



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE: 2023 - 2024

N° D'ORDRE:

.....

CANDIDAT

Nom : ATTE

Prénoms : Atté Guillaume

THESE DE DOCTORAT

Mention : Géosciences et Environnement

Spécialité : Hydrogéologie et SIG

Caractérisation hydrogéologique et potentialité en eau des aquifères fissurés des départements de Yamoussoukro et de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire): apport de la Télédétection, de la Géophysique et des Systèmes d'Information Géographique

JURY

Président : M. DIBI Brou, Professeur Titulaire, Université Jean Lorougnon GUEDE

Directeur: M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON GUEDE

Rapporteur : M. YOUAN TA Marc, Maître de Conférences, Université Felix HOUPHOUËT-BOIGNY

Examineur : M. MANGOUA Oi Mangoua Jules, Maître de Conférences, Université Jean Lorougnon GUEDE

Examineur : M. DOUAGUI Gountoh Aristide, Maître de Conférences, Université Nangui ABROGOUA

Soutenue publiquement le :

11 Janvier 2024

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
DEDICACE.....	vi
REMERCIEMENTS.....	vii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	3
CHAPITRE 1 : CONTEXTES ENVIRONNEMENTAL, GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DES DEPARTEMENTS DE YAMOUSOUKRO ET DE TOUMODI.....	4
1.1. Situation géographique de la zone d'étude.....	4
1.2. Caractéristiques physiques	5
1.2.1. Climat.....	5
1.2.2. Relief	6
1.2.3. Végétation	7
1.2.4. Hydrographie.....	7
1.2.5. Approvisionnement en eau potable	8
1.2.6. Sol	9
1.3. Caractéristiques humaines.....	10
1.4. Activités socio-économiques.....	10
1.5 Aperçu géologique et hydrogéologique	11
1.5.1. Aperçu géologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	11
1.5.2 Aperçu hydrogéologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	12
1.5.2.1 Réservoirs d'altérites.....	12
1.5.2.2 Réservoir de fissures et de fractures.....	13
Conclusion partielle.....	14
CHAPITRE 2 : SYNTHESE SUR LES TECHNOLOGIES ASSOCIÉES A LA CONNAISSANCE DES AQUIFÈRES DE SOCLE.....	15
2.1. Télédétection	15
2.2. Système d'informations Géographiques (SIG) et Analyse Multicritères (AMC).....	16

2.3. Géophysique.....	17
2.3.1 Méthode électrique.....	18
2.3.2 Méthodes de résistivité électrique.....	19
2.3.3 Dispositifs de mesure.....	19
2.3.4 Techniques de prospection électrique.....	20
2.3.5 Socle et milieux fissurés.....	20
2.3.6 Modèle conceptuel de la structure du profil d'altération des aquifères de socle.....	21
2.3.7 Description du profil d'altération en milieu de socle.....	21
Conclusion partielle.....	22
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES.....	23
CHAPITRE 3 : DONNEES ET MATERIEL.....	24
3.1 Données.....	24
3.1.1 Données images satellitaires.....	24
3.1.2 Données cartographiques.....	24
3.1.3 Données de fiches techniques de forages.....	24
3.1.4 Données hydroclimatiques.....	26
3.2 Matériel.....	26
3.2.1 Matériel de terrain.....	26
3.2.1.1 Matériel d'acquisition de données hydrogéologiques.....	26
3.2.1. 2 Matériel de prospection géophysique.....	28
3.2.2 Matériel de traitement de données.....	30
Conclusion partielle.....	30
CHAPITRE 4 : APPROCHE METHODOLOGIQUE.....	31
4.1 Méthode de caractérisation des aquifères des départements de Yamoussoukro et de Toumodi.....	31
4.1.1 Analyse des paramètres de forages.....	31
4.1.1.1 Débit (m ³ /h).....	31
4.1.1.2 Profondeur totale de l'ouvrage (m).....	31
4.1.1.3 Epaisseur d'Altérites (m).....	32
4.1.1.4 Niveau statique (m).....	32
4.1.2 Evaluation des paramètres hydrodynamiques.....	32

4.1.2.1 Détermination de la transmissivité	32
4.1.2.2 Détermination de la conductivité hydraulique et la porosité de la couche d'altérite ...	33
4.1.2.3 Détermination de la conductivité hydraulique de la couche fissurée	35
4.1.3 Analyse de la piézométrie	35
4.1.4 Analyse de la productivité des aquifères	37
4.2 Méthode d'élaboration du modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	39
4.2.1 Méthode d'élaboration du modèle conceptuel géologique	39
4.2.2 Elaboration du modèle conceptuel géoélectrique.....	39
4.2.2.1 Modèle électrique à l'échelle du forage	39
4.2.2.2.1 Réalisation du profil d'altération en 2D.....	41
4.2.2.2.2 Prétraitements et traitement des données	43
4.3 Méthodologie de cartographie des zones de potentialités en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	44
4.3.1 Estimation de la recharge	44
4.3.1.1 Estimation de l'ETP par la méthode Thornthwaite	45
4.3.1.2 Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	46
4.3.1.3 Estimation de la lame d'eau ruisselée R.....	46
4.3.1.4 Evaluation de l'infiltration	46
4.3.2. Cartographie des linéaments des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	47
4.3.2.1. Prétraitements des images Landsat 8 / OLI_TIRS.....	47
4.3.2.2 Traitement numérique des images pour l'extraction des linéaments	48
4.3.2.3 Validation de la carte des linéaments et analyse statistique de la fracturation.....	51
4.3.3 Mise en œuvre de l'analyse multicritère	52
4.3.3.1 Identification et élaboration des critères de décision	53
4.3.3.2 Classification et standardisation des critères de décision.....	55
4.3.3.3 Evaluation spatiale des critères de décision	58
4.3.3.4 Pondération des critères	59
4.3.3.5 Agrégation des critères.....	63
4.3.3.6 Etablissement de la carte des zones favorables à gros débits.....	64
4.3.3.7 Validations des différentes cartes thématiques	64
Conclusion partielle.....	66
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION.....	67

CHAPITRE 5 : CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE DES AQUIFERE DES DEPARTEMENTS DE YAMOUSSOUKRO ET DE TOUMODI	73
5.1. Analyse descriptive des paramètres de forages	73
5.1.1 Analyse des débits	73
5.1.2 Relation débits et profondeurs.....	73
5.1.3 Relation débits et épaisseurs d'altération.....	74
5.1.4 Analyse des premières arrivées d'eau	74
5.1.5 Corrélation entre épaisseur d'altérite et profondeur totale.....	75
5.1.6 Niveau statique	75
5.2 Analyse des paramètres hydrodynamiques	76
5.2.1 paramètres hydrodynamiques des aquifères d'altérites.....	76
5.2.1.1 Perméabilités des couches altérites	76
5.2.1.2 Porosité des couches d'altérites.....	77
5.2.2 Paramètres hydrodynamiques des aquifères fissurés	78
5.2.2.1 Transmissivité de la frange fissurée	78
5.2.2.2 Perméabilité de la frange fissurée	80
5.3 Piézométrie.....	81
5.4 Analyse statistique des paramètres hydrodynamiques avec la méthode SOM	81
5.6 Discussion	85
Conclusion partielle.....	87
CHAPITRE 6 : MODELE CONCEPTUEL HYDROGEOLOGIQUE DES AQUIFERES DE FISSURE DES DEPARTEMENTS DE YAMOUSSOUKRO ET DE TOUMODI..	89
6.1 Modèle conceptuel géologique.....	89
6.1.1 Analyse des Logs de forages	89
6.1.2 Bloc diagramme géologique.....	90
6.2 Modèle conceptuel géoélectrique du système aquifère.....	92
6.2.1 Courbes de sondage électrique à l'échelle du forage	92
6.2.2 Analyse géophysique.....	95
6.3 Comparaison des résultats géophysiques et des résultats des forages	97
6.4. Discussion	99
Conclusion partielle.....	101

CHAPITRE 7 : CARTOGRAPHIE DES ZONES DE POTENTIALITES EN EAU SOUTERRAINE DES DEPARTEMENTS DE YAMO USSOUKRO ET DE TOUMODI	102
7.1 Bilan hydrologique	102
7.2 Cartographie des structures linéamentaires	102
7.2.1 Validation de la carte des linéaments	103
7.2.2 Analyse statistique des fractures	104
7.2.3 Distribution des intensités de fractures	105
7.3 Potentialités en eau souterraine	106
7.3.1 Disponibilité des ressources en eau souterraine	106
7.3.2 Accessibilité des ressources en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	108
7.3.3 Exploitableté des ressources en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	110
7.3.4 Carte des sites potentiels en eau souterraine	111
7.4 Discussion	113
Conclusion partielle.....	115
CONCLUSION GENERALE	116
REFERENCES	121
PUBLICATIONS ISSUES DE LA THESE	xv

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

*la mémoire de mon père, feu ACHI Atté Emile,
et de ma mère, feu KOFFI Oro Agathe,
qui demeurent à jamais présents dans mon cœur.*

*Mon épouse KEITA Affoué Marie-Josée, pour son amour, son soutien indéfectible et sa
patience.*

*ainsi qu'à mes enfants ATTE Oro Marie Ashley, ATTE Nsimire Leslie, Feu ATTE N'Takpé
Emmanuel Dereck, ATTE N'Dah Samuel Pharrel et ATTE Amanie Chloé Joana , sources de
joie, de motivation et d'espérance.*

*Enfin à la grande famille ATTE, mes frères et sœurs, pour leur affection et leur soutien
constant.*

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes celles et à tous ceux qui, par leur appui scientifique, leur soutien moral, financier ou affectif, ont contribué à la réalisation de cette thèse.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) pour leur appui institutionnel tout au long de ce parcours académique.

Je témoigne une reconnaissance toute particulière à Madame le Professeur ADOHI Adjo épouse KROU Viviane, Présidente de l'UJLoG, pour m'avoir offert l'opportunité et les conditions favorables à la réalisation de cette thèse au sein de cette prestigieuse université.

J'exprime ma profonde reconnaissance au Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, que j'ai toujours appelé, avec respect et affection « *Président* », Professeur titulaire et Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement, pour sa disponibilité constante, ses conseils avisés et surtout pour m'avoir accordé l'honneur d'intégrer l'UFR qu'il dirige avec rigueur et bienveillance.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude au Professeur DIBI Brou, Professeur titulaire et Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) au sein de l'UFR Environnement. Je le remercie non seulement de m'avoir accueilli au sein du laboratoire qu'il dirige avec compétence et ouverture, mais également pour sa grande disponibilité et la qualité de nos échanges, dont la richesse a contribué de manière significative à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie tout particulièrement le Docteur KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences et responsable du conseil pédagogique de l'UFR Environnement, pour avoir accepté d'encadrer cette thèse. Je lui suis reconnaissant pour la justesse de ses conseils, la pertinence de ses orientations et la constance de ses encouragements, qui ont grandement contribué à l'avancement et à la qualité de ce travail.

J'adresse également ma profonde gratitude à l'ensemble des enseignants de l'UFR Environnement pour le savoir transmis, la rigueur intellectuelle partagée et l'accompagnement dont j'ai bénéficié tout au long de mon parcours académique.

Je tiens à remercier l'ensemble des instructeurs ainsi que les membres du jury de ce mémoire pour le temps précieux qu'ils m'ont consacré, ainsi que pour la qualité de leurs observations et suggestions. Leurs remarques pertinentes ont largement contribué à l'enrichissement et à l'amélioration de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères vont au Professeur KOITA Mahamadou, Professeur titulaire et Directeur des Enseignements et des Affaires Académiques à l'Institut International

d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) de Ouagadougou (Burkina Faso), pour ses orientations éclairées et ses conseils avisés, qui ont grandement contribué à l'enrichissement de ce travail.

Je remercie également les Docteurs KOUASSI Kouamé Auguste, KOUADIO Zilé Alex, DOUAGUI Gountôh Aristide et AFFOUE Berthe, tous Maîtres de Conférences, ainsi que SORO Tanina Drissa et KOUAME Yao Morton, Maîtres-Assistants, pour leurs précieux conseils et leurs contributions significatives. Par leurs lectures attentives et leurs remarques pertinentes, ils ont contribué à enrichir et à améliorer de manière substantielle la qualité de ce mémoire.

Je remercie tout particulièrement le Docteur TSHISUAKA Yonie Yowa pour son soutien constant tout au long de ce parcours. Ses encouragements, toujours opportuns, ont été pour moi une précieuse source de motivation et m'ont permis de mener ce travail à son terme.

Ma gratitude va également à mes amis ADIA Touchard Jacque, KOUROUMA Namory et AKA Okou Konan Patrice, pour leurs paroles bienveillantes et leur soutien moral, qui m'ont accompagné dans les moments de doute comme dans les instants de persévérance.

Enfin, à toutes celles et tous ceux dont les noms ne sont pas expressément cités ici, je présente mes excuses et leur adresse mes remerciements les plus sincères, avec toute ma reconnaissance.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP	: Analyse en Composantes Principales
AEP	: Alimentation en Eau Potable
AHP	: Analyse Hiérarchique des Procédés
AMC	: Analyse Multicritères
BMU	: Best Matching Unit
CAH	: Classification Ascendante Hiérarchique
CIE	: Compagnie Ivoirienne d'Electricité
CIEH	: Comité Inter-africain d'Etudes Hydrauliques
CPCS	: Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
DHH	: Direction de l'Hydraulique Humaine
ESRI	: Environmental Systems Research Institute
ETM+	: Enhanced Thematic Mapper Plus
ETP	: Evapotranspiration Potentielle
ETR	: Evapotranspiration Réelle
GEE	: Génie de l'Eau et de l'Environnement
GPS	: Système de Positionnement Mondial
HV	: Hydraulique Villageoise
HVA	: Hydraulique Villageoise Améliorée
INPHB	: Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny
INS	: Institut National de la Statistique
LSTE	: Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
NRMS	: Normalised Root Mean Square
OLI	: Imageur Terrestre Opérationnel
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
ONEP	: Office National de l'Eau Potable
PCR	: Plan Cadre de Réinstallation
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le Développement
PRC	: Projet Riz Centre
PRICI	: Projet de Renaissance des Infrastructures et de gestion urbaine en Côte d'Ivoire

RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RMS	: Moyenne quadratique
SIG	: Système d'Information Géographique
SODECI	: Société de Distribution d'Eau de la Côte d'Ivoire
SODEXAM	: Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
SOM	: Cartes auto-organisées
SRTM	: Mission topographique radar de la navette
UFR	: Unité de Formation et de Recherche
UJLoG	: Université Jean LOROUGNON GUEDE
UNESCO	: Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
UNICEF	: Fonds des Nations Unies pour l'Enfance
VER	: Volume Elémentaire Représentatif
VGE	: Valéry Giscard d'Estaing

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Matrice 7 X 7 des filtres directionnels de Sobel	50
Tableau II: Classification et standardisation des critères de disponibilité (Youan Ta et al., 2011 ; Yao et al., 2016)	57
Tableau III: Classification et standardisation des critères d'exploitabilité et d'accessibilité (Youan Ta et al., 2011 ; Yao et al., 2016)	58
Tableau IV: Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de critères (Elmorjani, 2003)	60
Tableau V: Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des critères des indicateurs de disponibilité.....	61
Tableau VI: Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des critères des indicateurs d'accessibilité et d'exploitabilité	61
Tableau VII : Indice aléatoire (Saaty, 1980)	62
Tableau VIII: Vérification de la cohérence des jugements de disponibilité	62
Tableau IX: Vérification de la cohérence des jugements d'accessibilité.....	63
Tableau X: Vérification de la cohérence des jugements d'exploitabilité.....	63
Tableau XI: Résultats statistiques des débits en fonction des classes du C.I.E.H.....	73
Tableau XII: Fréquence des niveaux statiques en fonction des profondeurs	76
Tableau XIII: Caractéristiques des valeurs de perméabilité des couches d'altérites	76
Tableau XIV: Caractéristiques des valeurs de porosité des couches d'altérites.....	77
Tableau XV : caractéristiques des valeurs de transmissivité de la frange fissurée.....	78
Tableau XVI: Tableau des fréquences de transmissivité.....	79
Tableau XVII: Caractéristiques des valeurs de perméabilité de la frange fissurée	80
Tableau XVIII: Erreurs de quantification (EQ) et de topologie (ET) des différentes tailles de carte de Kohonen.....	82
Tableau XIX: Bilan hydrologique (1974-2019), station de Yamoussoukro.....	102
Tableau XX : Statistiques des paramètres de disponibilité en eau souterraine.....	108
Tableau XXI: Statistique des paramètres d'accessibilité en eau souterraine.....	109
Tableau XXII: Statistiques des paramètres d'exploitabilité en eau souterraine.....	111
Tableau XXIII: Statistiques des indicateurs de potentialité en eau souterraine	112

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Présentation de la zone d'étude	4
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la zone d'étude (2000-2020) (Gnazalé, 2020).....	5
Figure 3: Carte du modèle numérique de terrain des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	6
Figure 4 : Réseau hydrographique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	8
Figure 5 : Ouvrages d'approvisionnement en eau potable (23/02/2021).....	9
Figure 6 : Carte géologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi (Tagini, 1971)	12
Figure 7 : Schéma simplifié des aquifères sur socle cristallin (Lachassagne et al., 2011).	14
Figure 8: Repartition des forages sur la zone d'étude	25
Figure 9: Prise de niveau d'eau dans un forage non fonctionnel à Amonkro.....	27
Figure 10: GPS portatif	27
Figure 11: Infiltromètre double anneaux	28
Figure 12: Tarière.....	28
Figure 13: Matériel de prospection géophysique	29
Figure 14: Carte des points de mesure	33
Figure 15 : Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique de la couche superficielle..	34
Figure 16: Carte de campagne piézométrique.....	36
Figure 17: Schéma simplifié de la carte auto-organisatrice de Kohonen(Aguilar, 2004).....	37
Figure 18: Hiérarchisation d'une classification non supervisée (Rousseau et al., 2007)	39
Figure 19 : interprétation automatique de données de sondage(Marescot, 2009).....	40
Figure 20 : Situation géographique des localités prospectées.....	41
Figure 21: Séquence de mesure pour construire une pseudo-section (Geotomo, 2002).....	42
Figure 22: Image brute	47
Figure 23: Traitement en composition colorée	49
Figure 24: Image réhaussée.....	50
Figure 25: Organigramme général du traitement et de l'extraction des linéaments.....	52
Figure 26: Synthèse de la mise en oeuvre de l'analyse multicritères	65
Figure 27: Evolution des débits en fonction des profondeurs totales de forages.....	73
Figure 28: Evolution des débits en fonction des épaisseurs d'altérites	74
Figure 29: Histogramme des fréquences d'observation des premières arrivées d'eau.....	75
Figure 30: Relation entre l'épaisseur d'altérite et la profondeur totale.....	75
Figure 31 : Carte de répartition des valeurs de perméabilités dans les couches d'altérites	77
Figure 32: Carte des répartitions des porosités dans les altérites.....	78
Figure 33 : Carte de répartition des valeurs de transmissivité de la frange fissurée	79
Figure 34 : Carte de répartition des valeurs de perméabilité dans la frange fissurée.....	80
Figure 35 : Carte piézométrique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi, Décembre 2022)	81
Figure 36: Carte de Kohonen issue de la matrice 7 *5 (35 cellules).....	82
Figure 37: Dendrogramme de classification hiérarchique des cellules de la carte de Kohonen	83
Figure 38 : Distribution des forages sur la carte de Kohonen à partir des paramètres hydrodynamiques	83
Figure 39 : Gradient de valeur de chaque paramètre hydrodynamique sur la carte de Kohonen	85

Figure 40 : Modèle conceptuel géologique	90
Figure 41 : Blocs diagrammes géologiques réalisés à partir des résultats des forages	91
Figure 42 : Courbe sondage électrique de type A : exemple de SE1 à Adaou	92
Figure 43 : courbe sondage électrique de type H : exemple de SE1 à Tontonoukoffikro	93
Figure 44 : Courbe sondage électrique de type KH : exemple de SE1 à Loukoukro.....	94
Figure 45: Profils TRE des résistivités électriques de Amonkro	95
Figure 46: Profils TRE des résistivités électriques de Mougna	96
Figure 47: Profils TRE des résistivités électriques de Konan-Kouadiokro	97
Figure 48 : Comparaison du bloc diagramme géoélectrique et géologique	98
Figure 49 : Carte détaillée des linéaments des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	103
Figure 50 : Superposition des forages implantés à l'aide de la géophysique aux fractures majeures	104
Figure 51 : Rosace directionnelle des fractures	105
Figure 52 : Carte de la densité de fracturation des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	106
Figure 53 : Carte de disponibilité en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	107
Figure 54 : Carte d'accessibilité en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	109
Figure 55 : Carte d'exploitabilité en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi	110
Figure 56 : Carte des zones favorables à l'implantation des forages	112

INTRODUCTION

L'eau constitue un élément naturel vital, indispensable à la satisfaction des besoins fondamentaux de l'être humain, tout en représentant un levier essentiel du développement socio-économique. Toutefois, l'accès à l'eau potable demeure une préoccupation majeure à l'échelle mondiale, suscitant l'inquiétude persistante des autorités et des acteurs du développement. En effet, selon l'UNICEF (2017), près de 30 % de la population mondiale ne disposent toujours pas d'un accès sûr à l'eau potable.

Dans les pays en développement, l'accès à une eau potable constitue l'un des enjeux prioritaires des projets de développement. Par ailleurs, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2020) estime que 42 % de la population d'Afrique subsaharienne ne bénéficie toujours pas d'un accès à une eau de qualité, ce qui souligne l'ampleur des défis à relever dans cette région.

Dans ces pays, les eaux souterraines constituent souvent la principale source d'approvisionnement en eau potable pour la population. La nappe phréatique, localisée dans le socle rocheux, présente une perméabilité due à la présence de fissures. Plusieurs études, notamment celles de Wyns (2020) et de Lachassagne *et al.* (2021), ont montré que l'eau de ces milieux s'accumule dans deux réservoirs majeurs : les réservoirs de roches altérées, caractérisés principalement par des propriétés capacitives, et les réservoirs plus profonds liés aux fissures, présentant des caractéristiques conductrices. Selon Lachassagne *et al.* (2021), cet aquifère complexe bénéficie d'une bonne dispersion de l'eau. Ainsi, face à la demande croissante en eau potable et à la dégradation de la qualité des eaux de surface, cette ressource souterraine constitue un apport complémentaire essentiel. L'exploration initiale de ces ressources s'est principalement focalisée sur les couches superficielles, notamment les aquifères d'altérites, car le rôle hydraulique des fractures profondes était alors peu connu ou sous-estimé (Kouadio, 2022).

En Côte d'Ivoire, notamment dans les principaux centres urbains situés en zone de socle, les eaux de surface, bien que disponibles en abondance, sont couramment utilisées pour l'approvisionnement en eau potable (Ahoussi, 2008). Cependant, ces eaux présentent souvent une qualité physico-chimique et bactériologique incertaine, nécessitant des traitements coûteux et complexes. C'est dans ce contexte que, depuis les années 1970, la Côte d'Ivoire a mis en œuvre un programme d'approvisionnement en eau potable fondé sur l'exploitation des réservoirs souterrains (AEP). De nombreuses études ont été menées à cet effet, parmi lesquelles celles récentes de Koita (2010), Ouedraogo (2016), Mangoua *et al.* (2019), Tagnon *et al.* (2020), Kamenan (2021), Ouattara (2022), Kouadio (2022) et Kokobou (2023).

Malgré ces efforts soutenus du gouvernement, l'accès à une eau potable de qualité demeure encore un défi majeur dans certaines régions du pays.

Dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, situés sur le socle cristallin, l'approvisionnement en eau potable de la population repose essentiellement sur les eaux souterraines issues des nappes fracturées. Toutefois, près de 65 % des forages réalisés dans cette région se sont révélés infructueux (Soro *et al.*, 2010). Ce taux élevé d'échec suscite un vif intérêt scientifique et soulève d'importantes interrogations quant à la compréhension et à la modélisation du comportement complexe des aquifères fracturés.

Selon Amaya *et al.* (2019), cités par Kouadio (2022), ces échecs sont en grande partie imputables à l'insuffisance d'études approfondies visant à mieux caractériser et comprendre la structure ainsi que le comportement hydrodynamique de ces aquifères, une étape incontournable pour une gestion efficace de ces ressources. En effet, dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, aucun travail approfondi n'a encore été réalisé pour élucider le fonctionnement de ces aquifères, particulièrement dans le contexte des changements environnementaux persistants.

Dès lors, une question fondamentale se pose : quels sont les paramètres descriptifs, tels que la fonction de stockage de l'eau et la conductivité hydraulique, ainsi que la géométrie à considérer afin de comprendre pleinement le fonctionnement d'un aquifère fracturé ?

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude, intitulée : «Caractérisation hydrogéologique et potentialité en eau des aquifères fissurés des départements de Yamoussoukro et de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire) : apport de la télédétection, de la géophysique et des systèmes d'information géographique ».

Elle a été initiée dans le but de contribuer à une meilleure compréhension de ces aquifères complexes, en mobilisant des outils modernes d'analyse et d'aide à la décision.

L'objectif général de cette étude est de caractériser les propriétés géologiques et hydrodynamiques des aquifères de socle dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, en vue d'améliorer les connaissances nécessaires à l'implantation optimale de forages à gros débits en zone fissurée.

Pour atteindre cet objectif général, plusieurs objectifs spécifiques ont été définis :

- caractériser le système aquifère des départements de Yamoussoukro et de Toumodi, afin de mieux comprendre son fonctionnement hydrodynamique ;
- élaborer un modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères, en vue de simuler le comportement global du système aquifère dans ces deux départements ;

Introduction

- cartographier les zones à fort potentiel en eau souterraine, afin de mettre en évidence les facteurs favorables à la présence de l'eau dans le système aquifère des départements de Yamoussoukro et de Toumodi.

Ce mémoire est structuré en trois (3) parties principales, organisées comme suit :

- La première partie est consacrée aux généralités sur la zone d'étude. Elle aborde les principaux aspects géographiques, physiographiques, hydroclimatiques, géologiques et hydrogéologiques ;
- La deuxième partie présente les différentes données mobilisées, ainsi que le matériel et les méthodes utilisés pour la réalisation de l'étude ;
- La troisième partie est dédiée à l'analyse des résultats obtenus, accompagnée d'une discussion critique.

Le mémoire s'achève par une conclusion générale, qui synthétise les résultats majeurs, suivie de recommandations, de perspectives de recherche et de la liste des références bibliographiques.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

CHAPITRE 1 : CONTEXTES ENVIRONNEMENTAL, GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DES DEPARTEMENTS DE YAMOUSSOUKRO ET DE TOUMODI

1.1. Situation géographique de la zone d'étude

La zone d'étude couvre les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, situés au centre de la Côte d'Ivoire, entre 4°04' et 5°30' de longitude Ouest et 6°12' à 7°09' de latitude Nord (Figure 1). Elle est délimitée :

- à l'Ouest par les départements d'Oumé et de Bouaflé,
- à l'Est par ceux de Dimbokro et de M'Batto,
- au Nord par Tiébissou et Didiévi,
- et au Sud par Taabo.

L'ensemble comprend dix (10) sous-préfectures : Bonikro, Pkouebo, Angonda, Kossou, Attiegouakro, Lolobo, Kokoumbo, Djekanou, Toumodi et Yamoussoukro.

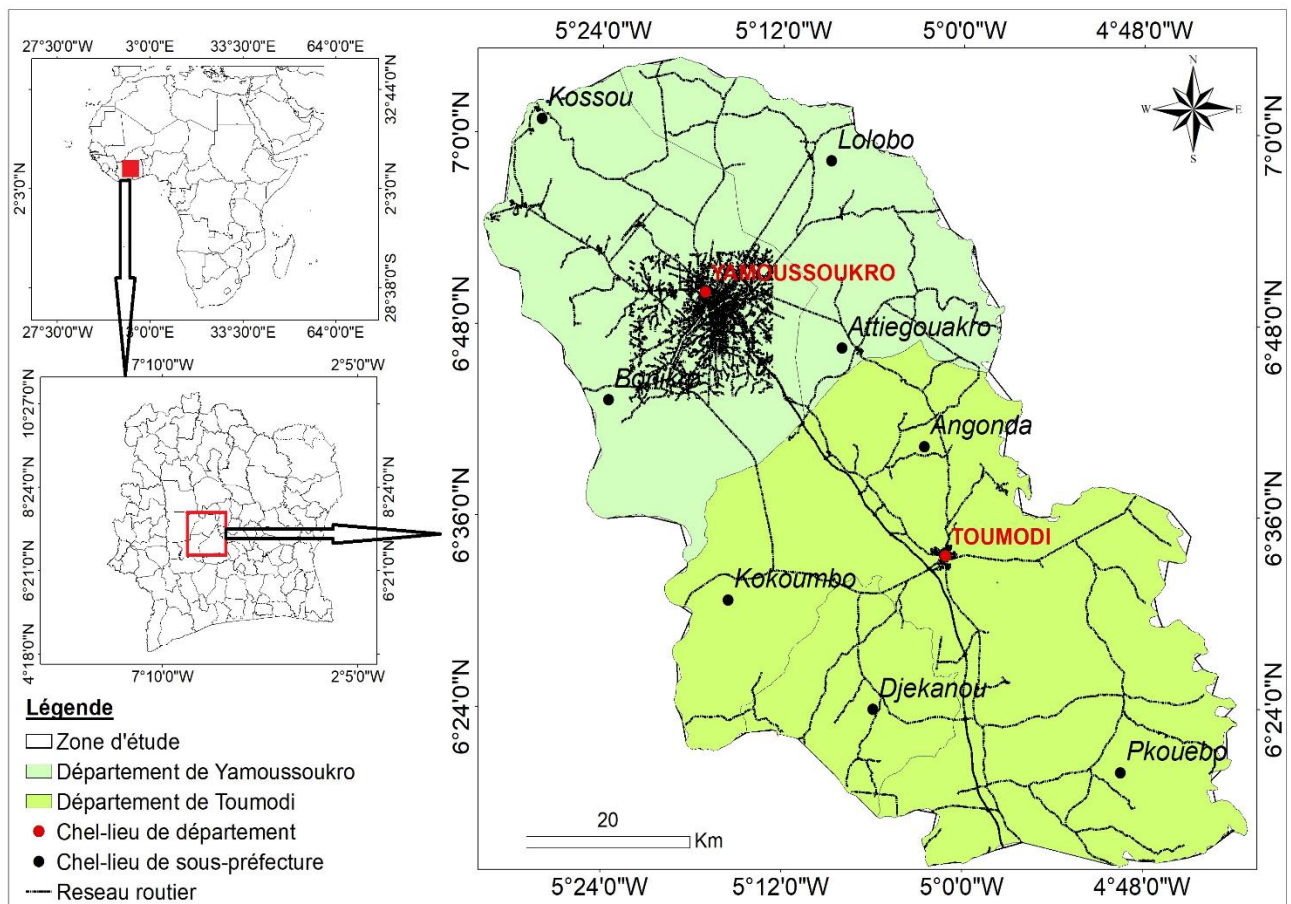


Figure 1: Présentation de la zone d'étude

1.2. Caractéristiques physiques

1.2.1. Climat

Le climat des départements de Yamoussoukro et de Toumodi est de type équatorial humide, selon la classification de N'Guessan *et al.* (2014). Il se caractérise par deux grandes saisons :

- une saison sèche, s'étendant de novembre à mi-mars,
- et une saison des pluies, allant de mi-mars à fin octobre.

Les précipitations annuelles varient généralement entre 900 et 1600 mm (Figure 2). Sur le plan mensuel, deux pics pluviométriques sont observés, respectivement en juin et en septembre, traduisant un régime bimodal typique du centre ivoirien.

La température moyenne annuelle avoisine 28 °C. La période la plus chaude de l'année s'étend de janvier à mars, tandis que les mois d'août et de septembre correspondent à la période la plus humide.

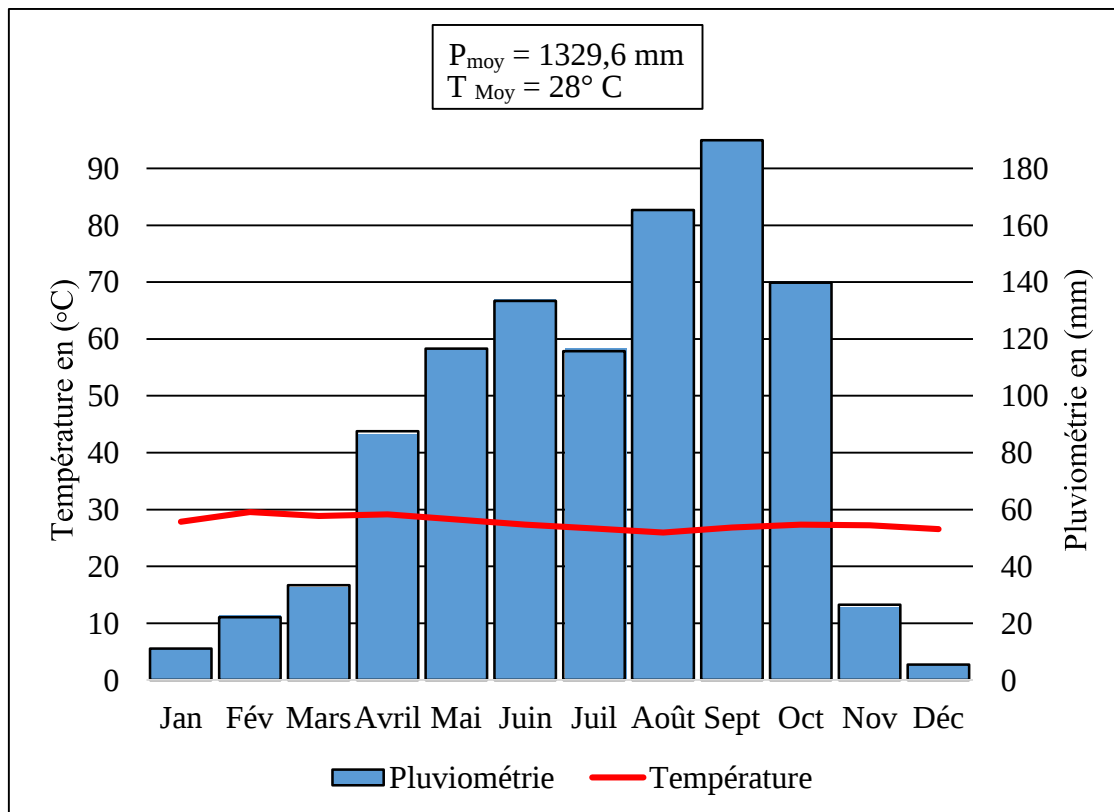


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la zone d'étude (2000-2020) (Gnazalé, 2020)

1.2.2. Relief

Le relief de la zone d'étude se présente sous la forme d'un plateau légèrement vallonné, typique des régions de savane boisée du centre de la Côte d'Ivoire. Ce relief a été mis en évidence à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 30 mètres, obtenu via une plateforme de la NASA (<ftp://eosrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Africa>). L'analyse de ce MNT montre que le terrain est globalement peu accidenté (Figure 3), ce qui corrobore les observations précédentes de Leblond (1984).

Les altitudes dominantes dans la zone varient entre 100 et 300 mètres. Cependant, des élévations plus marquées sont observées dans certaines zones particulières :

- à l'Est, la présence de la chaîne de collines de Fêtékro marque le domaine des hauts plateaux (Kouassi, 2007),
- au Sud du barrage de Kossou, les altitudes peuvent dépasser 600 mètres (Kouassi, 2007).

Ce relief relativement monotone favorise la stagnation des eaux, ce qui peut conduire à des phénomènes d'infiltration ou d'évaporation, selon la perméabilité du sous-sol et l'intensité de l'évapotranspiration (Kouassi, 2007).

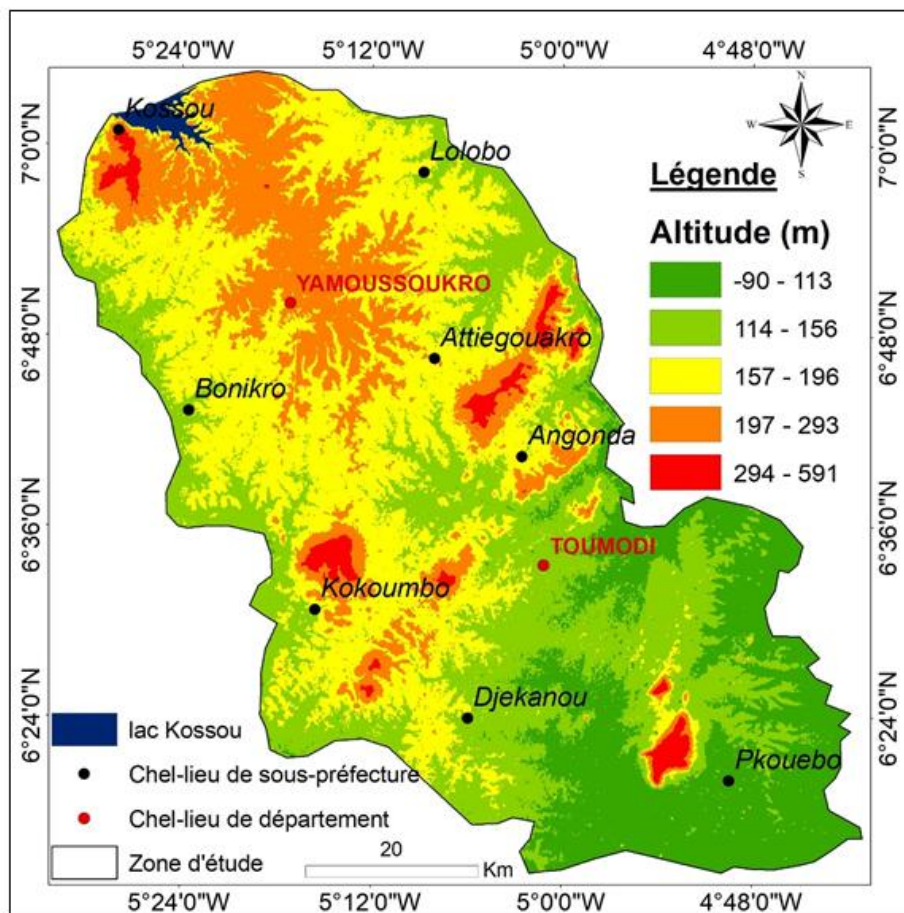


Figure 3: Carte du modèle numérique de terrain des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

1.2.3. Végétation

La végétation des départements de Yamoussoukro et de Toumodi appartient au domaine guinéen, caractéristique des zones de transition entre la forêt humide du sud et la savane du nord. Cette région présente une savane pré-forestière, marquant une zone de transition écologique. Elle est constituée de prairies herbeuses parsemées de petits arbres, entrecoupées de forêts résiduelles, d'îlots forestiers et de forêts-galeries qui s'étendent le long des cours d'eau (Kokobou, 2023).

Sur les sols sableux bien drainés, on observe la présence de peuplements de palmiers, associés à des prairies d'herbes hautes, témoignant d'une végétation adaptée aux variations locales de texture du sol et du drainage (Gnazalé, 2020).

1.2.4. Hydrographie

Le réseau hydrologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi est constitué de nombreux plans d'eau, dominés principalement par les rivières Marahoué (également appelée Bandama Rouge) et du N'zi, tous deux affluents du fleuve Bandama (Figure 4).

La zone comprend également plusieurs barrages à vocation agricole, ainsi qu'un important barrage hydroélectrique, le barrage de Kossou, érigé sur la Marahoué, au nord-ouest de Yamoussoukro.

Par ailleurs, plusieurs cours d'eau permanents structurent le territoire, parmi lesquels :

- le Kpoussouba, le Tanoba, le Kloglo et le Raret, qui traversent respectivement les villages de Subiaklo, Zambakro et Kacoubroukro ;
- l'Agbahan et le Gbédrikan, qui s'écoulent dans la localité d'Attiegouakro.

Enfin, deux grandes étendues d'eau se distinguent par leur superficie : le lac de Kossou, formé par le barrage éponyme, et le Praha, affluent du N'zi (Akmel, 2013).

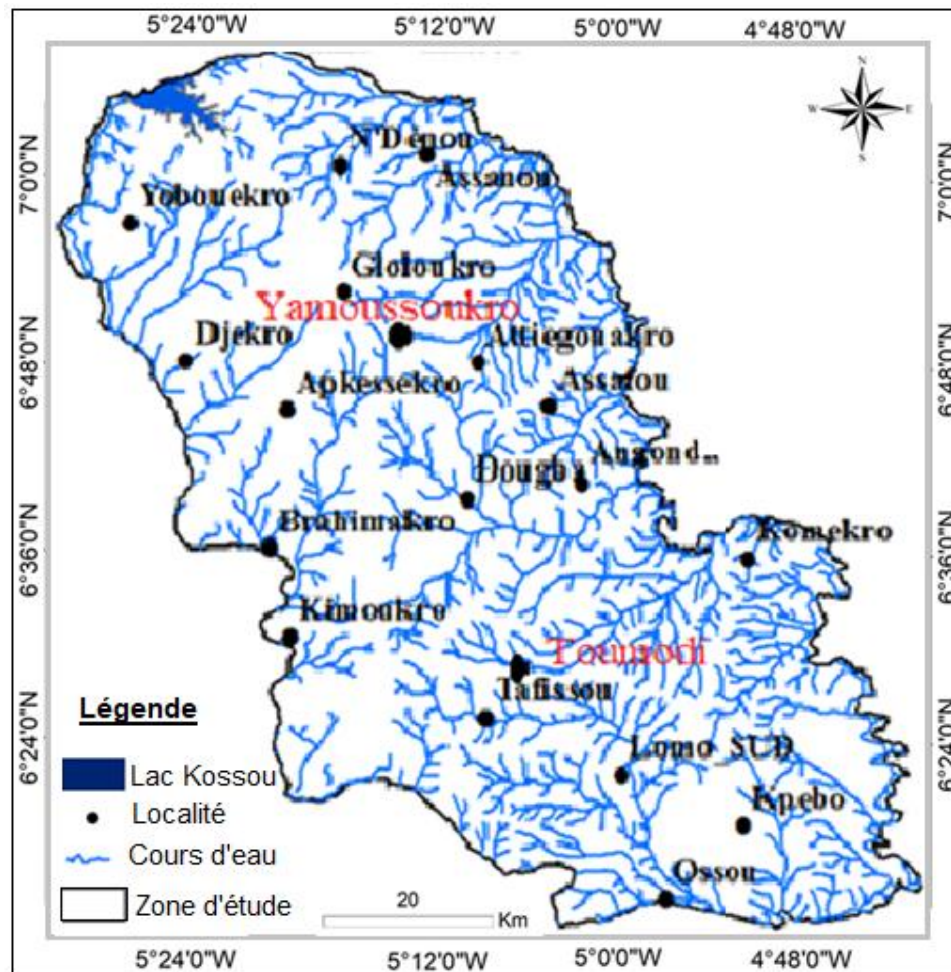


Figure 4 : Réseau hydrographique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

1.2.5. Approvisionnement en eau potable

L'approvisionnement en eau potable des populations des départements de Yamoussoukro et de Toumodi repose à la fois sur les eaux de surface et les eaux souterraines.

Dans les grandes agglomérations, l'eau potable provient principalement des eaux de surface, captées et traitées à la station de traitement d'eau potable Valéry Giscard d'Estaing 2 (VGE2) située à Yamoussoukro (PRICI, 2016).

En revanche, les zones rurales sont majoritairement alimentées par les eaux souterraines, issues de puits modernes, de forages équipés de pompes à motricité humaine, ou encore de puits traditionnels creusés manuellement.

Ces ouvrages exploitent deux types de réservoirs :

- les puits sont généralement creusés dans la roche altérée ;
- les forages, quant à eux, atteignent la roche fissurée et fracturée.

Les aquifères ainsi exploités offrent un débit moyen n'excédant pas 3,2 m³/h (Leblond, 1984), ce qui limite leur usage essentiellement à la consommation domestique quotidienne dans les zones rurales.

Ce dispositif s'inscrit dans le cadre des systèmes d'Hydraulique Villageoise (HV) et d'Hydraulique Villageoise Améliorée (HVA), destinés à desservir des localités comptant entre 1 000 et 4 000 habitants. Ainsi, les sous-préfectures ainsi que plusieurs localités bénéficient des systèmes HVA (Figure 5a et Figure 5b), tandis que d'autres zones rurales sont approvisionnées via les forages du programme HV et les puits traditionnels (Figure 5c et Figure 5d).

Malgré ces installations, certaines localités continuent toutefois de rencontrer des difficultés d'accès à l'eau potable, révélant des disparités persistantes dans la couverture des besoins en eau.



Figure 5 : Ouvrages d'approvisionnement en eau potable (23/02/2021)
a : Château à Kokoumbo, b : HVA à Angonda, c : PMH à Blaisekro, d : Puits à Amonkro

I.2.6. Sol

Les départements de Toumodi et de Yamoussoukro sont situés sur la pénéplaine granito-gneissique du socle de l'Afrique de l'Ouest (Gnazalé, 2020). Cette région géologique se distingue par la présence de sols argileux, granitiques et sableux, ainsi que par des formations

volcano-sédimentaires éburnéennes constituées de métavulcanites, de métasédiments et de granitoïdes éburnéens (N'Guessan *et al.*, 2014).

On y distingue principalement trois grands types de sols :

- des sols argileux, sablo-humifères ou hydromorphes, généralement localisés à proximité des cours d'eau ;
- des sols ferralitiques, développés sur la roche mère granitique, typiques des zones forestières, des bas-fonds et des abords du fleuve Bandama ;
- et des sols issus de roches basiques, souvent associés à des cuirasses ferrugineuses, caractéristiques des zones de savane, parfois riches en ressources minières.

1.3. Caractéristiques humaines

Les départements de Yamoussoukro et de Toumodi totalisent une population de 627 716 habitants, avec une moyenne de cinq individus par ménage (RGPH, 2021). Cette zone se distingue par une forte proportion de population jeune, avec plus de 56,46 % des résidents qui ont moins de 20 ans (PRICI, 2016). Conformément aux tendances observées au niveau national, la ville de Yamoussoukro a connu une croissance démographique soutenue, estimée à 2,26 % par an, ainsi qu'un taux d'urbanisation d'environ 66,9 % sur la période 1998-2014 (INS, 2021). Par ailleurs, au-delà des populations autochtones Akoué et Nanafoué, la région accueille une population non autochtone et étrangère représentant plus de 17 % des habitants. Ces dernières sont essentiellement composées de communautés originaires du Burkina Faso, du Mali, du Bénin, du Nigeria, de Guinée, du Sénégal, du Ghana, du Togo et de Mauritanie (INS, 2021).

1.4. Activités socio-économiques

Les départements de Yamoussoukro et de Toumodi se caractérisent par une diversification progressive de leurs activités économiques, dominées par les secteurs agricole, commercial et professionnel. Les activités commerciales et professionnelles se concentrent principalement dans les chefs-lieux communaux et sous-préfectoraux, où se trouvent les principales infrastructures administratives et économiques. À l'inverse, les activités agricoles relèvent majoritairement des populations rurales et regroupent les métiers de cultivateurs, planteurs et pêcheurs.

L'économie agricole locale repose à la fois sur les cultures de rente et les cultures vivrières. Les principales spéculations de rente comprennent le café, le cacao, le palmier à huile, l'anacarde et l'hévéa, qui occupent une place stratégique dans les dynamiques d'exportation et de développement rural. En parallèle, les cultures vivrières telles que l'igname, le manioc, la

banane plantain, l'arachide, le maïs et le riz, assurent la sécurité alimentaire des ménages. L'élevage constitue un autre pilier de l'économie locale, incluant les filières bovine, caprine, porcine, avicole et piscicole.

Sur le plan industriel, la localité de Zatta abrite plusieurs unités de transformation, parmi lesquelles une égreneuse de coton, une entreprise spécialisée dans le traitement du bois, ainsi qu'un centre de stockage de produits pétroliers (Gnazalé, 2020). Ces installations témoignent d'un début d'industrialisation ancré dans les dynamiques agricoles et forestières de la région.

Par ailleurs, la présence de services administratifs déconcentrés, tels que les directions régionales et départementales des ministères, renforce le rôle de ces départements dans la gouvernance locale. À ces structures étatiques s'ajoutent les représentations locales de grandes entreprises de service public, notamment la SODECI, la CIE et Côte d'Ivoire Télécom, contribuant à l'ancrage institutionnel et à la fourniture des services essentiels.

Enfin, les départements de Yamoussoukro et de Toumodi disposent d'un important patrimoine touristique, aussi bien naturel que culturel. Parmi les sites les plus emblématiques figurent la réserve de faune d'Abokouamékro, la chaîne montagneuse Baoulé, la colline Nani Oka de Gbofia offrant une vue panoramique sur la région, ainsi que des monuments d'envergure nationale tels que la Basilique Notre-Dame de la Paix, le lac aux caïmans et l'Hôtel Président.

1.5 Aperçu géologique et hydrogéologique

1.5.1. Aperçu géologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

La Côte d'Ivoire située sur la dorsale de Man est constituée du socle précambrien (97,5% du territoire) du domaine sédimentaire (2,5% du territoire). Les départements de Toumodi et de Yamoussoukro appartiennent à la pénéplaine granito-gneissique du précambrien. Les formations géologiques principales sont dominées par des roches métamorphique et magmatiques (N'guessan *et al.*, 2014) (Figure 6). Les roches magmatiques occupent 88,7 % de la zone d'étude. Ce sont les Granitoïdes (les Granites à deux micas, les Rhyolites), les Syenitoïdes (Syenites, Trachytes) et les Dioritoïdes (les Diorites et les Pegmatites). Avec près de 11,3 %, les formations métamorphiques sont représentées par des Schistes (vert et ardoisier), les Grès, les conglomérats, les Amphibolites, les Tufs (formés par l'accumulation de petits fragments de calcaire), les brèches (roches détritiques appartenant à la famille des conglomérats) et les roches vertes du Birimien.

Ces deux principales formations géologiques conduisent à la formation d'un contexte hydrogéologique caractérisé par un d'aquifère composite (réservoir d'altérites et réservoir fracturés ou de fissures) dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi.

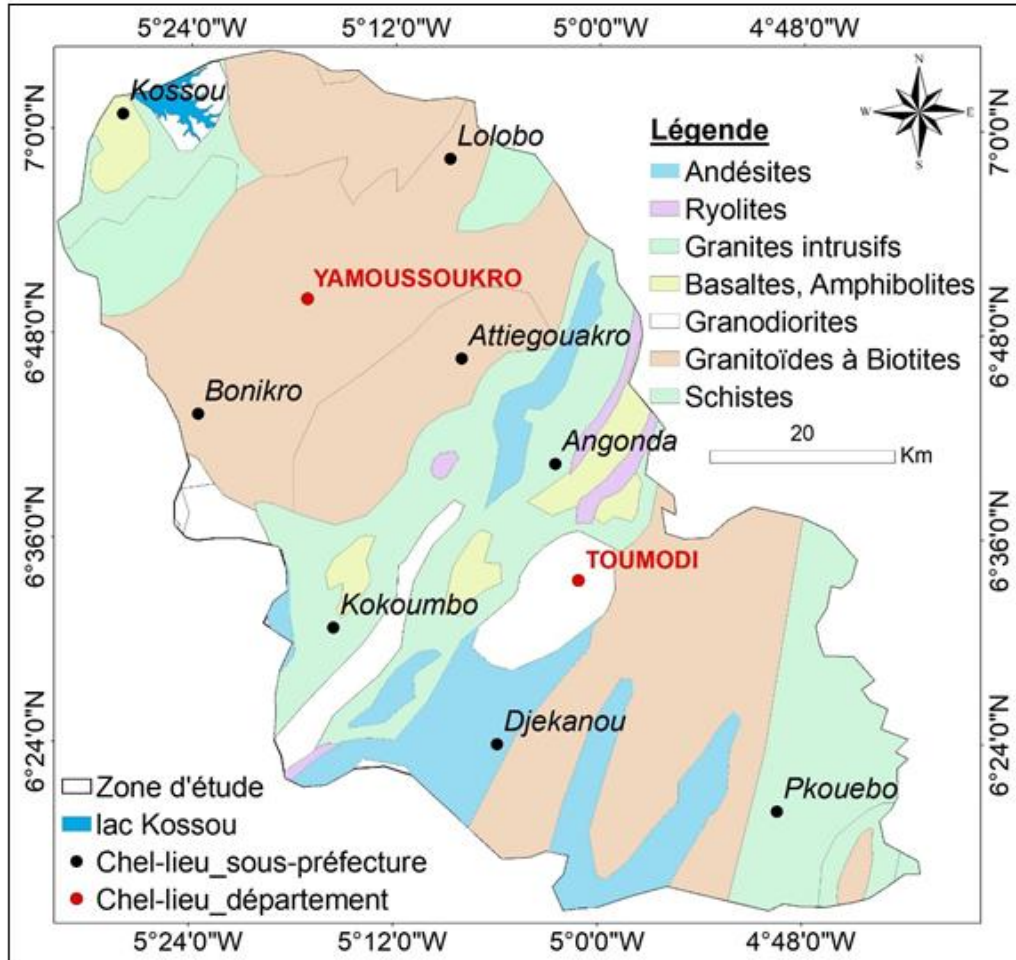


Figure 6 : Carte géologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi (Tagini, 1971)

1.5.2 Aperçu hydrogéologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

Les travaux menés dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi par Leblond (1984), N'Guessan (1985) et Faillat (1986) ont mis en évidence la présence d'aquifères composites, exploités à travers les différents ouvrages hydrauliques implantés dans la région.

1.5.2.1 Réservoirs d'altérites

Il s'agit d'un aquifère avec une porosité totale élevée mais une faible porosité efficace et une très faible perméabilité. Les zones les plus perméables se trouvent en surface ou au sein de la masse rocheuse altérée (lentille de sable), soit dans la transition existante au contact altérites

socle (Yacé, 1984). En raison de la forte teneur en minéraux argileux, ces zones sont alimentées en eau de mauvaise qualité et le débit est très faible, de 1,3 m³/h en moyenne pour des rabattements de 2 à 6 m (Yace, 2002).

Il s'agit cependant du premier aquifère que les autorités ivoiriennes utilisaient pour approvisionner les villages en eau à travers des puits modernes d'un diamètre supérieur à 1 m jusqu'en 1975 (Yace, 1984). Dans les zones basses où la nappe phréatique se situe souvent entre 1 et 2 mètres sous terre, de nombreux puits villageois recueillent ces roches altérées. Ces forages sont dans leurs majorité affectées par les saisons. Pour faire face au risque élevé de contamination, les ingénieurs utilisent de nouveaux moyens technologiques pour forer de plus en plus profondément (Soro, 2010).

1.5.2.2 Réservoir de fissures et de fractures

L'introduction de la technologie du marteau fond-de-trou dans les opérations d'exploration des eaux souterraines en zone de socle a permis la réalisation de forages de petit diamètre, ciblant principalement les zones fracturées. L'aquifère ainsi intercepté correspond au réservoir de fissures et de fractures, dont la perméabilité est généralement bonne dans les secteurs à forte densité de discontinuités géologiques. Selon les travaux de Leblond (1984), le débit moyen des forages réalisés dans les formations granitoïdes autour de Yamoussoukro est estimé à environ 3,5 m³/h, pour un rabattement moyen de l'ordre de 24 mètres. Le niveau statique moyen des nappes se situe à environ 12 mètres de profondeur, avec des variations extrêmes allant de 0 à 20 mètres sous la surface. Cet aquifère constitue la principale ressource mobilisée pour l'alimentation en eau potable dans le cadre des programmes d'Hydraulique Villageoise (HV) et d'Hydraulique Villageoise Améliorée (HVA). Il s'agit d'un système aquifère composite, dans lequel les altérites jouent un rôle capacitif essentiel, en assurant le stockage de l'eau avant sa percolation vers le réseau de fractures (Figure 7).

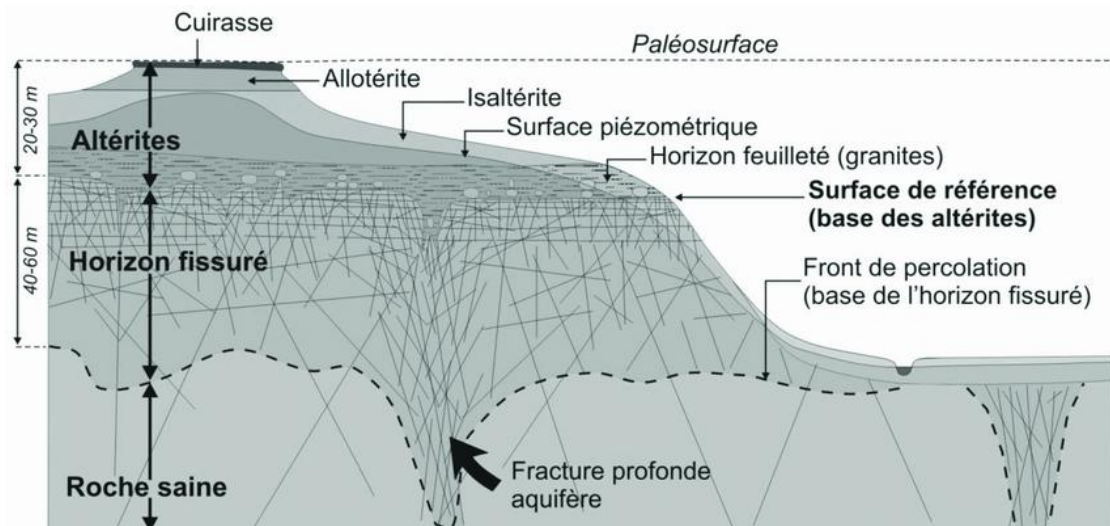


Figure 7 : Schéma simplifié des aquifères sur socle cristallin (Lachassagne *et al.*, 2011).

Conclusion partielle

Les départements de Yamoussoukro et de Toumodi comptent une population estimée à 627 716 habitants. Sur le plan géomorphologique, ils se caractérisent par la présence de pédiplaines à versants modérément inclinés, de bas-fonds plats ainsi que de reliefs granitiques bas et aplatis, dont l'altitude moyenne est d'environ 200 mètres. Le climat qui y prévaut est de type tropical humide, marqué par l'alternance de saisons pluvieuses et sèches, avec une pluviométrie annuelle moyenne avoisinant 1 200 mm.

Du point de vue pédologique, les sols ferraliques dominent largement, témoignant de processus d'altération avancée en milieu tropical. La couverture végétale est constituée de forêts mésophiles, de forêts-galeries ainsi que de formations savaniques, notamment des savanes à rônier et des savanes arbustives. Le réseau hydrographique est structuré principalement autour du fleuve Bandama et de ses affluents, qui drainent la majeure partie du territoire.

Sur le plan géologique, ces départements appartiennent au domaine paléoproterozoïque, plus précisément à la province birrimienne de la Côte d'Ivoire. Le substratum est constitué de formations d'origine magmatique et métamorphique, comprenant notamment des granites à biotite, des granites à deux micas, des migmatites, des granodiorites, des pegmatites, des schistes, des quartzites ainsi que des roches vertes.

Le système aquifère présent dans cette zone est de nature composite. Il associe les réservoirs d'altérites, jouant un rôle capacitif, aux réservoirs fracturés du socle, qui assurent la transmissivité de l'eau souterraine.

Le chapitre suivant abordera de manière détaillée les différentes thématiques en lien avec la problématique de recherche.

CHAPITRE 2 : SYNTHESE SUR LES TECHNOLOGIES ASSOCIÉES A LA CONNAISSANCE DES AQUIFÈRES DE SOCLE

2.1. Télédétection

Selon Duclos (2005), la télédétection est une technologie qui permet d'acquérir des informations sur un objet, une zone ou un phénomène géographique par l'analyse de données collectées à distance, sans interaction physique directe avec la cible observée. Cette approche repose notamment sur l'utilisation d'images satellitaires, qui offrent une cartographie rapide, précise et synoptique des linéaments, souvent assimilés au réseau hydrographique et révélateurs des zones de fracturation du socle.

Les linéaments, qui apparaissent sous forme de discontinuités topographiques à l'échelle régionale, sont généralement interprétés comme le reflet des structures profondes de la croûte terrestre (Youssof *et al.*, 1973). Ils constituent ainsi des éléments structuraux majeurs, jouant un rôle déterminant dans l'identification des fractures. Ces dernières sont d'un intérêt particulier en hydrogéologie, dans la mesure où elles facilitent l'infiltration et le stockage des eaux souterraines, et servent donc de guides précieux dans la prospection hydrogéologique.

En Côte d'Ivoire, de nombreux travaux ont mis en évidence la contribution significative de la télédétection dans la recherche et la gestion des ressources en eau souterraine. Biémi (1992) a démontré l'importance des linéaments structuraux dans la région de la Marahoué, tandis que Savané (1997) a eu recours à la télédétection pour la cartographie des fractures dans la région du Denguélé. De son côté, Kouamé (1999) a appliqué le traitement d'images satellitaires à l'étude hydrogéologique de la région de Man, mettant en lumière la relation entre structures géologiques et potentiel hydrique. Plus récemment, Mangoua (2013) a procédé à une évaluation à la fois qualitative et quantitative des eaux souterraines du bassin versant de la Baya, dans le but d'optimiser l'implantation de nouveaux forages.

D'un auteur à un autre, les méthodes de traitement des images satellitaires utilisées dans le cadre de la prospection hydrogéologique reposent sur des approches similaires. Il s'agit notamment de l'Analyse en Composantes Principales (ACP), des combinaisons de bandes spectrales, des compositions colorées, ainsi que des filtrages spatio-directionnels.

L'ACP permet de transformer le signal-image en un nouvel espace de représentation fondé sur des fonctions orthogonales, facilitant ainsi l'extraction des axes de variance majeurs de l'image (Youan Ta *et al.*, 2008 ; N'Go *et al.*, 2010). Cette technique de rehaussement radiométrique génère plusieurs canaux ou composantes principales, classées selon un ordre décroissant d'importance explicative (Mangoua, 2013), ce qui permet d'accentuer les contrastes géologiques et structuraux.

Les combinaisons de bandes sont quant à elles issues d'opérations mathématiques simples (somme, différence, produit, ratio) entre différentes bandes spectrales. Elles ont pour objectif soit de réduire la redondance d'information, soit de mettre en évidence certains thèmes spécifiques, tels que la végétation, les types de sols ou les formations géologiques.

Les filtres spatio-directionnels, en particulier les filtres de type Sobel ou Laplacien orientés, sont utilisés pour faire ressortir des caractéristiques linéaires d'une image, en accentuant la fréquence spatiale liée à la texture (Himiyari et al., 2002). En hydrogéologie, ces filtres sont particulièrement efficaces pour la détection des fractures, qui présentent généralement une forte fréquence spatiale (Mangoua, 2013).

Ces différentes méthodes ont déjà démontré leur efficacité dans divers contextes : pour l'analyse structurale du bassin versant de la Marahoué (Biémi, 1992), la détermination des sites propices à l'implantation de forages à Bondoukou (Youan Ta, 2008), l'identification des zones favorables aux forages hydrauliques dans le département de Téra au Niger (Boubacar *et al.*, 2022), ou encore pour l'implantation de forages en milieux fissurés en Nouvelle-Calédonie (Dutartre et al., 1990).

2.2. Système d'informations Géographiques (SIG) et Analyse Multicritères (AMC)

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) constituent un ensemble cohérent de méthodes, de principes, d'outils et de données géoréférencées permettant l'analyse, la gestion et la cartographie des phénomènes répartis dans l'espace (Coulibaly, 2009). Ils offrent des informations précieuses sur diverses thématiques, notamment la pédologie, le climat, la topographie ou encore l'occupation du sol. En ce sens, les SIG contribuent à affiner et à améliorer la précision des interprétations issues des produits de télédétection.

Par ailleurs, la télédétection peut être mobilisée comme une source d'acquisition, de validation ou de mise à jour des données utilisées dans les SIG. Il existe donc une complémentarité opérationnelle entre ces deux technologies, la télédétection fournissant des données primaires à large couverture spatiale, tandis que les SIG permettent leur structuration, leur analyse spatiale et leur intégration dans des processus décisionnels.

Les Méthodes d'Analyse Multicritères (AMC), également connues sous le nom de méthodes d'aide à la décision multicritères, ont été initialement développées à la fin des années 1960. À cette époque, les chercheurs ont reconnu la nécessité d'étendre la programmation linéaire et les méthodes d'analyse coûts-avantages pour tenir compte des facteurs et résoudre les conflits multiples. Ils suggèrent des normes, ou des processus, qui doivent être suivis pour parvenir à des décisions optimales et idéales. Ces modèles ont donc évolué vers des modèles prescriptifs-

prescriptifs (Roy, 1968), qui prédisent par exemple le comportement futur d'un client à partir de l'analyse de ses données historiques, désormais prévisible. Ces techniques ont ensuite été développées dans l'industrie pour surmonter les limites de l'analyse qui limitent la prise de décision à un seul critère (Froger, 2005). Depuis le début des années 1980, leur utilisation s'est progressivement élargie pour inclure les questions d'aménagement du territoire, notamment l'aménagement urbain et régional, les transports et la gestion de l'environnement (Simos, 1990 ; Maystre *et al.*, 1994 ; Joerin, 1995, 1997, 2000 ; Damart *et al.*, 2002). Plusieurs méthodes d'analyse ont été développées en fonction de la nature du problème posé. On peut citer entre autres, la Méthode d'agrégation complète de l'école Américaine ; la méthode d'agrégation partielle ou méthode de surclassement de l'école Française et d'autres approches telle que la méthode MACBETH (Youan Ta, 2013). Dans le cadre de cette étude, l'on utilisera le Processus de Hiérarchisation Analytique de Saaty (AHP) de la Méthode d'agrégation complète de l'école Américaine. Cette méthode hiérarchique multicritère englobe au mieux la complexité du problème à étudier.

L'AMC, utilisée conjointement avec le SIG, a déjà fait l'objet de plusieurs applications surtout pour l'identification des zones favorables à l'implantation des points d'eau en Algérie (Jarar *et al.*, 2005), en Turquie (Sener *et al.*, 2005), au Nigéria (Mogaji *et al.*, 2011) et en Côte d'Ivoire (Jourda *et al.*, 2006 ; Youan Ta *et al.*, 2011 ; Yao, 2015). L'objectif assigné à la recherche des réserves d'eau souterraine contenues dans les aquifères fissurés du socle précambrien ivoirien (Savané, 1997 ; Kouamé, 1999 ; Saley, 2003 ; Jourda, 2005 ; Youan Ta, 2008 ; Mangoua, 2013 ; Yao, 2015) a toujours été de mettre en place une méthodologie permettant d'évaluer le potentiel aquifère du milieu, afin de gérer au mieux les ressources en eau souterraine. Ces études ont abouti à l'établissement des cartes thématiques définissant les zones à fortes potentialités en eau, notamment les secteurs de forte productivité où la ressource est disponible, exploitable et d'accès facile. Ces cartes thématiques sont utiles pour toute activité de développement et d'aménagement du territoire (Yao, 2015).

2.3. Géophysique

La géophysique désigne l'ensemble des méthodes et techniques appliquées à l'étude et à la caractérisation physique de la Terre à partir de mesures indirectes. Lorsqu'elle est spécifiquement utilisée pour l'exploration des eaux souterraines ou l'analyse des systèmes aquifères, elle prend alors le nom d'hydrogéophysique. Cette discipline constitue un outil fondamental dans les études hydrogéologiques, en ce qu'elle permet d'identifier et de

caractériser les structures géologiques et les formations souterraines susceptibles de contenir, stocker ou drainer les eaux souterraines (Alabi *et al.*, 2021).

Par ailleurs, suite à l'investigation et à l'identification des fractures sur les images satellites, la géophysique est une méthode complémentaire qui permet de matérialiser ces fractures in situ (Douagui *et al.*, 2019 ; Kouadio, 2022). Il existe diverses méthodes géophysiques basées sur les propriétés physiques mesurées à la surface de la Terre. Les méthodes électriques et électromagnétiques sont les plus couramment utilisées en hydrogéologie, puisque les principaux paramètres de fonctionnement (la résistivité ou sa conductivité inverse) sont influencés non seulement par les propriétés de la roche, mais aussi par la quantité et la qualité de l'eau absorbée (Ibraheem *et al.*, 2021). Dans le but d'avoir des images qui s'apparentent à la réalité, plusieurs travaux ont montré l'intérêt d'utiliser les méthodes géophysiques avec une connaissance de la géologie de la zone étudiée (Soro *et al.*, 2017 ; Mainoo *et al.*, 2019).

2.3.1 Méthode électrique

La méthode électrique a été développée en France et aux Etats-Unis par Conrad Schlumberger et Frank Wenner dans les années 1920. Cette méthode a connu depuis lors, une progression dans sa compréhension, sa mise en œuvre et ses applications. Elle représente l'ensemble des méthodes axées sur l'analyse électrique des formations géologiques. Ces propriétés sont la résistivité électrique et la conductivité. La conductivité d'une roche (sa résistivité) va dépendre de ses pores, la quantité de l'eau d'absorption de la roche, et la qualité de l'eau (quantités de sels dissous, température). La méthode électrique est une méthode peu influencée par les éléments extérieurs lors de la prospection (contrairement à la méthode électromagnétique) (Alabi *et al.*, 2021). A cet effet, elle peut donc être considérée comme une méthode fiable et robuste. Les méthodes de type électrique permettent de mesurer le potentiel induit dans le sol d'un courant continu en général au moyen d'électrodes métalliques plantées en surface. Les mesures sont réalisées en courant continu à basse fréquence (Ouedraogo, 2016 ; Kouadio, 2022). Dans cette étude, la mesure de résistivité électrique a été retenue.

✓ Principe général de la résistivité électrique

La résistivité électrique ρ exprimée en $\Omega.m$ est la grandeur mesurée par la méthode électrique. Elle représente l'inverse de l'expression de la conductivité σ exprimée en $m.s^{-1}$. La résistivité est l'aptitude d'une roche ou d'un sol à résister au passage du courant électrique. Par ailleurs, elle est définie comme la résistance R du milieu par unité de longueur. Pour un échantillon homogène de sol de section S exprimée en m^2 et une longueur L exprimée en m , placé entre deux plaques conductrices reliées à un générateur qui fournit un courant électrique d'intensité I

exprimée en A et de différence de potentiel ΔV exprimée en V, la résistivité électrique de l'échantillon ($\Omega.m$) est définie par les équations 1 et 2 :

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (\text{Eq. 1})$$

avec :

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Eq. 2})$$

Dans le cadre de cette étude, la géophysique peut aider à définir la géométrie du système aquifère (épaisseur et limites) et à valider notre carte linéamentaire.

2.3.2 Méthodes de résistivité électrique

✓ Principe

Dans cette méthode, un courant (I) est délivré à la surface via deux électrodes d'injection (A et B). Le passage du courant dans le sol se fera par des filets rectilignes et produira une différence de potentiel influencée par la résistivité du terrain. Cette différence de potentiel (ΔV) est mesurée via deux électrodes réceptrices (M et N).

La profondeur de terrain investiguée est proportionnelle à l'espacement des électrodes A et B, soit $z = AB/2$. Sur le terrain, on peut calculer immédiatement une résistivité apparente des formations selon l'équation 3 :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Eq. 3})$$

où K est un facteur géométrique qui dépend de la position relative des électrodes d'injection, ρ_a la résistivité apparente et de mesure selon l'équation 4 :

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (\text{Eq. 4})$$

L'arrangement des électrodes du quadripôle ABMN définit un dispositif de mesure : Pole-Pole, Wenner, Pole-dipôle, Schlumberger etc.

2.3.3 Dispositifs de mesure

Le dispositif utilisé est défini par le nombre d'électrodes et leur agencement (Kouadio, 2022). Plusieurs modèles d'électrodes permettent de déterminer la résistivité apparente dans le sol par des mesures de l'intensité (I) du courant et de la différence de potentiel (V). Tous les dispositifs

de mesure ne sont qu'une variation du quadripôle AMNB et de l'expression de la résistivité apparente ρ_a . Il est parfois difficile de définir le meilleur dispositif électrique à utiliser lors de la prospection. Cependant, le choix d'un dispositif est parfois une question de commodité du point de vue logistique et pratique (problèmes avec la topographie, nombre de personnes requises sur le terrain, vitesse d'exécution, etc.) (Kouadio, 2022).

2.3.4 Techniques de prospection électrique

Le sondage électrique, le trainé électrique et la tomographie électrique constituent les différentes techniques de prospection électrique. L'interprétation des données de sondage permet de déterminer de façon ponctuelle l'épaisseur de la zone altérée et de la zone fissurée (Kouadio, 2022). Quant au trainé électrique, il met en évidence des contrastes de résistivités latérales (zones faillées, contacts lithologiques et d'autres accidents tectoniques) des faciès, selon une épaisseur d'investigation constante. La tomographie de résistivité électrique (TRE) réalise à la fois un sondage et un trainé. Elle est souvent utilisée en hydrogéologie pour définir la structure des formations de socle et leur géométrie (Kouadio, 2022).

2.3.5 Socle et milieux fissurés

Les formations de socle contrastent généralement avec les roches sédimentaires en raison de leur hétérogénéité et de leur anisotropie (Singhal, 2008). Ces formations de socle sont généralement définies comme des formations d'origine plutonique (exemple : granites) et métamorphique (exemples : gneiss, schistes) et des roches sédimentaires consolidées (Krásný & Sharp, 2007). Ainsi, ces types de formations sont définies comme des formations cristallines, non-volcaniques ayant une porosité primaire et une infime perméabilité pour l'extraction de l'eau souterraine (Gustafsson, 1994). Ces types de formations doivent leurs propriétés hydrauliques à l'altération associée à la fracturation. Par conséquent, elles sont également appelées roches fracturées. Environ 20 à 35% des terres émergées à travers le monde sont des formations de socle (Krásný & Sharp, 2007 ; Singhal, 2008). Elles doivent leurs propriétés aquifères aux intempéries et la fracturation qui leur confèrent une porosité secondaire et une perméabilité à des degrés divers (Lachassagne *et al.*, 2011). Pour diverses raisons : l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation, la connaissance des migrations de polluants au sein des fractures, la recherche de réservoirs de gaz et de pétrole (Wang *et al.*, 2018), les aquifères de socle font l'objet d'un intérêt de plus en plus grandissant dans la communauté scientifique.

2.3.6 Modèle conceptuel de la structure du profil d'altération des aquifères de socle

Une fois exposées à la surface du sol, les roches cristallines sont soumises aux processus d'altération chimique et physique (Guihéneuf, 2014). Plusieurs facteurs parmi lesquels la nature de la roche mère, le type de climat, l'état initial de fracturation de la roche, le gradient hydraulique, le pH et la température de l'eau, la biosphère et le temps d'exposition de la roche (Wyns, 2013) favorisent la mise en place des profils d'altération. De nombreux travaux de recherche se sont intéressés aux processus d'altération et aux profils d'altération qui en sont issus (Soro *et al.*, 2017 ; Zhang *et al.*, 2018; Lachassagne *et al.*, 2021).

2.3.7 Description du profil d'altération en milieu de socle

Plusieurs descriptions du profil d'altération ont été faites à partir de différents critères tels que la composition minéralogique et/ou chimique des différents horizons, la structure du profil, les propriétés hydrodynamiques et du paléoclimat (Soro *et al.*, 2017 ; Vassolo *et al.*, 2018 ; Lachassagne *et al.*, 2021). Ces études qui utilisent des techniques d'interprétations robustes, spécifiques aux milieux fracturés, proposent des modèles conceptuels de la géométrie du profil d'altération mais décrivent aussi l'hydrodynamique dans les couches altérées des aquifères associés. En plus de la simple description structurale des profils, ces modèles conceptuels proposent une évolution des profils en fonction du paléoclimat et des événements tectono-morphologiques (Bon *et al.*, 2016) subis par la roche. Ces derniers résultats indiquent que les profils d'altération typiques peuvent être scindés en deux catégories : i) les profils issus de l'altération monophasée (Wyns, 2020a) et ii) les profils issus de l'altération polyphasée (Dewandel *et al.*, 2017).

De la base au sommet, ces modèles peuvent être décrits comme suit :

- la roche saine (non altérée) fracturée et perméable localement où elle est affectée par la fracturation. Sa capacité d'emmagasinement est limitée à l'échelle locale (Soro *et al.*, 2017 ; Lachassagne *et al.*, 2021). A l'échelle du bassin versant et pour des applications à la recherche de ressources en eau, la roche saine peut être considérée comme imperméable et d'une capacité d'emmagasinement très faible (Maréchal *et al.*, 2004) ;
- au-dessus du socle sain fracturé, se situe une couche altérée fissurée dont la densité de fissuration augmente vers le sommet. La partie inférieure de cette couche est dominée par une fissuration verticale alors qu'une fissuration horizontale devient prépondérante dans sa partie supérieure. L'intensification de la fissuration au sommet de cette couche, qui constitue la zone laminée sus jacente, assure la fonction capacitive principale de

l'aquifère composite. C'est cette zone que draine la plupart des forages réalisés en zone de socle ;

- au sommet du profil se trouvent les formations d'altérite (ou saprolite) riche en argile. Les altérites peuvent être subdivisées en deux sous couches, les allotérites et les isaltérites, selon le changement de volume et la préservation de la structure originelle de la roche (Soro *et al.*, 2017). Dans la couche inférieure (isaltérite) qui repose directement sur la zone laminée, la structure de la roche originelle de la roche est préservée tandis que dans la couche supérieure (allotérite) essentiellement argileuse, elle ne l'est plus.

Conclusion partielle

Ce chapitre a permis d'établir un état de l'art exhaustif relatif à la caractérisation des aquifères de socle, en mettant en lumière leur profil hydrogéologique spécifique et les défis liés à leur exploitation. Plusieurs thématiques clés ont été développées, notamment l'apport de la télédétection dans la cartographie des structures superficielles et linéaments, l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) pour l'analyse spatiale et la gestion des données géoréférencées, ainsi que le recours à la géophysique appliquée à l'hydrogéologie, avec un accent particulier sur les méthodes électriques.

Ces différentes approches méthodologiques permettent d'améliorer significativement la connaissance des aquifères complexes de socle, caractérisés par une hétérogénéité spatiale importante et une perméabilité fortement contrôlée par les fractures et altérites. En combinant l'analyse des images satellitaires, les données SIG et les investigations géophysiques, il devient possible de mieux localiser les zones potentiellement favorables à la présence d'eau souterraine et ainsi d'optimiser le choix des sites de forage.

L'objectif primordial de l'intégration de ces techniques est de réduire le taux d'échec élevé constaté dans la réalisation des forages hydrauliques en milieux soclés, en proposant des approches plus précises et adaptées aux spécificités géologiques locales.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation du matériel et des méthodes employés dans le cadre de cette étude.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE 3 : DONNEES ET MATERIEL

Ce chapitre présente en détail les données, le matériel de terrain ainsi que les logiciels mobilisés pour la réalisation de cette étude. Il décrit également les différentes modalités d'acquisition des données ainsi que leurs sources. Les données exploitées comprennent notamment les informations techniques relatives aux forages et aux essais de pompage, les mesures piézométriques, ainsi que les données issues de la télédétection, de la cartographie et des investigations géophysiques.

3.1 Données

3.1.1 Données images satellitaires

Les images satellitaires utilisées sont les images du satellite Landsat 8 / OLI_TIRS en bande 3 et 5. Il s'agit des scènes 196-055 ; 196-056 et 197-055 acquises respectivement les 07 Janvier 2020 ; 14 Janvier 2020 et 08 Février 2020. Ces images ont été téléchargées sur le site sources des images : <https://earthexplorer.usgs.gov/> avec une résolution spatiale de 30 m. Ces images ont permis d'extraire les différents linéaments.

Le Shuttle Radar Topographic Mission (STRM) de résolution 30 m a été utilisé pour l'extraction de la topographie et le réseau hydrographique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi.

3.1.2 Données cartographiques

La carte géologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi a été extraite de celle de la Côte d'Ivoire. Elle a permis de mettre en évidence les différentes formations géologiques et les types de roches. Il s'agit de la carte géologique établie au 1/200 000 pour le territoire ivoirien (Tagnini, 1971) éditée par la Société pour le développement minier de la Côte d'Ivoire (SODEMI) en 1972.

Un extrait topographique de ces départements a également été obtenu au ministère du plan de Yamoussoukro. Cette carte fournit une connaissance métrique des limites des districts, des régions, des départements et des sous - préfectures à une échelle de 1/200 000 et des informations complémentaires telles que le réseau routier et le réseau hydrographique.

3.1.3 Données de fiches techniques de forages

Les fiches techniques de forages ont été recueillies lors des missions auprès de la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH), sise à Yamoussoukro. Ces forages ont dans l'ensemble été réalisés par la société PRESTICOM ou HEGEMAN GROUP. Ces fiches ont été collectées à

partir du dépouillement de 261 dossiers-villages. Pour l'analyse des données, on s'est limité aux forages ayant des informations complètes sur les différentes fiches. En effet, sur les 261 fiches techniques de forages collectées, seulement 150 forages disposent de données complètes. Les données recueillies pour chaque forage sont : la nature de l'ouvrage (forage ou puits), les coordonnées géographiques, l'altitude du sol (côte par rapport au niveau de la mer) à la tête du forage, la profondeur totale (Pt), l'épaisseur de socle sain traversée (ES), le niveau statique (Ns), le débit moyen, la lithologie de l'encaissant, Les profondeurs des arrivées d'eau. La figure 8 illustre la répartition des différents forages sélectionnés pour le calcul des paramètres hydrodynamiques. Sur les 150 forages, seulement 60 d'entre eux disposent de fiches d'essais de pompage. Ces essais de pompage sont soit de longue durée soit de courte durée (4h à 72h) avec au moins deux heures (2 h) de remontées.

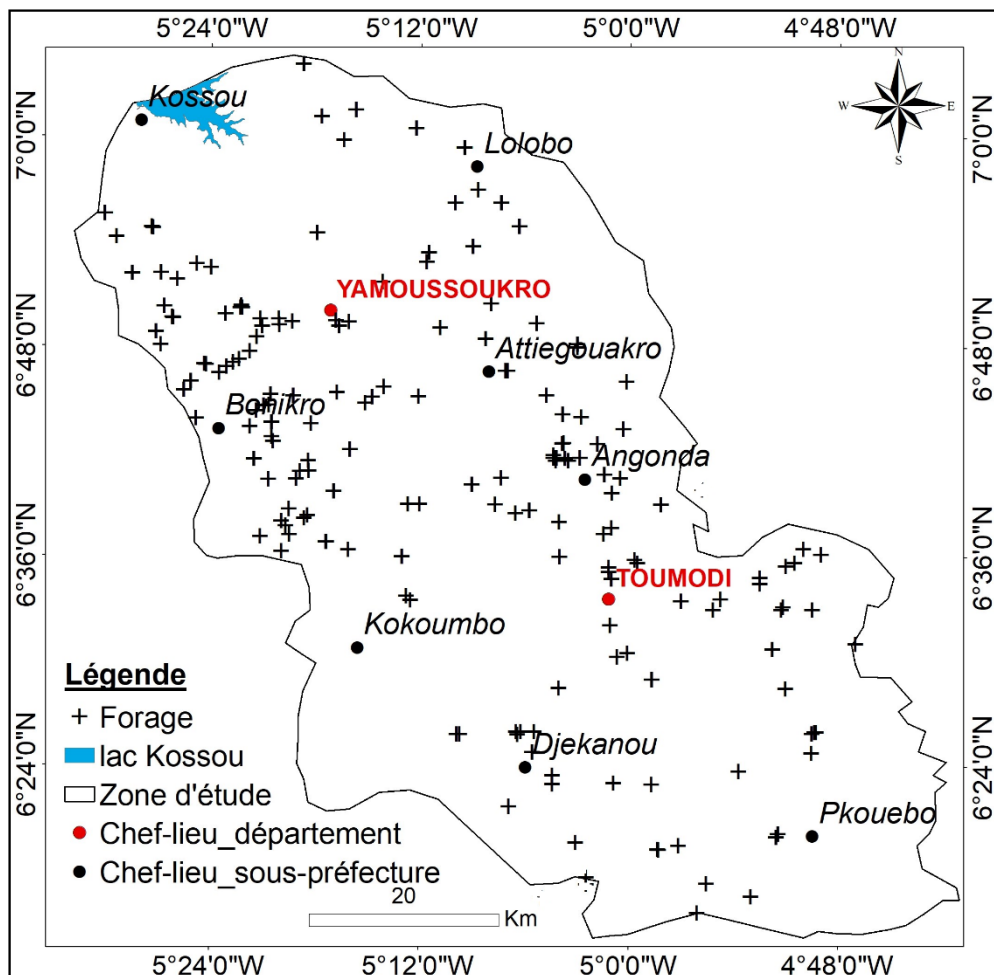


Figure 8: Repartition des forages sur la zone d'étude

3.1.4 Données hydroclimatiques

Les données climatologiques utilisées dans cette étude couvrent la période de 2000 à 2020 et proviennent principalement des stations météorologiques de Yamoussoukro et de Toumodi. Situés dans une même zone climatique, ces départements présentent des profils thermiques très similaires. Ces données ont été mises à disposition par la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire et Maritime (SODEXAM).

Les séries chronologiques comprennent les précipitations annuelles (exprimées en millimètres), les températures moyennes (en degrés Celsius) ainsi que les taux d'humidité relative (en pourcentage). Ces informations ont été exploitées pour caractériser le climat régional et estimer la recharge des aquifères dans les départements étudiés.

3.2 Matériel

Les outils utilisés dans cette étude se répartissent principalement en deux catégories : les équipements de terrain et les instruments dédiés au traitement des données.

3.2.1 Matériel de terrain

Cette catégorie comprend le matériel destiné à la collecte des données hydrodynamiques ainsi que les équipements spécifiques à la prospection géophysique.

3.2.1.1 Matériel d'acquisition de données hydrogéologiques

Le matériel utilisé comprend principalement une sonde piézométrique, un GPS, un infiltromètre à double anneau, une tarière ainsi qu'un appareil photo numérique. La sonde piézométrique, lumineuse et sonore de type hydrométrique, est constituée d'un ruban gradué de 150 mètres enroulé autour d'une bobine métallique actionnée par une manivelle. Cet équipement a permis de mesurer avec précision les différentes profondeurs de la nappe phréatique pour chacun des ouvrages étudiés (cf. Figure 9).



Figure 9: Prise de niveau d'eau dans un forage non fonctionnel à Amonkro

Le GPS (Garmin) a servi à déterminer la longitude, la latitude et l'altitude des points de mesure (Figure 10).



Figure 10: GPS portatif

Un infiltromètre à double anneaux (Figure 11) a permis de mesurer la perméabilité *in situ* des altérites.



Figure 11: Infiltromètre double anneaux

Une tarière (Figure 12) a été utilisée pour prélever des échantillons de sol qui ont été analysés au laboratoire pour le calcul de la porosité.



Figure 12: Tarière

3.2.1. 2 Matériel de prospection géophysique

Dans le cadre de l'acquisition des données géophysiques, le matériel utilisé sur le terrain est présenté à la Figure 13. Il comprend principalement un résistivimètre Syscal Pro Switch 48, instrument dédié à la collecte des données électriques du sous-sol. Cet appareil se présente sous la forme d'un boîtier équipé d'une batterie intégrée de 12 V, d'un écran et d'un panneau de commandes numériques.

Son fonctionnement requiert l'association de plusieurs équipements annexes indispensables à la réalisation des mesures :

Matériel et méthodes

- une batterie externe assurant l'alimentation électrique du résistivimètre lors des campagnes sur le terrain ;
- des massettes destinées à l'implantation des électrodes dans le sol ;
- une boussole utilisée pour le relevé de l'orientation des profils géophysiques ;
- trois rubans métriques de 100 mètres chacun, permettant de mesurer les longueurs des layons, les espacements entre électrodes et entre layons ;
- des machettes employées pour défricher les parcours des layons ;
- des bobines émettrices et réceptrices de courant, respectivement de 120, 200 et 500 mètres, utilisées pour injecter et capter le courant électrique ;
- quarante-huit électrodes en acier assurant le contact électrique entre le sol et les bobines
- un GPS Garmin MAP 64st, garantissant la géolocalisation précise des points de mesure de la résistivité apparente ;
- enfin, des fils de jonction qui relient les électrodes aux bobines.



Figure 13: Matériel de prospection géophysique

A : Bobine de 500 m ; B : Bobine de 200 m ; C : Résistivimètre ; D : Batterie externe ; E : Massettes ; F : Boussole ; G : Bobine de 120 m ; H : Ruban métrique ; I : électrodes pour l'imagerie ; J : Electrodes pour traînées et sondages ; K : Câbles de connexion ; L : Machettes ; M : Appareil photo numérique ; N : GPS.

3.2.2 Matériel de traitement de données

L'essentiel de ce travail a été exécuté à partir d'outils informatiques et de logiciels. Les travaux de traitements des images Landsat ont été exécutés à partir du logiciel Envi 7.4 ; l'extraction des linéaments, la carte piézométrique et les différentes cartes thématiques a été possible grâce au logiciel ArcGis 10.4. Quant au logiciel Linwin 2.0, il a permis d'effectuer l'analyse statistique des linéaments. SURFER 19.2 a permis de réaliser la coupe lithologique des différents forages ; AQTESOLV a permis de calculer les paramètres hydrodynamiques du système ; Matlab 6.1 a permis d'analyser la productivité des forages ; le programme Prosys pour le filtrage des données, Res2Dinv a permis l'interprétation des données de sondage dont X2IPI a permis d'éliminer certaines valeurs aberrantes.

Conclusion partielle

Cette section a présenté l'ensemble des données brutes ainsi que les outils mobilisés dans le cadre de cette étude. Les logiciels et outils informatiques utilisés ont permis de transformer ces données initiales en informations exploitables et pertinentes.

Les données exploitées se répartissaient en trois grandes catégories :

- les images satellitaires Landsat 8 / OLI_TIRS (scènes 196-055, 196-056 et 197-055), acquises respectivement les 7 janvier, 14 janvier et 8 février 2020, qui ont été utilisées pour l'extraction des linéaments, ainsi qu'une image SRTM employée pour l'analyse morphologique de la zone d'étude ;
- une carte géologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi, extraite de la carte géologique de la Côte d'Ivoire établie à l'échelle 1/200 000 ;
- les données hydroclimatiques, les fiches techniques des forages, les résultats des essais de pompage ainsi que les données issues des campagnes piézométriques.

CHAPITRE 4 : APPROCHE METHODOLOGIQUE

4.1 Méthode de caractérisation des aquifères des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

4.1.1 Analyse des paramètres de forages

Les paramètres considérés dans cette étude sont : Q (débit), EA (épaisseur des altérites), Pt (profondeur totale), AE (premières arrivées d'eau) et NS (niveau statique). Afin d'évaluer les débits potentiels fournis par ces forages et d'apprécier l'influence des paramètres susmentionnés sur ces débits, des relations quantitatives ont été établies entre eux.

4.1.1.1 Débit (m^3/h)

Il s'agit du débit d'exploitation du forage. Il est déterminé après un essai de pompage qui doit logiquement être de longue durée pour mieux estimer les réserves de la nappe et faire une bonne proposition. Ceci n'est pas généralement le cas pour les forages d'hydraulique villageoise (HV). En Côte d'Ivoire, d'une manière générale, les débits acceptés pour l'équipement d'un forage sont de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ pour l'hydraulique villageoise et de $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ pour l'hydraulique villageoise améliorée (HVA) (DHH, 2001).

Pour mieux apprécier la distribution des débits d'exploitation (Q) de forage, le Comité Inter-Africain d'Études Hydrauliques (C.I.E.H.) a proposé une classification (Lasm, 2000) :

- de 0 à $1 \text{ m}^3/\text{h}$: débits très faibles
- de 1 à $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$: débits faibles
- de $2,5$ à $5 \text{ m}^3/\text{h}$: débits moyens
- supérieur à $5 \text{ m}^3/\text{h}$: débits forts.

4.1.1.2 Profondeur totale de l'ouvrage (m)

Dans le cadre de cette étude, la profondeur totale d'un ouvrage correspond à la profondeur équipée du forage. Cette profondeur peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la topographie locale, la nature des formations géologiques, la présence ou l'absence de fissures, entre autres.

Selon les travaux antérieurs (Dibi, 2008), cette profondeur est généralement comprise entre 70 et 80 mètres, car, d'après ces mêmes études, la fréquence des fractures diminue significativement au-delà de cette limite. Néanmoins, il a été observé que des débits d'exploitation très importants peuvent être obtenus à des profondeurs supérieures.

Dans les départements de Toumodi et de Yamoussoukro, les forages sont souvent réalisés à de grandes profondeurs, atteignant fréquemment jusqu'à 110 mètres.

.

4.1.1.3 Epaisseur d'Altérites (m)

L'épaisseur des altérites correspond à la zone de transition où la roche-mère est altérée. Cette épaisseur varie d'un site à un autre en fonction de la nature lithologique de la roche-mère et de l'intensité de sa fracturation. Elle constitue la première zone de transit des eaux d'infiltration issues des précipitations vers les nappes phréatiques. Souvent, cette frange altérée joue le rôle de réservoir aquifère exploité par des puits peu profonds.

Cependant, en raison de sa vulnérabilité face aux polluants et de sa sensibilité aux variations saisonnières, cet aquifère est souvent délaissé au profit des aquifères de fissures, jugés plus stables et moins exposés aux contaminations.

4.1.1.4 Niveau statique (m)

Le niveau statique correspond à la hauteur de la surface de l'eau dans un aquifère au repos. Dans le cas des nappes captives, lorsque ce niveau se situe au-dessus du toit de l'aquifère, il peut engendrer une nappe artésienne. Dans les aquifères fissurés, le niveau statique est généralement confiné le long des fractures (Dibi, 2008) et peut varier en profondeur en fonction de l'épaisseur de la zone d'altération (Dibi, 2008).

Le suivi du niveau statique constitue un indicateur essentiel pour une gestion optimale et une évaluation précise des ressources en eau souterraine (Soro, 2002).

4.1.2 Evaluation des paramètres hydrodynamiques

4.1.2.1 Détermination de la transmissivité

La transmissivité représente la fraction de temps nécessaire à l'eau pour traverser une unité de surface. Elle peut être déterminée avec les données de la remontée ou de la descente des essais de pompage. Dans le cas de la descente des niveaux d'eau, les valeurs de la transmissivité sont souvent biaisées par les incertitudes de mesures dues aux pertes de charges quadratiques (De Marsily, 2004). Quant aux valeurs de transmissivités obtenues par la méthode de la remontée, elles sont beaucoup plus significatives (régime non influencé). De ce fait, la méthode de la remontée de Cooper-Jacob (1946) a été retenue pour la détermination de ce paramètre. Cette méthode a été détaillée dans les travaux de (Jourda, 2005 ; Youan Ta, 2008). Une analyse de la transmissivité a été faite à partir d'une classification de celle-ci (Lasm, 2000) :

- classe faible : $T < 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$;
- classe moyenne : $10^{-5} < T < 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$;
- classe forte : $T > 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$

4.1.2.2 Détermination de la conductivité hydraulique et la porosité de la couche d'altérite

Une campagne de mesure in situ de la perméabilité a été réalisée du 21 au 26 mai 2023. Cette mission a également permis de prélever 18 échantillons de sol en vue de la détermination de la porosité, dans plusieurs localités indiquées sur la figure 14.

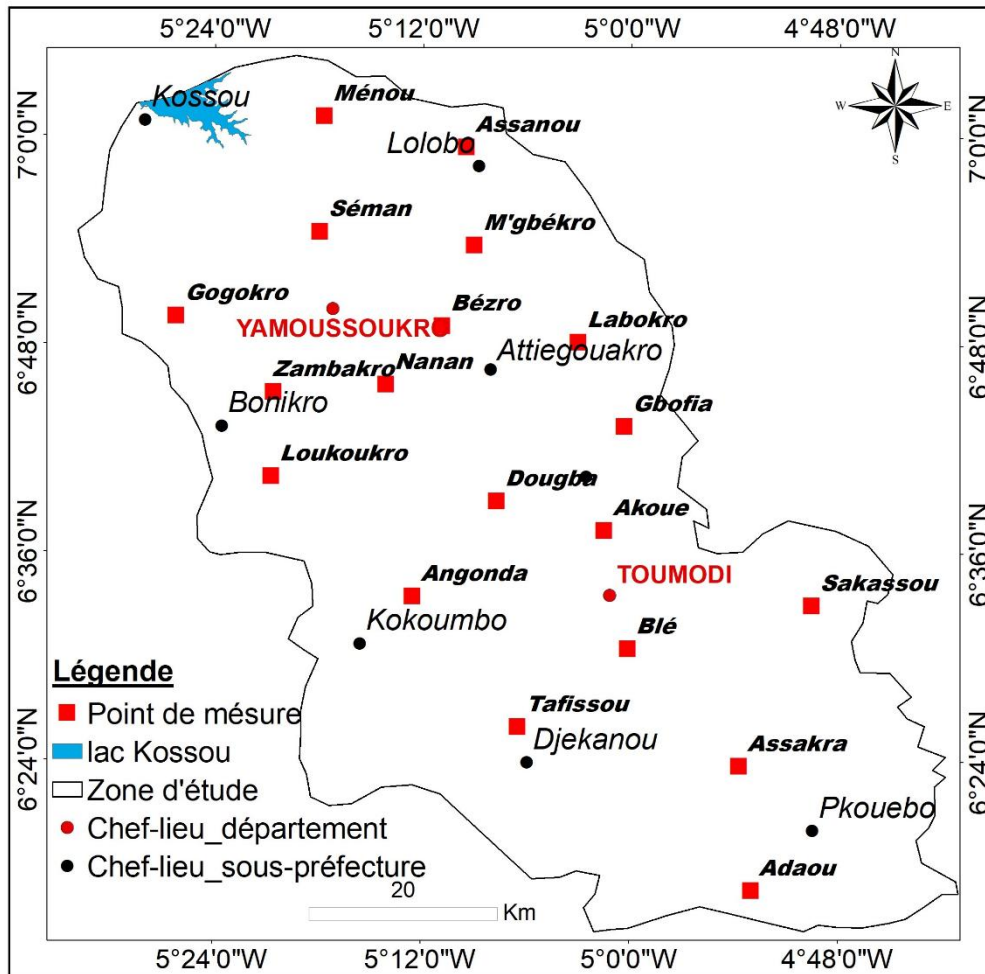


Figure 14: Carte des points de mesure

- Perméabilité

La conductivité hydraulique ou perméabilité est l'aptitude du sol à permettre l'infiltration de l'eau. La méthode basée sur le principe de l'infiltration à charge constante a été utilisée. Cette méthode a été utilisée par Kouadio (2022) en zone de socle dans le bassin versant de la Lobo au centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. L'appareil de mesure est constitué de deux anneaux de

diamètres 30 et 50 cm (Figure 15) enfoncés dans le sol de quelques centimètres (5 cm) et rempli d'eau.

Le principe consiste à suivre l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps dans l'anneau interne afin de déterminer la vitesse d'infiltration sur chaque pas de temps Kouadio (2022). Notons que durant toute la mesure, on doit veiller à ce que les niveaux d'eau dans les deux anneaux restent les mêmes (au besoin, on modifie celui de l'anneau externe). On peut alors supposer que sous l'anneau interne l'infiltration est verticale. Au bout d'un certain temps, un régime permanent s'installe et la vitesse d'infiltration devient constante. De cette vitesse, est déduite la valeur du coefficient de perméabilité en utilisant la loi de Darcy (équation 5).

$$Q = K.S.\frac{H}{L} \quad (\text{Eq. 5})$$

avec :

Q = Quantité d'eau percolée (mm^3/h)

H = Charge d'eau (mm)

L = Longueur de la colonne de terre (mm)

S = Surface de la section de la colonne (mm^2)

K = Conductivité hydraulique (mm/h)

La loi de Darcy est appliquée à une colonne de sol saturée soumise à un écoulement unidimensionnel dans un milieu homogène et isotrope. Avec H/L : la pente hydraulique. A partir de l'équation de Darcy on obtient la conductivité hydraulique avec l'équation 6.

$$K = \frac{\pi.r^2.h'}{t.(2\pi.r.h+\pi r^2)} = \frac{r.h'}{t.(2h+r^2)} \quad (\text{Eq. 6})$$

Avec : r : rayon de l'anneau central ; h' : hauteur de la lame d'eau percolée (mm) ; t : temps écoulé (mn) ; h : hauteur de la colonne d'eau initiale (mm) 0,11 m



Figure 15 : Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique de la couche superficielle

- Porosité

Pour la détermination de la porosité, des échantillons de sol ont été prélevés. Une pression est exercée sur la tarière par des mouvements de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre. L'outil s'enfonce progressivement dans la colonne de sol et emprisonne un échantillon qui est récupéré dans un sachet étiqueté et transporté au laboratoire. La porosité est comprise entre 0 et 1. Elle indique la quantité d'espace vide entre des particules de sol libres. La porosité efficace correspond au rapport du volume d'eau contenue dans un matériau pouvant être libérée sous l'effet de la gravité, au volume total du milieu qui la contient (Equation 7).

$$Pe_{eff} = \frac{v_{lnf}}{v_t} \quad (\text{Eq.7})$$

avec : Pe_{eff} = porosité efficace ; V_{inf} = volume d'eau infiltré (m^3) ; V_t = volume total (m^3).

4.1.2.3 Détermination de la conductivité hydraulique de la couche fissurée

La propriété de conduite d'un aquifère est contrôlée par sa perméabilité ou conductivité hydraulique. Elle est fonction des caractéristiques du milieu et du fluide et possède la dimension d'une vitesse. Il n'existe aucun rapport direct entre la porosité cette perméabilité. Cependant, pour être perméable, la roche devrait être poreuse (Castany, 1982). Ainsi, la circulation d'eau dans un aquifère dépend de son coefficient de perméabilité et de son épaisseur mouillée impliquant la notion de la transmissivité (Equation 8) :

$$T = Ke \quad \text{ou} \quad K = \frac{T}{e} \quad (\text{Eq.8})$$

avec :

K = perméabilité (m/s)

T = transmissivité (m^2/s)

e = épaisseur mouillée (m)

4.1.3 Analyse de la piézométrie

Les données relatives à cette étude ont été collectées pendant des campagnes de mesure sur la période du 11 au 14 décembre 2022 (figure 16). Il s'agit principalement des données de profondeur de la nappe phréatique et de hauteur de la margelle des ouvrages. Les cartes piézométriques représentent la distribution spatiale des charges et des potentiels hydrauliques. Pour ce faire, les côtes piézométriques doivent être déterminées avec précision à partir de la formule de Castany (1998) (équation 9) :

$$H = Z - (P - H_m) \quad (\text{Eq. 9})$$

avec :

H : côte piézométrique (m)

Z : côte sol ou élévation du terrain naturel (m)

P : profondeur mesurée (m)

H_m : hauteur margelle

L'expression de la piézométrie de Castany est spécifique aux nappes libres. Pour chaque profondeur mesurée, après avoir retranché la hauteur de la margelle H_m , il lui a été affecté le coefficient (-1) traduisant le sens de mesure du haut vers le bas. Cette méthode a permis de représenter le niveau de l'eau dans chaque ouvrage à partir de surface topographique. Pour réaliser la carte piézométrique, une équidistance de 10 m a été choisie pour la représentation des lignes piézométriques par la méthode d'interpolation par krigeage au moyen du logiciel ArcGis 10.4.

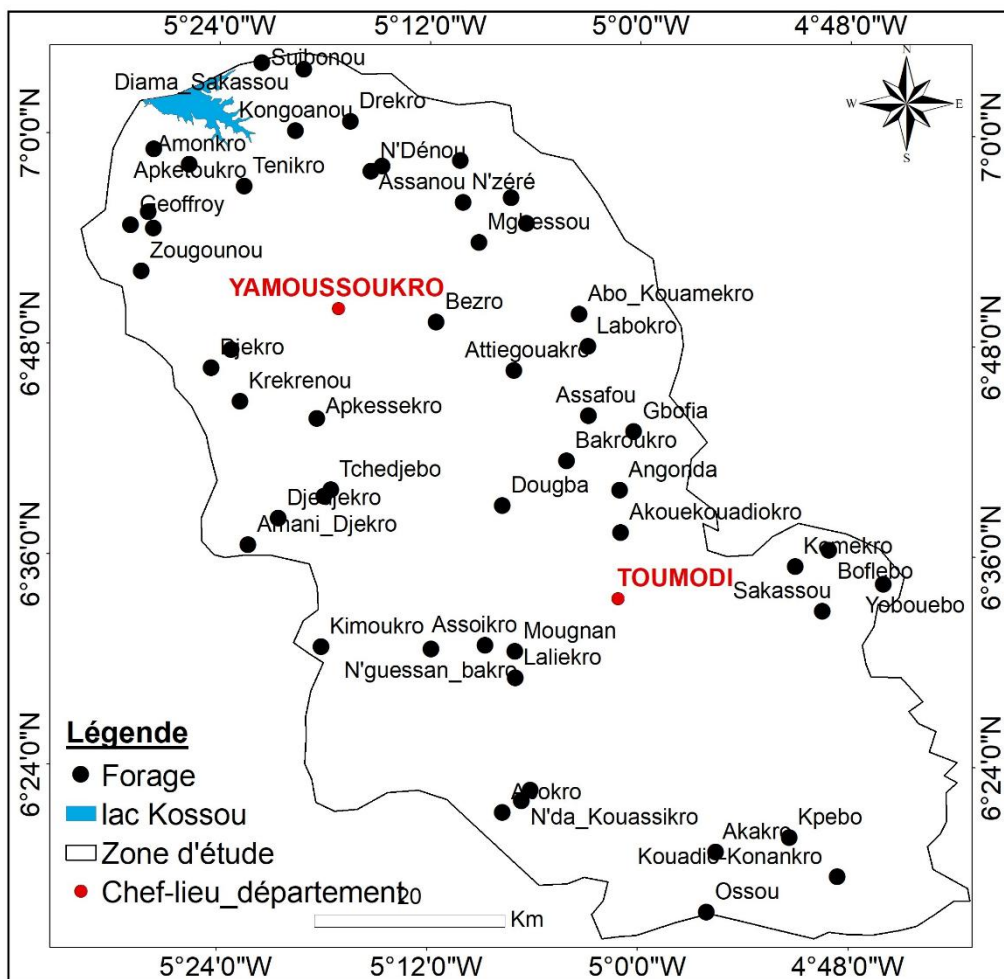


Figure 16: Carte de campagne piézométrique

4.1.4 Analyse de la productivité des aquifères

Pour l'analyse de la productivité des forages, la méthode SOM (Self-Organising Maps) a été utilisée. Elle traite avec aisance les données extrêmes, très souvent contenues dans les bases de données (Haselbecka *et al.*, 2019). Cette méthode fut Appliquée par plusieurs auteurs en hydrochimie (Kamenan, 2021 ; Koffi *et al.*, 2021) et en hydrogéologie (Mangoua, 2013). Les SOM se composent habituellement de deux couches de neurones (Kamenan, 2021). La matrice d'entrée, constituée de la matrice du jeu de données, et la couche bidimensionnelle de sortie dite carte de Kohonen (Figure 17). Cette méthode permet de mettre en évidence les liens éventuels que présenteraient deux ou plusieurs variables au cours de leur évolution. Les paramètres d'entrées utilisés pour cette étude sont : le débit (Q), l'épaisseur d'altération (EA), la profondeur moyenne des AE (Prof AE), la transmissivité (T), la perméabilité (K) et le niveau statique (NS). Cette étude s'est réalisée d'une part sur la totalité des formations géologiques qui constituent les principales formations géologiques du département de Yamoussoukro et de Toumodi.

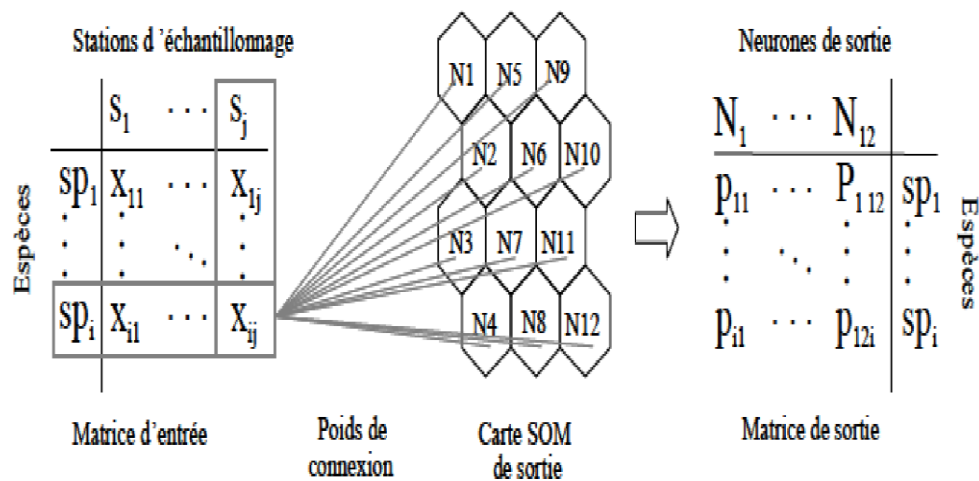


Figure 17: Schéma simplifié de la carte auto-organisatrice de Kohonen(Aguilar, 2004)

➤ Phase d'apprentissage

L'objectif de l'apprentissage est d'ajuster toutes les composantes des objets virtuels pour qu'ils puissent refléter la distribution des échantillons. Les étapes de l'algorithme des SOM sont les suivantes :

- ✓ les objets virtuels sont initialisés par des objets choisis au hasard parmi les objets réels du jeu de données ;
- ✓ un objet réel est choisi au hasard et présenté à la couche d'entrée ;
- ✓ la distance entre cet objet et chaque objet virtuel est calculée ;
- ✓ l'objet virtuel le plus proche est déclaré « neurone vainqueur » ou « Best Matching Unit » (BMU) ;

- ✓ tous les neurones au voisinage du BMU sont modifiés (phase de mise en ordre et d'ajustement).

L'apprentissage se fait avec différentes tailles de données et la taille optimale est choisie en minimisant les erreurs dites de quantification (QE) et de topographie (TE). Selon Kohonen (2013), la QE qui mesure la résolution de la carte est la moyenne des distances entre chaque vecteur d'entrée et son BMU. La TE représente quant à elle, la proportion des vecteurs de données pour lesquels les 1^{er} et 2^{ème} BMU sont utilisées pour mesurer la préservation de la typologie (Kiviluoto, 1996). La TE évalue la qualité de la carte afin de déterminer la qualité de l'apprentissage de la carte de Kohonen.

➤ **Classification Ascendante Hiérarchique (C.A.H.)**

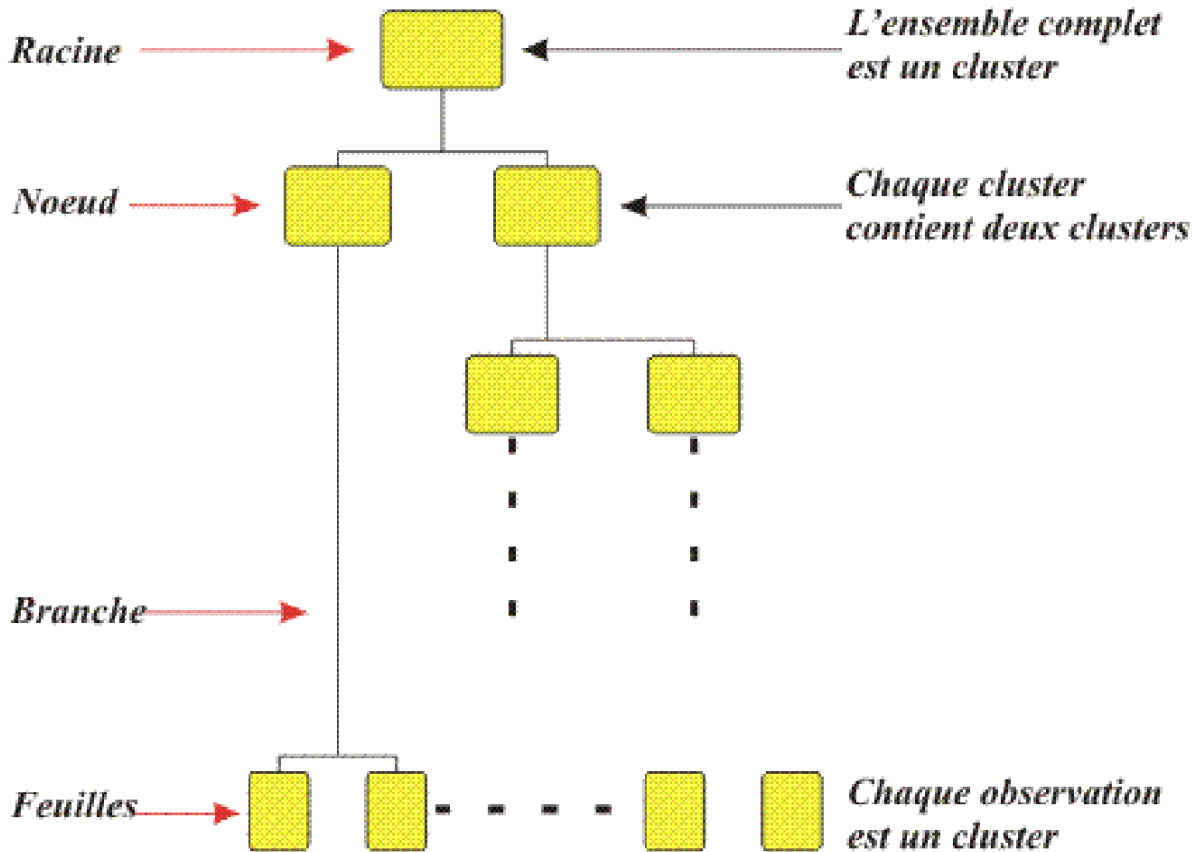
• **Objectif**

Les neurones issus de la carte de Kohonen sont regroupés à l'aide d'une procédure de classification hiérarchique ascendante. Cette classification consiste à regrouper au mieux les échantillons ayant un comportement similaire sur un ensemble de variables de sorte à donner une vision plus globale de la carte.

• **Principe**

La classification ascendante hiérarchique est une méthode de classification automatique qui permet d'effectuer la seconde phase nécessaire à l'élaboration du classifieur en regroupant « au mieux » les neurones (Dreyfus *et al.*, 2002). C'est une méthode qui calcule une hiérarchie de partitions et chaque partition permet de regrouper d'une manière différente les neurones de la carte. L'algorithme de classification hiérarchique se fait en 3 étapes :

- Initialisation : considérer la partition formée par les singletons. Chaque neurone est alors affecté à un sous-ensemble distinct. Choisir le nombre K de groupement que l'on souhaite ;
- pour une partition donnée, trouver les deux sous-ensembles les plus proches au sens du critère de similitude choisi, et les fusionner de manière à former un seul sous-ensemble ;
- si le nombre de groupement de la partition courante est inférieur à K, revenir à l'étape (2), sinon l'algorithme se termine. Le résultat est une suite de classifications emboîtées en regroupant les neurones les plus proches, puis les groupes les plus proches au sens d'une distance convenable, et le résultat est un dendrogramme (Figure 18).



Hiérarchie

Figure 18: Hiérarchisation d'une classification non supervisée (Rousseau *et al.*, 2007)

4.2 Méthode d'élaboration du modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

4.2.1 Méthode d'élaboration du modèle conceptuel géologique

Le modèle conceptuels 2D a été développé pour permettre la compréhension du système aquifère acquise durant cette étude. Ceux-ci prend en compte le contexte géologique et hydrogéologiques. Il s'agit d'intégrer les épaisseurs d'altérites et la fracturation relevée sur les fiches de forage dans le logiciel logiciel SURFER.

4.2.2 Elaboration du modèle conceptuel géoélectrique

4.2.2.1 Modèle électrique à l'échelle du forage

Le modèle conceptuel géoélectrique est réalisé à partir des logs de forages (70 logs). Le traitement des données de sondage électrique est fait avec le logiciel IPI2WIN qui a consisté à la représentation et à l'interprétation des courbes de sondages électriques. Les valeurs de résistivités apparentes sont reportées sur une échelle bi-logarithmique avec en abscisse, les

distances $AB/2$ en ordonnées la résistivité apparente en ohm.m. L'interprétation avec ce logiciel utilise des algorithmes d'inversion qui consiste à comparer les courbes pré-calculées (Marescot, 2009) pour divers modèles (épaisseur et résistivité variables) avec des résultats de terrain (courbes de sondage électrique) (Figure 19).

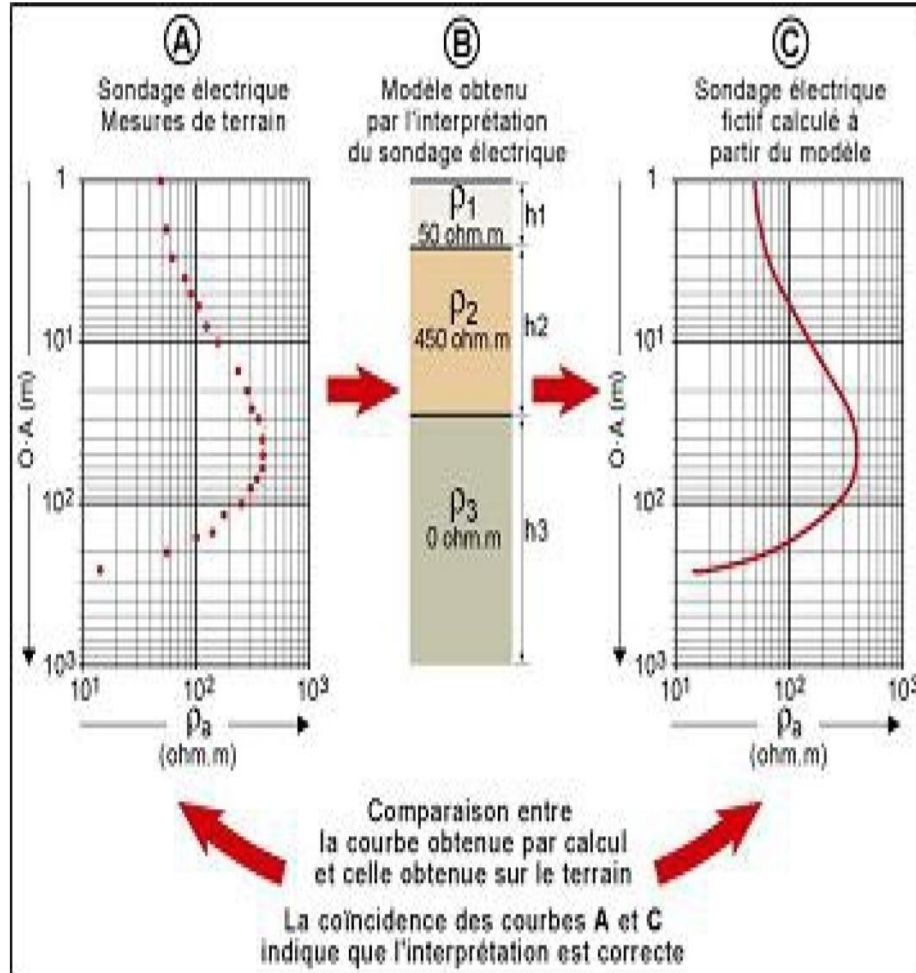


Figure 19 : interprétation automatique de données de sondage(Marescot, 2009)

4.2.2.2 Prospection géophysique

L'objectif de ces différentes investigations est de concevoir un modèle stratigraphique du système aquifère. Les sites prospectés ont été sélectionnés à l'issue d'une campagne de collecte des logs de forages, ainsi que sur la base de la carte de fracturation élaborée pour la zone d'étude. Par ailleurs, des visites de terrain ont été réalisées afin d'appréhender la géomorphologie locale, le profil d'altération observé en affleurement, ainsi que l'état des forages existants.

Au total, trois sites ont été retenus, Amonkro, Mougna et Kouadio-Konankro, en fonction de leur potentiel en eau souterraine au sein des départements de Yamoussoukro et de Toumodi,

mais également en considération des différentes formations géologiques présentes dans cette zone (Figure 20).

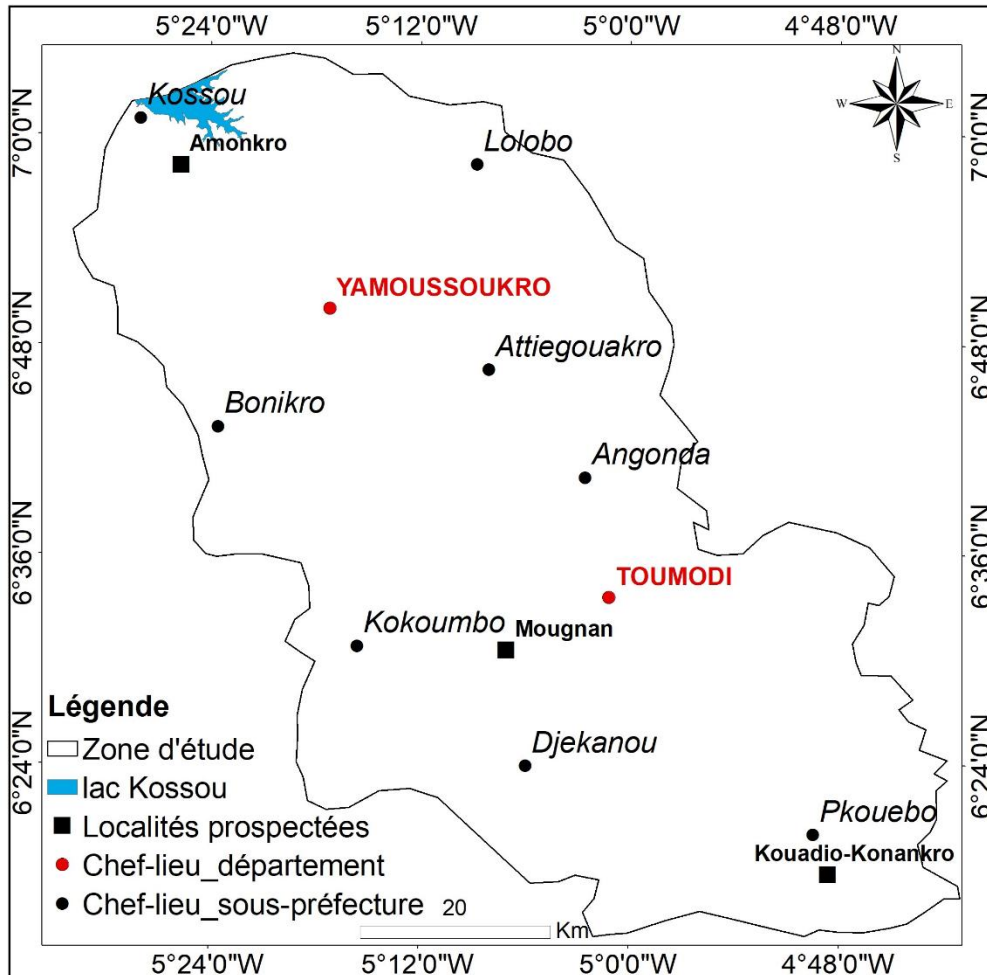


Figure 20 : Situation géographique des localités prospectées

4.2.2.2.1 Réalisation du profil d'altération en 2D

La description du profil d'altération des départements de Yamoussoukro et de Toumodi a été faite à partir de la tomographie. Elle permet d'obtenir un modèle de la résistivité en 2D du sous-sol où la répartition de la résistivité varie verticalement et horizontalement le long du profil (Kouadio, 2022). Elle consiste à mettre en œuvre un très grand nombre de quadripôles de dimensions différentes et de positions différentes, le long d'un ou de plusieurs profils (Figure 21).

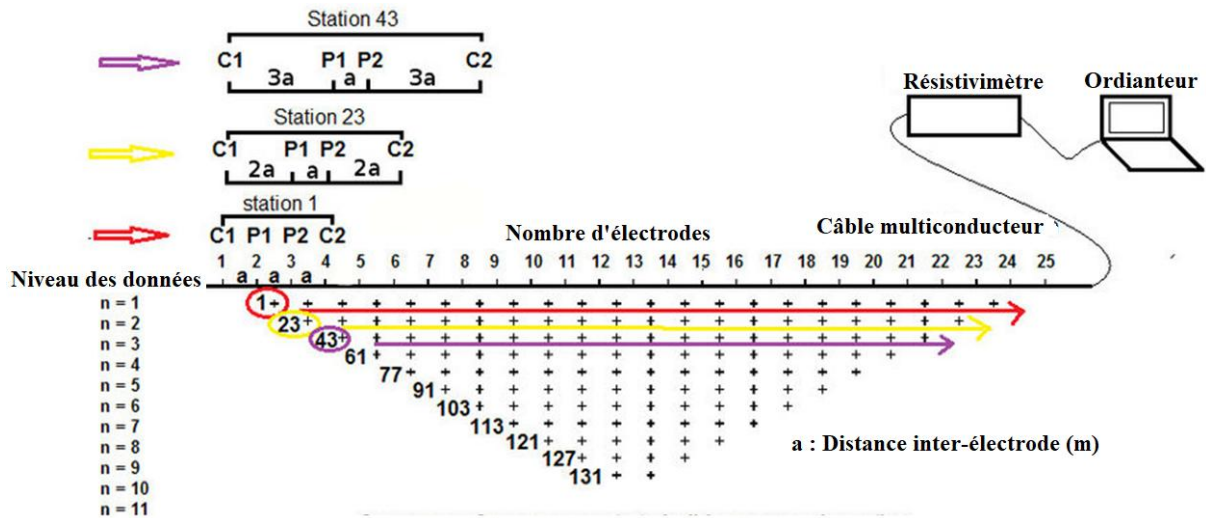


Figure 21: Séquence de mesure pour construire une pseudo-section (Geotomo, 2002)

Diverses géométries de collecte de données existent pour l'imagerie de résistivité 2D et doivent être choisies en fonction des objectifs. Les techniques de Wenner, Schlumberger, pôle-pôle, dipôle-dipôle et pôle-dipôle sont les plus couramment utilisées (Gao *et al.*, 2018). Cette dernière configuration a été efficacement utilisée par Gao *et al.* (2018) pour la différenciation des structures géologiques complexes dans de nombreuses études. Ainsi, le dispositif pôle-dipôle a été utilisé dans la présente étude parce qu'il a une force de signal significativement plus élevée pour obtenir une haute résolution des données TRE et est moins affecté par l'électrode placée à l'infini. Il a une plus grande sensibilité verticale et une grande profondeur d'investigation (Kouadio, 2022). Cette technique de résistivité multi-électrodes utilise des câbles multiconducteurs avec autant de conducteurs que d'électrodes branchées dans le sol avec un espacement fixe. La différence de potentiel électrique créée par un courant électrique traversant le matériau terrestre via les conducteurs est mesurée, ce qui permet de calculer la résistance du matériau. Les différentes combinaisons de paires d'électrodes de courant (A, B) et de potentiel (M, N) construisent la section mixte de sondage et de traîné électrique avec la profondeur maximale d'investigation, qui dépend à son tour de la longueur du câble et du type de configuration utilisé. Les variations de résistivité en fonction de la profondeur aident à la construction d'une section 2D du sous-sol. Les levés ont été réalisés avec un espacement unitaire des électrodes de 2,5 m sur une longueur de profil comprise entre 260 m avec une électrode placée à l'infini (1Km). Pour les mesures, 2D sur le terrain l'outil Syscal Pro Switch 48 de la société Iris instrument a été utilisé.

Se sont au total trois (03) sections de profils TRE qui ont été réalisées (Amonkro, Mougna, Kouadio-Konankro). Dans un souci de recouper le maximum de structures linéamentaires

préalablement identifiées, différentes directions ont été choisies pour la réalisation des mesures sur le terrain (Nord-Sud, Est-Ouest). Ceci permettra de valider les linéaments qui seraient la représentation surfacique des fractures du substratum qui n'ont pas pu être appréciés en termes d'extension et d'orientation lors des investigations à l'échelle du forage. Ces mesures ont été aussi faites à proximité des forages. L'intérêt de faire passer les sections de mesure à proximité de ces forages réside dans le fait que les lithologs issus de ces forages serviront de référence pour apprécier la réalité géologique des modèles de profils d'altération issus de l'inversion des résistivités apparentes et ainsi d'aider à la validation des modèles géologiques obtenus (Soro, 2017).

4.2.2.2 Prétraitements et traitement des données

✓ Prétraitements des données

Lorsque les données sont acquises, elles sont soumises d'abord à des prétraitements. Ceux-ci sont réalisés en deux étapes que sont le filtrage et l'élimination des valeurs aberrantes.

- Filtrage de données

Les données brutes qui sortent du résistivimètre sont prétraitées avec le programme Prosys II. Le courant injecté supérieur 0,1 mA (autrement le rapport signal/bruit est trop faible), la résistivité apparente positive, l'écart type maximum égal à 10% constituent les contraintes dans cette étude. A la sortie du programme, lorsque le fichier de données est enregistré, on obtient un fichier dont le nombre de lignes est directement lié au nombre de valeurs éliminées. C'est pourquoi, lorsque l'on filtre une série de fichiers de données issues d'un même dispositif électrique, on obtient à la sortie des fichiers n'ayant pas nécessairement le même nombre de lignes. Pour nos données, nous avons constaté que l'ensemble des sections de mesure sont jugées bonne à l'issue de cette étape.

- Elimination des valeurs aberrantes

Le logiciel X2IPI (Kouadio, 2022) a permis d'éliminer certaines valeurs aberrantes qui auraient pu échapper au filtre. Cela a consisté à identifier les données qui ont des ordres de grandeur différents de ceux des données voisines.

✓ Traitements des données : inversion et classification

Le traitement des données effectuées comprend les phases d'inversion des données et de classification. L'inversion des données de résistivité apparente permet la reconstruction de la distribution interprétée aussi proche que possible de la distribution « réelle » de la résistivité dans le sous-sol (Kouadio, 2022). Le logiciel Res2dinv a été utilisé pour inverser les valeurs de

résistivité apparente en une section de modèle de résistivité. La technique d'ajustement des moindres carrés Loke & Barker (1996) a été utilisée pour obtenir le meilleur ajustement du modèle de résistivité (Kouadio, 2022). Un certain nombre d'itérations ont été effectuées afin que la différence entre la réponse du modèle et les données mesurées soit minimale. Cette différence est quantifiée sous la forme d'une valeur d'erreur quadratique moyenne (RMS) est calculé par l'équation (10). Toutefois, il faut noter qu'une valeur de RMS n'est pas impérativement la signification d'une bonne représentation de la réalité (Kouadio, 2022). Mais, il faut toujours se référer à des réalités du terrain telles les coupes lithologiques des forages.

$$RMS = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n (x_{donnée,i} - x_{modèle,i})^2)}{N}} \quad (\text{Eq. 10})$$

Avec N représentant le nombre total des mesures

4.3 Méthodologie de cartographie des zones de potentialités en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

L'objectif de la recherche des zones à forte potentialité en eau souterraine est de mettre en place une méthodologie permettant d'évaluer le potentiel aquifère d'un milieu pour une bonne gestion des ressources en eaux souterraines. Selon Lee *et al.* (2015), l'intégration de plusieurs facteurs de surface qui indiqueraient la potentialité en eau souterraine est un aspect nécessaire dans les études de gestion des eaux.

4.3.1 Estimation de la recharge

La recharge a été estimée par la méthode de Thornthwaite (1954) sur la période de 2000 à 2020. Cette méthode basée sur le bilan hydrologique, a pour but de comptabiliser les apports et les pertes en eau au niveau de ces deux départements sur des périodes plus ou moins grandes. Elle a permis de déterminer l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'infiltration totale. L'intérêt de cette méthode réside dans le fait qu'elle ne dépend que des températures et des pluviométries mensuelles. L'équation générale du bilan hydrologique est donnée par l'équation 11 :

$$P = ETR + I + R \pm \Delta S \quad (\text{Eq. 11})$$

avec :

P : précipitation (mm)

R : lame d'eau ruisselée (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

I : lame d'eau infiltrée (mm)

ΔS : variation de stock des différents réservoirs du domaine.

A l'échelle du cycle hydrologique annuel, il y'a une annulation des variations de stock sur un grand bassin versant (Mahé *et al.*, 1998). L'équation du bilan se simplifie donc aux termes de l'évapotranspiration, du ruissellement, et de l'infiltration profonde qui peut constituer une source de recharge pour les eaux souterraines. Le bilan hydrologique s'exprime donc à partir de l'équation 12 :

$$P = ETR + I + R \quad (\text{Eq. 12})$$

4.3.1.1 Estimation de l'ETP par la méthode Thornthwaite

L'évapotranspiration potentielle désigne la quantité maximale d'évaporation vers laquelle tend le sol et le couvert végétal, lorsque le sol est abondamment pourvu en eau et que les plantes peuvent puiser par leurs racines l'eau nécessaire à la demande de l'environnement aérien (Mégny, 1979). L'estimation de l'ETP par la méthode de Thornthwaite (1944) donne de bons résultats (Mangoua, 2013 ; Yao, 2015) et est simple d'utilisation. Elle nécessite comme données d'utilisation la température et la pluviométrie moyenne mensuelle (équation 13).

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^\alpha F(\lambda) \quad (\text{Eq.13})$$

Avec :

t : température moyenne de la période considérée (°C)

α : fonction complexe de l'indice I

$$\alpha = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7910^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (\text{Eq. 14})$$

I : Indice thermique annuel égal à la somme des 12 indices mensuels i :

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (\text{Eq.15})$$

Chaque indice thermique mensuel est calculé selon l'équation :

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514} \quad (\text{Eq. 16})$$

$F(\lambda)$: facteur correctif qui est fonction de la latitude du lieu considéré et est donné par les tables de Gerbier.

4.3.1.2 Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

La détermination de l'ETR a été réalisée à partir de la méthode de Coutagne (Kouassi *et al.*, 2012 ; N'guessan *et al.*, 2014). Cette méthode est une méthode empirique qui a donné des bons résultats (Kouassi *et al.*, 2012 ; N'guessan *et al.*, 2014). L'évapotranspiration réelle (ETR) est donnée par l'expression suivante l'équation 17 :

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (\text{Eq. 17})$$

avec :

$$\lambda = \frac{1}{(0,8 + 0,145 t)} \quad (\text{Eq. 18})$$

t : température moyenne annuelle en °C ; P : précipitation moyenne annuelle en m.

Cette méthode n'est applicable que si : $1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$, avec P en m.

4.3.1.3 Estimation de la lame d'eau ruisselée R

Le ruissellement (R) représente la fraction de la pluie qui alimente les cours d'eaux de surface. Celle-ci dépendant des caractéristiques morphologiques et physiques du milieu d'étude, entre autres le relief, le couvert végétal, le contexte géologique, la forme, la densité du réseau hydrographique et l'orientation. Son estimation est faite par la formule de Tixéront-Berkaloff qui utilise la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle calculée par la méthode de Thornthwaite (Kouassi *et al.*, 2012 ; N'guessan *et al.*, 2014). La formule de Tixéront-Berkaloff pour l'évaluation du ruissellement (R) est la suivante (Equation 19) :

$$R = \frac{P^3}{3 ETP^2} \quad (\text{Eq. 19})$$

avec :

R : ruissellement annuel moyenne (mm) ; P : précipitation annuelle moyenne (mm) ;

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (mm) calculée par la méthode de Thornthwaite.

4.3.1.4 Evaluation de l'infiltration

L'estimation de la partie infiltrée consiste à déterminer la quantité d'eau susceptible d'alimenter les nappes d'eau souterraine. Cette lame d'eau constitue le facteur le plus important qui conditionne la disponibilité des ressources en eau souterraine. A défaut d'un suivi piézométrique, la méthode du bilan hydrologique a été choisie. La lame d'eau infiltrée (I) est déduite à partir de l'équation du bilan hydrologique (Equation 20) :

$$I=P-(ETR+R) \quad (Eq.20)$$

4.3.2. Cartographie des linéaments des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

Dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, les eaux souterraines sont fortement sollicitées pour satisfaire les besoins en eau croissants des populations, surtout celles qui vivent en zone rurale. Cette forte demande nécessite l'optimisation de leur connaissance. Or, l'essentiel des réservoirs d'eau souterraine est localisé dans les aquifères fissurés (Yao, 2015 ; Kouadio, 2022). La caractérisation de cette fracturation constitue donc, l'une des premières étapes dans la recherche des réservoirs d'eau souterraine. A cet effet, la méthodologie développée dans ce travail consiste à cartographier les éléments structuraux présents sur les images Landsat 8 / OLI_TIRS couvrant la zone d'étude en vue de les extraire pour établir la carte de densité de fracturation. Le traitement numérique des images satellitaires se résume au traitement préliminaire, à l'accentuation des discontinuités images et, à l'extraction des linéaments structuraux.

4.3.2.1. Prétraitements des images Landsat 8 / OLI_TIRS

En raison du fait que, la prise de vue soit effectuée en saison sèche, ces images apparaissent sans bruit radiométrique majeur et ne nécessitent donc pas des prétraitements importants (Figure 22). Seule l'atténuation des effets d'ombrage liés au relief a été réalisée, grâce aux rapports de bandes.

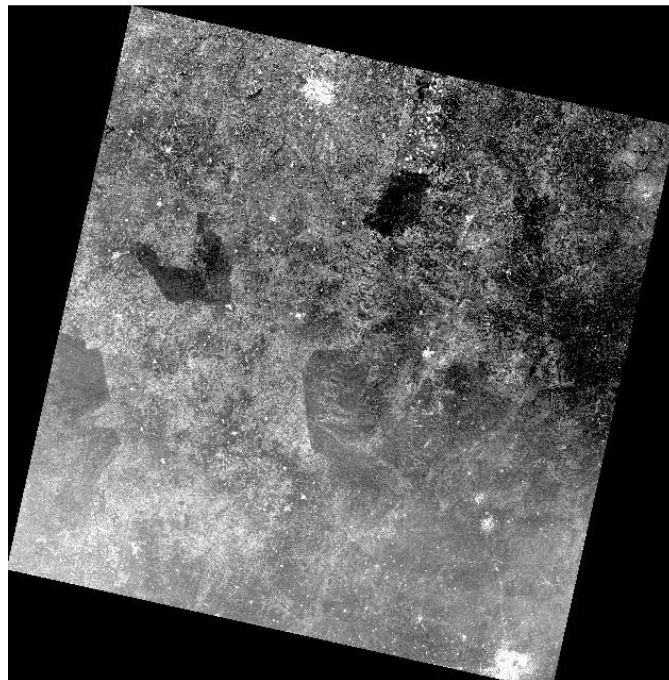


Figure 22: Image brute

4.3.2.2 Traitement numérique des images pour l'extraction des linéaments

L'analyse en composantes principales (ACP), les combinaisons d'images, les compositions colorées et le filtrage spatial directionnel ont été appliqués pour le rehaussement des images.

✓ Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales est une technique efficace pour accentuer une image multi spectrale pour des fins d'interprétation géologique (Biémi et *al.*, 1992). Elle permet de réduire l'information contenue dans plusieurs bandes, parfois hautement corrélées (d'où redondance de l'information) en un nombre plus restreint de composantes. Celles-ci représentent généralement jusqu'à 97% la variance totale de l'ensemble des données originale (N'go et *al.*, 2010). Parfois l'information comprise dans 5 ou 6 bandes est réduite par l'analyse en composantes principales en seulement 3 composantes. Cette analyse permet, entre autres, de créer des composés colorés des trois premières composantes qui constituent un excellent produit d'interprétation visuelle, augmentant ainsi le contraste entre les divers objets au sol. L'image obtenue à l'aide de composition coloré des bandes résultant de l'analyse en composantes principales, seront par la suite utilisée dans la suite du processus

✓ Technique de combinaison d'images

Les combinaisons d'images ou indices sont des analyses multivariées, c'est-à-dire des traitements élaborés à partir de plusieurs canaux. La technique de la combinaison d'images est basée sur des opérations mathématiques plus ou moins simples (rapports, sommes, différences, multiplications) visant soit à réduire la somme d'informations ou bien la mise en évidence de thèmes particuliers (végétations, sols). En effet, la nature numérique des données de télédétection se prête particulièrement bien à des opérations arithmétiques entre canaux (Youan Ta, 2008). Le principe de cette technique est basé sur les opérations mathématiques qui permettent de générer des rapports de bandes $ETM+4/ETM+5$, $ETM+5/ETM+4$ et $ETM+6/ETM+5$. Les images brutes et les néo-canaux ainsi générés ont été utilisés comme images d'entrée pour l'application de techniques plus pertinentes pour le rehaussement des structures linéaires. Il s'agit notamment des techniques de filtrages (filtres Sobel de dimension 7×7) qui accentuent les discontinuités-images (morphologique, hydrographique, couverture végétale, différence de tonalités de surface, etc.) et de la composition colorée.

✓ Technique de compositions colorées

Cette méthode se présente comme étant une technique d'amélioration de l'image en vue de permettre une bonne visualisation. On parle de technique RGB (Red (R), Green (G), Blue (B) ou transformation RBG qui permet d'obtenir une image multichrome à partir de trois

images monochromes (Figure 23). Les compositions colorées ont consisté à afficher simultanément à l'écran, trois bandes d'images dans les canaux de base (Rouge/Vert/Bleu). Les compositions qui ont données les résultats les plus intéressants sont : ETM+4, ETM+5 et ETM+1 et ETM+3, ETM+4 et ETM+5. Elles permettent la distinction des sols nus, des discontinuités lithologiques, des étendues d'eau et des linéaments (Yao, 2015).

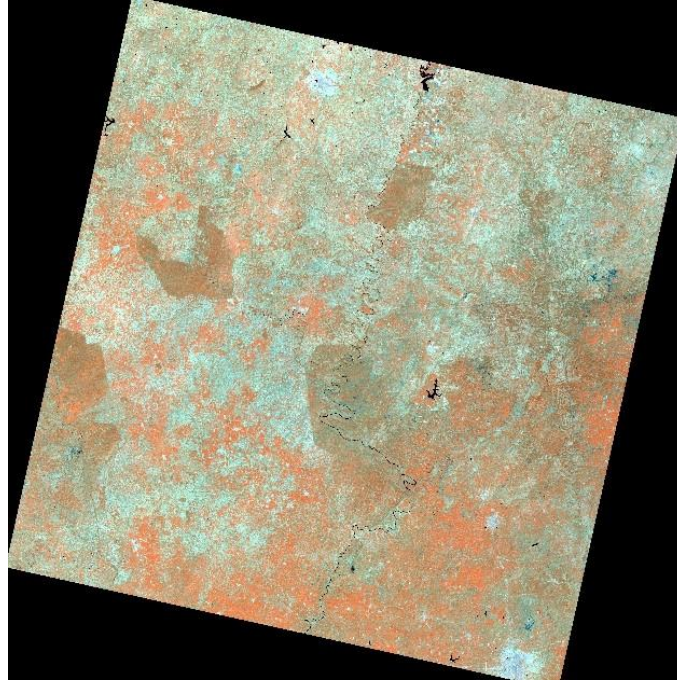


Figure 23: Traitement en composition colorée

✓ Rehaussement par filtre directionnel de SOBEL

Les filtres directionnels améliorent la perception des linéaments en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image comme si elle était éclairée par une lumière rasante (Youan Ta et *al.*, 2008). De plus, ce type de filtre permet de rehausser les linéaments qui ne sont pas favorisés par la source d'éclairage (Biémi., 1992). Le rehaussement des linéaments a donc été effectué à partir de filtres directionnels utilisant l'opérateur de Sobel. L'image utilisée pour les filtrages est celle de la bande 3 qui se trouve dans la zone du proche infrarouge permettant ainsi de voir les détails structuraux importants. Le filtre de Sobel est une variété plus sélective de filtres directionnels où les valeurs de la matrice de convolution sont déterminées selon la distance par rapport au pixel central. En d'autres termes, les points les plus près du centre dans la matrice (en ligne ou en colonne) interviennent avec un poids supérieur à ceux des extrémités dans la mesure du gradient directionnel. Quatre images de dérivée ont été générées à partir de quatre filtres directionnels de Sobel (NE-SO, N-S, NO-SE, E-O). Ceci permet de détecter les linéaments dans toutes les directions possibles. La structure des filtres de Sobel utilisés est

donnée dans le tableau I. Après le rehaussement les linéaments seront donc extraits de façon manuelle sur la figure 24.

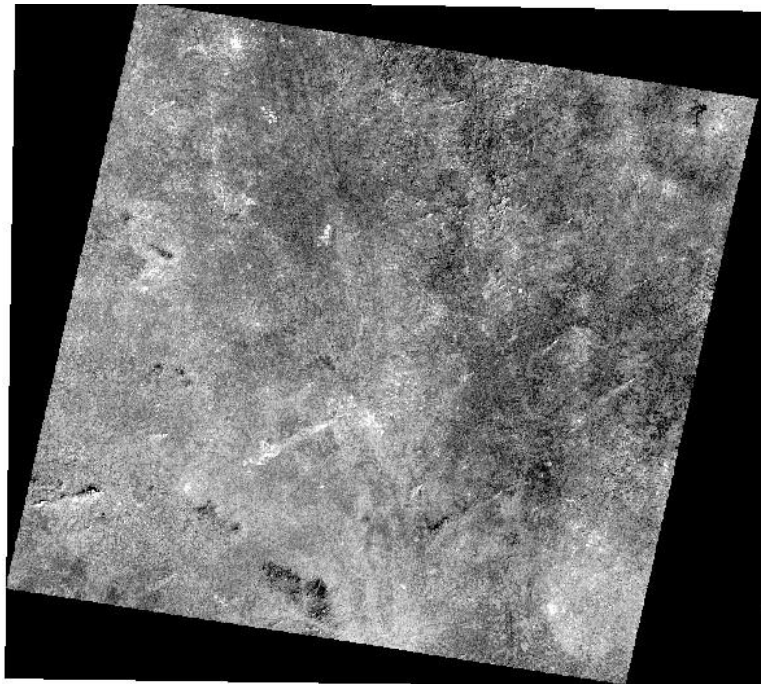


Figure 24: Image réhhaussée

Tableau I: Matrice 7 X 7 des filtres directionnels de 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
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
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
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

4.3.2.3 Validation de la carte des linéaments et analyse statistique de la fracturation

Selon Tagnon *et al.* (2020) les linéaments extraits à partir du traitement d'images satellitaires doivent nécessairement être validées pour préciser leur signification structurale. Les linéaments identifiés ont fait l'objet d'une analyse fréquentielle qui a permis de faire ressortir les directions principales car, l'orientation des fractures représente l'un des facteurs essentiels qui interviennent dans l'écoulement des eaux en milieu de socle. Pour la validation de la carte linéamentaire, une comparaison de la direction des linéaments majeurs obtenus a été faite avec celle des accidents majeurs identifiés par Biémi (1992) auteur d'une carte de fracturation de toute la Côte d'Ivoire. Ensuite, il a été procédé à la superposition de la carte des linéaments majeurs à celle des forages productifs. Selon Jourda *et al.* (2006), les forages les plus productifs sont situés sur ou à proximité des accidents majeurs et peuvent donc être un outil essentiel à la validation des linéaments. Des mesures géophysiques ont permis de valider certains linéaments sur la zone. Celles utilisées dans le cadre de cette étude sont les trains, les sondages électriques et la tomographie de résistivité électrique (TRE) qui permettent d'identifier les horizons aquifères en milieu de socle fracturé.

L'organigramme de la figure 25 résume la méthodologie de traitement des images Landsat8/OLI_TIRS pour la réalisation de la carte linéamentaire.

Le logiciel Linwin 2.0 a permis de traiter la carte de fracturation des départements de Yamoussoukro et de Toumodi. Ce logiciel permet d'effectuer des opérations en rapport avec les fractures. En effet, les programmes constitutifs de ce logiciel permettent de construire la rosace directionnelle, l'histogramme des longueurs de fractures et la carte des densités de fracturation. Pour ce faire, la carte de fracturation est géoréférencée afin d'être reconnue par le logiciel. Ce logiciel permet d'extraire automatiquement les discontinuités au niveau du réseau de linéaments.

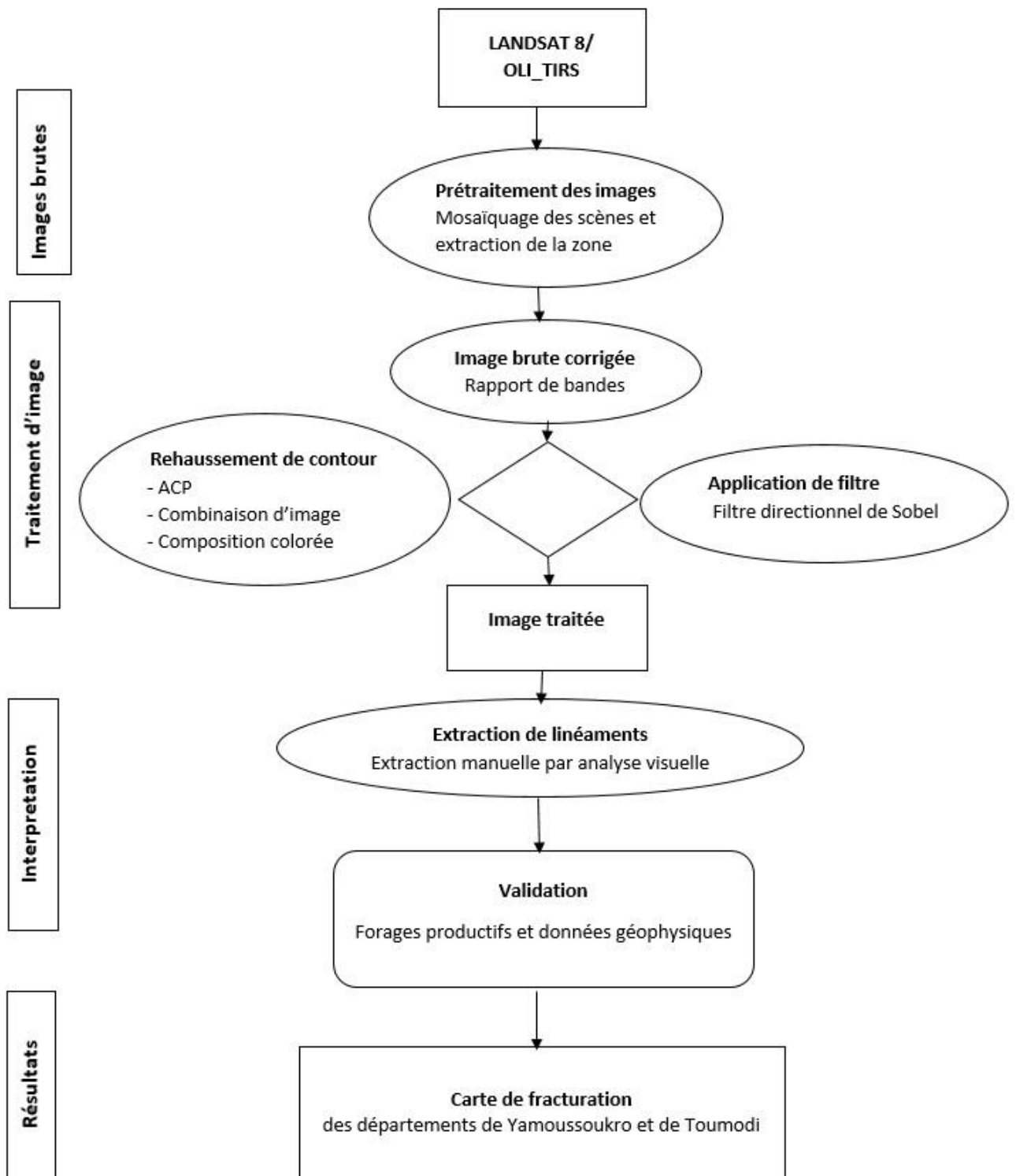


Figure 25: Organigramme général du traitement et de l'extraction des linéaments

4.3.3 Mise en œuvre de l'analyse multicritère

La cartographie des zones potentielles en eau souterraine nécessite la conception et la mise en place d'une base de données hydrogéologiques de la zone d'étude. L'approche méthodologie

abordée pour l'élaboration de la carte de potentialité des ressources en eaux souterraines est basée sur l'utilisation des méthodes d'analyses multicritères (Savane, 1997 ; El Morjani, 2003 ; Jourda, 2005 ; Mangoua, 2013 ; Yao, 2015 ; Mangoua *et al.*, 2019).

La démarche adoptée dans le cadre de ce travail est le Processus de Hiérarchisation Analytique de Saaty (AHP). Elle est organisée en 7 étapes : (i) l'identification et élaboration des critères de décision, (ii) la classification et la standardisation des critères de décision en vue d'élaboration des critères conformément aux objectifs à atteindre, (iii) l'évaluation spatiale des critères de décision, (iv) la pondération des critères de décision (v) l'agrégation des critères, (vi) l'établissement de la carte des zones favorables à gros débits, (vii) la validation des différentes cartes thématiques.

4.3.3.1 Identification et élaboration des critères de décision

Le premier élément fondamental de l'analyse multicritère est la création d'un ensemble d'attributs ou critères. Maystre *et al.* (1994) définissent le critère comme une expression qualitative ou quantitative de points de vue objectifs, aptitudes ou contraintes, relatives au contexte réel, permettant de juger des personnes, des objets ou des événements. Pour qu'une telle expression puisse devenir un facteur, elle doit être fiable et utile pour le problème considéré (Dibi, 2008). Selon Youan Ta *et al.* (2011), l'identification des critères est une phase décisive et délicate qui conditionne la qualité des informations générées en vue de la prise de décision. Ainsi, en référence aux travaux d'El Morjani (2003), Jourda (2005), Youan Ta *et al.* (2011), Mangoua (2013) et Yao (2015), un certain nombre de critères est identifié, sélectionné et évalué pour atteindre l'objectif fixé. Dans le cadre de cette étude, les critères de décision utilisés ont été guidés par les résultats des travaux de Savané (1997), Jourda (2005), Youan Ta *et al.* (2011), Yao *et al.* (2016) et Mangoua *et al.* (2019) et Kouassi *et al.* (2012). Ces critères sont la pente, le niveau piézométrique, la densité de drainage, la densité de fracturation, le débit de production ou d'exploitation, l'épaisseur d'altération, la probabilité de réussite ou indice de succès des ouvrages de captages, la profondeur totale du forage et l'infiltration.

➤ Pente

La pente (T) désigne l'inclinaison du terrain et conditionne l'accumulation des eaux. Elle permet d'identifier les zones à bonnes conditions de réalisation de forages où à bonnes conditions de recharge. Plus la pente est forte, plus le temps de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est court.

➤ Niveau piézométrique

Le niveau piézométrique (NP) permet de suivre la fluctuation du niveau d'eau dans l'aquifère. Il a été élaboré à partir des données des fiches techniques de 60 forages réalisés. Ces derniers varient entre 2,39 m et 64 m.

➤ Densité de drainage

La densité de drainage est obtenue grâce au réseau hydrographique, lequel est extrait de la carte topographique. Le bassin versant est divisé en grille de 25 Km². La longueur totale de tous les drains dans chaque grille est calculée et utilisée pour déterminer la valeur de la densité de drainage.

➤ Densité de fracturation

Les zones de très forte densité de fracturation (DF) constituent le pôle favorable à l'existence d'un réservoir potentiel, alors que les zones de densité nulle ou très faible augurent très défavorablement la présence de réservoir (Jourda, 2005). Le critère densité de fracturation (km/km²) a été élaboré à partir du traitement de la carte de fracturation sous le logiciel Linwin. La zone d'étude est divisée en grille de 25 Km². La longueur totale de tous les linéaments dans chaque grille est calculée et utilisée pour déterminer la valeur de la densité de fracturation.

➤ Débit de production ou d'exploitation

Le débit (QE) de production délivré par l'ouvrage est élaboré à partir des données de 60 fiches techniques de forages et des essais de pompages. Le débit minimum recommandé est 1 et 3,5 m³/h, respectivement pour l'hydraulique villageoise et l'hydraulique villageoise améliorée (DHH, 2001). Au niveau de la zone d'étude, le débit varie de 0,51 à 12 m³/h.

➤ Epaisseur d'altération

L'épaisseur d'altération (EA) correspond à la frange superficielle altérée des roches de socle qui renferme des réservoirs appelés aquifères d'altérites. Les altérites représentent le premier lieu de transit des eaux d'infiltration en provenance des précipitations vers les nappes. La généralisation de l'extension de la couverture d'altérites sur toutes les formations indique l'importance de la fissuration (Saley, 2003). Le critère épaisseur d'altération a été élaboré à partir des données des fiches techniques de 60 forages. Ces données varient entre 1,85 m et 54,89 m.

➤ **Probabilité de réussite ou indice de succès des ouvrages de captages**

L'indice de succès (IS) donne la probabilité de succès d'un forage et est calculé (équation 21).

$$a = \frac{b}{10} \times 100 \quad (\text{Eq.21})$$

$$\text{Si } b = 1 \text{ m}^3/\text{h} \quad a = \frac{1}{10} \times 100 = 10\%$$

$$\text{Si } b > 1 \text{ m}^3/\text{h} \quad a > 10\%$$

$$\text{Si } b < 1 \text{ m}^3/\text{h} \quad a < 10\%$$

$$\text{Si } b = 12 \text{ m}^3/\text{h} \quad a = \frac{12}{10} \times 100 = 120\%$$

Où a est l'indice de succès (%) et b est le débit d'exploitation (m^3/h).

Selon les recommandations de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP), l'indice de succès permet la distinction des zones de bonne productivité caractérisée par des forages positifs ($a > 10\%$) et des zones de faible productivité avec un nombre élevé de forages négatifs ($a < 10\%$) (DHH, 2001). Ainsi, un forage avec un indice de succès $a > 10\%$ est accessible à la population pour exploitation.

➤ **Profondeur totale du forage**

La profondeur totale du forage (PF) donne des informations sur le coût du forage, selon le nombre de mètre linéaire foré. Elle indique le débit optimal que l'aquifère considéré est susceptible de fournir. Le critère profondeur de forage a été élaboré à partir des données des fiches techniques de 60 forages et varie entre 50,27 m et 105,35 m.

➤ **Infiltration**

L'infiltration efficace représente la frange d'eau qui va effectivement alimenter les aquifères. Elle permet d'avoir une estimation de la recharge de l'aquifère. Elle est déterminée à partir des données hydroclimatiques, grâce à l'approche du bilan hydrologique exposée dans les paragraphes précédents.

4.3.3.2 Classification et standardisation des critères de décision

➤ **Classification des critères de décision**

La classification consiste à regrouper les valeurs de chaque critère en un certain nombre de classes. Les différentes limites choisies pour ces classes ne sont pas nécessairement équidistantes mais fonction des objectifs fixés et du contexte général de l'étude (Jourda, 2005). Ces limites sont fixées en fonction des données disponibles et ne sont pas figées. Dans le cadre de cette étude, la classification tient compte de la variance des données et s'inspire de celle

adoptée dans les travaux antérieurs parmi lesquels on peut citer ceux de Jourda (2005), Youan Ta *et al.* (2011), Youan Ta *et al.* (2015), Mangoua (2013) et Mangoua *et al.* (2019) réalisés en région de socle cristallin et cristallophyllien et de celle proposée par le CIEH pour les débits. Ainsi, 5 classes ont été retenues en vue d'une meilleure interprétation des résultats. Il s'agit des classes très faible, faible, moyenne, forte et très forte.

➤ **Standardisation des critères de décision**

Une étape importante et incontournable est la standardisation des différents critères. En effet, ces critères sont exprimés dans différentes unités et pour une bonne analyse multicritère, une normalisation est nécessaire. Un intervalle commun de 1 à 9 est retenu pour cette opération. La note 10 est attribuée aux classes très faible ou très forte selon qu'elles contribuent à l'excellente réalisation de l'indicateur considéré. Dans le cas inverse, la note 1 est attribuée à ces classes. En suivant la même logique, les valeurs intermédiaires sont attribuées aux classes intermédiaires selon une distribution linéaire. Pour l'élaboration de chaque indicateur considéré, un certain nombre de critères est retenu. Leur classification et standardisation sont présentées dans les tableaux II et III.

Tableau II: Classification et standardisation des critères de disponibilité (Youan *Ta et al.*, 2011 ; Yao *et al.*, 2016)

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Notes
Disponibilité en eau souterraine	Pente (%)	Très faible	0 -1	9
		Faible	1 - 2	7
		Moyenne	2 - 3	5
		Forte	3 - 4	3
		Très forte	> 4	1
	Infiltration (mm)	Très faible	< 25	1
		Faible	25 – 40	3
		Moyenne	40 – 70	5
	Densité de drainage (km/km ²)	Forte	70 – 100	7
		Très forte	>100	9
		Très faible	< 5	9
		Faible	5 – 10	7
		Moyenne	10 – 15	5
	Densité de fracturation (km/km ²)	Forte	15 – 20	3
		Très forte	> 20	1
		Très faible	< 5	1
		Faible	5 – 10	3
		Moyenne	10 – 15	5
	Epaisseur d'altération (m)	Forte	15 - 20	7
		Très forte	> 20	9
		Très faible	< 10	1
		Faible	10 - 20	3
		Moyenne	20 - 30	5
		Forte	30 - 40	7
		Très forte	> 40	9

Tableau III: Classification et standardisation des critères d'exploitabilité et d'accessibilité (Youan Ta *et al.*, 2011 ; Yao *et al.*, 2016)

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Notes
Exploitabilité en eau souterraine	Niveau statique (m)	Très faible	< 5	9
		Faible	5 - 15	8
		Moyenne	15 - 25	6
		Forte	25 - 40	3
		Très forte	> 40	1
	Débit d'exploitation (m ³ /h)	Très faible	< 1	1
		Faible	1 - 3	3
		Moyenne	3 - 5	5
		Forte	5 - 8	8
		Très forte	> 8	9
Accessibilité en eau souterraine	Probabilité de succès (%)	Très faible	< 20	1
		Faible	20 - 40	3
		Moyenne	40 - 60	5
		Forte	60 - 80	8
		Très forte	> 80	9
	Profondeur de forage (m)	Très faible	< 25	9
		Faible	25 - 52	8
		Moyenne	52 - 70	7
		Forte	70 - 85	5
		Très forte	> 85	1

4.3.3.3 Evaluation spatiale des critères de décision

L'évaluation spatiale des critères est fonction de la thématique étudiée. Chaque thème appelé aussi indicateur est formé d'un ensemble de critères ou facteurs nécessaires à la réalisation de l'indicateur (Savané, 1997). Dans le cadre de cette étude, les indicateurs qualitatifs et quantitatifs étudiés sont au nombre de trois. Il s'agit des indicateurs de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité des ressources en eau souterraine.

➤ Indicateur de disponibilité en eau souterraine

L'indicateur de disponibilité traduit la notion de l'existence d'un aquifère et constitue la première condition à connaître avant toute autre activité (Savané, 1997). La carte de disponibilité est réalisée à partir de la combinaison de la pente, la densité de drainage, la densité de fracturation, l'épaisseur d'altération et l'infiltration. L'infiltration est le paramètre le plus important pour la disponibilité des eaux souterraines (Mangoua, 2013 ; Yao *et al.*, 2016).

➤ Indicateur d'exploitabilité en eau souterraine

L'indicateur d'exploitabilité dépend du débit d'exploitation et du niveau piézométrique de la nappe. Le débit d'exploitation est conditionné par la quantité d'eau dans la réserve souterraine, mais aussi par la rapidité de renouvellement de cette réserve en cas de forte sollicitation (Youan

Ta *et al.*, 2011). La ressource en eau n'est exploitable que si le débit d'exploitation est significatif (au moins 1 m³/h). Le niveau piézométrique permet de suivre la fluctuation du niveau d'eau dans l'aquifère et joue un rôle important dans la délimitation des zones potentielles en eau souterraine (Shankar & Mohan, 2006).

➤ **Indicateur d'accessibilité en eau souterraine**

L'indicateur d'accessibilité renseigne sur les conditions d'accès à la ressource en eau souterraine. Ces conditions sont considérées comme des facteurs économiques et sociaux car elles favorisent ou non l'accès à la ressource. Les principaux facteurs d'accessibilité sont la profondeur totale et l'indice de succès. La profondeur totale est le paramètre le plus important dans l'indicateur d'accessibilité car il indique la profondeur à forer pour obtenir le débit optimal. De ce fait, il donne des informations sur le coût du forage, celui-ci (coût) étant facturé en fonction du nombre de mètres forés. Certains auteurs ont défini le meilleur intervalle ou le maximum de profondeur que doit atteindre un forage pour obtenir une productivité satisfaisante en milieu cristallin (Jourda, 2005). La plupart des auteurs ont montré que lorsque la profondeur des forages augmente, la fermeture des discontinuités par pression litho-statique diminue leur productivité.

4.3.3.4 Pondération des critères

La pondération consiste à affecter des poids à chaque critère rentrant dans la réalisation d'un indicateur donné. La valeur des poids est relative à l'importance du critère dans l'accomplissement du phénomène que traduit l'indicateur. Dans cette étude, la pondération a été effectuée suivant la méthode de comparaisons par paires selon le processus d'analyse hiérarchique (Analytical Hierarchy Process, (AHP)) développée par Saaty (2008). Selon Youan Ta *et al.* (2011), la technique de pondération proposée par Saaty est une méthode simple dont l'ossature est consolidée par des calculs mathématiques qui génèrent des coefficients de pondération (Cp) standardisés dont la somme est égale à 1.

Cette méthode consiste à faire une comparaison par paire des critères d'un indicateur donné, puis à attribuer une note de comparaison (Tableau IV) à chaque critère selon leur importance dans la réalisation de l'indicateur donné.

Tableau IV: Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de critères (Elmorjani, 2003)

Expression d'un critère par rapport à un autre	Note
Même importance	1
Modérément important	3
Fortement important	5
Très important	7
Extrêmement important	9
Modérément moins important	1/3
Moins important	1/5
Fortement moins important	1/7
Extrêmement moins important	1/9

L'ensemble des notes attribuées à l'issue de la comparaison par paire permet de générer la matrice de comparaison par paire des critères de chaque indicateur (Tableau V et VI). Elle est également appelée matrice de jugement parce qu'elle porte les jugements du spécialiste qui est chargé de comparer les critères deux à deux. Au-delà de deux critères, il est possible que des incohérences soient observées dans le jugement apporté. D'où la nécessité d'adopter une méthodologie pertinente qui permet non seulement de mettre en évidence l'incohérence mais également d'apporter une solution pour corriger cette incohérence (Youan Ta *et al.*, 2015).

En s'appuyant sur la matrice générée par la comparaison par paire sur l'échelle proposée par Saaty (2008), le vecteur propre et le coefficient de pondération de chaque critère sont alors calculés selon les équations 22 et 23. Un exemple du calcul de vecteur propre et du coefficient de pondération est donné au Tableau V et VI.

$$V_{Pj} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n g_i} \quad (\text{Eq. 22})$$

avec :

V_{Pj} : vecteur propre ;

N : nombre de critère

g_i : note du critère i obtenu dans la matrice de comparaison par paire

Le coefficient de pondération (C_p) de chaque critère est obtenu par le rapport de son vecteur propre et la somme de tous les vecteurs propres des autres critères entrant dans la réalisation d'un indicateur donné, à partir de l'équation 23

$$C_{Pj} = \frac{V_{Pj}}{\sum_{i=1}^n V_{Pj}} \quad (\text{Eq. 23})$$

C_{Pj} est le coefficient de pondération du critère i ; et V_{Pj} est le vecteur propre du critère i.

Tableau V: Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des critères des indicateurs de disponibilité

Paramètres	Infiltration	Pente	DF	EA	DD	Vp	Cp
Infiltration	1	3	3	5	7	3,16	0,45
Pente	1/3	1	3	4	5	1,81	0,26
DF	1/3	1/3	1	3	4	1,05	0,15
EA	1/5	1/4	1/3	1	3	0,54	0,08
DD	1/7	1/5	1/4	1/3	1	0,29	0,04
Somme	2	4,78	7,58	13,33	20	6,87	1

DD : Densité de drainage DF : Densité de fracturation EA : Epaisseur d'altération

Tableau VI: Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des critères des indicateurs d'accessibilité et d'exploitabilité

	IS	PF	Vp	Cp
Indice de succès (IS)	1	1/5	0,44	0,20
Profondeur totale (Pt)	5	1	2,23	0,80
Somme	4	1,25	2,67	1
	QE	NS		
Débit d'exploitation (QE)	1	3	1,7	0,75
Niveau Statique (NS)	1/3	1	0,58	0,25
Somme	1,33	4	2,28	1

Dans une étude qui repose sur la subjectivité des valeurs, il est impératif de déterminer la cohérence des jugements (Anoh, 2014). En effet, les valeurs attribuées présentant souvent un certain degré d'incohérence, une synthèse de tous les jugements s'avère judicieux. Pour vérifier la cohérence des appréciations, Saaty (1984) a déterminé un critère d'appréciation qui est le ratio de cohérence (Rc). Si ce dernier est inférieur à 10% alors les appréciations sont cohérentes ; dans le cas contraire, elles nécessiteront une révision. Le principe de vérification se subdivise en 5 étapes successives (Equations 24, 25, 26, 27, 28, 29 et 30) :

- Normalisation de la matrice [A]. Elle consiste à diviser chaque élément d'une colonne par la somme de cette colonne :

$$[A] = \sum \frac{W_n}{\sum W_n} \quad (\text{Eq. 24})$$

- Calcul du vecteur prioritaire [C]. Il consiste à calculer la moyenne de chaque ligne :

$$[C] = [A] \times \frac{1}{n} \quad (\text{Eq. 25})$$

- Multiplication de chaque note de la matrice par le vecteur prioritaire lui correspondant permet d'en déduire la priorité globale [D].

$$[D] = \sum W_n \times [C] \quad (\text{Eq. 26})$$

- Division de chaque priorité globale par le vecteur prioritaire lui correspondant afin de trouver la priorité rationnelle [E].

$$[E] = \frac{[D]}{[C]} \quad (\text{Eq. 27})$$

- Calcul de la moyenne des priorités rationnelles Ymax.

$$Y_{\max} = \frac{[E]}{n} \quad (\text{Eq. 28})$$

- Calcul de l'indice de cohérence (IC).

$$I_C = \frac{Y_{\max} - n}{n - 1} \quad (\text{Eq. 29})$$

- Déduction du coefficient de cohérence (Rc).

$$I_a = \frac{I_c}{I_a} \quad (\text{Eq. 30})$$

Où (Ia) est l'indice aléatoire. Les valeurs de (Ia) sont consignées dans le tableau VII.

Tableau VII : Indice aléatoire (Saaty, 1980)

Nombre de variables	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ia	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Les tableaux VIII, IX et X présente les résultats obtenus à la suite de la vérification des jugements.

Tableau VIII: Vérification de la cohérence des jugements de disponibilité

	Inf	Pente	Df	EA	Dd	C	D	E	Ymax	IC	RC
Inf	0,500	0,628	0,396	0,375	0,350	0,450	2,445	5,436	5,261		
Pente	0,165	0,209	0,396	0,300	0,250	0,264	1,443	5,467		0,065	0,058
Df	0,165	0,069	0,132	0,225	0,200	0,158	0,822	5,195			
EA	0,100	0,052	0,044	0,075	0,150	0,084	0,424	5,038			
Dd	0,070	0,042	0,033	0,025	0,050	0,044	0,227	5,169			

Tableau IX: Vérification de la cohérence des jugements d'accessibilité

	Is	Pt	C	D	E	Ymax	IC	RC
Is	0,25	0,25	0,25	1	2,94	2,07	0,07	0,07
Pt	0,75	0,75	0,75	1	1,2			

Tableau X: Vérification de la cohérence des jugements d'exploitabilité

	Q	Ns	C	D	E	Ymax	IC	RC
QE	0,16	0,16	0,16	0,192	1,2	2,08	0,08	0,08
Ns	0,8	0,8	0,8	4,86	2,96			

Avec des Rc égal à 5,8 %, 7% et 8% respectivement pour la disponibilité, l'accessibilité et l'exploitabilité, les matrices de hiérarchisation présentées (Tableau V et VI) sont considérées comme cohérentes. Par conséquent les jugements attribués peuvent être utilisés pour la détermination des zones de potentialité en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi.

4.3.3.5 Agrégation des critères

Dans cette étude, la méthode d'agrégation des critères par pondération a été utilisée. Cette méthode a été également utilisée par Saley (2003), Jourda (2005), Dibi (2008), Youan Ta et *al.* (2011). Elle consiste à faire la somme des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère intervenant dans l'élaboration d'un indicateur donné. Le résultat final (S) représentant la valeur de l'indicateur est donnée par l'équation 31) :

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (\text{Eq. 31})$$

avec :

S : le résultat ;

Wi le poids du critère i ;

Xi la valeur standardisée du critère i.

L'agrégation par pondération fournit un indice d'aptitude situé sur une échelle de 0 à 10. En effet, la somme des coefficients de pondération générée par la méthode de Saaty (2008) vaut 1. L'établissement de la carte d'un indicateur donné consistera à reporter dans un espace géographique les différentes valeurs issues de la sommation des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère intervenant dans l'élaboration dudit indicateur (Youan Ta et *al.*, 2011). Une reclassification des indicateurs conduira à des cartes thématiques à quatre classes

que sont : les classes mauvaise, médiocre, bonne et excellente. Le nombre de classe est fixé à quatre pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte résultante.

4.3.3.6 Etablissement de la carte des zones favorables à gros débits

Suivant la même logique de l'analyse multicritère, les indicateurs disponibilité, accessibilité et exploitabilité considérés ici comme des critères de décision vont être combinés selon la technique d'agrégation par pondération. Cette démarche s'explique par le fait que la ressource en eau souterraine recherchée doit être suffisante, accessible et exploitable. Il est important avant de procéder à cette combinaison de s'assurer que les différents indicateurs reflètent la sensibilité du terrain, d'où la nécessité de leur validation.

4.3.3.7 Validations des différentes cartes thématiques

Les cartes thématiques réalisées ont été validées par le calcul de l'incertitude (Mangoua, 2013 ; Yao, 2015). En effet, le mode de validation des cartes thématiques utilisées dans les études antérieures (Jourda, 2005 ; Youan Ta *et al.*, 2011) a montré des insuffisances dans le fait qu'il est pratiquement impossible de trouver une classe de sensibilité reflétant à 100% la réalité du terrain, car à côté d'un forage à gros débit, il est possible d'avoir un autre forage à débit faible, voire nul. Ainsi, le calcul des incertitudes sur les moyennes des divers paramètres des principaux indicateurs est donné par l'équation 32.

$$\Delta \bar{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} \quad (\text{Eq. 32})$$

avec :

$\Delta \bar{X}$: incertitude sur la moyenne de la série de données ;

σ : écart type de la série de données ;

m : nombre de données.

Un facteur d'expansion (K.) est alors calculé afin de déterminer le niveau de confiance. La détermination de ce paramètre est basée sur le principe statistique de calcul de l'incertitude étendue. Le facteur K permet la définition d'un intervalle de portée suffisante ayant pour but d'avoir dans les résultats une grande confiance. L'expression de ce facteur est donnée par l'équation 33) :

$$K = \frac{|E - \bar{X}|}{\sigma} \quad (\text{Eq. 33})$$

avec :

K est le facteur d'expansion ;

E correspond à la valeur extrême de la série statistique qui peut être le maximum ou le minimum de cette série.

Matériel et méthodes

Les niveaux de confiance des différents paramètres ont été déduits des différentes valeurs de K . Ainsi, $K = 1$ pour un niveau de confiance de 68 % ; $K = 2$ pour un niveau de confiance de 95 % et $K = 3$ pour une confiance de 99 %.

La figure 26 résume fait une synthèse de la mise en oeuvre de l'analyse multicritères pour la détermination des zones potentiellement favorables à l'obtention de gros débits.

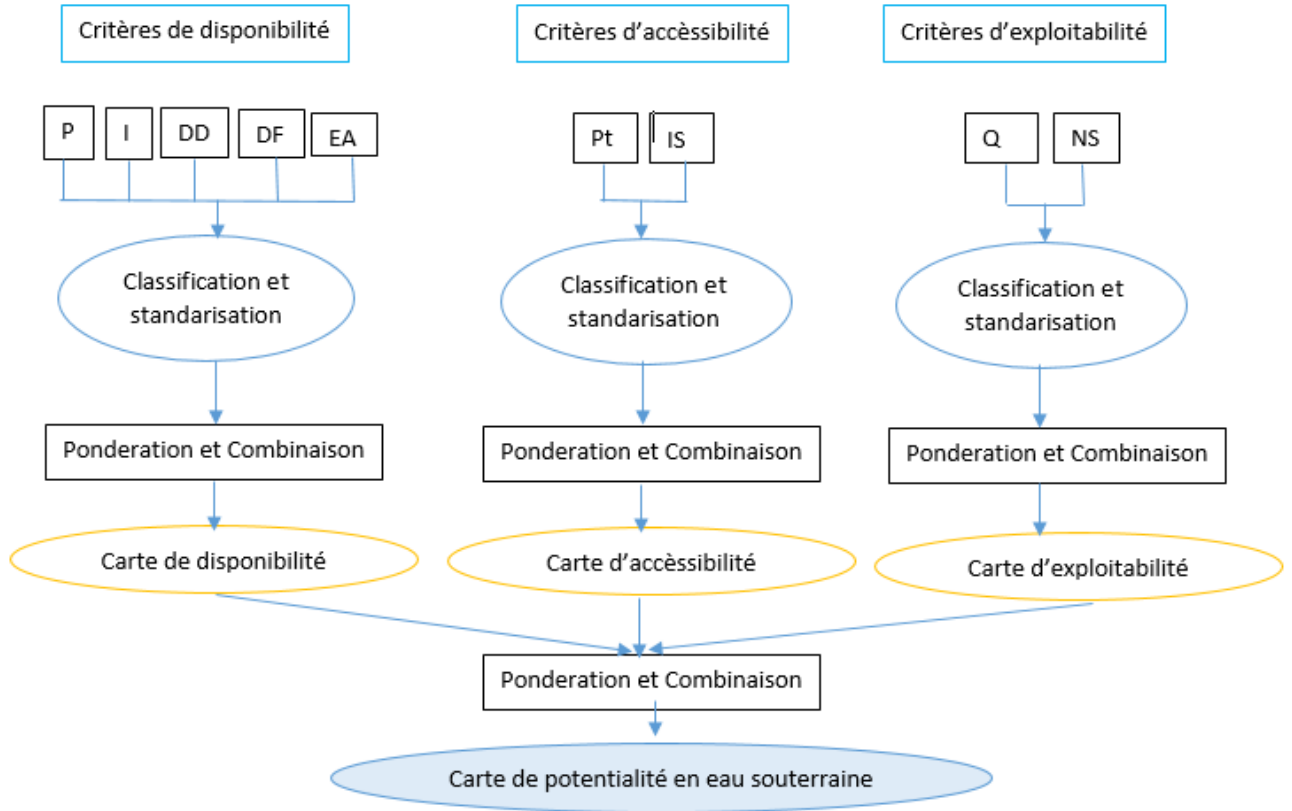


Figure 26: Synthèse de la mise en oeuvre de l'analyse multicritères

P : Pente ; I : Infiltration ; DD : Densité de Drainage ; DF : Densité de Fracturation ; EA : Epaisseur d'altération ; Pt : Profondeur totale ; IS : Indice de succès ; Q : Débit ; NS : Niveau Statique

Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de présenter les différentes approches méthodologiques mobilisées dans le cadre de cette étude, notamment :

- la caractérisation du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère, à travers la détermination de la transmissivité, de la perméabilité des couches d'altérites et de l'aquifère fracturé, de la porosité, du débit spécifique, du coefficient d'emmagasinement, ainsi que l'établissement d'une relation entre les propriétés hydrodynamiques et la résistivité ;
- l'élaboration d'un modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères ;
- la cartographie des zones à fort potentiel en eau souterraine.

Ces différentes méthodes ont permis d'obtenir des résultats significatifs, dont la présentation, l'analyse et la discussion seront développées dans la troisième partie de ce mémoire.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 5 : CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE DES AQUIFERE DES DEPARTEMENTS DE YAMOUSSOUKRO ET DE TOUMODI

5.1. Analyse descriptive des paramètres de forages

5.1.1 Analyse des débits

Les débits des forages ont été classés selon les catégories définies par le C.I.E.H. (Tableau XI). Les classes 3 et 4, correspondant à des débits supérieurs à 2,5 m³/h, sont les plus représentées, avec une fréquence cumulée de 65,01 %.

Tableau XI: Résultats statistiques des débits en fonction des classes du C.I.E.H

Classes	Classe de debits	Débit (m ³ /h)	Fréquences (%)
1 ^{ère} classe	Très faible	≤ 1	8,33
2 ^{ième} classe	Faible	1-2,5	26,66
3 ^{ième} classe	Moyen	2,5-5	26,66
4 ^{ième} classe	Fort	> 5	38,35

5.1.2 Relation débits et profondeurs

Les profondeurs des forages réalisés varient entre 50,27 m et 105,35 m, avec une profondeur moyenne de 77,59 m. L'analyse de la figure 27 montre que, de manière générale, les débits principaux (Q) supérieurs à 5 m³/h se situent majoritairement entre 45 et 85 mètres de profondeur dans cette zone.

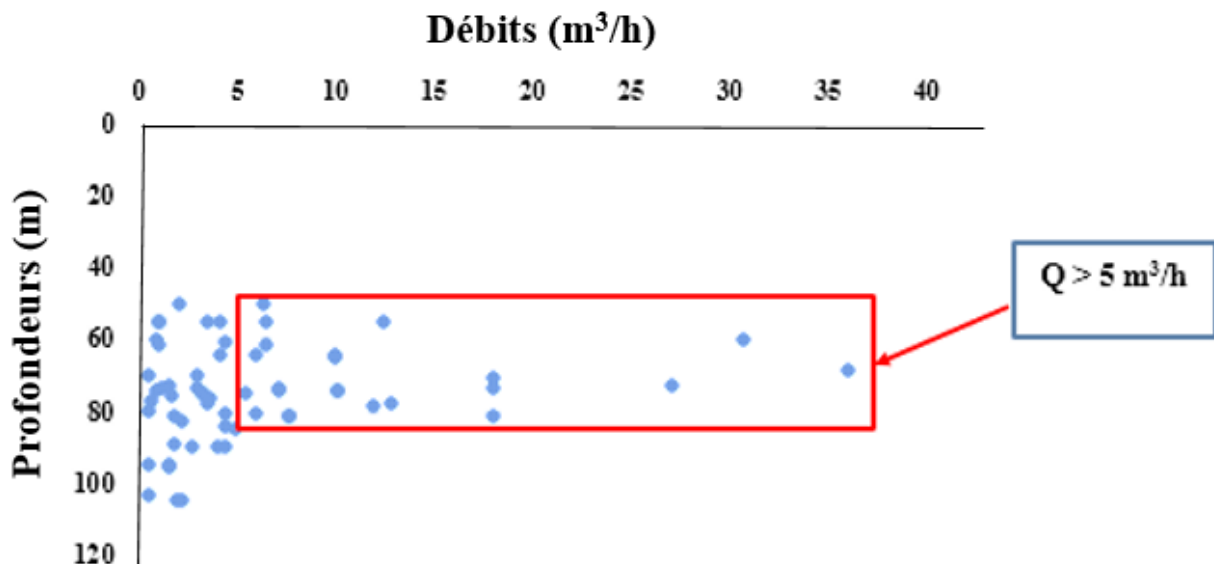


Figure 27: Evolution des débits en fonction des profondeurs totales de forages

5.1.3 Relation débits et épaisseurs d'altération

La figure 28 illustre une relation non linéaire entre les débits et l'épaisseur des altérites. Les débits les plus élevés sont observés sur presque l'ensemble des différentes épaisseurs d'altération, témoignant d'une variabilité complexe de la productivité en fonction de ce paramètre.

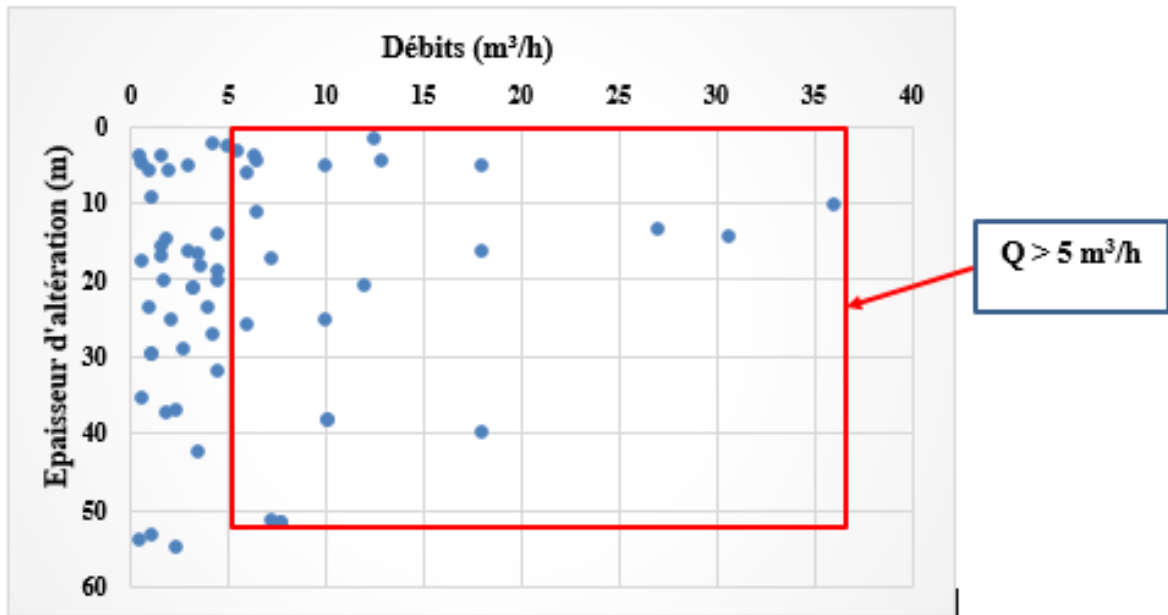


Figure 28: Evolution des débits en fonction des épaisseurs d'altérites

5.1.4 Analyse des premières arrivées d'eau

Les premières arrivées d'eau observées se situent entre 10 et 75 mètres de profondeur. L'histogramme de distribution des fréquences des profondeurs des premières arrivées d'eau (Figure 29) indique que 55 % de ces arrivées se concentrent entre 60 et 75 mètres dans le socle.

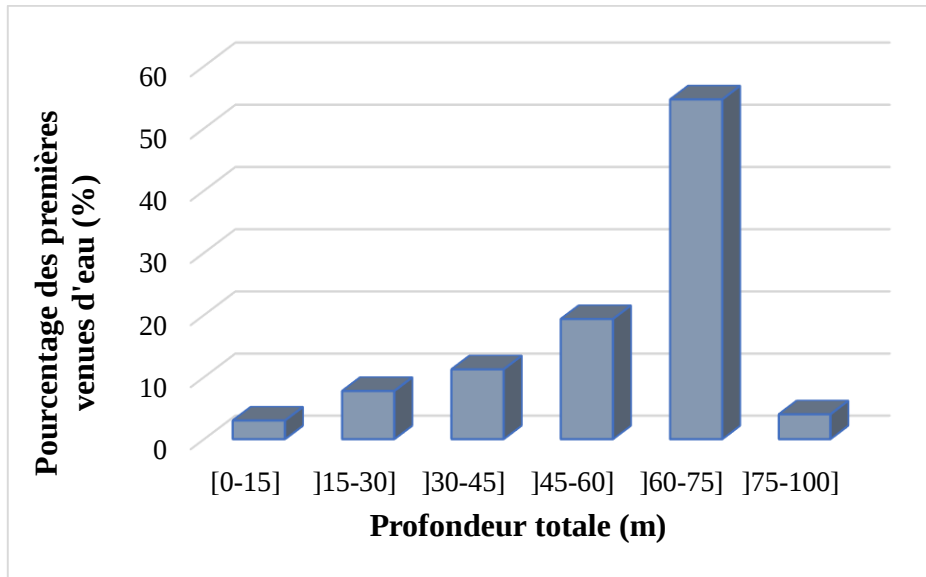


Figure 29: Histogramme des fréquences d'observation des premières arrivées d'eau

5.1.5 Corrélation entre épaisseur d'altérite et profondeur totale

Le graphique présenté à la figure 30 montre l'absence de corrélation significative entre la profondeur totale des forages et l'épaisseur des altérites.

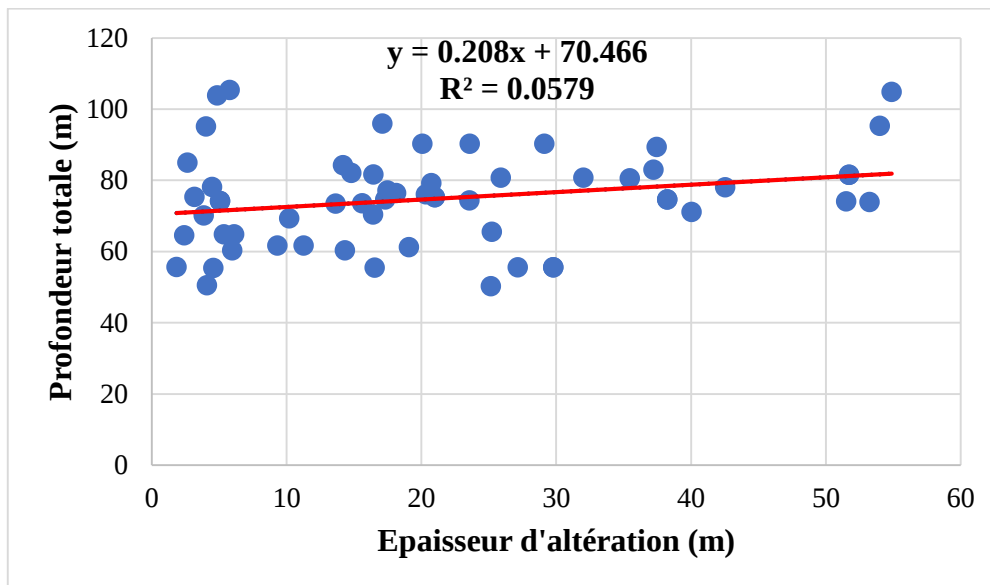


Figure 30: Relation entre l'épaisseur d'altérite et la profondeur totale

5.1.6 Niveau statique

Le tableau XII présente les niveaux statiques mesurés à la fin des travaux de forage, correspondant au niveau d'eau au repos dans les ouvrages. Il en ressort que 76,66 % des forages affichent un niveau d'eau situé entre la surface et 20 mètres de profondeur. De plus, la majorité

des niveaux statiques sont localisés au sein des formations d'altérites, un constat également valable pour les aquifères fissurés.

Ce résultat revêt une importance majeure, car il témoigne de la mise en charge de l'aquifère de fissures par l'eau et confirme l'existence d'une interconnexion hydraulique entre les aquifères d'altérites et de fissures.

Tableau XII: Fréquence des niveaux statiques en fonction des profondeurs

Profondeur (m)	Fréquence des NS (%)
0 – 10 m	21,66
10 – 20 m	55
20 - 40 m	18,33
40 – 50 m	3,33
50 – 100 m	1,66

5.2 Analyse des paramètres hydrodynamiques

5.2.1 paramètres hydrodynamiques des aquifères d'altérites

5.2.1.1 Perméabilités des couches altérites

Les valeurs de perméabilité de la couche d'altérites dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi varient entre $1,2 \times 10^{-8}$ m/s à Attiéguakro et $3,6 \times 10^{-5}$ m/s à N'zéré (Tableau XIII). La perméabilité moyenne est estimée à $1,3 \times 10^{-7}$ m/s, avec un écart-type de $1,2 \times 10^{-6}$ m/s.

Tableau XIII: Caractéristiques des valeurs de perméabilité des couches d'altérites

	Perméabilité (m.s ⁻¹)
Minimum	$1,2.10^{-8}$
Maximum	$3,6.10^{-5}$
Moyenne	$1,3.10^{-7}$
Écart-type	$1,2.10^{-6}$

La carte de répartition des valeurs de perméabilité des couches d'altérites révèle que, de manière générale, la perméabilité est faible sur l'ensemble des départements de Yamoussoukro et de Toumodi. Toutefois, des valeurs relativement élevées sont observées dans les secteurs du Nord-Ouest et du Sud, où la perméabilité dépasse 3×10^{-5} m/s (Figure 31).

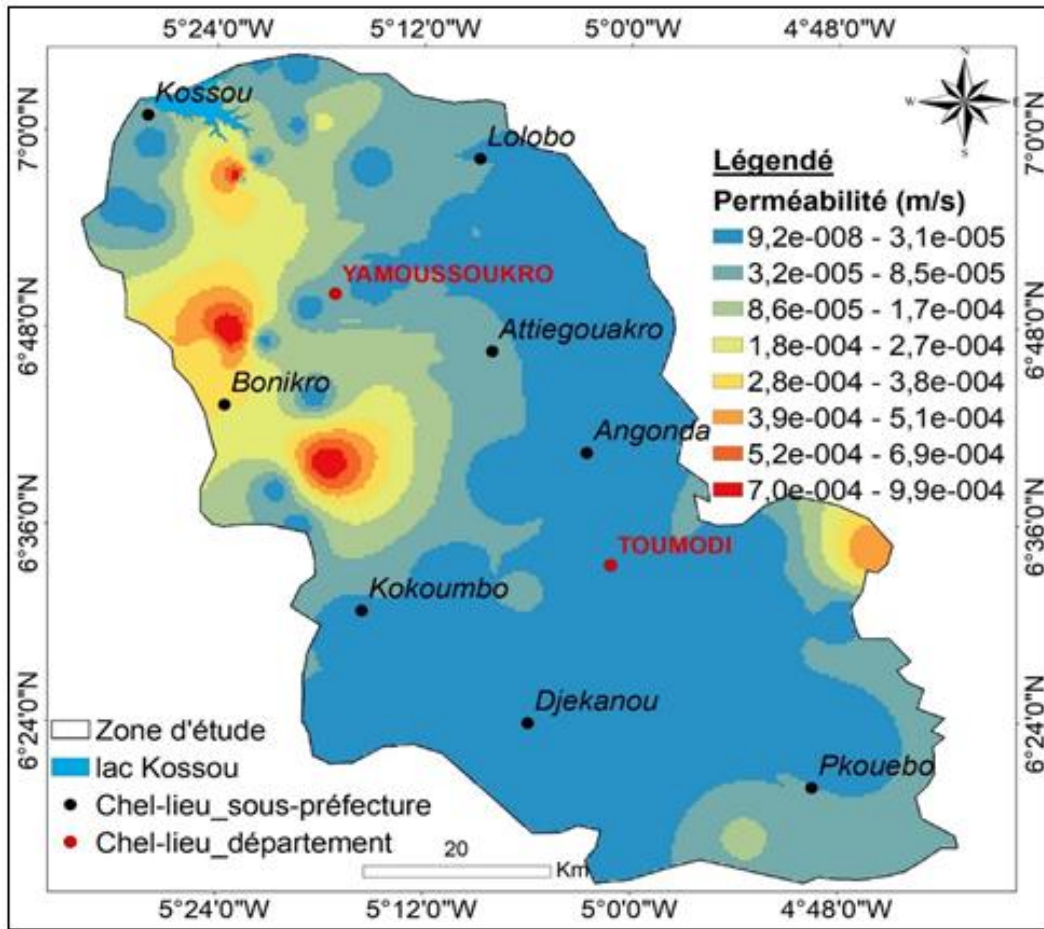


Figure 31 : Carte de répartition des valeurs de perméabilités dans les couches d'altérites

5.2.1.2 Porosité des couches d'altérites

Le tableau XIV présente les résultats relatifs à la porosité totale des couches d'altérites. Les valeurs observées varient entre 5 % et 37,6 %, avec une moyenne de 28,4 % et un écart-type de 7,58 %. Globalement, ces porosités peuvent être considérées comme moyennes.

Tableau XIV: Caractéristiques des valeurs de porosité des couches d'altérites

	Porosité (%)
Minimum	5%
Maximum	37,6%
Moyenne	28,4%
Écart-type	7,58

Les valeurs les plus faibles ont été relevées au sud de Kossou, à l'est de la sous-préfecture de Toumodi ainsi que dans le secteur sud de Djekanou. En revanche, les porosités les plus élevées sont localisées au centre des deux départements, précisément dans la zone comprise entre Kokoumbo, Attiégouakro et Angonda (Figure 32).

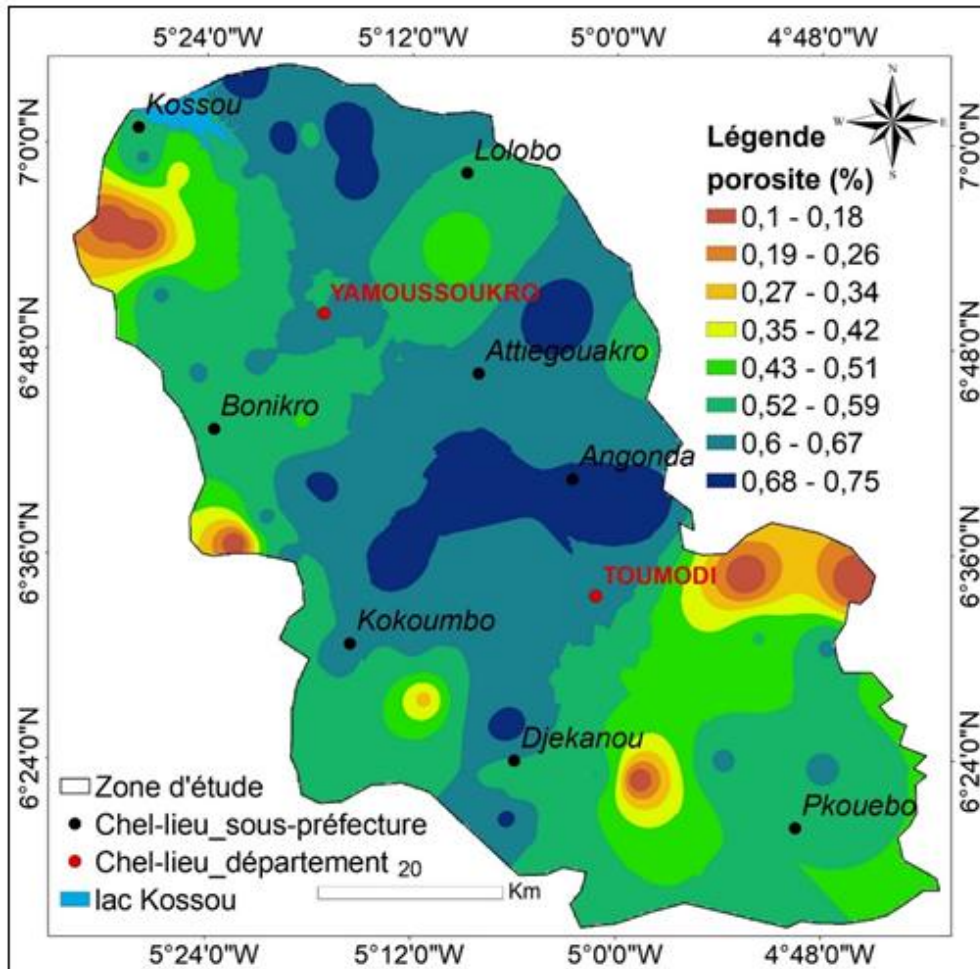


Figure 32: Carte des répartitions des porosités dans les altérites

5.2.2 Paramètres hydrodynamiques des aquifères fissurés

5.2.2.1 Transmissivité de la frange fissurée

Les valeurs de transmissivité varient entre $1,84 \times 10^{-6}$ et $6,69 \times 10^{-4}$ m/s, avec une moyenne géométrique de $6,80 \times 10^{-5}$ m/s. L'écart-type est de l'ordre de $1,28 \times 10^{-4}$ m/s (Tableau XV).

Tableau XV : caractéristiques des valeurs de transmissivité de la frange fissurée

	Transmissivité (m/s)
Minimum	$1,844.10^{-6}$
Maximum	$6,69.10^{-4}$
Moyenne	$2,95. 10^{-5}$
Écart-type	$1,28. 10^{-4}$

Les fréquences des valeurs de transmissivité sont présentées dans le tableau XVI. On observe que 42 % des valeurs correspondent à la classe faible, 21 % à la classe moyenne, tandis que 37 % appartiennent à la classe forte.

Tableau XVI: Tableau des fréquences de transmissivité

Classe	Transmissivité (m ² /s)	Fréquence (%)
Classe faible	$T < 10^{-5}$	42
Classe moyenne	$10^{-5} < T < 10^{-4}$	21
Classe forte	$T > 10^{-4}$	37

La carte de répartition des valeurs de transmissivité dans la frange fissurée révèle que les sous-préfectures de Djékanou, Toumodi, Attiégouakro ainsi que le secteur sud de Bonikro présentent des transmissivités élevées. En revanche, dans le reste de la zone d'étude, les valeurs sont généralement faibles, avec quelques secteurs affichant des valeurs moyennes par endroits (Figure 33).

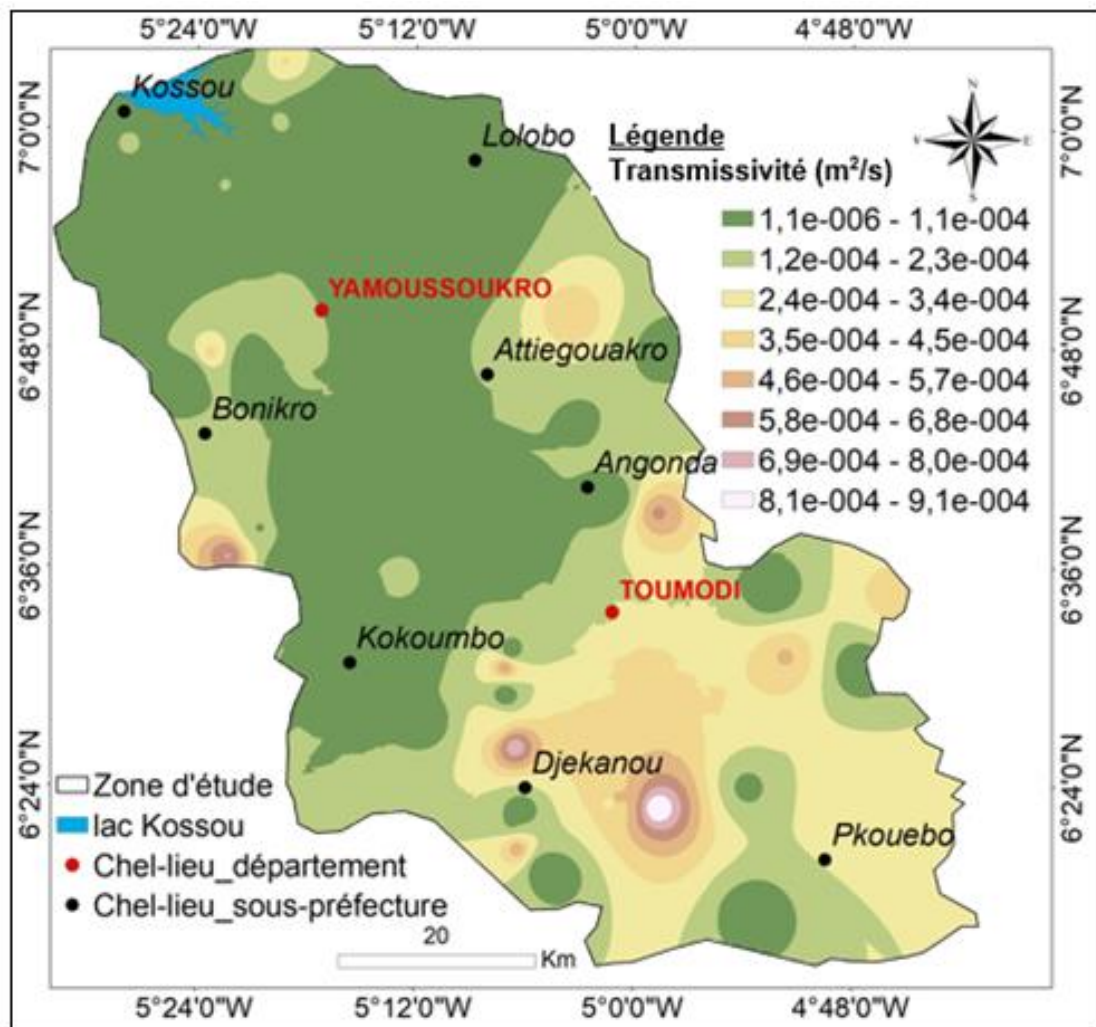


Figure 33 : Carte de répartition des valeurs de transmissivité de la frange fissurée

5.2.2.2 Perméabilité de la frange fissurée

Le tableau XVII présente les valeurs de perméabilité de la couche fissurée dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi. Les valeurs enregistrées varient d'un minimum de $2,9 \times 10^{-8}$ m/s à Attiégouakro à un maximum de $2,6 \times 10^{-5}$ m/s à N'da-Kouassikro. La perméabilité moyenne est estimée à $1,5 \times 10^{-6}$ m/s, avec un écart-type de $3,7 \times 10^{-6}$ m/s.

Tableau XVII: Caractéristiques des valeurs de perméabilité de la frange fissurée

	Perméabilité (m.s ⁻¹)
Minimum	$2,9.10^{-8}$
Maximum	$2,6.10^{-5}$
Moyenne	$1,5.10^{-5}$
Écart-type	$3,7.10^{-6}$

La carte de répartition des valeurs de perméabilité dans la frange fissurée révèle que, dans les parties ouest et est de la zone d'étude, la perméabilité reste faible sur l'ensemble des départements de Yamoussoukro et de Toumodi. Cependant, des valeurs sensiblement élevées sont observées au sud de Pkouebo ainsi que dans les environs des sous-préfectures de Bonikro et Kokoumbo (Figure 34).

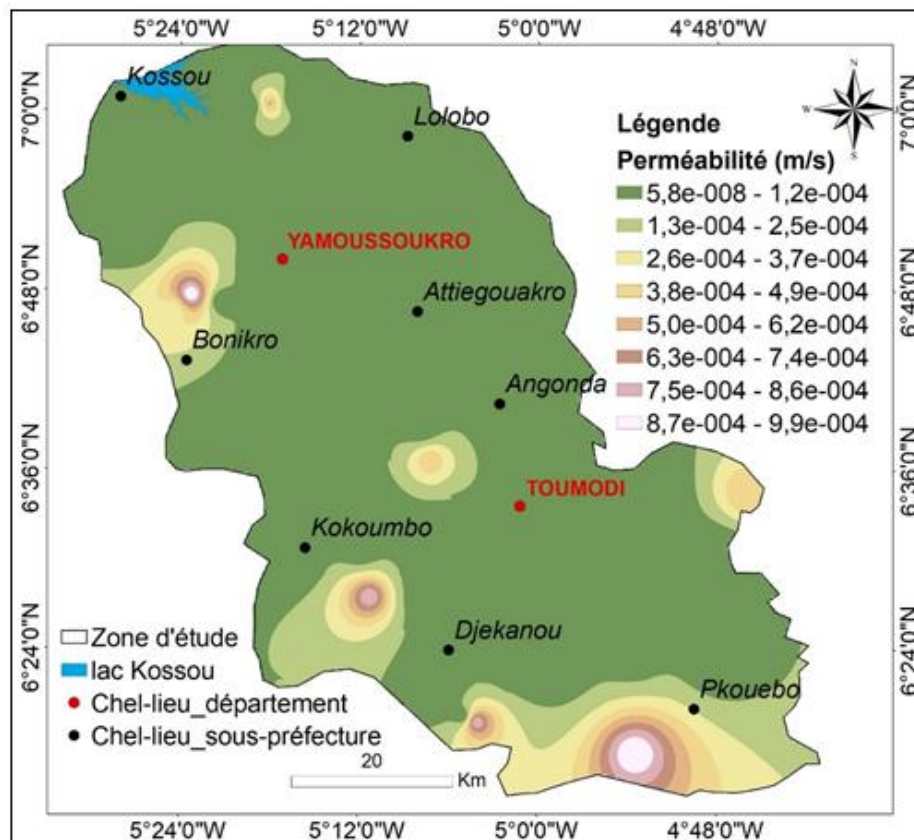


Figure 34 : Carte de répartition des valeurs de perméabilité dans la frange fissurée

5.3 Piézométrie

La carte piézométrique (Figure 35) met en évidence trois principales directions d'écoulement des eaux souterraines ainsi que les différentes zones de recharge de l'aquifère. Les flux souterrains s'orientent principalement selon les axes Nord-Sud et Est-Ouest. En ce qui concerne les zones d'alimentation, celles-ci sont quasi absentes dans la majeure partie de la zone d'étude. Toutefois, quelques secteurs de recharge de la nappe ont été identifiés autour de Yamoussoukro, Kpouèbo, Kossou et Kokoumbo. Par ailleurs, la présence de dômes piézométriques significatifs est observée aux abords de Bonikro et Toumodi.

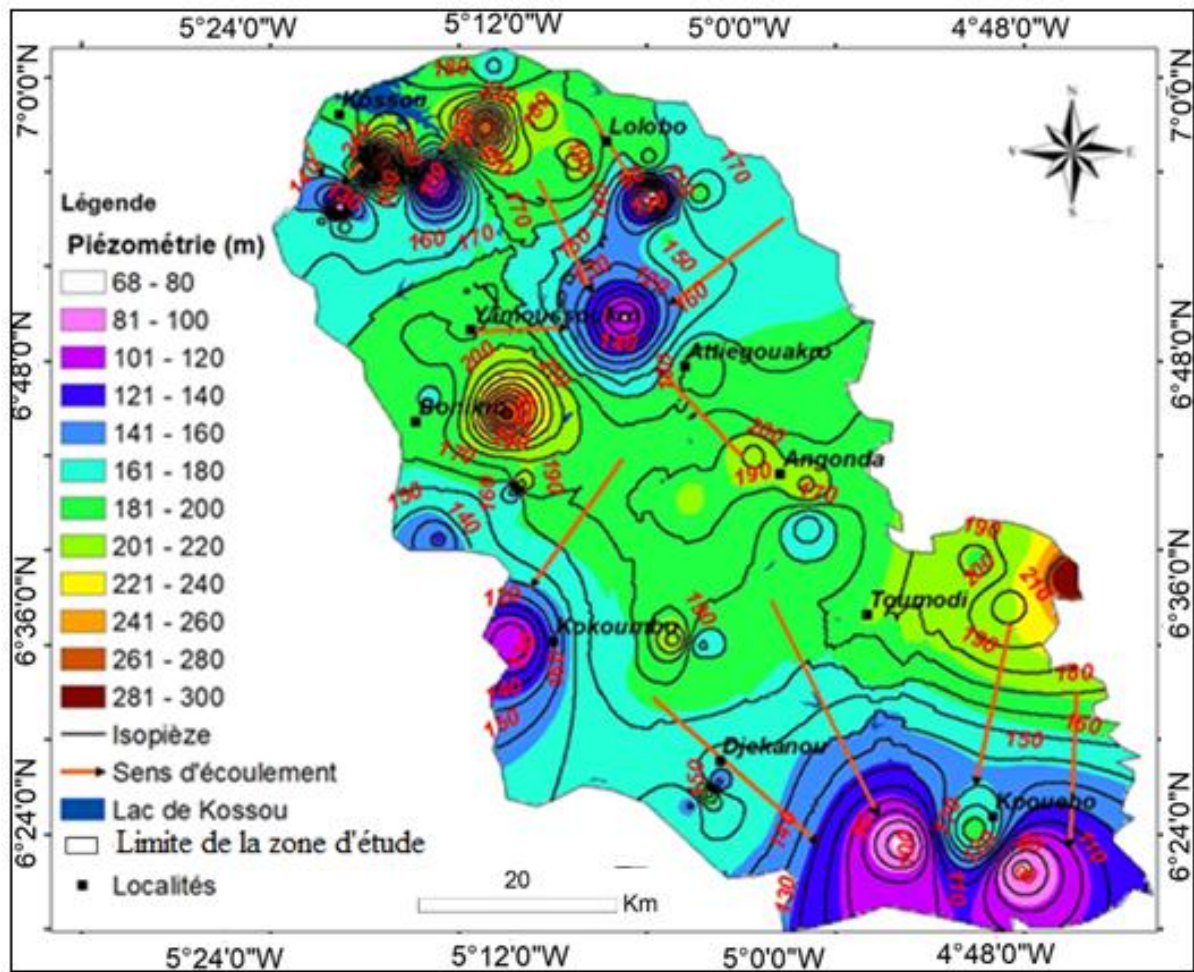


Figure 35 : Carte piézométrique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi, Décembre 2022)

5.4 Analyse statistique des paramètres hydrodynamiques avec la méthode SOM

Les paramètres hydrodynamiques ont été analysés à l'aide de la carte auto-organisatrice de Kohonen (SOM). Les erreurs de quantification (QE) et de topologie (TE) sont présentées dans

le Tableau XVIII. La carte de Kohonen comporte 38 cellules organisées en 5 lignes et 7 colonnes, utilisées pour projeter les données relatives à 60 forages (Figure 36).

Tableau XVIII: Erreurs de quantification (EQ) et de topologie (ET) des différentes tailles de carte de Kohonen

Taille de la carte	Erreur de topographie (ET)	Erreur de quantification (EQ)
36	0,033	0,215
35	0,000	0,216
40	0,017	0,195
42	0,033	0,199

La matrice retenue est en gras car elle présente la plus faible erreur de topographie (ET).

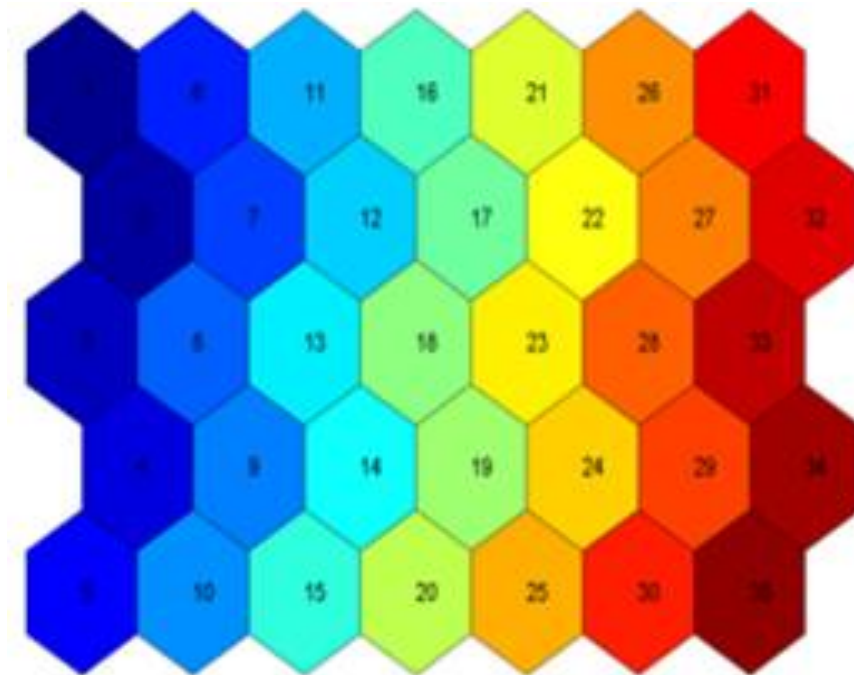


Figure 36: Carte de Kohonen issue de la matrice 7 * 5 (35 cellules)

- **Dendrogramme de classification hiérarchique**

L'analyse de classification hiérarchique (Figure 37) a permis de regrouper les 35 cellules de la carte de Kohonen en quatre (4) groupes distincts (G1 à G4), en fonction de leur similarité au regard des paramètres hydrodynamiques.

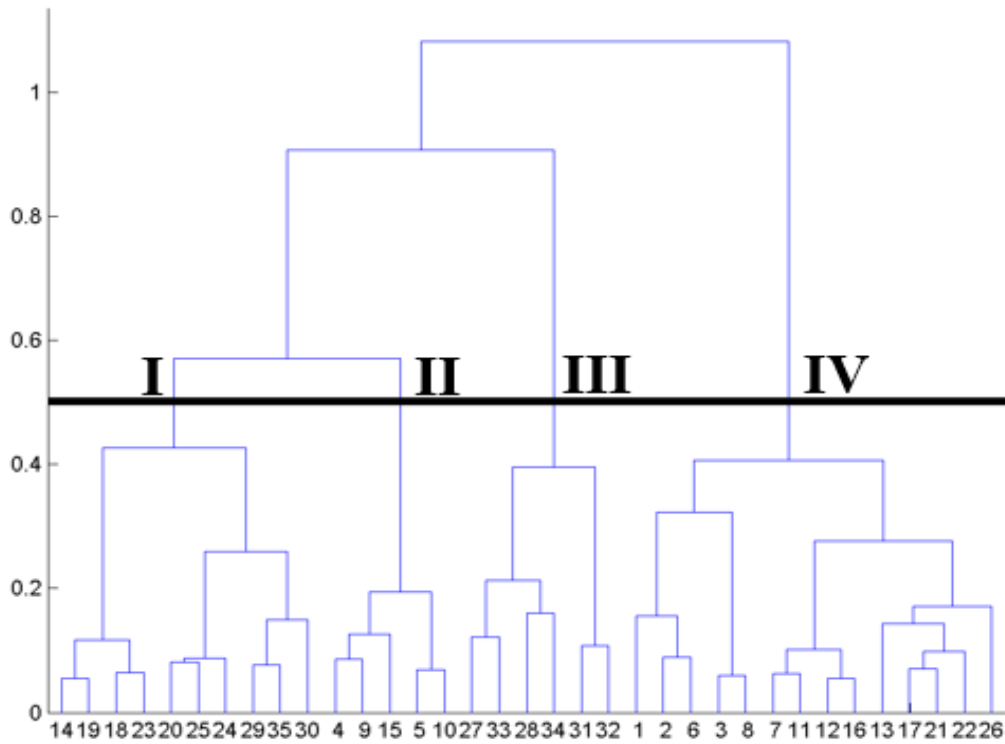


Figure 37: Dendrogramme de classification hiérarchique des cellules de la carte de Kohonen

- **Distribution des forages**

Afin de mieux comprendre la productivité des forages, une classification de ces derniers a été réalisée sur la carte de Kohonen (Figure 38). La figure 39 illustre les poids attribués aux différents paramètres hydrodynamiques dans le regroupement des unités définies par l'analyse de classification hiérarchique employée.

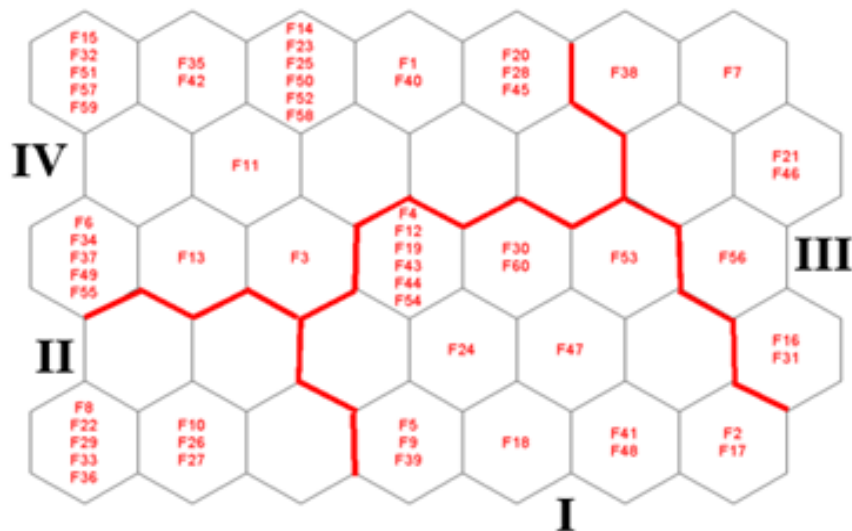


Figure 38 : Distribution des forages sur la carte de Kohonen à partir des paramètres hydrodynamiques

- **Gradient de valeur des paramètres hydrodynamiques**

Le groupe 1 regroupe 22 forages et se caractérise par un niveau statique élevé ($d = 28,7$ m), un débit moyen, ainsi qu'une transmissivité et une perméabilité faibles (respectivement $d = 2,13$ m²/s, $2,77 \times 10^{-5}$ m/s et $4,68 \times 10^{-7}$ m/s). Ce groupe présente également une épaisseur d'altérites moyenne ($d = 25,9$ m) et une grande profondeur totale ($d = 97$ m).

Le groupe 2 comprend 8 forages. Il se caractérise par un débit et une profondeur totale de forage modérés (respectivement $d = 10$ m³/h et $d = 79,7$ m), un niveau statique moyen ($d = 18,9$ m) ainsi qu'une épaisseur d'altérites relativement élevée ($d = 43,5$ m). En revanche, la transmissivité et la perméabilité y demeurent faibles, avec des valeurs respectives de $2,77 \times 10^{-5}$ m²/s et $4,68 \times 10^{-7}$ m/s.

Le groupe 3 regroupe 7 forages. Il se caractérise par une épaisseur d'altérites, un niveau statique et un débit de valeurs moyennes (respectivement $d = 25,9$ m, $d = 18,9$ m et $d = 10$ m³/h). En revanche, la transmissivité et la perméabilité y sont élevées, avec des valeurs respectives de $7,92 \times 10^{-4}$ m²/s et $1,06 \times 10^{-5}$ m/s. La profondeur totale des forages dans ce groupe est également moyenne ($d = 79,7$ m).

Le groupe 4 comprend 26 forages. Il se caractérise par un niveau statique relativement faible ($d = 18,9$ m), une épaisseur d'altérites moyenne ($d = 25,9$ m) et une faible profondeur totale ($d = 62,5$ m). La transmissivité et la perméabilité y sont également faibles, avec des valeurs respectives de $2,77 \times 10^{-5}$ m²/s et $4,68 \times 10^{-7}$ m/s. Toutefois, ce groupe présente un débit moyennement élevé, atteignant en moyenne 17,9 m³/h (Figure 39).

Les forages considérés comme productifs sont ceux qui présentent une transmissivité et une perméabilité élevées, une épaisseur d'altérites moyenne ainsi qu'une profondeur totale relativement faible. Ainsi, les groupes II, III et IV se distinguent comme les plus favorables en termes de productivité des forages.

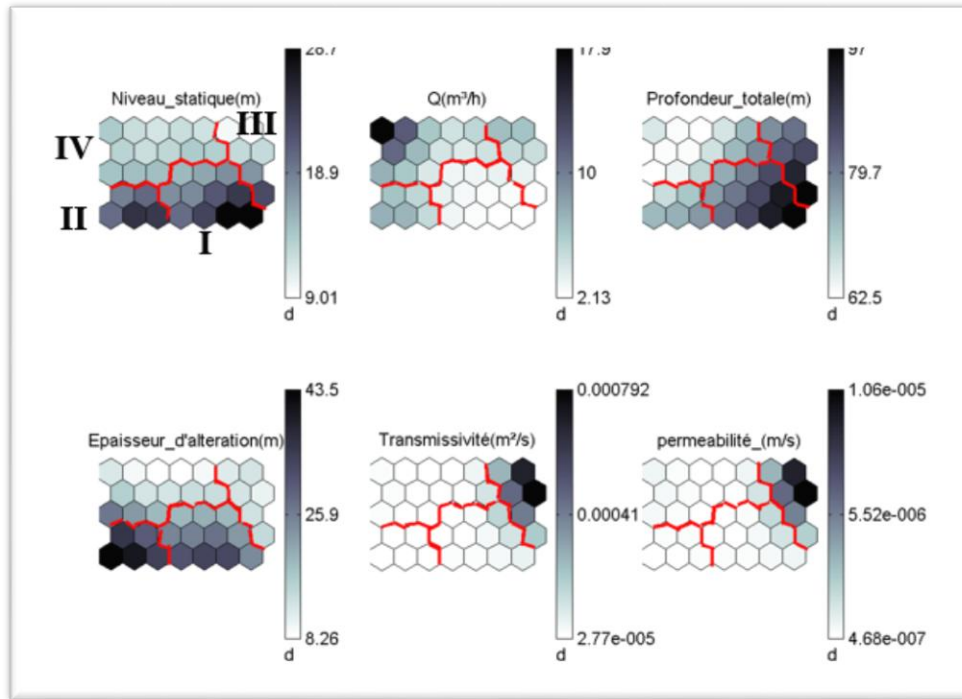


Figure 39 : Gradient de valeur de chaque paramètre hydrodynamique sur la carte de Kohonen
NB : d = échelle indiquant les valeurs transformées des paramètres par le logarithme ; couleur foncée= valeurs fortes pour le paramètre considéré ; couleur pâle = valeur faible.

5.6 Discussion

Au regard de l'analyse des forages réalisés dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, la profondeur optimale de productivité se situe entre 45 et 85 mètres. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par plusieurs auteurs ayant travaillé sur les aquifères en milieu de socle en Côte d'Ivoire, notamment Biémi (1992) et Dibi *et al.* (2004). Ces derniers ont en effet souligné qu'au-delà d'une certaine profondeur, les probabilités de rencontrer un aquifère à bon débit diminuent fortement. Ainsi, une plage de profondeur optimale a été définie pour garantir une productivité satisfaisante : environ 80 m dans les formations granitiques et 100 m dans les formations schisteuses.

Par ailleurs, l'évolution du débit ne semble pas suivre celle de l'épaisseur des altérites de manière systématique. Cette observation s'explique par le fait que certains paramètres déterminants, tels que la nature de la roche mère ou les caractéristiques pétrographiques des altérites, ne sont pas systématiquement intégrés dans les analyses (Mangoua *et al.*, 2010). En revanche, Berger *et al.* (1980) ont montré qu'en Côte d'Ivoire, la productivité des forages tend à croître avec l'épaisseur des altérites dans les zones à roches cristallines et cristallophylliennes.

Dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, les débits élevés ($Q > 4 \text{ m}^3/\text{h}$) sont majoritairement observés entre 15 et 45 mètres de profondeur. Ce résultat complète les conclusions de plusieurs travaux antérieurs menés en Côte d'Ivoire. En effet, dans la région d'Oumé, Baka et al. (2019) ont identifié la tranche d'altérites [0–30 m] comme étant favorable à l'obtention de débits importants. De même, à Bondoukou, Mangoua (2013) a observé que les débits élevés se rencontrent généralement entre 10 et 40 voire 45 mètres de profondeur.

Aux profondeurs plus importantes ($> 60 \text{ m}$), les arrivées d'eau détectées dans le socle peuvent être interprétées comme des indices de la profondeur maximale de fracturation dans ces départements. Ces observations sont cohérentes avec les travaux de Jourda (2005), qui fixent la limite inférieure d'existence de fissures ouvertes entre 50 et 70 mètres.

Les valeurs de transmissivité dans la zone d'étude varient de $1,8 \times 10^{-6}$ à $6,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette forte hétérogénéité s'explique par la diversité des unités géologiques, la structuration lithologique locale et la géométrie des systèmes aquifères, incluant à la fois les altérites et la zone fissurée sous-jacente. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Soro (2010) dans la même zone, qui rapporte des valeurs comprises entre $1,1 \times 10^{-6}$ et $4,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, avec une moyenne de $4,9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Cette variabilité importante des transmissivités est également observée dans d'autres régions de la Côte d'Ivoire (Biémi, 1992 ; Savané, 1997 ; Lasm, 2000 ; Koïta, 2010) et plus largement en Afrique de l'Ouest (Savadogo, 1984). Les valeurs relativement élevées enregistrées par endroits peuvent s'expliquer par la présence de joints subverticaux et par une interconnexion efficace du réseau de fractures, ce qui favorise de bonnes propriétés hydrauliques, comme l'ont souligné Lachassagne et Wyns (2005).

Les valeurs de perméabilité calculées dans le cadre de cette étude varient entre $2,9 \times 10^{-8}$ et $2,6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, avec une moyenne de $1,5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Kouassi *et al.* (2013) dans la circonscription de Dimbokro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), où les valeurs de perméabilité varient de $1,79 \times 10^{-8}$ à $3,80 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, avec une moyenne de $6,35 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Cette similitude s'explique par le fait que les deux études ont été menées dans des zones de socle. Toutefois, les méthodes d'estimation diffèrent : la présente étude repose sur la méthode de Cooper-Jacob, tandis que Kouassi *et al.* ont utilisé la méthode de Hvorslev.

Par ailleurs, les valeurs de porosité obtenues se situent entre 5 % et 37,6 %, ce qui reste conforme aux plages de valeurs proposées par De Marsily (2004). Ce dernier indique que la porosité des milieux poreux peut varier entre 2 % et 90 %, en fonction de la nature du matériau et de sa structure, tout en soulignant la relation fondamentale entre la phase fluide et la matrice solide.

L'application de la méthode des cartes auto-organisatrices de Kohonen (Self-Organizing Maps, SOM) a permis de révéler des corrélations significatives entre les paramètres hydrodynamiques étudiés. L'analyse des regroupements suggère une relation étroite entre le niveau statique (NS), la profondeur des premières arrivées d'eau (AE), la profondeur totale (Pt) et les paramètres de productivité (débit Q, perméabilité P et transmissivité T). Plus la profondeur forée dans le socle est importante, plus la productivité des ouvrages tend à diminuer, en raison d'un nombre réduit de fractures et de la rareté des arrivées d'eau significatives.

En outre, ces corrélations suggèrent qu'une grande profondeur ainsi qu'une épaisseur importante des altérites, particulièrement en terrain schisteux, contribuent à une élévation du niveau statique de l'aquifère (Dibi *et al.*, 2004 ; Mangoua, 2013). Cela s'explique par le rôle capacitif joué par les altérites, qui emmagasinent l'eau, et le rôle drainant de la zone fissurée sous-jacente (Koïta, 2010).

Conclusion partielle

La caractérisation du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère des départements de Yamoussoukro et de Toumodi a permis de mettre en évidence les principaux paramètres hydrodynamiques des aquifères d'altérites et de fissures. Cette analyse a également permis d'établir des relations entre les propriétés hydrodynamiques et les valeurs de résistivité, ainsi que de conduire une étude statistique approfondie sur l'épaisseur des altérites et ses liens avec les paramètres hydrodynamiques.

Les résultats obtenus révèlent une forte hétérogénéité du milieu. En effet, la perméabilité des couches d'altérites varie considérablement selon les localités, avec des valeurs comprises entre $1,35 \times 10^{-6}$ et $1,31 \times 10^{-5}$ m/s. Dans les aquifères de fissures, cette perméabilité s'étend de $2,93 \times 10^{-8}$ à $2,6 \times 10^{-5}$ m/s, traduisant une variabilité encore plus marquée.

Concernant la transmissivité, les valeurs relevées dans les couches d'altérites et dans les aquifères de fissures varient toutes deux entre $1,8 \times 10^{-6}$ et $6,6 \times 10^{-4}$ m²/s. Ces plages de variation indiquent une grande diversité des capacités de transport d'eau au sein des formations géologiques étudiées, soulignant ainsi la complexité du fonctionnement hydrodynamique dans les zones de socle.

En ce qui concerne la relation entre les propriétés hydrodynamiques et les valeurs de résistivité, les résultats montrent qu'aussi bien dans les altérites que dans le socle fissuré, une perméabilité élevée est généralement associée à une résistivité faible. Par ailleurs, dans le socle fissuré, la transmissivité évolue de manière proportionnelle à la perméabilité, traduisant une certaine cohérence dans la distribution des propriétés hydrauliques. En revanche, aucune corrélation

significative n'a été observée entre la résistivité et le coefficient d'emménagement, ce qui suggère que ce dernier est influencé par d'autres facteurs non directement liés aux contrastes de résistivité du sous-sol.

L'analyse statistique de l'épaisseur des altérites et des paramètres hydrodynamiques révèle une épaisseur moyenne d'altérites de 20,88 m. Le niveau statique de 76,66 % des forages est situé dans les vingt premiers mètres, principalement au sein des formations altéritiques. Les premières venues d'eau sont observées en moyenne à 51,9 m de profondeur, avec un débit moyen de 6,35 m³/h et une profondeur totale moyenne des forages estimée à 77,59 m.

Les forages les plus productifs sont généralement ceux présentant une bonne transmissivité, une perméabilité élevée, une épaisseur d'altérites moyenne et une profondeur totale modérée.

La carte piézométrique met en évidence **les** principales directions d'écoulement des eaux souterraines, orientées globalement du Nord vers le Sud **et** d'Est en Ouest. Si l'on note l'absence de véritables zones de décharge identifiées dans la zone d'étude, quelques zones de recharge sont localisées dans les environs de Yamoussoukro, Kpouèbo, Kossou et Kokoumbo. De plus, la présence de dômes piézométriques est clairement observée dans les secteurs de Bonikro et de Toumodi, traduisant des zones potentielles de surpression ou d'alimentation localisée de la nappe.

CHAPITRE 6 : MODELE CONCEPTUEL HYDROGEOLOGIQUE DES AQUIFERES DE FISSURE DES DEPARTEMENTS DE YAMOOUSSOUKRO ET DE TOUMODI

6.1 Modèle conceptuel géologique

6.1.1 Analyse des Logs de forages

Les logs de forages réalisés dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi révèlent une forte hétérogénéité des couches géologiques (Figure 40). La structure lithologique de la zone d'étude, de la surface vers la profondeur, se compose des unités suivantes :

- **Terre arable et/ou cuirasse latéritique :**

Cette première unité regroupe une fine couche de terre végétale (environ 0,5 m d'épaisseur en moyenne), souvent surmontée ou accompagnée à sa base d'une cuirasse latéritique. L'ensemble atteint des épaisseurs variables comprises entre 2 et 12 m.

- **Altérites argileuses :**

Située immédiatement sous la terre arable/cuivrée, cette couche est constituée d'altérites argileuses dont l'épaisseur varie entre 4,5 m et 27 m. Elle constitue une partie importante du réservoir aquifère altéritique.

- **Frange fissurée :**

Cette zone de transition entre la couche altéritique et le socle sain est caractérisée par la présence de fractures et fissures, jouant un rôle important dans la circulation des eaux souterraines. L'épaisseur de cette frange est comprise entre 31 m et 67 m.

Cependant, les venues d'eau y sont parfois limitées, notamment dans les zones où l'épaisseur de cette frange est inférieure à 5 m.

- **Substratum granitique sain :**

Le socle granitique non altéré constitue la base du profil lithologique. Il est identifié à des profondeurs variant entre 71 m et 82 m selon les localités. Ce substratum est qualifié de "sain" car aucune arrivée d'eau n'y est observée, traduisant une absence de fracturation ou de porosité exploitable à ces profondeurs.

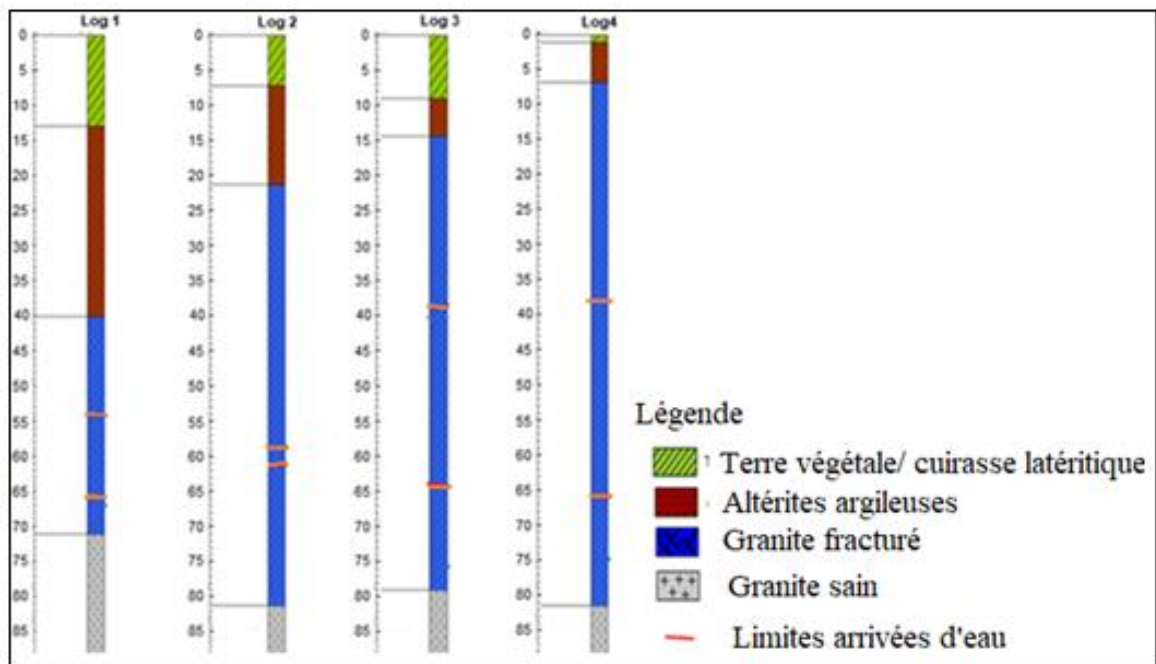


Figure 40 : Modèle conceptuel géologique

6.1.2 Bloc diagramme géologique

Les forages réalisés ont permis de construire un bloc diagramme représentant la structure géologique verticale des départements de Yamoussoukro et de Toumodi. Cette structuration verticale met en évidence trois grands horizons distincts. De la surface vers la profondeur, on distingue successivement:

- la couverture végétale surmontant les couches d'altérites ;
- la frange fracturée intermédiaire;
- enfin, le socle sain en profondeur (Figure 41).

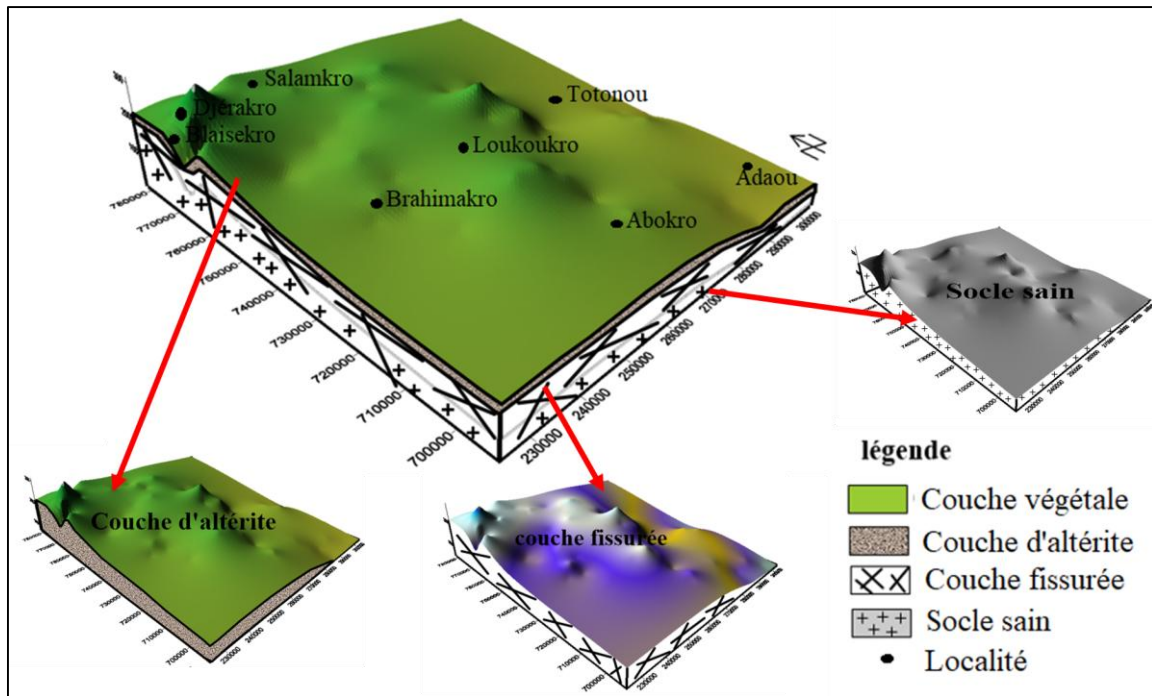


Figure 41 : Blocs diagrammes géologiques réalisés à partir des résultats des forages

- **Couches d'altérites**

Cette couche est principalement constituée de cuirasse latéritique, généralement recouverte par une terre arable composée de sable humifère. Son épaisseur maximale varie de 2,4 m à Tontonoukoffikro à 51,72 m à Maçon Konankro, avec une moyenne d'environ 19,76 m. Il arrive toutefois que la cuirasse et la terre arable soient absentes ; dans ce cas, le profil d'altération débute directement par les altérites argilo-sableuses.

Sous cette première couche, se trouvent les altérites argilo-sableuses (allotérite et isaltérite), dont l'épaisseur peut atteindre jusqu'à 30 m selon les sites. Cette formation constitue un véritable aquifère exploité par les populations rurales.

- **Frange fracturée**

Elle correspond au substratum fissuré, où la densité de la fracturation est élevée au niveau du toit de la frange fracturée, puis décroît progressivement avec la profondeur. Le toit de cet horizon fissuré est légèrement altéré, formant ainsi une zone de transition entre le substratum sain et les couches fortement altérées. Cette zone fracturée, d'une épaisseur importante avoisinant les 70 m, présente de nombreuses venues d'eau. Elle constitue donc un secteur privilégié pour la recherche de réservoirs d'eau souterraine à fort débit, d'autant plus qu'elle bénéficie d'une protection contre les variations saisonnières et les pollutions diverses.

6.2 Modèle conceptuel géoélectrique du système aquifère

6.2.1 Courbes de sondage électrique à l'échelle du forage

Les différents profils de sondages électriques obtenus sont de types A, H et KH, révélant la présence de trois à quatre horizons géologiques distincts.

• Les courbes de type « A »

Ces courbes se caractérisent par une résistivité qui augmente progressivement avec la profondeur, présentant une seule branche ascendante. Dans cette étude, on observe toutefois de légers changements d'inclinaison le long de cette branche, traduisant un changement de couches dans le sous-sol. La courbe de sondage électrique SE1, réalisée à Adaou, illustre ce type de profil (Figure 42).

Cette courbe met en évidence trois terrains géoélectriques distincts, du bas vers le haut :

- un socle granitique très fracturé, caractérisé par une résistivité élevée (environ 1013 ohm.m) avec des déflexions légères sur la courbe indiquant la fracturation ;
- un terrain intermédiaire épais de 24,5 m présentant une conductivité moindre (résistivité de 472 ohm.m), probablement constitué d'argile sableuse ;
- une couche supérieure conductrice avec une résistivité d'environ 100 ohm.m, correspondant à une argile latéritique d'environ 2,8 m d'épaisseur.

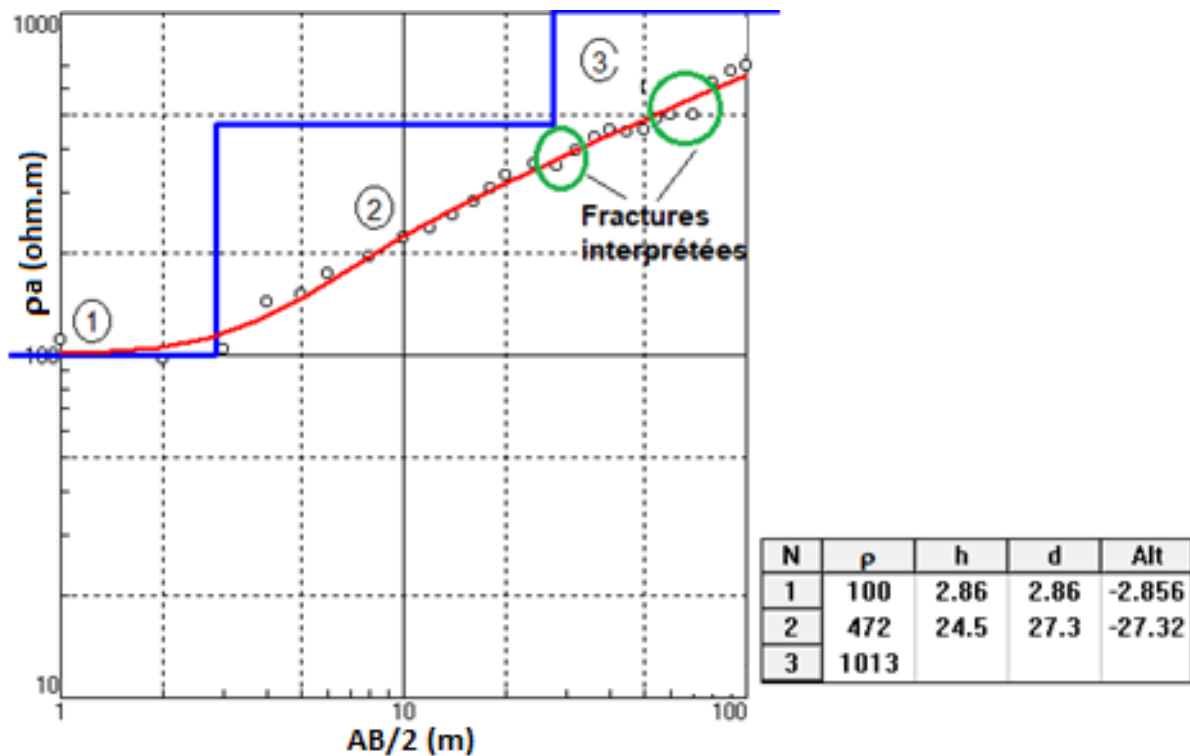


Figure 42 : Courbe sondage électrique de type A : exemple de SE1 à Adaou

- **Les courbes de type « H »**

La courbe électrique SE1 obtenue à Tontonoukoffikro (Figure 43) présente deux branches distinctes, l'une descendante et l'autre ascendante, révélant trois horizons géoélectriques.

L'interprétation montre que la première couche, d'une épaisseur de 1,36 m et d'une résistivité de 536 ohm.m, correspond à un recouvrement superficiel constitué de terre arable et/ou de cuirasse latéritique. Cette couche peut varier localement en épaisseur, atteignant jusqu'à 4 m ou se limitant parfois à moins d'un mètre.

Sous cette couche se trouve un complexe conducteur, caractérisé par une résistivité de 196 ohm.m et une épaisseur de 4,14 m, correspondant à une couche argileuse. Cette zone est représentée sur la courbe par la branche descendante.

Les deux premières couches reposent sur un socle cristallin résistant, identifié par la branche ascendante de la courbe de sondage. On observe toutefois, à partir d'environ 20 m de profondeur, un léger changement de pente, passant d'une inclinaison de 45° à une pente plus douce. Ce signe traduit la présence de fractures dans le socle granitique.

La remontée caractéristique à pente inférieure à 45°, dite « remontée traînante », indique un socle très fracturé, voire broyé. Ce type de fracturation suggère une bonne perméabilité, ce qui rend cet emplacement particulièrement favorable pour le forage, en vue de capter une ressource en eau généralement abondante.

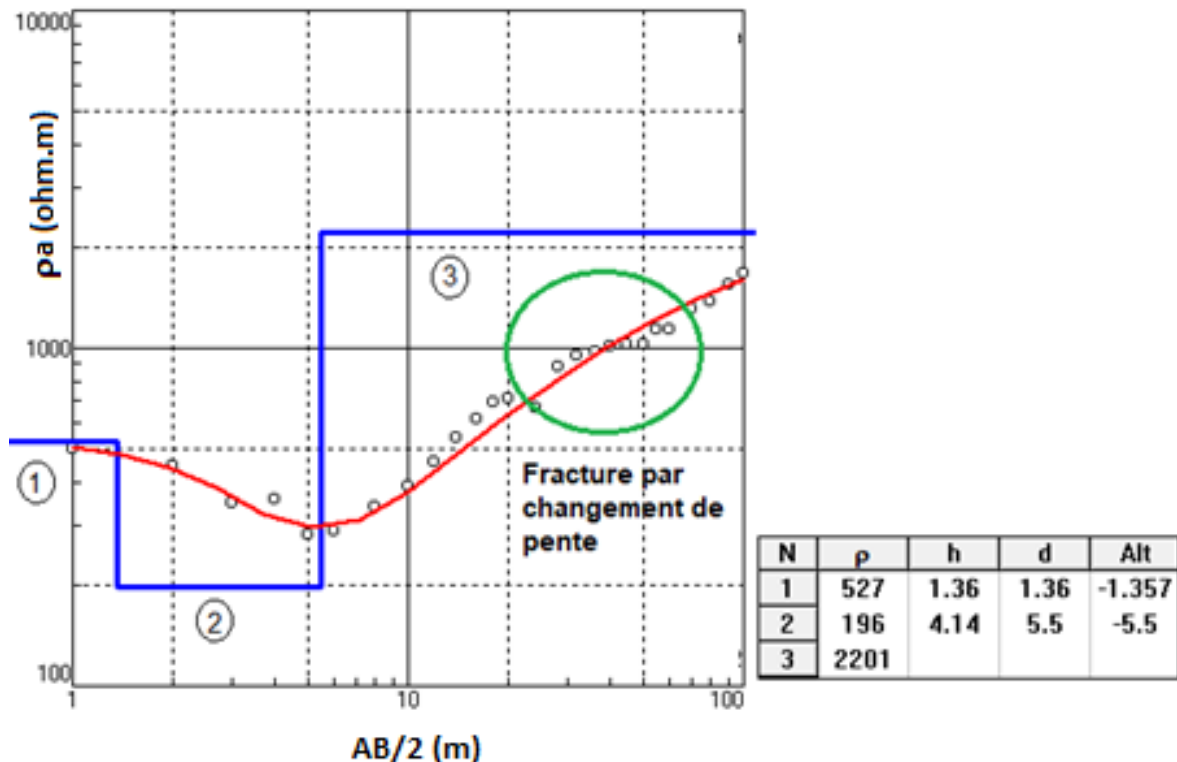


Figure 43 : courbe sondage électrique de type H : exemple de SE1 à Tontonoukoffikro

- **La courbe de type « KH »**

L'interprétation de la courbe de sondage SE1 réalisée à Loukoukro (Figure 44) met en évidence quatre horizons géoélectriques distincts.

Le premier horizon, d'une faible épaisseur de 0,3 m et présentant une résistivité de 111 ohm.m, correspond à un recouvrement superficiel constitué de terre arable.

Le deuxième horizon, représenté par la suite de la première branche ascendante, affiche une résistivité de 428 ohm.m et une épaisseur plus importante, de l'ordre de 9,5 m. Il s'agit d'un matériau latéritique.

Le troisième horizon, matérialisé par la branche descendante de la courbe, correspond à un complexe conducteur avec une résistivité de 158 ohm.m. Ce niveau est constitué de formations argileuses ou argilo-sableuses, parfois latéritiques, et s'étend sur une épaisseur notable d'environ 18 m.

Enfin, le quatrième horizon correspond au socle cristallin fracturé, identifié par la deuxième branche ascendante. Cette roche granitique présente une résistivité relativement faible, évaluée ici à 490 ohm.m, traduisant un substratum fracturé qui peut constituer un important couloir de drainage des eaux souterraines.

Par ailleurs, la fracturation du massif rocheux est observable à différentes profondeurs, comme en témoignent les variations de pente et perturbations relevées sur la remontée de la courbe de sondage, caractéristiques des fractures dans le substratum.

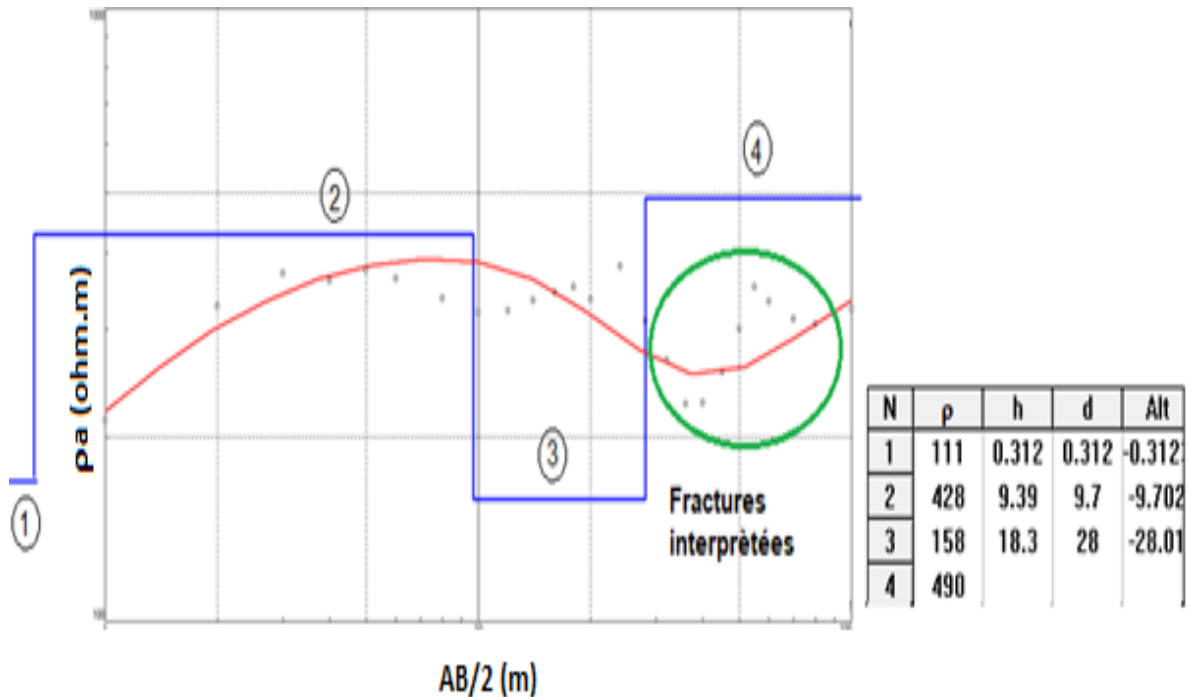


Figure 44 : Courbe sondage électrique de type KH : exemple de SE1 à Loukoukro

6.2.2 Analyse géophysique

La localisation des zones de stockage des eaux souterraines repose sur une compréhension approfondie de la géologie sous-jacente de la zone d'étude. Dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, la profondeur d'investigation atteinte à l'aide du dispositif de tomographie électrique est d'environ 96 mètres. Pour chacun des profils analysés, les pseudo-sections de résistivité obtenues ont permis de délimiter des structures géologiques susceptibles de contenir de l'eau.

Les traitements finaux de ces pseudo-sections ont été réalisés en cinq itérations, avec une erreur quadratique moyenne (RMS) variant entre 3,5 % et 7 %, sur la base d'environ 1953 points de données filtrées. L'analyse des résultats issus de la tomographie de résistivité électrique (TRE) révèle des sections bidimensionnelles de pseudo-résistivités caractérisées par des zones de faibles résistivités ($\rho < 1\,000\ \Omega.m$), représentées en bleu, et des zones de fortes résistivités ($\rho > 10\,000\ \Omega.m$), illustrées par des teintes allant du jaune au rouge. Chaque site étudié met en évidence la présence successive d'une couche de saprolite, d'une zone fissurée et de la roche saine.

✓ Site 1

Le profil de tomographie de résistivité électrique (TRE) réalisé sur le site 1 a atteint une profondeur d'investigation de 96 mètres (Figure 45). La couche de saprolite présente sur ce site affiche une épaisseur variable, comprise entre 1 et 45 mètres. Elle se caractérise par des résistivités comprises entre 101 et 406 $\Omega.m$. En profondeur, un horizon présentant des résistivités électriques comprises entre 25 et 406 $\Omega.m$ est observé entre 45 et 90 mètres.

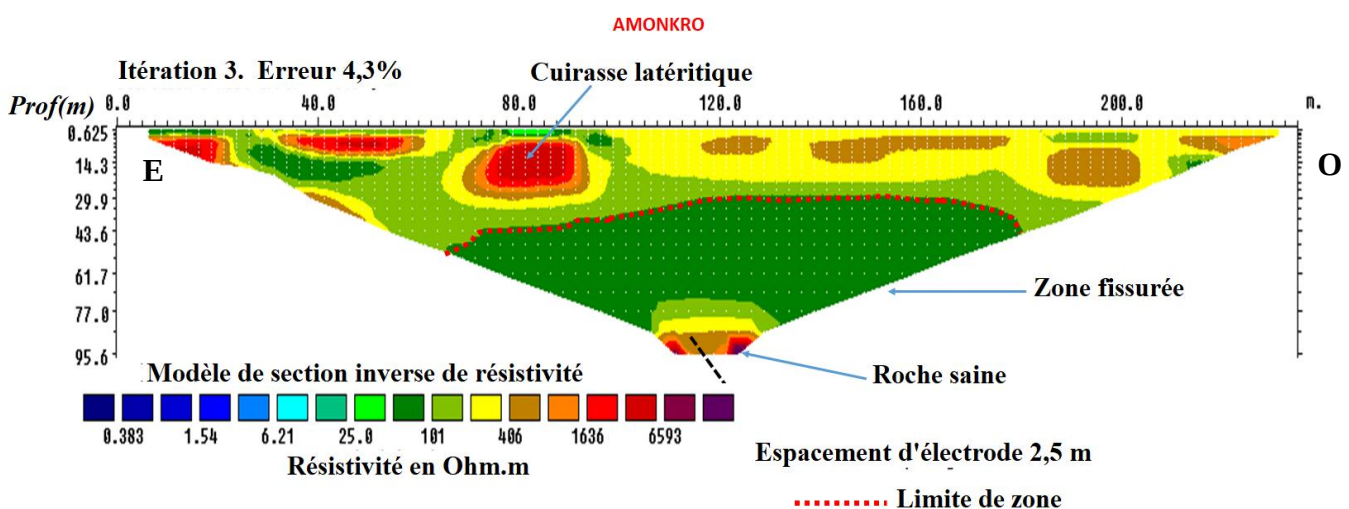


Figure 45: Profils TRE des résistivités électriques de Amonkro

✓ Site 2

Le profil de tomographie de résistivité électrique (TRE) réalisé sur le site de Mougnan a atteint une profondeur d'investigation d'environ 96 mètres (Figure 46). La couche de saprolite identifiée sur cette section inversée présente une résistivité électrique comprise entre 1 et 3 185 $\Omega.m$, pour une épaisseur moyenne d'environ 40 mètres. La section met également en évidence une zone à résistivité comprise entre 54 et 211 $\Omega.m$, interprétée comme saturée. Une intrusion de la roche saine, caractérisée par une résistivité élevée ($\rho_a \geq 10\,000\ \Omega.m$), est par ailleurs observable le long du profil.

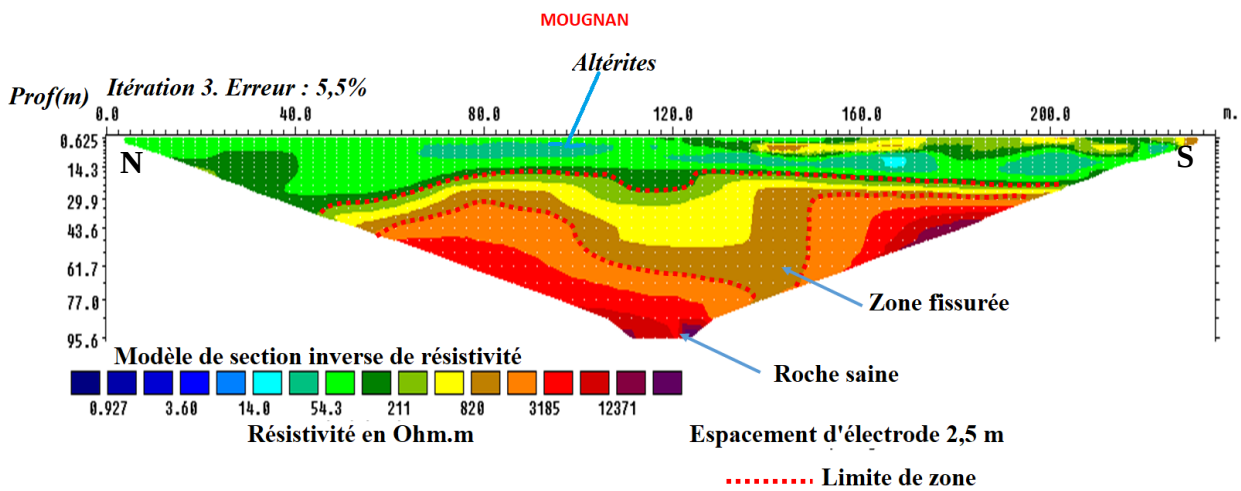


Figure 46: Profils TRE des résistivités électriques de Mougnan

✓ Site 3

L'enquête géophysique réalisée sur le site 3 à l'aide du même dispositif de tomographie de résistivité électrique (TRE) a permis d'atteindre une profondeur d'investigation de 96 mètres (Figure 47). La section inversée met en évidence une couche de saprolite d'environ 30 mètres d'épaisseur, présentant des résistivités électriques comprises entre 188 et 437 $\Omega.m$. En dessous de cette couche, à partir de 30 mètres de profondeur, une zone de plus faible résistivité électrique ($\rho_a \geq 600\ \Omega.m$) est observée sur le profil.

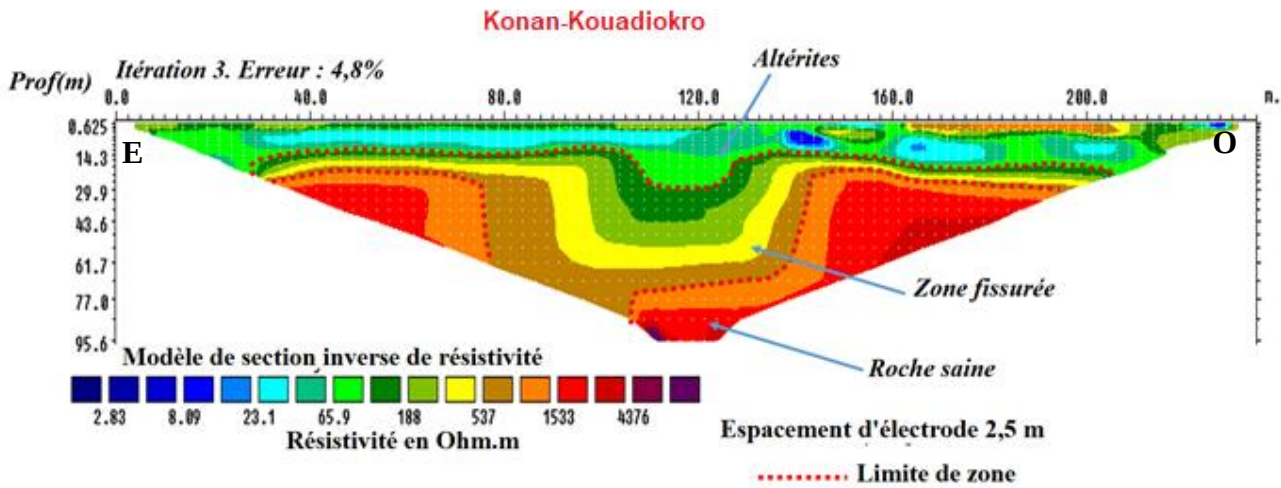


Figure 47: Profils TRE des résistivités électriques de Konan-Kouadiokro

Des informations lithologiques issues de forages localisés à proximité ou directement sur les profils ont été mobilisées pour appuyer l'interprétation hydrogéologique des données issues de la tomographie de résistivité électrique (TRE). Les profils géologiques obtenus, hors couche de recouvrement superficiel, révèlent généralement trois horizons principaux, disposés de haut en bas :

- La couche de saprolite, d'épaisseur variable comprise entre 30 et 45 mètres, avec une moyenne d'environ 35 mètres. Elle présente des valeurs de résistivité inférieures à 1 000 $\Omega.m$. La présence de cuirasses latéritiques dans la région pourrait favoriser le ruissellement des eaux de pluie vers des zones topographiquement plus basses, constituant ainsi des axes préférentiels de recharge des nappes souterraines ;
- La frange fissurée, dont l'épaisseur varie de 30 à 95 mètres, avec une moyenne d'environ 45 mètres. Cet horizon montre des résistivités généralement comprises entre 50 et 800 $\Omega.m$. Il est principalement constitué de granite légèrement altéré dans la zone d'étude ;
- La roche saine, sous-jacente aux deux premiers horizons, se caractérise par une résistivité électrique généralement supérieure à 10 000 $\Omega.m$.

6.3 Comparaison des résultats géophysiques et des résultats des forages

Les modèles géoélectriques et géologiques élaborés (Figure 48) présentent des caractéristiques géométriques similaires, confirmant la cohérence des données acquises. Les différents blocs-diagrammes mettent en évidence un contexte tectonique favorable, qui contribue à la formation d'un environnement propice au développement d'aquifères. Deux principaux types de formations aquifères se distinguent nettement : les nappes superficielles contenues dans les altérites argilo-sableuses et les aquifères localisés dans la frange fissurée du socle.

Le profil d'altération observé dans la zone d'étude révèle la présence de trois grands horizons géologiques distincts :

- la couche superficielle, composée de cuirasse latéritique et/ou de terre arable, constituant le niveau de recouvrement ;
- le complexe conducteur, correspondant aux horizons altérés, généralement subdivisé en deux sous-couches : les allotérites et les isaltérites ;
- la frange fissurée, caractérisée par un réseau de fractures interconnectées. Cette zone peut également être subdivisée en deux compartiments : une couche très fissurée et peu altérée, située entre les horizons fortement altérés et les zones fracturées profondes.

L'ensemble de ces horizons constitue un aquifère composite, dont les propriétés hydrogéologiques sont particulièrement favorables dans les secteurs où les compartiments altérés et fissurés coexistent et interagissent. Cette configuration permet une synergie entre porosité et perméabilité, contribuant ainsi à la formation d'un aquifère potentiellement productif.

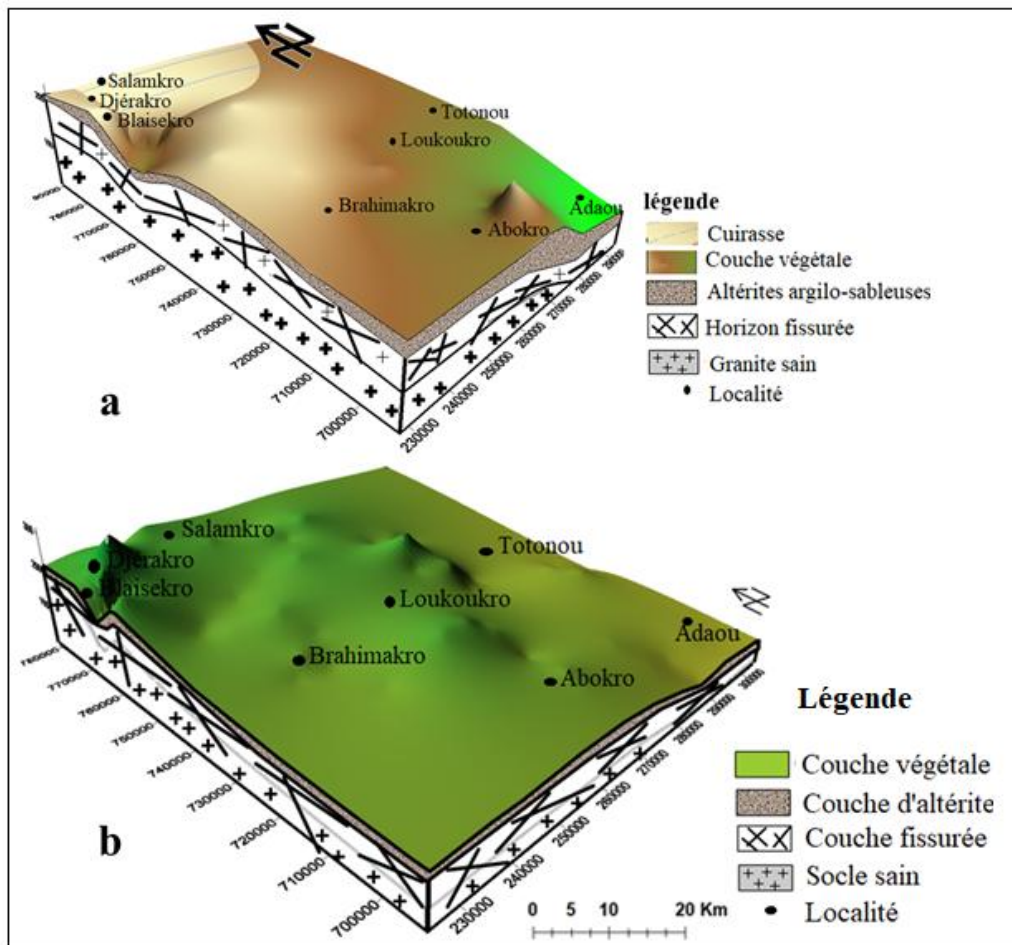


Figure 48 : Comparaison du bloc diagramme géoélectrique et géologique
a) bloc diagramme géoélectrique ; b) bloc diagramme géologique

6.4. Discussion

Dans le cadre de cette étude, les courbes de sondages électriques identifiées sont de types A, H et KH. Ces différents types de courbes sont fréquemment associés à la présence de structures tectoniques telles que des failles et des fractures, caractéristiques des formations géologiques cristallines (Kouakou *et al.*, 2016 ; Kouadio, 2022). Leur occurrence dans la zone d'étude souligne l'importance des déformations affectant les formations géologiques locales.

Cependant, la proximité d'un forage avec ces types de courbes de sondages ne garantit pas nécessairement l'obtention de débits élevés. Il apparaît donc judicieux de localiser les forages en tenant compte du pendage structural, tout en veillant à atteindre une profondeur suffisante pour intersecter les structures géologiques favorables à la circulation et au stockage des eaux souterraines (Kouadio, 2022).

La méthode géophysique appliquée dans cette étude, à savoir la tomographie de résistivité électrique, a permis de cartographier la géométrie des aquifères et de distinguer quatre principales couches géologiques.

La cuirasse latéritique peut être soit présente, soit absente selon les secteurs. Lorsqu'elle est conservée, préservée de l'érosion et alimentée en eau, elle peut former de petits aquifères perchés, parfois associés localement à quelques sources (Lassachagne *et al.*, 2021 ; Kouadio, 2022). Dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, la cuirasse latéritique se caractérise par une résistivité électrique élevée. La saprolite, issue de la décomposition de la roche mère, est constituée de deux sous-couches : la couche d'allotérite, riche en argile, et la couche d'isaltérite, à prédominance sableuse. Cette formation représente le premier horizon de l'aquifère composite, abritant la nappe phréatique exploitée par les puits traditionnels. La résistivité électrique de la saprolite, généralement dominée par une forte teneur argileuse, est inférieure à 150 $\Omega.m$ (Kouadio, 2022). Toutefois, dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, cette valeur varie généralement entre 54 et 437 $\Omega.m$. Cette caractérisation géoélectrique de la saprolite est en accord avec les observations rapportées par Soro *et al.* (2017) et Kouadio (2022). La couche fissurée se distingue par une fracturation très intense, notamment dans les premiers mètres (Lassachagne *et al.*, 2021 ; Kouadio, 2022). Dans la zone d'étude, son épaisseur varie entre 29 et 50 mètres, avec des résistivités comprises entre 100 et 820 $\Omega.m$. Cette description correspond aux données proposées pour les formations de socle par Alle *et al.* (2018) et Kouadio (2022). La roche saine sous-jacente n'est perméable qu'en présence de fractures profondes. Bien que ces fractures présentent une perméabilité comparable à celles de la zone fissurée, leur densité diminue nettement avec la profondeur. Cette unité est caractérisée

par des résistivités souvent supérieures à 4 000 $\Omega.m$, ce qui correspond à la roche saine sous-jacente.

Les modèles géologique et géoélectrique élaborés dans le cadre de cette étude présentent des caractéristiques géométriques similaires. Les différents blocs-diagrammes ont mis en évidence que le contexte tectonique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi crée un environnement hydrogéologique favorable à l'existence d'aquifères. On y distingue notamment les nappes superficielles contenues dans les altérites argilo-sableuses ainsi que les aquifères fissurés du socle. Les travaux de Savané (1997), Lachassagne & Wyns (2005) et Koïta (2010) ont également démontré que ces nappes et aquifères souterrains sont inclus dans des formations géologiques dont le profil d'altération est généralement composé de trois grands horizons : une couche superficielle constituée de cuirasse latéritique et/ou de terre arable ; un complexe conducteur correspondant aux horizons altérés, subdivisé en deux sous-couches, allotérite et isaltérite; enfin, la frange fissurée, caractérisée par un réseau de fractures interconnectées. Cette dernière comprend également une couche fissurée peu altérée, représentant la zone intermédiaire entre les horizons fracturés profonds et les horizons fortement altérés. Ces différents horizons forment un aquifère composite, dont les propriétés hydrogéologiques sont optimales dans les secteurs où les trois compartiments coexistent et combinent leurs caractéristiques hydrodynamiques, donnant ainsi naissance à un aquifère productif.

Conclusion partielle

Le modèle conceptuel géologique, appuyé par l'analyse des logs de forages, confirme la structure lithologique caractéristique de la zone d'étude. Celle-ci est composée de couches d'altérites dont l'épaisseur varie de 2,4 m à 51,72 m, surmontées par une couverture végétale, suivies d'une frange fracturée présentant une épaisseur pouvant atteindre environ 70 m, puis du socle sain. Le profil d'altération indique globalement des épaisseurs d'altérites comprises entre 1,85 m et 54,89 m, tandis que les couches fissurées affichent des épaisseurs variant de 20,6 m à 99,57 m.

La carte de résistivité vraie en fonction de la profondeur a permis d'identifier les principales zones de captage des eaux souterraines au sein des deux formations aquifères (altérites et frange fissurée). Les formations altérées atteignent une profondeur allant jusqu'à 15 m et sont constituées, du sommet vers le bas, de cuirasse latéritique et/ou de terre arable, suivies d'altérites argilo-sableuses. La frange fissurée du socle, quant à elle, constitue un réservoir souvent plus intéressant que celui des altérites, avec une épaisseur locale pouvant atteindre 50 m.

Les modèles conceptuels géoélectrique et géologique élaborés dans cette étude ont ainsi permis de reconstituer le profil d'altération du système aquifère des départements de Yamoussoukro et de Toumodi.

CHAPITRE 7 : CARTOGRAPHIE DES ZONES DE POTENTIALITES EN EAU SOUTERRAINE DES DEPARTEMENTS DE YAMOOUSSOUKRO ET DE TOUMODI

7.1 Bilan hydrologique

Les départements de Yamoussoukro et de Toumodi reçoivent en moyenne annuelle environ 1169,9 mm de précipitations (Tableau XIX). L'évapotranspiration potentielle (ETP) interannuelle, estimée selon la méthode de Thornthwaite, s'élève à 1 563,5 mm/an. Les pertes par évapotranspiration réelle, calculées à l'aide de la méthode de Coutagne, sont de l'ordre de 871,5 mm/an, soit 74,5 % du total des précipitations annuelles. La lame d'eau ruisselée (R) en surface est évaluée à 218 mm/an, ce qui correspond à 18,63 % des précipitations moyennes annuelles. Enfin, l'infiltration efficace (I), qui participe à la recharge des nappes souterraines, est estimée à 80,38 mm/an, représentant environ 6,87 % de la hauteur annuelle des précipitations.

Tableau XIX: Bilan hydrologique (1974-2019), station de Yamoussoukro

Mois	Pluies P (mm)	ETP (mm)
Janvier	24,7	123,8
Février	33,2	147,5
Mars	83,8	165,6
Avril	127,1	157,5
Mai	143,1	149,5
Juin	209,4	122,6
Juillet	140,1	108,8
Août	94,7	111,1
Septembre	121,2	115,1
Octobre	120,8	125,6
Novembre	56,5	123,6
Décembre	15,4	112,8
Cumul annuel	1 169,9	1 563,5
ETR (mm/an)		871,5
R (mm/an)		218
Infiltration (mm/an)		80,38

7.2 Cartographie des structures linéamentaires

La carte détaillée des linéaments (Figure 49) comprend un total de 2 063 linéaments, extraits manuellement à partir de l'interprétation visuelle d'images issues de différentes techniques de traitement d'images satellitaires. La longueur cumulée de ces linéaments est estimée à 2 410 km. L'exploitation de cette carte a permis la production de plusieurs fichiers thématiques, à partir desquels ont été définis et caractérisés divers paramètres structuraux liés à la géométrie

des aquifères souterrains, tels que la densité de fracturation, la distribution des longueurs et les orientations des linéaments. Bien qu'elle ne soit pas exhaustive, cette carte fournit une représentation pertinente et suffisamment représentative du réseau de fractures dans la zone d'étude.

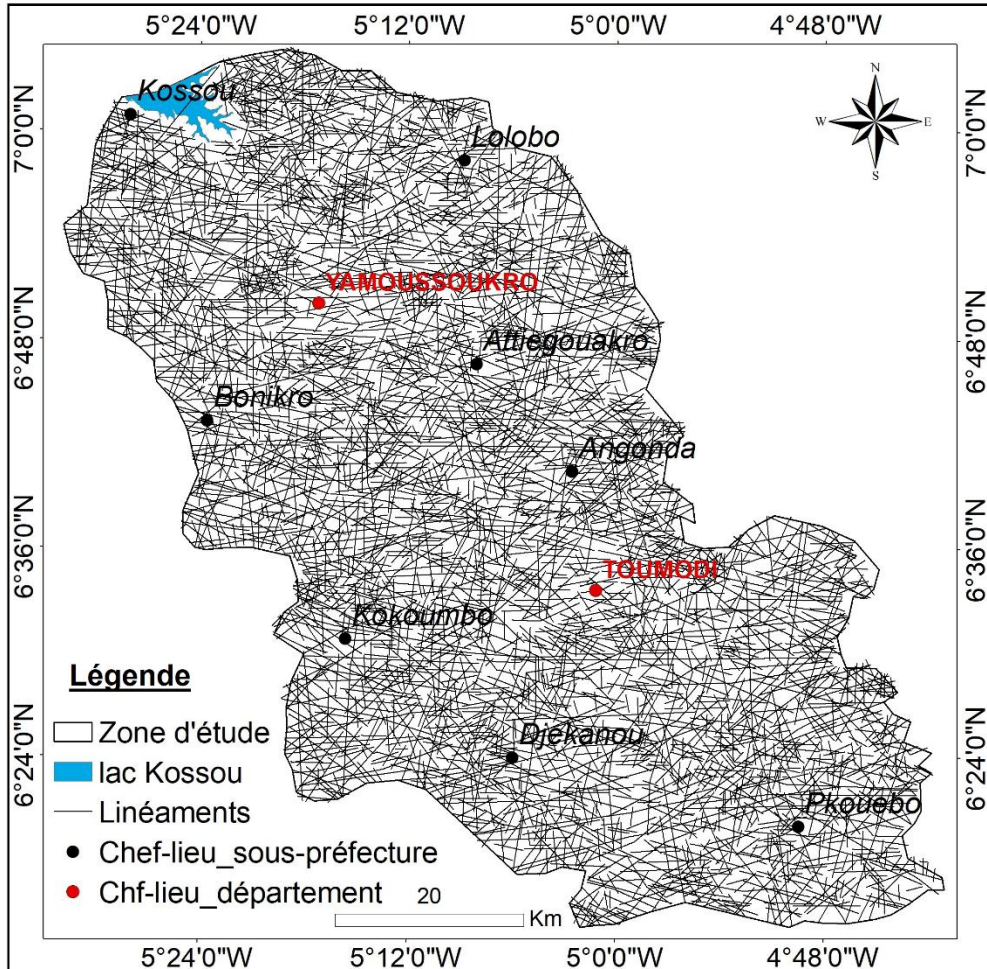


Figure 49 : Carte détaillée des linéaments des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

7.2.1 Validation de la carte des linéaments

Les forages implantés à l'aide de la géophysique ont été superposés à la carte des linéaments majeurs issus des images OLI de Landsat 8 (Figure 50). L'analyse spatiale révèle que la majorité de ces forages sont localisés soit directement sur les linéaments, soit à leur proximité immédiate. Bien que certains de ces forages présentent des débits faibles, la majorité de ceux situés en correspondance avec les linéaments majeurs affichent des débits élevés. Ces observations suggèrent une corrélation entre la présence de fractures majeures et les débits importants observés dans la région. La validation croisée avec les données de terrain permet

ainsi de confirmer la nature fracturée des linéaments identifiés, renforçant leur valeur en tant qu'éléments structuraux favorables à la circulation et au stockage des eaux souterraines.

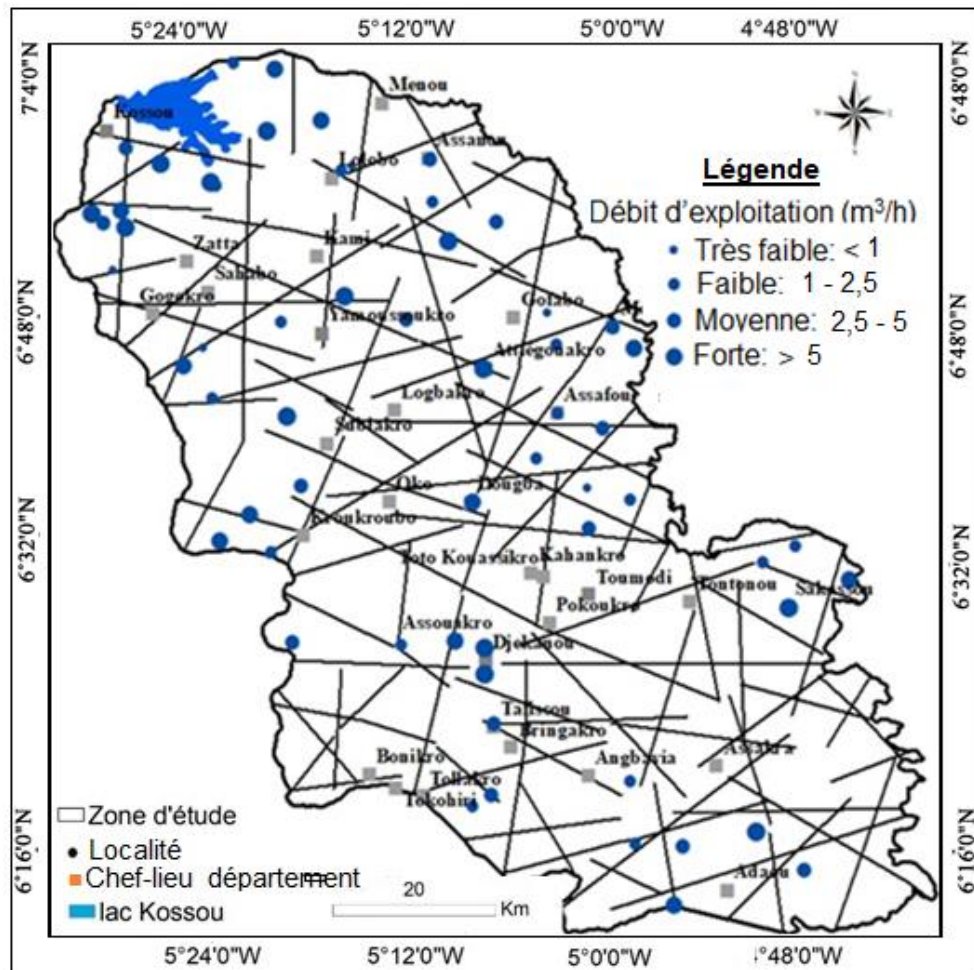


Figure 50 : Superposition des forages implantés à l'aide de la géophysique aux fractures majeures

7.2.2 Analyse statistique des fractures

L'analyse statistique des linéaments a permis de déterminer leur répartition, tant en nombre qu'en longueurs cumulées. Cette analyse a conduit à la construction d'une rosace directionnelle (Figure 51), illustrant la distribution des orientations des fractures. La répartition des linéaments, exprimée à la fois en fréquence et en longueur, apparaît relativement homogène sur l'ensemble de la rosace. Les directions dominantes sont définies comme celles présentant un pourcentage supérieur ou égal à 10 %. Deux orientations principales se dégagent de cette analyse : la direction nord-sud (N 0–10°) et la direction est-ouest (N 90–100°), reflétant les grandes structures tectoniques régionales.

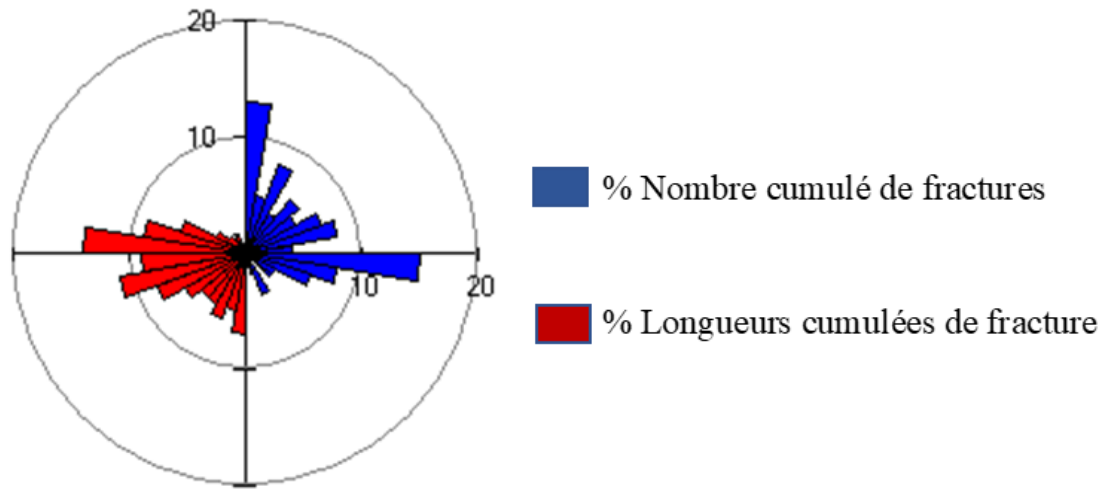


Figure 51 : Rosace directionnelle des fractures

7.2.3 Distribution des intensités de fractures

L'analyse globale de la carte de densité de fracturation (Figure 52) révèle une variabilité spatiale marquée de l'intensité de fracturation, répartie en cinq classes. La classe à très faible densité de fracturation couvre environ 10 % de la zone d'étude, avec une distribution dispersée sur l'ensemble du territoire. La faible densité de fracturation concerne environ 40 % de la superficie, principalement localisée dans la partie ouest de la zone. Les zones à densité moyenne de fracturation occupent également 40 % du territoire, avec une présence répartie de manière relativement homogène. La forte densité de fracturation représente 9,5 % de la superficie totale et se manifeste sous forme de poches localisées, notamment dans les localités de Toumodi, Djekanou et Attiégouakro. Enfin, la classe à très forte densité de fracturation couvre seulement 0,5 % de la zone d'étude.

De manière générale, la carte de densité de fracturation indique que les départements de Yamoussoukro et de Toumodi présentent un niveau de fracturation globalement modéré, avec des zones localisées de fracturation intense susceptibles d'influencer favorablement la circulation et le stockage des eaux souterraines.

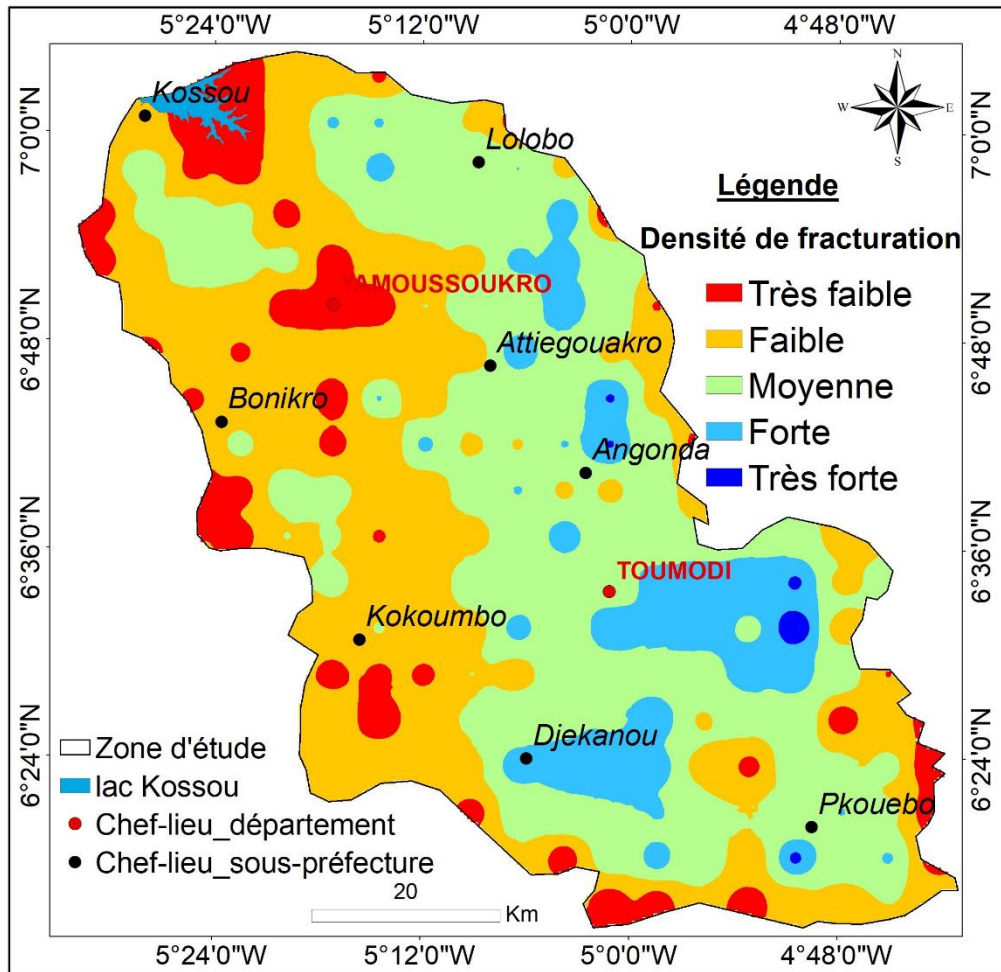


Figure 52 : Carte de la densité de fracturation des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

7.3 Potentialités en eau souterraine

7.3.1 Disponibilité des ressources en eau souterraine

La carte de la disponibilité en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi présente quatre classes distinctes (Figure 53). L'analyse et l'interprétation de cette classification révèlent les répartitions suivantes :

- les zones de faible disponibilité couvrent environ 14,7 % de la superficie totale. Elles sont disséminées de manière dispersée à travers l'ensemble de la zone d'étude ;
- la classe de disponibilité médiocre constitue la catégorie dominante, représentant environ 67 % de la superficie. Cette classe est largement répandue et occupe presque toute l'étendue de la zone d'étude ;
- les zones de bonne disponibilité représentent 14,7 % de la superficie et sont localisées de façon hétérogène ;

- les zones d'excellente disponibilité occupent environ 3,6 % du territoire. Elles sont également dispersées dans l'ensemble de la zone.

Dans l'ensemble, la carte met en évidence une prédominance des zones à faible potentiel en eau souterraine, avec quelques secteurs favorables localisés, susceptibles de faire l'objet d'un aménagement ou d'une exploitation ciblée.

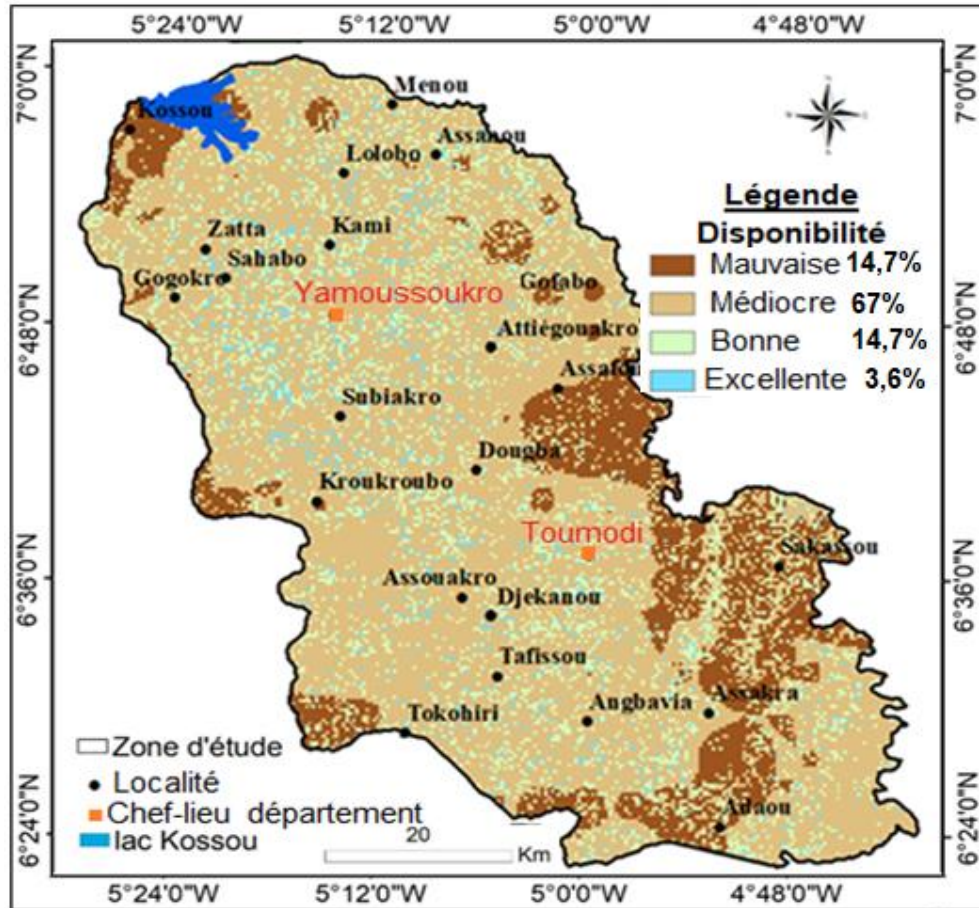


Figure 53 : Carte de disponibilité en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

Les incertitudes associées aux paramètres utilisés pour l'évaluation de la disponibilité en eau souterraine varient entre $\pm 0,002$ et $\pm 1,9$ (Tableau XX). De manière générale, les erreurs observées dans l'élaboration de la carte demeurent faibles, à l'exception des paramètres relatifs à la densité de fracturation et à l'épaisseur d'altération, qui présentent des incertitudes légèrement plus élevées. Hormis les variables pente et épaisseur d'altération, les niveaux de confiance obtenus pour les critères retenus dans l'évaluation de l'indicateur de disponibilité en eau souterraine sont particulièrement élevés. La carte produite présente une marge d'erreur globale de $\pm 0,003$ avec un niveau de confiance de 99 %, ce qui atteste de la fiabilité des résultats et de la représentativité des conditions réelles du terrain.

Tableau XX : Statistiques des paramètres de disponibilité en eau souterraine

Paramètre	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC (%)
Infiltration	80,38	80,38	80,38	0	$\pm 0,0001$	1	100
Pente (%)	0	176,1	7,1	6,7	$\pm 0,002$	1	68
DD (Km/Km ²)	0,18	17,1	6,2	4,3	$\pm 0,6$	2	95
DF (Km/Km ²)	0,18	45,9	20,2	13	$\pm 1,9$	2	95
EA (m)	2,4	59,85	17,2	13,2	$\pm 1,9$	1	68
Disponibilité	4	7,9	5,1	0,7	$\pm 0,003$	3	99

DD : Densité de drainage (km/km²) ; DF : Densité de fracturation (km/km²) ; EA : Epaisseur d'altération (m) ; K : NC : Niveau de confiance (%)

7.3.2 Accessibilité des ressources en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

La carte d'accessibilité aux ressources en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi se décline en quatre classes (Figure 54) :

- la classe à accessibilité faible couvre environ 6,6 % de la zone d'étude. Elle se présente sous forme de poches localisées, notamment dans les localités de Lolobo, Tafissou, Tokohiri, dans la partie sud de Sahabo, à l'ouest d'Assouakro, au nord de Sakassou et de Dougba, ainsi qu'au centre de la zone d'étude ;
- la classe à accessibilité médiocre représente 12 % de la superficie. Ces zones sont situées principalement dans les parties ouest, sud et est de la zone d'étude ;
- la classe à bonne accessibilité est la plus étendue, occupant 61 % du territoire. Elle couvre la majeure partie de la zone d'étude et se retrouve de manière quasi continue sur l'ensemble du territoire ;
- la classe à excellente accessibilité concerne 20,24 % de la superficie totale. Elle est principalement localisée dans les localités de Kossou, Dougba et Assouakro, à l'ouest de Kami ainsi que dans la partie sud-est de la zone d'étude.

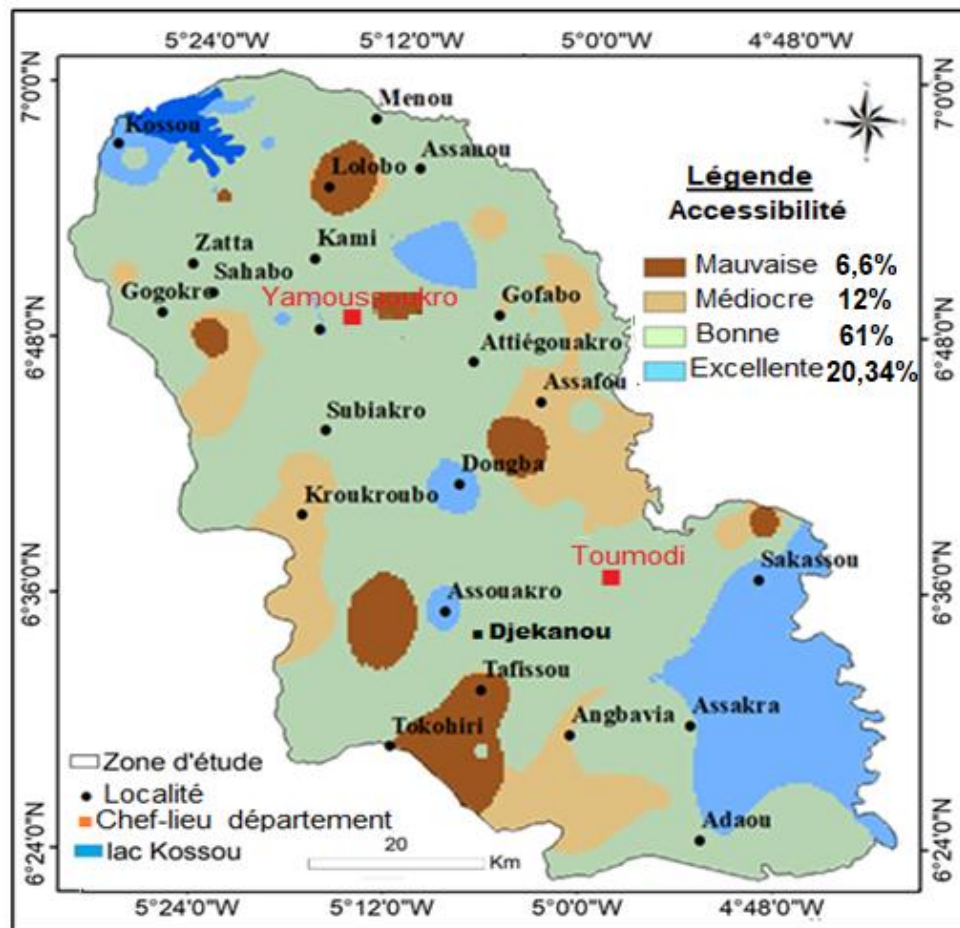


Figure 54 : Carte d'accessibilité en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

En ce qui concerne l'accessibilité à l'eau souterraine, les paramètres utilisés présentent des incertitudes de $\pm 1,9$ pour la profondeur totale forée et de $\pm 10,5$ pour l'indice de succès, avec des niveaux de confiance respectifs de 95 % et 68 % (Tableau XXI). Bien que ces deux paramètres affichent les plus fortes incertitudes, leur niveau de fiabilité reste globalement acceptable pour l'analyse. La carte d'accessibilité à l'eau souterraine présente quant à elle une marge d'erreur globale de $\pm 0,004$ et un niveau de confiance de 99 %, ce qui atteste de sa robustesse méthodologique et de sa capacité à refléter fidèlement les conditions d'accessibilité aux ressources en eau dans la zone d'étude.

Tableau XXI: Statistique des paramètres d'accessibilité en eau souterraine

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC (%)
PF	50,27	95,89	72,9	12,8	$\pm 1,9$	2	95
IS	5,1	100	65,4	71,2	$\pm 10,5$	1	68
Accessibilité	1	8	5,5	1,4	$\pm 0,004$	3	99

PF : profondeur totale de forage (m) ; IS : indice de succès (%) ; NC : Niveau de Confiance (%)

7.3.3 Exploitableté des ressources en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

La carte d'exploitableté des ressources en eau souterraine (Figure 55) distingue quatre classes réparties comme suit :

- la classe de mauvaise exploitableté occupe 0,59 % de la zone d'étude. Elle est localisée dans les secteurs de Lolobo, Gofabo, au sud de Sahabo et à l'est de Dougba ;
- la classe à exploitableté médiocre couvre 9,84 % de la zone d'étude, principalement répartie dans les parties sud, est et ouest de la zone d'étude ;
- la classe à bonne exploitableté représente 26,57 % de la zone et se concentre majoritairement dans les secteurs sud, ouest, est et nord-est ;
- la classe à excellente exploitableté, la plus étendue, occupe environ 63,6 % de la superficie et s'étend de façon quasi continue sur l'ensemble du territoire.

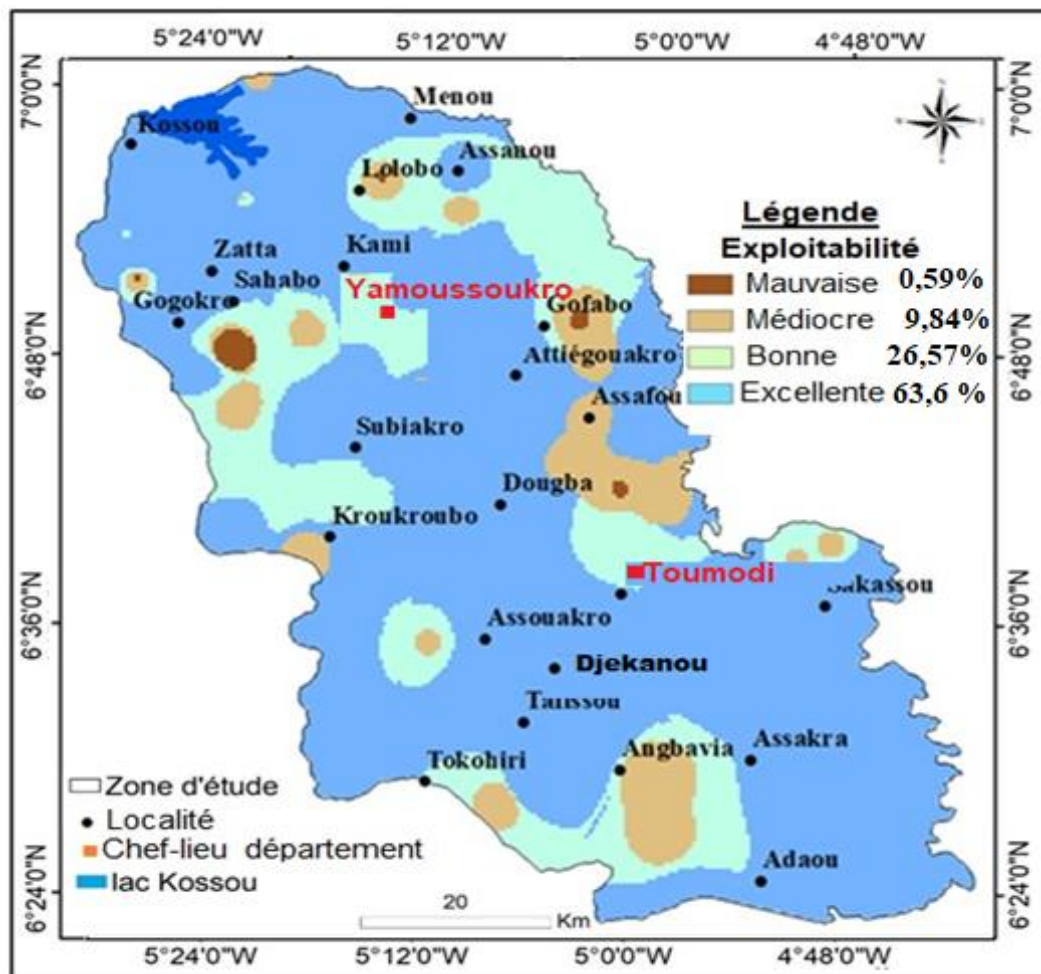


Figure 55 : Carte d'exploitableté en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

Les paramètres utilisés pour évaluer l'exploitabilité présentent des incertitudes de ± 1 pour le débit d'exploitation et de $\pm 1,2$ pour le niveau statique, avec des niveaux de confiance respectifs de 68 % et 99 % (Tableaux XXII). La carte d'exploitabilité des ressources en eau souterraine affiche une marge d'erreur globale de $\pm 0,004$, accompagnée d'un niveau de confiance de 99 %. Ces résultats attestent de la robustesse et de la fiabilité de cette carte thématique.

Tableau XXII: Statistiques des paramètres d'exploitabilité en eau souterraine

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC (%)
QE	0,51	30,7	6,5	7,1	± 1	1	68
NS	2,56	45,7	15,1	8,4	$\pm 1,2$	3	99
Exploitabilité	1	8,7	6,7	1,5	$\pm 0,004$	3	99

QE : débit d'exploitation (m^3/h) ; NS : niveau statique (m) K : NC : Niveau de confiance (%)

7.3.4 Carte des sites potentiels en eau souterraine

L'analyse de la carte des zones favorables à l'implantation de forages à grande échelle (Figure 56) révèle que les départements de Yamoussoukro et de Toumodi disposent de ressources importantes en eau souterraine. Cette analyse distingue quatre classes de potentiel, réparties comme suit :

- la classe de mauvaise potentialité couvre environ 9 % de la zone d'étude. Elle se manifeste principalement sous forme de poches dispersées dans les secteurs sud, est, ouest et nord ;
- la classe de potentiel médiocre représente environ 24 % de la superficie. Elle s'étend de la zone ouest à la zone sud-ouest, ainsi que de la zone nord-est à la partie est du territoire;
- la classe de bon potentiel occupe environ 42 % de la superficie d'étude. Elle est essentiellement localisée au centre, avec des extensions vers les parties nord et sud ;
- la classe à excellent potentiel couvre environ 25 % de la zone d'étude. Elle est principalement située dans les secteurs nord-ouest et sud-est, avec des poches dispersées au centre du territoire.

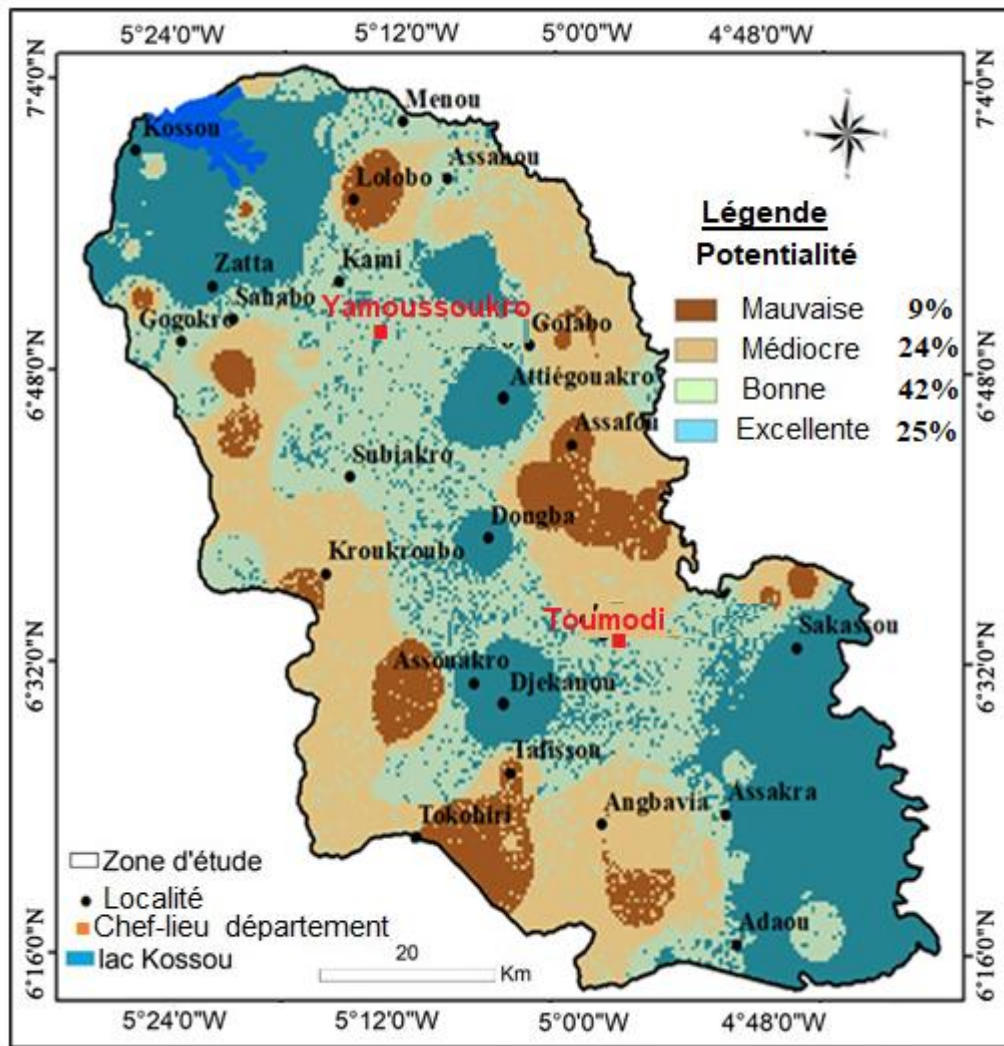


Figure 56 : Carte des zones favorables à l'implantation des forages

La carte des sites potentiels en eau souterraine a également fait l'objet d'une validation rigoureuse. Le calcul de l'erreur a révélé une incertitude faible, de l'ordre de $\pm 0,005$, associée à un niveau de confiance élevé de 99 % (Tableaux XXIII). Cette faible marge d'erreur, observée pour l'ensemble des trois indicateurs utilisés, témoigne de la fiabilité et de la robustesse de la carte thématique de potentialité en eau souterraine.

Tableau XXIII: Statistiques des indicateurs de potentialité en eau souterraine

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Incertainde	K	NC (%)
Disponibilité	4	7,9	5,1	0,7	$\pm 0,003$	3	99
Accessibilité	1	8	5,5	1,4	$\pm 0,004$	3	99
Exploitableté	1	8,7	6,7	1,5	$\pm 0,004$	3	99
Potentialité	7,3	23,8	17,3	2,6	$\pm 0,005$	3	99

7.4 Discussion

À la lumière des résultats présentés, le bilan hydrologique global met en évidence que l'évapotranspiration réelle (ETR) constitue le terme prédominant, avec une valeur de 871,5 mm/an, soit 74,5 % des précipitations annuelles. Cette prédominance est en grande partie liée à la mise à nu des sols, conséquence des pratiques culturales traditionnelles et de la déforestation dans la zone d'étude. Cette valeur est comparable à celle rapportée par N'Guessan et al. (2014) pour la ville de Yamoussoukro, qui s'établit à 852,66 mm/an. La lame d'eau ruisselée, estimée à 218 mm/an, représente quant à elle 18,63 % des précipitations annuelles. En ce qui concerne la lame d'eau infiltrée moyenne, contribuant à la recharge des nappes phréatiques, elle s'élève à 80,38 mm/an, soit environ 6,87 % de la pluviométrie annuelle. Ces valeurs concordent avec les résultats de N'Guessan et al. (2014), qui ont estimé respectivement la lame ruisselée à 214,6 mm/an et la recharge à 69,98 mm/an. Des études comparables réalisées en Côte d'Ivoire, utilisant la méthode du bilan hydrologique selon Thornthwaite, fournissent également une large gamme de valeurs pour la recharge : 43 mm/an dans le bassin versant de la Mé (Soro, 1987), 46 mm/an dans le bassin de la Haute Marahoué (Biémi, 1992), 77 mm/an dans la région d'Odienné (Savané, 1997), ainsi que 74 mm/an à Man et 168 mm/an à Danané (Kouamé, 1999). Cette variabilité reflète la diversité des contextes géologiques et climatiques des zones étudiées, soulignant l'influence de ces facteurs sur les processus d'infiltration et de recharge.

Les résultats de la cartographie des structures linéamentaires ont révélé que les départements de Yamoussoukro et de Toumodi présentent un niveau de fracturation globalement modéré. En effet, environ 50 % de la superficie de la zone d'étude est caractérisée par une densité de fracturation moyenne à élevée, incluant des secteurs à bonne et excellente sensibilité de fracturation. Par ailleurs, l'analyse statistique du réseau de linéaments a mis en évidence deux directions structurales dominantes : N 0-10° (axe Nord-Sud) et N 90-100° (axe Est-Ouest). Cette approche méthodologique s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés sur la cartographie de la fracturation dans d'autres bassins versants, tels que celui de la Baya (Mangoua, 2013) et de la Lobo (Yao, 2015).

Dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, la carte de potentialité en eau souterraine a été élaborée à partir des cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité des ressources. L'analyse de la carte de disponibilité révèle que près de 81,7 % de la superficie des départements est caractérisée par des zones de disponibilité mauvaise à médiocre. Cette situation peut s'expliquer par la présence de pentes marquées associées à une densité élevée de drainage, favorisant un écoulement rapide des eaux de surface et limitant ainsi la recharge des réservoirs souterrains (Shankar & Mohan, 2006). Cependant, il est important de noter que des

forages situés au droit ou à l'intersection de méga-fractures ouvertes peuvent présenter des débits exceptionnels, même dans des secteurs à disponibilité limitée.

Par ailleurs, les zones bénéficiant d'une accessibilité bonne à excellente couvrent environ 81,34% de la superficie étudiée. Cette accessibilité favorable est en partie liée à la profondeur modérée des forages, qui permet d'exploiter efficacement des nappes produisant des débits satisfaisants. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Yao (2015) dans le bassin versant de la Lobo (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire), où la classe des bonnes et excellentes accessibilités représentait 83,7 % de la zone.

L'exploitabilité des ressources en eau souterraine dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi est largement dominée par les classes bonne (26,57 %) et excellente (63,6 %). Cette forte exploitabilité pourrait être liée à une densité de fracturation moyenne, qui couvre environ la moitié de la superficie de la zone d'étude, favorisant ainsi la circulation et le stockage des eaux souterraines. Les zones à faible potentialité représentent 8,9 % de la zone d'étude. Elles se caractérisent par une disponibilité faible, combinée à une accessibilité et une exploitabilité allant de médiocre à mauvaise. Ces zones, difficiles d'accès et généralement associées à des débits d'exploitation faibles, sont classées comme non convenables pour l'implantation de forages et sont donc fortement déconseillées. Les zones à potentialité médiocre couvrent 27,6 % de la zone d'étude. Elles présentent une variabilité plus importante, avec une disponibilité allant de mauvaise à excellente, une accessibilité médiocre à bonne, et une exploitabilité allant de médiocre à excellente selon les localités. En raison des débits exploitables modérés, ces zones sont classées comme acceptables pour l'implantation de forages, notamment dans le cadre de l'hydraulique villageoise ou de l'hydraulique villageoise améliorée.

Enfin, les zones à bonne et excellente potentialité occupent 67 % du territoire des deux départements. Ces secteurs, classés comme convenables, sont fortement recommandés pour l'implantation de forages, tant pour l'hydraulique villageoise améliorée que pour la recherche de points d'eau à forts débits. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Youan Ta *et al.* (2015) dans le département de Oumé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), où 58,25 % de la superficie étudiée était également classée comme zone à bonne et excellente potentialité.

Conclusion partielle

Dans le cadre de cette étude, les zones potentiellement productives des aquifères de socle des départements de Yamoussoukro et de Toumodi ont été identifiées à travers une approche intégrée combinant analyses géophysiques, statistiques et cartographiques. Au total, 2 063 linéaments ont été extraits sur l'ensemble de la zone d'étude, représentant une longueur cumulée de 2 410 km. L'analyse statistique de ces linéaments a permis de mettre en évidence deux orientations principales : N 0–10° (Nord–Sud) et N 90–100° (Est–Ouest), structurantes pour la circulation et l'accumulation des eaux souterraines.

La carte de disponibilité en eau souterraine de la zone d'étude est caractérisée par 4 classes : mauvaise (14,7%), médiocre (67%), bonne (14,7%) et excellente (3,6%). De même, la carte d'accessibilité des ressources en eau est caractérisée par 4 classes : mauvaise (6,6%), médiocre (12%), bonne (61%) couvrant la plus grande partie et quasi-présente sur l'ensemble de la zone d'étude et enfin celle excellente (20,24%). Dans le même ordre, la carte d'exploitabilité des ressources en eau présente 4 classes : mauvaise (0,59%), médiocre (9,84%), bonne (26,24%) et excellente (63,6%) et qui est quasi-présente sur l'ensemble de la zone d'étude. Enfin, la carte de sites potentiels en eau souterraine montre que les départements de Yamoussoukro et de Toumodi regorgent d'importantes réserves en eau souterraine avec une implantation des forages à gros débits répartis également en 4 classes : mauvaise (9%), médiocre (24%), bonne (42%) et excellente (25%).

Ces résultats confirment que les départements de Yamoussoukro et de Toumodi disposent d'un potentiel important en ressources en eau souterraine, avec une répartition favorable des zones exploitables pour l'alimentation en eau, notamment dans le cadre de projets d'hydraulique villageoise et semi-urbaine.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La présente étude vise à caractériser les aquifères de socle des départements de Yamoussoukro et de Toumodi, situés au centre de la Côte d'Ivoire, à partir de l'analyse combinée des propriétés hydrodynamiques et hydrogéophysiques. Les objectifs spécifiques poursuivis sont les suivants : (i) analyser le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère ; (ii) élaborer un modèle conceptuel hydrogéologique représentatif des aquifères de la zone d'étude ; (iii) cartographier les zones de potentialité en eau souterraine dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi.

Caractérisation des aquifères de socle des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

L'analyse du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi a permis de mettre en évidence les propriétés des aquifères localisés dans les altérites et le socle fracturé. Cette étude a notamment porté sur les paramètres hydrodynamiques des deux types d'aquifères, la relation entre les propriétés hydrodynamiques et les valeurs de résistivité électrique, une analyse statistique de l'épaisseur des altérites et des principaux paramètres hydrodynamiques.

Les cartes de résistivité électrique en fonction de la profondeur ont permis d'identifier deux grands domaines hydrogéologiques : l'aquifère d'altérites, généralement limité à une profondeur moyenne de 15 m, et l'aquifère du socle fissuré, qui se développe au-delà de cette profondeur.

Dans les altérites, les valeurs de porosité varient de 0,5 % à 29,6 %, tandis que la perméabilité se situe entre $1,25 \times 10^{-6}$ et $3,69 \times 10^{-5}$ m/s. Dans le socle fissuré, la perméabilité varie entre $2,93 \times 10^{-8}$ et $2,67 \times 10^{-5}$ m/s, la transmissivité entre $1,84 \times 10^{-6}$ et $6,69 \times 10^{-4}$ m²/s, le coefficient d'emménagement entre $3,45 \times 10^{-5}$ et $5,30 \times 10^{-2}$, et le débit spécifique entre 0,036 et 1,67 m³/h/m.

L'analyse croisée entre les résistivités électriques et les paramètres hydrodynamiques révèle que les zones à faible résistivité dans le socle correspondent généralement à des zones fracturées caractérisées par une forte perméabilité et une transmissivité élevée. Toutefois, aucune corrélation significative n'a été observée entre la résistivité électrique et le coefficient d'emménagement. Par ailleurs, des débits spécifiques élevés peuvent être observés dans des zones où la résistivité est modérée ou élevée.

Concernant l'analyse statistique, l'épaisseur moyenne des altérites est de 20,88 m, avec des valeurs comprises entre 1,85 m et 54,89 m. Près de 76,66 % des forages interceptent les horizons aquifères dans les 20 premiers mètres, principalement dans les formations d'altérites. La profondeur moyenne des premières venues d'eau est estimée à 51,9 m, avec un débit moyen de 6,35 m³/h et une profondeur moyenne des forages de 77,59 m, allant de 51,84 m à 105,35 m.

Conclusion générale

L'horizon le plus productif est localisé entre 40 m et 80 m de profondeur. Les débits supérieurs à 5 m³/h sont généralement associés à des forages où l'épaisseur de la zone altérée est comprise entre 10 m et 55 m. Les venues d'eau les plus productives sont majoritairement enregistrées dans les 70 premiers mètres.

Les transmissivités, estimées à partir des données de remontées d'essais de pompage, varient entre 10⁻⁶ m²/s et 10⁻³ m²/s, avec une valeur moyenne de $1,02 \times 10^{-4}$ m²/s et un coefficient de variation élevé de 284,58 %, traduisant une forte hétérogénéité spatiale.

Enfin, l'interprétation des paramètres hydrodynamiques à l'aide de la méthode des Self-Organizing Maps (SOM) a permis d'identifier les caractéristiques des forages les plus productifs. Ces derniers se distinguent par une bonne transmissivité, une perméabilité élevée, une épaisseur d'altération modérée et une profondeur totale relativement faible.

Elaboration d'un modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de fissure des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

Le modèle conceptuel hydrogéologique élaboré pour les départements de Yamoussoukro et de Toumodi met en évidence une structuration verticale du système aquifère de socle, typique des formations cristallines ou cristallophylliennes. Il révèle la superposition de trois grandes unités lithologiques aux épaisseurs variables, au sein desquelles se distinguent deux principaux aquifères.

Les blocs diagrammes géoélectriques et géologiques produits dans le cadre de cette étude présentent quatre horizons géologiques principaux, témoignant d'un profil d'altération structuré verticalement. De haut en bas, on observe (i) une couverture superficielle constituée de terre arable, souvent associée à une cuirasse latéritique à sa base, dont l'épaisseur varie de 2 à 12 m. Cette couche superficielle, en fonction de sa conservation et de son niveau de recharge, peut occasionnellement héberger des aquifères perchés ; (ii) une zone d'altérites argileuses, héritée de la décomposition in situ de la roche mère. Elle présente une épaisseur comprise entre 4 et 27 m. Cette unité correspond à l'aquifère d'altérites, généralement peu profond, exploité par des puits traditionnels. Sa perméabilité reste fortement conditionnée par sa granulométrie et sa teneur en argiles ; (iii) la frange fissurée du socle, constituée de granite faiblement à moyennement altéré, est la principale zone réservoir du système aquifère. Elle est marquée par la présence de fractures interconnectées favorables à la circulation et au stockage de l'eau souterraine. Cette frange atteint localement une épaisseur de 67 m. Elle constitue l'aquifère fissuré, souvent associé à des débits plus importants et plus durables ; (iv) le substratum sain, formé de granite peu ou non altéré, constitue la limite inférieure du système aquifère. Il est

Conclusion générale

globalement imperméable, à l'exception des zones affectées par des fractures profondes, localement conductrices.

Ce modèle met en évidence un aquifère composite à double étage, constitué des altérites en surface et du socle fracturé en profondeur, dont les propriétés hydrogéologiques sont conditionnées par l'intensité de l'altération, la fracturation, la lithologie et les conditions topographiques locales.

Cartographie des zones potentielles en eau souterraine en milieu de socle des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

Au terme de cette étude, les paramètres du bilan hydrologique ont été évalués dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi. Les résultats obtenus indiquent que l'évapotranspiration réelle (ETR) constitue la composante la plus significative du bilan, avec une valeur estimée à 871,5 mm/an, soit 74,5 % des précipitations annuelles. La lame d'eau infiltrée, estimée à 80,38 mm/an (soit 6,87% des précipitations), représente la part qui contribue efficacement à la recharge des nappes phréatiques. L'analyse statistique de la carte détaillée des linéaments a permis d'identifier 2 063 fractures, extraites manuellement à partir d'images satellitaires, pour une longueur cumulée de 2 410 km. Cette cartographie structurale met en évidence une fracturation importante de la zone d'étude, avec deux directions principales dominantes : N 0-10° (N-S) et N 90-100° (E-O). L'évaluation du potentiel en eau souterraine révèle une distribution spatiale contrastée : les zones de mauvaise potentialité couvrent 8,9 % de la superficie de la zone d'étude ; les zones de potentialité médiocre représentent 27,6 % ; les zones de bonne potentialité s'étendent sur 31,4 % ; et les zones d'excellente potentialité couvrent 32,1 % du territoire. Ces résultats indiquent que plus de 90 % de la zone d'étude est favorable à l'implantation de forages, notamment pour les besoins de l'hydraulique villageoise et de l'hydraulique villageoise améliorée. De plus, environ 63 % de cette superficie présente des conditions propices à la mise en place de forages à gros débits, susceptibles de répondre aux besoins des grands centres urbains.

Au cours de cette étude et sur la base des connaissances acquises, quelques solutions ont été proposées pour une caractérisation hydrogéologique et les potentialités en eau des aquifères fissurés des départements de Yamoussoukro et de Toumodi. Cette étude doit être poursuivie, et comme perspectives, il conviendrait de :

- Réaliser une étude piézométrique approfondie sur le long terme, afin de mieux comprendre les dynamiques spatio-temporelles du niveau piézométrique dans le système aquifère des départements de Yamoussoukro et de Toumodi ;

Conclusion générale

- Élaborer un modèle d'écoulement souterrain, permettant d'affiner la connaissance des paramètres hydrodynamiques et d'appuyer la gestion intégrée des ressources en eau ;
- Évaluer la vulnérabilité à la pollution des zones à fort potentiel, afin de garantir une exploitation durable et préserver la qualité des ressources en eau.

REFERENCES

Références

- Akmel J.M. (2013). Étude de faisabilité de la mise en place du réseau d'information économique du tourisme pour la ville de Yamoussoukro. Mémoire d'Ingénieur des Techniques du Tourisme, Ecole de Formation Continue et de Perfectionnement des Cadres de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 23 p.
- Alabi A.A., Ganiyu S.A., Idowu O.A., Ogabi A.F. & Popoola O.I. (2021). Investigation of groundwater potential using integrated geophysical methods in Moloko-Asipa, Ogun State, Nigeria. *Applied Water Science*, 11 : 124-132
- Alle, I. C., Descloitres, M., Vouillamoz, J. M., Yalo, N., Lawson, F. M. A., Adihou, A. C. (2018). Why 1D Electrical Resistivity Techniques Can Result in Inaccurate Siting of Boreholes in Hard Rock Aquifers and Why Electrical Resistivity Tomography Must Be Preferred: The Example of Benin, West Africa, *Journal of African Earth Sciences*, (139) : 341-353.
- Amaya A.G., Ortiz J., Duran A., Villazon M. (2019). Hydrogeophysical methods and hydrogeological models: basis for groundwater sustainable management in Valle Alto (Bolivia), *Sustainable Water Resources Management*, (5) : 1179-1188. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0293-x>.
- Anoh K. A. (2014). Apport d'un SIG Et du modèle agro-hydrologique SWAT Dans la gestion durable des ressources en eaux du bassin Versant du lac de Taabo (centre de la Cote d'Ivoire). Thèse de doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan. 217 p.
- Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurales, Hydrodynamique, Hydrochimie et Isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat Ès Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 479 p.
- Boubac I.A., Saley.M. B., Sorokoby.V. M & Koudou Aimé. (2022). Apport de la télédétection et des SIG à l'identification des zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques dans le Département de Téra, Ouest du Niger. *Afrique science*, 20(5) :75- 9
- Castany G. (1998). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Paris, Bordas 238 p.

Conclusion générale

- Cooper H.H. & Jacob C.E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Transactions of the American Geophysical Union*, 27(4) : 16-24.
- Coulibaly N. (2009). Conception d'un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans la région du Denguelé (Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université Abobo-Adjamé, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 155 p.
- De Marsily G. (2004). Cours d'hydrogéologie. Université Paris VI, Paris (France), 226 p.
- Dewandel B., Alazard M., Lachassagne P., Bailly-Comte V., Couëffé R., Grataloup S., Ladouche B., Lanini S., Maréchal J.C. & Wyns R. (2017). Respective roles of the weathering profile and the tectonic fractures in the structure and functioning of a crystalline thermomineral carbo-gaseous aquifer. *Journal Hydrology*, 547 : 690–707.
- DHH (2001). Bilan diagnostic et redynamisation du dispositif de maintenance des pompes manuelles. Séminaire de réflexion sur la maintenance des pompes d'hydraulique villageoise, 47 p
- Dibi B. (2008). Cartographie des sites potentiels d'implantation des points d'eau dans le département d'Aboisso (Sud-est de la Côte d'Ivoire) : Apport du SIG et de l'analyse multicritère. Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 164p.
- Dibi B., Inza D., Goula B.T.A., Savane I. & Biémi J. (2004). Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud-est de la Côte d'Ivoire). *Sud Sciences et Technologies*, 13 : 12-17.
- Douagui A.G., Kouadio S.K.A., Mangoua J.O.M., Kouassi A.K., Kouam B.K. & Savané I. (2019). Using specific capacity for assessing of the factors controlling borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of N'Zi, Iffou and Moronou regions in the eastern area of Côte d'Ivoire, *Groundwater for Sustainable Development*, (9) : 100-235.
- El morjani Z. (2003). Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels. *Conférence francophone*, 17-22 Juin 2003, Souss, Maroc, pp 76-103.
- Gao Q., Shang Y., Hasan M., Jin W. & Yang P. (2018). Evaluation of a Weathered Rock Aquifer Using ERT Method in South Guangdong, China, *Water*, 10(293): 1-22.

Conclusion générale

- Geotomo-Software. (2002). Geoelectrical Imaging 2D and 3D Geotomo Software Manual. ABEM Instrument, Bromma, Sweden.
- Gnazalé G.G.R. (2020). Apport de la géomatique à l'analyse et à la modélisation de l'impact des facteurs climatiques et environnementaux sur la prolifération des schistosomes en Côte d'Ivoire : cas de la schistosomiase urinaire, dans la région du béliet et du district de Yamoussoukro. Thèse de doctorat en climat, environnement et développement durable, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières de l'Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 215 p.
- Haselbecka V., Kordillab J., Krausea F. & Martin S.M. (2019). Self-organizing maps for the identification of groundwater salinity sources based on hydrochemical data, *Journal of hydrology*, 576 : 610-619.
- Ibraheem I.M., Tezkan B. & Bergers R. (2021). Integrated Interpretation of Magnetic and ERT Data to Characterize a Landfill in the North-West of Cologne, Germany. *Pure Appl. Geophys*, 178, 2127–2148.
- INS (2021). Recensement générale de la population et de l'habitat, Côte d'Ivoire, Rapport final de l'institut national de la statistique, 37 p.
- Jarar O.H., Benslimane A., Benaabidate L. & Eljaafari S. (2005). Elaboration d'un S.I.G. pour la gestion des ressources en eau des bassins versants de Ziz et Rhéris. *Manuscrit*, 10 p.
- Joerin F. (1995). Méthode multicritère d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site. *Revue internationale de géomatique*, 5 (1), pp. 37-51.
- Jourda J. P., Kouamé K. J., Saley M. B., Kouadio B. H., Oga Y. S., Deh S. K. (2006). Contamination of the Abidjan aquifer by sewage : An assessment of extent and strategies for protection. *Groundwater pollution in Africa*, 1 : 293-302.
- Jourda J.P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat Ès Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 430 p.
- Jourda J.P., Saley M.B., Djagoua E.V., Kouamé K.J., Biemi J. & Razack M. (2006). Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. *Revue de Télédétection*, 5 (4), 339-357.

Conclusion générale

- Kamenan Y.M. (2021). Elaboration d'un modèle de protection des eaux souterraines en zone de socle : cas des aquifères du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (Centre-Ouest de Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa (Côte d'Ivoire), 170 p.
- Kiviluoto K. (1996). Topology preservation in self-organizing maps. Proceedings of ICNN'96, IEE International Conference on Neural Networks. IEEE Service Center, Piscataway : 294 - 299.
- Koffi K.H., Kouame K.K.I., Dao A., Noufe D., Koffi K.J.T., Kamagate.B. (2021). Analysis of the qualitative evolution of groundwater in the Abouabou area in the Port-Bouet municipality (Abidjan, Côte d'Ivoire), *Heliyon*, (6) : 52-68.
- Kohonen T. (2013). Essentials of the self-organizing map. *Neural Networks*, (37) : 62-65.
- Koita M. (2010). Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II (Montpellier, France), 220 p.
- Kokobou K.H.J. (2023). Elaboration d'une base de données liée aux forages et analyse géospatiale par Système d'Information Géographique : cas des départements de Yamoussoukro et de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire), 179 p.
- Kouadio K. J.O. (2022). Simulation du Mode de recharge et du transfert des polluants vers les eaux souterraines du bassin versant de la Lobo (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire), 281 p.
- Kouakou E.G.K., Sombo A.P., Bié G.R., Aka E., Kouamé L. N., (2016). Étude comparative de résultats de sondages électriques et des coupes litho stratigraphiques de forages en région de socle (Nord de la cote d'ivoire), *Larhyss Journal*, (25) :101-119.
- Kouamé K.F. (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semimontagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université de Cocody, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 194 p.
- Kouassi A.M., Coulibaly D., Koffi Y.B. & Biémi J. (2013). Application de méthodes géophysiques à l'étude de la productivité des forages d'eau en milieu cristallin : cas

Conclusion générale

- de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 16(2) : 12-16.
- Kouassi A.M., N'guessan B.T.M., Kouamé K.F., Kouamé K.A., Okaïgni J.C. & Biémi J. (2012). Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Comptes Rendus Géoscience*, 344 : 288-296.
- Kouassi, A.M. (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: Cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 210 p.
- Krásný J., Sharp J.M. (2007). Groundwater in fractured rocks : IAH Selected Paper Series. CRC Press.
- Lachassagne P. & Wyns R. (2005). Aquifères de socle : nouveaux concepts, application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Géosciences*, 2 : 32-37.
- Lachassagne P., Dewandel B. & Wyns R. (2021). Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers-guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources, *Hydrogeology Journal*, 12:1-34.
- Lachassagne P., Wyns R. & Dewandel B. (2011). The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23, (3) : 145–161.
- Lasm T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyses statistiques et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (Domaine Archéen). Thèse unique de doctorat Université de Poitiers, (Poitiers, France), 272 p.
- Lasm T., Lasme O., Oga M.S., Youan-Ta M., Baka D., Kouamé K.F. & Yao K.T. (2008). Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pédro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(2) : 4-16.
- Leblond P. (1984). Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'Ivoire. Région de Yamoussoukro (Station expérimentale de l'ENSTP). Thèse de 3ème cycle en hydrogéologie, Université de Bordeaux (Bordeaux, France), 150 p.
- Lee C.H., Chen W.P., Lee R.H. (2015). Estimation of groundwater recharge using water balance coupled with base-flow-record estimation and stable-base-flow analysis, *Environnement, Geology*, (51) : 73–82.

Conclusion générale

- Loke M.H. & Barker R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, *Geophysical Prospecting*, 44, (1) : 131–152.
- Mahé G., Dessouassi R., Bandia C. & Olivry J. C. (1998). Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du Bani à Douna au Mali. *Hydrological Sciences*, 252: 289-295.
- Mainoo P.A., Manua E., Yidanab S.M.Y., Agyekuma W.A., Stigterd T., Duaha A.A. & Prekoc K. (2019). Application of 2D-Electrical resistivity tomography in delineating groundwater potential zones: Case study from the voltaian super group of Ghana, *Journal of African Earth Sciences*, (160) : 103-618.
- Mangoua M.J. (2013). Evaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d’Ivoire). Thèse unique de Doctorat, Université d’Abobo-Adjamé, (Abidjan, Côte d’Ivoire), 169 p.
- Mangoua M.J., Kouassi K.A., Douagui G.A., Savané I. & Biémi J. (2019). Remote Sensing and GIS Contribution for Groundwater Mapping Reservoirs in the Baya Watershed (Eastern Region of Côte d'Ivoire), *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 23(3) : 1-14.
- Mangoua M.J., Touré S., Goula B.T.A., Yao K.B., Savané. I& Biémi J. (2010). Evaluation des caractéristiques des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya ou Bâ (Est de la Côte d’Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 16 : 243-259.
- Maréchal J.C., Dewandel B., Subrahmanyak K. (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer, *Water resources Research*, 40 :11-50.
- Marescot D. (2009). Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis. Thèse de doctorat, Université de Nantes et de Lausanne (Suisse), 208 p.
- Maystre, L.Y., Lucien, Y. Pictet, J. & Simos, J. (1994). Méthodes multicritères ELECTRE: Description, conseils, pratique et cas d'application à la gestion environnementale. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 319 p.
- Megnien C. (1979). Hydrogéologie du centre du bassin de Paris : contribution à l’étude de quelques aquifères principaux. Numéro 98 de la collection : Memoires du BRGM, 532 p.

Conclusion générale

- Mogaji K.A., Aboyeji O.S. & Omosuyi G.O. (2011). Mapping of lineaments for groundwater targeting in the basement complex region of Ondo State, Nigeria, using remote sensing and geographic information system (GIS) techniques. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 3 (7), 150-160.
- N'go Y. A., Lasm. T., Koita M. & Savane I., (2010). Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambrien de la région de Dimbokro (Centre-est de la Côte d'Ivoire). *Revue Télédétection*, 9 (1) : 33-42.
- N'guessan A. (1985). Contribution à l'hydrogéologie de la région Centrale de la Côte d'Ivoire et analyse statistique des résultats de forage. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle en hydrogéologie, Université de Franche-Comté (Besançon, France), 154 p
- N'guessan K.A., Kouassi A.M., Gnaboa R., Traoré K.S. & Houenou P.V. (2014). Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbanisé : cas de la ville de Yamoussoukro (centre de la Côte d'ivoire), *Larhyss Journal*, 23 : 11-15.
- Neves M.A. & Morales N. (2007). Weil productivity controlling factors in crystalline terrains
- OMS (2020). Aide au développement et Accès à l'eau et à l'assainissement en Afrique. Rapport de la banque africaine de développement, 47 p.
- Ouédraogo M. (2016). Caractérisation des aquifères de socle pour l'amélioration de la productivité des forages d'hydraulique villageoise dans le bassin versant du Bandama blanc amont (Nord de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud (Paris, France), 221 p.
- PRICI (2016). Projet de Renaissance des Infrastructures de Côte d'Ivoire. Rapport final du cadre de gestion environnementale et sociale, Côte d'Ivoire, 203 p.
- RGPH. (2021). Résultats globaux, recensement général de la population et de l'habitat, secrétariat technique permanent du comité technique du RGPH (Côte d'Ivoire), 26 p.
- Rousseau A. N., Lafrance P. D., Quilbé R.D., Caron E.M., Grenier M.M., Lavignen M.P. & Savary S. (2007). Développement de normes de performance agro-environnementales atteignables (NPA) sur quatre bassins versants canadiens. Centre Eau, Terre et Environnement Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE) 490, rue de la Couronne, Québec (QC), G1K 9A9. Rapport N° R-924, 31 mars 2007, 217 p.
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle*, 8 : 57-75.

Conclusion générale

- Saaty T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority setting, Resource allocation, Mc Graw-Hill, New York, 19 p.
- Saaty T.L. (2008). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15 : 234-281
- Saley M. B. (2003). Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo- image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Thèse unique de Doctorat*, Université de Cocody, (Abidjan,Côte d'Ivoire), 209 p.
- Savané I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Cote d'Ivoire) : apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat d'Etat es-Sc. Nat, Université de Cocody, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 398 p.
- Sener E., Davraz A. & Ozcelik M. (2005). An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations : A case study in Burdur, Turkey. *Hydrogeology Journal*, 13, 826–834.
- Sener E., Davraz A. et Ozcelik M. (2005). An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey. *Hydrogeology Journal*, vol. 13, pp. 826–834.
- Shankar R.M.N & Mohan G. (2006). Assessment of the groundwater potential and quality in the Bhatsa and Kalu river basins of Thane district, western Deccan Volcanic Province of India.Environmenta/Geology. 49 : 990-998.of southeastern Brazil. *Hydrogeology Journal*, 15 : 4 71-482.
- Singhal B.B.S. (2008). Nature of hard rock aquifers: hydrogeological uncertainties and ambiguities. In Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers. *Springer Netherlands*, 20–39.
- Soro D.D., Koïta M., Biao C.A., Outoumbe E., Vouillamoz J.M., Hamma Y. & Guerin R. (2017). Geophysical demonstration of the absence of correlation between lineaments and hydrogeologically usefull fractures: Case study of the Sanon hard rock aquifer (Central northern Burkina Faso), *Journal of African Earth Sciences*, (129) : 842-852.
- Soro G. (2010). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire) : hydrogéologie et hydrochimie des

Conclusion générale

- aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou. Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 250 p.
- Soro N. (2002) : Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique. Thèse d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 256p.
- Soro, N. (1987). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire: Bassin versant de la Mé. Thèse de Doctorat 3è cycle, Université de Grenoble (Grenoble, France), 239 p.
- Tagini B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Thèse de Doctorat, Université de Lausanne (Lausanne, Suisse), 302 p.
- Tagnon B.O., Assoma V.T., Mangoua J.M.O., Douagui A.G., Kouamé F.K. & Savané I. (2020). Contribution of SAR/RADARSAT-1 and ASAR/ENVISAT images to geological structural mapping and assessment of lineaments density in Divo-Oume area (Côte d'Ivoire). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*,: S1110982318300899.
- Thornthwaite C.W. (1954). An approach toward a rational classification of climate, *Transaction American Geophysics Union*, 27 : 55-99.
- UNICEF (2017). Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène : mise à jour 2017 et évaluation des objectifs de développement durable. Rapport du Joint Monitoring Program, New York (Etats-Unis), 116 p.
- Vassolo S., Neukum C., Tiberghien C., Heckmann M., Hahne K. & Baranyikwa D. (2018). Hydrogeology of a weathered fractured aquifer system near Gitega, Burundi, *Hydrogeology Journal*, 27 : 625–637.
- Wang X.D., Li G., Cheng P., Luo. (2018). Study on structural plane of deep rock mass in xinchang preferred site for underground research laboratory on geological disposal of high-level radioactive waste in China. In : 2nd International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science, *Earth Environment Science*, 170, (3) : 20-97.
- Wyns R. (2020). Weathering paleoprofiles in Vosges and their applications, *Bulletin d'Information Géologique Bass Paris*, 57, (4) : 13–27.
- Wyns R. (2020a). Weathering and lithosphere geodynamics, *Géochronique* 1 : 70–80
- Yacé I (2002). Initiation à la géologie. L'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest. Pétrologie, Géologie régionale. Edition. CEDA, SODEMI, Abidjan, 2002.

Conclusion générale

- Yace I. (1984). Le précambrien de l'Afrique de l'Ouest et ses corrélations avec le Brésil oriental. Rapport final du projet PICG, 28 p.
- Yao A.B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Yao A.B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre Ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 240 p.
- Yao K.A. & Amani Y.C. (2016). La problématique de la pérennité du service public d'eau potable à Bondo (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). *Revue Perspectives et Sociétés*, 3(2) : 6- 9.
- Youan Ta M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 237 p.
- Youan Ta M., Baka D., Lasm T., Jourda J.P. & Biemi J. (2015). Analyse des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère fissuré du socle paléo protérozoïque : Aide à l'approvisionnement en eau potable des populations de la région de Bondoukou (Nord-est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 13 : 561-580.
- Youan Ta. M., Lasm T., Jourda J. P., Saley B. M., Adja M.G., Kouame K. & Biémi J.(2011).Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère Cas de Bondouk:ou (Côte-d'Ivoire). *Revue internationale de géomatique*, 21 (1) : 43- 71.
- Youssef S., Zaid K.F. & Kassem M.O (1973). Cartographie des linéaments géologiques en domaine aride par extraction semi-automatique à partir d'images satellitaires : Exemple à la région d'El Kseïbat (Sahara algérien). *Estudios Geológicos enero-junio* 72(1) : 367-449.
- Zhang G.H., Jiao Y.Y., Ma C.X., Wang H., Chen L.B. & Tang Z.C. (2018). Alteration characteristics of granite contact zone and treatment measures for inrush hazards during tunnel construction – A case study, *Engineering Geology*, 235 : 64–80.

PUBLICATIONS ISSUES DE LA THESE

1 - Atté Guillaume Atté, Arthur Brice Konan-Waidhet, Tanina Drissa Soro, Abé Parfait Sombo, Jean Biemi (2022). Mapping of groundwater potential by multicriteria analysis : case of the departments of Yamoussoukro and Toumodi (Central Côte d'Ivoire). *Journal of Geographic Information System*, 14: 259-279.

2 - Guillaume A., Arthur Brice K-W., Parfait S. A. Hervé Jacques K.K. & Jea B. (2022). Landsat 8 oli Satellite Imagery Mapping and Analysis of Bedrock Fracture Networks in the Departments of Yamoussoukro and Toumodi (Central Cote d'Ivoire). *European Scientific Journal*, ESJ, 18 (30), 206. <https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n30p206>

Résumé

Les échecs observés lors de l'implantation des forages restent un problème majeur dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi mettant ainsi en mal la connaissance du système aquifère dans lequel les eaux souterraines sont captées. Dès lors l'évaluation des potentialités en eau souterraine pour l'amélioration du système d'approvisionnement en eau potable dans ces départements constitue l'objectif principal de cette étude. Pour la caractérisation du système aquifère, la méthode de la remontée de Cooper-Jacob (1946) et la loi de Darcy ont permis d'évaluer les paramètres hydrodynamiques suivit, de l'application de la méthode des SOM (Self-Organising Maps) pour l'identification des paramètres de productivité. Ensuite, la méthode de sondage électrique et tomographique a été utilisées pour l'élaboration d'un modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères. Enfin, la cartographie des zones de potentialités en eau souterraine des départements de Yamoussoukro et de Toumodi a été réalisée par la méthode d'analyse multicritère. Les résultats montrent que les profondeurs les plus productives se rencontrent entre 65 et 85 m. Avec une tranche de 10 à 55 m d'altérite qui offre les meilleurs débits soit 58,83% des débits. Les essais de pompages et les fiches techniques des forages ont servi à déterminer les propriétés hydrodynamiques par la méthode de la remontée de Cooper-Jacob. Dans les altérites, la porosité varie entre 5 % et 37,5 %. Dans le socle fissuré, la perméabilité est comprise entre $2,93.10^{-8}$ et $2,67.10^{-5}$ m/s, la transmissivité entre $1,844.10^{-6}$ et $6,69.10^{-4}$ m²/s. Ainsi les valeurs de la transmissivité illustrent que les aquifères de socle du département de Yamoussoukro ont une bonne fonction conductrice. Les résultats ont ensuite montré que la zone d'étude est fortement fracturée, avec une dominance des directions N-S (N 0-10°) et E-O (N 90-100°). Enfin, ces résultats ont montré que la zone d'étude regorge d'importantes réserves en eau souterraine avec plus de 90% de zone favorable à l'implantation de forage dans le cadre de l'hydraulique villageoise et l'hydraulique villageoise amélioré. Et près de 67% de ces zones sont favorables à l'implantation des forages à gros débits.

Mots clés : Propriétés hydrodynamiques. Modèles conceptuels hydrogéologiques, méthode géophysique, Aquifère-fissuré, Potentialité, Côte d'Ivoire.

Abstract

Insufficient quantity of water in the boreholes, the settling of the hydraulic pumps and the failures observed during the installation of the boreholes remain a major problem in Yamoussoukro department, putting the underground bilges are captured. Therefore, the assessment of groundwater potential for improving the drinking water supply system in the departments of Yamoussoukro and Toumodi which is the main objective of this study. The depths productive pals meet between 65 and 85 m; the 10 to 55 m range of alterity offers the best flows 58.83%. The pumping test and the technical sheets boreholes were used to determine the hydrodynamic properties by Cooper-Jacob upwelling method. In alterites, the porosity varies between 0.5% and 29.6% and the permeability is between $1.25.10^{-6}$ and $3.69.10^{-5}$ m / s. In the fractured basement, the permeability is between $2.93.10^{-8}$ and $2.67.10^{-5}$ m/s, the transmissivity between $1.844.10^{-6}$ and $6.69.10^{-4}$ m²/s, the storage coefficient between $3.45.10^{-5}$ between $5.30.102$ and the specific flow between 0.036 between $1.67\text{m}^3 / \text{h} / \text{m}$. In the fractured basement, the low resistivities coincide with the high permeability and transmissivity. The value transmissions varying between $9, 44.10^{-6}$ and $9, 4.10^{-4}$ m²/s which a geometric mean $2,29.10^{-4}$ m²/s illustrated that the basement aquifers of the department have a good conductive function. The results obtained showed that 6.87% of the rainfall feeds the groundwater, i.e. 80.38 mm/year. These results then showed that the study area is highly fractured, with a dominance of N-S (N 0-10°) and E-W (N 90-100°) directions. Finally, these results showed that the study area has significant groundwater reserves with more than 90% of the area favorable to the establishment of drilling in the context of village water supply and improved village water supply. And nearly 63% of these areas are favorable to the establishment of large flow boreholes. village water supply and improved village water supply. And nearly 63% of these areas are favorable to the establishment of large flow boreholes.

Keywords: hydrodynamic properties, hydrogeolical conceptual models, geophysics model, Fissured aquifer, Potentiality, Côte d'Ivoire.