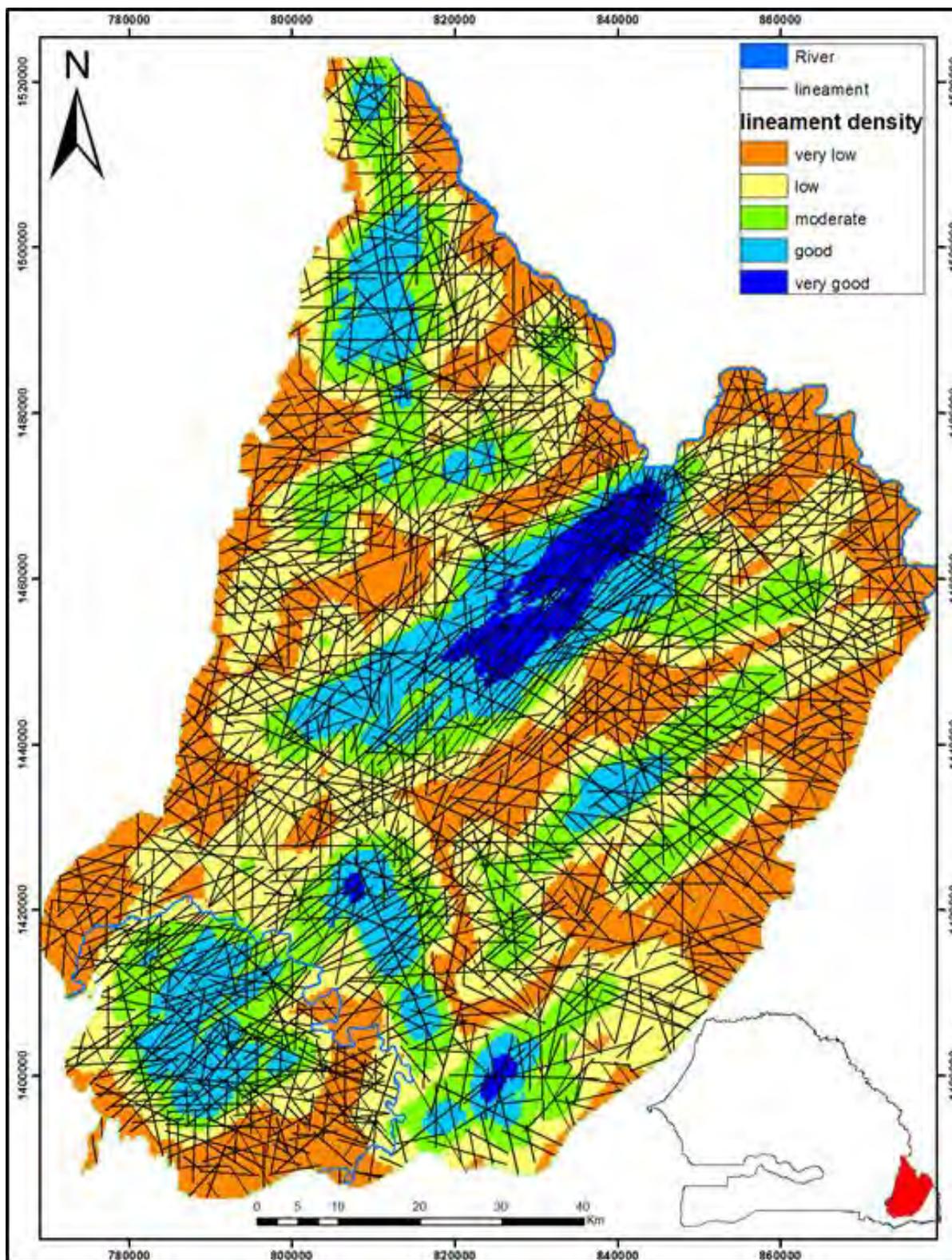


Figure 46. linéaments et densité des linéaments.

V.11.4. Les pentes

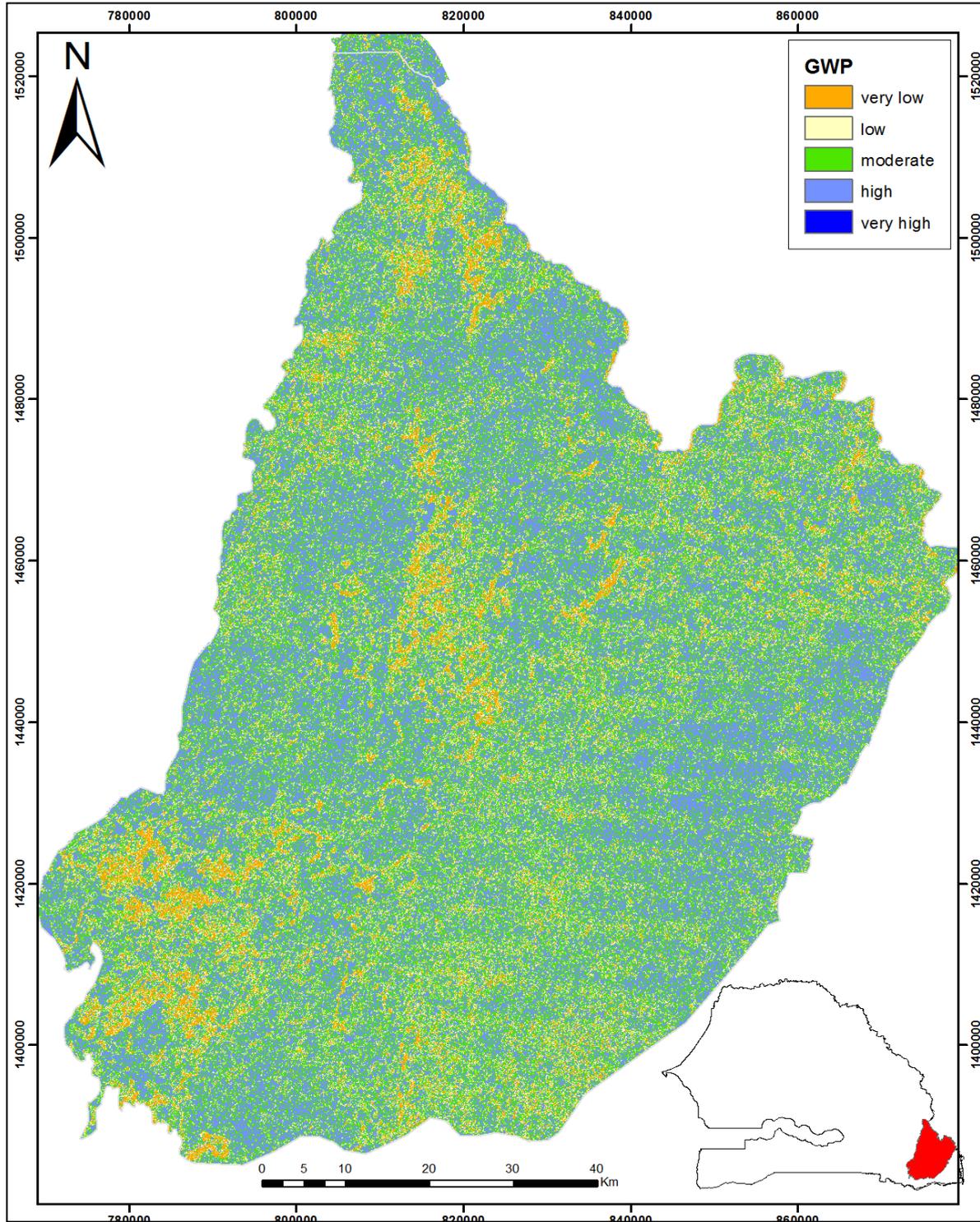


Figure 47. Répartition des pentes dans la zone d'étude

La plaine occupe la plus grande partie de la région et le relief est souvent marqué par des plateaux couverts d'un épais manteau latéritique. Les pentes sont particulièrement plus importantes dans la partie sud-ouest de Kédougou à proximité du secteur de Mako et dans le centre de la zone d'étude vers Sabodala où, ils peuvent atteindre 32% (Fig.47). La partie nord-est de la zone d'étude est relativement plate avec quelques reliques de plateau à altitude

modérée avec des pentes relativement faibles qui déversent vers la Falémé. Les élévations sont plus importantes dans la partie sud de la zone d'étude. Cette configuration de la géomorphologie rend les terrains dans la partie sud, plus propice au ruissellement qu'à l'infiltration donc, moins favorable au stockage des eaux souterraines si l'on tient compte du paramètre pente.

V.11.5. Le réseau de drainage

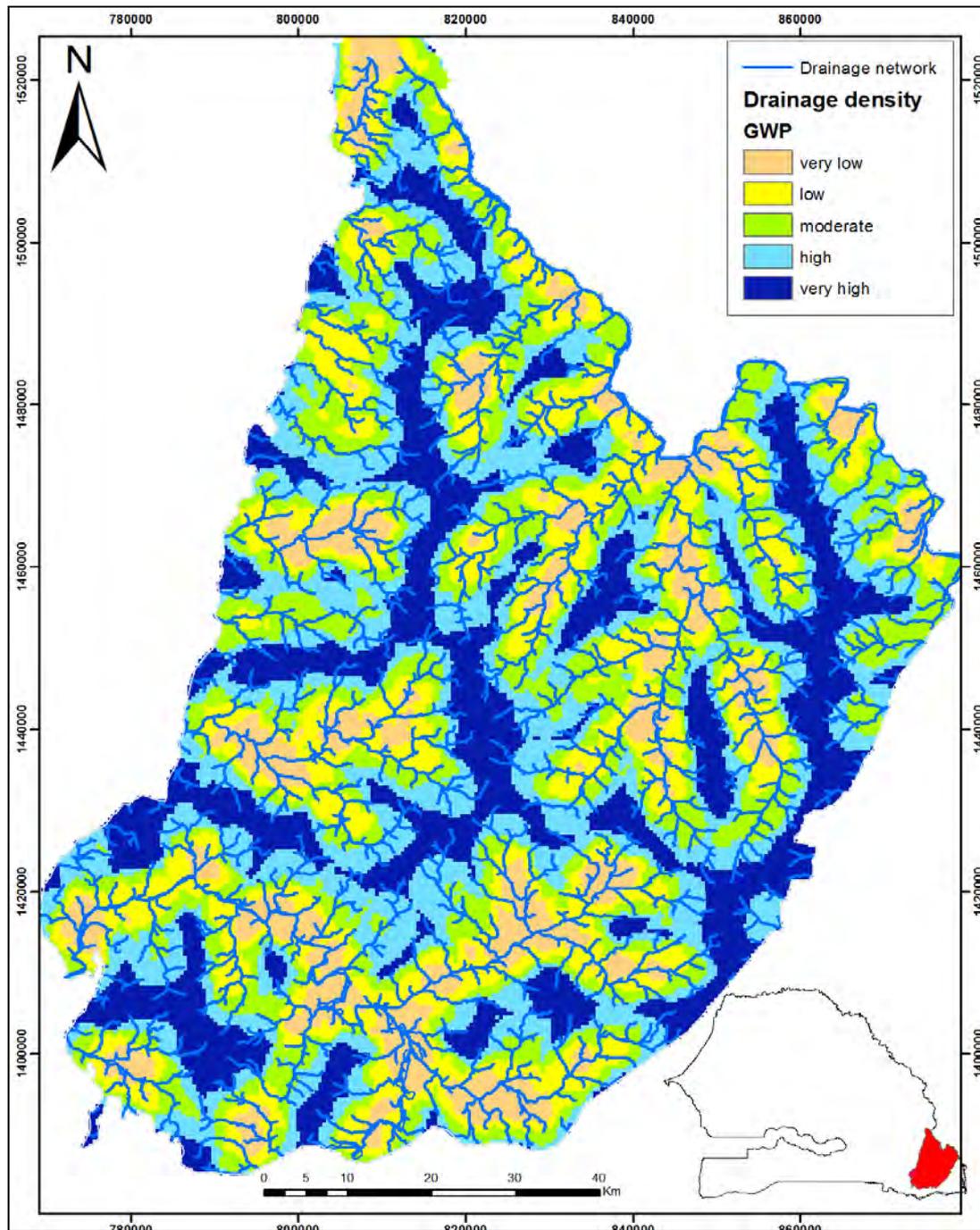


Figure 48. Le réseau de drainage et la densité de drainage.

Le réseau hydrographique constitue un facteur non moins important dans la mise en place de réserve d'eau souterraine. Cependant, il est étroitement lié aux facteurs physiographiques des bassins versants que sont : leur forme, leur taille, les pentes, la nature des sols, la nature lithologique des formations géologiques, etc. Comme la pente, le développement du réseau de drainage est inversement proportionnel au stockage des eaux souterraines. Un réseau de drainage important induit un ruissellement plus élevé qui réduit la capacité de stockage des eaux souterraines. Dans la zone d'étude, la nature imperméable des formations de socle et la présence de nombreuses failles expliquent cette très forte densité du réseau de drainage qui correspond essentiellement à des cours d'eau intermittents qui s'assèchent le plus souvent dès janvier. Toutefois, si les conditions topographiques sont favorables (faible pente), ces ravins qui bordent les lits des rivières peuvent constituer d'importantes réserves d'eau souterraine à faible extension latérale à l'échelle des villages.

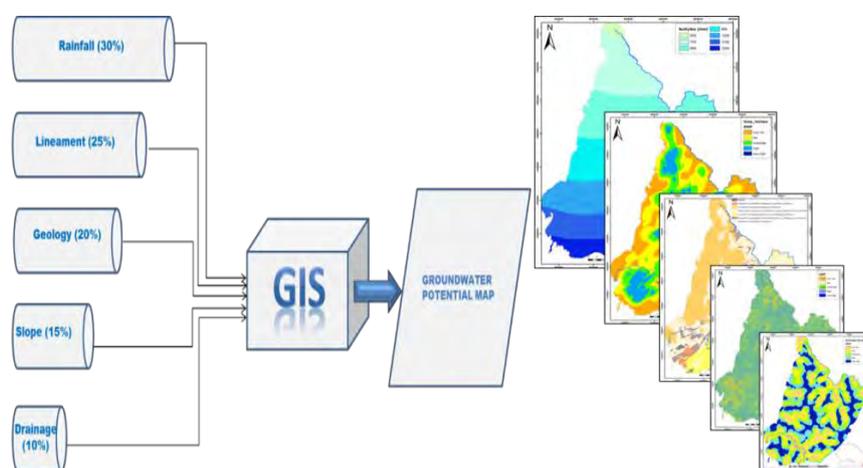


Figure 49. Organigramme des paramètres intégrés (Pluviométrie, densité de linéament, Géologie, Pente, Densité de drainage) et leur pourcentage de Pondération.

Tableau 8. Classification des facteurs impliqués dans la mise en place de réserve d'eau souterraine et leur pourcentage d'influence (Al Saoud, 2010 modifié).

Classes Paramètres pondérés	Très bon 9	Bon 7	Moderée 5	Faible 3	Très Faible 1
Pluviométrie 30%	2,7 1250-1150mm	2,1 1150-950mm	1,5 950-850mm	0,9 850-750mm	0,3 750-650mm
Linéaments 25% Longueur Km/Km²	2,25 38-48	1,75 28-38	1,25 19-28	0,75 9,5-19	0,25 0-9,5
Geologie 20%	1,8 Gabbros	1,4 Volcano-sédiments	1 Schiste	0,6 Granite	0,2 Rhyolite
Pente 15%	1,35 0-1%	1,05 1-2%	0,75 2-3%	0,45 3-5%	0,15 5-35%
Réseau de drainage 10% Km/Km²	0,9 0-1	0,7 1-1,8	0,5 1,8-2,7	0,3 2,7-3,6	0,1 3,6-4,5

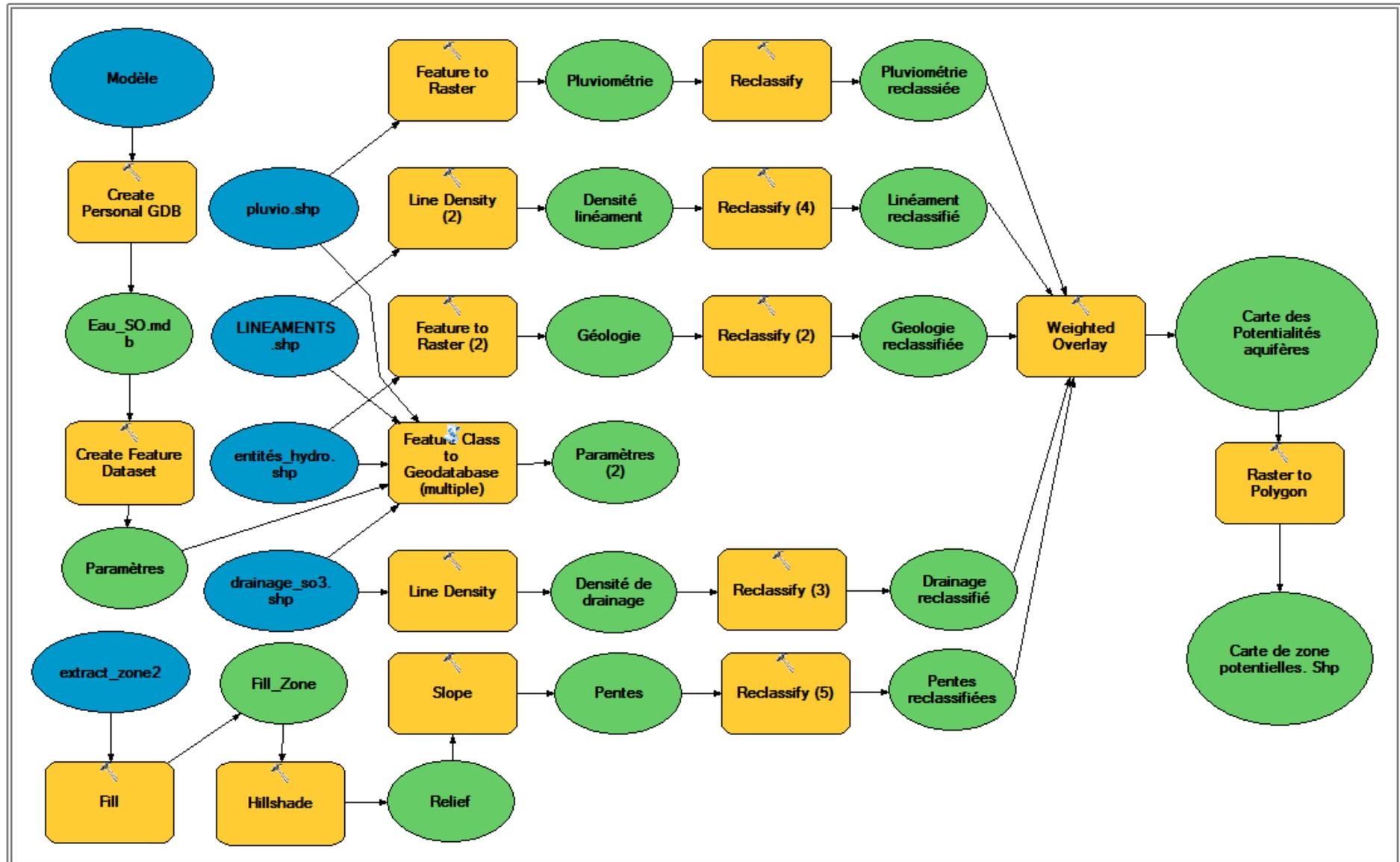


Figure 50. Modèle utilisé pour la réalisation de carte de potentialité aquifère des terrains du Birimien du Sénégal Oriental.

V.12. RESULTATS ET DISCUSSION

La carte de zone potentielle aquifère déduite de l'analyse SIG par intégration des paramètres pondérés indique cinq classes de potentialité allant des très fortes potentialités aux très faibles potentialités. Les zones à fort potentiel sont situées dans la partie sud de la zone minière de Sabodala et contrastent avec la partie nord où le potentiel des eaux souterraines est faible en raison de la baisse de la pluviométrie et des types de formations géologiques constituées de granites pour l'essentiel. Les très bons potentiels occupent environ 5% de la zone d'étude. Ces zones se trouvent principalement la partie sud du bassin versant du fleuve Gambie entre les isohyètes 1250 à 1150mm et MTZ. Cependant, les zones présentant un très bons potentiels sont également notées dans le secteur situé entre les isohyètes 1150 à 850 mm qui sont des zones isolées à faible extension, elles sont observées dans la partie sud du granite de Saraya, au Sud du village de Kanouméry et ses environs immédiats. Les très bons potentiels sont également localisés dans les formations volcano-sédimentaires (sud du Village Massamassa) et au sud du village Mouran. Dans la partie nord de la zone d'étude, quelques secteurs seulement présentent un très bon potentiel et se localisent aux environs de Kossanto et au sud du village Makana (sud du village de Sabodala). Il faut noter que les zones à très bon et de bon de potentiels sont associées avec un système de fracturation dense qui provoque une perméabilité secondaire élevée au niveau de ces formations cristallines : c'est le cas de la MTZ. Par contre, les zones à bons potentiels occupent 18% de la zone d'étude et sont aux alentours des zones à très bon potentiel. La plupart de ces zones à bon potentiel sont également localisées dans le sud de l'isohyète 850 mm, cependant, quelques reliques de zones à bon potentiel sont notées dans certains secteurs situés au nord l'isohyète 850mm.

Les résultats de NDVI, calculés à partir de l'image Landsat Avril 2010 (fin de la saison sèche) (Fig.52) montrent que les zones à très bon et bon potentiels sont bien corrélées avec des zones qui montrent une activité végétale élevée. Les zones à très faible potentiel et les zones à faible potentiel correspondent à des zones où l'activité végétale est très faible comme ce qui est observé sur la majeure partie des granites (Sandikounda-Soukouta et Saraya) et la partie nord du secteur au nord de l'isohyète 850mm (Fig.51). Toutefois, cette bonne corrélation entre la forte intensité de l'activité végétale et les zones à très bon et bon potentiel n'existe pas dans la partie nord de la zone d'étude aux environs du village de Soreto et cela pourrait être lié à la nature xérophytique des communautés végétales qui sont adaptées aux conditions de sécheresse et peuvent maintenir leurs activités à un niveau élevé, même avec une faible

humidité des sols. Comme en cette période avancée de la saison sèche, l'activité végétale est essentiellement soutenue par les ressources en eaux souterraines. Le NDVI peut être ainsi un bon indicateur de présence d'eau souterraine, mais son utilisation doit exiger une certaine prudence en raison de la déforestation et de la récurrence des feux de brousse dans la région pendant la période de saison sèche avancée. Ces phénomènes peuvent masquer l'intensité de l'activité végétale dans les zones affectées par ces feux et présentant une faible densité de peuplement végétal. La profondeur de la nappe doit être également prise en compte. Cependant, une faible activité végétale peut être retrouvée dans les zones où, la profondeur de la nappe dépasse 20 mètres, même si, les résultats des SIG indiquent parfois un très bon potentiel aquifère dans ces zones, c'est le cas de la partie sud du village de Mouran. En tenant compte de la productivité des forages, les gros débits (environ 11,5 à 30 m³ / H) sont observés dans les zones présentant un très bon à bon potentiel aquifère générés par le SIG et les très faibles productivités des forages sont observées dans la partie nord de la zone d'étude correspondant aux zones à potentiels aquifères faibles à très faibles avec des productivités allant de 0,6 à 2,5 m³ / H. Ces résultats ont ainsi prouvé que, la partie nord de la zone d'étude est une zone à faible potentialité de stockage des eaux souterraines si l'on tient compte des résultats des SIG et les productivités de forage. Ainsi, la réalisation d'ouvrage de captage dans cette partie nord du Sénégal oriental nécessite des études sérieuses dans le choix de l'emplacement des ouvrages pour minimiser les risques d'échec de forage ou de forage improductifs (très faibles débits).

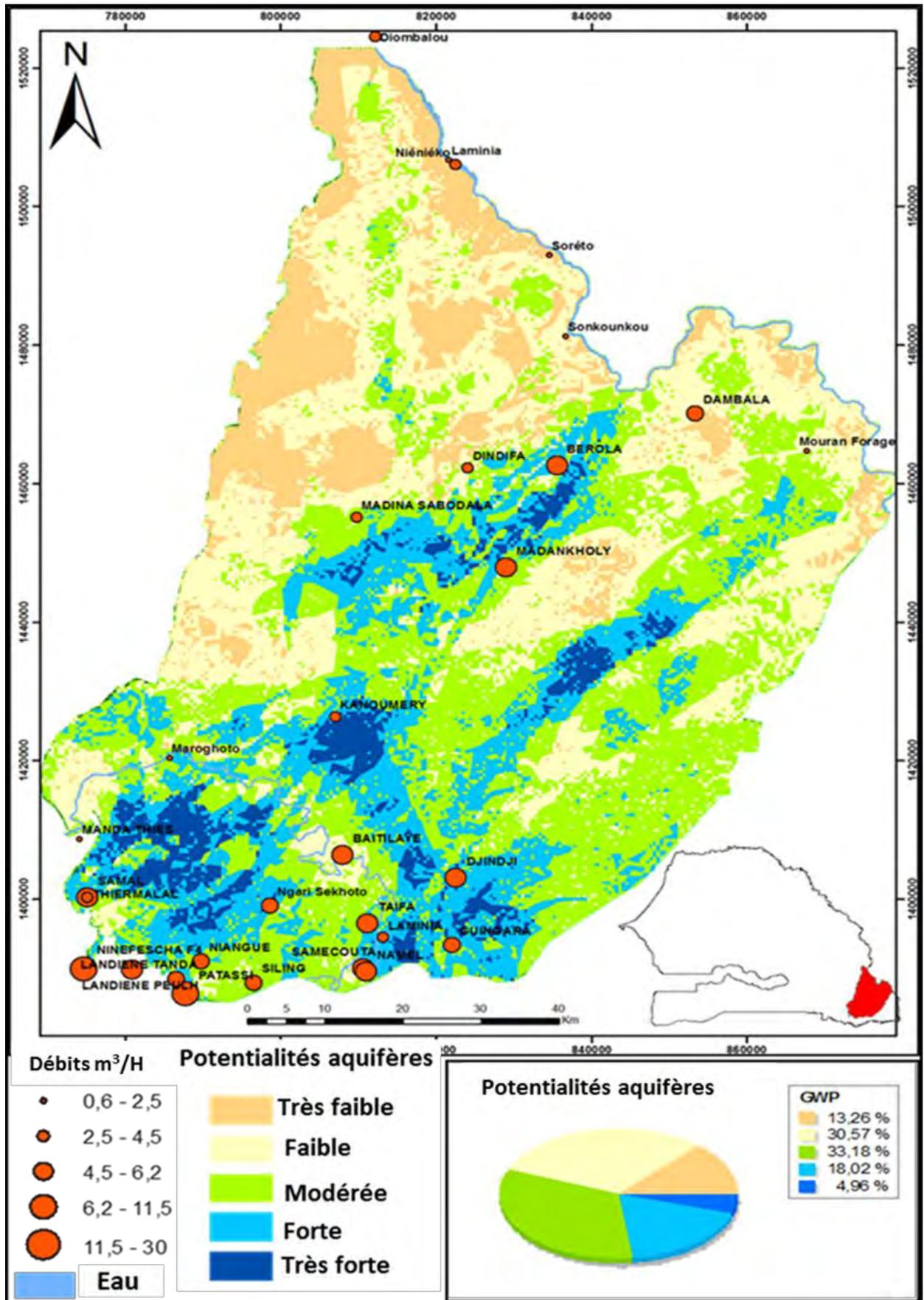


Figure 51. Carte des potentialités aquifères.

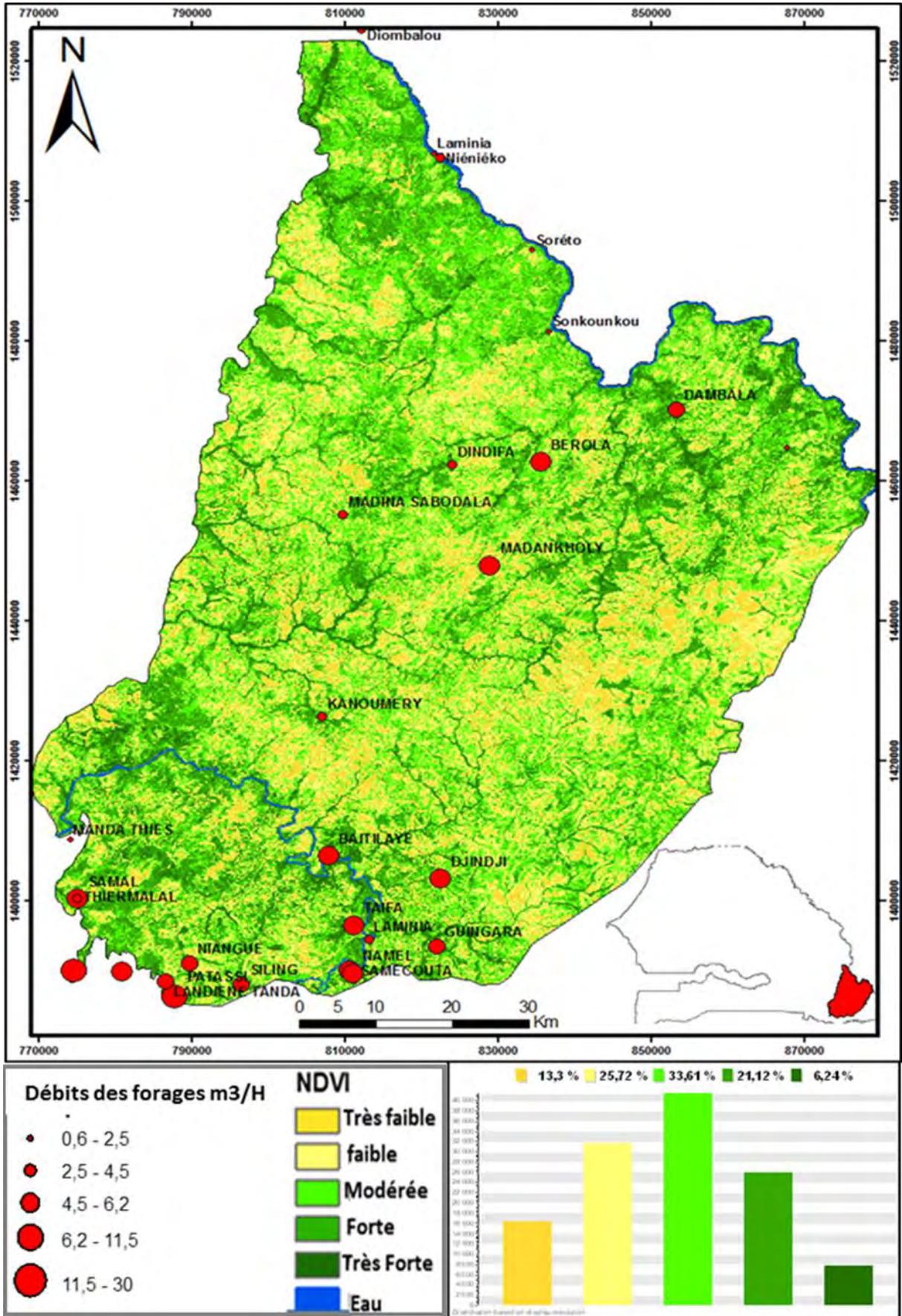


Figure 52. NDVI (Landsat ETM+ image 04/2010).

V.13. CONCLUSION

Au vu de ces résultats, l'intégration des différents paramètres qui influent sur la mise en place de réserve d'eau souterraine reste une méthode utile pour une meilleure localisation des sites d'implantation de forage ce qui réduirait les taux d'échecs de forage relativement élevés dans la zone. Les résultats du SIG montrent que 5% de la zone d'étude présente de très bons potentiels aquifères qui sont principalement concentrés dans la partie sud de la zone d'étude et sur la MTZ. Les très faibles potentiels qui constituent 13% de la superficie se trouvent essentiellement dans la partie nord de la zone d'étude et en particulier sur les granites. La combinaison des résultats générés par le SIG avec NDVI ainsi que la productivité des forages montre que généralement, les zones à bons potentiels aquifères sont bien corrélées avec les zones à activités végétales élevées en saison sèche avancée, sauf dans les secteurs affectés par les feux de forêt qui sont très fréquents dans la région en cette période. Les forages à grands débits sont observés dans les zones présentant de bon et de très bon potentiels aquifères résultant de l'analyse du SIG et les très faibles productivités de forage sont rencontrées dans la partie nord de la zone d'étude correspondant ainsi aux zones à faibles et très faibles potentialités aquifères. Ces résultats importants peuvent être utilisés comme un indicateur efficace qui aiderait les décideurs à mieux gérer leurs projets de forage, mais également permettrait à réduire les risques d'échec de forages dans la zone. Par conséquent, l'utilisation des techniques de télédétection et SIG contribuent à améliorer la connaissance de l'investigation sur les ressources en eaux souterraines dans le contexte de socle du Sénégal oriental et peut être considérée comme un outil efficace pour évaluer les potentialités aquifères d'une zone sur de grandes échelles.

DEUXIEME METHODE : Evaluation des potentialités aquifère par analyse multicritère SIG intégrant les paramètres intrinsèques de la matrice aquifère et de la pluviométrie.

V.14. Introduction

Cette deuxième partie de l'évaluation des potentialités aquifères du Sénégal oriental est basée sur l'étude des propriétés intrinsèques de la matrice aquifère et leur implication dans la mise en place de zones favorables à l'implantation de forages (nature pétrographique, altérites, et leur degré de fracturation). Les aquifères de socle cristallin sont généralement classés comme systèmes à deux couches qui se composent du substratum rocheux fracturé recouvert par une zone altérée / régolite (Chilton et Foster, 1995). La régolithe étant défini comme le produit solide qui a subi une intense altération in situ. Le développement ou l'évolution de la zone altérée dans les terrains birimiens du Sénégal oriental est mis en évidence par l'étude lithologique et stratigraphique de soixante-sept logs de forages dans la zone. Cependant, l'étendue et la profondeur de la partie altérée des roches cristallines sont déterminées par les facteurs tels que leur sensibilité à l'altération et l'action de l'eau. Ainsi, le climat agit comme un facteur prépondérant dans le développement de l'altération. Ce qui fait qu'en climat aride, la zone altérée est généralement moins développée que dans les terrains localisés dans les zones climatiques plus humides (UNESCO, 1984). L'altération et la fracturation constituent ainsi les facteurs qui influencent sur le caractère favorable ou défavorable à la mise en place de réserve d'eau en zone de socle. Le degré d'altération et la nature des altérites (argileuse ou sableuse) peuvent avoir une influence non négligeable sur les taux d'échec de forages souvent élevés dans les réservoirs de socle du fait de leurs faibles capacités de stockage.

V.15. Méthodologie

L'approche méthodologique adoptée est basée sur la description de la lithologie des formations traversées par les forages à partir des logs de forage. Ces derniers montrent une très grande diversité des terrains géologiques aquifères dans le Birimien du Sénégal oriental. L'analyse stratigraphique a été réalisée par le logiciel RockWorks qui nous a permis de modéliser l'extension et la variation d'épaisseur des différents terrains traversés par les forages. Cette analyse s'est faite à partir de données 67 forages implantés dans les terrains birimien du

Sénégal oriental. La première étape a consisté à la mise en place de la base de données qui intègre les données lithologiques et stratigraphiques de tous les ouvrages ainsi que leur débit. Le modèle intègre tout d'abord les données de localisation de l'ouvrage coordonnées XY et l'altitude Z du point qui est déterminée dans le cadre de cette étude à partir des images SRTM. Sur la base des informations stratigraphiques fournies, le logiciel permet de calculer et de restituer la forme du relief et les cartes isopaques et isobathes de toutes les couches traversées par les forages. Ainsi, à travers le module « Stratigraphy », nous avons pu réaliser des cross sections qui montrent l'évolution de la stratigraphie permettant ainsi d'avoir des cartes isobathes des différentes lithologies qui seront utilisées dans l'analyse SIG pour l'évaluation des potentialités aquifères. Les cartes isobathes (épaisseurs) des différentes lithologies seront associées avec la densité de fracturation pour évaluer les potentialités aquifères de la zone. Ce paramètre constitue le facteur le plus déterminant pour la mise en place de nappe dans le contexte de socle cristallin. Bien que, l'épaisseur de la partie fracturée peut-être importante, sa productivité peut être limitée si elle n'est pas affectée par plusieurs fractures. Cependant, l'interconnexion des fractures constitue un élément clé de succès de forages dans ce milieu où les nœuds de fracture représentent généralement des zones cibles pour l'implantation d'ouvrage de captage. Cependant, pour simplifier l'analyse lithostratigraphique, le découpage en unité stratigraphique proposé à cet effet intègre quatre parties essentielles que sont : (1) les altérites que nous définissons ici comme les formations superficielles altérées qui regroupent les sols, la cuirasse et les argiles se développant sur la roche altérée ; (2) la Régolithe qui représente la roche altérée in situ et qui à son tour repose sur le socle fracturé ; (3) et ce dernier repose sur le socle sain (4). Cependant, l'absence d'une ou de plusieurs de ces unités peut être notée dans certains secteurs. La méthode utilisée pour l'analyse dans le SIG reste la méthode de pondération des poids « Weighted overlay » de chaque paramètre d'entrée du modèle en tenant compte de son pourcentage d'influence (plus de détails sur cette méthode : se référer à la première partie de ce chapitre). Dans l'analyse SIG il a été également tenu compte de l'existence de nappes alluviales à faible extension latérale à proximité du fleuve Gambie et de la rivière Falémé. Ces alluvions ont une capacité de stockage adéquate et constituent une cible importante d'exploration de ressources en souterraine dans les milieux cristallins. En raison de leur plus grande porosité. Ces niveaux agissent comme des réservoirs capacitifs qui alimentent lentement la nappe inférieure de fracture. Le tableau 11 récapitule les pourcentages d'influence des différents paramètres choisis par l'analyste.

Pour voir l'importance et l'influence de chaque paramètre, nous avons procédé à une analyse statistique. Le traitement statistique des données a été réalisé par le logiciel R qui a permis de faire l'analyse en composante principale (ACP). Cette analyse prend en compte les paramètres tels que la pluie, le débit des forages, les linéaments, la pente, la proximité aux cours d'eau majeurs, l'épaisseur des arènes et l'épaisseur de la fracturation.

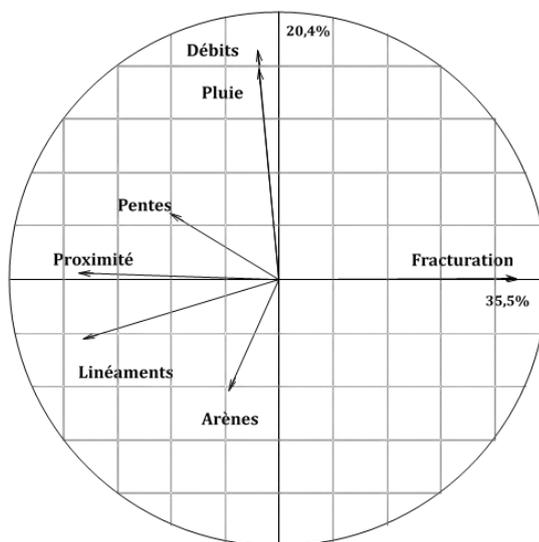


Figure 53. Analyse en composantes principales intégrant les paramètres qui influencent les débits

Tableau 9. Contribution des axes factoriels

Axes Factoriels	F1	F2	F3	F4	F5
Inerties	2.8406	1.6349	1.1407	0.9100	0.6542
Pourcentage d'inertie	35.507	20.437	14.259	11.376	8.177
Pourcentage cumulé	35.51	55.94	70.20	81.58	89.76

Les résultats de l'ACP (Figure) montrent que l'axe factoriel F1 contribue pour 35,5% de la variance totale des données et l'axe F2 pour 20,4%. L'axe F1 est représenté les paramètres tels que : la proximité aux cours d'eau, les linéaments et la fracturation. Ces paramètres influencent peu le débit. Par contre, sur l'axe factoriel F2 les débits et la pluviométrie sont fortement corrélés. Les pentes également sont positivement corrélées aux débits et les arènes par contre, montrent une corrélation négative signifiant ainsi, qu'une augmentation de leur épaisseur contribuerait à réduire les débits. L'axe F2 qui est caractérisé par les paramètres qui influencent plus le débit c'est le cas de la pluie, de la pente et des arènes (Fig.53). Ces résultats montrent que le débit des forages est essentiellement influencé par la répartition de la pluviométrie. Au niveau des zones à pluviométrie élevée, les rendements des forages sont beaucoup plus intéressants. Cependant, il est à signaler que les arènes présentent une influence négative sur

le rendement des ouvrages. Ainsi, si l'épaisseur des arènes est très importante (cas des ouvrages qui captent les roches basiques), les débits observés au niveau de ces forages baissent. Ce constat est tout à fait vrai au niveau des aquifères de type doléritique qui développent des épaisseurs d'arènes relativement élevées souvent très argileuses tendant ainsi à colmater les fractures ce qui contribue à réduire leur perméabilité. Toutefois, sur terrain granitique les arènes sont accompagnées de produits d'altération à granulométrie grossière et présentent des épaisseurs moins importantes ce qui tend à augmenter les rendements des ouvrages sur ces types de terrain. Les autres paramètres tels que : les linéaments, la fracturation, la proximité aux cours d'eau majeurs semblent avoir peu d'influence sur le débit des forages. Ainsi pour affiner cette analyse, nous avons mesuré le degré d'influence de ces paramètres à travers un test statistique basé sur un modèle de régression linéaire.

Le modèle intègre tous les paramètres qui peuvent affecter le débit des forages. Ainsi, le débit est choisi comme variable dépendante et les autres paramètres (Pluviométrie, pentes, épaisseur des arènes, proximité aux cours d'eau majeurs, épaisseur de la fracturation, densité de linéament) comme variables explicatives. Le tableau 10 présente les résultats de ce test statistique qui montre que, parmi les variables quantitatives, seule la pluie présente un seuil de probabilité significatif de 0,03 avec une valeur test 2,3. Ces valeurs tests définissent l'importance de chaque paramètre dans le rendement des ouvrages. Ainsi, par ordre d'importance, les paramètres qui influencent plus les débits sont, la pluie, la pente, l'épaisseur des arènes, la proximité aux cours d'eau majeurs, les altérites et la densité de linéaments avec des valeurs tests respectives de 2,3 ; 0,6 ; 0,38, -0,27 ; 0,23 ; 0,011. C'est donc sur cette base qu'un pourcentage d'influence est attribué à chaque paramètre. Ainsi, le Tableau résume les facteurs et leur pondération.

Tableau 10. Résultats du modèle de régression

	Estimée	Erreur Std.	Valeur test	Pr (> t)
(Interception)	-5,817	6,275	-0,927	0,364
Pluie	0,0099	0,0043	2,308	0,0308*
Pente	0,3431	0,4957	0,692	0,4961
Arène	0,0432	0,112	0,386	0,7034
Proximité	-0,00053	0,0019	-0,27	0,7897
Altérite	0,0187	0,08	0,233	0,8176
Fracturation	0,0031	0,077	0,041	0,9676
Linéament	-0,000001	0,00014	-0,011	0,9914
RBUB	1,102	3,222	0,342	0,7356
VSS	2,577	3,245	0,794	0,4355

RBUB : Roches basiques et ultrabasiques ; VSS : volcano-sédiments et schistes

Tableau 11. Classification des facteurs impliqués dans la mise en place de réserve d'eau souterraine et leur pourcentage d'influence.

Classes Paramètres pondérés	Très bonne 9	Bonne 7	Modérée 5	Faible 3	Très Faible 1
Pluviométrie 25%	2,25 1250-1150 mm	1,75 1150-950 mm	1,25 950-850 mm	0,75 850-750 mm	0,25 750-650 mm
Géologie 25%	2,25 VSS	1,75 RPB	1,25 RVB	0,75 GR	0,25 Dolérite
Pente 15% Longueur Km/Km²	1,35 0-1%	1,05 1-2%	0,75 2-3%	0,45 3-5%	0,15 5-35%
Proximité des axes hydrauliques 10%	0,9 250 m	0,7 500 m	0,5 750 m	0,3 1000 m	0,1 >1500 m
Epaisseur arène 10% Km/Km²	0,9 19-35	0,7 12-19	0,5 7,4-12	0,3 3,7-7,4	0,1 0-3,7
Epaisseur fracturation (m) 5%	0,45 29-47	0,35 22,5-29	0,25 16,8-22,5	0,15 11,4-16,8	0,05 0-11,4
Altérites 5 %	0,45 30-60	0,35 22,4-30	0,25 16,4-22,4	0,15 10,7-16,4	0,05 1,2-10,7
Linéaments 5%	0,45 38-48	0,35 28-38	0,25 19-28	0,15 9,5-19	0,05 0-9,5

RPB : Roche plutonique basique ; VSS : volcanosédiments et schistes ; Gr : Granite

L'intégration de ces différents facteurs concourant à la mise en place de réserves dans ces types de terrain dans le SIG a permis de générer la carte des potentialités aquifères de la zone (Fig.52).

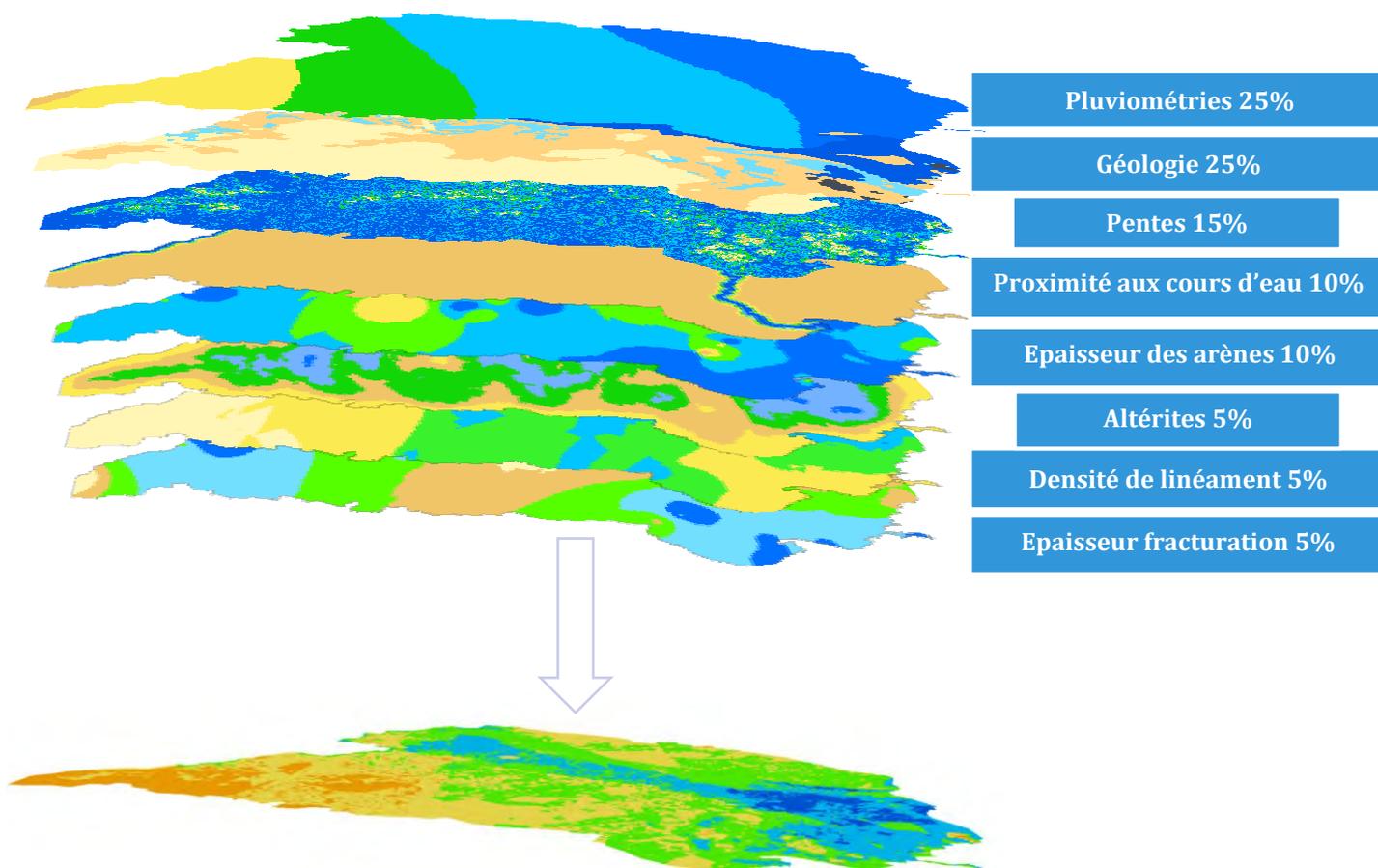


Figure 54. Organigramme de la méthodologie de l'analyse multicritère dans le SIG

V.16. Résultats

Les données de forages montrent que l'altération est beaucoup plus développée dans la partie sud de la zone si l'on tient compte de la coupe (A-A') (Fig.55), allant de Sibikiling passant par Mako et le long du fleuve Gambie jusqu'à Guingara avec des épaisseurs d'altération relativement plus importante (en moyenne 25m) dans cette partie sud de la zone. Par contre, au nord de la zone, la coupe (B-B') (Fig.55) montre un profil qui part de Diabougou au sud à Dioumbalou dans l'extrême nord avec une diminution de l'épaisseur de l'altération du Sud vers le nord (en moyenne 9 à 10 m). Ce résultat est en conformité avec la situation hydroclimatique dans la zone nord qui reste très peu arrosée par rapport à la partie Sud. Cette coupe montre que l'altération est beaucoup moins importante dans la partie nord où les pluies sont moins importantes et l'évaporation y est plus intense. Le développement de la partie fracturée est également faible et le socle sain est atteint à des profondeurs relativement faibles dépassant rarement 50 m. La prédominance des terrains de nature granitique dans la partie nord

constitue également un facteur important sur le développement des altérites à ce niveau. Les granites s'altèrent moins que les autres types de formations géologiques ce qui n'est pas sans conséquence sur le rendement des ouvrages localisés dans cette partie Nord et plus particulièrement sur les formations granitiques.

La coupe (C-C') est un profil de direction SSO-NNE (Fig.55) qui part de Folonkoto, traverse la MTZ et se prolonge jusqu'à Bokhody. Elle donne un aperçu net sur l'évolution et la profondeur du toit du socle sain. L'épaisseur de l'unité altérite est très variable et le socle sain est également atteint à des profondeurs très variables. La fracturation reste très développée dans le secteur de Madankholy et ceci est le résultat direct de la tectonique transcurrente éburnéenne à l'origine de la MTZ qui a affecté la zone. Cette intense altération a une conséquence importante sur le rendement des forages localisés sur la MTZ dont, l'essentiel présente de bons débits. Concernant les arènes, ils se développent surtout sur les dolérites (forage de Kanouméring et de Sambarabougou), sur le granite (Forage de Tinkoto), sur les grès (forage de Madankhloy). L'unité roche altérée est souvent constituée d'arènes granitiques ou des boules de dolérites caractéristique de l'altération doléritique qui débite en boule avec la présence d'une couche argileuse sur le toit de ses arènes.

La coupe (D-D') (Fig.55) part des zones relativement élevées dans le secteur de Sabodala et traverse la MTZ et une partie du granite de Saraya jusqu'au village de Sanela. Elle montre une évolution de l'épaisseur des altérites beaucoup plus développée sur les terrains volcaniques basiques du groupe de Mako et qui diminue progressivement à partir de Massamassa vers le granite où le socle sein est atteint à moins de 50 m de profondeur. Il faut noter également un développement plus important des arènes sur les granites que sur les autres formations géologiques. Ceci pourrait être un facteur important dans la recharge des aquifères sous-jacents du fait de la grande porosité secondaire que peuvent développer ces types de formation améliorant ainsi le rendement des ouvrages dans ces zones à transmissivité élevée.

Concernant les unités fracturées, elles montrent une évolution de la fracturation beaucoup plus importante au niveau de la MTZ (Coupe C-C') au niveau de Madankholy et sur Mako (coupe A-A') probablement liée à la shear zone de Mako avec des épaisseurs moyennes respectives avoisinant 50 et 75 m. Sur terrain granitique, elle est moins développée (coupe B-B' et D-D') avec des épaisseurs moyennes dépassant rarement 20 m. Cette fracturation est fonction de la limite de décompression des roches qui souvent, ne dépasse pas 60 m.

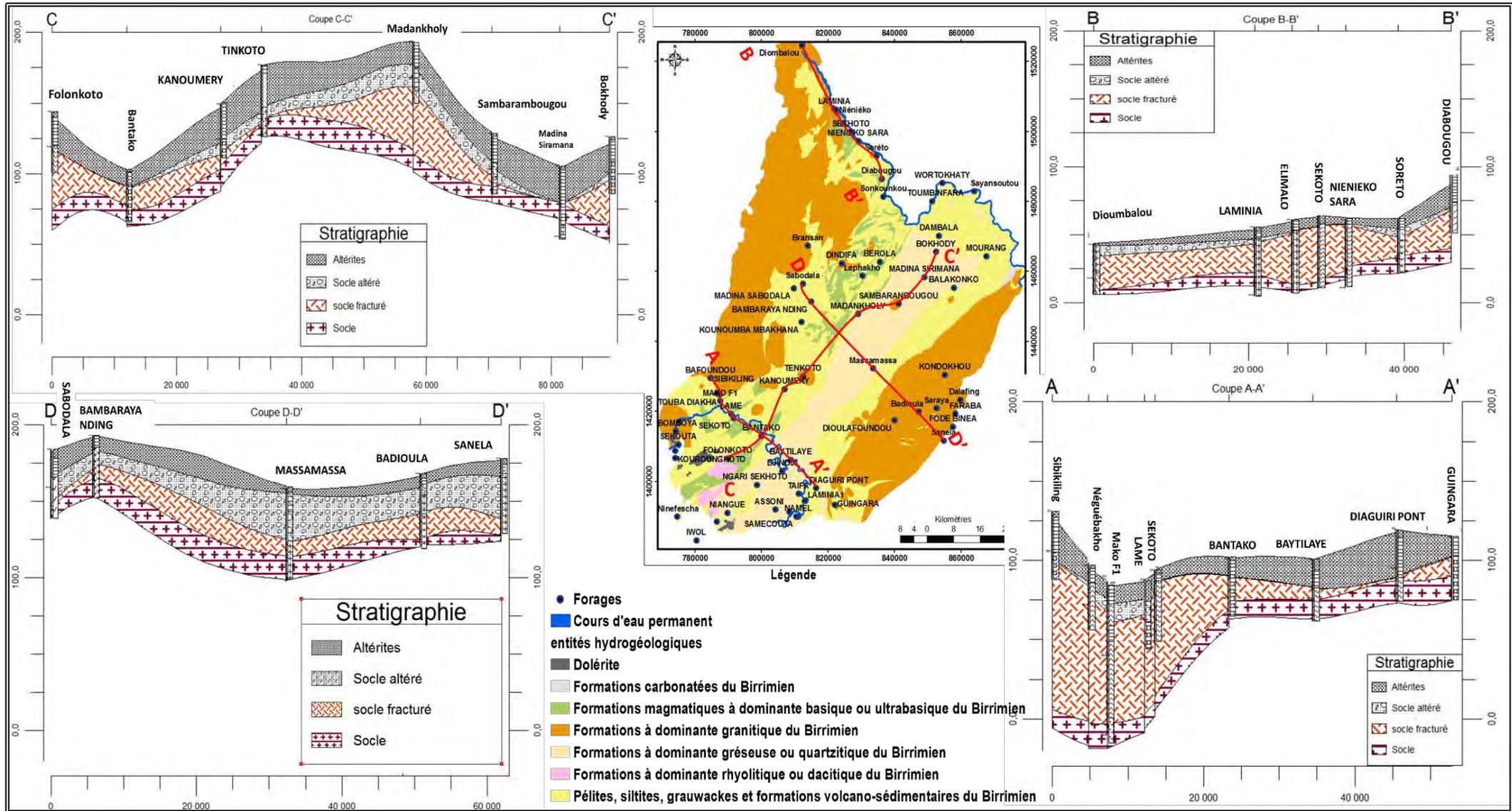


Figure 55. Coupes indiquant les variations des différentes lithologies en fonction de terrains et des latitudes

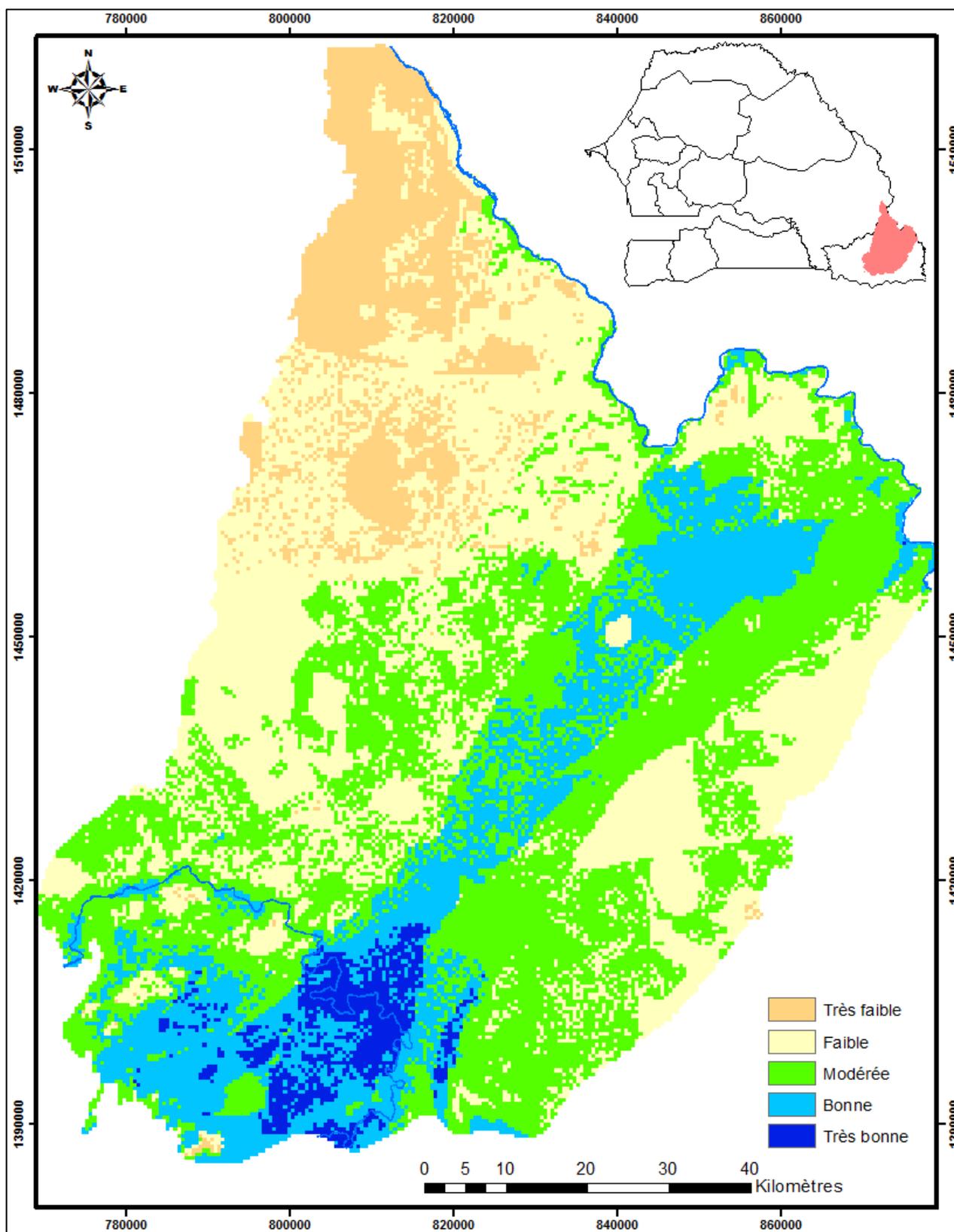


Figure 56. Carte de potentialité aquifère générée par le SIG

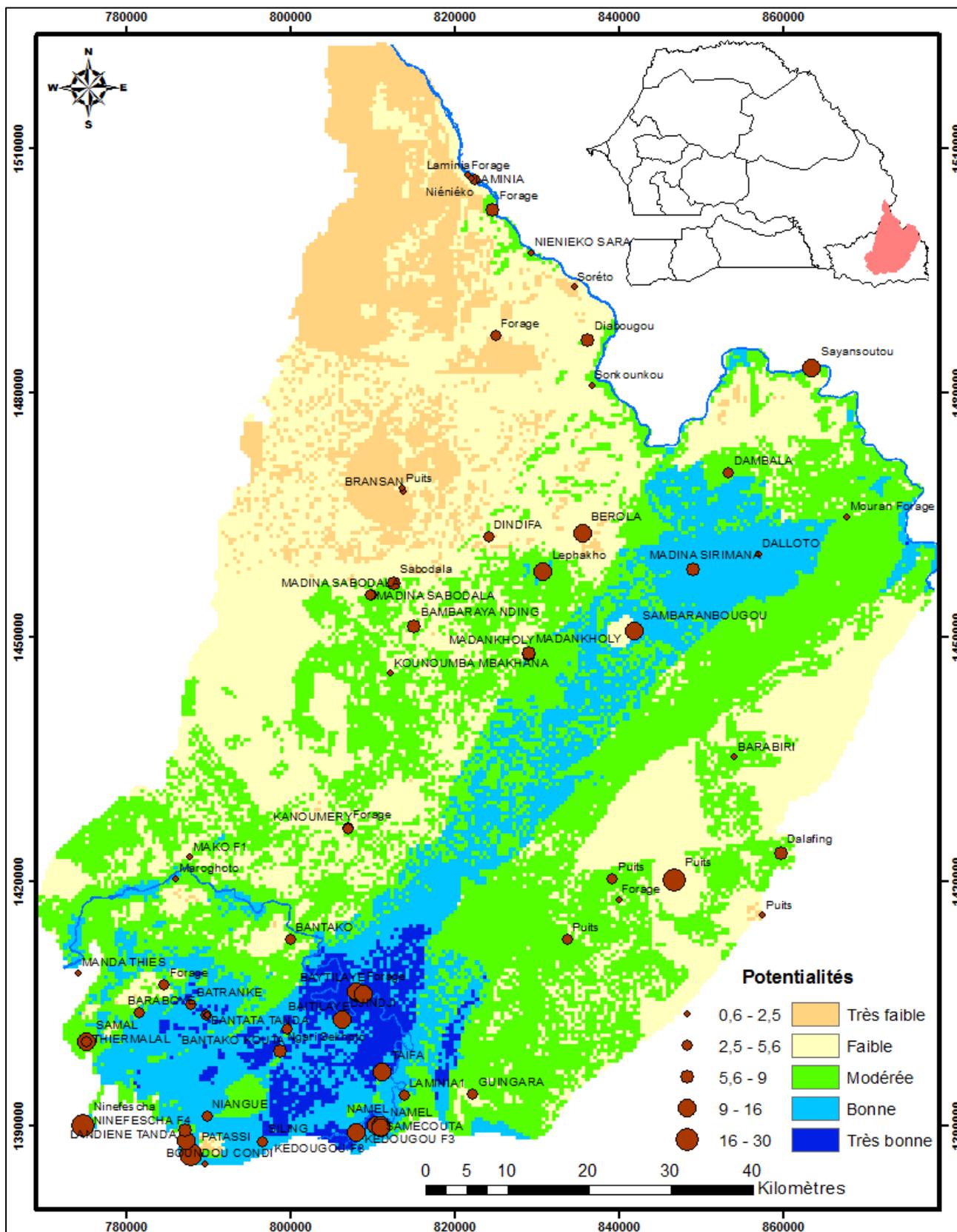


Figure 57. Classes de débits superposés sur la carte des potentialités aquifères

Les résultats de cette deuxième méthode montrent que, les zones à très forte potentialité sont localisées le long du fleuve Gambie, au sud du bassin versant de la Gambie et sur la MTZ (Fig.57). Ces secteurs constituent donc des zones privilégiées pour la recherche de zone favorable à l'implantation de forage surtout pour obtenir des débits élevés. Ces zones représentent 3,15% de la superficie totale de zone soit 256,8 Km². Les zones présentant de bonnes potentialités sont observées surtout sur les terrains volcanosédimentaires, mais ils se concentrent plus sur la partie sud du bassin versant de la Gambie où les débits intéressants peuvent être observés (8 à 20 m³/H). Ce résultat est en conformité par les données de débits observés dans cette partie sud. Elles sont également retrouvées sur la MTZ à Madankholy, vers Kossanto. Par contre, les potentialités modérées constituent la classe que l'on retrouve sur tous les types de terrain et représentent 35,1% de la zone soit une superficie 1280,6 Km². Elle est en majorité rencontrée sur les granites et dans la partie nord-est, sur les formations volcanosédimentaires du groupe de Dialé, au niveau des villages de Mouran Missira Siramana et au nord le long de la Falémé de Soreto à Laminia. Il faut noter qu'il y'a une bonne corrélation entre les débits observés et les zones à bonne potentialité, mais dans certaines zones à potentialités modérées de bons débits peuvent y être observés : c'est le cas du forage de Badioula sur le granite de Saraya qui capte les enclaves sédimentaires de nature gréseuse. Ce fait peut être lié à deux phénomènes : soit le forage est implanté sur un accident tectonique majeur ou il est implanté à proximité d'un axe hydraulique (affluent de cours d'eau) généralement guidé par la fracturation (cas du forage de Diaguiri). Les faibles potentiels sont essentiellement rencontrés dans la partie nord et plus particulièrement sur le Granite de Sandikounda Soukouta, à l'est de Heremekono vers la Falémé, sur le granite de Saraya à Dioulafoundou et dans la partie sud vers Guingara. Ces zones à faibles potentialités couvrent une superficie de 2987,06 Km² soit 35,9% de la superficie de la zone.

Tableau 12. Statistique des superficies des classes de potentialités

Potentialité	Surface (Km ²)	Pourcentage
Très faible	873,10	10,5
Faible	2987,06	35,9
Modérée	2917,62	35,1
Bonne	1280,61	15,4
Très bonne	256,80	3,1

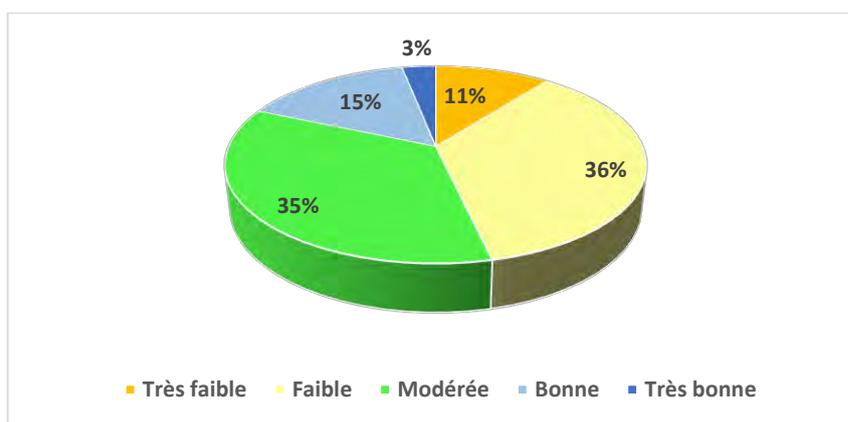


Figure 58. Pourcentage des classes de potentialités dans la zone d'étude

Cette étude cartographique montre que les formations volcanosédimentaires du Birimien présentent les meilleures potentialités aquifères compte tenu des résultats générés par le SIG. Les très faibles potentialités ne sont rencontrées que dans la partie nord et occupent une superficie de 873,10 Km² soit 10,5% de la superficie totale de la zone. Ces résultats confirment que dans la partie nord et les terrains granitiques présentent de faibles potentialités et les risques d'avoir des forages négatifs restent élever à ces niveaux. Contrairement aux zones à faibles potentialités, les zones à forte potentialité restent les zones les plus intéressantes du point de hydrogéologique au Sénégal oriental, parce que c'est seulement dans ces zones que sont observés des débits parfois supérieurs à 20 m³. Ces zones constituent donc, des sites privilégiés d'implantation de forage pour l'alimentation en eau potable en quantité suffisante. Cependant dans certains secteurs bien que la zone présente de bonnes potentialités, de faibles débits de forage y ont été notés : c'est le cas du secteur de Mako situé en altitude. Ces débits faibles peuvent être liés à la qualité de réalisation des ouvrages ou surtout un mauvais choix des sites d'implantation. Ces résultats du modèle pourraient être plus affinés s'ils sont couplés de mesures géophysiques complémentaires pouvant donner plus d'indications précises sur l'hydraulicité réelle des fractures. Ce qui par conséquent, améliorerait significativement les débits des forages et baisserait les taux de forages négatifs dans la zone. Ce qui fait que tout projet de réalisation de forage devrait nécessiter une étude approfondie visant à mieux affiner le choix dans l'emplacement des ouvrages hydrauliques à bon débit. Ainsi, cette étude montre que les méthodes présentées dans ce travail sont relativement adaptées et permettent d'avoir une idée prédictive rapide dans l'estimation de la productivité des ouvrages dans les secteurs cibles pour les projets d'implantation de forage. Cependant, ils peuvent présenter certaines

limites ce qui nécessite donc une bonne compréhension de ces milieux de socle afin de pouvoir mener une interprétation correcte des résultats générés par le SIG.

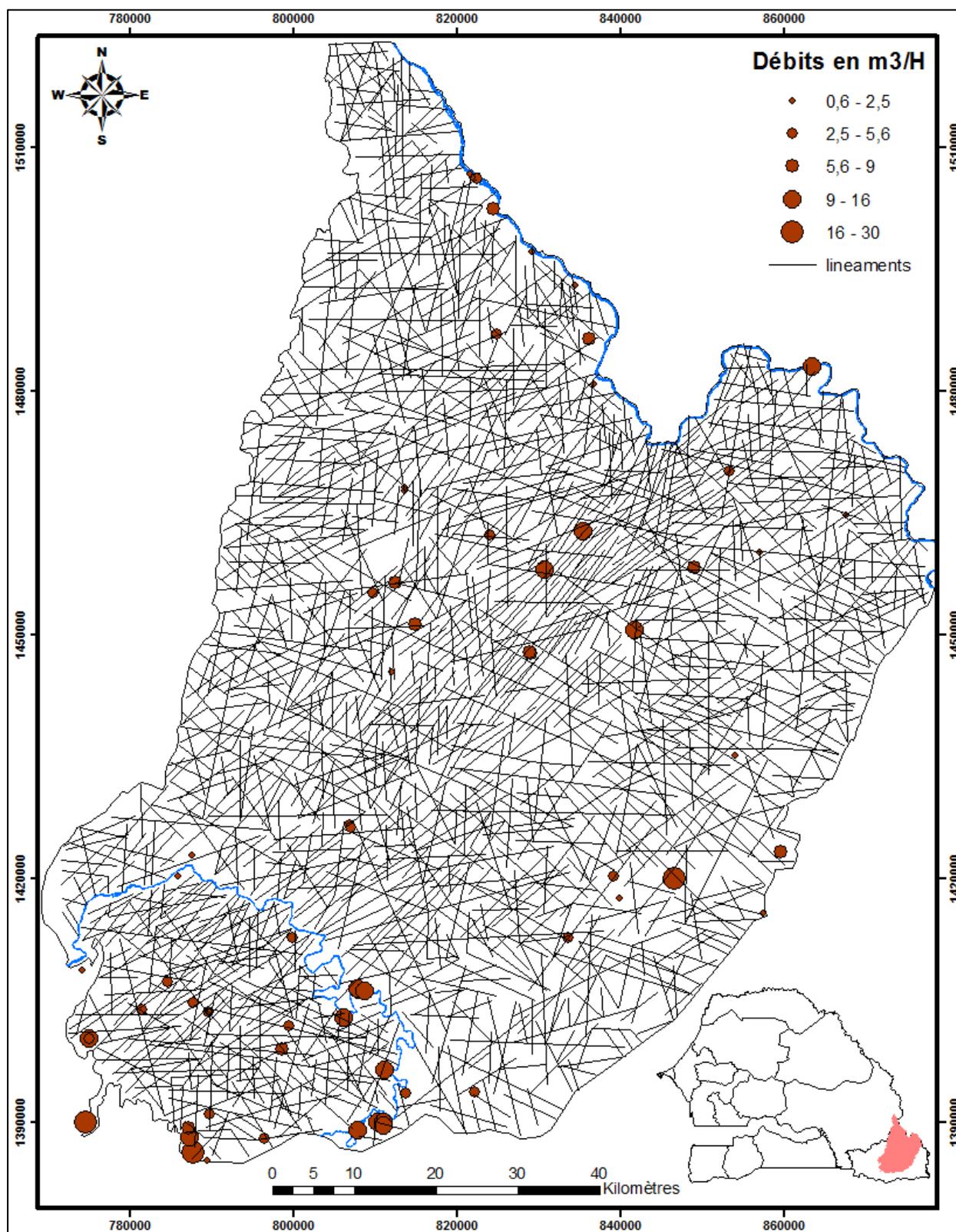


Figure 59. Répartition des débits de forages sur la carte linéamentaire

La carte linéamentaire (Fig.59) constitue un élément clé dans le positionnement des ouvrages de captage. Le taux de succès de ces ouvrages dépend essentiellement de leur positionnement par rapport au réseau de fractures conductrices présentant une hydraulicité réelle. Un décalage de quelques mètres de ces structures peut être une cause d'échec dans ces terrains cristallins. Cette étude a pu démontrer qu'au moyen d'analyse multicritère il a été possible de produire des cartes pouvant servir de guide dans le choix de l'emplacement de sites productifs pour l'implantation de forages en zone de socle. La méthode a également servi d'avoir une représentation visuelle du niveau de confiance de l'analyste en vers les résultats du modèle en lui permettant de faire une analyse comparative des informations relatives aux débits des forages par rapport aux potentialités aquifères indiquées par les résultats du SIG. La méthode présente également un grand intérêt en termes de coût et de temps, mais également en termes de simplicité ce qui fait que le concepteur peut modifier les paramètres de l'analyse en fonction de ces besoins. Ceci lui permettra ainsi de concevoir et de réaliser différents scénarii en modifiant certains paramètres, par exemple le nombre et le type de paramètre à choisir dans l'analyse.

V.16.1. Représentation de l'incertitude et limite de la méthode

Pour évaluer la précision du modèle nous avons utilisé les débits comme données de validation. Sur le tableau 14 les colonnes représentent les classes de débit et les lignes représentent les prédictions en termes de potentialité. Ainsi, pour tester la fiabilité du modèle nous avons étudié la correspondance des classes de débit par rapport aux classes de potentialités prédites dans les différents secteurs. Pour cela, nous avons défini trois classes de débit : débits faibles (classe 1), modérés (classe 2) et élevés (classe 3) (Fig.60). A partir de ces classes de débits nous avons utilisé l'outil « extract value to point » dans « spatial analyst tools » pour avoir la correspondance des classes de débits aux résultats de potentialités prédites. Le tableau donne toutes les valeurs prédites par le modèle ainsi que leur correspondance avec les classes de débit réel. Ceci nous a permis de calculer la fréquence de correspondance de chaque classe par rapport aux valeurs de potentialités prédites à partir de l'outil « frequency » dans Arctoolbox. Le résultat est consigné dans le tableau des fréquences (Tableau.13). Ce dernier nous a permis de déterminer la matrice d'erreur entre les différentes classes en utilisant l'outil « pivot table » (tableau croisé dynamique) toujours dans Arctoolbox.

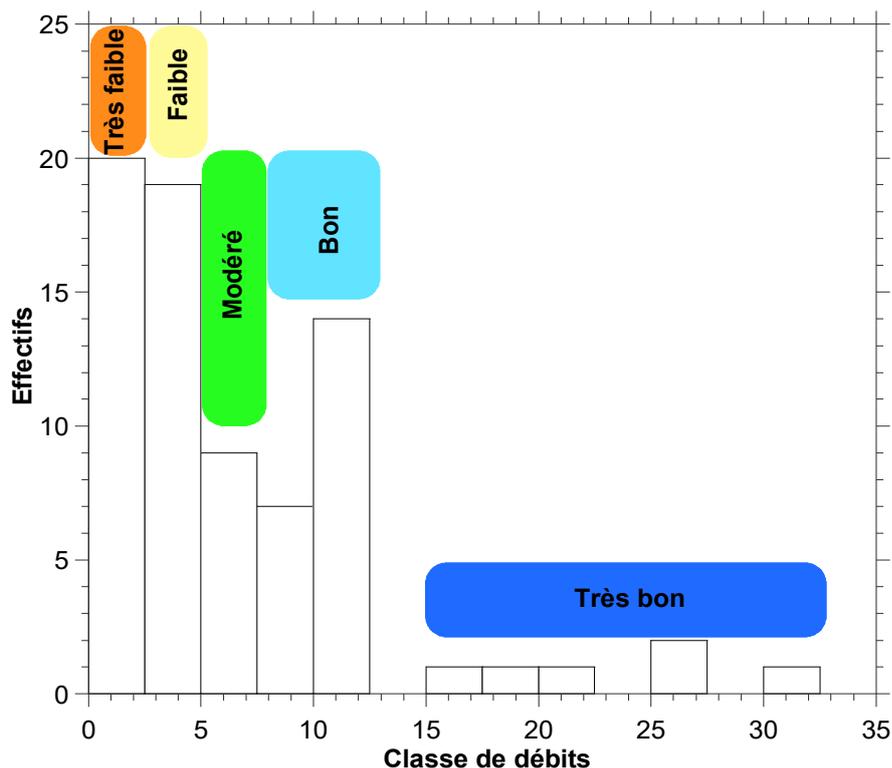


Figure 60. Histogramme des effectifs en fonction des classes de débits

Tableau 13. Fréquence de correspondance des classes de débits avec les différentes prédictions

Fréquence	Classe	Prédiction
15	1	1
12	1	2
7	1	3
1	2	1
5	2	2
2	2	3
7	3	1
6	3	2
14	3	3

1= Faible débit ; Faible potentialité ; 2= débit modéré, potentialité modérée ; 3 Bon débit, Bonne potentialité

Tableau 14. Matrice d'erreur

Classe	Prédiction	Faible débits 0-5 m ³	Débits modérés 5-8 m ³	Débits élevés > 8 m ³	Pourcentage de précision
Faible potentialité	1	15	1	7	61,21%
Potentialité modérée	2	12	5	6	21,76%
Bonne potentialité	3	7	2	14	60,86%

Ces résultats montrent que la classe faible potentialité présente la meilleure précision avec 15 valeurs de faible débit sur les 23 (Tableau.14). Ce qui correspond à un pourcentage de précision

de 61,21% au niveau des zones à faible potentialité. Par contre, pour la classe potentialité modérée, elle montre la plus faible précision avec seulement 5 ouvrages à débits modérés soit 21,7% des ouvrages rencontrés dans ces zones présentent cette classe de débit et pour l'essentiel, ce sont de faibles débits qui y sont observés (12 ouvrages sur les 23) soit 52% des ouvrages. Ces résultats montrent que dans les zones à potentialités modérées majoritairement localisées sur les granites, le succès de réalisation d'ouvrages est aléatoire et nécessite des études précises dans le choix de l'emplacement des ouvrages, car dans ces zones à potentialité modérée, la probabilité d'avoir des débits faibles reste très élevée (52% des ouvrages situés dans ces zones à potentialité modérée présentent des débits faibles). Toutefois, dans certains secteurs, bien que les potentialités prédites soient modérées, des débits élevés peuvent y être notés : c'est le cas des forages du forage de Badioula qui bien qu'étant sur le granite présente un débit élevé (19 m³/H).

S'agissant de la classe bonne potentialité, elle montre une bonne fiabilité du modèle avec une précision de 60,86% soit 14 ouvrages sur les 23 qui présentent de bons débits. Cependant, sur ces zones à bonne potentialité 7 ouvrages présentent de faibles productivités. Autres enseignements à tirer reste le fait que les zones à faibles potentialités coïncident bien avec les zones présentant des forages à faibles débits, cependant, les seules zones favorables à ces niveaux restent les zones à proximité des cours d'eau majeurs notamment la Falémé. Toutefois, il faut surtout retenir que dans ces zones, la réalisation d'ouvrage à grand débit reste à exclure et un choix approprié des sites d'implantation devrait être bien mené à ce niveau pour éviter les forages négatifs.

Il est cependant, nécessaire de quantifier cette incertitude entourant les cartes produites. Cela permet ainsi de mieux évaluer la valeur des résultats qui sont présentés, car ces résultats de la modélisation peuvent être altérés par bon nombre d'éléments pouvant affecter l'exactitude de l'analyse. Certaines données de l'analyse ainsi que les outils utilisés sont responsables de cette perte potentielle de confiance dans les résultats générés. Le processus de cartographie constitue un exemple où des incertitudes peuvent être générées (Grandmont, 2013). Par exemple, dans le cas de cette étude, la carte de pentes présente des valeurs dont la précision dépend de la résolution des données spatiales utilisées. Un autre exemple d'erreur pourrait provenir des méthodes d'interpolation utilisées, qui prédisent des résultats dans des zones sans informations. La précision de ces résultats prédits dépendra en grande partie de la densité des points de mesure dans la zone. Ainsi, plus les points d'observation sont denses, plus l'erreur générée sur la valeur prédite est faible. Le caractère discontinu et très hétérogène des terrains

de socle combinés à la fracturation et la couverture altérée souvent épaisse dans ces milieux augmentent également les risques d'erreurs dans ce type d'analyse.

V.17. Conclusion

La recherche de zone favorable à l'implantation de forage dans les zones de socle constitue un défi important pour l'approvisionnement en eau dans ces terrains présentant de faibles potentialités aquifères. La mise en place de projets hydrauliques ne doit plus se faire sans une évaluation approfondie des sites d'implantations. Aujourd'hui, les SIG constituent des outils d'analyse multicritère pertinents pouvant aider à la réduction des taux de forages négatifs dans ces milieux. Les approches abordées dans ce travail montrent que les SIG constituent un outil pertinent dans la recherche de zones favorables à l'implantation de forage. Les résultats ont montré qu'il existe une bonne corrélation entre les zones à bonne potentialité identifiées par le SIG et les zones présentant des débits de forages appréciables. Cependant, pour les deux méthodes les granites et la partie nord présentent les plus faibles potentialités où les forages sont très peu productifs. Ces deux méthodes utilisées dans ce travail peuvent être bien utiles et complémentaires et pourraient ainsi, être appliquées à d'autres sites de recherche de points d'eau dans ces milieux discontinus de socle. Elles permettent d'avoir une idée claire et rapide sur les secteurs à bonnes potentialités réduisant ainsi les risques d'échec de forages. L'avantage de la première méthode par rapport à la seconde méthode réside dans sa simplicité et l'accessibilité des paramètres à intégrer dans l'analyse. Par contre, pour la deuxième méthode l'étude prend beaucoup plus de temps parce qu'elle nécessite une étude détaillée des logs de forage afin d'identifier la nature des altérites, leur épaisseur et l'épaisseur de la fracturation. En termes d'informations hydrogéologiques, elle reste la plus pertinente et permet d'avoir une idée claire sur les caractéristiques des différents réservoirs aquifères et les profondeurs moyennes des ouvrages dans les différents contextes de ces terrains de socle.

**TROISIEME PARTIE : EVALUATION QUALITATIVE DES
RESSOURCES EN EAU DANS LES TERRAINS BIRIMIEN DU
SENEGAL ORIENTAL ;**

CHAPITRE VI : HYDROCHIMIE DES EAUX DANS LES TERRAINS BIRIMIEN DU SENEGAL ORIENTAL

VI.1. Introduction

Dans les nappes d'eau souterraine, la minéralisation des eaux est fonction de plusieurs facteurs notamment, la nature géologique de l'encaissant, les processus biogéochimiques affectant l'aquifère et du temps de résidence des eaux en contact avec ce dernier. Ce temps de résidence contrôle les interactions fluides-roches et permet de prédire les changements de compositions chimiques des phases solides et liquides dans les systèmes aquifères. Cette partie de la thèse est consacrée à l'étude hydrochimique des eaux des aquifères des différents réservoirs dans le birimien du Sénégal oriental. Cependant, pour une meilleure compréhension de la chimie des eaux, l'étude s'est basée sur une identification de la nature lithologique des différents terrains géologiques aquifères dont la composition minéralogique et pétrographique est un facteur essentiel dans la compréhension de la chimie des eaux. Les outils hydrochimiques tels que les diagrammes de Piper, de Gibbs, et diagrammes binaires et les indices de saturation sont utilisés pour déterminer les différents processus qui affectent la chimie des eaux souterraines dans la zone. Trois campagnes d'échantillonnage ont été effectuées dans le cadre de cette thèse afin de voir l'évolution de la chimie des eaux suivant les saisons. Une première campagne a été réalisée en Janvier 2011 (saison sèche) et s'était basée sur l'analyse des éléments majeurs et traces, une seconde en Novembre 2011 (fin de saison pluvieuse) essentiellement axée sur l'analyse des ions majeurs et une troisième campagne en juin 2014 qui s'était focalisée sur les zones d'exploitation de l'or. Cependant, pour mieux comprendre les processus d'acquisition de la minéralisation des eaux dans la zone nous nous sommes appesantis sur la campagne régionale de Novembre 2014 avec un réseau de 52 points échantillonnés sur des différentes formations géologiques du Birimien du Sénégal oriental (Fig.61).

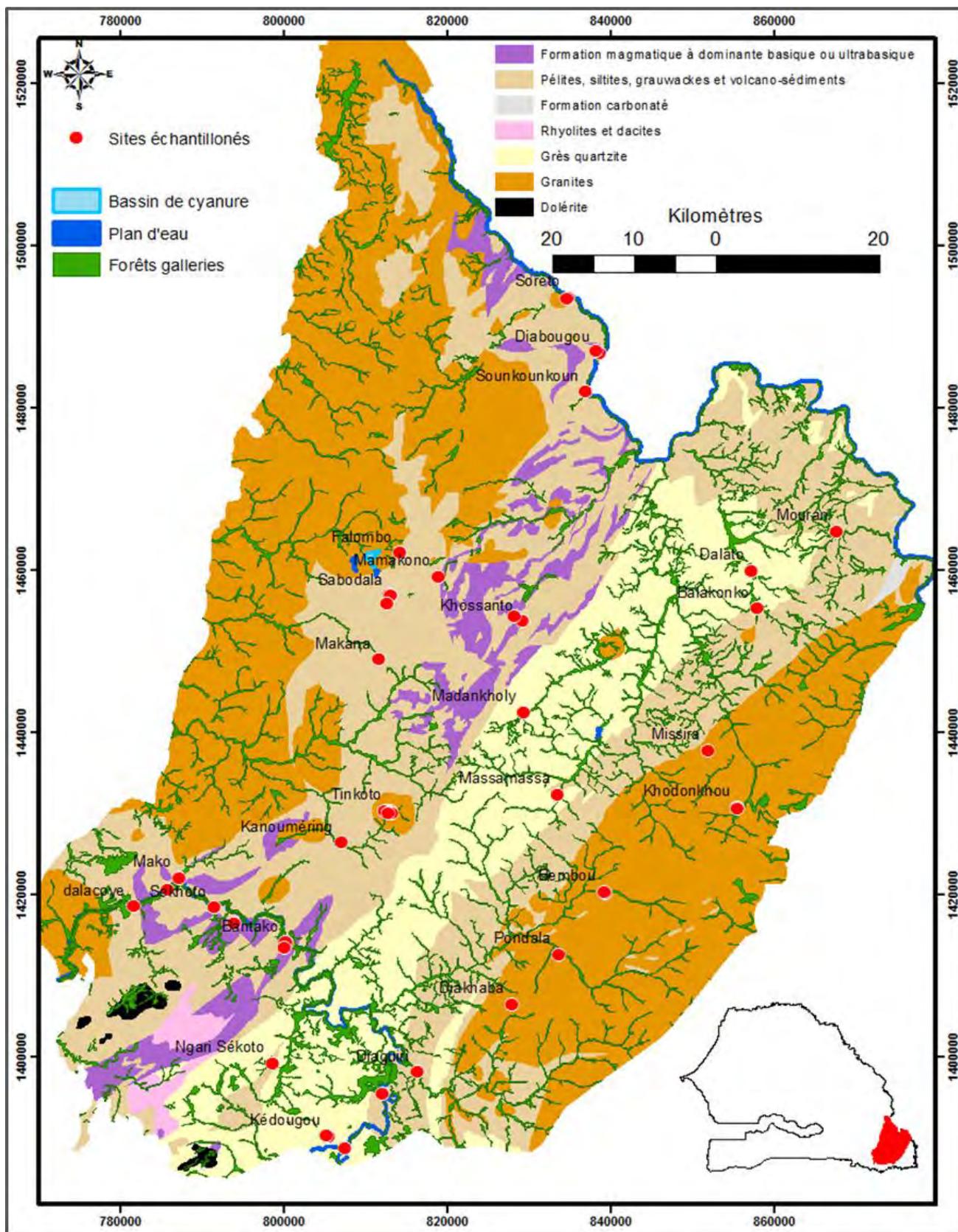


Figure 61. Répartition des sites échantillonnés en novembre 2011

VI.2. Etude des processus géochimiques par les méthodes hydrochimiques classiques (diagrammes binaires, diagramme de gibbs et indices de saturation)

VI.2.1. Le diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est un outil qui permet de voir la distribution des ratios d'ions majeurs (cations et anions) dans un échantillon d'eau (Fig.62). Il permet ainsi de déterminer les types d'eau des différents échantillons et l'évolution de leur faciès dans le temps. Un échantillon d'eau est classé en fonction de sa composition chimique qui est basée sur la proportion de l'ion qui représente plus de 50 pourcent du total des cations ou des anions en milliéquivalent. Dans un échantillon si la concentration d'aucun ion ne dépasse pas 50%, du total des cations ou des anions, l'échantillon est classé comme mixte. Ainsi dans les échantillons prélevés durant la campagne de novembre 2011, 7,6% des échantillons sont de type sodique, 44,2% de type mixte 28,8% de type calcique et 22,1% de type nitraté.

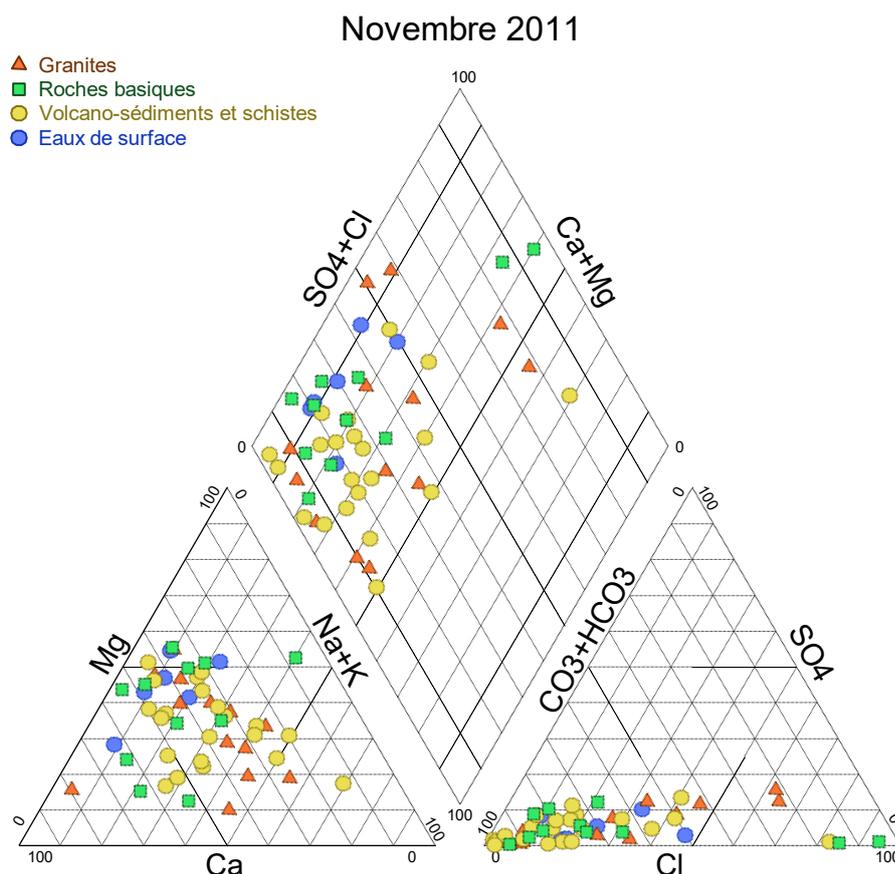


Figure 62. Répartition des faciès chimiques des eaux sur diagramme de Piper (Campagne Novembre 2011)

Le diagramme de Piper (Fig.62) montre toujours la prédominance du faciès $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg-Na}$ sur les eaux du Sénégal oriental. Ce faciès est rencontré sur tous les types de terrains. Cependant, il faut noter la présence des faciès Cl-Ca-Mg-Na et Cl-Na , caractéristiques des eaux fortement

affectées par la pollution par les nitrates : c'est le cas des puits et forage de Bembou sur le granite de Saraya et des puits de Sabodala, sur les volcaniques basiques. Un seul type HCO₃-Mg, rencontré au niveau de Sabodala. Les échantillons de type sodique sont en général plus anciens et ont des valeurs de pH et de TDS plus élevées et sont issus des puits les plus profonds comparés aux échantillons de type Ca et Mixte : c'est le cas de l'échantillon du forage de Soukounkoun (TDS=1510 mg. L⁻¹).

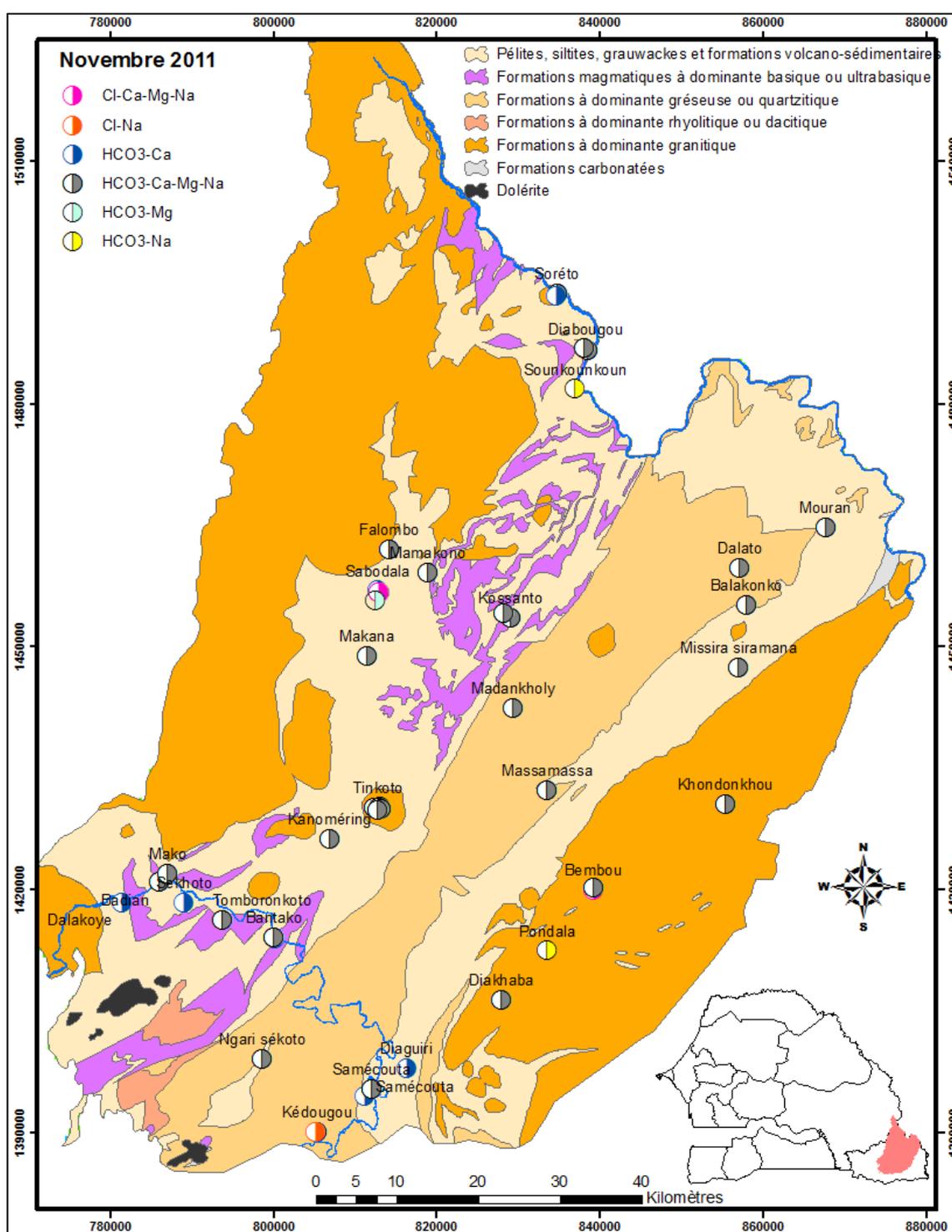


Figure 63. Répartition des faciès chimique dans la zone d'étude (Novembre 2011)

Tableau 15. Chimie des eaux Campagne Novembre 2011.

Eaux de surface

Nom	Libellé	TDS	T°C	pH	Ca [meq/L]	Mg [meq/L]	Na [meq/L]	K [meq/L]	HCO ₃ [meq/L]	Cl [meq/L]	SO ₄ [meq/L]	NO ₃ [meq/L]
K2	Samécouta Gambie	35	32	4,36	0,16367	0,17692	0,08004	0,00588	0,19994	0,18503	0,01166	0,00919
K9	Diabougou Falémé	60	25	5,31	0,21457	0,42296	0,17051	0,01458	0,6998	0,08067	0,07017	0
K40	Tinkoto Rivière Amont	45	25	6,16	0,17814	0,26661	0,04089	0,00358	0,29992	0,1729	0,05372	0
K41	Tinkoto rivière Avale	50	31	6,88	0,20659	0,23041	0,05133	0,00563	0,39989	0,13793	0,03081	0
K44	Bantako Fleuve (lavage)	41	26	7,5	0,28393	0,12755	0,03654	0,00332	0,39989	0,08716	0,00937	0
K45	Bantako Fleuve Avale	41	30	6,81	0,23253	0,20572	0,03306	0,00793	0,39989	0,09618	0,00999	0

Granite

Nom	Libellé	TDS	T°C	pH	Ca [meq/L]	Mg [meq/L]	Na [meq/L]	K [meq/L]	HCO ₃ [meq/L]	Cl [meq/L]	SO ₄ [meq/L]	NO ₃ [meq/L]
K16	Saraya Puits	117	28	6,44	0,48154	0,52746	0,09352	0,00281	0,39989	0,43748	0,11056	0,24014
K17	Bembou Forage	570	32	4,94	1,8313	2,5526	3,0683	0,18466	0,99972	2,7882	0,53426	3,0199
K18	Bembou Puits	227	29	6,3	0,71856	0,87307	0,68074	0,07059	0,89975	0,54354	0,20446	0,77994
K21	Massamassa Forage	212	30	6,06	0,88224	1,0269	0,61071	0,06394	2,4993	0,10013	0,02582	0,01081
K28	Falombo Forage	214	32	6,14	0,86078	1,0533	0,3097	0,04578	2,1994	0,13454	0,00958	0
K33	Khondokhou For	335	29	5,97	1,8383	1,7527	0,74076	0,09668	1,8995	1,0047	0,05164	1,4612
K34	Khondokhou Puits	405	31	6,11	1,27	0,92656	2,4611	0,29157	0,39989	1,1198	0,27817	3,1999
K35	Tinkoto Forage	192	28	6,23	0,53393	0,82288	0,11831	0,02737	1,3996	0,12749	0,01083	0
K36	Tinkoto Puits1	197	26	6,2	0,58333	0,49537	0,70031	0,04885	1,6995	0,16162	0,01978	0
K37	Tinkoto Puits2	236	27	6,28	0,82934	0,44435	0,99784	0,05857	2,0994	0,1729	0,08807	0
K38	Tinkoto Puits3	169	26	5,47	1,0429	0,23041	0,98435	0,08159	1,2996	0,53931	0,1522	0,36981
K39	Tinkoto Puits 4	72	25	5,89	0,78343	0,15223	0,04567	0,00179	0,49986	0,42197	0,08641	0
K47	Ngari Sékoto Forage	315	30,1	6,9	0,83733	0,67476	0,77817	0,05985	0,39989	0,14385	0,01582	1,8599

Volcanosédiments et schistes

Nom	Libellé	TDS	T°C	pH	Ca [meq/L]	Mg [meq/L]	Na [meq/L]	K [meq/L]	HCO ₃ [meq/L]	Cl [meq/L]	SO ₄ [meq/L]	NO ₃ [meq/L]
K1	Samécouta Puits	313	31	5,05	2,6248	0,76527	1,2001	0,05704	2,3993	0,58133	0,274	1,2983
K3	Diaguiri Puits	311	30	6,11	2,0494	0,74553	1,0809	0,04553	2,5993	0,58754	0,03789	0,67091
K4	Diakhaba Puits	23	31	4,95	0,08234	0,06583	0,02784	0,00205	0,09997	0,08293	0,01478	0
K5	Pondala Forage	123	34	5,43	0,24651	0,23041	0,44542	0,02813	0,89975	0,08547	0,01853	0
K6	Soreto F1	722	32	4,37	4,1462	3,2421	3,0601	0,19847	3,0991	2,756	0,90529	3,8497
K7	Soreto F2	497	31	5,42	4,025	1,9584	1,7303	0,08287	4,3988	1,2636	0,27962	1,7289
k8	Diabougou F	592	30	5,36	4,0115	1,9798	2,8417	0,13632	5,3985	1,2194	0,51802	1,7886
K10	Diabougou Puits	534	28	6,37	3,6552	1,9338	2,5111	0,11919	5,3985	0,93419	0,3271	1,52
K11	Sounkounkoun For	1190	30	5,73	3,7625	5,8342	9,0945	0,32073	10,297	4,7567	1,191	3,1885
K19	Kédougou Puits1	57	28	6,07	0,21657	0,27155	0,32362	0,00997	0,39989	0,26514	0,03331	0,18015
K20	Kédougou Puits2	153	29	4,46	0,24451	0,31269	1,2131	0,04169	0,09997	0,49474	0,00666	1,3193
K22	Madankholy For	283	29	6,21	1,5075	1,6787	1,3515	0,1041	3,9989	0,41689	0,23986	0,04919
K23	Khossanto Puits	200	26	6,11	1,0439	1,4565	0,53111	0,06778	2,2994	0,48515	0,35354	0,19821
K24	Khossanto Forage	332	30	6,74	2,6801	3,1681	0,26534	0,06906	5,8983	0,08998	0,09869	0,02048
K25	Mamakono Forage	332	31	6,13	2,2989	1,6951	0,68987	0,09182	3,599	0,35794	0,3679	0,38029
K29	Mouran	170	33	6,73	0,41717	0,46081	0,59026	0,02609	1,0997	0,19491	0,00708	0,2503
K30	Dalato Forage	241	32	6,8	1,8204	1,8844	0,35059	0,02839	3,8989	0,08829	0,04476	0
K31	Balakonko forage	229	30	6,21	1,2455	1,4565	1,0104	0,05985	3,499	0,1416	0,10223	0
K32	Missira Forage	269	30	6,76	1,2645	1,9338	0,70945	0,08108	2,6992	0,46964	0,24277	0,50093
K42	Kanouméring F	296	32	6,12	1,6766	2,1148	1,0096	0,08824	4,6987	0,11847	0,01124	0
K46	Bantako Forage	461	34	6,28	4,0629	3,1278	0,87082	0,11944	6,3982	1,6594	0,08432	0

Volcaniques basiques

Nom	Libellé	TDS	T°C	pH	Ca [meq/L]	Mg [meq/L]	Na [meq/L]	K [meq/L]	HCO₃ [meq/L]	Cl [meq/L]	SO₄ [meq/L]	NO₃ [meq/L]
K12	Sabodala Pts prf	191	28	4,5	1,9296	0,46081	0,60984	0,05346	2,3993	0,21437	0,25859	0,28998
K13	Sabodala Pts 3	202	29	4,93	1,2435	0,29294	0,72728	0,08031	0,09997	0,59939	0,00562	1,7699
K14	Sabodala Pts4	517	28	4,22	0,49102	3,5055	2,5111	0,17469	0,09997	1,9829	0,02332	4,6495
K15	Sabodala Pts 2	63	28	5,27	0,24401	0,35055	0,0983	0,01407	0,29992	0,14498	0,01749	0,28982
K26	Madina Sab For	423	30	6,6	2,6053	4,0601	0,61027	0,07161	5,7984	0,75537	0,76142	0,00726
K27	Makana For	447	31	6,64	2,2705	2,3279	1,9613	0,11279	3,399	1,0851	0,6113	1,5099
K43	Tomborokoto For	242	25	7,62	0,93214	0,69944	0,3606	0,0688	1,9994	0,1258	0,00812	0
K48	Sekhoto	386	29,4	6,8	4,0235	1,5676	0,79035	0,10998	5,2985	0,57569	0,14117	0,41013
K49	Badian For	349	30,1	6,73	2,6582	2,5345	0,40366	0,03146	3,599	0,97848	0,27754	0,70978
K50	dalacoye For	470	31,3	6,97	4,4616	3,6462	0,20748	0,04553	6,7981	0,97312	0,34896	0,19902
K51	Mako For	402	31,3	6,97	2,0639	3,5301	1,2319	0,09387	4,6987	1,4509	0,24548	0,49609

VI.2.2. Diagrammes binaires

VI.2.2.1. L'altération des silicates

L'altération des silicates reste l'un des processus géochimiques majeurs qui contrôle la minéralisation des eaux dans les terrains cristallins (Mackenzie et Garells, 1965). L'hydrolyse des silicates peut être évaluée en étudiant le ratio HCO_3^- vs total cation (TC). La figure 64-a montre une bonne corrélation entre les bicarbonates et la somme de tous les cations ce qui confirme l'hydrolyse des silicates dans ces milieux cristallins signalée plus haut. Cette hydrolyse s'accompagne d'une libération de bicarbonate et des cations. La majorité des échantillons d'eau se trouve sur la droite 1/1 ce qui confirme l'hydrolyse des silicates. Sur les ouvrages échantillonnés seuls, quelques points présentent une faible corrélation entre leur teneur en HCO_3^- et la somme des cations. Cette faible corrélation est essentiellement liée aux teneurs très élevées en nitrates dans certains ouvrages (Sabodala P3 ; Sabodala P4 ; Bembou F ; Khodonkhon Pts, Ngari Sékhoto et Kédougou Pts) Globalement la tendance HCO_3^- -Ca-Mg se confirme dans les eaux durant la campagne de novembre 2011 (fin de la saison pluvieuse). Sur le graphe Na+K vs TC, les eaux qui se localisent au-dessus de la droite 0,5TC sont affectées par une faible hydrolyse des silicates (feldspaths alcalin). Par contre, dans le cas des granites les eaux se situent légèrement au-dessus de la droite Na+K=1TC (Fig.62-d). Ceci indique qu'au niveau des granites l'altération des silicates est le processus géochimique majeur dominant et contribue le plus à l'enrichissement des eaux en Na^+ et K^+ parce que les feldspaths sont plus exposés à l'hydrolyse et l'altération que le quartz dans ces roches silicatées. Toutefois, Ca+Mg vs TZ^+ (Fig.64-c) montre que les eaux des formations volcaniques et volcanosédimentaires sont plus enrichies en Ca^{2+} et Mg^{2+} et sont proches de la droite 1/1 suggérant que ces ions proviennent de l'hydrolyse des minéraux silicatés riches en Ca et Mg. L'enrichissement en silice est beaucoup plus important dans les eaux des formations granitiques et volcanosédimentaires (fig.64-f), par contre, les eaux des roches volcaniques basiques présentent une minéralisation en silice intermédiaire, mais sont relativement enrichies en bicarbonate. En plus de l'hydrolyse des silicates, d'autres processus peuvent enrichir les eaux en Ca^{2+} et Mg^{2+} .

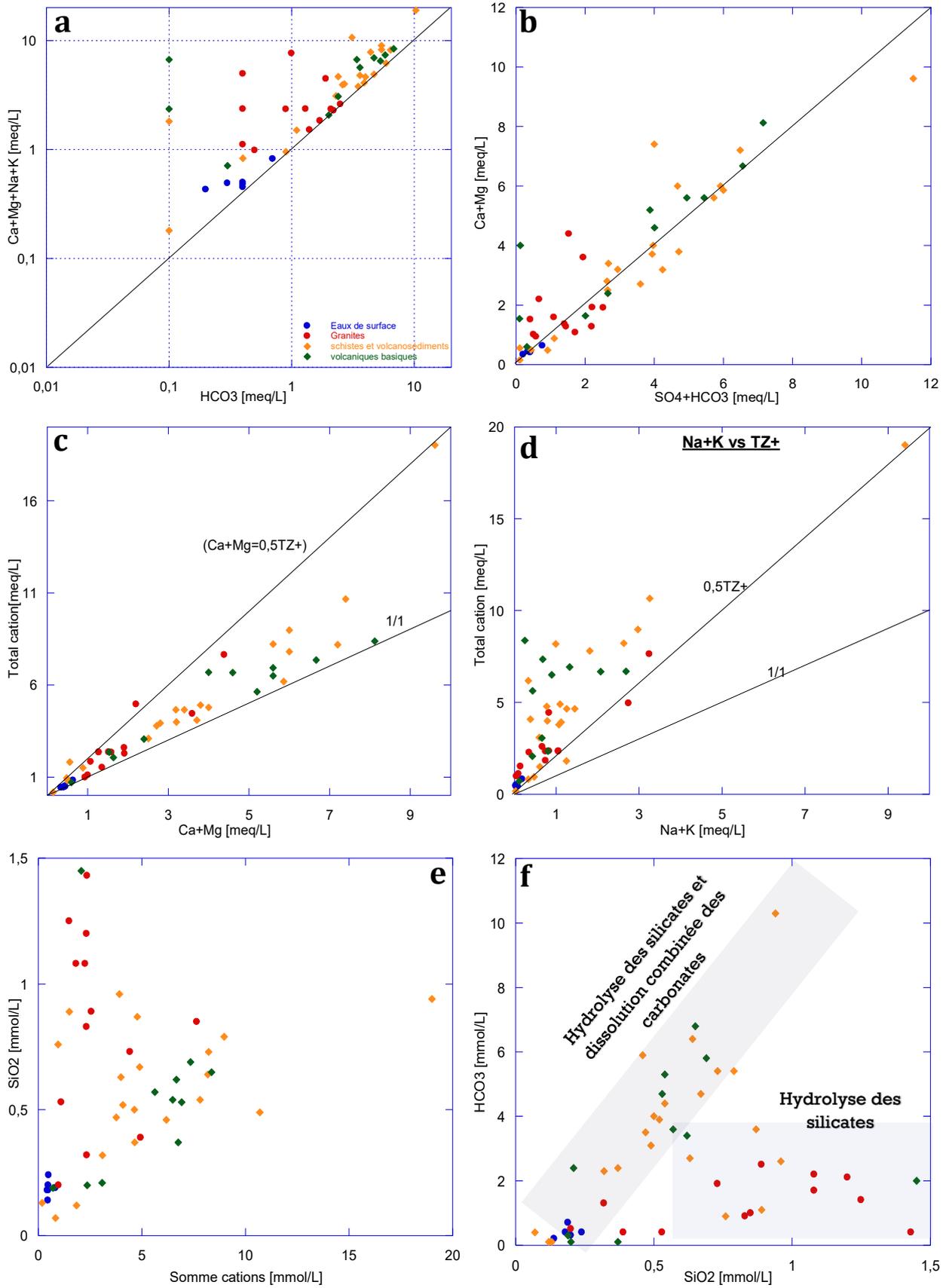


Figure 64 a-b-c-d-e-f. Diagramme binaires (Ca+Mg vs HCO₃ Ca+Mg vs SO₄+ HCO₃ ; Na+K vs TC ; TC vs HCO₃ Ca+Mg vs TZ⁺)

La bonne corrélation HCO_3^- vs $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ montre que les alcalinoterreux (Ca^{2+} , Mg^{2+}) sont les cations dominants dans les eaux quel que soit la nature du réservoir. Cependant, les eaux des granites montrent des teneurs en HCO_3^- et en alcalinoterreux beaucoup plus faibles que les autres types de réservoir (Fig.65-a). Par contre, les eaux des réservoirs de schistes et volcanosédiments et les eaux des formations volcaniques basiques montrent des teneurs en HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} beaucoup plus élevées. Ce qui s'explique essentiellement par l'interaction eau-roche. Cette interaction eau-roche est influencée non seulement par l'altération des minéraux silicatés mais également les processus de dissolution de certains minéraux carbonatés (calcite et dolomite) qui contribuerait à enrichir les eaux en Ca^{2+} et Mg^{2+} (Fig.63-d). Le graphe $(\text{Ca} + \text{Mg})$ vs $(\text{SO}_4 + \text{HCO}_3)$ (Fig.64-b) montre une bonne corrélation dans les différents groupes où les échantillons sont très proches de la droite 1/1 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} = \text{SO}_4 + \text{HCO}_3$), ce qui indique que ces ions proviennent de l'altération combinée des carbonates et des silicates (Datta et al., 1996). Cependant, les échantillons situés au-dessus de la droite sont plus affectés par des processus d'altération des minéraux carbonatés. Par contre, pour l'essentiel des eaux, l'hydrolyse des silicates reste le processus géochimique majeur qui contrôle la minéralisation c'est le cas de la majorité des eaux des granites et des volcanosédiments et schistes. Le rapport Ca/Mg peut également donner une indication sur les processus de dissolution de la calcite et de la dolomite qui peut enrichir les eaux en alcalinoterreux. Ainsi, si le ratio $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} = 1$, la dissolution de la calcite et de la dolomite restent les processus dominants. Par contre, si $\text{Ca}/\text{Mg} > 1$, la contribution de la calcite est beaucoup plus importante (Maya et Look, 1995). Un rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} > 2$ signifie que la libération de Ca^{2+} et Mg^{2+} provient des processus d'hydrolyse des silicates riche en calcium et Magnésium (pyroxène, et péridots). Ce cas est surtout observé au niveau des eaux des formations basiques et des volcanosédiments et schistes (Fig.65-c).

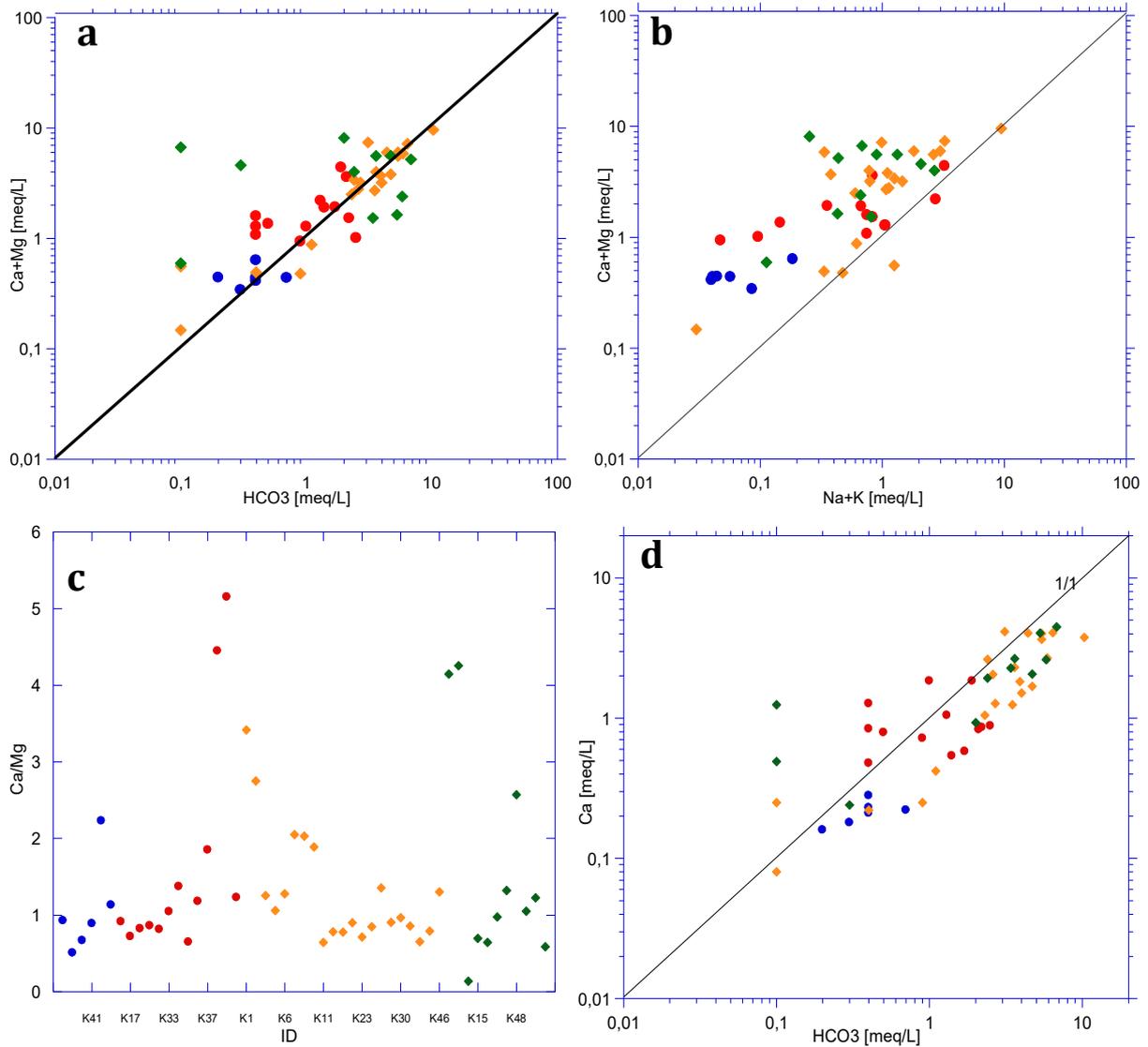


Figure 65- a-b-c-d. Diagramme binaires (Ca+Mg vs HCO₃ ; Ca+Mg vs Na+K ; Ca/Mg vs ID)

VI.2.2.2. Diagrammes de Gibbs

Les échantillons affectés par l'interaction eau-roche peuvent être étudiés en détail pour identifier les réactions chimiques exactes qui contrôlent la composition chimique des eaux souterraines. Ces diagrammes Gibbs peuvent être utilisés pour mettre en évidence l'interaction eau-roche ou les processus chimiques impliqués dans l'acquisition de la minéralisation (Fig.66). La présence de l'interaction eau-roche est identifiée en utilisant le graphe TDS vs Na/(Na+Ca) et TDS vs Cl/(Cl+HCO₃) (Gibbs, 1970). Dans ces diagrammes, les échantillons localisés au milieu de la courbe proviennent des processus d'interaction eau-roche.

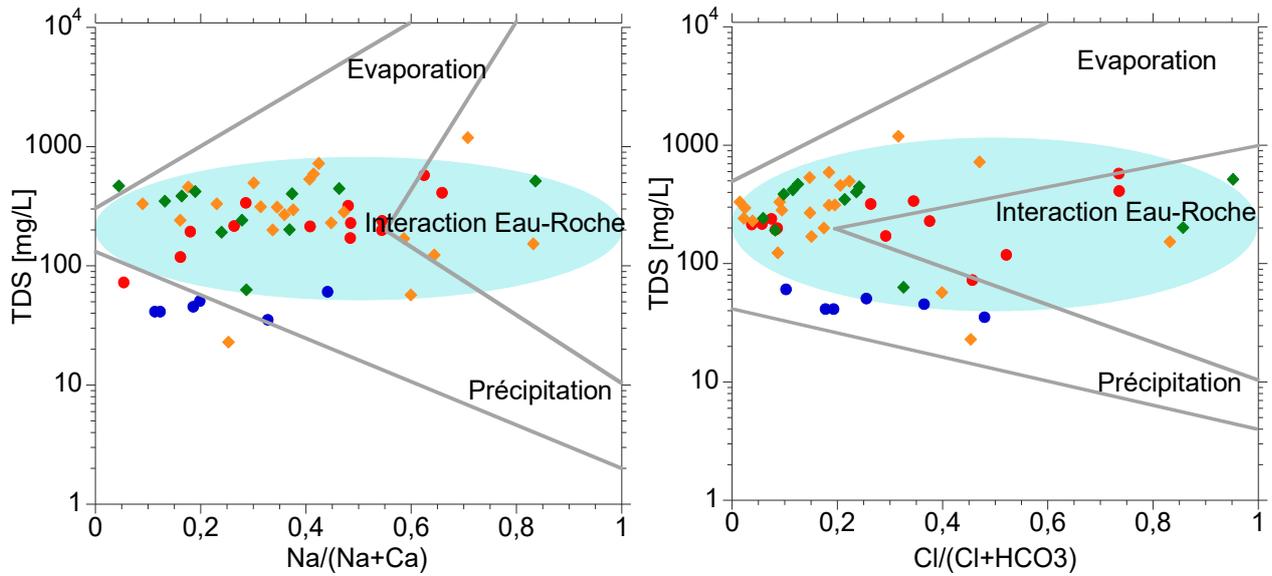


Figure 66. Diagramme de Gibbs

Ces diagrammes donnent une bonne idée concernant l'intensité de l'interaction eau-roche. Dans le cas des eaux du Birimien du Sénégal oriental, tous les échantillons sont localisés dans le champ interaction eau-roche, aussi bien pour le diagramme des cations comme pour celui des anions. Il en ressort ainsi qu'au Sénégal oriental, le processus majeur naturel responsable de la minéralisation des eaux reste l'interaction eau roche. Ceci est confirmé par les diagrammes HCO_3^- vs Total cation (Fig.65-c) qui indique une très bonne corrélation suggérant ainsi que le processus dominant dans la minéralisation des eaux reste l'hydrolyse des silicates qui contribue à enrichir les eaux en HCO_3^- et libère en même temps des cations. Ici l'interaction eau-roche confirme que la chimie de l'eau est essentiellement contrôlée par la nature pétrographique de l'aquifère, mais également le degré d'altération (âge) de ces roches qui contribuerait à faciliter la solubilité des éléments par hydrolyse. Cette hydrolyse sur les différents minéraux silicatés qu'ils soient acides ou basiques, conduit à la formation de minéraux secondaires tels que la Kaolinite et la libération des cations dans l'eau comme nous le montre les équations (équations 1, 2, 3, 4). Le diagramme de stabilité (Fig.67) montre que toutes les eaux sont stables dans le domaine de la Kaolinite.

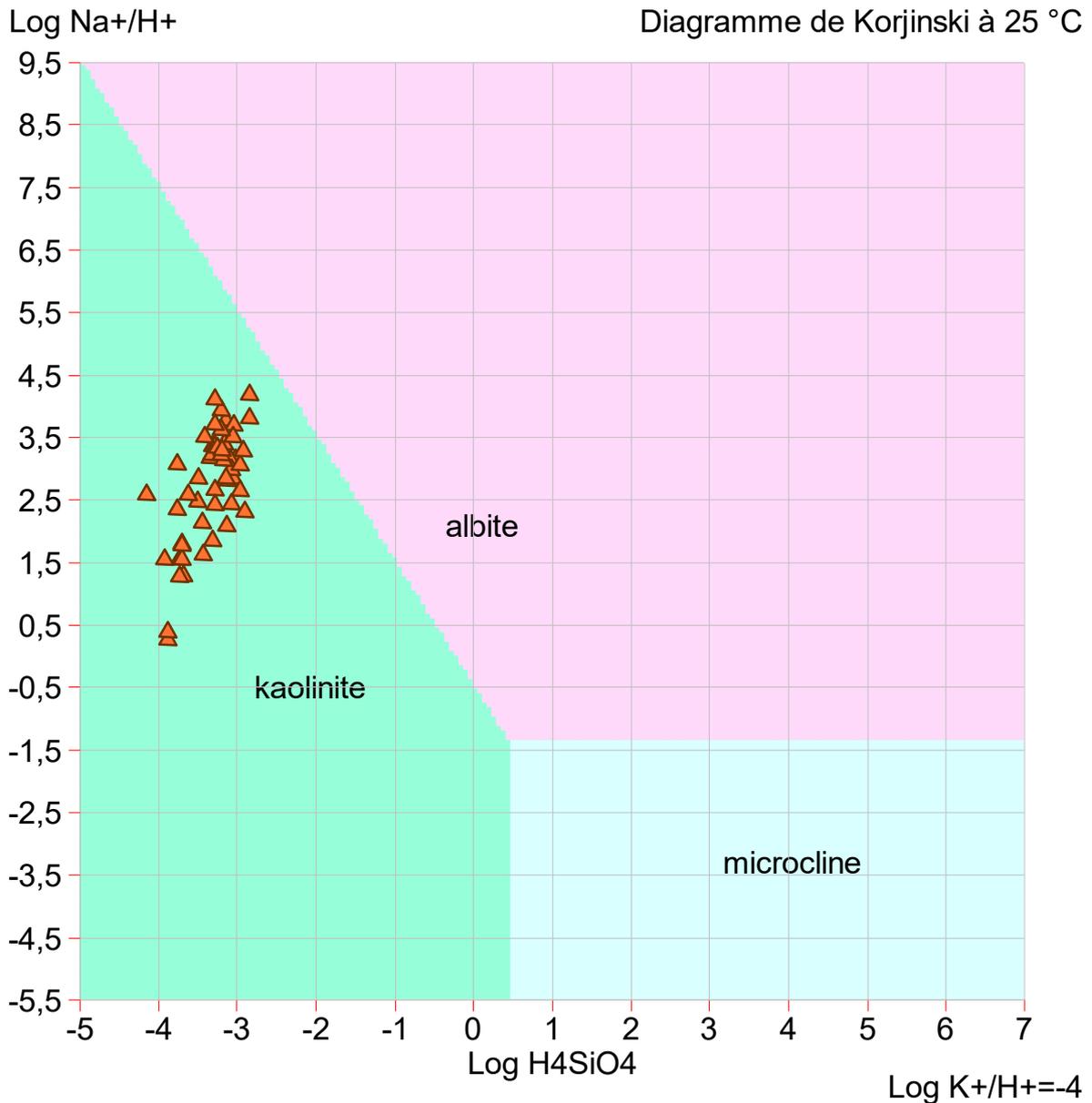


Figure 67. Répartition des eaux sur diagramme de stabilité des eaux du Sénégal oriental (Campagne Novembre 2011)

VI.2.2.3. Les échanges de base

D'autres processus tels que les échanges ioniques de base et les échanges inverses de bases peuvent affecter la minéralisation des eaux. Le calcul des indices d'échange de base (Fig.68) montre que les eaux des formations volcanosédimentaire et des formations granitiques de type Bondoukou de Tinkoto sont plus affectées par les réactions d'échange de base qui favorisent une libération de Na^+ dans les eaux et l'absorption de Ca^{2+} ou Mg^{2+} dans la matrice. C'est le cas des forages, Tinkoto P1 et P2 sur les granites avec des valeurs respectives de : -

0,64 et -0,91 et sur les formations volcanosédimentaires au niveau de sounkounkoun, Madankholy, Balakonko, Kanoumérining et Massamassa avec des valeurs respectives de -1,89, -1,05, -0,90, -0,91 et -0,61. Ces réactions d'échange de base sont beaucoup plus marquées dans les formations volcanosédimentaires que dans les autres types de réservoirs.

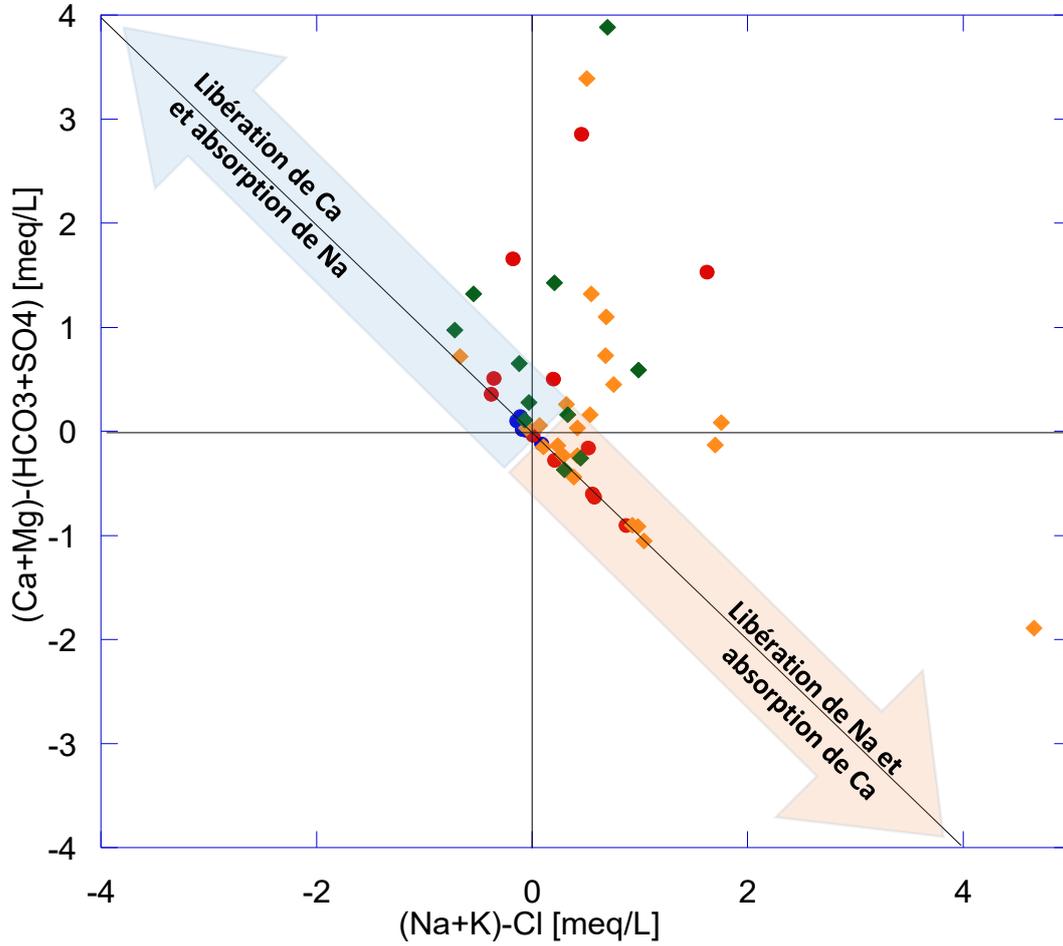


Figure 68 diagramme (Na+K)-Cl vs (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄)

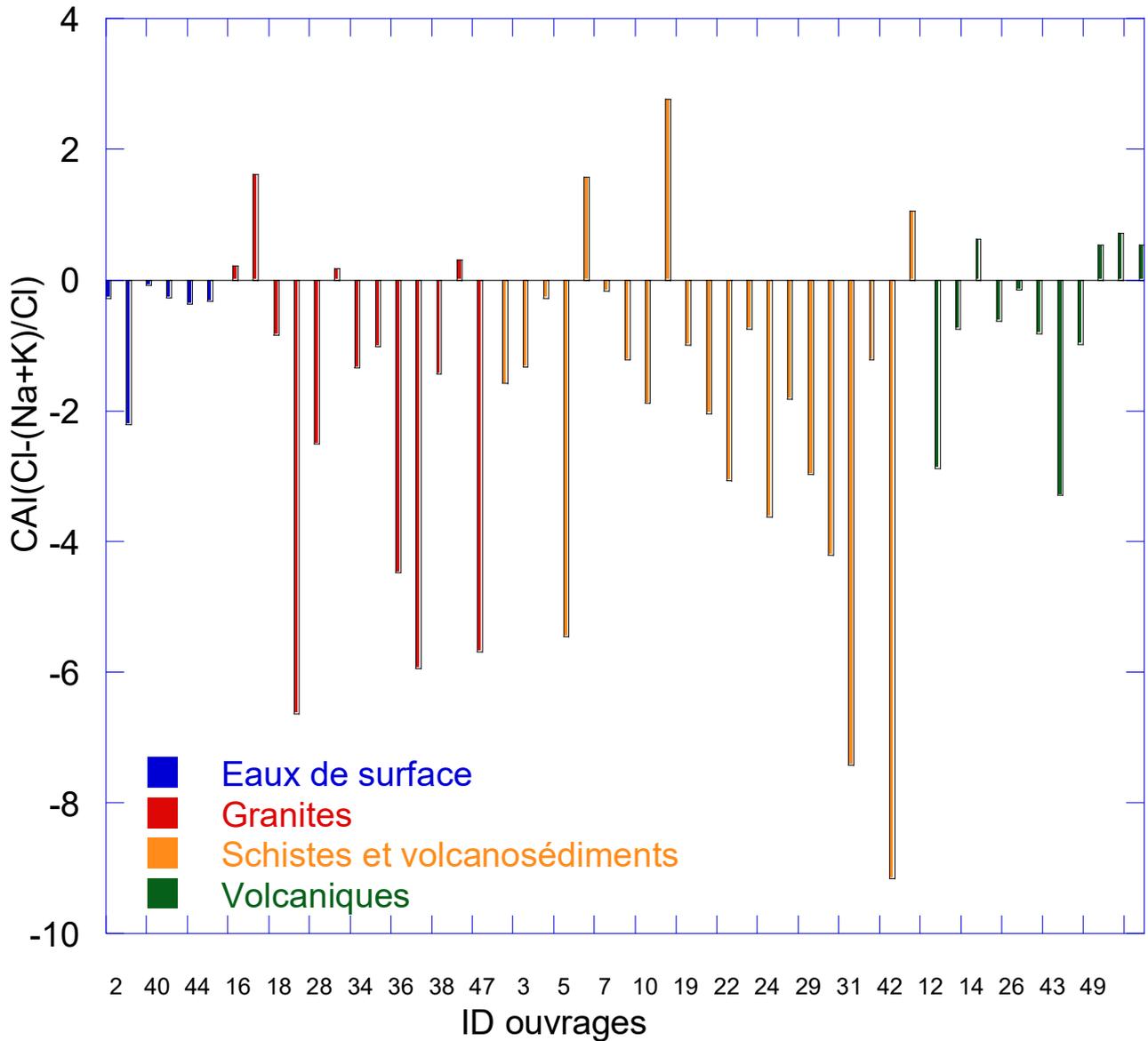


Figure 69 Indices chloroalcalins

L'indice chloroalcalin ICA est obtenu à partir de l'équation suivante :

$$ICA = Cl^- - (Na+K)/Cl^-$$

Cet indice donne une idée sur les échanges d'ions entre la matrice aquifère et l'eau. Ainsi, si l'indice est positif Ca^{2+} et Mg^{2+} sont libérés dans l'eau et Na^+ absorbé dans la matrice. Par contre si l'indice est négatif, Na^+ et K^+ sont libérés dans les eaux et Ca^{2+} et le Mg^{2+} sont absorbés dans la matrice (Schoeller, 1965). Dans les eaux du Sénégal oriental, les échanges de base restent le processus dominant par rapport aux échanges inverses de base. Les granites et les volcanosédiments sont plus affectés par les processus d'échange de base à l'exception de quelques échantillons (Fig.69). Cependant, les eaux des formations volcaniques basiques sont

plus marquées par les échanges inverses de base c'est le cas des échantillons collectés au niveau de Sabodala Pts4, Sabodala Pts2, Badian, Dalakoye F, et Mako F avec des valeurs d'indices respectives de 0,62, 0,53, 0,71, et 0,53. Cependant, ces échanges inverses de bases peuvent se manifester sur certains échantillons au niveau des granites et volcanosédiments, c'est le cas des forages de Bembou et Bantako, avec des valeurs respectives de 1,61 et 1,05. La prédominance du sodium sur le calcium dans les eaux anciennes peut être liée aux échanges cationiques dus au remplacement des ions Ca^{2+} dans les eaux souterraines par les ions Na^+ associés aux minéraux par les processus d'échange cationique au cours du temps (Drever, 1997). Les eaux présentant un faciès mixte sont significativement plus récentes que les eaux de type sodique, mais plus anciennes que les eaux de type Ca. Ces relations peuvent être liées à l'évolution des eaux souterraines à travers leur circulation dans l'aquifère qui passent du type Ca vers le type sodium plus ancien. Le type Ca est souvent associé aux ouvrages localisés le long du fleuve Gambie et sur les axes hydrauliques (Fig.63) où l'interaction eau de surface eau souterraine est prépondérante du fait de la présence de nappes alluviales très favorables à la recharge. Ce type de faciès peut être ainsi, un bon indicateur de zone favorable à la recharge ce qui est en parfaite concordance avec les résultats de la cartographie des zones potentielles aquifères. Ils sont retrouvés dans la partie sud du bassin versant de la Gambie, à Kossanto et le long de la Falémé et du fleuve Gambie. Le type Na est également retrouvé sur le granite de Saraya à Pondala ce qui conforte l'interaction eau-roche au niveau des granites qui sont enrichis en alcalin (Na et K). La présence de minéraux alcalins notamment l'Orthose et la Biotite dans la matrice aquifère influence fortement la chimie des eaux par apport supplémentaire de ces éléments alcalins présents dans les minéraux constitutifs du granite. Ce faciès est également retrouvé au nord à Sounkounkoun, très éloigné des zones de recharge. Il est caractéristique des eaux relativement anciennes ce qui atteste probablement un temps de séjour plus long et une intensité de l'interaction eau-roche plus poussée favorisant les réactions d'échange de bases.

VI.3. APPROCHE THERMODYNAMIQUE : LES INDICES DE SATURATION

Les eaux souterraines sont rarement en équilibre chimique avec les minéraux constitutifs de l'aquifère réservoir ; elles évoluent constamment le long des voies d'écoulement à travers les réactions avec les minéraux dans lesquels elles sont en contact (Plummer et Back, 1980 ; Hem, 1985). Les indices de saturation permettent de mettre en évidence l'évolution de la chimie de l'eau en fonction de son état d'équilibre (ou de déséquilibre) vis-à-vis des minéraux primaires

et néoformés de la roche réservoir. Cet état d'équilibre contrôle de ce fait les réactions de dissolution et de précipitation des minéraux. Ces réactions se font avec une certaine cinétique et atteignent rarement l'état d'équilibre (Maliki, 1993). Cependant pour parvenir à calculer les différents paramètres thermodynamiques les données ont été traitées avec le programme thermodynamique Phreeq. Il a permis à partir de l'analyse globale des échantillons d'avoir la distribution des espèces minérales présentes en solution et leur état d'équilibre par rapport à la solution.

L'indice de saturation (I.S) vis-à-vis d'un minéral donné est défini par le logarithme décimal du rapport du produit des activités ioniques (P.A.I) sur le produit de solubilité (K) :

$$IS = \log \frac{PAI}{K}$$

Si nous prenons comme exemple la dissolution de la calcite $CaCO_3$



Le produit des activités ioniques de cette réaction est :

$$PAI = aCa^{2+} \times aCO_3^{2-}$$

aCa^{2+} : activité de l'ion Ca^{2+} , l'activité tient compte de la force ionique de la solution et de la température in situ.

A l'équilibre thermodynamique, le produit de solubilité pour la calcite $KCaCO_3$ est :

$$KCaCO_3 = \frac{aCa^{2+} \times aCO_3^{2-}}{aCaCO_3}$$

$aCaCO_3$ est égale à l'unité puisque l'activité d'un solide est égale à 1

L'indice de saturation (I.Sc) est donc :

$$IS_c = \log \frac{PAI}{KCaCO_3}$$

I.Sc = 0 l'eau est saturée vis-à-vis de la calcite

I.Sc < 0 l'eau est sous saturée par rapport à la calcite

I.Sc > 0 l'eau est sursaturée vis-à-vis de la calcite

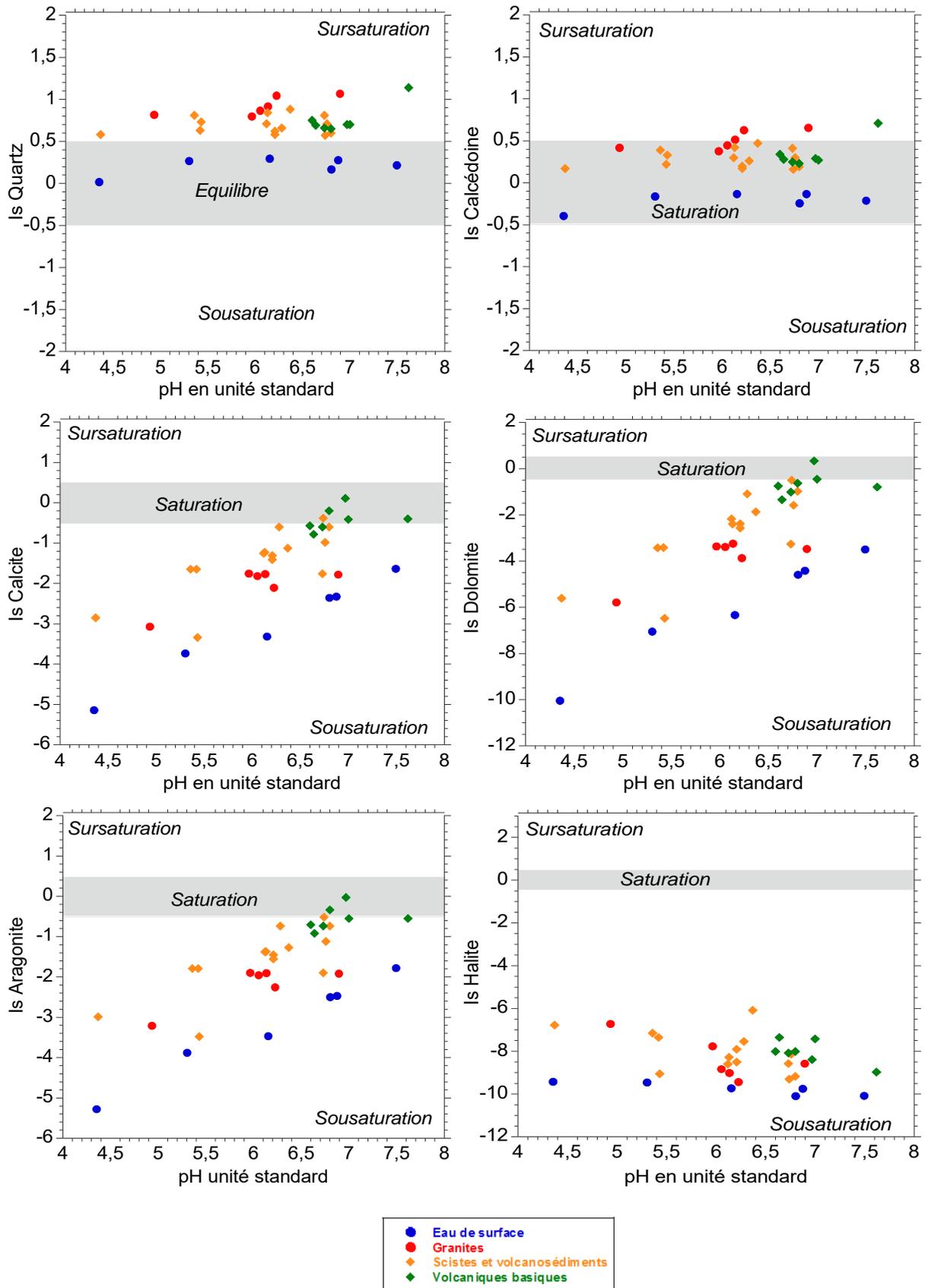


Figure 70. Indices de saturation des eaux par rapport au Quartz et à la Calcédoine ; Calcite ; Dolomite ; Aragonite et Halite.

Les résultats sur les indices de saturation, montrent que les eaux du Sénégal oriental sont très sous saturées en Calcite ; Dolomite ; Aragonite et Halite, ainsi que les minéraux évaporitiques (Fig.70). Par contre, elles montrent un état de saturation à sursaturation vis-à-vis du quartz et pour l'essentiel de la Calcédoine également ce qui prouve que l'enrichissement en silice des eaux n'est que le produit d'hydrolyse des silicates qui contribue ainsi à déplacer l'équilibre de ces eaux vers un état saturé à sursaturé vis-à-vis du quartz. Les eaux des granites montrent ainsi, un état de saturation en quartz beaucoup plus élevé que les eaux issues des autres types de réservoirs (Schistes-volcanosédiments et volcaniques basiques) ceci s'explique par les teneurs beaucoup plus élevées en silice des granites que les autres types de roches réservoirs. Le calcul des Is indique que les minéraux tels que la Calcite, l'Aragonite (CaCO_3), et la Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) sont bien sousaturés dans la quasi-totalité des échantillons et montrent ainsi que leur présence dans la matrice aquifère participe à la minéralisation des eaux par leur dissolution qui contrôle la solubilité du Ca^{2+} et du Mg^{2+} dans ces eaux. Cependant, la coprécipitation de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ et CaCO_3 peut être un mécanisme affectant la baisse des concentrations des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} si le pH augmente, c'est le cas de certains échantillons des formations volcaniques basiques présentant un état de saturation vis-à-vis de ces minéraux qui sont généralement sousaturés en solution acide à neutre. Dans le cas où les échantillons présentent un état de sursaturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite, le Ca^{2+} pourrait provenir de l'altération des plagioclases et des minéraux ferromagnésiens (Olivines et pyroxènes). Les résultats sur les Is par rapport aux minéraux non cristallins montrent une évolution des eaux d'un état sousaturé vis-à-vis de ces minéraux aux faibles pH vers progressivement des conditions de sursaturation avec l'augmentation du pH. Ceci indique qu'il y'a des phénomènes de précipitation de CaCO_3 si les pH des eaux souterraines deviennent plus alcalins (supérieur à 7) et l'excès de Ca^{2+} dans les eaux ne peut provenir que de l'hydrolyse des silicates et/ou des échanges inverses de base.

VI.3. Les nitrates

Les nitrates sont naturellement présents dans les eaux souterraines à partir des pluies, des végétaux ou des animaux. Dans ce cas, leurs concentrations ne dépassent généralement pas 1 mg. L⁻¹ dans les eaux naturelles (Peter et Bonelli, 1982, in Melinda et al., 2013). Ainsi, toutes concentrations en nitrate supérieures au fond géochimique sont généralement liées à l'utilisation de fertilisants agricoles, des décharges d'ordure, des fosses septiques, et des stations d'épuration (Denver et al., 2010).

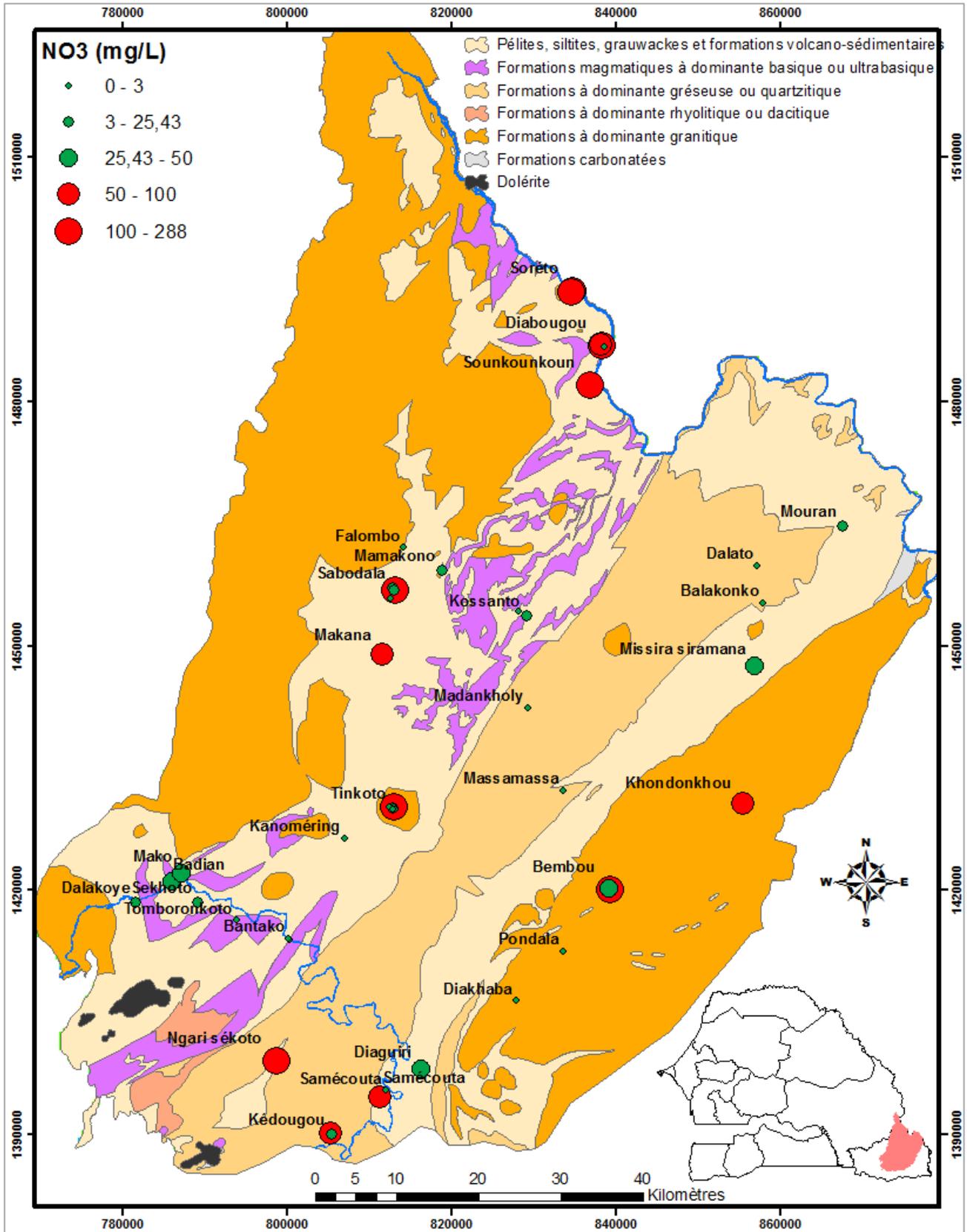


Figure 71. Répartition spatiale des concentrations en nitrate

Au Sénégal oriental, les fortes teneurs en nitrates sont observées surtout au niveau des puits traditionnels (Fig.71) avec souvent, des teneurs en nitrates dépassant parfois largement les normes de potabilité des eaux de consommation fixées par l'OMS (50 mg. L⁻¹). Ces fortes teneurs en nitrates observées dans la zone sont pour l'essentiel liées à l'activité anthropique (déchets solides ; absence d'assainissement, élevage). L'aquifère d'altérite reste cependant très vulnérable à la pollution nitratée du fait des faibles temps de transit des eaux qui atteignent très rapidement cette nappe souvent très peu profonde (profondeur de l'eau par rapport au sol dépassant rarement 10 m). Cependant au niveau des terrains granitiques certains forages présentent des teneurs en NO₃ relativement élevées c'est le cas des forages de Khodonkhou, Bambou et Ngari Sékhoto avec des valeurs respectives en NO₃ 90,6 ; 187 et 85,7 mg. L⁻¹. Toutefois, il apparaît dans la partie Nord de la zone d'étude une particularité, sur l'essentiel des forages échantillonnés, les nitrates sont à des niveaux de concentration largement au-dessus des recommandations OMS, c'est le cas des deux forages de Soréto Saboussiré, de Diabougou et de Sounkounkoun avec des teneurs respectives en nitrates de 238, 107, 110, et 197 mg. L⁻¹. La forte intensité des activités d'orpaillage dans certains sites constitue également une menace sur les ressources en eau avec parfois de fortes concentrations humaines qui engendrent une grande production de déchets non traités souvent stockés dans des dépotoirs non loin des ouvrages hydrauliques (cas des forages de Sounkounkoun et de Diabougou) (photo 10).



Photo 9. Pollution par les déchets solides autour des ouvrages hydrauliques (à gauche enclos du forage de Sounkounkoun et à droite le forage de Bantako)

Tableau 16. statistiques sur les concentrations en NO₃ des différents réservoirs (novembre, 2011)

Types de réservoir	Min	Max	Moy	Med	Nombre
Eaux de surface	0,0	0,6	0,1	0,0	6,0
Granites	0,0	198,4	52,2	14,9	13,0
Volcanosédiments	0,0	238,7	50,0	15,5	21,0
Volcaniques basiques	0,0	288,3	58,2	25,4	11,0

Les concentrations en nitrate dans les eaux souterraines au niveau des différents réservoirs du Sénégal oriental sont consignées dans le tableau 14. Ces concentrations varient de 0 à 288,3 mg. L⁻¹, avec des valeurs médianes 14,9 mg. L⁻¹ au niveau des granites, 15,5 mg. L⁻¹ au niveau des volcanosédiments et 25,4 mg. L⁻¹ au niveau des formations volcaniques basiques. Les teneurs maximales observées sont de 0,6 mg. L⁻¹ dans les eaux de surface, 198 mg. L⁻¹ au niveau des granites, 238 mg. L⁻¹ dans les formations volcanosédimentaires et 288 mg. L⁻¹ au niveau des formations volcaniques basiques. Ces fortes valeurs de nitrates peuvent avoir des conséquences néfastes sur la santé des populations. Cette situation est en grande partie liée à forte affluence humaine vers les villages d'orpaillage, ce qui a favorisé l'habitat spontané sans infrastructures d'assainissement installant parfois ces populations dans des situations très précaires où les règles d'hygiène et de propreté sont très négligées. Il s'y ajoute une absence de décharges d'ordures ménagères réglementaires qui, parfois, sont directement rejetées dans la nature, mais également le défaut d'assainissement. Selon [ANSD \(2013\)](#), les dépôts sauvages d'ordure constituent le principal mode utilisé dans la région de Kédougou et à Kédougou, un peu plus de la moitié des ménages ruraux pratiquent la défécation à l'air libre. Il s'agit d'ailleurs de l'une des rares régions où cette pratique concerne plus de 10% des ménages urbains (13,3% à Kédougou). Cette situation se répercute sur la qualité des eaux souvent très affectée par la pollution nitratée. Cette pollution nitratée est plus marquée dans la partie nord de la zone et ce phénomène est accentué par l'effet évaporatoire et au déficit du bilan hydrique plus important dans cette partie tendant à concentrer les éléments en solution. Ceci est confirmé par les valeurs de TDS qui sont les plus élevés dans la zone : Soreto F2 (633 mg. L⁻¹) ; Diabougou F (759 mg. L⁻¹) ; Diabougou Puits (701 mg. L⁻¹) ; Sounkounkoun Forage (1510 mg. L⁻¹) et où les concentrations en NO₃⁻ sont largement supérieures aux normes OMS (50 mg.L⁻¹).

VI.4. Les éléments traces

VI.4.1. Le contrôle géochimique de l'occurrence des éléments traces

La dissolution des éléments chimiques dans les eaux souterraines peut provenir également au-delà de l'altération des roches, d'autres processus tels que : les processus biologiques et les sources anthropiques. La dissolution des minéraux de la roche mère libère généralement les éléments en solution dans les eaux souterraines. Cependant, les concentrations des éléments traces dissous peuvent varier largement en fonction de leur occurrence dans la roche et par l'apport de sources supplémentaires. Ainsi, la solubilité des éléments traces dans eaux est largement contrôlée par les réactions d'adsorption et de désorption au niveau de l'interface eau particule et/ou la précipitation ou la dissolution des minéraux secondaires. Ces réactions sont en retour contrôlées par les conditions géochimiques dans l'aquifère. Ces conditions géochimiques peuvent affecter la solubilité des éléments traces dans les eaux souterraines. Ils comprennent : (1) les conditions d'oxydo-réductions ; (2) le pH ; (3) et les concentrations en ions majeurs (Wright, 2015). L'effet d'évaporation peut également augmenter la concentration des éléments traces. La composition des aquifères, sa nature géochimique et l'âge des eaux sont également parmi les facteurs qui affectent la genèse d'éléments traces dans les eaux.

VI.4.1.1. Spéciation

La spéciation chimique d'un élément correspond à l'ensemble des formes qu'il peut prendre dans un milieu naturel donné. Un certain nombre de facteurs vont conditionner cette spéciation (Nicolau, 2005). Des facteurs physicochimiques tels que le pH ou la salinité vont influencer l'agrégation, la précipitation ou la solubilisation de certains métaux (Pinheiro et al., 1998 ; Wales et al., 2004). Trois types de spéciation peuvent être envisagés dans les milieux aquatiques : la spéciation physique (basée sur la séparation selon les dimensions), la spéciation chimique (basée sur les formes complexes) et la spéciation électrochimique (basée sur les degrés d'oxydation). Lorsqu'un ion libre métallique (Mn^+) se retrouve dans le milieu naturel aqueux, il est souvent hydraté et en quête d'un ligand pour former des complexes plus ou moins stables, ceci est fonction de la nature de liaisons (des réactions de compétition entre le métal et les différents ligands sont complexes dans le milieu aquatique) (<http://uved.univ-nantes.fr>). Il est maintenant reconnu que le dosage des concentrations totales d'un élément n'est plus suffisant pour obtenir une information précise du devenir de cet élément dans l'environnement ou bien en physiologie, humaine ou animale. En effet, les éléments traces

peuvent exister sous différentes formes chimiques et chacune d'entre elles présente une toxicité, une mobilité ou une réactivité différente. Ces espèces chimiques peuvent être classées en trois familles. Le premier groupe est constitué des éléments qui peuvent présenter différents états d'oxydation ; l'exemple le plus connu est celui du chrome qui existe sous forme de chrome trivalent, espèce essentielle à la vie, et de chrome hexavalent qui est considéré comme un agent carcinogène. En raison de la grande différence de toxicité entre les deux formes chimiques du chrome, de nombreux textes européens prennent en compte sa spéciation (<http://www.techniques-ingenieur.fr>).

VI.4.1.2. Relation avec le potentiel redox

D'autres facteurs tels que le potentiel redox peuvent avoir un effet de contrôle dans la concentration des éléments traces en dépit du degré d'évolution chimique de l'échantillon d'eau. La méthode de détermination de l'état redox se fait à partir généralement des constituants chimiques mesurés intégrant la concentration en oxygène dissous qui peut fournir des informations utiles pour évaluer la disponibilité des éléments trace à l'échelle régionale ou nationale (Wright, et al., 2015 ; Ayotte et al., 2011). Dans le cadre de cette étude puisque les potentiels redox n'ont pas été mesurés sur le terrain, nous nous sommes basés sur la méthode de McMahon et Chapelle (2008) pour déterminer les potentiels redox. Selon ces auteurs, les eaux souterraines sont classées en trois groupes (oxydant, anoxique-Fe ou mixte) en fonction des espèces redox dissoutes. Ainsi, les eaux sont considérées comme oxydantes si la concentration en O_2 dissous > 0.5 mg/L et le Fe total dissous ≤ 100 μ g/L ; anoxique-Fe si $O_2 \leq 0,5$ et le fer total dissous > 100 μ g/L ; et mixte si $O_2 > 0,5$ et le Fe total dissous > 100 μ g/L. La Campagne de janvier 2011 nous a servi de base pour classer les eaux et essayer de voir l'influence des potentiels redox sur la mobilité des éléments. Dans ces résultats (Fig.72), il apparaît que les eaux à caractère mixte sont dominantes et représente 72% des échantillons prélevés et les eaux présentant un caractère oxydant représentent 28% des échantillons. Par contre, aucun échantillon ne présente un caractère anoxique. Les résultats montrent que, quel que soit l'état redox, les éléments tels que le Mn, Ni, Cu, Zn, As, Pb sont plus libérés à des pH faibles inférieurs à 6 contrairement à l'As qui présente des concentrations plus élevées avec l'augmentation du pH. Le caractère oxydant et mixte des eaux est essentiellement lié au contexte d'aquifère de socle, peu profond et très affecté par la fracturation ce qui favorise le renouvellement rapide des eaux dont le temps de transit dans la zone non saturée est relativement faible.

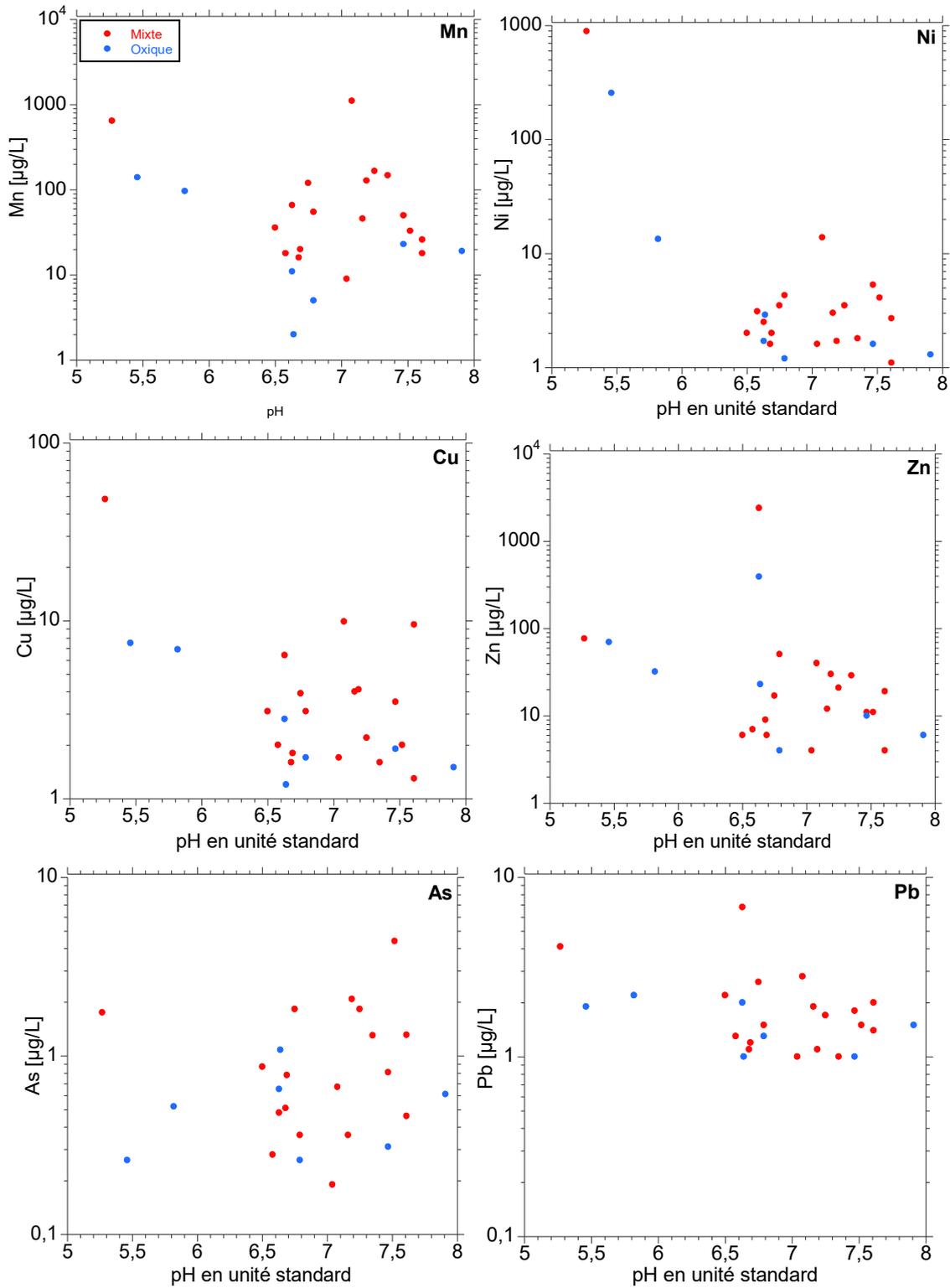


Figure 72. Distribution des éléments en fonction des potentiels redox

VI.4.1.3. En fonction de la saison

L'évolution de la chimie des eaux montre une variabilité saisonnière des concentrations de certains éléments dans les eaux. Ainsi, les concentrations en As et Sr sont plus élevées dans les

eaux en saison pluvieuse qu'en période sèche. Selon [Barringer et al., \(2010\)](#), la fluctuation saisonnière des taux de recharge affecte le devenir et le transport de l'As dans les eaux souterraines. Les périodes de fortes précipitations provoquent une dilution des eaux souterraines superficielles, mais également transporte superficiellement la matière organique dissoute dans les aquifères. Cependant, en plus de son effet important sur la recharge, la pluie contribue à l'apport par lessivage des substances contenues dans les sols au niveau des réservoirs aquifères profonds augmentant ainsi, la charge d'éléments dissous dans les réservoirs. Par contre, les éléments tels que le Mn, Ni, Cu, Zn présentent une tendance inverse leurs teneurs sont plus élevées en saison sèche qu'en hivernage (Fig.73-74). Ces concentrations plus élevées en saison sèche peuvent être liées au phénomène de concentration, provoqué par les processus d'évaporation et de lessivage des produits issus de l'activité minière qui reste très élevés dans la zone en particulier dans la partie nord durant cette période de l'année. Cette situation est également renforcée par les pH relativement plus acides en saison sèche qu'en période d'hivernage ou l'on note une tendance neutre à légèrement basique des eaux sauf à Sabodala.

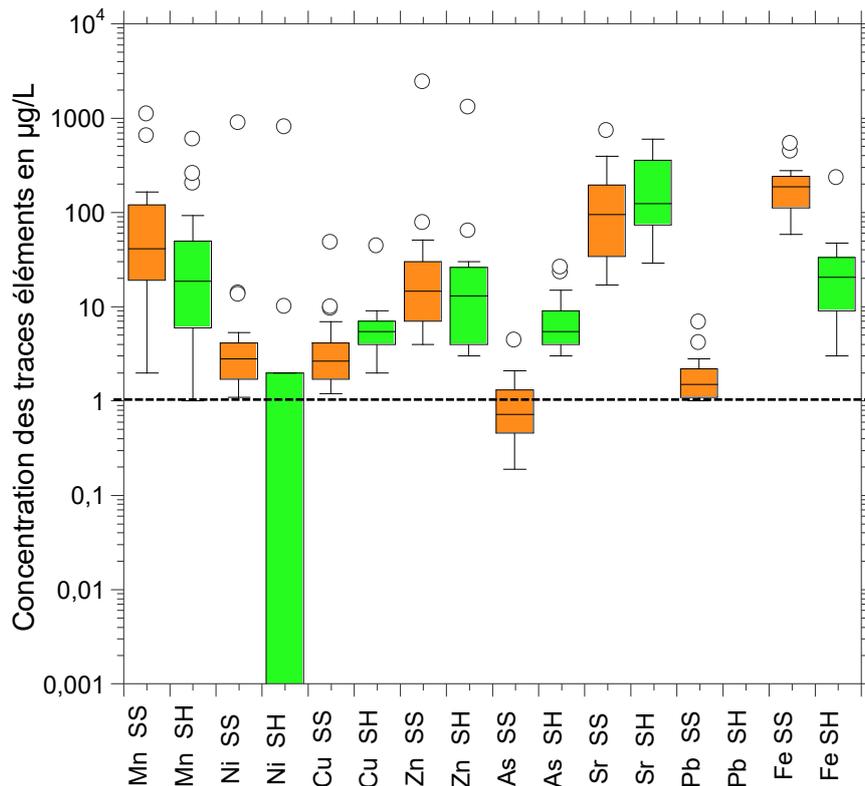


Figure 73. Box plot montrant l'évolution des éléments en fonction des saisons (SS=Saison Sèche ; SH=Saison humide)

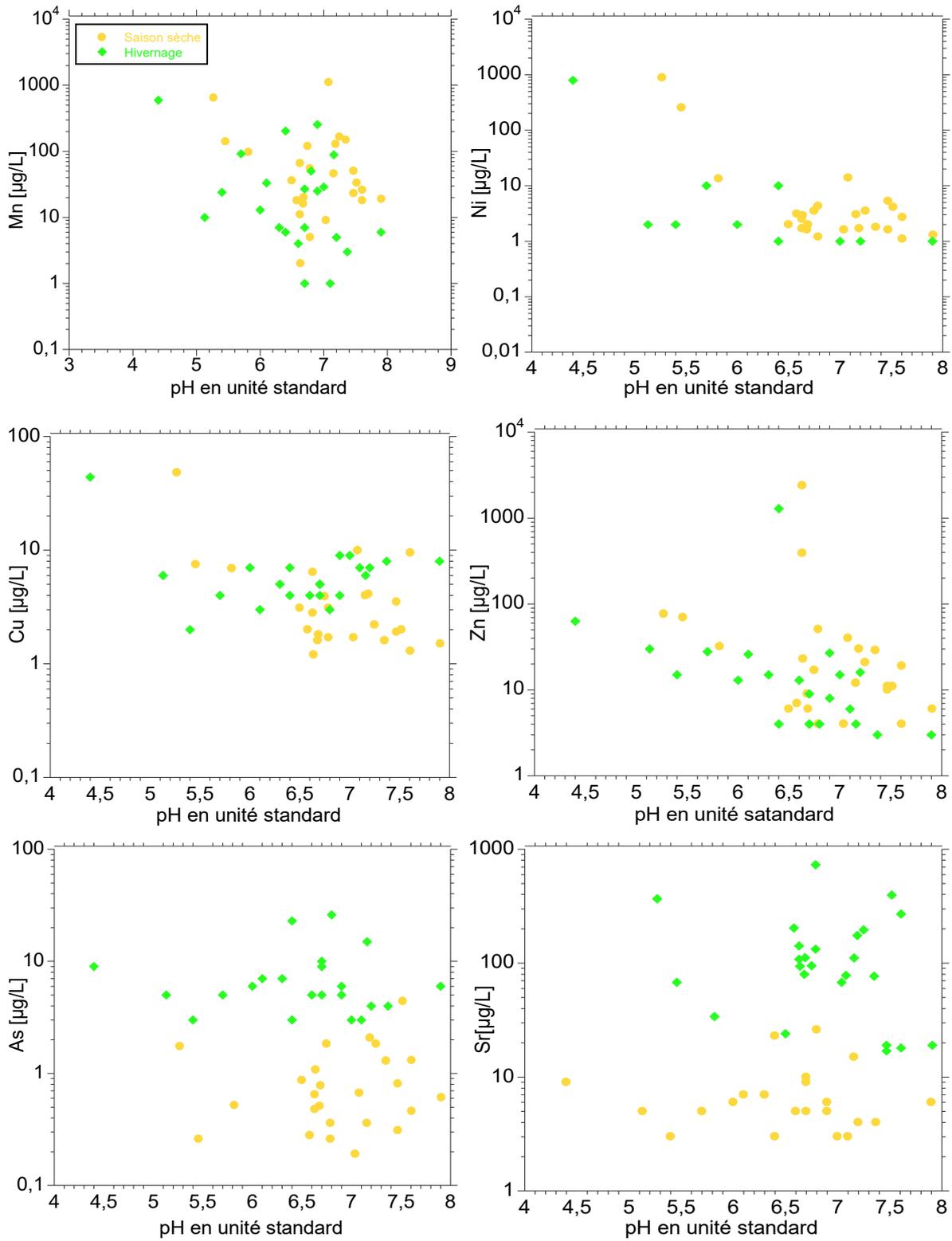


Figure 74. Distribution des éléments en fonction de la saison



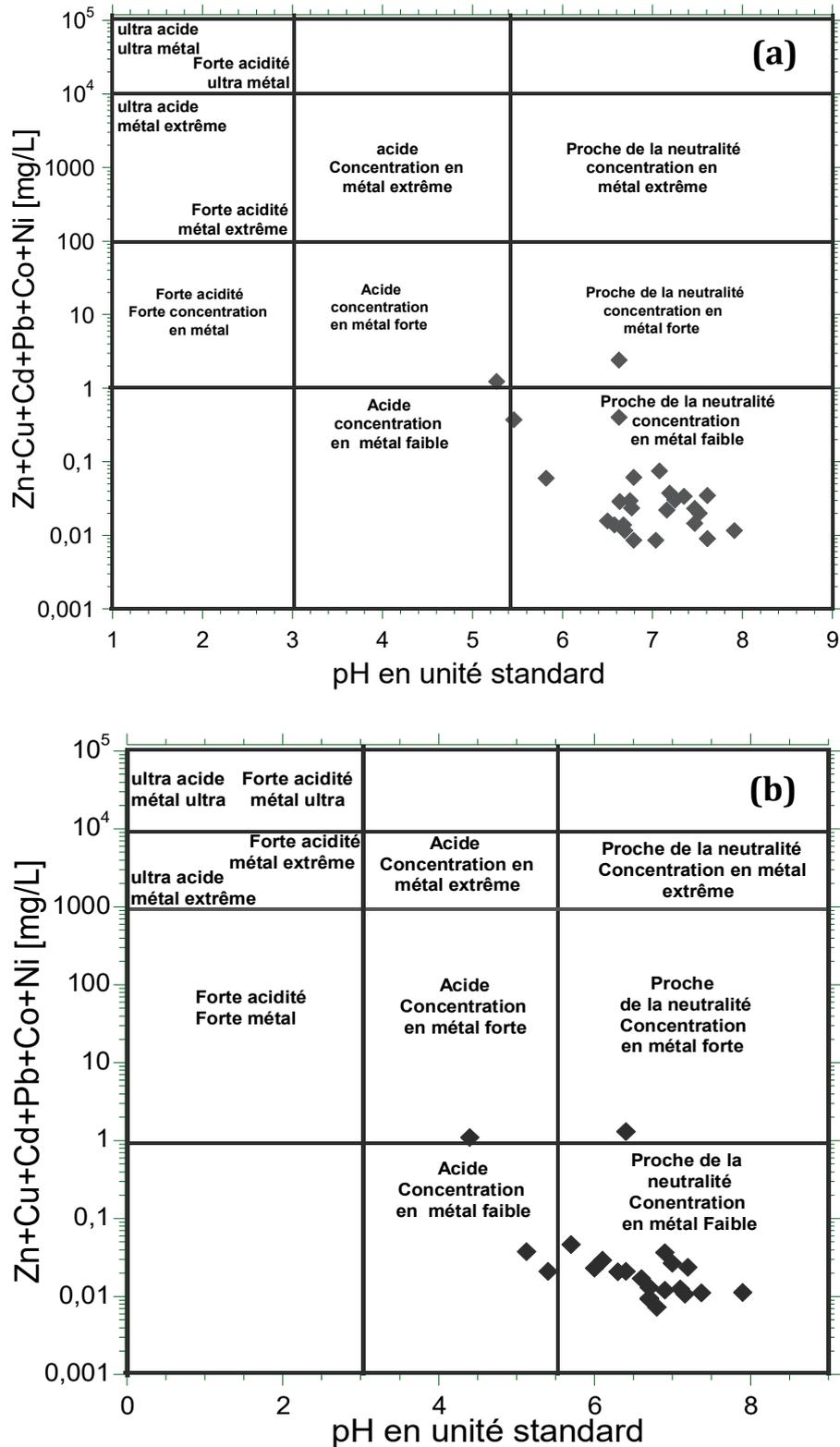


Figure 75. Localisation des échantillons des campagnes de Janvier 2011 (a) et JUIN 2014 (b) dans le diagramme de Ficklin

A travers les deux campagnes d'échantillonnage de Janvier 2011 et juin 2014, les diagrammes de Ficklin (Fig.75) montrent le degré d'acidité et de concentration des métaux dans les eaux

du Sénégal oriental. Ainsi, sur tous les sites échantillonnés, l'essentiel des eaux se trouve dans le champ des eaux proches de la neutralité et présente de faibles concentrations en métal excepté les eaux prélevées à Sabodala. Au niveau de ce site, les eaux sont acides et présentent pour l'essentiel de fortes teneurs en métal c'est les cas de Sabodala P4 ; Sabodala P3. Par contre, au niveau du site de Falombo, à proximité des stériles minières, l'eau du forage présente un pH légèrement acide et une forte concentration en métal. Ceci montre également que l'activité minière industrielle constitue également une source d'enrichissement des eaux en éléments traces au Sénégal oriental puisque c'est au niveau uniquement dans ce secteur de Sabodala que le niveau de concentration des métaux reste le plus élevé.

VI.5. Etude des processus géochimiques par les méthodes statistiques (analyse multivariée (ACP) et classification Hiérarchique (CHA))

VI.5.1. Description et pertinence des méthodes statistiques en hydrochimie

Les outils d'analyse statistique sont aujourd'hui utilisés dans tous les domaines des sciences et constituent également un outil pertinent dans la discrimination des données en hydrogéologie. Les méthodes d'analyses statistiques multivariées, telles que l'analyse factorielle (FA) et l'analyse en composantes principales (ACP) ont été largement utilisées comme méthodes efficaces dans l'élaboration d'informations significatives pour l'analyse des données de qualité (Vega et al., 1998; Helena et al., 2000; Reghunath . et al, 2002; Simenov et al, 2003). L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique d'analyse statistique multidimensionnelle et constitue une méthode factuelle et linéaire qui traite des données numériques ayant les mêmes influences (Bourouche et Saporta, 1983). Selon Wunderlin et al., (2001), l'ACP est appliquée pour réduire la dimension d'un jeu de données constitué d'un grand nombre de variables interdépendantes, tout en conservant au mieux la variabilité au sein des données. Cette réduction est obtenue par la transformation de l'ensemble dans un nouvel ensemble de variables, à savoir les composantes principales (CP). Ces composantes sont orthogonales (non corrélées) et disposées dans l'ordre décroissant dans la matrice des produits croisés, qui décrit la dispersion de plusieurs paramètres mesurés afin d'obtenir des valeurs et des vecteurs propres. Les composantes principales sont donc les combinaisons linéaires des variables originales et des vecteurs propres. Des auteurs tels que : Yidana (2009) a utilisé les méthodes statistiques multivariées pour faire la classification des eaux souterraines dans le Sud du Ghana. Il a pu faire une discrimination des échantillons d'eau en

fonction des formations géologiques de la Buem du Birimien supérieur et inférieur en montrant que les eaux souterraines de ces aquifères sont principalement affectées par les effets d'altération des minéraux. Cependant, il a pu montrer que d'autres facteurs anthropiques tels que les engrais chimiques et les eaux usées domestiques influencent la composition chimique des eaux. Poto (2011) à travers l'ACP appliquée aux éléments majeurs et traces sur des échantillons d'eau durant 5 campagnes, a pu montrer que l'approche statistique est essentielle pour mieux comprendre les facteurs qui contrôlent l'hydrochimie. Selon l'auteur, cela a pu aider à définir les éléments caractéristiques des différents réservoirs aquifères dans le Var. Une étude récente de Alassane et al. (2015) menée sur la nappe du Continental terminal au Bénin a pu montrer que, les processus géochimiques majeurs qui contrôlent la minéralisation des eaux étaient principalement dominés par des : 1) processus de mélange avec le lac Nokoué et les eaux salées de la lagune de Porto-Novo provoquant une augmentation de la salinité dans la partie sud de l'aquifère; 2) les activités anthropiques; 3) processus d'échange de cations; et 4) et la diffusion du CO₂ dans le sol fournissant une grande proportion de bicarbonates.

Au vu de tous ces avantages que présentent les analyses statistiques, nous les avons utilisées dans le traitement de nos données hydrochimiques de la campagne de Janvier 2011 afin de mieux comprendre les processus de minéralisation des eaux au Sénégal oriental. Les résultats ont fait l'objet d'une publication dans le journal JWARP (Journal of Water Resource and Protection).

2015, 7, 247-263 Published Online February 2015 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/jwarp>
<http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.73020>

VI.5.2. MATERIELS ET METHODES

La campagne de prélèvement s'est déroulée en Janvier 2011 et concernait les eaux souterraines et eaux de surfaces. Les prélèvements d'échantillons ont été effectués sur trois types de réservoir : les réservoirs supérieurs d'altérite qui sont captés par les puits villageois ; les réservoirs de fissures et de fractures profondes captés par les forages et les eaux de surfaces. Au total 26 échantillons ont été collectés et répartis sur les différentes entités hydrogéologiques (Fig.76). Les paramètres physico-chimiques tels que le pH, la Température et la conductivité électrique ont été mesurés sur le terrain. Les échantillons ont été filtrés à travers des filtres acétate cellulose 0,45 µm et acidifiés avec de l'acide nitrique concentré puis conservés à 4°C pour l'analyse des cations et éléments traces. L'analyse des éléments traces a été réalisée par spectrométrie de masse à plasma inductif (ICP-MS Inductively Coupled Plasma

Mass Spectrometry). Cette technique permet de mesurer simultanément les concentrations d'un grand nombre d'éléments chimiques. Les limites de détection (LD) sont faibles (souvent inférieures à 0,1 ppb) (Potot, 2011). En utilisant la solution standard X MERCK ICP multiélément, chaque analyse a été répétée cinq fois et la déviation standard est donnée pour chaque mesure. Concernant les anions l'analyse a été faite par chromatographie sur colonne échangeuse d'ions de marque DIONEX. Le procédé d'analyse est constitué, de colonnes anionique et cationique, d'une cellule de détection par conductimétrie munie d'un stabilisateur de détection. Le montage analytique est alimenté par un passeur d'échantillons. Le traitement des données pour la lecture se fait par le programme PeakNet. Ces données ont fait l'objet d'une analyse statistique quantitative multi variée avec le logiciel R (package ADE-4 Chessel et al., 2004). L'analyse par les composantes principales (ACP) a été conduite sur les différents paramètres chimiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Si^{4+} , As, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Mn, Zn, Ni, Al) et physico-chimiques (pH, T°C , O_2 dissout, Eh) pour déterminer les différentes origines de la minéralisation. La classification ascendante hiérarchique (CAH) et le saut de Ward, puis une représentation des classes par la fonction biplot ont été utilisés pour identifier les différentes classes d'eau.

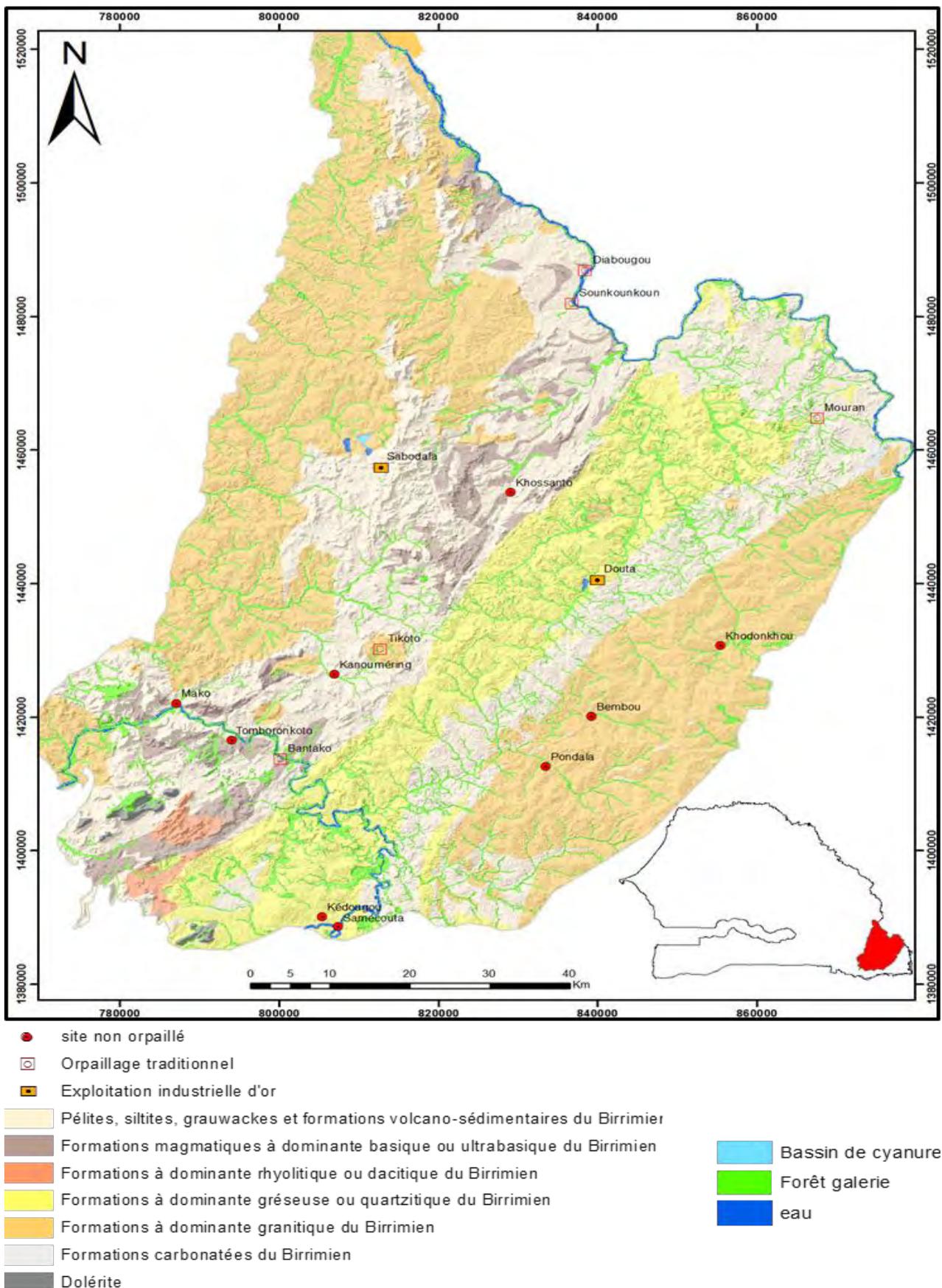


Figure 76. Carte des unités hydrogéologiques et de localisation des sites échantillonnés (Willeumiet & al. 2010 modifiée)

VI.5.3. RESULTATS ET DISCUSSION

VI.5.3.1. Paramètres physico-chimiques

L'analyse des éléments majeurs dans les eaux des nappes de socle du Sénégal Oriental montre que les eaux sont globalement peu minéralisées avec des conductivités qui varient entre 790 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 49 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau 10) et ceci selon la nature des réservoirs rencontrés dans la zone. Ainsi concernant les eaux souterraines, celles issues des réservoirs granitiques présentent la valeur médiane de conductivité la plus faible (185 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) suivie des eaux issues des formations volcaniques basiques (213 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et enfin le groupe des eaux provenant des réservoirs Schistes et volcano-sédiments qui présente la conductivité médiane la plus élevée (351 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Cependant il est à noter que la conductivité maximale a été enregistrée au niveau des réservoirs granitiques notamment au niveau du puits de Bambou. Cette conductivité élevée est due à pollution liée à une forte teneur en NO_3^- (227,34 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) ce qui contribue significativement à la minéralisation globale au niveau de ce puits. Au niveau des eaux de surface les conductivités sont très faibles avec une valeur médiane de (48 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Le pH des eaux souterraines est légèrement acide avec des valeurs médianes de 6,6 au niveau des eaux des réservoirs granitiques ; 6,9 au niveau des réservoirs schistes et volcano-sédiments ; et 6,3 au niveau des roches volcaniques basiques. Par contre les eaux de surface présentent un caractère neutre à légèrement basique avec une valeur médiane de pH de 7,5. Cette différence peut être expliquée par un dégazage du CO_2 au niveau des eaux de surface (Potot, 2011). Les pH les plus faibles sont observés au niveau des puits Sabodala P3 et Sabodala P2 et Sabodala P4 avec respectivement des valeurs de pH égales à 5,3 ; 5,8 et 5,5. Les eaux de surface montrent un caractère plus oxydant avec une valeur médiane en O_2 de 7,09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, suivies des eaux des réservoirs de roches volcaniques basiques, ensuite les eaux des granites et enfin les eaux issues des réservoirs de Schiste et volcano-sédiments qui présentent respectivement des valeurs médianes de 4,05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 3,9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 2,5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Le caractère moins oxydant observé au niveau des réservoirs schistes-volcano-sédiments peut être expliqué par la présence d'argile qui rend le milieu fermé moins oxydant.

Tableau 17. Statistique des paramètres physico-chimique (CE, pH, T°C, O₂, Eh)

Type	Granites				Schistes et Volcano-sédiments				Volcaniques basiques				Eaux de surface			
	Min	Max	Méd	n	Min	Max	Méd	n	Min	Max	Méd	n	Min	Max	Méd	n
pH	6,5	7	6,6	9	6,5	7,5	6,9	6	5,3	7,4	6,3	6	7,09	7,9	7,5	5
CE $\mu\text{S.Cm}^{-1}$	49	790	185	9	129	724	351	6	59	701	213	6	47	292	48	5
T°C	25,2	31,7	26,6	9	26,6	31	29,9	6	28,2	32,2	30,7	6	23,7	25,1	24,2	5
O ₂ mg.L ⁻¹	3,09	5,5	3,9	9	1,5	5,1	2,5	6	1,8	5,6	4,05	6	2,5	14,9	7,09	5
Eh mV	10,5	56,1	51	9	15,9	59,2	52,5	6	6,3	51	12,1	6	28	121,	59,2	5

VI.5.3.2 Hydrochimie des ions majeurs et processus géochimiques par approche géostatistique

L'environnement des terrains cristallins est composé d'une multitude de types de roches ignées et métamorphiques. La composition des roches ignées et certaines de ces propriétés physiques sont contrôlées par leur condition de cristallisation. Les roches ultramafiques sont composées d'assemblages de minéraux qui se cristallisent à des températures plus élevées que celles des roches felsiques. Le tableau 11 est un résumé des caractéristiques chimiques et minéralogiques de certains types de roches généralement en contact avec les fluides trouvés dans des environnements cristallins. Les roches mafiques et ultramafiques ont tendance à être composées d'une phase minérale riche en silicates de fer-magnésium-calcium, tandis que les roches felsiques contiennent plus de sodium et de potassium (Frape et al., 2003).

 Tableau 18. Chimie et minéralogie des types de roches représentatives des milieux cristallins (analyses normalisées à 100%, y compris MnO, P₂O₅, l'eau libre, les oxydes sont en% en poids).

Type of rock Paramètre nomb d'analyses	Ultramafiques (Peridotites) n = 287	Mafiques (gabbro) n = 1.451	Intermédiaires (diorite) n = 872	Felsiques (granite) n = 2.485
SiO ₂	45,31	51,06	58,58	72,04
TiO ₂	0,52	1,17	0,96	0,30
Al ₂ O ₃	4,38	15,91	16,98	14,42
Fe ₂ O ₃	4,28	3,10	2,55	1,22
FeO	7,48	7,76	5,13	1,68
MnO	0,26	0,12	0,12	0,05
MgO	31,19	7,68	3,73	0,71
CaO	5,5	9,88	6,66	1,82
Na ₂ O	0,55	2,48	3,60	3,69
K ₂ O	0,3	0,96	1,81	4,12
P ₂ O ₅	0,11	0,24	0,29	0,12
Minéraux	Ol. Py	Py. Pl. Hb. Bi	Pl. Hb. Bi	Pl. Kspar. Bi. Qtz

Ol = olivine. Py = pyroxène. Hb = hornblende. Bi = biotite. Pl = plagioclase feldspar. Kspar = potassium feldspar. Qtz = quartz. (Hyndman, 1985)

L'interaction fluide/roche ou plus correctement interaction minéral/fluide, doit être bien examinée afin de mieux comprendre l'évolution géochimique des eaux souterraines dans les systèmes de roches cristallines. Pour l'essentiel des eaux, le faciès bicarbonaté calcique est dominant et ceci reflète la signature chimique des eaux issue des milieux cristallin ou cristallophyllien où la minéralisation des eaux est essentiellement liée à l'hydrolyse des silicates qui produit des bicarbonates et libère des cations. Cette hydrolyse s'accompagne souvent d'une augmentation du pH (Appelo Postma, 2009). Les eaux des aquifères granitiques sont caractérisées par une teneur en alcalin notamment Na+K beaucoup plus importante (Tableau 13) avec une valeur médiane de 21,2 mg. L⁻¹ alors que, les valeurs médianes de concentration en alcalin observées au niveau des eaux des formations schistes et volcano-sédiments et des formations volcaniques basiques sont respectivement : 19,8 mg. L⁻¹ et 13,9 mg. L⁻¹. Cet enrichissement en alcalin essentiellement lié à l'altération des K-feldspaths et de la biotite éléments constitutifs des granites se fait selon les réactions suivantes décrites par Appelo et Postma (équations 3-5). Cependant, la teneur en alcalino-terreux Ca²⁺ et Mg²⁺ est beaucoup plus importante au niveau des eaux des aquifères des schistes et volcano-sédiment avec une concentration médiane (44,9 mg. L⁻¹) suivies des eaux provenant des réservoirs volcaniques basiques (30,3 mg.L⁻¹) et enfin les eaux les granites présentent les plus faibles teneurs en alcalino-terreux (16,5 mg. L⁻¹). Les bicarbonates suivent la même évolution que les alcalino-terreux au niveau de ces trois groupes. Ainsi le groupe des eaux issues des schistes et volcano-sédiments présente une teneur médiane en HCO₃⁻ plus élevées (143,3 mg. L⁻¹) suivies de celles des eaux issues des formations volcaniques basiques et granites qui présentent des teneurs médianes en HCO₃⁻ similaires (73,2 mg. L⁻¹). Au niveau des réservoirs schistes et volcano-sédiments, l'enrichissement en alcalino-terreux (Ca²⁺, Mg²⁺) et le HCO₃⁻ peut s'expliquer par l'altération des pyroxènes (Equation 4) et des minéraux ferromagnésiens contenus dans ces roches qui libère du Ca²⁺ du Mg²⁺ et des HCO₃⁻ et par une dissolution des minéraux carbonatés notamment la calcite et la dolomite contenus dans les formations sédimentaires. Le Ca²⁺ et le HCO₃⁻ pourraient provenir également de l'altération des Ca-feldspaths (Garrels and Mackenzie, 1971) (équation 2). La solubilité et la vitesse de dissolution du plagioclase, fait qu'il est un contributeur majeur d'ions sodium et de calcium en solution. Pour de nombreux types de roches, le plagioclase est la seule source silicatée de ces ions. Il faut s'attendre à ce que les solutions d'altération aient un rapport Ca/Na qui reflète dissolution congruente des plagioclases, et ceci est observé dans certains systèmes des bassins versants. Le plus souvent, cependant, le rapport Ca/Na est plus grand que le ratio dans le plagioclase, ce

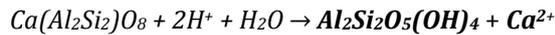
qui implique soit la présence d'une autre source de calcium ou une perte de sodium (Bricker et al, 2003). L'albitisation des plagioclases indiqués dans l'équation 6 participe également à une augmentation des ions Ca^{2+} et une réduction de la concentration des ions Na^+ (Kharaka, 2004). Au niveau des nappes supérieures d'altérite très vulnérables, la chimie des eaux évolue de manière très variable et peut être très affectée par la pollution organique liée à la présence de concentration en NO_3^- très élevée au niveau de la majorité des puits échantillonnés. Par contre, les forages présentent tous un caractère non pollué avec des concentrations en nitrate en dessous du seuil de concentration admissible pour l'eau de boisson. Seul le forage de Mako présente des teneurs en nitrates relativement élevées (47 mg.L^{-1}). Cet état de fait nous conduit à considérer la signature chimique des eaux prélevée au niveau des forages comme étant caractéristique de la nature géologique de la formation aquifère réservoir (Mall, 2009).

(1) (Albite) plagioclase sodique

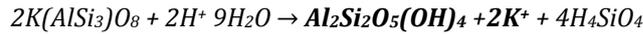
Kaolinite



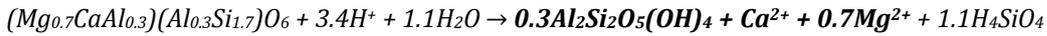
(2) (Anorthite) plagioclase calcique



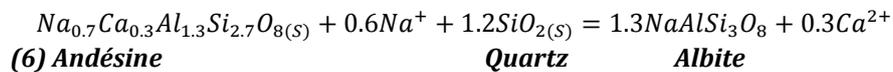
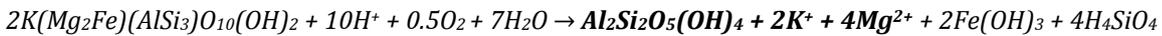
(3) (Microcline) feldspath potassique



(4) (Augite) Pyroxène



(5) (Biotite) Mica



(6) Andésine

Quartz

Albite

Tableau 19. Statistique sur les teneurs ions majeurs des eaux au niveau des différents réservoirs [mg.L⁻¹].

Type	Granites				Schistes et Volcano-sédiments				Volcaniques basiques				Eaux de surface			
	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n
Ca (mg.L ⁻¹)	1,7	61,23	14,82	9	9,23	78,2	35,9	6	4,77	49,7	21,7	6	1,03	23,12	3,78	5
Mg (mg.L ⁻¹)	1,4	30,8	3,04	9	0,88	25,3	9,03	6	2,45	47,5	8,67	6	0,33	9,2	2,3	5
Na (mg.L ⁻¹)	3	62,7	18,1	9	3,7	34,6	17,7	6	1,6	61,9	12,2	6	1,1	20,6	2,6	5
Si (mg.L ⁻¹)	7,5	32	29	9	10,3	33,7	23	6	6,2	19,1	6,8	6	4,8	10,4	5,2	5
K (mg.L ⁻¹)	0,3	21,4	2,3	9	1,8	9,1	2,1	6	0,2	4,7	1,7	6	0,2	3,7	3,1	5
HCO ₃ (mg.L ⁻¹)	18,3	115,9	73,2	9	61	366	143,3	6	6,1	280,6	73,2	6	24,4	164,7	24,4	5
Cl (mg.L ⁻¹)	2,1	63,7	6,3	9	2,6	37,6	8,2	6	2,2	55,6	8,2	6	2,05	7,3	2,1	5
SO ₄ (mg.L ⁻¹)	0,3	113,5	5,1	9	0,4	21,7	5,04	6	0,5	11,34	1,26	6	0,3	1,6	0,4	5
NO ₃ (mg.L ⁻¹)	0	224,3	2,09	9	0,29	43,1	6,1	6	0	277,5	23,7	6	0	0,47	0	5

Tableau 20. Composition chimique des eaux en éléments majeurs [mg/L]

Id	N°	Type	T°C	pH	Eh	O ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Bal
SrP	1	Gr	25,9	6,7	46	5,5	41,4	11,3	44,1	4,5	91,5	53,5	16,5	106,1	-0,2
BemP	2	Gr	27,6	6,8	56	3,9	61,2	30,8	52,6	2,4	115,9	63,7	27,3	224,3	0,4
KhkF	3	Gr	26,6	6,6	48,3	4,9	37,2	2,1	13,7	21,4	73,2	31,1	113,5	2,1	-1,1
KhkP	4	Gr	26,6	6,6	48,3	4,9	21,4	8,8	62,7	5,8	24,4	41,4	13,5	180,4	-0,8
TinP4	5	Gr	31,0	6,8	10,5	3,1	7,6	3,1	12,4	1,7	73,2	2,2	0,8	0,2	-2,4
PonP	6	Gr	26,5	7,0	56,1	5,2	14,8	1,7	18,1	1,2	73,2	6,3	4,9	17,8	-1,9
TinP2	7	Gr	26,0	6,7	51	3,5	13,4	3,04	19,3	1,9	103,7	3,2	1,6	2,0	-1,3
TinP1	8	Gr	25,3	6,5	56,1	3,4	1,7	1,4	4,6	0,3	18,3	2,6	5,2	0,0	-8,4
TinF1	9	Gr	31,8	6,6	54,8	3,4	14,1	2,3	3	11,8	91,5	2,1	0,0	0,4	-1,8
KosP	10	S&Vs	26,6	6,6	53,3	4,3	29,5	11,2	34,7	1,9	122,0	27,5	21,7	42,2	0,6
KanF	11	S&Vs	28,2	7,2	51,8	2,5	57,5	23,4	17,4	2,3	329,4	2,6	1,3	0,3	0,9
MouF	12	S&Vs	30,9	6,6	59,3	2,5	9,2	0,8	3,7	9,1	61,0	3,6	6,1	0,4	-1,1
SamP	13	S&Vs	29,8	6,7	56,1	5,2	26,5	5,2	18,2	1,8	97,6	9,3	5,8	43,1	-1,5
MouP	14	S&Vs	30,0	7,5	15,9	1,5	42,3	6,8	9,2	1,9	164,7	7,1	8,3	0,4	0,7
BanF	15	S&Vs	31,0	7,3	49	2,4	78,2	25,4	30,1	2,8	366	37,6	4,2	6,1	0,9
SbP4	16	V.B	28,3	5,5	6,3	5,7	7,8	5,4	22,5	2,6	6,1	13,3	1,1	88,7	-1,1
MakF	17	V.B	32,3	7,4	22,1	1,8	49,7	47,6	14,02	1,6	280,6	49,6	11,3	47,1	0,4
SbP	18	V.B	29,3	7,2	13,8	4	25,3	8,9	2,1	0,5	122	2,2	2,8	0,3	-0,5
SbP2	19	V.B	31,8	5,8	51	4,1	4,7	2,4	1,6	0,3	24,4	3,3	1,1	0	0,1
SbP3	20	V.B	29,8	5,3	10,5	5,5	33,6	20,9	61,9	4,7	6,1	55,6	1,3	277,5	0,3
TomF	21	V.B	31,8	6,8	6,3	2,9	18,2	8,4	10,4	1,7	128,1	2,2	0,5	0,4	-1,9
GamA	22	E.S	24,3	7,5	121,3	7	1,09	0,4	2,6	3,7	24,4	2,0	0,0	0,4	-0,9
SbR	23	E.S	23,8	7,1	51,8	14,	23,1	9,3	20,7	3,1	164,7	7,3	1,6	0,5	-0,8
GamV	24	E.S	24,3	7,6	59,3	7,1	3,7	2,5	2,7	0,5	30,5	2,3	0,8	0	-4,2
GamS	25	E.S	24,1	7,6	101	2,6	4,1	2,4	1,1	0,2	24,4	2,1	0,3	0	-1,2
Gam	26	E.S	25,1	7,9	28	7,1	1,03	0,3	2,6	3,7	24,4	2,1	0,0	0,4	-1,5

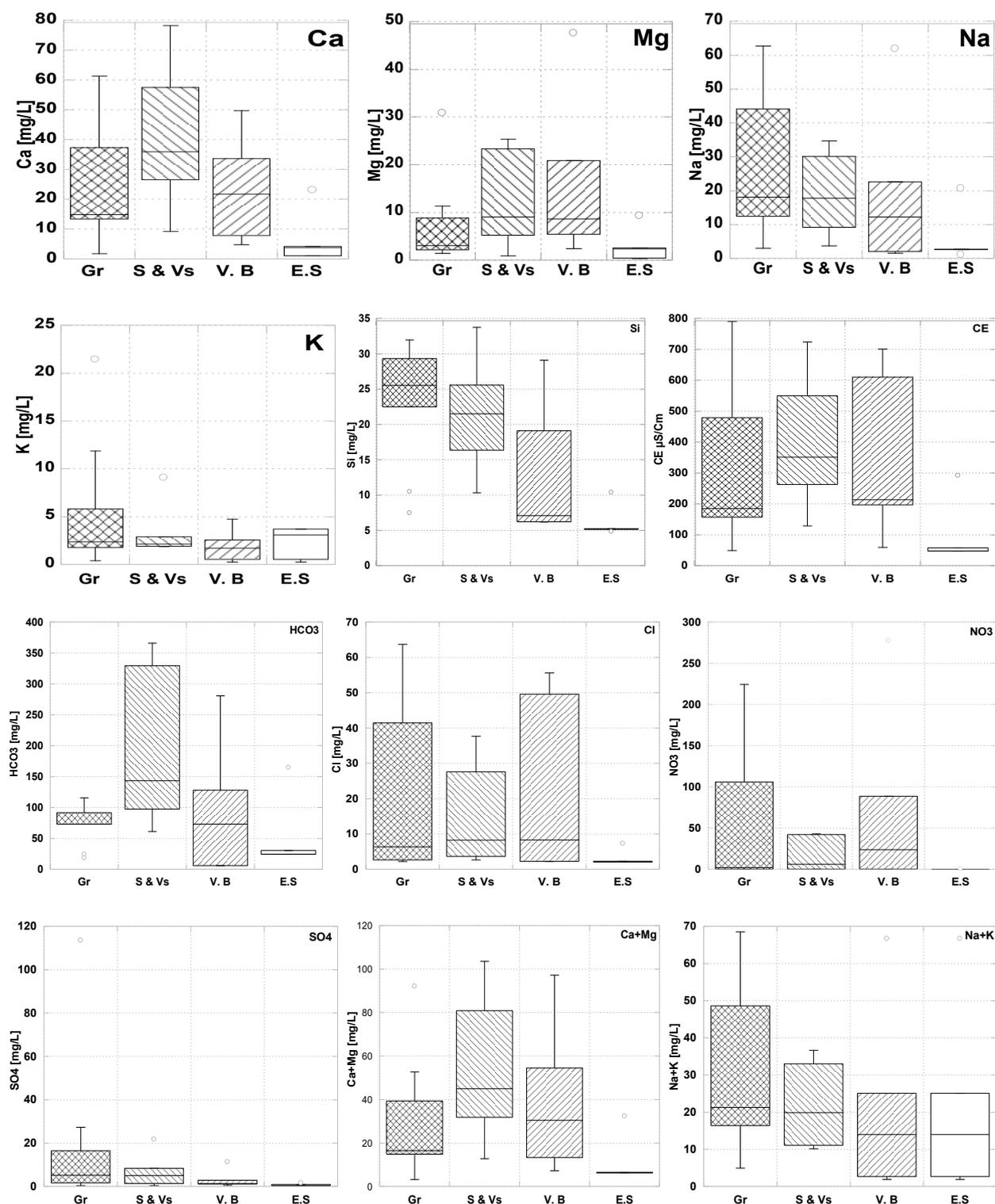


Figure 77. Boxplot indiquant la répartition de la composition en ions majeurs des eaux des différents réservoirs échantillonnés. (Vs. = Schistes et Volcano-sédiments ; V. B. = Volcaniques basiques ; E. S. = Eaux de surface)

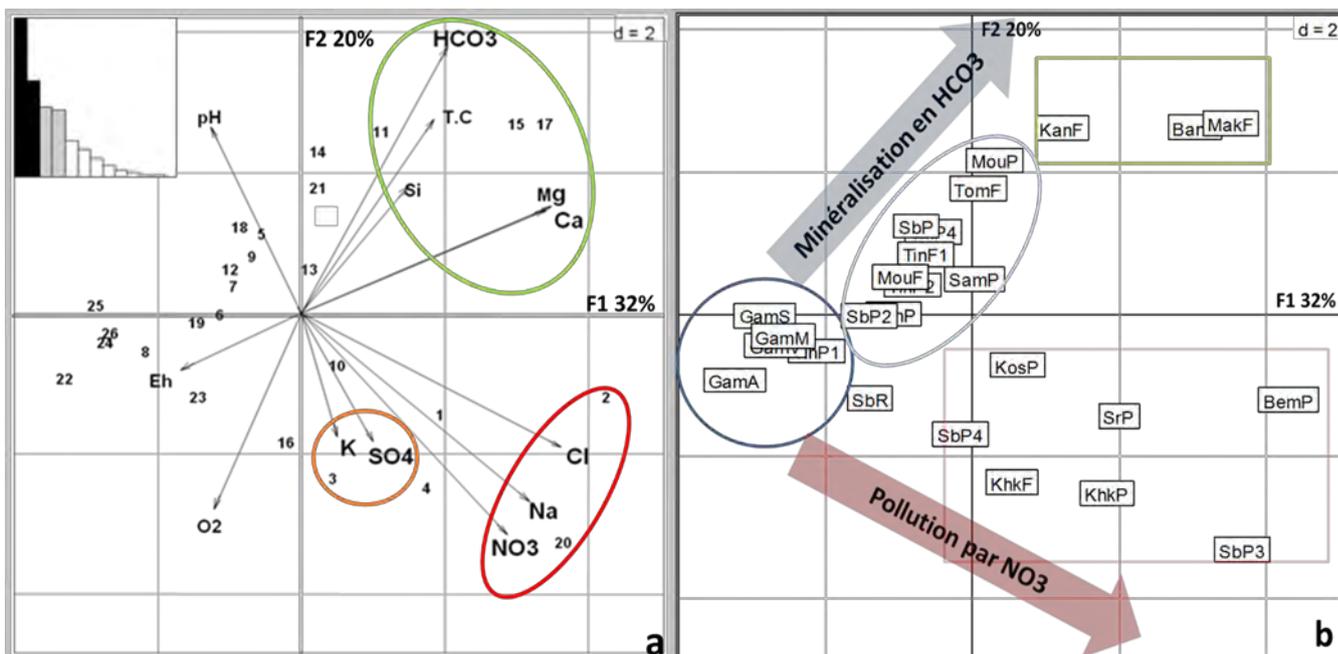


Figure 78. a-b. Analyse des composantes principales (ACP) des ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Si^{4+})

Le traitement des données à partir du logiciel d'analyse statistique R a permis de faire l'analyse des composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CHA). Pour les majeurs, l'analyse tient compte des ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Si^{4+}). Les résultats de l'ACP (Fig. 78 a-b) montrent que l'essentiel des ions contribue de manière significative à l'axe factoriel F1. La contribution de chaque élément sur l'axe dépend de la longueur du rayon attribué à l'élément sur le cercle de corrélation. Ainsi, les ions Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NO_3^- et Si^{4+} contribuent significativement à la première composante principale (F1) qui représente 32% de la variance totale des données. Cet axe F1 représente l'ensemble des ions qui participe à la minéralisation des eaux. Au niveau de la seconde composante principale F2 qui représente 20% de la variance, il existe une corrélation positive entre les ions HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} et Si^{4+} qui suggère une origine naturelle commune de ces éléments dans les eaux liée essentiellement à l'hydrolyse des silicates. L'enrichissement en HCO_3^- des eaux s'accompagne d'une augmentation de la concentration des ions Si^{4+} suivie des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} à proportion à peu près égales. Ce groupe caractérisant un faciès HCO_3^- -Ca-Mg, s'oppose au groupe Cl^- , Na^+ , NO_3^- (Fig. 78 a) qui indique une autre source de minéralisation qui est d'origine anthropique marquée par des teneurs en NO_3^- très élevées. Cette contamination des eaux par les nitrates s'accompagne d'une augmentation de la concentration des ions Cl^- qui pourrait indiquer une origine organique des nitrates. L'axe F2 indique également que les alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+}) sont anti corrélés (Na^+ , K^+) ; les premiers étant caractéristiques des eaux

issues des aquifères schistes volcano-sédimentaires et roches volcaniques basiques et les derniers caractérisent les eaux issues des granites (Fig. 78 b).

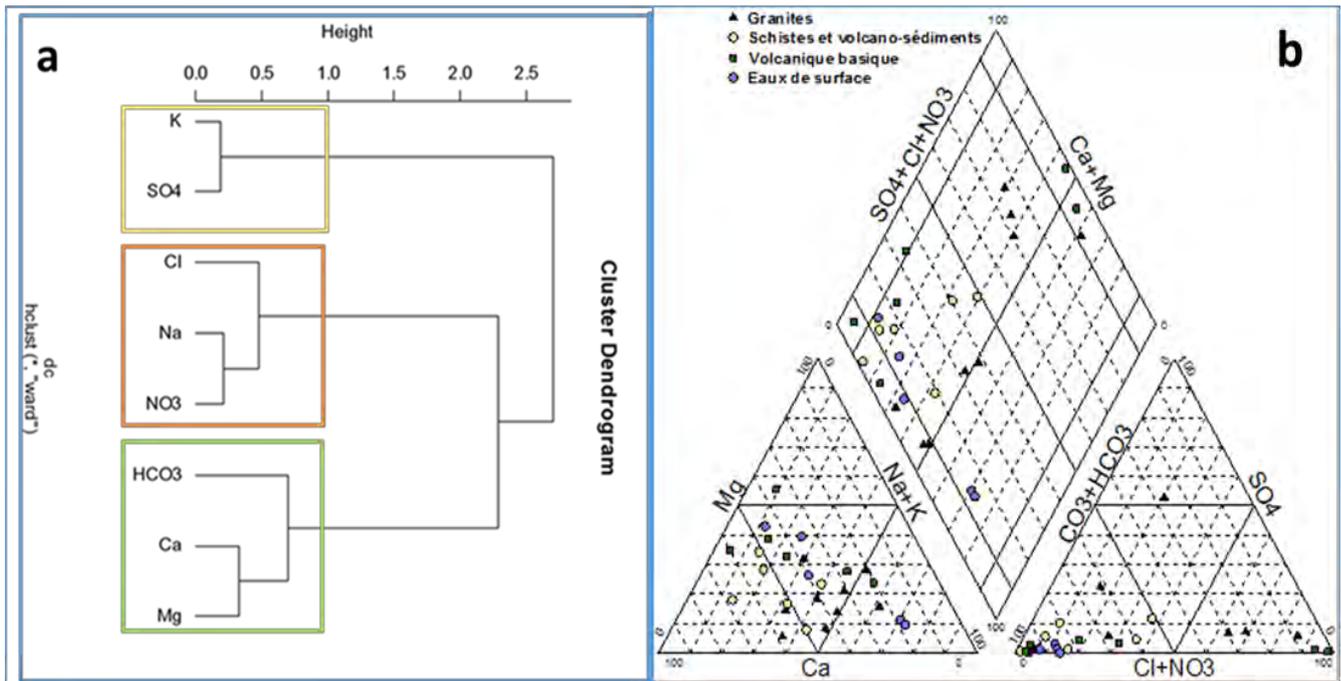


Figure 79 a-b: Différents types d'eau selon le dendrogramme et le diagramme de Piper (Janvier 2011)

La distribution des clusters basée sur les trois premiers ACP (Fig.80) indique que, les clusters 1, 3 et 4 sont définis par des eaux non polluées à faciès HCO₃-Ca-Mg pour l'essentiel des eaux qui composent ce groupe et sont caractéristiques des échantillons d'eaux de surface et de forage . Les clusters 2 et 6 représentent la famille des eaux à faciès NO₃-Cl-Ca-Mg et NO₃-Cl-Na, qui caractérisent les eaux polluées ou de qualité médiocre si on tient compte des teneurs en nitrate des eaux du groupe 6. Elles sont rencontrées au niveau des puits villageois. Enfin le cluster 5 indique une eau caractérisée par des teneurs en K⁺ et SO₄²⁻ relativement élevées que l'on rencontre sur le granite de Saraya. Globalement, l'ACP montre trois origines principales de la minéralisation des eaux. Il s'agit : d'un premier groupe caractérisé par des eaux faiblement minéralisées présentant un faciès bicarbonaté calcique magnésien où les ions dominants sont les HCO₃, le Ca²⁺ et le Mg²⁺. Ce groupe représente pratiquement les eaux non contaminées rencontrées au niveau des forages qui captent le niveau profond fracturé ou la principale source de minéralisation demeure l'hydrolyse des silicates;

Un deuxième groupe caractérisé par un faciès nitraté chloruré que nous rencontrons uniquement au niveau des puits villageois souvent affectés par la pollution organique d'origine anthropique caractérisée par des eaux présentant des teneurs en nitrate très élevées qui dépassent les normes OMS de potabilité pour l'eau de boisson (50 mg. L⁻¹) ;

Enfin un groupe présentant une eau avec des concentrations relativement importantes en K^+ et SO_4^{2-} qui indique un troisième pôle de minéralisation liée à l'encaissant granitique qui contribue à enrichir l'eau en K^+ et SO_4^{2-} observé au niveau du forage de Khondonkhon situé sur le granite de Saraya. Cet enrichissement d'origine naturelle provient essentiellement du contact eau-granite très riche en biotite et en K-feldspath qui contribuerait à augmenter la teneur en potassium des eaux, mais également de la présence possible de sulfate de Zn et Pb qui contribuerait à enrichir l'eau en SO_4^{2-} , Zn^{2+} et Pb^{2+} puisque c'est en ce point uniquement que les teneurs les plus élevées en Zn et Pb ont été notées. Concernant les eaux de surfaces, les analyses d'échantillons prélevés sur le fleuve Gambie à différentes stations et sur la Rivière Sabodala montrent des conductivités très faibles qui varient sur le fleuve Gambie entre 47 et 58 $\mu S/cm$ alors qu'au niveau de la rivière de Sabodala, la valeur de conductivité mesurée (292 $\mu S/cm$) est très supérieure à la gamme de conductivité rencontrée au niveau des eaux surface ce qui pourrait attester un apport supplémentaire d'éléments provenant de sources diverses au niveau de cette rivière. Cet enrichissement peut être lié également à la très faible lame d'eau et le caractère stagnant de l'eau favorisant ainsi la concentration de certains contaminants au niveau de cette rivière qui est subit une forte évaporation.

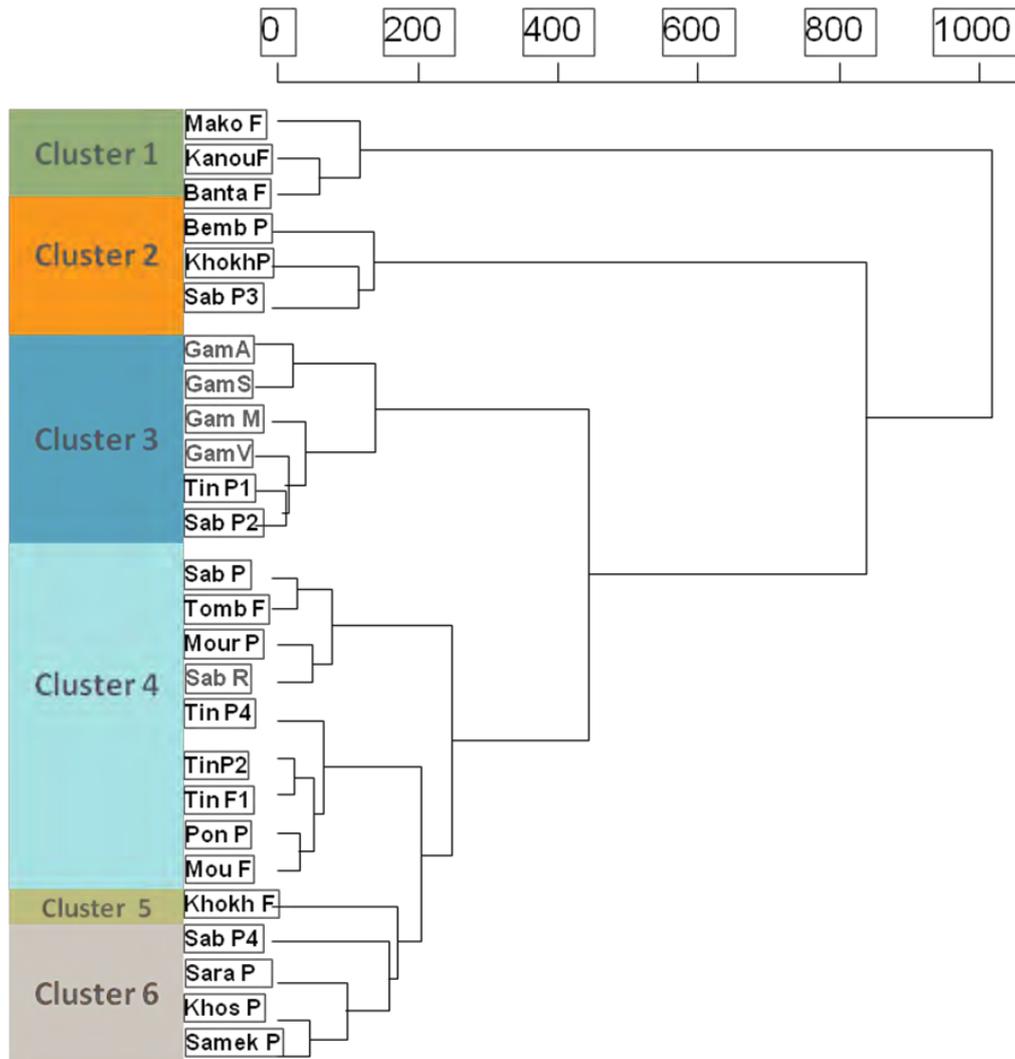


Figure 80. CAH des différents groupes d'eau issus des différents réservoirs tenant compte de leur composition en ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Si^{4+})

VI.5.3.3. Hydrochimie des éléments traces et processus géochimiques par approche géostatistique :

Les éléments traces sont les éléments chimiques constituant de la croûte terrestre dont la concentration est, pour chacun d'entre eux, inférieure à 1 g.kg^{-1} dans les roches. Dans la croûte continentale supérieure, ils ne représentent à eux tous que 0,6 % de la masse totale, alors que les 11 éléments majeurs interviennent pour 99,4 % (ADEME, 2010). Cependant, les éléments en trace dans les roches ne sont pas nécessairement ceux en trace dans les eaux, où leur présence dépend de l'altérabilité des minéraux et leur mobilité. Ainsi, l'aluminium, le fer ou encore le titane font partie des éléments majeurs de la croûte terrestre, mais sont présents à l'état de traces dans les eaux. La concentration des éléments traces dans les eaux de surface naturelles est inférieure à 1 mg.L^{-1} (ADEME, 2010). Ces concentrations en éléments traces dans les eaux de consommation peuvent être fortement influencées par l'activité anthropique

ou la nature des terrains géologique. La présence d'activité minière industrielle et d'orpaillage au niveau du secteur de Sabodala justifie cette étude qui se veut de caractériser la chimie des eaux du point de vue éléments traces pour pouvoir suivre leur évolution dans le temps et de voir l'impact des activités minières sur la qualité de ces ressources. Selon INERIS (2006) au niveau des zones minières qui constituent un cas particulier, les concentrations en éléments traces métalliques sont localement élevées. Bien qu'à l'origine ces éléments soient en général inclus dans des structures cristallines, donc peu mobiles, les risques de migration résultent de l'oxydation des sulfures (au sein des galeries ou des stériles présents en surface). L'acidification des eaux qui en résulte permet le transport à l'état dissous des éléments (phénomène appelé drainage minier acide dans le cas d'une eau d'exhaure). Au niveau du Sénégal oriental, la composition en éléments traces des eaux montre un caractère très variable en fonction des réservoirs (tableau 14). L'enrichissement des teneurs en trace des eaux est surtout noté au niveau des zones minières ou à activité d'orpaillage. Les éléments qui affectent le plus les eaux sont par ordre d'importance l'Al, le Ni, le Mn, le Cr et le Co. Les statistiques montrent que l'Al présente des teneurs relativement importantes au niveau des eaux du Sénégal oriental quelque soit la nature du réservoir. Au niveau des granites, la concentration médiane est de l'ordre de $257 \mu\text{g.L}^{-1}$ et la teneur maximale enregistrée est observée au niveau du puits Tinkoto P4 situé sur le site d'orpaillage du village avec une concentration de $700 \mu\text{g.L}^{-1}$. Au niveau des réservoirs de schistes et volcano-sédiments, la teneur médiane en Al est de $55 \mu\text{g.L}^{-1}$ et la teneur maximale est observée au niveau du puits de Khossanto ($166 \mu\text{g.L}^{-1}$). Les eaux du réservoir volcanique basique montrent une teneur médiane Al de l'ordre de $104,5 \mu\text{g.L}^{-1}$ et la teneur maximale ($813 \mu\text{g.L}^{-1}$) rencontrée au niveau de puits P3 de Sabodala. Enfin au niveau des eaux de surface l'Al est présent en faible quantité avec une concentration médiane de $98 \mu\text{g.L}^{-1}$, la concentration maximale Al est enregistrée au niveau de la rivière Sabodala. Cependant, le point Bantako aval situé sur le fleuve Gambie à l'aval du site de lavage de minerai montre une teneur en Al relativement importante de $306 \mu\text{g.L}^{-1}$.

Ces teneurs relativement élevées en Al dans les différents types de réservoirs échantillonnés sont essentiellement liées aux activités d'orpaillage qui contribuent à enrichir les eaux en cet élément par le lavage du minerai broyé qui facilite ainsi la libération et la solubilisation de l'Al dans les eaux. Le Ni est présente en faible teneur sur l'ensemble des eaux issues des différents réservoirs (Tableau 14) excepté celui des formations de roches basiques et particulièrement au niveau du village de Sabodala où la teneur maximale est observée au niveau de puits Sabodala P3 avec une concentration $890,2 \mu\text{g.L}^{-1}$. Sur les quatre puits échantillonnés au niveau

village de Sabodala, les deux, Sabodala P4 et Sabodala P3 présentent des teneurs en Ni qui dépassent la norme de potabilité. Sur les autres groupes réservoirs, le Nickel est présent à des teneurs médianes relativement faibles avec des valeurs en dessous des normes qui sont de l'ordre de 2 $\mu\text{g.L}^{-1}$ au niveau des réservoirs granitiques ; 3 $\mu\text{g.L}^{-1}$ au niveau des réservoirs schistes et volcano-sédiments ; 8,45 $\mu\text{g.L}^{-1}$ au niveau des réservoirs volcaniques basiques et 1,6 $\mu\text{g.L}^{-1}$ au niveau des eaux de surface. La présence de ces fortes teneurs en Ni observée à de Sabodala pourrait être liée à l'activité minière industrielle dans la zone. Concernant le Mn et le Cr, des teneurs dépassant la norme de potabilité sont uniquement rencontrées au niveau de la rivière Sabodala avec des concentrations respectives de 1107 $\mu\text{g.L}^{-1}$ et 10,38 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Le Mn a été également retrouvé au niveau de Sabodala P3 avec des teneurs relativement élevées (643 $\mu\text{g.L}^{-1}$) ce qui confirme toujours l'impact de l'activité minière au niveau de ce site qui abrite la plus grande industrie extractive d'or dans la zone. Les autres éléments tels que l'As, le Cd, le Fe, le Pb, le et le Zn sont présents à des teneurs ne dépassant pas les normes de potabilité des eaux et leur concentration dans les eaux dépend de la nature des réservoirs (tableau 10).

Tableau 21. Statistique sur les teneurs en éléments traces des eaux au niveau des différents réservoirs

Type	Granites				Schistes et Volcanosédiments				Volcaniques basiques				Eaux de surface			
	Mi	Ma	Media	n	Mi	Ma	Media	n	Mi	Max	Media	n	Mi	Max	Media	n
Al	16	700	257	9	12	166	55	6	7	813	104,5	6	71	797	98	5
Cd	0	0,8	0,1	9	0,1	0,9	0,35	6	0,1	1,4	0,45	6	0	0,5	0,1	5
Cr	0,6	3,87	1,61	9	0,5	1,43	1,1	6	0,6	7,72	3,55	6	0,6	10,3	1,1	5
Mn	5	120	20	9	2	166	25,5	6	39	643	118,5	6	19	1107	26	5
Fe	73	443	181	9	59	244	168	6	41	207	109,5	6	77	534	112	5
Co	0,2	2,41	0,44	9	0,2	1,04	0,56	6	0,3	210	2,84	6	0,3	8,61	0,64	5
Pb	1	6,8	1,5	9	1	2	1,4	6	1	4,1	1,9	6	1	2,8	1,5	5
As	0,1	1,83	0,51	9	0,2	4,39	1,57	6	0,2	1,75	0,7	6	0,3	0,81	0,61	5
Zn	4	239	9	9	7	30	20	6	9	77	30,5	6	4	40	10	5
Ni	1,2	4,3	2	9	1,7	4,1	3	6	1,8	890	8,45	6	1,1	13,8	1,6	5

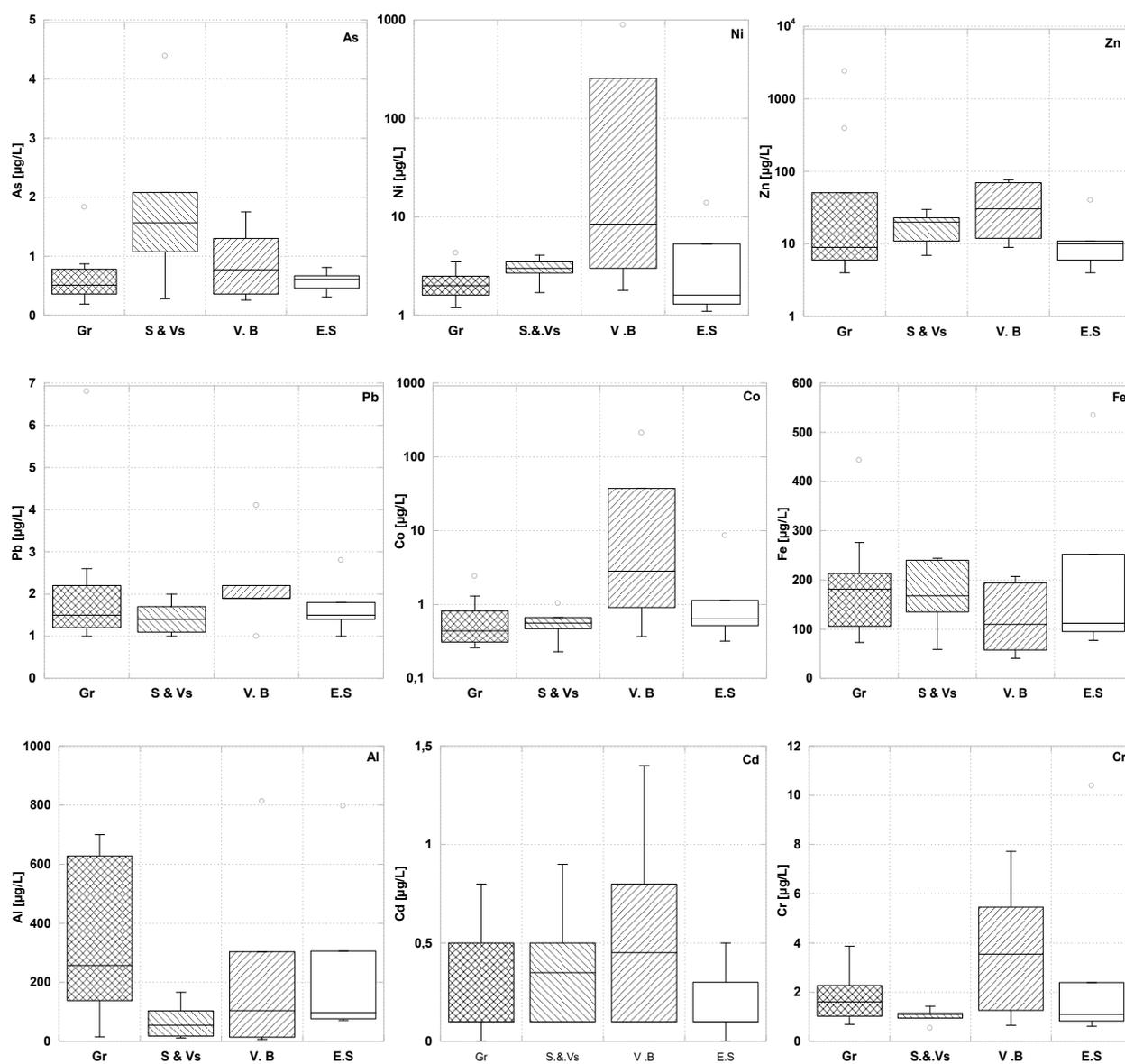


Figure 81. Boxplot des éléments traces des différents réservoirs échantillonnés (Gr. = Granites ; S & Vs. = Schistes et Volcano-sédiments ; V. B. = Volcaniques basiques ; E.S. = Eaux de surface)

Tableau 22. Composition chimique des eaux en éléments traces [$\mu\text{g. L}^{-1}$] et la déviation standard en % par rapport à la répétabilité des mesures

Id	Type	Cr	DSR%	Mn	DSR%	Ni	DSR%	As	DSR%	Cd	DSR%	Pb	DSR	Fe	DSR%	Co	DSR%	Al	DSR%	Zn	DSR%
SrP	Gr	1,03	4,7	16	0,9	1,6	2,5	0,51	6,8	0,1	4,0	1,1	1,2	181	0,7	0,26	3,1	351	1,4	9	1,9
BemP	Gr	0,91	3,2	55	0,7	4,3	0,9	0,36	6,2	0,1	4,6	1,5	1,1	213	0,6	0,44	0,9	88	0,8	51	0,3
KhkF	Gr	0,69	2,7	5	0,6	1,2	2,5	0,26	8,5	0,0	6,9	1,3	1,6	84	0,4	0,34	1,8	165	2,0	4	2,6
KhkP	Gr	1,61	2,2	66	1,0	2,5	1,2	0,48	6,4	0,7	5,7	6,8	0,8	443	0,9	0,82	2,2	138	1,1	2393	0,9
TinP4	Gr	2,67	11,0	120	10,0	3,5	11,0	1,83	11,2	0,1	10,3	2,6	10,6	276	0,7	2,41	10,5	628	10,2	17	10,0
PonP	Gr	1,10	6,4	9	6,4	1,6	6,2	0,19	10,1	0,1	8,6	1,0	6,0	211	0,4	0,30	7,8	645	6,2	4	7,1
TinP2	Gr	1,79	3,2	20	0,8	2,0	2,4	0,78	6,1	0,1	43,7	1,2	3,1	119	0,4	0,52	7,2	257	0,6	6	2,1
TinP1	Gr	3,87	14,6	36	12,3	2,0	17,5	0,87	25,1	0,5	36,9	2,2	16,5	106	0,9	1,31	19,2	700	12,2	6	14,0
TinF1	Gr	2,28	2,5	11	0,4	1,7	1,9	0,65	3,5	0,8	1,2	2,0	1,3	73	0,3	0,31	5,1	16	0,8	393	0,6
KosP	S & Vs	1,10	1,4	18	0,3	3,1	1,0	0,28	4,7	0,1	7,8	1,3	1,0	135	2,0	0,49	0,9	166	0,4	7	2,4
KanF	S & Vs	0,54	7,7	128	0,6	1,7	1,7	2,08	2,8	0,2	19,9	1,1	3,4	244	0,4	0,47	6,0	12	1,2	30	0,8
MouF	S & Vs	0,95	1,9	2	0,3	2,9	0,7	1,08	1,0	0,1	13,0	1,0	1,6	59	1,1	0,23	5,4	104	0,5	23	0,2
SamP	S & Vs	1,15	8,1	18	3,3	2,7	4,8	1,31	6,3	0,5	10,6	2,0	4,8	240	0,7	0,63	10,4	30	3,5	19	3,1
MouP	S & Vs	1,10	7,5	33	5,6	4,1	6,1	4,39	6,6	0,5	6,5	1,5	4,4	143	0,6	0,67	5,0	80	5,9	11	6,2
BanF	S & Vs	1,43	12,5	166	32,3	3,5	22,5	1,83	23,7	0,9	14,4	1,7	19,1	193	17,9	1,04	12,0	18	12,3	21	81,5
SbP4	V B	1,26	1,7	140	0,8	255,9	0,6	0,26	5,3	0,1	7,0	1,9	1,7	41	0,5	37,52	1,2	114	0,4	70	0,8
MakF	V B	0,65	6,0	148	1,6	1,8	1,0	1,30	2,2	0,1	2,4	1,0	1,8	194	0,7	0,37	2,8	14	1,7	29	1,9
SbP	V B	5,46	12,9	46	14,8	3,0	11,9	0,36	21,9	0,3	32,6	1,9	10,4	159	0,9	0,95	8,3	303	14,7	12	15,5
SbP2	V B	7,72	2,0	97	1,2	13,4	0,9	0,52	9,2	0,6	5,7	2,2	1,6	60	0,3	4,73	1,5	95	0,7	32	0,9
SbP3	V B	5,32	1,6	643	0,4	890,2	0,3	1,75	3,5	1,4	5,8	4,1	1,2	207	1,2	210,19	0,4	813	0,3	77	0,8
TomF	V B	1,78	0,8	39	1,8	3,5	3,8	1,03	3,8	0,8	5,1	1,9	2,7	58	2,1	0,91	6,7	7	1,1	9	1,0
GamA	E S	0,61	4,1	23	1,3	1,6	1,2	0,31	7,0	0,0	11,9	1,0	1,3	95	0,2	0,32	1,4	77	1,2	10	1,3
SbR	E S	10,38	1,8	1107	2,2	13,8	2,5	0,67	4,1	0,1	6,8	2,8	2,5	534	0,8	8,61	2,3	797	2,4	40	2,4
GamV	E S	2,39	14,3	50	14,8	5,3	14,9	0,81	16,1	0,1	31,6	1,8	15,2	252	1,1	1,14	15,9	306	14,2	11	14,8
GamS	E S	0,83	25,7	26	20,3	1,1	24,3	0,46	33,1	0,3	29,6	1,4	23,5	112	1,3	0,52	28,2	71	20,3	4	25,8
GamM	E S	1,10	3,5	19	0,4	1,3	2,3	0,61	5,5	0,5	4,4	1,5	2,3	77	0,6	0,64	3,1	98	0,5	6	5,0

Gr. = Granites ; S & Vs. = Schistes et Volcano-sédiments ; V B. = Volcaniques basiques ; E S. = Eaux de surface

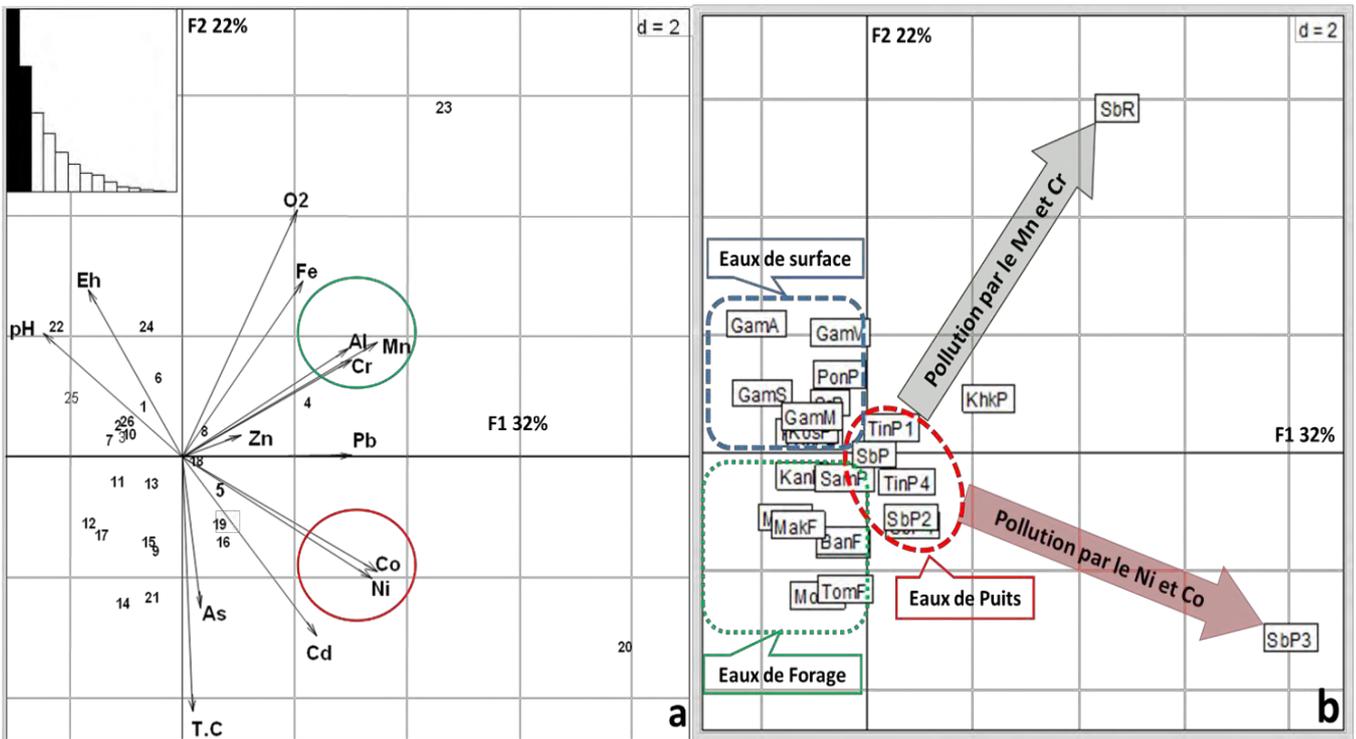


Figure 82 a-b. Analyse des composantes principales (ACP) des éléments traces (Ni, Cr, Al, Mn, Co, Cd, Fe, Zn, Pb) des eaux issues des différents réservoirs (les numéros représentent les ouvrages échantillonnés : se référer au tableau 3).

L'analyse par les composantes principales (Fig. 82 a-b) montre que l'axe F1 contribue pour 32% de la variance totale des données et contrôle essentiellement la minéralisation. Les éléments qui contribuent significativement à cet axe sont : le Ni, Co, Mn, Cr, et Al. Par contre, l'axe factoriel F2 qui représente 22% de la variance, c'est le Fe et le Cd qui contribuent significativement et montre que Mn et Cr sont bien corrélés ce qui peut suggérer une origine commune de ces deux éléments. Une grande partie du Cr d'origine naturelle provient de la chromite ($FeCr_2O_{4(s)}$) (INERIS, 2006) relativement insoluble. Les teneurs en Cr et Mn au niveau de la rivière Sabodala montrent un état de pollution à ce niveau (Fig. 82 a-b). L'enrichissement des eaux en Mn et surtout la forme soluble du Cr peut provenir de sédiments des lacs évaporés ou d'autres environnements évaporés comme éléments traces dans les autres sels solubles. (Plumlee et al, 2003). A l'opposé, le Ni et Co sont bien corrélés ceci révèle l'existence d'une autre source de pollution au niveau de Sabodala. Le Ni et le Co sont deux éléments souvent en association dans la nature. Leur présence est surtout notée au niveau des roches ultramafiques, des schistes noirs, mais également au niveau des gisements de nickel ou d'argent (Plumlee. et al, 2003). Les teneurs très élevées de Ni observées à Sabodala pourraient provenir des déchets miniers (stériles) dont le lessivage peut contaminer les eaux de puits au niveau de ce village. Ceci se confirme par une baisse des pH au niveau des eaux de puits du village de Sabodala où les plus faibles valeurs de pH sont observées avec des valeurs respectives de pH de 5,3, 5,8 et 5,5 au

niveau de Sabodala P3, Sabodala P2 et Sabodala P4. Enfin au niveau de l'axe F3 c'est le Zn et le Pb qui contribuent significativement à cet axe et compte 14% de la variance totale des données. L'unique échantillon qui est dans ce groupe est rencontré au niveau du granite de Saraya, il est caractérisé par des teneurs en Zn et Pb relativement importantes. Cette concentration importante en Zn et Pb s'accompagne à ce niveau d'une concentration en SO_4^{2-} des eaux ce qui pourrait être liée à la présence de sulfate de Zn ($ZnSO_4$) et de Pb ($PbSO_4$) sur le granite.

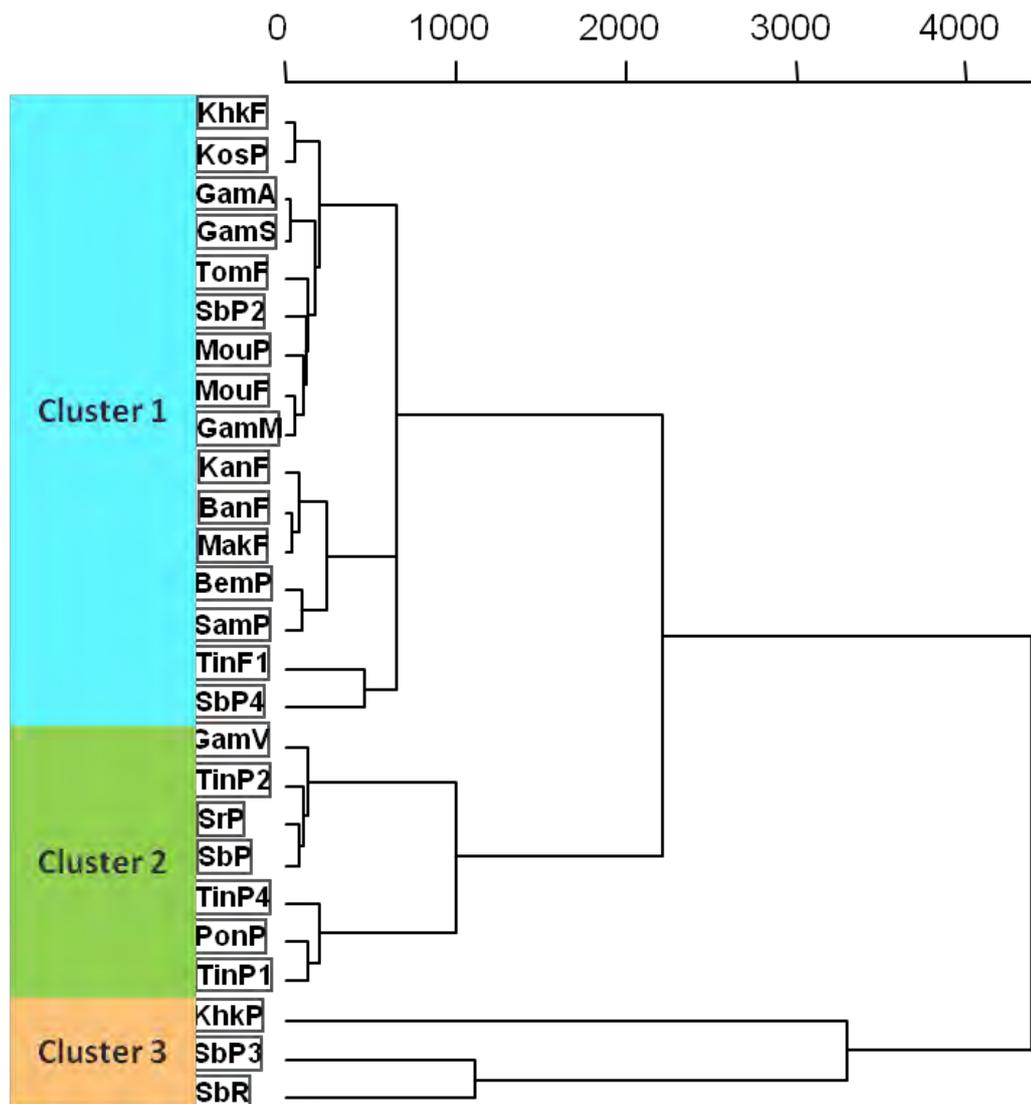


Figure 83. CAH des différents groupes d'eau issus des différents réservoirs tenant compte de leur composition en éléments traces (Ni, Cr, Al, Mn, Co, Cd, Fe, Zn, Pb)

La distribution en cluster (Fig.56) permet d'identifier trois groupes:

- le cluster 1 qui regroupe les eaux présentant des teneurs en ETM très faibles en dessous des seuils de concentrations admissibles pour l'eau de boisson. Ce cluster regroupe tous les forages, les eaux de surface sauf Sabodala rivière, le point aval à Bantako et les puits qui sont non pollués, localisés essentiellement au niveau des zones non orpaillées ;
- le cluster 2 regroupe les eaux issues des zones d'orpaillage excepté le point Saraya, il est caractérisé par des eaux plus enrichies en ETM notamment l'aluminium. Cet enrichissement

relativement important en Al des eaux des zones d'orpaillages est lié au lessivage et au lavage du minerai d'or qui contribuent significativement à libérer l'Al, élément majeur de ces roches en solution, tendant ainsi à enrichir les eaux en cet élément ;

Enfin le cluster 3 regroupe les eaux qui présentent un caractère pollué lié à de fortes teneurs en Ni au niveau Sabodala P3, des teneurs très élevées en Mn au niveau de la rivière Sabodala et le puits de Khodonkhou qui présente des teneurs relativement élevées en Zinc ($2393 \mu\text{g.L}^{-1}$) et Pb ($6,8 \mu\text{g.L}^{-1}$).

VI.6. Conclusion

L'étude hydrochimique des différents réservoirs du Sénégal oriental à travers outils géochimiques classiques (diagrammes binaires, de stabilités, de Gibbs et les indices de saturation) donnent une idée claire de l'origine de la minéralisation des eaux du Sénégal oriental qui se fait essentiellement par hydrolyse des silicates. Les diagrammes de Gibbs montrent que l'interaction eau roche constitue le processus majeur qui gouverne la minéralisation des eaux ce qui est confirmé par les indices de saturation qui montrent que les eaux sont toutes sursaturées en quartz et en silice et très sous saturées vis-à-vis des minéraux du sédimentaire. Cependant, à travers les diagrammes binaires d'autres processus non moins importants tels que les échanges de bases et les dissolutions des minéraux carbonatés ont été identifiés. Ces réactions peuvent contribuer également la minéralisation des eaux et leurs effets est d'autant plus accentués sur les formations volcano-sédimentaires et schisteuses. L'origine anthropique des nitrates a été également mise en évidence à travers les diagrammes binaires. Cette discrimination de la chimie en fonction des réservoirs est bien nette à travers les résultats des études statistiques qui intègrent à la fois, les éléments majeurs, les ETM ainsi que les paramètres physico-chimiques. L'analyse statistique multivariée basée sur l'ACP a montré deux sources principales de la minéralisation des eaux du point de vue éléments majeurs. Une première source naturelle caractérisée par des eaux à faciès $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg-Na}$ dominant caractéristique des eaux de forages et des eaux de surface non polluées et une deuxième source d'origine anthropique caractérisée par des eaux polluées par les nitrates observées essentiellement au niveau des puits villageois captant la nappe d'altérite et certains forages localisés dans la partie nord. Les eaux issues des granites sont moins minéralisées et sont plus enrichies en alcalin (Na+K) alors que les eaux des réservoirs schistes et volcano-sédiments comme celles des roches volcaniques basiques sont plus minéralisées et sont caractérisées par des teneurs en alcalino-terreux (Ca+Mg) plus élevées. Concernant les ETM, l'analyse géostatistique a montré 3 groupes d'eau : les eaux présentant des concentrations en ETM très

faibles, proches du fond géochimique naturel rencontrées au niveau des forages et eaux de surface; les eaux présentant des valeurs en ETM relativement importantes et caractérisées par des teneurs élevées en Al rencontrées dans les zones d'orpaillage et enfin les eaux polluées par le Ni, le Cr, le Co, et le Mn observées uniquement au niveau du village de Sabodala. Ces résultats ont montré qu'au Sénégal oriental les eaux de puits très vulnérables sont souvent affectées par la pollution et ceci du fait de l'activité anthropique observée au niveau des zones d'orpaillage (Tinkoto, Sabodala et Bantako) où les eaux les plus enrichies en ETM sont observées. L'étude a montré que plusieurs facteurs notamment, le pH, le Eh, et la saison peuvent avoir une grande influence dans la mobilité des éléments traces. Ces résultats indiquent qu'au Sénégal oriental, les nappes supérieures d'altérite sont très exposées à la pollution. La consommation de ces eaux de puits contaminés pourrait à long terme, provoquer des problèmes de santé aux populations qui sont exposées à ces teneurs relativement élevées en ETM notamment au niveau du village de Sabodala où des investigations plus poussées mériteraient d'être menées. Globalement, ces outils bien que très différents nous ont permis de bien comprendre les différents processus impliqués dans la minéralisation des eaux du Sénégal oriental à travers les différents réservoirs.

CHAPITRE VII : POLLUTION DES EAUX DU SENEGAL ORIENTAL PAR LES ACTIVITES D'ORPAILLAGE

VII.1. Introduction

Le développement de l'activité minière extractive de l'or au Sénégal oriental a occasionné un rapide développement du secteur de l'orpaillage qui du reste était pratiqué à un rythme très faible. Il constitue aujourd'hui la principale activité génératrice de revenus au Sénégal oriental avec une implication de toutes les couches sociales. Cette activité qui se faisait par battait au niveau des marigots connaît aujourd'hui, un grand déclic du fait de l'introduction de nouvelles techniques de traitement pratiquées par les orpailleurs venant des pays limitrophes. L'exploitation de l'or filonienne et alluvionnaire et l'application de ces nouvelles techniques de traitement ont induit l'usage de produit tel que le mercure dans le traitement du minerai. Ce qui a considérablement transformé les techniques et pratiques de l'orpaillage au Sénégal oriental. L'usage incontrôlé du mercure au niveau de tous les villages d'orpaillage constitue une grande préoccupation des autorités étatiques et reste une très grande menace sur les écosystèmes et les ressources naturelles. Selon [UNEP \(2013\)](#), l'utilisation du mercure dans le monde continuera à baisser à l'exception de son usage dans le secteur de l'orpaillage traditionnel, dans la fabrication de lampe à basse consommation et dans la production du plastique. L'orpaillage est reconnu comme un défi majeur non seulement du fait des questions liées au mercure, mais également la large gamme de problèmes environnementaux et sanitaires liés à cette activité y compris son rôle dans le développement socio-économique. L'activité minière constitue un des secteurs qui contribue plus à la pollution notamment en éléments traces. Des études à travers le monde ont montré que les fortes concentrations en éléments traces peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine ([Wu et al, 1989](#) ; [Smedley et al, 2001](#) ; [Kendal et Smith, 2002](#) ; [Smedley, 2003](#) ; [Seiler, 2004](#) ; [Selinus et al 2005](#) ; [Wasserman et al 2006](#) ; [Meliker et al, 2007](#) ; [Walker et al, 2008](#)). Certains éléments traces tels que l'arsenic, le cadmium, le chrome, le plomb et le gaz radon sont connus pour leur toxicité établie ([Selinus et al, 2005](#)). D'autres éléments traces dans les eaux des zones orpaillées peuvent différer de ceux rencontrés dans les zones non orpaillées. Du fait de l'apport anthropique de certains de ces éléments dans le milieu par usages de produits chimiques tels que le mercure et les détergents dans le traitement du minerai.

Selon [INERIS \(2006\)](#) dans la Décision 2455/2001/CE du conseil européen modifiant la Directive européenne sur l'eau 2000/60/CE, trois métaux (Cd, Pb, Hg) ont été identifiés comme des "substances dangereuses prioritaires". Ces substances sont soumises à un objectif de rejet

zéro dans les eaux souterraines. Par ailleurs, une proposition de la Directive Européenne du 19/09/2003 sur la protection des eaux souterraines a fixé une liste minimale de substances pour lesquelles les états membres sont tenus de fixer des valeurs seuils. Cette liste contient l'As en plus des trois substances métalliques « dangereuses prioritaires » (Cd, Pb, Hg). De plus, une liste de 9 éléments traces présentant un risque pour la santé humaine (teneurs moyennes dans les sols inférieures à 1 g/kg) a été proposée dans le rapport 42 de l'Académie des Sciences (1998). Ces éléments sont Cd, Pb, Hg, As, Ni, Cr, Cu, Zn, et Se. Cet objectif de rejet zéro de ces éléments hautement toxiques dans les eaux souterraines, nous a conduit à mener des investigations sur l'état de contamination des ressources en eau du Sénégal oriental par le mercure et l'arsenic dans les communautés d'orpillage où, l'activité d'orpillage est pratiquée depuis des décennies et sur une très grande diversité de sites répartis sur la majeure partie des terrains du Birimien.

VII.2. Les gisements d'or du Sénégal Oriental.

Une cartographie géologique récente ([Morisseau et al, 2010](#)) subdivise les gisements d'or du Sénégal oriental en trois classes : les gisements primaires, les gisements éluvionnaires et les gisements alluvionnaires.

VII.2.1. Les gisements primaires

Dans ces sites, la minéralisation est exploitée principalement dans les filons de quartz aurifères parfois associés à des zones de cisaillement (shear zones), ou beaucoup plus rarement dans des zones de cisaillement sans filons de quartz. Les teneurs varient considérablement d'un site à l'autre. Dans les filons de quartz, l'or est parfois visible et très souvent associé à de la limonite très probablement issue de l'altération supergène de la pyrite. La pyrite peut être localement abondante, comme observée sur le site de Fadougou Niafa situé sur la Falémé près du point triple Sénégal-Guinée-Mali. Globalement, les filons de quartz orientés N40° semblent plus propices à une minéralisation en or.



Photo 10. Site d'exploitation de gisement d'or primaire à Sounkounkoun et à Kérékounda (photo Mall)

VII.2.2. Les gisements éluvionnaires

Les sites en gisements éluviaux sont localisés sur des zones où, les concentrations d'or proviennent du démantèlement supergène des filons de quartz aurifères ou du substratum minéralisé. L'or est généralement concentré dans un horizon d'épaisseur centimétrique à pluridécimétrique situé juste au-dessus de la roche mère. L'or est présent sous la forme de paillettes et de pépites. Ces sites sont très largement exploités au Sénégal oriental et les teneurs en or peuvent y être localement élevées. Quelques sites d'orpaillage éluvial ont été observés dans la latérite, comme à Sabodala (dioura Soutouba) et à Daloto (dioura Souroukoto).



Photo 11. Site d'exploitation d'or éluvionnaire sur la route de Douta (Photo Moritz 2011)

VII.2.3. Les gisements alluvionnaires

Les sites en gisements alluviaux sont localisés sur les cours d'eau ayant drainé ou drainant des sites aurifères, qu'ils soient primaires ou éluviaux. L'or natif se trouve aussi bien dans le lit actif des cours d'eau que dans les terrasses alluviales. On peut considérer que la plupart des cours d'eau drainant les terrains du domaine Birimien sont potentiellement aurifères. L'or est présent sous la forme de paillettes et de pépites. Parmi les minéraux lourds qui accompagnent l'or, l'ilménite est le minéral le plus fréquent. Ces sites sont très largement exploités au Sénégal oriental et les teneurs en or peuvent y être localement élevées.



Photo 12. Site d'exploitation d'or alluvionnaire à Tinkoto et à Sayansoutou (photo Mall)

VII.3. Généralité sur Mercure et l'Arsenic

VII.3.1. Le Mercure

VII.3.1.1. Généralités – Principales Utilisations – Classification

Le mercure élémentaire est un métal liquide à température ambiante. Il intervient au cours de plusieurs types de procédés industriels (peintures, batteries, industries chimiques, etc....) mais on le retrouve aussi dans les amalgames dentaires ainsi qu'en faible quantité dans les ampoules à économie d'énergie. La principale source dans l'environnement provient du dégazage de l'écorce terrestre. Il existe deux grands types de sels : les sels inorganiques (chlorure mercurique, chlorure mercureux, etc...) et les sels organiques (méthylmercure, etc...). Certains composés du mercure sont classés parmi les substances reprotoxiques et mutagènes pour les deux classifications issues de la directive 67/548/CEE et du CLP (INERIS 2010). Fort de ce

constat que les gouvernements ont convenu à mettre en place la convention de Minamata qui est un texte de réglementation juridiquement contraignant sur l'usage du mercure. Son article 7 et l'annexe C de ladite Convention sont relatifs à l'orpaillage et l'exploitation minière de l'or à petite échelle, elle intègre les aspects qui portent sur le développement de plans nationaux pour l'orpaillage et l'exploitation minière à petite échelle, mais également la mise en œuvre d'une stratégie de santé publique par la collecte de données sanitaire, la formation des travailleurs de la santé et la sensibilisation à travers les établissements de santé.

Aujourd'hui, selon l'UNEP, environ 15 millions de personnes, dont environ 3 millions de femmes et d'enfants s'activent dans l'orpaillage et l'exploitation minière à petite échelle dans 70 pays (UNEP 2013a). Ces pays se trouvent principalement en Asie l'est et du sud-est, en Afrique subsaharienne et en Amérique du sud. Certaines activités de l'ASGM se produisent également en Asie du sud et la communauté des États indépendants (anciennes républiques soviétiques) et d'autres pays européens (UNEP 2012; 2013c). Au Sénégal selon le dernier recensement de l'ANSD, plus de 10.000 personnes sont directement impliquées dans l'orpaillage au Sénégal oriental.

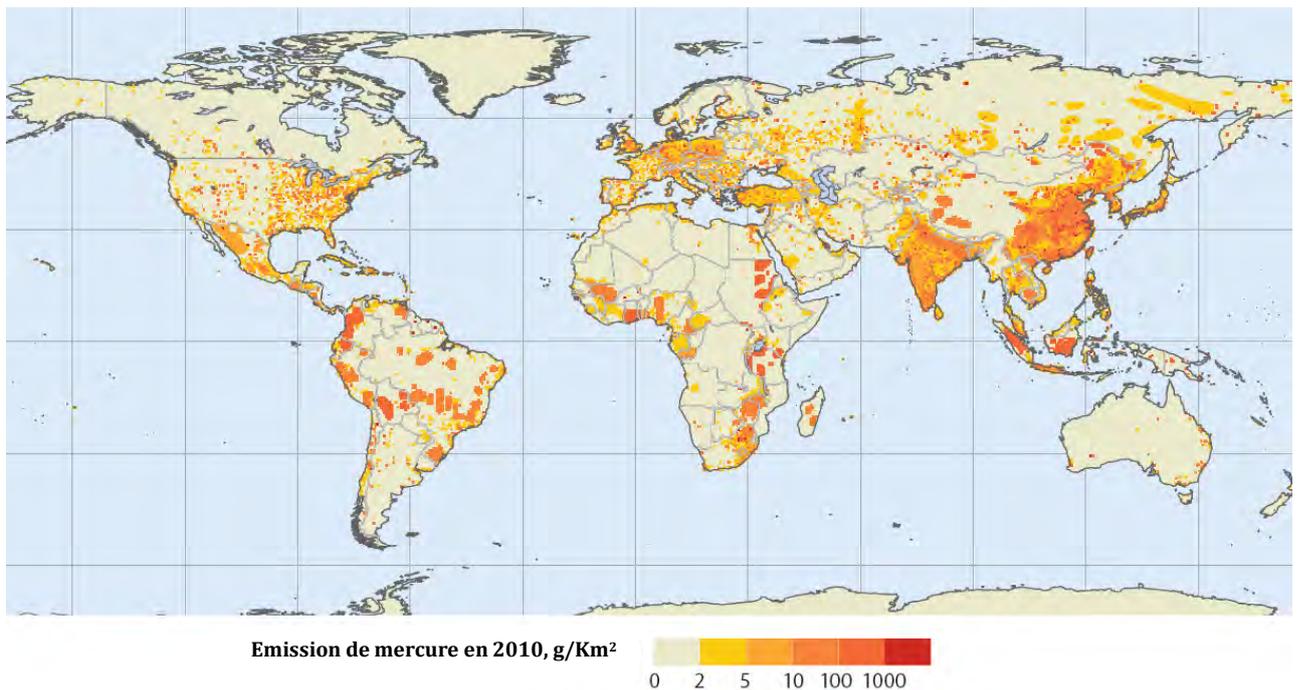


Figure 84. Distribution globale des émissions anthropiques du mercure dans l'air en 2010 (UNEP, 2013).

VII.3.1.2. Toxicocinétique du Mercure

Chez l'homme, comme chez l'animal, le mercure métallique (Hg⁰) est essentiellement absorbé par voie pulmonaire. Le mercure inorganique est très peu absorbé par voie pulmonaire. De manière générale, chez l'homme, le mercure métallique et le mercure inorganique présentent un faible taux d'absorption par voie orale et encore plus faible par voie cutanée. Enfin, les sels

mercuriques (Hg^{2+}) sont plus facilement absorbés que les sels mercurieux (Hg^+). Le mercure organique est absorbé plus facilement par voie orale. Quelle que soit la forme de mercure considérée, il est distribué dans tout l'organisme, mais se retrouve préférentiellement au niveau des reins, du foie et du cerveau. Le métabolisme du mercure a lieu au niveau des poumons, des hématies, du foie et du cerveau. Le mercure de manière générale subit au sein des organes où il se situe un cycle d'oxydoréduction. Dans l'organisme, le mercure élémentaire et le mercure inorganique sont éliminés principalement par les urines et les fèces, et une plus faible quantité par la respiration et par les sécrétions. Cette toxicocinétique des composés organiques du mercure, avec en particulier le méthylmercure, montre que l'absorption de ce sel est plus importante que pour les composés inorganiques. Sa distribution au sein de l'organisme se fait de manière homogène dans tous les tissus, avec toutefois une présence plus élevée au niveau des reins. Les sels organiques de mercure sont transformés en ions mercuriques divalents et sont par conséquent largement excrétés au niveau des fèces. Le mécanisme d'action toxique du mercure est fortement lié à sa capacité à se fixer sur les groupements sulfhydryles et consécutivement à l'induction de nombreux dysfonctionnements cellulaires (INERIS 2010).

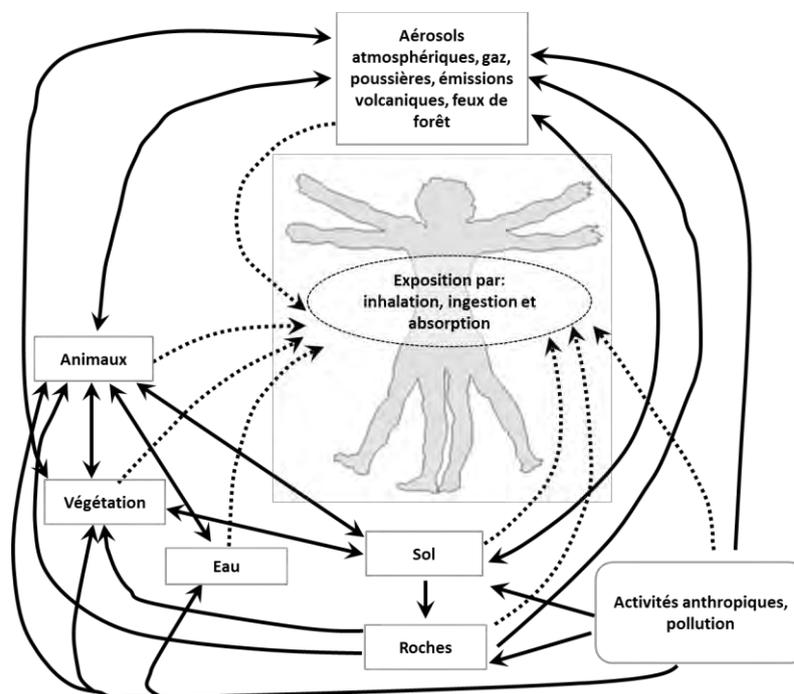


Figure 85. Les voies d'expositions potentielles dans le cycle géochimique terrestre pouvant provenir d'une grande variété de sources naturelles ou anthropiques (Plumlee, 2003).

VII.3.1.3 Toxicité aiguë

Chez l'homme, l'exposition unique à de fortes concentrations en mercure élémentaire peut provoquer des céphalées, des convulsions, un électroencéphalogramme anormal et des

troubles respiratoires, pouvant conduire à la mort par asphyxie. L'intoxication aiguë par les sels de mercures inorganiques se traduit surtout par un choc hémodynamique, ainsi que par des insuffisances cardiaques et rénales, des dommages gastro-intestinaux pouvant aller jusqu'à la mort ainsi que des effets respiratoires (œdème pulmonaire). Le mercure sous forme de sels organiques peut également provoquer la mort (INERIS 2010).

VII.3.1.4. Toxicité chronique

- Effets systémiques

Chez l'homme, les deux principaux organes cibles du mercure élémentaire et du mercure inorganique sont le système nerveux central et le rein. Ainsi, les principaux symptômes d'hydrargyrisme chronique (intoxication par le mercure) sont d'ordre neurologique comme des troubles de la psychomotricité, des troubles cognitifs et des modifications de la personnalité (comme de l'irritabilité, de l'anxiété). Le mercure atteint également les reins (lésions glomérulaires et tubulaires) et induit une protéinurie. Enfin, il est également observé des troubles cardiovasculaires (tachycardie, hypertension artérielle), respiratoires, hépatiques et immunologiques. Le mercure organique atteint essentiellement le cerveau, avec des paresthésies, un malaise général, des modifications et des troubles sensoriels. Le méthylmercure induit la maladie de Minamata avec l'apparition de troubles neurologiques sévères. Le mercure organique provoque également des atteintes rénales. Les mêmes observations sont faites chez l'animal, et les organes cibles sont les mêmes (INERIS 2010).

VII.3.1.5. L'utilisation du mercure dans l'ASGM

Le mercure est utilisé dans les mines d'or pour extraire l'or du minerai par la formation de "l'amalgame" – qui est un mélange de composés à quantité à peu près égale de mercure et d'or (UNEP. 2012 ; UNEP. 2013b). L'amalgame qui est brûlé entraîne l'évaporation du mercure dans le mélange et l'or pur est récupéré (UNEP. 2013b). Cette technique d'extraction d'or est utilisée dans la communauté d'orpaillage et d'exploitation minière à petite échelle, car étant moins coûteux que la plupart des autres méthodes, c'est un procédé rapide, simple et accessible à l'échelle individuelle (UNEP. 2012). Au niveau mondial, l'orpaillage et l'exploitation minière petite échelle est la cause d'environ 37% des émissions de mercure, ils constituent la plus grande source de pollution de l'air et de l'eau par le mercure (UNEP. 2013d).

Une fois libéré ou émis, le mercure persiste dans l'environnement où il circule entre air, eaux, sédiments, sols et les êtres vivants (Fig.85). Il peut voyager à des distances éloignées de sa zone de production ou d'usage. Une forte exposition au mercure constitue un risque sérieux pour

l'humanité tout entière à travers la chaîne alimentaire (UNEP, 2013). Les vapeurs de mercure dans l'air autour des sites de combustion de l'amalgame peuvent être extrêmement élevées et sont presque toujours au-delà la limite fixée par l'OMS pour l'exposition publique ($1,0 \mu\text{g} / \text{m}^3$). Ces expositions ne concernent pas seulement les orpailleurs, mais aussi ceux vivants dans les communautés environnantes des zones de traitement (UNEP, 2012). Ainsi, le mercure vapeur peut retomber sous l'effet des précipitations et atteindre le sol, les sédiments des lacs, des rivières, des baies et océans et est transformé par les organismes anaérobies en méthylmercure (Fig.86).

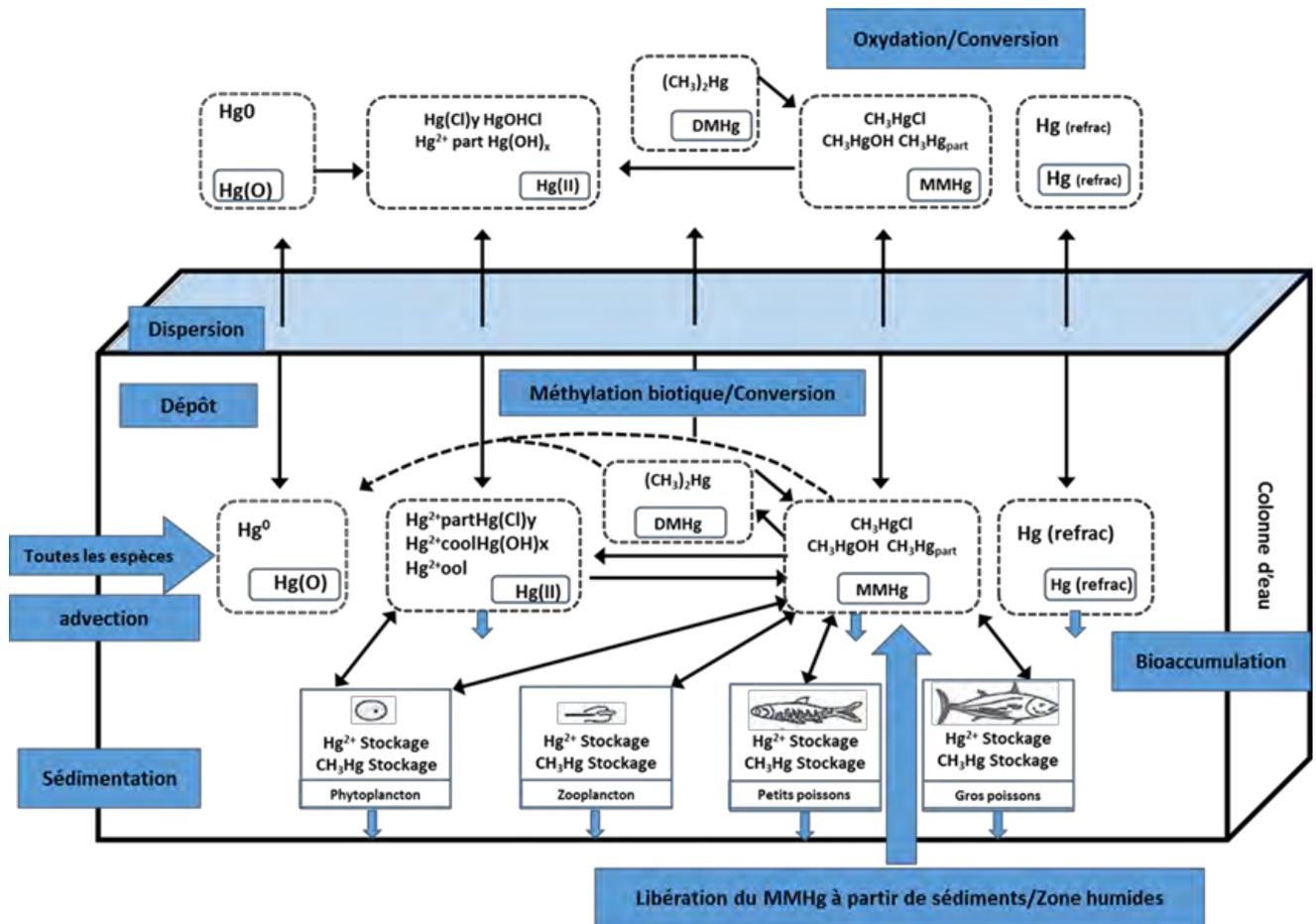


Figure 86. Vue généralisée de la biogéochimie du mercure dans les environnements aquatiques. Les processus dominants sont étiquetés (Hudson et al., 1994)

Dans les plans d'eau, le méthylmercure est absorbé par le phytoplancton, ingéré par le zooplancton et les poissons contaminant ainsi la chaîne alimentaire. Il s'accumule surtout chez les espèces prédatrices à longue durée de vie, telles que: les requins et espadons (UNEP 2012 ; WHO 2007 ; 2008).

VII.3.1.6. L'exposition au mercure dans l'orpaillage

Une grande partie de la littérature disponible concernant l'exposition au mercure au sein des communautés d'orpailleur, examine les niveaux de mercure dans les cheveux. Concentrations dans les cheveux en corrélation avec l'absorption du méthylmercure alimentaire (WHO, 2008). L'urine et sang constituent également des matrices biologiques où des mesures de mercure peuvent être faites. Les concentrations de mercure dans le sang indiquent une exposition récente ou en cours et peuvent représenter à la fois une exposition au mercure élémentaire et au méthylmercure, là où le mercure urinaire indique une exposition au mercure élémentaire et inorganique (WHO. 2008 ; WHO. 2003). Les personnes résidant dans ou à proximité des communautés d'orpailleur sont généralement exposées à la consommation de poissons contaminés par le méthylmercure ou de la vapeur de mercure produite lors du processus combustion (UNEP 2012).



Photo 13. Enfants exposés à des risques de contamination au mercure (photo gauche à Tinkoto et à droite à Bantako)

La Figure 87 synthétise les différentes étapes du procédé de traitement l'or par les orpailleurs au Sénégal oriental. La première étape du cycle de traitement est la phase d'extraction du minerai qui peut se faire soit au niveau des alluvions sur les berges des cours d'eau ; au niveau des éluvions ou au niveau des puits et galeries creusés (Damans) quand il s'agit de l'or primaire. Ensuite, le minerai est concassé et broyé soit de manière manuelle ou mécanisée par l'intermédiaire de concasseurs et de broyeurs. Il passe d'abord par un broyeur à marteau et un autre dit broyeur finisseur. Le minerai réduit à une granulométrie très fine est lavé sur des placettes couvertes d'une moquette qui récupère le pré-concentré constitué de pépite d'or plus dense qui sédimente sur la moquette (photo 15). Après le lavage la moquette est trempée dans l'eau pour récupérer le pré-concentré avec le mercure. Il s'en suit ainsi, une décantation et

séparation de l'amalgame solide (association mercure or) avec le mercure liquide. Cette étape se fait par filtration à travers un morceau d'étoffe où le mélange est pressé à travers ce morceau pour laisser passer le mercure liquide et l'amalgame est retenu par le tissu. L'or pur est ainsi obtenu par combustion de l'amalgame entre 400 et 450°C. A ces températures tout le mercure s'évapore et se sépare de l'or. Aujourd'hui au Sénégal oriental, l'introduction de ces nouvelles techniques notamment les broyeurs et la mise au point du « Trommel » (photo 15) (une machine servant à faciliter le lavage de l'or) ont considérablement augmenté le rendement de l'activité d'orpaillage en réduisant les temps et coûts de traitement du minerai.



Photo 14. Le lavage du minerai avec le Trommel et sur placette couverte d'une moquette retenant les pépites d'or encerclées en rouge (photo Mall).

Le diagramme ci-dessous (Fig.87) fait la synthèse des différentes étapes du traitement de l'or par les orpailleurs au Sénégal oriental.



Figure 87. Procédés de traitement du minerai dans l'orpaillage et l'exploitation minière à petite échelle (photo Mall)

VII.3.2. L'ARSENIC

L'arsenic est un métalloïde, chalcophile. Dans la partie superficielle de l'écorce terrestre, sa concentration moyenne est évaluée à 2 mg/kg mais localement le fond géochimique peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées (200 mg/kg dans des dépôts calcaires, phosphatés ou dans des schistes). L'arsenic peut exister sous plusieurs formes et à différents degrés d'oxydation dans les eaux et les sols (INERIS, 2006) :

Dans les eaux, l'arsenic peut se présenter avec différents états de valence : +5, +3, 0, -3 ; au niveau du sol, l'arsenic existe principalement sous forme trivalent, arsénite As(III) ou pentavalent, arséniate As(V).

Dans les eaux souterraines, l'arsenic tend à former des oxyanions dans des conditions alcalines à neutres et est très sensible aux variations de potentiels rédox. Pour des potentiels oxydants, à pH alcalins, il est habituel de rencontrer l'As(V) alors que l'As(III) est le degré d'oxydation prédominant pour des potentiels plus réducteurs (Fig.88).

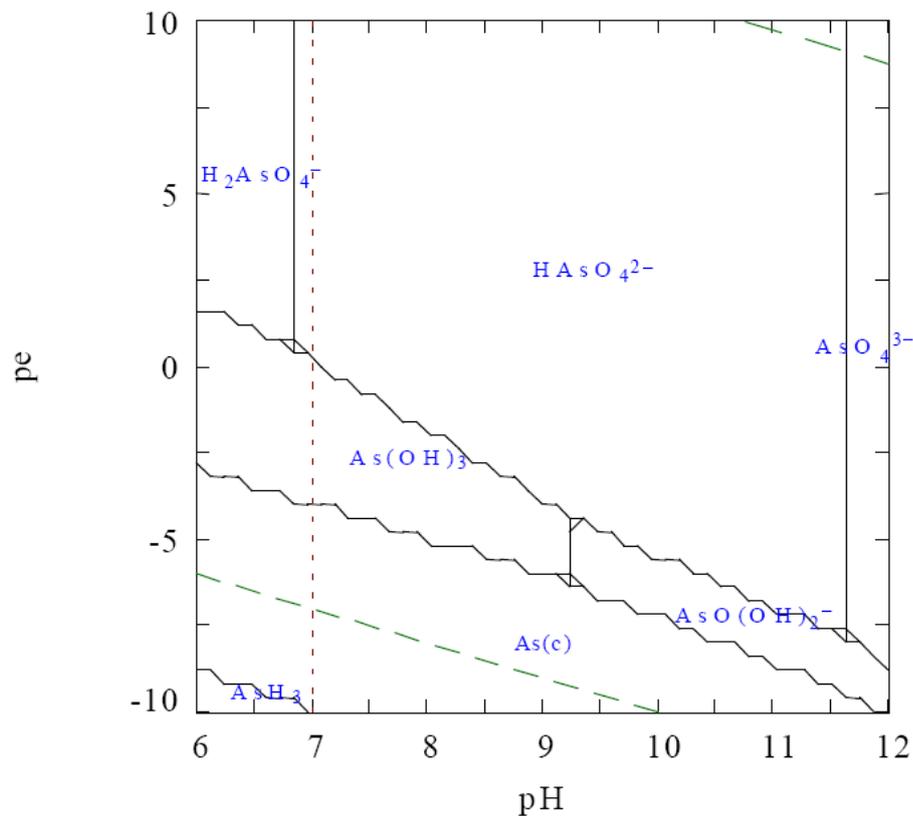


Figure 88. Spéciation des différentes espèces d'arsenic en fonction du pH (INERIS, 2006)

VII.3.2.1. Sources liées aux mines

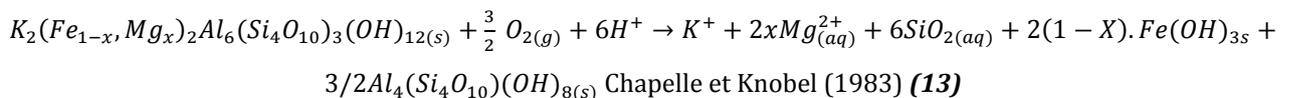
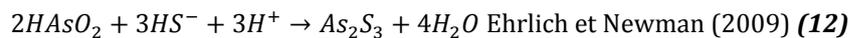
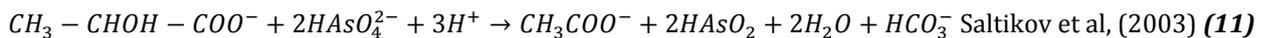
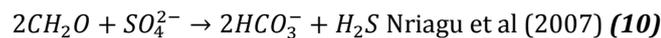
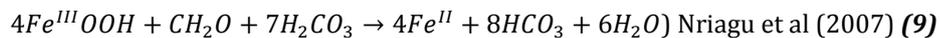
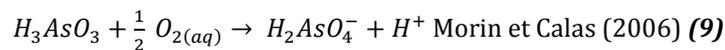
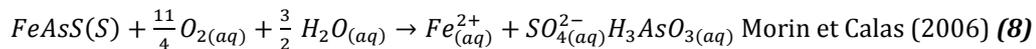
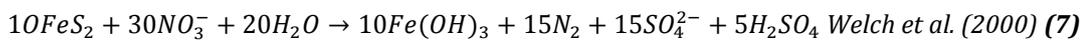
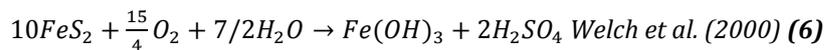
L'exploitation minière contribue très significativement à la libération de l'As dans l'environnement. Le minerai d'or est souvent associé à la pyrite et à l'arsénopyrite. Ces deux minerais sulfureux après excavation et entreposage en contact avec l'oxygène et l'eau peuvent générer le drainage minier acide. Ce dernier participe à la libération de l'As et les métaux dans l'environnement. Ce qui fait que les sites miniers constituent un cas particulier, où les concentrations en éléments traces métalliques restent souvent relativement élevées. L'acidification des eaux qui en résulte favorise le transport à l'état dissous des métaux (INERIS, 2006). Dans le sud-ouest de l'Angleterre, les gisements minéraux et le traitement des minerais d'étain et de cuivre sont des sources reconnues d'As dans les sols et les eaux souterraines (Brunt et al, 2004, Camm et al, 2004; Palumbo-Roe et al, 2007).

VII.3.2.2. Sources naturelles

Les sources géologiques de l'As sont nombreuses, à travers les variétés de matériaux géologiques, des occurrences communes d'As proviennent des sulfures (principalement la pyrite), les hydroxydes de Fe, mais également dans certains silicates et les roches carbonatées. L'abondance de la pyrite et des oxydes de fer constituent les principales sources des concentrations élevées d'arsenic dans les eaux conduisant sa dissémination dans la matrice aquifère ou son accumulation dans les fractures, joints et plans de stratification. (Gross et Low, 2013). Cette contamination liée au fond géochimique est ainsi considérée par définition selon l'académie des sciences (1998) comme "la teneur naturelle ou originelle en éléments traces dans un sol en absence de tout processus d'apport ou d'exportation vers ou hors d'un site considéré". Cette teneur dépend aussi bien de la teneur de la roche originelle constituant le sol (roche dite primaire) que des processus, intervenus lors des périodes géologiques de formation du sol, qui ont pu lessiver ou concentrer l'élément en question (INERIS, 2006). Les principaux processus impliqués dans la libération de l'As dans les eaux souterraines sont : la réduction des hydroxydes de Fe, la réduction de l'As dans les minéraux et comme espèce adsorbée, les sorptions compétitives avec d'autres oxyanions, et l'oxydation des sulfures. La distribution de l'As dans la nature peut être associée à plusieurs facteurs tels que : la géologie, la géochimie des eaux souterraines, l'occupation des sols, les mines, la composition des sols ainsi que les variables climatiques qui intègrent les précipitations, la température et la recharge des eaux souterraines. Les différences dans les formations géologiques avec leur propriété

minéralogique peuvent également affecter les concentrations d'As dans les eaux souterraines ou modifier les potentialités d'adsorption ou de désorption des formations géologiques comme source de libération ou récepteur d'As (Gross et Low, 2013). Les conditions microbiologiques peuvent également affecter directement ou indirectement la concentration de l'arsenic dans les eaux. L'oxygène dissous disponible pourrait augmenter l'activité bactérienne conduisant à réduire le potentiel redox et une libération subséquente d'arséniate par dissolution réductive. Durant la respiration réductive, l'arséniate est réduit en arsénite par les bactéries arséniates réductases (Oremland and Stolz, 2003).

L'As est souvent présent en trace dans les minéraux naturels tels que les sulfures (pyrite, Eq.6-7-8), les oxydes métalliques hydratés (oxydes de fer Eq.9), le charbon, les roches ferrugineuses, les argiles, les phosphates, les silicates (Eq.13) et les carbonates. La pyrite et les oxydes de fer sont d'importantes sources contribuant à augmenter les concentrations de l'As des eaux souterraines du fait de leur abondance dans les aquifères, conduisant ainsi leur dissémination à travers la matrice aquifère ou leur accumulation dans les fractures, les joints et les plans de stratifications (Smedley and Kinniburgh, 2002).



(Julia L. Barringer and Pamela A. Reilly, 2013)

Selon Barringer and Reilly (2013), plusieurs études montrent que ces processus peuvent être atténués par l'activité bactérienne. Aujourd'hui, des études récentes ont montré que l'As peut provenir des sédiments riches en glauconie ce qui indique que toutes les sources géologiques de libération de l'As dans les eaux souterraines ne sont pas encore identifiées.

VII.4. Toxicocinétique

Selon INERIS (2010), l'arsenic inorganique est facilement absorbé par voie orale (> 90 %) et respiratoire (entre 30 et 34 %) ; l'absorption cutanée est négligeable. Une fois absorbé, il est transporté dans le sang et distribué rapidement dans tous les organes (principalement le foie et les reins). L'arsenic a aussi la capacité de traverser la barrière placentaire. La métabolisation de l'arsenic passe par des réactions d'oxydation et de méthylation, jusqu'à obtention de métabolites méthylés (monométhyle MMA et diméthyle DMA), majoritairement éliminés via l'urine. La toxicité de l'arsenic est intimement liée à son processus de métabolisation, avec une toxicité différentielle entre l'As(III) et l'As(V). L'ordre relatif de toxicité déterminé à partir d'études récentes serait le suivant :

MMA(III) et DMA(III) > arsenite¹ (III) > arséniate (V) > MMA(V) et DMA(V)

VII.4.1. Toxicité aiguë de l'Arsenic

Les principaux effets aigus, observés suite à l'ingestion d'arsenic inorganique sont typiquement gastro-intestinaux associant nausées, vomissements, hémorragies gastro-intestinales, douleurs abdominales et diarrhées. Des effets sur le système nerveux et la peau peuvent aussi apparaître dans les jours ou les semaines suivant l'exposition.

VII.4.2. Toxicité chronique de l'Arsenic

- Effets systémiques de l'Arsenic

Par voie orale, les effets de l'absorption chronique de l'arsenic sont divers et variés : avec les affections sur la peau (hyperkératose et hyperpigmentation, maladie de Bowen), sur le système respiratoire (toux, rhinorrhées, laryngites), le cardiovasculaire (arythmies, péricardites, maladie de Raynaud, «Blackfoot disease» gangrène), le système neurologique (neuropathies périphériques), le système gastro-intestinal et le système sanguin (anémie, leucopénie). Il a été découvert récemment, un possible impact sur le développement de certains types de diabète. Les effets sur la peau précédemment cités sont les signes les plus précoces traduisant une intoxication à l'arsenic.

- Effets cancérigènes de l'Arsenic

L'arsenic a été l'un des premiers composés chimiques reconnus comme cancérigène par le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC) (groupe 1), l'US EPA (classe A) et l'union européenne (en Catégorie 1). Les principaux cancers liés à une exposition à l'arsenic sont les

cancers de la peau, de la vessie, des poumons, des reins et du foie. L'arsenic est clastogène in vitro et in vivo. Le mécanisme d'action génotoxique impliqué serait indirect, l'arsenic agissant au niveau de l'apoptose, de la réplication de l'ADN ou des enzymes de réparation, ou en tant qu'analogue du phosphore. Il n'est pas classé par l'Union européenne (INERIS, 2010).

- Effets sur la reproduction et le développement

Ces effets ont été très peu étudiés chez l'homme. Toutefois, durant ces dernières années, il a été mis en évidence que, l'exposition à des doses très faibles d'arsenic peut provoquer des avortements spontanés, des mortalités fœtales et infantiles tardives et de faible poids de naissance. De même, des effets sur le développement intellectuel ont été observés. Chez l'animal, aucun effet sur la reproduction n'est observé; des effets sur le développement sont principalement mis en évidence par inhalation, avec des pertes post implantatoires et une diminution du nombre de fœtus viables. Seul l'arséniate de plomb est classé par l'Union Européenne dans la Catégorie 1 et 3 (INERIS, 2010). Le tableau 24 fait le récapitulatif des différents effets de l'arsenic sur la santé.

Tableau 23. Concentration en métaux et métalloïdes définissant les limites de qualité d'une eau potable (Législation Française, OMS) (INERIS, 2006)

Eléments	Décret n°2001-1220	Recommandation OMS
As	10 µg/l	10 µg/l
Cd	5,0 µg/l	3,0 µg/l
Cr	50 µg/l	50 µg/l (Chrome total)
Cu	2,0 mg/l	2,0 mg/l
Hg	1,0 µg/l	1 µg/l (mercure total)
Ni	20 µg/l	20 µg/l
Pb	10 µg/l	10 µg/l
Se	10 µg/l	10 µg/l
Zn	Non précisée	Non précisée Pas d'effet néfaste sur la santé observés pour les teneurs généralement mesurées dans l'eau destinée à la consommation

Tableau 24. Récapitulatif des différents effets de l'exposition chronique à l'As sur la Santé (Mandal et Suzuki, 2002, et Ng et al., 2003)

Systèmes	Effets sur la santé
Cardiovasculaire	Crise cardiaque, arythmies cardiaques, l'épaississement des vaisseaux sanguins, perte de circulation conduisant à la gangrène des extrémités, l'hypertension
Dermique	Hyperpigmentation, épaississement anormal de la peau, un rétrécissement des petites artères menant à l'engourdissement (maladie de Raynaud), épidermoïde et cancer des cellules basales
Gastro-intestinal	Brûlures d'estomac, des nausées, des douleurs abdominales
Hématologique	L'anémie, faible numération des globules blancs (leucopénie)
Hépatique	La cirrhose, la dégénérescence graisseuse, une croissance cellulaire anormale (néoplasie)
Neurologique	Le cerveau, les hallucinations, la perte de mémoire, des convulsions, un coma, une neuropathie périphérique
Pulmonaire	La toux chronique, maladie pulmonaire restrictive, le cancer
Respiratoire	Laryngite, bronchite trachéale, rhinite, pharyngite, l'essoufflement, la perforation du septum nasal
Rénal	Hématurie, protéinurie, la déshydratation, la nécrose corticale, le cancer des reins et de la vessie
Reproductif	avortements spontanés, mort-nés, malformations congénitales du fœtus, faible poids de naissance

VII.5. Méthodologie

Une campagne d'échantillonnage a été menée sur les villages d'orpaillage les plus actifs du Sénégal oriental : Sambaraboubou, Douta, Sabodala, Tinkoto, Diabougou, Sounkounkoun, Bantako et Tomboronkoto (Fig.88). L'échantillonnage a concerné les eaux des puits, forages et des grands cours d'eau (fleuve ou rivière) au niveau desquels, se pratique une intense activité de traitement du minerai d'or. Les échantillons ont été collectés, filtrés avec des filtres 0,45 µm, puis acidifiés et conservés au frais avant d'être analysés. Les analyses ont été faites par (ICP-MS Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) (la méthode analytique est bien décrite dans le chapitre 5). Au total plus de trente éléments (majeurs et éléments trace métalliques) ont été dosés, mais dans le cadre de cette étude sur la pollution des eaux nous sommes focalisés sur les éléments qui représentent plus de menaces sur la santé publique au niveau de ces communautés d'orpailleurs à savoir le Hg et As. Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés directement sur le terrain (pH, T°C, Conductivité, l'Oxygène dissout, le Eh). Le choix de ces villages était essentiellement guidé par la forte intensité de l'activité d'orpaillage dans ces sites et leur très forte densité de population. Au niveau de chaque village les ouvrages les plus utilisés ont été échantillonnés et leurs coordonnées géographiques relevées par GPS.

VII.6. Résultats et discussion

Le tableau 25 montre la distribution des concentrations de certains éléments dans les sites orpaillés et la figure 89 montre la distribution des classes de teneurs en Hg au niveau dans ces différents sites majeurs d'orpaillage.

VII.6.1. Le Mercure

Tableau 25. Concentration de quelques traces dans les eaux (juin 2014)

Id	Sites	Al µg/L	Li µg/L	Mn µg/L	Ni µg/L	Sr µg/L	As µg/L	Hg µg/L
J1	SAMB Pts1	43	46	203	10	123	23	8
J2	SAMB F	22	48	33	b.d.l.	81	7	3
J3	SAMB Pts2	88	55	50	b.d.l.	172	26	4
J4	Douta Pts	24	23	24	2	66	3	b.d.l.
J5	Souk F	76	13	89	0	356	15	13
J6	Souk Pts	61	9	25	0	179	5	8
J8	Diab F	72	32	1	b.d.l.	599	9	9
J9	Diab Pts1	87	44	1	b.d.l.	498	3	8
J10	Diab Pts 2	93	43	27	0	481	10	7
J11	Diab Falémé	608	1	6	1	56	6	b.d.l.
J12	Sab Pré	41	1	4	b.d.l.	122	5	8
J13	Sab Pts2	14	2	92	10	29	5	7
J14	Sab Pts3	462	17	592	798	381	9	34
J15	Falomb F	27	12	6	1	74	3	3
J16	Tink F	17	12	7	b.d.l.	125	7	7
J17	Tink Pts1	27	2	10	2	60	5	b.d.l.
J18	Tink Pts2	38	5	7	0	181	5	6
J19	Tink Riv	64	1	29	1	108	3	b.d.l.
J20	Tink Pts3	31	11	13	2	120	6	6
J21	Bant Fl	20	0	3	b.d.l.	38	4	3
J22	Bant For	82	13	256	b.d.l.	292	6	19
J23	Tomb Pts	72	21	5	1	486	4	5

b.d.l : inférieur à la limite de détection de l'élément

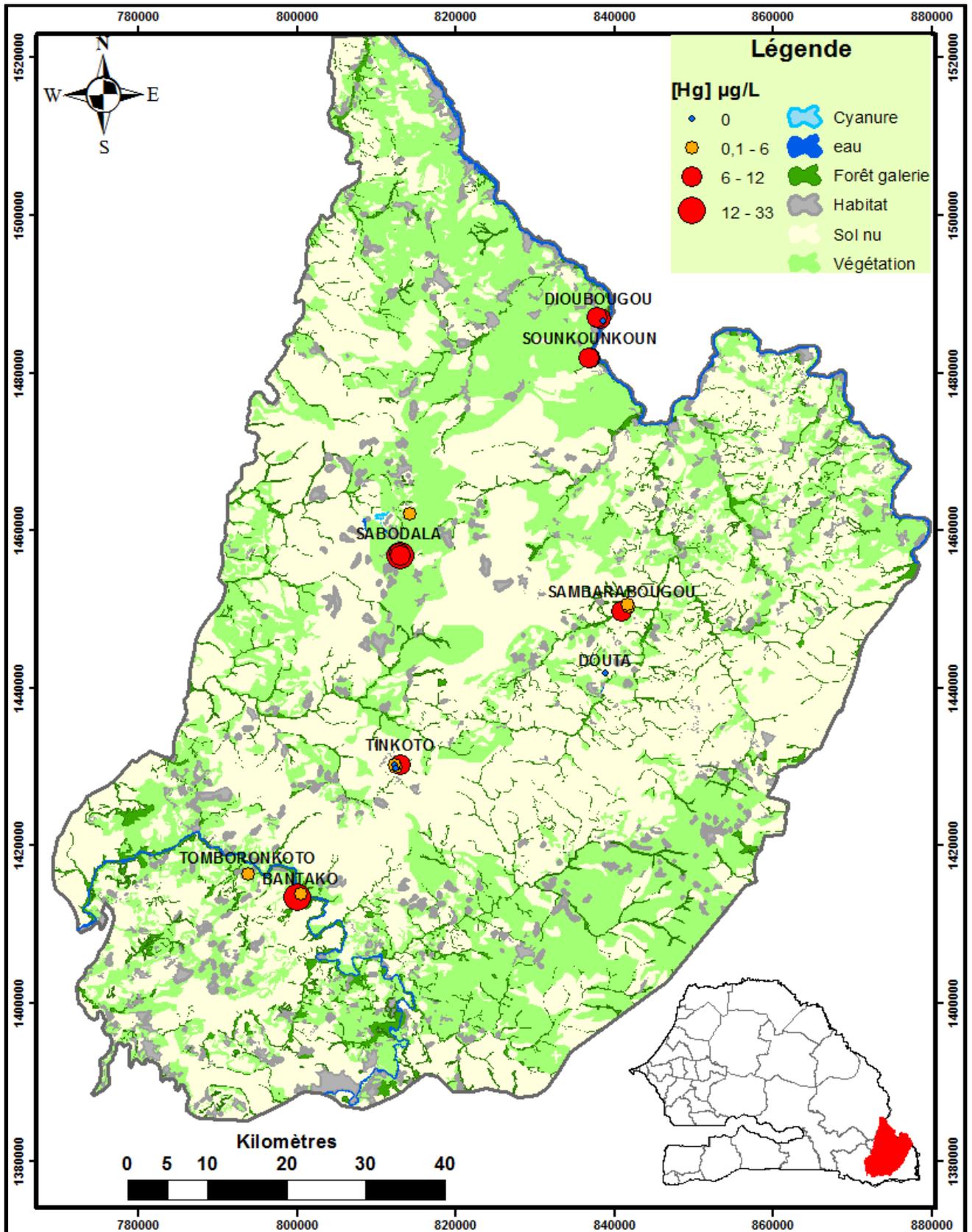


Figure 89 Répartition des teneurs en mercure dans les sites d'orpaillage (Juin 2014)

Tableau 26. Statistiques sur les concentrations [$\mu\text{g. L}^{-1}$] de mercure par village au Sénégal oriental (Juin 2014)

Hg	Min	Max	Moy	Med	Déviat. Std	Nombre	Norme OMS
SAMB	3	8	5	4	2,6	3	1
Soumk	8	13	10,5	10,5	3,5	2	1
Diab	7	9	8	8	1	3	1
Sab	7	34	16,3	8	15,3	3	1
Tink	0	7	4,3	6	3,7	3	1
Bant	19	19	19	19	NA	1	1

Au vu des résultats de la campagne de juin 2014, il en ressort que la présence du mercure est bien réelle dans les eaux souterraines au niveau de tous les villages d'orpaillages (Tableau 26). Les concentrations en Hg dissous observées sont largement supérieures parfois à la norme OMS pour l'eau boisson ($1 \mu\text{g. L}^{-1}$ pour le Hg total) aussi bien dans les forages qu'au niveau des puits villageois. Les analyses ont porté que sur le mercure dissous, les autres formes (DMHg, MMHg) du mercure n'étant pas prises en compte dans cette étude. Ce qui fait que la situation reste très sérieuse en ce qui concerne la consommation de ces eaux très contaminées par le mercure et l'exposition de ces populations notamment, les enfants qui en définitive, restent la frange la plus vulnérable aux effets du mercure, car agissant négativement sur le développement de leur système nerveux (INERIS, 2010). Les plus faibles concentrations en mercure sont observées dans les eaux de forage pour l'essentiel des villages d'orpaillage à l'exception du forage de Bantako où une très forte concentration Hg a été mesurée ($19 \mu\text{g. L}^{-1}$). Ces fortes teneurs en Hg dans les eaux peuvent s'expliquer par le fait que le village de Bantako reste l'un des sites d'orpaillage les plus actifs du Sénégal oriental avec une très grande concentration humaine. Les risques de contamination des eaux sont également liés à la proximité des lieux de traitement aux points d'eau. A Bantako, le forage est le seul ouvrage qu'on a pu échantillonner, aucun puits n'a été signalé dans le village. Ainsi, à part le fleuve Gambie, le forage reste la seule source d'approvisionnement en eau. Une autre cause est que le traitement du minerai par le mercure se fait à même, dans les concessions (voir photo 16) alors que le Dioura (mine) peut être localisé parfois à quelques kilomètres des villages. Ce phénomène constitue l'un des facteurs essentiels de concentration de mercure dans ces sites. Ces fortes concentrations n'épargnent aucune composante de l'environnement favorisant ainsi, la concentration de mercure dans les sols par rejet direct, dans l'air par la combustion de l'amalgame, mais également dans les eaux aussi bien de surface comme souterraines soit par rejet direct où par lessivage des sols contaminés et les

espèces animales comme végétales par bioaccumulation. Le même phénomène s'est observé dans les autres villages tels que Sabodala, Tinkoto, Sambarabougou, Sounkounkoun et Diabougou. Au niveau des résultats d'analyse d'eaux, le village de Sambarabou (Tableau 26) présente les concentrations médianes en Hg les plus faibles ($4 \mu\text{g. L}^{-1}$), ceci s'explique par le fait que ce village constitue un nouveau site d'affluence récemment découvert par les orpailleurs. Les concentrations médianes très élevées en mercure observées au niveau des villages de Tinkoto, Diabougou, Sabodala, Sounkounkoun, Bantako avec respectivement des concentrations médianes de 6, 8, 8, 10,5 et $19 \mu\text{g. L}^{-1}$, s'expliqueraient par une contamination chronique due à l'usage continu du mercure dans le traitement du minerai d'or au niveau de ces villages traditionnels d'orpaillage. Ce traitement se faisant le plus souvent au niveau des points d'eau ou à proximité des puits constitue une grande menace à la contamination de ces nappes de socle fracturé qui restent très vulnérables aux pollutions. Ce cas est observé également à Sabodala au niveau du puits P2 situé dans une concession (photo 16) et au niveau de Tinkoto à côté d'un puits captant la nappe alluviale aux abords du lit de la rivière de Tinkoto (photo 16), à Diabougou P2 et au niveau de Bantako sur le fleuve Gambie (photo 16). Cependant, cet usage du mercure dans ces zones sans mesures de restriction ni contrôle favorise sa dissémination dans les milieux naturels et reste la seule source de contamination des eaux qui constituent le réceptacle naturel de toutes sortes de contamination du fait de sa grande capacité de solvant naturel. Les résultats de [Niane et al \(2014\)](#) confirment l'état de contamination de certaines composantes de l'environnement par le Hg. A travers ses investigations sur les sédiments et les êtres humains, il a pu montrer des teneurs moyennes en Hg largement au-dessus de la norme de concentration Hg dans les sédiments fixée par [MacDonald et al. \(2000\)](#) (1 mg. Kg. L^{-1}) dans les sites orpaillés de Sabodala, Tinkoto, Mako, Bantako 1, et Bantako 2. Selon toujours l'auteur, ces fortes concentrations en THg (mercure total) dans les sites d'orpaillage s'expliquent par l'usage du Hg dans l'amalgamation pour l'extraction de l'or dans le traitement du minerai par les orpailleurs. Toujours dans la zone, une deuxième étude réalisée par [Niane et al \(2014\)](#) sur des poissons et échantillons de cheveux humains montre que les contaminations par le Hg affectent ces derniers. Les résultats obtenus sur la teneur en Hg dans des échantillons de cheveux humains au niveau de Tinkoto et Bantako excèdent largement les normes de l'agence américaine pour la protection environnementale 1mg/Kg ([US EPA, 1997](#)).

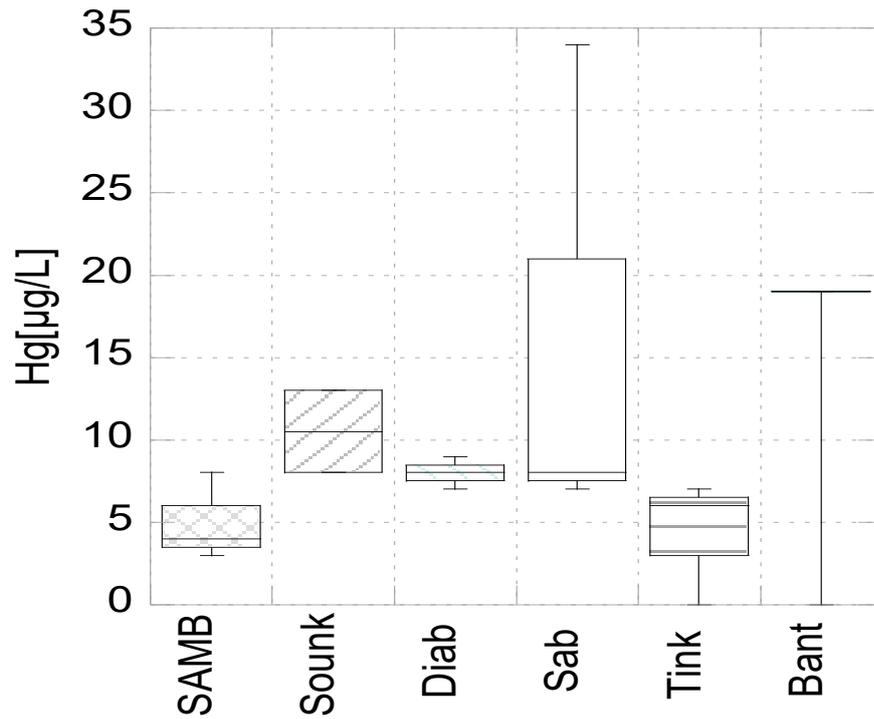


Figure 90. Boxplot indiquant la distribution des concentrations en mercure par village [$\mu\text{g/L}$] (Juin 2014)



Photo 15. Lavage du minerai au niveau de différents points d'eau (photo Mall, 2011)

VII.6.2. L'Arsenic

La répartition des teneurs en As contrairement au mercure, montre globalement des teneurs inférieures à la norme OMS (10 $\mu\text{g. L}^{-1}$) dans les eaux, exceptées au niveau de la partie nord de la zone d'étude ou les niveaux d'As sont relativement important et dépassent parfois les normes guides pour l'eau potable aussi bien dans les forages que dans les puits (Fig.91).

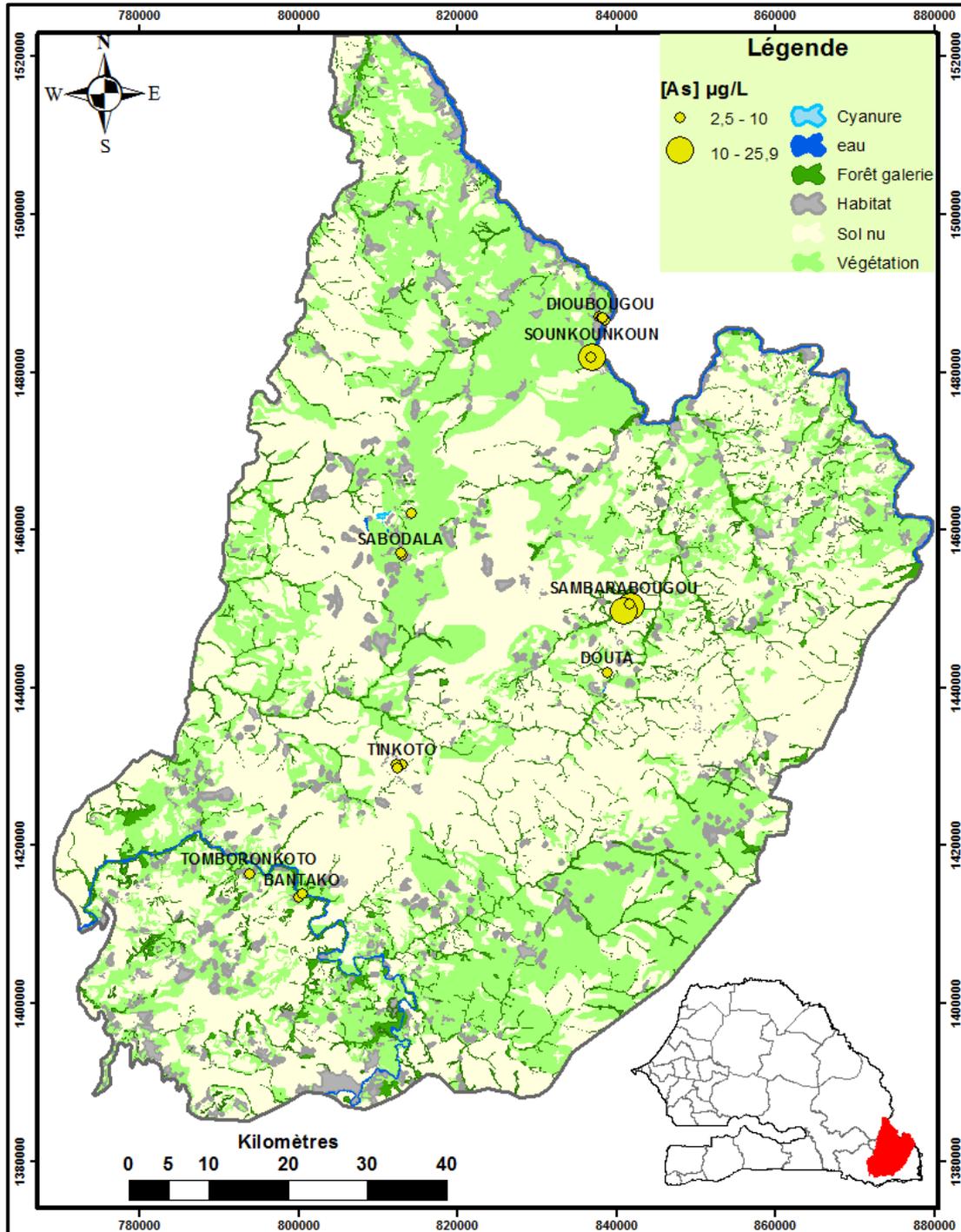


Figure 91. Répartition des teneurs en Arsenic dans les sites d'orpaillage (Juin 2014)

Tableau 27. Statistiques sur les concentrations [$\mu\text{g/L}$] d'Arsenic par village au Sénégal oriental (Juin 2014)

As	Min	Max	Moy	Med	Std Deviation	Nombre	Norme OMS
SAMB	7	26	18,6	23	10,2	3	10
Souk	5	15	10	10	7,07	2	10
Diab	3	10	7,3	9	3,7	3	10
Sab	5	9	6,3	5	2,3	3	10
Tink	5	7	5,6	5	1,15	3	10
Bant	6	6	6	6	-	1	10

L'essentiel des valeurs médianes de concentration d'arsenic observée dans les sites d'orpaillage des terrains birimiens du Sénégal oriental reste inférieur à norme OMS ($10 \mu\text{g. L}^{-1}$). Cependant, il existe une grande disparité dans les concentrations en As mesurées dans les eaux du Sénégal oriental. Les concentrations les plus élevées sont notées au niveau du village de Sambarabougou où deux des trois ouvrages échantillonnés présentent des teneurs en arsenic supérieures aux normes de potabilité pour l'eau de boisson ($10 \mu\text{g. L}^{-1}$), il s'agit : des puits P1 et P2 de Sambarabougou avec des concentrations respectives de 23 et $26 \mu\text{g. L}^{-1}$. Ces résultats montrent une tendance inverse de l'évolution des concentrations de ces deux éléments (Hg et As) par rapport à celle qui a été observée pour le mercure où, les plus faibles concentrations en Hg sont enregistrées à Sambarabougou. Selon [Kaisin et al \(2010\)](#), l'or est également associé à l'As sur la MTZ, les valeurs trouvées atteignent 360 ppb pour l'or et 180 ppm pour l'As. Selon toujours l'auteur, ces teneurs sont structurées suivant les alignements NNE de la MTZ qui correspondent à des faisceaux de dykes de dolérites et de formations basaltiques. Une seconde anomalie est présente sur la partie centrale de la zone elle présente des teneurs en Or plus élevées (jusqu'à 500 ppb) mais une structuration est moins nette, potentiellement affaiblie par un masque de cuirasses latéritiques. Cette seconde zone occupe le flanc Est de la MTZ, dit « Axe de Sambarabougou ». Ce qui confirme que la présence d'arsenic dans les eaux souterraines au niveau de Sambarabougou contrairement au mercure, a une origine géogénique. Le démantèlement et le broyage de la roche minéralisée, enrichie en Arsénopyrite contribueraient par lessivage à la libération d'arsenic dans l'environnement dont la mobilité reste fonction du pH et du Eh qui influenceraient la capacité d'adsorption de l'As au niveau des sols et dans la phase colloïdale ou sa libération dans les eaux. Ainsi, la solubilité et la mobilité de l'As dans les eaux souterraines sont influencées par plusieurs processus qui souvent varient dans la matrice

aquifère. Les processus hydrogéochimiques majeurs influençant la mobilité de l'As comprennent (1) l'oxydation et la réduction des sulfates ou de la matière organique qui peuvent contenir de l'As, (2) la désorption ou la dissolution des hydroxydes ferromagnésiens, la rétention de l'As au niveau des fractures et la surface des grains et (3) les transformations biologiques affectant l'As (Welch et al, 2000).



Photo 17. Activités d'orpaillage au Sénégal oriental (Photos Mall 2011)

L'utilisation de détergent dans le traitement du minerai par les orpailleurs du Sénégal oriental (photo 17) influencerait très fortement la mobilité de l'Arsenic du fait de l'effet tampon qu'ont ces bases sur les acides générés par le lavage du minerai. Cela favorise une augmentation des pH de l'eau contribuant ainsi à sa libération dans les eaux. Par contre, les autres métaux sont

plutôt affectés par des phénomènes de sorption avec l'augmentation du pH. En effet, si la présence d'arsenic dans les eaux prélevées dans les différents sites orpaillés était uniquement liée à l'orpaillage, sa concentration serait plus marquée au niveau des villages ayant une très longue tradition d'orpaillage (Tinkoto et Sabodala) où les teneurs médianes en As observées sont inférieures à la norme OMS (10 $\mu\text{g. L}^{-1}$) et sont respectivement (6,3 et 5,6 $\mu\text{g. L}^{-1}$). Cependant, le constat est tout autre à Sambarabougou où les plus fortes teneurs en As sont observées (23, et 26 $\mu\text{g. L}^{-1}$). Des concentrations élevées en As ont été observées également au niveau du village de Sounkounkoun où l'eau du Forage présente des concentrations en As de 15 $\mu\text{g. L}^{-1}$ supérieure à la norme OMS. A Diabougou un peu au nord de Sounkounkoun, les teneurs en As sont en dessous de la limite admissible pour l'eau de boisson à l'exception du puits P2 qui présente une concentration en As de 10 $\mu\text{g. L}^{-1}$. Les teneurs en As relativement élevées observées au niveau de l'axe Sambarabougou Sounkounkoun pourraient être d'origine géogène ou lithogène dues à la présence probable de sulfures notamment l'arsénopyrite qui est associée à l'or dans ce secteur (Fig. 91). Ceci pourrait expliquer les teneurs relativement élevées de l'As dans les eaux observées uniquement dans cette partie nord-est de la zone affectée par la MTZ. Cette hypothèse est étayée par l'association de l'or avec les sulfures tels que: la pyrite, l'arsénopyrite et l'hématite qui a été signalée également par [Morisseau 2010](#) au niveau du gisement d'or de Massawa situé sur la MTZ. Cette zone de cisaillement régionale constitue donc, un grand réservoir des sulfures susceptible d'enrichir les eaux en As.

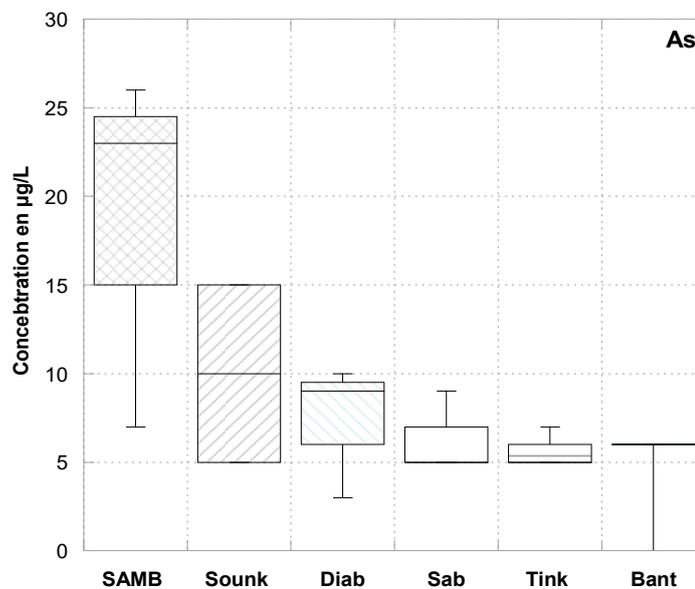


Figure 92. Boxplot indiquant la distribution des concentrations en Arsenic par village [$\mu\text{g/L}$] (Juin 2014)

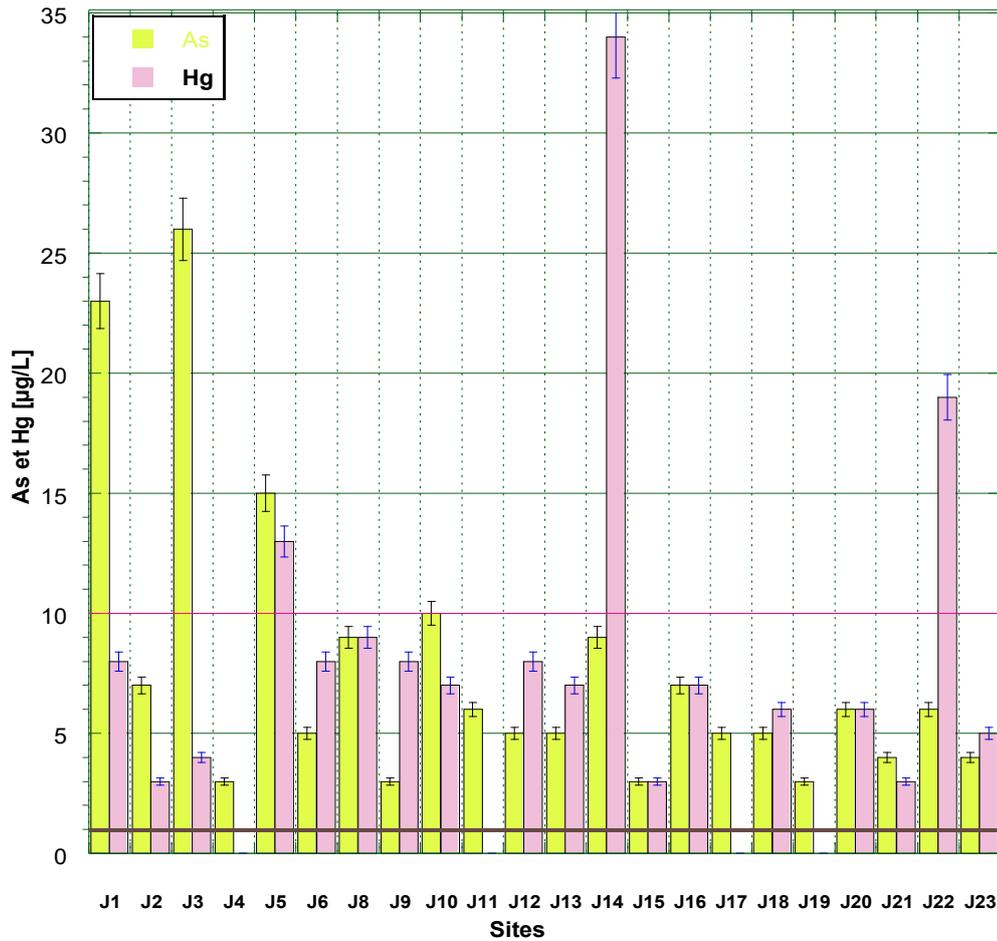


Figure 93. Distribution des concentrations en As et Hg dans les zones orpaillées (Juin 2014)

La figure 93 montre que sur l’essentiel des échantillons d’eau souterraine, les concentrations en mercure dissous sont largement au-dessus de la norme admissible pour l’eau de consommation ($1 \mu\text{g. L}^{-1}$) à l’exception du puits du village de Douta et des eaux prélevées au niveau des cours d’eau aussi bien niveau de la Gambie à Bantako, de la Falémé à Diabougou, qu’au niveau de la rivière Tinkoto. Pour l’arsenic les concentrations qui dépassent la norme ne sont observées que dans la partie Nord à Sambarambougou, au niveau de Sounkounkoun et à Diabougou qui est à la limite de la concentration admissible ($10 \mu\text{g. L}^{-1}$). Ces observations indiquent que la contamination mercurielle des ressources en eau est bien réelle dans tous les villages d’orpaillage visités en juin 2014.

VII.7. CONCLUSION

Cette étude a permis de voir le degré de contamination des eaux par le mercure et l’As dans ces zones d’orpaillage. Les résultats ont montré que les concentrations de mercure dans les eaux sont pour l’essentiel des ouvrages échantillonnés, largement supérieures aux normes OMS pour

l'eau de boisson. L'Arsenic qui est présent à des niveaux de concentration relativement élevés sur quelques ouvrages dans la partie nord de la zone d'étude notamment à Sounkounkoun et Diabougou et Sambarambougou avec des valeurs médianes légèrement au-dessus de la norme OMS (10µg/L) mérite également une attention particulière. L'usage du mercure aujourd'hui constitue une menace très sérieuse sur toutes les composantes de l'environnement (atmosphère, hydrosphère, lithosphère et biosphère) pouvant induire une contamination chronique qui affecte toute la chaîne alimentaire. Les personnes impliquées dans l'orpaillage ou qui résident dans ces zones particulièrement les enfants sont plus exposés aux risques de contamination chronique liée à la présence de ces éléments traces toxiques dans les eaux souterraines, mais également aux risques d'intoxication par inhalation du mercure ou par absorption par voie cutanée du fait de la manipulation du produit sans mesures de protection. Cependant, au Sénégal oriental, le niveau de pauvreté est tel, que ces communautés impliquées dans l'orpaillage ne se soucient même pas des dangers liés à la manipulation de ce métal hautement toxique avec tous les risques sanitaires encourus. L'usage de ces produits chimiques hautement toxiques (mercure et cyanure) par les orpailleurs constitue une menace très sérieuse non seulement pour l'homme, mais pour l'environnement si des mesures réglementaires ne sont pas prises. Il revient donc à l'Etat du Sénégal et des pays voisins qui partagent ces bassins hydrographiques transfrontaliers de développer des stratégies visant à organiser le secteur et à renforcer les capacités des orpailleurs en mettant en place des technologies d'exploitation propres, soucieuses de la protection et de la préservation de l'environnement ainsi que de la santé des populations locales.

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse axée sur la connaissance des ressources en eau du Sénégal oriental a permis de faire un diagnostic approfondi sur l'état de la ressource dans cette partie du Sénégal qui du reste est très peu investie en terme d'évaluation aussi bien quantitative que qualitative. A travers les outils SIG, Télédétection, la géostatistique et les outils géochimiques classiques plusieurs résultats ressortent de cette étude. Elle a pu caractériser et affiner les connaissances sur les ressources en eaux dans cette partie du Sénégal où les résultats saillants dans les différentes approches méthodologiques sont synthétisés dans nos conclusions sur les aspects suivants :

Cartographie des zones potentielles aquifères

Les résultats de la cartographie des zones potentielles aquifères du Sénégal oriental par combinaison des outils SIG et de la Télédétection s'est faite à partir de deux approches : (1) première méthode qui a tenu compte des paramètres de surface tels que la pluviométrie, la densité de linéament, la géologie, les pentes et la densité de drainage et une deuxième méthode qui s'est focalisée surtout sur les paramètres intrinsèques de l'aquifère (géologie, épaisseur des altérites, épaisseur de la fracturation, épaisseur de la régolithe, densité de linéament, proximité aux cours d'eau). Les résultats de la première méthode ont montré que 5% de la zone d'étude présente de très bons potentiels aquifères qui sont principalement concentrés dans la partie sud de la zone d'étude et sur la MTZ. Cependant, les très faibles potentiels constituent 13% de la superficie de la zone et se trouvent essentiellement dans la partie nord en particulier sur les granites. La combinaison de résultats générés par le SIG avec NDVI et la productivité des forages a montré que généralement, les zones à bons potentiels aquifères sont bien corrélées avec les zones à activités végétales élevées en saison sèche avancée, sauf dans les secteurs affectés par les incendies de forêt qui sont très fréquents dans la région en cette période. Les forages à grands débits sont observés dans les zones présentant de bon et de très bons potentiels aquifères résultant de l'analyse du SIG et les très faibles productivités de forage sont rencontrées dans la partie nord de la zone d'étude correspondant ainsi aux zones à faibles et très faibles potentialités aquifères. La deuxième méthode basée sur l'analyse multicritère SIG a montré la pertinence d'intégrer ces paramètres intrinsèques de l'aquifère dans la prospection hydrogéologique. Cela a permis une meilleure connaissance des systèmes aquifères en livrant des informations pertinentes sur les éléments concourant à favoriser la mise en place de réserve d'eau souterraine et sur les différentes caractéristiques géologiques et structurales des

réservoirs (épaisseur des altérites, épaisseur de la fracturation, épaisseur de la régolithe). Ceci nous a permis d'avoir une meilleure idée sur la variation spatiale des épaisseurs des différentes unités aquifères mais également de pouvoir caractériser avec précision la nature pétrographique des terrains traversés par les forages. En comparant les résultats des deux méthodes il apparaît une grande similarité dans l'extension géographique des différentes classes de potentialités aquifères.

Hydrochimie des eaux du Sénégal oriental

Concernant la chimie des éléments majeurs dans les eaux, les outils géochimiques classiques (diagrammes binaires, de stabilité, de Gibbs et les indices de saturation) donnent une idée claire de l'origine de la minéralisation des eaux du Sénégal oriental qui se fait essentiellement par hydrolyse des silicates. Les diagrammes de Gibbs montrent que l'interaction eau-roche constitue le processus majeur qui gouverne la minéralisation des eaux ce qui est confirmé par les indices de saturation qui montrent que les eaux sont toutes sursaturées en quartz et en calcédoine et très sous saturées vis-à-vis des minéraux des terrains sédimentaires (Calcite, Dolomite, Halite, Gypse). La dissolution de ces minéraux carbonatés peut contribuer à enrichir les eaux en Ca^{2+} et Mg^{2+} . Cependant, d'autres processus tels que les échanges de base et les échanges inverses de base peuvent affecter la minéralisation des eaux.

L'étude basée sur la caractérisation hydrochimique des entités hydrogéologiques du Sénégal oriental par approche statistique intégrant à la fois les éléments majeurs, les ETM, ainsi que les paramètres physico-chimiques a montré toute sa pertinence dans la discrimination des origines de la minéralisation des eaux. L'analyse statistique multivariée basée sur l'ACP a montré deux sources principales de la minéralisation des eaux du point de vue éléments majeurs. Une première source naturelle caractérisée par des eaux à faciès $HCO_3-Ca-Mg$ caractéristique des eaux de forages et des eaux de surface non polluées et une deuxième source d'origine anthropique caractérisée par des eaux polluées par les nitrates, observées essentiellement au niveau des puits villageois captant la nappe d'altérite. Les eaux issues des granites sont moins minéralisées et sont plus enrichies en alcalin (Na+K) alors que les eaux des réservoirs schistes et volcano-sédiments comme celles des roches volcaniques basiques sont plus minéralisées et sont caractérisées par des teneurs en alcalino-terreux (Ca+Mg) plus élevées. Concernant les ETM, l'analyse statistique a montré trois groupes d'eau : les eaux présentant des concentrations en ETM très faibles, proches du fond géochimique naturel

rencontrées au niveau des forages et eaux de surface; les eaux présentant des valeurs en ETM relativement importantes et caractérisées par des teneurs élevées en Al rencontrées dans les zones d'orpaillage et enfin les eaux polluées par le Ni, le Cr, le Co, et le Mn observées uniquement au niveau du village de Sabodala. Ces résultats ont montré qu'au Sénégal oriental les eaux de puits très vulnérables sont souvent affectées par la pollution et ceci du fait de l'activité anthropique observée dans les zones d'orpaillage (Tinkoto, Sabodala et Bantako) où les eaux les plus enrichies en ETM sont notées. Ces résultats indiquent qu'au Sénégal oriental, les nappes supérieures d'altérite sont très exposées à la pollution. La consommation de ces eaux de puits contaminés pourrait à long terme, provoquer des problèmes de santé aux populations qui sont exposées à ces teneurs relativement élevées en ETM notamment au niveau du village de Sabodala où des investigations plus poussées mériteraient d'être menées. Globalement, ces outils bien que très différents, nous ont permis de bien comprendre les différents processus impliqués dans la minéralisation des eaux du Sénégal oriental à travers les différents réservoirs.

Pollution des eaux par les activités d'orpaillage

Enfin l'étude de la contamination des eaux par l'orpaillage a permis d'évaluer le degré de pollution des eaux par le mercure et l'As dans ces zones d'orpaillages. Les résultats ont montré que les concentrations de mercure dans les eaux sont pour l'essentiel des ouvrages échantillonnés largement supérieures aux normes OMS pour l'eau de boisson. Cette présence du mercure dans les eaux constitue un risque majeur de santé publique dans le Sénégal oriental. Cependant, dans la zone, le niveau de pauvreté est tel, que ces communautés impliquées dans l'orpaillage ne se soucient même pas des dangers liés à la manipulation de ce métal hautement toxique avec tous les risques encourus. L'usage du mercure aujourd'hui constitue une menace très sérieuse sur toutes les composantes de l'environnement (atmosphère, hydrosphère, lithosphère et biosphère) pouvant induire une contamination chronique qui affecte toute la chaîne alimentaire. Les personnes impliquées dans l'orpaillage ou qui résident dans ces zones notamment les enfants sont plus exposés aux risques de contamination chronique liée à la présence de ces éléments traces toxiques dans les eaux souterraines, mais également aux risques d'intoxication par inhalation du mercure ou par absorption par voie cutanée du fait de la manipulation du produit sans mesures de protection. Bien qu'aujourd'hui des efforts de sensibilisations et des projets d'appui au secteur minier (PASMI) aient été initiés dans ce sens par les autorités, l'applicabilité des mesures reste très peu efficace sur le terrain. Ainsi, des

mesures coercitives devraient être prises pour une exploitation propre de l'or par ces communautés pour enfin, réduire ou même éliminer les rejets de mercure dans la nature. Cela passe par: la promotion de l'usage des rotors dans la combustion de l'amalgame qui aura pour conséquence directe, une réduction des vapeurs de mercure dans la zone, mais également une réduction des émissions de mercure par rejet direct dans l'environnement au cours du traitement du minerai et par l'usage de techniques plus appropriées qui utilisent moins de mercure et qui tiennent compte du recyclage du mercure au cours du traitement du minerai. Egalement, la présence d'arsenic à des niveaux de concentration relativement élevés sur quelques ouvrages dans la partie nord de la zone d'étude notamment, à Sounkounkoun et Diabougou avec des valeurs médianes légèrement au-dessus de la norme OMS (10µg/L) reste un problème sérieux. Ces observations font qu'une attention particulière mérite d'être portée sur l'Arsenic notamment dans les villages situés dans la partie nord de la zone et sur la MTZ. Aujourd'hui pour mettre fin à cette situation l'Etat du Sénégal tente de réorganiser le secteur en définissant des couloirs d'orpaillage et l'octroi de permis d'exploitation pour mieux organiser le secteur afin de minimiser les risques environnementaux ainsi que les risques de conflit que peut générer l'orpaillage. C'est pourquoi des mesures d'accompagnement et de suivi sont nécessaires pour appuyer les autorités locales dans la mise en œuvre de projet d'exploitation minière durable soucieux de la protection de l'environnement et de la santé humaine. Cela passe obligatoirement par : une réorganisation du secteur de l'orpaillage au Sénégal oriental ; une réglementation des techniques de traitement et des produits qui sont utilisés ; une meilleure politique de protection des ressources en eau et des écosystèmes aquatiques qui jusque-là subissent une très forte pression de pollution pouvant réduire leur capacité de résilience. Ainsi, pour atteindre ces résultats il urge d'abandonner cette pratique anarchique de l'orpaillage qui, non seulement reste très peu profitable à ces communautés, mais constitue un danger réel aux populations très exposées à de possibles risques d'intoxications mercurielles graves par bioaccumulation si rien n'est fait dans les années à venir.

Perspectives et recommandations

- Des études géophysiques sont nécessaires pour confirmer les résultats des modèles SIG et doivent être utilisées comme outil complémentaire de validation des résultats de la cartographie SIG. La géophysique aidera non seulement à valider les modèles, mais à

apporter également des informations utiles sur la géométrie et l'extension des réservoirs.

- Les modèles géochimiques de transfère de contaminants aideront à mieux comprendre le comportement, spéciation des ions et leur mobilité au sein des différentes composantes des hydrosystèmes (eau, sols, sédiments). Ces modèles devront être couplés à des mesures de laboratoires qui en fonction des types de sols de sédiments, de roches et d'eau permettront restituer le comportement des ions en fonction du pH et de l'état d'oxydo-réduction dans ces milieux.
- L'analyse de roches totales de sols et de sédiments dans les différents hydrosystèmes contribuerait à mieux établir le fond géochimique naturel de l'eau au niveau des différents réservoirs aquifères.
- Une étude isotopique permettrait de dater l'âge des eaux et d'identifier les zones de recharge des différents systèmes aquifères du Sénégal oriental.
- Enfin, l'extension de l'étude sur toute la région de socle du Sénégal oriental est nécessaire pour renforcer l'état de la connaissance dans ces systèmes complexes d'aquifère de socle aussi bien dans le birimien, le sédimentaire ancien (Sepergroupe de Ségou Madinacouta) que dans les terrains métamorphiques de la chaîne des Mauritanides.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- ADEME, 2010**, Sites pollués et sols, accessible sur le site internet <http://www.ademe.fr>; (dernier accès le 14/10/10).
- Alassane, A., Trabelsi, R., Dovonon, L.F., Odeloui, D.J., Boukari, M., Zouari, K. and Mama, D. 2015**, Chemical Evolution of the Continental Terminal Shallow Aquifer in the South of Coastal Sedimentary Basin of Benin (West-Africa) Using Multivariate Factor Analysis. *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 496-515. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.76040>.
- ANSD, 2011**, Situation économique et sociale régionale de Kédougou. République du Sénégal Ministère de l'Economie et des Finances.
- ANSD, 2014**, Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage (RGPHAE). République du Sénégal Ministère de l'Economie, des Finances et du Plan.
- Appelo. C.A.J., Postma. D., 2009**, Geochemistry, groundwater and pollution. 2nd edition
- Archambault. J., 1974**, Les eaux du Sénégal Oriental. Rapport PNUD-BIRD. Rapport BURGEAP, 30p
- ATSDR, 1997**, Toxicological Profiles for nickel. Agency for Toxic Substances and Disease
- Ayotte, J.D., Gronberg, J.M., and Apodaca, L.E., 2011**, Trace elements and radon in groundwater across the United States, 1992–2003: U.S. Geological Survey Scientific Investigations. Report 2011–5059, 115p. available at (<http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5059>).
- Ba. A. T, Sambou. B, Finn. E., 1997**, Végétation et flore du parc transfrontalier Niokolo-Badiar Rapport I.S.E DAKAR, 157p.
- Barringer, J.L., Reilly, P.A., Eberl, D.D., Blum, A.E., Bonin, J.L., Rosman, R., Hirst, B., Alebus, M., Cenno, K., & Gorska, M. 2011**, Arsenic in sediments, groundwater, and streamwater of a glauconitic Coastal Plain terrain, New Jersey, USA—Chemical “fingerprints” for geogenic and anthropogenic sources. *Applied Geochemistry*, 26, 763-776.
- Bassot J.P. 1966**, Etude géologique du Sénégal oriental et de ces confins Guinéo-maliens. *Mem. Bur. Rech. Géol. Min., Paris*, 40, 322p.
- Bassot. J.P. 1987**, Le complexe volcanoplutonique calco-alkalin de la Dalema (Est Sénégal) : Discussion de sa signification géodynamique dans le cadre de l'orogénie éburnéenne (Protérozoïque inférieur). *Journal of African Earth Science*, 6, N°1, pp 109-115.
- Bessole., 1977**, Géologie de l'Afrique. Le craton ouest africain. *Mem. B.R.G.M., Paris*, n° 88, 402p.
- Biémi J. 1992**, Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse d'Etat, Univ. Abidjan, 480 p.
- Blot A., 1980**, L'altération climatique des massifs de granites du Sénégal. Thèse de Doctorat ès Sciences (1980) et mémoires ORSTOM n° 114, Paris 434p.
- BRGM. Web: www.inondationsnappes.fr;**
- Bricker O.P, Jones B.F, Bowser C.J. 2003**, Mass-balance Approach to Interpreting Weathering Reactions in Watershed Systems pp.119-132 In *Surface and Groundwater, Weathering, and soils* (ed. J.I. Drever) Vol 5 Treatise on Geochemistry (eds. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elsevier-Pergamon, oxford.
- Camus H. & Debuissou. J 1964**, Etude hydrologique des terrains anciens du Sénégal oriental. Campagne 1962-1963. Rapport ORSTOM, n°114, Paris 434p.
- Camus. H. et Debuissou. J., 1964**, Etude hydrogéologique des terrains anciens du Sénégal Oriental. Campagne 1962-1963. Rapport.B.R.G.M, Dak. 64-06, 143p.
- CEFIGRE., 1990**, Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest : Socle cristallin et cristallophyllien Sédimentaire ancien 2ème édition, Univ.d'Avignon, 147p.
- Chessel D, AB. Dufour and J. Thioulouse, 2004**, The ade4 package-I- One-table methods. *R News* 4:5-10.
- Compaore. J. L., 1980**, Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle de l'Afrique occidentale : essai de synthèse des connaissances relatives au territoire voltaïque. *Mém. D.E.A, Univ. Dakar*, 77p.
- Dalton, M.G., Upchurch, S.M., 1978**, Interpretation of hydrochemical facies by factor analysis. *Ground Water* 16 (4), 228–233.
- DAT/USAID., 1986**, Cartographie et télédétection des ressources de la république du Sénégal. Etude de l'hydrogéologie, des sols de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols.
- Degallier R. 1965**, - Réflexions et questions sur l'alimentation des nappes souterraines. *Chrono Hydrolog., Fr.*, 5, p.7-31.

- Diouf. S. 1999**, Hydrogéologie en zone de socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental. Application de la méthode électrique 1D et 2D à la localisation et à la caractérisation des aquifères du batholite de Saraya et ses environs. Thèse de doctorat de 3ecycle. Univ. C.A.D. de Dakar, 86p.
- Engalenc. M., 1978**, : Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines. Pub. CIEH, Ouagadougou, Vol, 1,2, 3, 652p.
- Engalenc. M., 1978**, Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines. Pub. CIEH, Ouagadougou, Vol, 1,2, 3, 652p
- ESA, 2002**, ASAR Product handbook (<http://envisat.esa.int>)
- Faillat. J.P., 1986**, Aquifères fissurés en zone tropicale humide : Structure hydrodynamique et hydrochimique (Afrique de l'ouest), Thèse Univ. Languedoc (Montpellier), 534p.
- Frape S.K. and Blyth A. 2003**, Deep fluids in the continent: II. Crystalline Rocks, pp. 541-580. In Surface and Groundwater, Weathering, and soils (ed. J.I. Drever) Vol. 5 Treatise on Geochemistry (eds. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elsevier-Pergamon, oxford.
- Garrels, M.R. and Mackenzi, F.T., 1971**, Evolution of sedimentary Rocks. Norton, New York, 397 pp.
- Grandmont K, 2013**, Utilisation de systèmes d'information géographique pour l'évaluation des risques liés à la dégradation du pergélisol. Étude de cas : Tasiujaq, Nunavik, Québec. Département de géographie, Faculté des arts et des sciences. Mémoire de maîtrise, 84p.
- Gross, E.L., Low, D.J., 2013**, Arsenic concentrations, related environmental factors, and the predicted probability of elevated arsenic in groundwater in Pennsylvania: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2012-5257, 46 p.
- Guiraud. R 1975**, Eléments pour une orientation nouvelle de la recherche des eaux souterraines dans les régions à substratum métamorphique ou éruptif de l'Afrique occidentale. Réu. Porto-Alegre, Mém.QIH, Vol. XI, p 15-19
- Harte, P.T., Robinson, G.R., Jr., Ayotte, J.D., and Flanagan, S.F., 2008**, Framework for evaluating water quality of the New England crystalline rock aquifers: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1282, 47 p., available only online at <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1282>.
- Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J.M., Fernandez, L., 2000**, Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga river, Spain) by principal component analysis. Water Res. 34, 807-816.
- Hertel, R.F., Maass, T. et Muller, V.R., 1991**. Nickel. World Health Organization, Geneva
- Hiroshi Sasamoto, Randolph C. Arthur b, Katsuhiko Hama., 2011**, Interpretation of undisturbed hydrogeochemical conditions in Neogene sediments of the Horonobe area, Hokkaido, Japan. Journal Applied Geochemistry.
- Hiroshi Sasamoto, Randolph. Arthur, Katsuhiko Hama, 2011**, Interpretation of undisturbed hydrogeochemical conditions in Neogene sediments of the Horonobe area, Hokkaido, Japan. Applied Geochemistry 26 (2011) 1464-1477.
- Hossam H. Elewa & Atef A. Qaddah., 2011**, Groundwater potentiality mapping in the Sinai Peninsula, Egypt, using remote sensing and GIS-watershed-based modeling. Hydrogeology Journal 19: 613-628.
- Howard, P.J.A., 1991**, An Introduction to Environment Pattern Analysis. Parthenon, Park Ridge, New Jersey. http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_1.php;
- Hudson R.J. M., Gherini S. A., Watras C. J., and Porcella D. B. 1994**, Modelling the biogeochemical cycle of mercury in lakes: the mercury cycling model (MCM) and its application to the MTL study lakes. In *Mercury Pollution: and Synthesis* (eds C. Watras and J. Huckabee). Lewis publisher. V1, pp. 473-526.
- Hyndman D. W. 1985**, Petrology of igneous rock and Metamorphic Rocks. MacGraw-Hill, New York, 786 pp.
- ICPS 1990**, Methylmercury. Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety (Environmental Health Criteria 101). Available at: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc101.htm>;
- INERIS 2010**, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. Mercure et ses dérivés
- INERIS, 2006**, Eléments traces métalliques : guide méthodologique. Rapport d'études INERIS-DRC-06-66246/DESP-R01a.
- Ismail. J & Mallikarjuna P., 2011**, Review: Satellite-based remote sensing and geographic information systems and their application in the assessment of groundwater potential, with particular reference to India. Hydrogeology Journal (2011) 19: 729-740.
- Jaiswal RK, Krishnamurthy J, Saxena R 2003**, Role of RS and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones towards rural development: an approach. Int J Remote Sens 24:993-1008
- Jenson, S. K., and J. O. Domingue. 1988**, "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11): 1593-1600.

- Julia L. Barringer and Pamela A. Reilly, 2013**, Arsenic in Groundwater: A Summary of Sources and the Biogeochemical and Hydrogeologic Factors Affecting Arsenic Occurrence and Mobility. Chapter 4, U.S. Geological Survey, USA. 34p.
- Kouamé K. F., 1999**, Hydrogéologie des régions de montagne : Apports des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique a référence spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (ouest de la cote d'ivoire). Thèse de 3ème Cycle Université de Cocody.
- Lachassagne. P, Wyns. R., 2005**, Aquifère de socle : Nouveaux concepts. Application à la prospection et à la gestion de la ressource en eau. Journal géosciences, n°2, 32-38
- Lee CH, Farmer I., 1993**, Fluid Flow in Discontinuous Rocks. Chapman and Hall, London, 169p.
- Lelong. F., 1966**, Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération
- Lillesand T. M. and kiefer R. W., 1989**, Remote sensing and image interpretation. 2nd Edition, John Wiley & sons Ed., New York, pp. 650-651.
- Lopez-Chicano. M, Bounamama. M, Vallejos. A, Pulido-Bosch. A 2001**, Factors which determine the hydrochemical behavior of karstic springs. A case study from Betic Cordilleras, Spain. Journal of applied Geochemistry N° 16, 1179-1192.
- MacDonald DD, Ingersoll CG, Berger T. 2000a**, Development and evaluation of consensusbased sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. Arch Environ Contam.
- Maliki. R.A., 1993**, Étude hydrogéologique du littoral béninois dans la région de Cotonou et ses environs. Thèse doctorat 3e cycle. Univ.C.A.D. de Dakar, 112p.
- Mall. I*, M. Diaw, H. D. Madioune, P. M. Ngom and S. Faye 2014**, Use of Remote Sensing and GIS for Groundwater Potential Mapping in Crystalline Basement Rock (Sabodala Mining Region Senegal). Nova Science Publishers, Inc. <http://www.novapublishers.com/catalog/index.php>;
- Mall. I., 2009**, Contribution à l'étude hydrogéochimique des aquifères de socle : cas du Sénégal oriental. Mémoire D.E.A Ucad, 80 pp.
- Mall. I., Moctar, D., Maguette, D.N., Diakher, M.H., Malick, N.P. and Serigne, F, 2015**, Evaluation of Water Resources Quality in Sabodala Gold Mining Region and Its Surrounding Area (Senegal). Journal of Water Resource and Protection, 7, 247-263. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.73020>
- Mandal, B.K., & Suzuki, K.T., 2002**, Arsenic round the world: a Review. Talanta, 58, 201-235.
- Martin. A., 1962**, Etude hydrogéologique de la région Kédougou-Bakel (Sénégal oriental-campagne 1962), Rapport B.R.G.M, 39p
- Mashaël Al Saud., 2010**, Mapping potential areas for groundwater storage in Wadi Aurnah Basin, western Arabian Peninsula, using remote sensing and geographic information system techniques. Hydrogeology Journal (2010) 18: 1481-1495.
- Mavrantza O, Argialas D, 2008**, An object-oriented image analysis approach for the identification of geologic lineaments in a sedimentary geotectonic environment. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography 2008, pp 383-398.
- McGrath, S.P., 1995**, Chromium and nickel. Heavy metals in soils. London (UK), Blackie, Academic & Professional. 2nd Ed. Registry, Atlanta, GA: U.S Department of Health and Human Services, Public Health Services.
- Mehnaz Rashid & Mahjoor Ahmad Lone & Shakeel Ahmed., 2011**, Integrating geospatial and ground geophysical information as guidelines for groundwater potential zones in hard rock terrains of south India. Journal, Environ Monit Assess.
- MEPNBRLA., 2009**, Ministère de l'environnement, de la protection de la nature, des bassins de rétention et des lacs artificiels (MEPNBRLA): Annuaire sur l'environnement et les ressources naturelles du Sénégal – deuxième édition, mai 2009.
- Michel. P. (1973)**. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique. Tome I. Thèse doctorat d'état. ORSTOM. Univ. Strasbourg. Dakar, 365p.
- Morisseau, M., Kaisin, J. et Théveniaut, H., 2010b**, Notice explicative de la carte géologique et abondance Or à 1/500 000 du Sénégal oriental. Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.
- Morisseau, M., Kaisin, J. et Théveniaut, H., 2010b**, Notice explicative de la carte géologique et abondance Or à 1/500 000 du Sénégal oriental. Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.
- Morisseau, M., Kaisin, J., Diallo, D.P., Ndiaye, P.M., Dioh, E., Dabo, B., Barry, T.M. Fall, M., Ndiaye, F., Diagne, E. et Diatta, F., 2010a**, Carte géologique et abondance Or à 1/500 000 du Sénégal oriental. Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.

- N'diaye. P.M, Dia. A, Vialette. T, Diallo. D. P, NGOM. P. M, Sylla. M, Wade. S, Dioh. E., 1997**, Données pétrographiques, géochimiques et géochronologiques nouvelles sur les granitoïdes du Paléoprotérozoïque du supergroupe de Dialé-Daléma (Sénégal oriental) : implications pétrogénétiques et géodynamiques. *J.of African Earth*, vol 25, N° 2. P 193-209.
- Ngom. P.M., 1985**, Contribution à l'étude de la série birimienne de Mako dans le secteur aurifère de Sabodala (Sénégal oriental). Thèse Doc. Univ. Nancy, Fr., 134p.
- Niane B, Guédron. S, Moritz. R, Cosio. C, Ngom. P M, Deverajan. N, Pfeifer H R and Poté. J, 2014**, Human exposure to mercury in artisanal small-scale gold mining areas of Kédougou region, Senegal, as a function of occupational activity and fish consumption
- Niane, B., Moritz. R, Guédron. S, Ngom. P M, Pfeifer. H R, Mall. I, Poté. J, 2014**, Effect of recent artisanal small-scale gold mining on the contamination of surface river sediment: Case of Gambia River, Kedougou ..., *J. Geochem. Explor.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.028>.
- Nriagu I. O., 1990b**, Global metal pollution. *Environment* 32, 7-33.
- Omar Al-Qudah, Arturo Woocay, John Walton, 2011**, Identification of probable groundwater paths in the Amargosa Desert vicinity. *Journal of Applied Geochemistry* 26 565–574
- Orange. D., 1990**, Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage lateritique (afrique de l'ouest). Thèse Université Louis Pasteur de Strasbourg. 203p.
- Oremland RS1, Stolz JF, 2003, The ecology of arsenic. Science 9 May 2003: Vol. 300 no. 5621 pp. 939-944**
- Pinder G.F., 2002, Groundwater modeling using geographical information system. Wiley, New York.**
- Plumlee G.S. and Ziegler T.L., 2003**, The medical Geochemistry of dusts, soils and other Earth Materials, pp. 263-310. In *Environmental Geochemistry* (ed. B.S. Lollar) Vol. 9 Treatise on Geochemistry (eds. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elsevier-Pergamon, oxford.
- Potot C., 2011**, Etude hydrochimique du système aquifère de la basse vallée du Var. Apport des éléments traces et des isotopes (Sr, Pb, $\delta^{18}O$, 226 , ^{228}Ra). Thèse Université de Nice-Sophia Antipolis, 202 pp.
- R. K. Prasad N. C., Mondal Pallavi Banerjee., M. V. Nandakumar., V. S. Singh., 2007**, Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Journal, Environ Geol.*
- Raffaele Adinolfi Falcone, Antonella Falgiani, Barbara Parisse, Marco Petitta, Michele Spizzico, Marco Tallini, 2008**, Chemical and isotopic ($\delta^{18}O$, δ^2H , $\delta^{13}C$, ^{222}Rn) multi-tracing for groundwater conceptual model of carbonate aquifer (Gran Sasso INFN underground laboratory – central Italy) *underground Journal of Hydrology* 357, 368– 388
- Ramli M. F, Yusof. N, Yusoff. M. K, Juahir. H, Shafri, H. Z. M., 2009**, Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: a review. *Journal Bull Eng Geol Environ.*
- Reghunath, R., Murthy, T.R.S., Raghavan, B.R., 2002**, The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India. *Water Res.* 36, 2437–2442.
- rePlan, 2014, stratégie de développement de teranga, rapport Teranga Gold, 144p.**
- RGPHAE 2013: Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage.**
- Sandow Mark Yidana 2009**, Groundwater classification using multivariate statistical methods: Southern Ghana. *Journal of African Earth Sciences* 57 (2010) 455–469.
- Saraf AK, Choudhury PR 1998**, Integrated RS and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. *Int J Remote Sens* 19:1825-1841
- Savado A. N., 1984**, Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta – Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse d'Etat, Univ. de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 350 p.
- Savané I., 1997**, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale. Thèse d'Etat, Univ. Abidjan, 386 p.
- SCANVIC J. Y., 1983**, Utilisation de la télédétection dans les Sciences de la Terre. *Ed. B.R.G.M.,*
- Selinus O, Alloway B, Centeno JA, Finkelman RB, Fuge R, Lundh U, Smedley P, eds 2005**, Essentials of medical geology - Impacts of the natural environment on public health. Elsevier Academic Press, London, UK.
- Shahid S, Nath SK, Roy J 2000**, Groundwater potential modeling in a soft rock area using GIS. *Int J Remote Sens* 21:1919-1924
- Silverman, B. W., 1986**, Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall, 1986.
- Simenov, V., Stratis, J.A., Samara, C., Zachariadis, G., Voutsas, D., Anthemidis, A., Sofoniou, M., Kouimtzis, Th., 2003**, Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water Res.* 37, 4119–4124.
- Singhal, B.B.S., Gupta, R.P. 2010**, Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. *Second Edition*
- Sisay L., 2007**, Application of Remote Sensing and GIS for Groundwater Potential Zone Mapping in Northern. Ada'a Plain (Modjo Catchment). Addis Ababa University, Addis Ababa – 1176; 77p.

- Smedley, P.L., and Kinniburgh, D.G., 2002**, A review of the source, behavior, and distribution of arsenic in natural waters: Applied Geochemistry, v. 17, no. 5, p. 517–568.
- Sreedevi PD, Srinivasulu S, Raju K 2001**, Hydrogeomorphological and groundwater prospects of Pageru River basin by using RS data. Environ Geol 40:1088–1094
- Sustrac, G., 1984**, Plan minéral de la République du Sénégal, Ministère du Développement industriel et de l'artisanat, Direction des Mines et de la Géologie, 3 volumes, 725 p.
- Taqveem Ali Khan., 2011**, Trace elements in the drinking water and their possible health effects in aligarh city, india. Journal of Water Resource and Protection, 2011, 3, 522-530 doi:10.4236/jwarp.2011.37062 Published Online July 2011 (<http://www.SciRP.org/journal/jwarp>)
- Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe. 1991**, "On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data." Hydrological Processes 5: 81–100.
- Teeuw R M., 1995**. Groundwater exploration using RS and a low cost GIS. Hydrogeol J 3:21–30.
- Théveniaut, H., Ndiaye, P.M., Buscail, F., Couëffé, R., Delor, C., Fullgraf, T., Goujou, J.-C., 2010b**, Notice explicative de la carte géologique du Sénégal oriental à 1/500 000. Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.
- Travi .Y., mudry, J., 1997**, Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. Journal hydrogéologie, n°1, 13-21.
- UNEP 2012**, Reducing Mercury Use in Artisanal and Small-Scale Gold Mining: A Practical Guide. Available at: http://www.unep.org/hazardoussubstances/Portals/9/Mercury/Documents/ASGM/Techdoc/UNEP%20Tech%20Doc%20APRIL%202012_120608b_web.pdf;
- UNEP 2013a**, The Negotiating Process. <http://www.unep.org/hazardoussubstances/Mercury/Negotiations/tabid/3320/Default.aspx>;
- UNEP 2013b**, Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013. Available at: <http://www.unep.org/hazardoussubstances/Mercury/Informationmaterials/ReportsandPublications/tabid/3593/Default.aspx> ;
- UNEP 2013c**, Global Mercury Assessment 2013 – Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport. Available at <http://www.unep.org/hazardoussubstances/Mercury/Informationmaterials/ReportsandPublications/tabid/3593/Default.aspx>;
- UNEP 2013d**, Mercury – Time to Act. Available at <http://www.unep.org/hazardoussubstances/Mercury/Informationmaterials/ReportsandPublications/tabid/3593/Default.aspx>;
- UNESCO 1984**, Ground water in hard rocks. Project 8.6 of the International Hydrological Programme. UNESCO, Paris.
- USAID, 2014**, Amélioration des politiques de gestion durable des ressources naturelles basées sur les Produits Forestiers Non Ligneux en Afrique de l'Ouest et du Centre. Rapport final, 63p.
- Van Golf-Racht TD., 1982**, Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering. Elsevier, Amsterdam, 710 p.
- Veeger, A.I., and Ruderman, N.C., 1998**, Hydrogeologic controls on Radon-222 in a buried valley-fractured bedrock aquifer system: Ground Water, v. 36, no. 4, pp. 596-604.
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E., Deban, L., 1998**, Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. Water Res. 32, 3581–3592.
- Wackermann. J. M., 1975**, L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide. Études minéralogiques et géochimiques des arènes du Sénégal Oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection. Thèse, sciences Univ Louis Pasteur Strasbourg, 338 p.
- Welch, A.H., Westjohn, D.B., Helsel, D.R., and Wanty, R.B., 2000**, Arsenic in ground water of the United States: Occurrence and geochemistry: Ground Water, v. 38, no. 4, p. 589-604.
- WHO 2003**, Elemental mercury and inorganic mercury compounds: human health aspects. Concise International Chemical Assessment Document 50. <http://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad50.pdf>;
- WHO 2007**, Exposure to Mercury: A Major Public Health Concern. Available at: <http://www.who.int/ipcs/features/mercury.pdf>;
- WHO 2008**, Assessing the burden of disease at national and local levels. Environmental Burden of Disease Series No. 16.
- Wright, M.T., Fram, M.S., and Belitz, Kenneth, 2015**, Geochemical conditions and the occurrence of selected trace elements in groundwater basins used for public drinking-water supply, Desert and Basin and Range hydrogeologic provinces, 2006–11—California GAMA Priority Basin Project: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2014–5173, 48 p., <http://dx.doi.org/10.3133/sir20145173>.

- Wuilleumier, A., Mall, I. et Ndiaye, P.M., 2010a**, Carte hydrogéologique à 1/500 000 du Sénégal oriental. Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.
- Wuilleumier, A., Théveniaut, H., Mall, I. et Ndiaye, P.M., 2010**, Notice explicative de la carte hydrogéologique à 1/500 000 du Sénégal oriental, Ministère des Mines, de l'industrie, de l'agro-industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie.
- Wuilleumier, A., Théveniaut, H., Mall, I. et Ndiaye, P.M., 2010**, Notice explicative de la carte hydrogéologique à 1/500 000 du Sénégal oriental, Ministère des Mines, de l'industrie, de l'agro-industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie.
- YÉSOU H., 1993**, Analyse d'image satellitaire radar et optique : optimisation et intégration des données. Apports à la géologie structurale et minière. Thèse Univ. Strasbourg, 232
- Yui, M., Sasamoto, H., Arthur, R., 2004**, Geostatistical and geochemical classification of groundwaters considered in safety assessment of a deep geologic repository for high-level radioactive wastes in Japan. *Geochem. J.* 38, 33-42.

Annexes

Localités	Easting (X_UTM)	Northing (Y_UTM)	Elevation SRTM (m)	Profondeur totale (m)
AMERIQUE	775192,5106	1417013,3530	58	45
ASSONI	804191,8453	1391971,4810	140	41
Badioula	847236,6786	1419936,1960	168	45
BAFOUNDU	784631,3322	1429531,6200	134	52
BALAKONKO	857889,4122	1455332,0060	124	51
BAMBARAYA NDING	814942,3365	1451296,5500	198	41
BANTAKO	799982,0111	1412992,9160	99	37
BAYTILAYE	808750,8668	1406136,7270	100	39
BEROLA	835545,5582	1462708,7530	135	51
BOKHODY	852509,6521	1465539,0990	126	40
BOMBOYA	774282,5128	1414421,9760	58	54
Bransan	813913,0654	1467340,6190	176	44
Dalafing	859656,2019	1423360,7540	172	43
DAMBALA	853323,3648	1470165,0640	90	52
Diabougou	836153,3734	1486435,7230	94	43
DIAGUIRI PONT	816358,2846	1398132,1990	120	45
DINDIFA	824067,4020	1462292,4520	138	35
Diombalou	812154,0209	1524562,3900	43	37
DIOULAFOUNDOU	839991,6460	1417417,3890	153	42
DJINDJI	806218,6196	1402941,9010	105	37
ELIMALO	824547,2532	1502227,2880	61	54
FARABA	858324,8660	1419368,1150	166	61
FODE BINEA	857526,7637	1415634,9850	155	54
FOLONKOTO	789875,5342	1406614,4130	144	43
GUINGARA	822000,4652	1393397,0120	115	40
IWOL	780414,6746	1383210,8200	139	51
KANOUMERY	806979,1813	1426366,9280	148	50
KEGNETO DIAKHA	808428,6361	1391248,0240	112	33
KONDOKHOU	855133,8354	1430435,1610	149	54
KOUNOUMBA MBAKHANA	812083,8432	1445512,1240	170	50
KOUROUNGHOTO	774025,8046	1406671,0230	82	44
LAME	790891,6471	1419232,0560	84	43
LAMINIA	821969,8159	1506317,5320	57	51
LAMINIA1	813136,5597	1394497,8940	107	35
LANDIENE TANDA	786555,5888	1388498,8760	176	34
Lephakho	830307,0179	1458749,9210	139	56
MADANKHOLY	828973,8498	1447800,9710	193	43
MADINA SABODALA	809743,1787	1455174,1210	172	43
MADINA SIRIMANA	848984,9916	1458355,7260	101	52
MAKO F1	787624,7612	1422950,0650	80	100

Localités	Easting (X_UTM)	Northing (Y_UTM)	Elevation (m)	Profondeur totale (m)
-----------	-----------------	---------------------	------------------	--------------------------

MANDA THIES	774126,8374	1408701,3550	77	42
Massamassa	833503,7604	1432272,1600	158	60
MOURANG	867628,4459	1464355,1130	108	51
NAMEL	810980,1532	1390014,6740	115	30
NEGUEBAKHO	786635,8590	1425215,9590	97	41
NGARI SEKHOTO	798619,5428	1399078,5300	140	52
NIANGUE	789762,3824	1391021,9620	158	60
Niéniéko	822453,1818	1506138,6310	52	40
NIENIEKO SARA	829214,1548	1497208,3810	61	50
Ninefescha	774669,9811	1389981,2910	99	47
Sabodala	812482,8941	1456509,4930	184	45
SAMBARANBOUGOU	841271,3521	1450719,9470	125	43
SAMECOUTA	810375,9689	1390008,1130	128	42
Sanela	854767,7233	1411723,2080	178	51
Saraya	852658,6915	1420926,9710	186	70
Sayansoutou	863971,4172	1482867,8050	77	49
SEKHOTO	826893,9442	1499856,3750	65	54
SEKOTO	791687,7586	1418103,3750	94	45
SEKOUTA	775014,5283	1410554,8740	59	48
SIBIKILING	784660,3427	1429561,8070	131	43
Sonkounkou	836639,1806	1481334,8720	73	35
Soréto	834535,0885	1492998,9920	62	40
TAIFA	811151,0827	1396506,0650	107	71
TENKOTO	812440,3300	1430014,1730	177	51
TOUBA DIAKHA	787394,7379	1424824,1340	89	43
TOUMBINFARA	851295,9355	1480045,8950	74	42
WORTOKHATY	854390,3540	1485194,2680	77	34

Du point de vue évolution chimique des eaux en ions majeurs, les statistiques sur les trois campagnes montrent les mêmes tendances quelque soit la saison considérée. Les aquifères des formations volcano-sédimentaires et schistes sont caractérisés par des eaux plus minéralisées, suivis des eaux des aquifères des roches basiques et les eaux des granites restent toujours les moins minéralisées. Concernant les eaux de surfaces, elles gardent toujours un caractère moins minéralisées excepté la campagne de 2014 où les TDS restent relativement élevés dûs aux lessivages des produits de l'activité minière au niveau de la Falémé à Diabougou et au niveau du fleuve Gambie à Bantako. En termes de minéralisation par les ions majeurs, les variations saisonnières sont peu prononcées, par ailleurs, concernant la campagne de Juin 2014, les eaux montrent un caractère plus affecté par la pollution nitratée qui est bien net au niveau des villages d'orpaillage.

Statistiques de la campagne de Janvier 2011

Type	Granites				Schistes & Volcano-sédiment				Roches basiques				Eaux de surface			
	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n
Paramètres																
TDS	25	519	202	15	63	517	215,5	12	25	459	124,5	6	22	147	22	5
T°C	25,30	31,80	28	15	26,6	31	29,4	12	28,30	32,30	30,80	6	23,80	25,10	24,30	5
pH	4,22	7,00	6,60	15	4,22	7,50	6,60	12	5,30	7,40	6,30	6	7,10	7,90	7,60	5
Ca (mg.L ⁻¹)	0,08	3,05	1,07	15	0,24	3,90	1,70	12	0,23	2,48	1,09	6	0,05	1,15	0,18	5
Mg (mg.L ⁻¹)	0,12	4,06	0,35	15	0,07	4,06	0,74	12	0,20	3,92	0,71	6	0,02	0,77	0,20	5
Na (mg.L ⁻¹)	0,10	2,73	0,73	15	0,10	2,51	0,74	12	0,07	2,69	0,53	6	0,05	0,90	0,11	5
K (mg.L ⁻¹)	0,01	0,55	0,07	15	0,01	0,23	0,07	12	0,01	0,12	0,04	6	0,01	0,09	0,08	5
HCO3 (mg.L ⁻¹)	0,10	5,80	1,20	15	0,10	6,00	2,20	12	0,10	4,60	1,20	6	0,40	2,70	0,40	5
Cl (mg.L ⁻¹)	0,06	1,98	0,60	15	0,07	1,98	0,43	12	0,06	1,57	0,23	6	0,06	0,21	0,06	5
SO4 (mg.L ⁻¹)	0,00	2,36	0,11	15	0,01	0,76	0,12	12	0,01	0,24	0,02	6	0,00	0,03	0,01	5
NO3 (mg.L ⁻¹)	0,00	4,65	0,29	15	0,00	4,65	0,29	12	0,00	4,48	0,38	6	0,00	0,01	0,01	5

Statistique de la campagne de Novembre 2011

Type	Granites				Schistes & Volcano-sédiment				Roches basiques				Surface water			
	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n
Paramètres																
TDS	72	570	214	13	23	1190	296	21	63	517	386	11	35	60	43	6
T°C	25	32	29	13	26	34	30	21	25	31,3	29,4	11	25	32	28	6
pH	4,94	6,9	6,14	13	4,4	6,8	6,1	21	4,2	7,6	6,6	11	4,36	7,50	6,48	6
Ca (meq.L ⁻¹)	0,48	1,84	0,84	13	0,1	4,1	1,8	21	0,2	4,5	2,1	11	0,16	0,28	0,21	6
Mg (meq.L ⁻¹)	0,15	2,55	0,82	13	0,1	5,8	1,7	21	0,3	4,1	2,3	11	0,13	0,42	0,22	6
Na (meq.L ⁻¹)	0,05	3,07	0,70	13	0,0	9,1	1,0	21	0,1	2,5	0,6	11	0,03	0,17	0,05	6
K (meq.L ⁻¹)	0,00	0,29	0,06	13	0,0	0,3	0,1	21	0,0	0,2	0,1	11	0,00	0,01	0,01	6
HCO3 (meq.L ⁻¹)	0,40	2,50	1,30	13	0,1	10,3	3,5	21	0,1	6,8	3,4	11	0,20	0,70	0,40	6
Cl (meq.L ⁻¹)	0,10	2,79	0,42	13	0,1	4,8	0,5	21	0,1	2,0	0,8	11	0,08	0,19	0,12	6
SO4 (meq.L ⁻¹)	0,01	0,53	0,09	13	0,0	1,2	0,1	21	0,0	0,8	0,2	11	0,01	0,07	0,02	6
NO3 (meq.L ⁻¹)	0,00	3,20	0,24	13	0,0	3,8	0,3	21	0,0	4,6	0,4	11	0,00	0,01	0,00	6

Statistiques de la campagne de Juin 2014

Type	Granites				Schistes & Volcano-sédiment				Roches basiques				Surface water			
	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n	Min	Max	Médiane	n
Paramètres																
TDS	80	252	128	5	59	688	406,5	10	61	600	169	4	46	220	162	3
T°C	27	30,6	29,6	5	30,20	34,50	31,50	10	30	31,70	31,40	4	30	32	31,2	3
pH	5,13	6,70	6,30	5	5,40	7,16	6,75	10	4,45	7,20	6,15	4	7	7,90	7,37	3
Ca (meq.L ⁻¹)	0,31	1,01	0,66	5	0,49	5,29	3,15	10	0,21	3,12	1,84	4	0,34	0,85	0,40	3
Mg (meq.L ⁻¹)	0,20	0,93	0,37	5	0,21	5,64	1,31	10	0,22	2,03	0,94	4	0,16	0,41	0,23	3
Na (meq.L ⁻¹)	0,43	1,45	0,51	5	0,14	6,48	0,87	10	0,13	1,87	0,90	4	0,15	2,43	0,67	3
K (meq.L ⁻¹)	0,05	0,18	0,09	5	0,00	0,21	0,05	10	0,01	0,90	0,19	4	0,04	0,19	0,05	3
HCO3 (meq.L ⁻¹)	0,20	2,40	1,40	5	1,00	9,80	4,50	10	0,50	4,10	2,15	4	0,60	3,00	1,30	3
Cl (meq.L ⁻¹)	0,12	1,32	0,14	5	0,18	3,42	1,43	10	0,12	1,98	0,29	4	0,19	1,47	0,78	3
SO4 (meq.L ⁻¹)	0,02	0,14	0,03	5	0,02	0,92	0,33	10	0,02	1,88	0,05	4	0,01	0,33	0,03	3
NO3 (meq.L ⁻¹)	0,09	1,76	0,37	5	0,01	6,42	1,35	10	0,11	2,59	0,36	4	0,08	0,55	0,16	3

Localités	identifiant	X_UTM	Y_UTM	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{Cm}$)	pH	Eh (mV)	Température ($^{\circ}\text{C}$)	O2dissout (mg/L)	Date_	NS (m)	Margelle (Cm)
Bantako	Puits	801870,069	1413117,93	66	6,5	66,4	25,3	3,4	19/01/2011	1,78	
Tinkoto	Puits2	812347,252	1430210,22	211	6,69	53,1	26	3,3	19/01/2011	2,9	
Tinkoto	Puits3	812365,145	1430228,87	184	6,72	50,05	27,3	3,5	20/01/2011	3,8	
Tinkoto	Puits4	813036,09	1430125,7	140,01	6,75	55,3	31	3,1	20/01/2011	5,5	
Tinkoto	Forage	813034,635	1430254,86	167,4	6,63	56,1	31,8	3,4	20/01/2011		
Kanouméring	Forage	805967,381	1426005,66	570	7,19	22,5	28,2	2,5	21/01/2011		
Mako	Gambie	787473,616	1421804,94	53,5	7,91	0	25,1	7,1	21/01/2011		
Mako	Forage	787055,375	1421985,14	735	7,35	159	32,3	1,8	21/01/2011		
Tomboronkoto	Puits	793832,876	1416188,01	0	0	0	0	0	21/01/2011	7,47	60
Tomboronkoto	Forage	793885,649	1416336,18	232	6,77	51	31,8	2,9	21/01/2011		
Bantako	Gambie	801031,107	1413662,51	52,7	7,47	10,5	24,3	0	22/01/2011		
Bantako	Gambie	800267,374	1413949,58	54	7,61	6,3	24,3	7,1	23/01/2011		
Bantako	Forage	799946,928	1413429,49	724	7,25	22,1	31	2,4	23/01/2011		
Mouran	Puits	867744,055	1464713,77	319	7,52	3,2	30	1,5	24/01/2011	23,62	40
Mouran	Forage	867689,548	1464731,5	153	6,64	54,8	30,9	2,5	24/01/2011		
Khodonkhou	Puits	855434,51	1430543,5	493	6,63	59,3	26,6	4,9	24/01/2011	4,45	65
Khodonkhou	Forage	855469,305	1430654,71	420	6,79	46	29,9	3,8	24/01/2011		
Saraya	Puits	851823,491	1421082,64	528	6,68	48,3	25,9	5,5	24/01/2011	5,35	35
Sabodala	Rivière	812980,557	1457271,85	269	7,08	34,2	23,8	14,9	25/01/2011		
Sabodala	Puits1	812820,783	1457011,65	227	7,16	28	29,3	4	25/01/2011	15,1	40
Sabodala	Puits2	812986,702	1456736,73	78,2	5,82	101	31,8	4,1	25/01/2011	19,5	70
Sabodala	Puits3	813076,691	1456774,67	623	5,27	132,2	29,8	5,5	25/01/2011	19,21	60
Sabodala	Puits4	813076,267	1456811,58	225	5,46	121	28,3	5,7	25/01/2011	19,4	70
Khossanto	Puits	829102,441	1453659,61	413	6,58	56,5	26,6	4,3	25/01/2011	4,12	60
Bembou	Puits	839190,443	1420243,63	842	6,79	49	27,6	3,9	28/01/2011	9	60
Pondala	Puits	833682,467	1412775,98	202	7,04	32,6	5,2	26,5	28/01/2011	2,95	50
Samékouta	Gambie	812424,749	1395498,9	50,6	7,61	3,6	24,1	7,1	28/01/2011		
Samékouta	Puits	812081,436	1395402,87	284	6,69	51,8	29,8	2,6	28/01/2011		

Ouvrages	X_UTM	Y_UTM	Cond	pH	eh	TDS	salinité	NS	Margelle
Samécouta Puits	807393,166	1388573,21	519	5,05	140	307	0,3		
Diaguiri Puits	816313,788	1398007,03	419	6,11	160	250	0,2		
Diakhaba Puits	827881,346	1406414,91	92	4,95	283	21,8	0		
Pondala Forage	833531,989	1412546,69	120	5,43	217	72	0,1		
Soreto F1	834775,444	1493593,98	1140	4,37	29	680	0,6		
Soreto F2	834605,221	1493366,56	920	5,42	18	550	0,5		
Diabougou F	838280,02	1486796,44	977	5,36	128	610	0,6		
Diabougou Falémé	838573,53	1486640,01	93,3	5,31	216	57	0,1		
Diabougou Puits	838113,511	1486992,14	940	6,37	206	560	0,5		
Soukounkoun Forage	836904,893	1481936,44	2060	5,73	184	1230	1,1		
Sabodala Puits préfecture	812818,845	1457029,23	341	0	195	204	0,2	13,15	0,5
Sabodala Puits 3	813052,973	1456805,37	276	4,93	313	164	0,2	16,8	0,7
Sabodala Puits4	813065,012	1456777,49	727	4,22	336	433	0,4	17,75	0,4
Sabodala Puits 2	812977,675	1456748,03	86,5	5,27	346	51,4	0,1	14,2	0,5
Saraya Puits	812978,905	1456744,83	500	6,44	210	297	0,3	5,3	0,4
Bembou Forage	839255,473	1420048,98	771	4,94	106	457	0,4		
Bembou Puits	839182,8	1420252,55	820	6,3	193	489	0,4	7,15	
Kédougou Puits1	805418,283	1390070,89	236	6,07	215	138	0,1	8,4	0,75
Kédougou Puits2	805213,485	1390162,7	222	4,46	345	131	0,1	8,75	0,7
Massamassa Forage	833503,76	1432272,16	301	6,06	98	179	0,2		
Madankholy Forage	829323,954	1442424,48	505	6,21	71	300	0,3		
Khossanto Puits	829095,313	1453650,66	347	6,11	230	206	0,2	3,7	
Khossanto Forage	828202,013	1454232,28	900	6,74	193	530	0,5		
Mamakono Forage	818876,401	1459167,07	538	6,13	81	319	0,3		
Madina Sabodala Forage	812525,884	1455750,28	763	6,6	21	454	0,4		
Makana Forage	811554,913	1448892,57	940	6,64	226	560	0,5		

Ouvrages	X_UTM	Y_UTM	Cond	pH	eh	TDS	salinité	NS	Margelle
Falombo Forage	814184,664	1462053,72	278	6,14	101	168	0,2		
Mouran Forage	867685,566	1464761,02	192	6,03	275	119	0,1		
Dalato Forage	857183,706	1459825,41	455	6,73	-10	270	0,2		
Balakonko forage	857946,332	1455221,76	407	6,8	-16	240	0,2		
Missira Forage			470	6,21	140	281	0,3		
Khodonkhou Forage	855464,821	1430671,12	529	6,76	249	315	0,3		
KHONDOKHOU PUIITS	2188659,02	0	477	5,97	266	284	0,3		
Tinkoto Forage	813020,849	1430266,96	200	6,11	136	118	0,1		
Tinkoto Puits1	812350,795	1430229,97	208	6,23	294	124	0,1	3,2	0
Tinkoto Puits2		0	241	6,2	281	143	0,1	2	
<Null>	812257,87	1430621,89	0	0	0	0	0		
Tinkoto Puits3	812862,762	1430107,84	246	6,28	330	146	0,1	5,9	0,2
Tinkoto Puits 4	812860,233	1429956,22	108	5,47	380	65	0,1	1,05	
Tinkoto Rivière Amont	813164,501	1429981,8	47,8	5,89	283	25,6	0		
Tinkoto rivière Avale	812789,632	1429927,42	50,1	6,16	362	30,2	0		
Kanouméring F	806979,181	1426366,93	589	6,88	247	350	0,3		
Tomboronkoto Forage	793842,419	1416303,84	249	6,12	256	149	0,1		
Bantako Fleuve (lavage)	800248,999	1413960,75	52,5	7,62	270	30,8	0		
Bantako Fleuve Avale	800084,067	1414091,07	39	7,7	225	24,4	0		
Bantako Forage			817	6,81	295	487	0,4		
Ngari Sékoto Forage	798609,042	1399094,92	288	6,28	126	170	0,2		
Sekhoto			669	6,9	300	395	0,4		
Badian Forage	785766,119	1420545,34	629	6,8	183	368	0,3		
dalacoye Forage	781506,873	1418454,34	950	6,73	201	560	0,5		
Mako Forage	787089,952	1422006,35	739	6,97	202	439	0,4		

