



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'EAU ET DE
L'ASSAINISSEMENT

SÉCRÉTARIAT GÉNÉRAL

DIRECTION GÉNÉRALE DES RESSOURCES EN EAU



ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE DE LA CEINTURE VERTE DE OUAGADOUGOU AU BURKINA FASO



RAPPORT DE L'ÉVALUATION DU POTENTIEL HYDROGÉOLOGIQUE ET DES RISQUES
DE POLLUTION DES AQUIFÈRES DE LA CEINTURE VERTE DE OUAGADOUGOU

VERSION FINALE – Aout 2025



REGISTRE DES REVISIONS ET ÉMISSIONS

N° de révision	Date	Description
01	15/07/2025	Émission de la première version provisoire
02	20/08/2025	Dépôt du rapport final

LIVRABLE 2

RAPPORT DE L'ÉVALUATION DU POTENTIEL HYDROGÉOLOGIQUE ET DES RISQUES DE POLLUTION DES AQUIFÈRES DE LA CEINTURE VERTE DE OUAGADOUGOU

Financement : État Néerlandais

Réf :	Version Finale	Date :
Préparé par :	Vérifié par :	Validé par :
BITON Tyano : Expert Hydrogéologue COMPAORE Hillary Marie Michelle : Experte Hydrogéologue -Géophysicienne/Cheffe de mission adjointe BONKOUNGOU Sambo Epiphane : Expert en Géosciences et Télédétection DENDE LUSHIMA Zacharie : Expert Hydrochimiste MAYELA TOMBA Ted : Expert Géophysicien	Dr SAURET S. G. Elie : Expert Hydrogéologue – Environnementaliste /Chef de mission SANOU Richard : Ingénieur Géomaticien, SIG et Télédétection TRAORE Yacouba Saly : Ingénieur des Sciences de l'Eau et Directeur Général de BERA SAVADOGO Moumini : Expert environnementaliste	

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CADRE DE L'INTERVENTION	1
I.1. Contexte et Justification	1
I.2. Objectifs de l'étude	2
I.3. Résultats attendus	2
PHYSIOGRAPHIE DE LA ZONE D'ÉTUDE	3
I.1. Localisation et cadre administratif de la zone d'étude.....	3
I.2. Contexte climatique	4
I.3. Hydrographie.....	5
I.4. Géomorphologie	6
I.5. Relief et Topographie	7
I.6. Sols et végétation	7
I.7. Activités socio-économiques.....	8
DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE D'ÉVALUATION DES POTENTIALITÉS EN EAU SOUTERRAINE.....	10
I.8. Approche planifiée	10
I.9. Organisation de la mission	13
SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES GÉOLOGIQUES ET STRUCTURALES	15
I.10. Contexte géologique	15
I.10.1. Contexte géologique régional	15
I.10.2. Contexte géologique du Burkina Faso.....	17
I.10.2.1. Contexte géologique de la feuille du Degré Carré de Ouagadougou (DCO).....	18
I.10.2.2. Description des terrains de la Région du Centre	20
I.10.2.3. Description des terrains de la CVO	22
I.11. Contexte structural.....	24
I.11.1. Contexte structural général du Burkina Faso	24
I.11.2. Contexte structural du DCO et de la CVO	26
CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE.....	28
I.12. Nature et typologie des aquifères.....	29
I.12.1. Activités préparatoires à la prospection géophysique	31
I.12.1.1. Matériel et méthode	31
I.12.1.2. Résultats et analyses	35
I.12.1.3. Propositions des directions des levées géophysiques.....	40

I.12.2.	Prospection géophysique proprement dite.....	41
I.12.2.1.	Matériel et méthode	41
I.12.2.2.	Traitement et interprétation des données	47
I.12.3.	Modèles hydrogéologiques conceptuel	51
I.13.	Ouvrages hydrauliques recensés et capitalisation des données	54
I.14.	Caractéristiques hydrogéologiques des aquifères de la région du centre	55
I.14.1.	Géométrie des aquifères et niveau de nappes	55
I.14.1.1.	Aquifères des altérites.....	56
I.14.1.2.	Aquifères de fractures	58
I.14.2.	Productivité des aquifères et paramètres hydrodynamiques	62
I.14.2.1.	Aquifères des altérites.....	63
I.14.2.2.	Aquifères de fractures	65
I.15.	Caractéristiques hydrogéologiques des forages de la CVO	68
I.15.1.	Géométrie des aquifères et niveau de nappes	68
I.15.2.	Productivité des aquifères et paramètres hydrodynamiques	72
I.16.	Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques de la CVO.....	75
SUIVI ET ÉVOLUTION DES EAUX SOUTERRAINES.....		77
I.17.	Le réseau piézométrique national.....	77
I.17.1.	Généralités	77
I.17.2.	Typologie des piézomètres du Réseau Piézométrique National	78
I.17.3.	Variation temporelle de la piézométrie.....	79
I.17.3.1.	Site de Bassinko	79
I.17.3.2.	Site de Silmissin	80
I.17.3.3.	Site de Ouagadougou	82
I.18.	Le réseau piézométrique de l'ONEA.....	83
ÉTUDE DES MÉCANISMES DE RECHARGES ET ESTIMATION DE LA RECHARGE		86
I.19.	Généralités sur la recharge des aquifères	86
I.20.	Évaluation par approche bilantaire spatialisée	88
ÉVALUATION DU POTENTIEL EN EAU SOUTERRAINE / ANALYSE MULTICRITERES (AMC).....		92
I.21.	Généralités	92
I.22.	Choix des critères	94
I.22.1.	Densité de drainage.....	94
I.22.2.	Densité de fracturation	96

I.22.3.	Type de sol.....	97
I.22.4.	Occupation du sol.....	98
I.22.5.	Épaisseur d'altération saturée.....	99
I.22.6.	Géologie	100
I.22.7.	Taux de succès.....	101
I.22.8.	Recharge directe.....	102
I.22.9.	Débit des forages.....	103
I.22.10.	Profondeur totale du forage.....	104
I.23.	Standardisation des critères pour les indicateurs hydrogéologiques	105
I.24.	Pondération des critères pour les indicateurs hydrogéologiques	108
I.24.1.	Méthodologie de pondération	108
I.24.2.	Résultats obtenus	111
I.24.2.1.	Indicateur de potentialité.....	111
I.24.2.2.	Indicateur d'accessibilité	112
I.24.2.3.	Pour l'indicateur d'exploitabilité	113
I.25.	Cartes des indicateurs hydrogéologiques.....	114
I.25.1.	Indicateur de potentialité.....	114
I.25.2.	Indicateur d'accessibilité	115
I.25.3.	Indicateur d'exploitabilité.....	116
I.26.	Validation de la carte de potentialité hydrogéologique	118
ÉTUDE DE L'HYDROCHIMIE ET LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES		120
I.27.	Hydrochimie des eaux souterraines.....	120
I.28.	État des lieux des connaissances sur la qualité des eaux.....	121
I.28.1.	Collecte des données	121
I.28.2.	Analyse critique des données collectées.....	122
I.28.2.1.	Données collectées de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE)	122
I.28.2.2.	Données collectées de la Direction Régionale de l'Eau et l'Assainissement de l'Environnement du centre (DREAE C)	123
I.28.2.3.	Données collectées du Centre de Traitement et de Valorisation des Déchets (CVTD)	123
I.28.2.4.	Données collectées de la documentation des études antérieurs	124
I.28.3.	Conclusion de l'état des lieux des connaissances sur la qualité des eaux.....	125
I.29.	État des lieux de la qualité des eaux	126
I.29.1.	Représentativité des données.....	126
I.29.2.	Vérification, contrôle	126

I.29.2.1.	Vérifications.....	126
I.29.2.2.	Contrôle des résultats	127
I.29.3.	Traitement et interprétations des données	128
I.29.3.1.	Balance ionique	128
I.29.3.2.	Diagramme de Piper.....	131
I.29.3.3.	Indice d’agressivité ou indice de Ryznar (IR)	132
I.29.3.4.	Cartes de teneurs et interprétation des paramètres physico-chimiques.....	133
II.	ÉTUDE DE LA VULNERABILITE INTRINSEQUE DES EAUX SOUTERRAINES	139
II.1.	Description de la méthode DRASTIC	139
II.1.1.	Étape 1.....	140
II.1.2.	Étape 2.....	140
II.1.3.	Étape 3.....	142
II.2.	Données des bases.....	142
II.3.	Détermination de la vulnérabilité méthode DRASTIC.....	143
II.3.1.	Indice de la vulnérabilité DRASTIC	144
II.3.2.	Vulnérabilité hydrogéologique	145
III.	ÉTUDE DE POLLUTION ET RISQUE DE POLLUTION DES EAUX	146
III.1.	Types de pollution des eaux dans la zone d’intérêt	146
III.1.1.	Analyse de la pollution naturelle dans la zone d’intérêt.....	147
III.1.1.1.	Facteurs géologiques.....	147
III.1.1.2.	Facteurs climatiques.....	147
III.1.1.3.	Érosion hydrique et éolienne	147
III.1.2.	Analyse de la pollution artificielle dans la zone d’intérêt	148
III.1.2.1.	Menace de pollution d’origine agricole.....	148
III.1.2.2.	Menace de pollution urbaine et industrielle.....	150
III.2.	Risques de pollution	154
III.2.1.	Relation entre qualité des eaux et pollution	154
III.2.2.	Menaces de pollution en zone urbaine.....	154
III.2.2.1.	Eaux usées	155
III.2.2.2.	Déchets solides.....	155
III.2.2.3.	Boues de vidange	155
III.2.3.	Menaces de pollution en zone péri-urbaine	155
III.3.	Analyse des Risques Hydrochimiques	156

III.4. Mesures de prevention et d'attenuation	156
ANNEXES	161
Annexe 1 : TDR de l'étude	161
CONTEXTE ET JUSTIFICATION.....	162
OBJECTIFS GLOBAL ET SPECIFIQUE DE LA MISSION.....	162
RESULTAT ATTENDUS.....	163
METHODOLOGIE	163
MOBILISATION DES EXPERTS	164
CRITERES D'EVALUATION.....	166
LIVRABLES DE L'ETUDE	167
DUREE DE LA MISSION	167
Annexe 2 : sections de tomographie de résistivité électrique, modèles géologiques et carte de distribution de conductivité du sous-sol	168

LISTE DES FIGURES

Figure III-1 : Localisation de la Ceinture verte de Ouagadougou	4
Figure III-2 : Évolution des pluies annuelles à la station de Ouagadougou.....	5
Figure III-3 : Chronique des ETP annuelles 1990 - 2023.....	5
Figure IV-1 : Approche conceptuelle de la mission	12
Figure V-1 : Carte géologique du craton ouest-africain (adapté de WAXI, 2013).....	16
<i>Figure V-2 : Carte du schéma structural montrant les principaux domaines structuraux, les cisaillements et les couloirs de déformation</i>	<i>17</i>
Figure V-3 : Principaux domaines géologiques du Degré Carré de Ouagadougou (DCO)	19
Figure V-4 : Principale lithologie du degré carré de Ouagadougou.....	20
Figure V-5 : Principales formations de la Région du Centre	21
Figure V-6 : Principales formations de la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO).....	23
Figure V-7 : Système structural du DCO	26
Figure VI-1 : démarche planifiée de la géophysique	30
Figure VI-2 : Comparaison des images ASTER et LandSat OLI 8 (NASA).....	33
Figure VI-3 : Localisation des sites retenus pour la géophysique.....	35
Figure VI-4 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 3.....	36
Figure VI-5 : Carte de fracturations du site de l'arrondissement 3	36
Figure VI-6 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 4.....	35
Figure VI-7 : Carte de fracturations du site de l'arrondissement 4	35
Figure VI-8 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 6.....	36
Figure VI-9 : Carte de fracturations du site de l'arrondissement 6	36
Figure VI-10 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 10.....	37
Figure VI-11 : Carte de fracturations du site de l'arrondissement 10	37
Figure VI-12 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 11.....	38
Figure VI-13 Carte de fracturations du site de l'arrondissement 11	38
Figure VI-14 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 12.....	39
Figure VI-15 : Carte de fracturations du site de l'arrondissement 12	39
Figure VI-16: déploiement du dispositif sur le terrain	41
Figure VI-17 : Interprétation géologique d'une section 2D de distribution de résistivité électrique	42
Figure VI-18 : Ellipse de polarisation dû à la présence d'un conducteur dans le champ magnétique.....	43
Figure VI-19 : Déploiement sur le terrain de l'équipement de tomographie de résistivité électrique (Syscal Switch Pro 72)	46

Figure VI-20 : Sections 2D de distribution de résistivité électrique obtenue après inversion des données brutes corrigées à l'aide du logiciel Res2DInv. (a) : Profil 1 ; (b) : profil 2.....	48
Figure VI-21 : carte de distribution de densité de courant du paramètre In-phase traduisant la distribution de la conductivité du sous-sol sur le site de l'arrondissement 4	49
Figure VI-22 : Modèles géologiques des deux sections inversées des profils 1 et 2 de l'arrondissement 4	51
Figure VI-23 : Coupes types de forages de Ouagadougou avec corrélations litho stratigraphiques (Ouandaogo-Yameogo, 2008).....	54
Figure VI-24 : Statistique des profondeurs de forages, épaisseur d'altération et profondeur de niveau statique des aquifères d'altération de la région du centre	57
Figure VI-25 : Distribution spatiale des profondeurs des forages des aquifères d'altération de la région du Centre	57
Figure VI-26 : Distribution spatiale des profondeurs de niveaux statiques des forages des aquifères d'altération de la région du Centre	58
Figure VI-27 : Statistique des profondeurs de forages, épaisseur d'altération et profondeur de niveau statique des aquifères de fracture de la région du centre	60
Figure VI-28 : Distribution spatiale des profondeurs des forages des aquifères de fracture de la région du Centre	60
Figure VI-29 : Distribution spatiale des épaisseurs d'altération des forages des aquifères de fracture de la région du Centre.....	61
Figure VI-30 : Distribution spatiale des profondeurs de niveaux statiques des forages des aquifères de fracture de la région du Centre.....	62
Figure VI-31 : Statistique des débits des aquifères d'altération de la région du centre.....	63
Figure VI-32 : Fréquence des classes de débits des aquifères d'altération de la région du centre.....	64
Figure VI-33 : Distribution spatiale des débits des forages des aquifères d'altération de la région du Centre ...	64
Figure VI-34 : Statistique des débits des aquifères de fracture de la région du centre	65
Figure VI-35 : Fréquence des classes de débits des aquifères de fracture de la région du centre	66
Figure VI-36 : Distribution spatiale des débits des forages des aquifères de fracture de la région du Centre	66
Figure VI-37 : Classification des débits spécifiques et transmissivité des forages de fracture de la région du Centre	67
Figure VI-38 : Distribution spatiale des débits spécifiques des forages des aquifères de fracture de la région du Centre.....	67
Figure VI-39 : Distribution spatiale des transmissivités des forages des aquifères de fracture de la région du Centre.....	68
Figure VI-40 : Statistiques des profondeurs de forage, épaisseur d'altération et niveau statique des aquifères de fracture de la CVO	69
Figure VI-41 : Distribution spatiale des profondeurs des forages de la CVO	70
Figure VI-42 : Distribution spatiale des épaisseurs d'altération des forages de la CVO	71

Figure VI-43 : Répartition spatiale des profondeurs de niveau statique de la CVO	72
Figure VI-44 : Statistiques des débits, des aquifères de fracture de la CVO	73
Figure VI-45 : Fréquence des classes de débits des forages de la CVO	74
Figure VI-46 Répartition spatiale des débits de forages de la CVO	74
Figure VI-47 : Valeurs moyennes et médianes des profondeurs de forages, épaisseurs d'altération et niveau des nappes des forages.....	75
Figure VI-48 : Statistiques des débits des forages	76
Figure VII-1 : Localisation des piézomètres du RPN de la région du Centre	77
Figure VII-2 : Exemple type du réseau piézométrique national actuel. Légende : 1 : cuirasse latéritique, 2 : aquifère superficiel dans les latérites, 3 : argiles latéritiques, 4 : arène grenue, 5 : aquifère profond dans la roche fissurée, 6 : roche saine, 7 : aquifère superficiel dans les alluvions ou aquifère alluvial (aquifère d'interfluve), TN : Terrain Naturel, G : Grand tube piézométrique, P : Petit tube piézométrique Centre.....	78
Figure VII-3 : Chroniques des profondeurs du niveau statique sur le site de Bassinko et de la pluviométrie mensuelle	79
Figure VII-4 : Chroniques des profondeurs du niveau statique sur le site de Silmissin et de la pluviométrie mensuelle	81
Figure VII-5 : Chroniques des profondeurs du niveau statique sur le site de Ouagadougou et de la pluviométrie mensuelle	82
Figure VII-6 : Localisation des piézomètres de l'ONEA sur l'étendue de la région du Centre	84
Figure VIII-1 : Spatialisation de la recharge bilantaire annuelle de la période 2014 à 2023	89
Figure VIII-2 : Graphique de la recharge bilantaire moyenne et maximale annuelle de la région du Centre pour la période 2014 à 2023	90
Figure VIII-3 : Répartition spatiale de la recharge bilantaire moyenne annuelle de 2014 à 2023	91
Figure IX-1 : Logigramme de la démarche méthodologique pour l'étude d'analyse multicritère (AMC) par la méthode AHP de Saati	93
Figure IX-2 : Carte de densité de drainage de la région du Centre.....	95
Figure IX-3 : Carte de densité de fracturation de la région du Centre	97
Figure IX-4 : Carte des types de sols de la région du Centre	98
Figure IX-5 : Carte d'occupation des sols de la région du Centre	99
Figure IX-6 : Carte des épaisseurs d'altération saturée de la région du Centre	100
Figure IX-7 : Carte géologique de la région du Centre	101
Figure IX-8 : Carte des taux de succès de la région du Centre	102
Figure IX-9 : Carte de la recharge de la région du Centre	103
Figure IX-10 : Carte des débits en fin de foration des forages de la région du Centre.....	104
Figure IX-11 : Carte des profondeurs totales des forages de la région du Centre.....	105
Figure IX-12 : Carte de potentialité de la ceinture verte	114

Figure IX-13 : Carte d'accessibilité de la ceinture verte.....	116
Figure IX-14 : Carte d'exploitabilité de la ceinture verte	117
Figure X-1 : Schéma de l'enchaînement des activités suivant les données.....	121
Figure X-2 : Localisation des forages de la DGRE dans la région du centre.....	122
Figure X-3 : Localisation des forages de la DREAE-C dans la région du centre.....	123
Figure X-4 : Localisation des forages du CTVD dans la commune de Ouagadougou.....	124
Figure X-5 : Localisation des forages collectés dans la documentation de la commune de Ouagadougou	125
Figure X-6 : Diagramme de Piper des analyses des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou	131
Figure X-7 : carte de l'indice de Ryznar des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou	133
Figure X-8 : Carte du pH des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou	136
Figure X-9 : carte de conductivité électrique des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou	137
Figure X-10 : carte de teneur en nitrates des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou	138
Figure XI-1 : Indice de vulnérabilité DRASTIC.....	145
Figure XI-2 : Vulnérabilité hydrogéologique.....	146
Figure XII-1 : Coins d'érosion hydrique et éolienne dans la CVO	148
Figure XII-2 : Illustration de quelques lieux de culture dans la CVO	150
Figure XII-3 : Coins de décharge sauvage dans la CVO.....	151
Figure XII-4 : Structures commerciales et sociales dans la CVO.....	152
Figure XII-5 : Activités artisanales et pollutions dans la CVO	153
Figure XII-6 : Illustration du couplage stations piézométriques et stations de qualité des eaux (Source : Rapport Étude technique préliminaire AEM 2022).....	154
Figure XII-7 : Illustration d'une gestion inadéquate des installations sanitaires dans la CVO.....	155

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III-1 : Températures moyennes relevées dans la ville de Ouaga de 1991 – 2020 (ACID, 2024a)	5
Tableau III-2 : Superficie (km ²) des types de sols dominants dans la commune de Ouagadougou (5-RGPH, 2002)	8
Tableau V-1 : terrains de la Région du Centre	20
Tableau V-2 : terrains de la Région du Centre	23
Tableau VI-1 : Linéaments et directions préférentielles pour les profils géophysiques	40
Tableau VI-2 : Coordonnées géographiques des profils EM-VLF levés	43
Tableau VI-3 : Coordonnées géographiques des profils de tomographie de résistivité électrique levés	44
Tableau VI-4 : Interprétation des données	50
Tableau VI-5 : Récapitulatif du modèle conceptuel	51
Tableau VI-6 : Résumé des données de forages à l'échelle de la région du centre	55
Tableau VI-7 : Profondeur des forages, épaisseur d'altération et profondeur de niveau statique des aquifères d'altération de la région du centre	56
Tableau VI-8 : Profondeur des forages, épaisseur d'altération et profondeur de niveau statique des aquifères de fracture de la région du centre	59
Tableau VI-9 : Classification des débits selon CIEH	62
Tableau VI-10 : Classification des transmissivités selon CIEH	63
Tableau VI-11 : Classification des débits spécifiques selon CIEH	63
Tableau VI-12 : Débit des aquifères d'altération de la région du centre	63
Tableau VI-13 : Débits, débits spécifiques et des transmissivités et coefficient d'emmagasinement des aquifères de fracture de la région du centre	65
Tableau VI-14 : Profondeur de forages, épaisseur d'altération et niveau statique des aquifères de fracture de la CVO	68
Tableau VI-15 : Débits, débits spécifiques et des transmissivités des aquifères de fracture de la CVO	72
Tableau VII-1 : Caractéristiques des piézomètres du RPN sur l'étendue de la région du Centre	78
Tableau VII-2 : Caractéristiques des piézomètres de l'ONEA sur l'étendue de la région du Centre	85
Tableau IX-1 : Listes des critères retenus pour la réalisation de l'étude de potentialités par l'analyse multicritères	94
Tableau IX-2 : Détails explicatifs sur la légende de la carte de drainage	95
Tableau IX-3 : Détails explicatifs sur la légende de la carte de fracturation	97
Tableau IX-4 : Détails explicatifs sur la légende de la carte des épaisseurs d'altération saturée	100
Tableau IX-5 : Détails explicatifs sur la légende de la carte de la géologie	101
Tableau IX-6 : Détails explicatifs sur la légende de la carte des taux de succès	102
Tableau IX-7 : Détails explicatifs sur la légende de la carte de recharge	103

Tableau IX-8 : Détails explicatifs sur la légende de la carte des débits en fin de foration.....	104
Tableau IX-9 : Détails explicatifs sur la légende de la carte des profondeurs totales.....	105
Tableau IX-10 : Échelle d'évaluation des différents paramètres vis-à-vis de la potentialité hydrogéologique (HAOUCHINE et al., 2010).	106
Tableau IX-11 : Récapitulatif de la standardisation des critères pour l'indicateur de potentialité (Haouchine et al., 2010; Saaty, 1977).....	107
Tableau IX-12 : Récapitulatif de la standardisation des critères pour l'indicateur d'accessibilité.....	108
Tableau IX-13 : Récapitulatif de la standardisation des critères pour l'indicateur d'exploitabilité	108
Tableau IX-14 : Échelle numérique de comparaison binaire (Saaty, 1984)	108
Tableau IX-15 : Valeur de l'Indice Aléatoire (IA) (Saaty, 1990)	110
Tableau IX-16 : Matrice de comparaison par paire des critères de l'indicateur de potentialité	111
Tableau IX-17 : Valeurs des vecteurs propres et coefficients de pondération	111
Tableau IX-18 : Valeurs de cohérence.....	112
Tableau IX-19 : Matrice de comparaison par paire des critères de l'indicateur d'accessibilité.....	112
Tableau IX-20 : Valeurs des vecteurs propres et coefficients de pondération pour l'indicateur d'accessibilité.	112
Tableau IX-21 : Matrice de comparaison par paire des critères de l'indicateur d'exploitabilité.	113
Tableau IX-22 : Valeurs des vecteurs propres et coefficients de pondération pour l'indicateur d'exploitabilité.....	113
Tableau IX-23 : Occupation par classes de potentialité de la ceinture verte	114
Tableau IX-24 : Occupation par classes d'accessibilité de la ceinture verte.....	116
Tableau IX-25 : Occupation par classes d'accessibilité de la ceinture verte.....	117
Tableau IX-26: Nombre de forages par classe de sensibilité avec la base de données OMES	118
Tableau X-1 : Récapitulatif des données collectées sur la qualité des eaux souterraines dans la région du Centre	121
Tableau X-2 : Ensemble des données collectées sur la qualité des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou	129
Tableau X-3 : Statistiques des paramètres physico-chimiques de tous les ouvrages.....	134
Tableau X-4 : Classification des eaux de boisson en fonction de la conductivité d'après Potelon et Zysman, (1993)	137
Tableau XI-1 : Classes, notes et poids attribués aux paramètres DRASTIC	141
Tableau XI-2 : Degrés de vulnérabilité selon l'indice DRASTIC (Mbuluyo et al., 2017)	142
Tableau XI-3 : Indices DRASTIC en pourcentage et vulnérabilité hydrogéologique	142
Tableau XII-1 : analyse des risques hydrochimiques.....	156

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AHP	Analyse hiérarchique
AMC	Analyse Multi Critère
BD-OMES	Base de Données des Ouvrages de Mobilisation des Eaux Souterraines
BEWACO	Base de données sur l'Eau et l'Environnement du Projet Bilan d'Eau
BUMIGEB	Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina
BUNASOL	Bureau National des Sols
CGLS	Copernicus Global Land Service
CHIRPS	Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations
CIEH	Comité Interafricain d'Études Hydrauliques
Cp	Coefficient de Pondération
CTVD	Centre de Traitement et de Valorisation des Déchets
CVO	Ceinture Verte de Ouagadougou
DEIE	Direction des Études et de l'Information sur l'Eau
DGRE	Direction Générale des Ressources en Eau
DREAE-C	Direction Régionale de l'Eau et l'Assainissement, de l'Environnement du centre
ETR	Evapotranspiration Réelle
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FLDAS	Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System
HWSD	Harmonized World Soil Database
IA	Indice Aléatoire
IDV	Indice de vulnérabilité
km	kilomètre
km/km²	kilomètre par kilomètre carré
m	mètre
mm	millimètre
N	Nord
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
PLU	Plans Locaux d'Urbanisation
PGRE	Plan de Gestion des Ressources en Eau
Rc	Ratio de Cohérence
RFU	Réserve Facilement Utilisable
RPN	Réseau Piézométrique National
SCT	Schémas de Cohérence Territoriale
SDAGO	Schémas Directeur d'Aménagement du « Grand Ouaga »
U	Unité
UTM	Universal Transverse Mercator
Vp	Vecteur propre
WGS	World Geodetic System
WTF	Water Table Fluctuation

INTRODUCTION

Centre administratif, culturel, économique et social du Burkina Faso, Ouagadougou est une mégapole grandissante qui concentre 10 % de la population totale du pays (environ 2.8 millions d'habitants) sur une superficie d'environ 219 km². La densité actuelle de sa population est de 1025 habitants/km² soit 20 fois la moyenne ouest Africaine qui est de 50 habitants/km² (Courtin F., and Guengant J.P, 2011) un « très gros surpeuplement » qui serait engendré par (i) la fuite vers le centre du pays des populations du Sahel après les sécheresses des années 1970 (Gallais, 1977), (ii) la péjoration climatique rendant inculte les sols et terres des zones sahéliennes, (iii) le retour forcé de la Côte d'Ivoire de milliers de rapatriés Burkinabè (Courtin *et al.*, 2011), et plus récemment depuis 2015, la migration de populations jadis rurales des zones du Nord et de l'Est durablement touchées par les conflits djihadistes/terroristes vers le centre du pays. Malheureusement cette migration vers le centre du pays, et la capitale en particulier a entraîné un développement spatial anarchique du territoire, l'éclosion et le développement croissant des quartiers périurbains, où la population se dispute les espaces habitables et commerciaux. À ce jour, ces quartiers non viabilisés communément appelés « non lotis » qui jouxtent les pourtours de la ville sont les nids de toutes formes de précarités notamment le logement, d'accès à des soins de santé efficaces, alimentation, l'assainissement collectif/individuel, l'emploi, etc. D'après Conchita M. G. Kêdowidé., (2010), sur le plan de l'alimentation, l'agriculture irriguée périurbaine ou urbaine reste une activité capable de contribuer à l'auto-emploi et l'insertion des groupes sociaux désœuvrés et, à l'atteinte de la sécurité alimentaire et nutritionnelle. À cet effet l'adoption du décret N° 99-270/PRES/PM/MIHU/MATS/MEE/MEF du 28 juillet 1999, relatif au schéma directeur d'aménagement du « Grand Ouaga » (SDAGO), est une volonté affichée du gouvernement à donner une place à l'agriculture dans le paysage périurbain de sa capitale. Le SDAGO a donné les grandes orientations des aménagements dans la capitale, les différents plans locaux d'urbanisation (PLU) ou les Schémas de Cohérence Territoriale (SCOT). Dans ce contexte, la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO), une initiative écologique entamée depuis les années 1976 est l'objet de grands engouements et d'intérêts majeurs. Sa revitalisation et revalorisation restent des enjeux importants pour la préservation du milieu naturel, la réduction des effets de chaleur, la protection des sols et la biodiversité et un espace privilégié pour la promotion de l'agriculture irriguée urbaine et périurbaine. Dans cette perspective, le Ministère de l'Environnement, de l'Eau et de l'Assainissement, envisage faire de la zone de la CVO un « agro-espace vivant » pour la promotion d'une agriculture urbaine/périurbaine durable, et améliorer la qualité de vie des populations. Malheureusement, la connaissance des potentialités en eau de cette CVO pour soutenir des activités d'irrigation reste précaire, limitée et insuffisante.

CADRE DE L'INTERVENTION

I.1. Contexte et Justification

La ceinture verte de Ouagadougou, une initiative écologique au Burkina Faso, a été pratiquement abandonnée mais connaît un renouveau depuis 2018. Elle joue un rôle crucial dans la protection de la capitale contre les effets néfastes de la désertification et de la dégradation environnementale.

La ceinture verte de Ouagadougou a été lancée en 1976 dans le but de protéger la ville du vent, de l'érosion et de la poussière. Elle agit comme un bouclier écologique grâce au reboisement et à la préservation des milieux naturels. Elle offre un espace de cultures maraîchères et permet aux femmes de subvenir à leurs besoins sans mendier. Les arbres et les cultures contribuent à la régulation du climat, à la protection des sols et à la biodiversité.

Face à la désertification, la ceinture verte est un outil précieux pour la ville de Ouagadougou. Cependant, elle doit faire face aux implantations informelles et aux défis sécuritaires. La ceinture verte de Ouagadougou est un projet d'envergure où l'eau et la végétation sont des atouts essentiels. Plus qu'un projet de reboisement, elle incarne la résilience, la paix et le développement durable pour la capitale burkinabè.

Dans cette perspective, le Ministère de l'Environnement, de l'Eau et de l'Assainissement, envisage d'améliorer la ceinture verte dans le but de promouvoir la durabilité environnementale et améliorer la qualité de vie des populations. Cependant, la gestion efficace de l'eau pour ce projet est entravée par une connaissance insuffisante des ressources en eau souterraine et de surface.

Dans le cadre de l'aménagement de la ceinture verte, le MEEA bénéficie de l'accompagnement de l'Ambassade du Royaume des Pays-Bas au Burkina Faso pour soutenir une étude hydrologique et hydrogéologique afin de combler cette lacune de connaissances, essentielle à la planification et à la mise en œuvre efficace des aménagements projetés.

I.2. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les ressources en eau souterraine et de surface dans la zone de la ceinture verte de Ouagadougou afin de guider les efforts d'aménagement et de gestion durable de cette zone.

Plus spécifiquement cette étude vise à :

- évaluer le potentiel hydrogéologique et les risques de pollution des aquifères de la ceinture verte ;
- évaluer le potentiel en eau de surface de la ceinture verte ;
- proposer des options d'aménagements assortis d'un plan de gestion des ressources en eau (PGRE).

I.3. Résultats attendus

Aux termes de l'étude, les résultats suivants sont escomptés :

- Le potentiel hydrogéologique et les risques de pollution des aquifères de la ceinture sont connus ;
- Le potentiel en eau de surface de la ceinture verte est connu ;
- Des propositions d'aménagements assorties d'un plan de gestion des ressources en eau (PGRE) sont proposées.

PHYSIOGRAPHIE DE LA ZONE D'ÉTUDE

I.1. Localisation et cadre administratif de la zone d'étude

La Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO) est un espace périphérique boisé mis en place autour de la commune de Ouagadougou dans les années 1970, avec le soutien de la coopération allemande. Elle a été initiée en 1974 et sa mise en œuvre a réellement commencé en 1976. Son objectif principal était de constituer un rempart écologique autour de la capitale, en luttant contre l'avancée du désert, en filtrant les poussières atmosphériques et en réduisant l'érosion et le ruissellement vers les barrages urbains (Sana, 2001).

Initialement prévue sur une superficie de 2 100 hectares, la Ceinture Verte s'étendait sur une bande de 500 mètres de large, sur environ 21 kilomètres de longueur, allant du nord-est (Kossodo) vers l'ouest de la ville de Ouagadougou (axe Ouagadougou-Bobo). Entre 1976 et 1986, environ 1 032 hectares ont été reboisés, avec la plantation d'environ 500 000 arbres (Barro, 2024).

En termes de coordonnées géographiques, la commune de Ouagadougou entourée par la CVO se situe entre les latitudes 12°15' et 12°30' Nord, et les longitudes 1°23' et 1°45' Ouest. Elle est limitée au nord par les communes rurales de Pabré et de Loumbila, à l'est par celle de Saaba, au sud par celles de Koubri et de Komsilga et enfin à l'ouest par la commune rurale de Tanghin-Dassouri (voir Figure 0-1).

Sur le plan administratif, la Ceinture Verte traverse plusieurs arrondissements de la ville de Ouagadougou, principalement les arrondissements 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12. Elle couvre plusieurs secteurs, à l'exception notable des arrondissements 1, 2 et 5 qui ne sont pas directement traversés. Elle comprend à la fois une partie aménagée (5 districts) et une partie non aménagée (4 districts), bien que la forte urbanisation ait entraîné l'envahissement progressif de nombreuses zones par des lotissements et des constructions spontanées.

La partie aménagée est constituée de cinq districts subdivisés en parcelles :

- Le district I de 188,1 ha allant de la route Ouaga-Kaya à la route reliant la digue du barrage n°2 de Kamboinsé ;
- Le district II de 226,4 ha allant de la route reliant la digue du barrage n°2 de Kamboinsé à la route Ouaga-Koungoussi ;
- Le district III de 337,3 ha qui va de la route Ouaga-Koungoussi à la route Ouagadougou-Ouahigouya ;
- Le district IV de 130,6 ha est situé entre la route Ouaga-Ouahigouya et le chemin de fer Ouaga-Bobo et ;
- Le district V qui est compris entre le chemin de fer Ouaga-Bobo et la route Ouaga-bobo avec une superficie est 126,3 ha.

La partie non aménagée (PNA) de la CVO est composée de quatre districts qui sont :

- Le district VI qui va de la route Ouaga-Bobo à la route Ouaga-Léo,
- Le district VII qui va de la route Ouaga-Léo à la route Ouaga-Pô,
- Le district VIII qui va de la route Ouaga-Pô à la route Ouagadougou-Fada,
- Le district IX qui se situe entre la route Ouagadougou-Fada et la route Ouaga-Kaya (DAPEU, 2009).

Malgré son rôle stratégique en matière de résilience environnementale et d'aménagement urbain, la Ceinture Verte de Ouagadougou ne bénéficie d'aucun statut juridique formel. Elle n'a été ni classée ni inscrite au cadastre, ce qui constitue un obstacle majeur à sa préservation et à sa gestion durable.

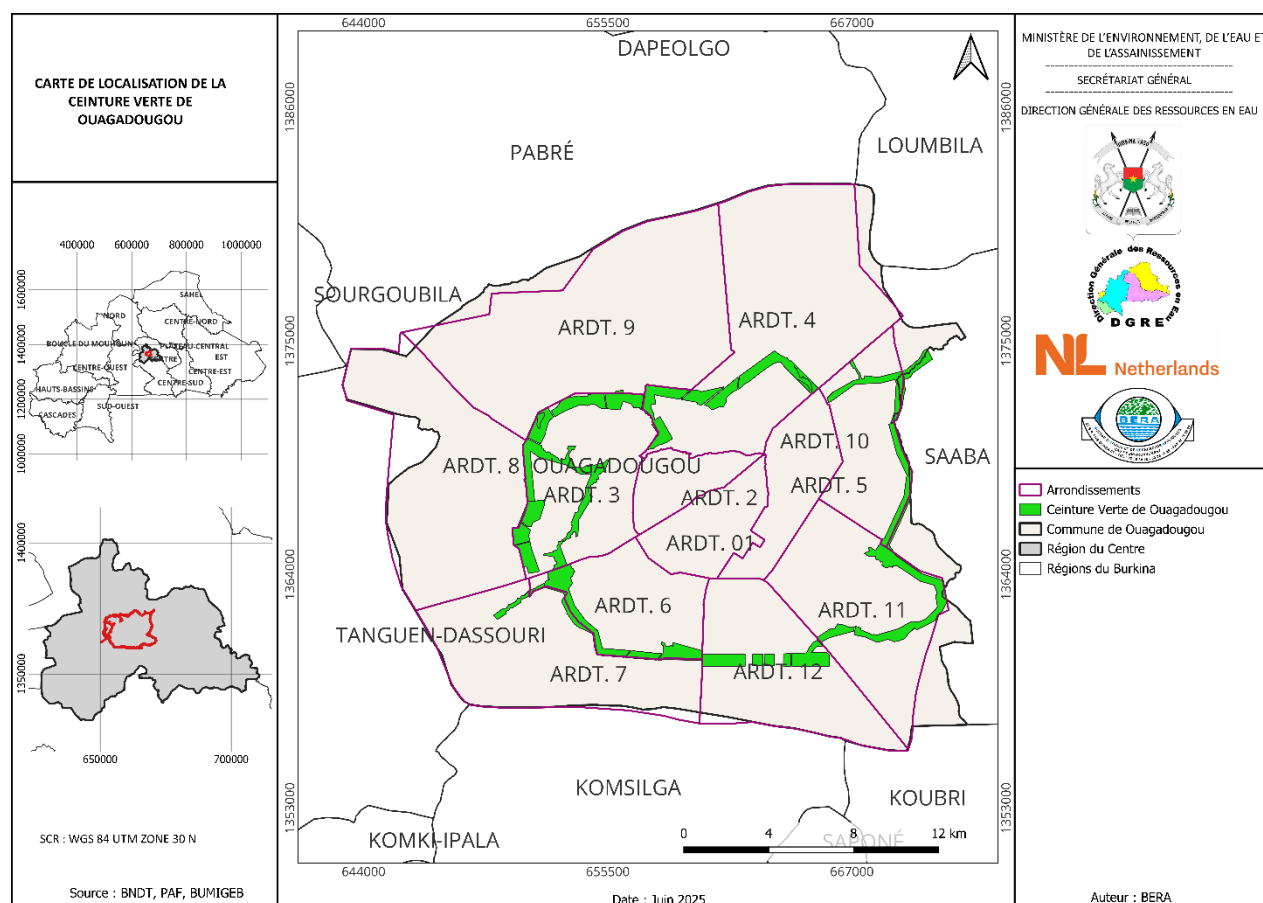


Figure 0-1 : Localisation de la Ceinture verte de Ouagadougou

1.2. Contexte climatique

La Ceinture Verte de Ouagadougou, comme son nom l'indique, entoure l'agglomération urbaine de Ouagadougou. Elle est située en zone soudano-sahélienne, caractérisée par un climat tropical sec avec deux saisons bien distinctes : une saison des pluies courte, s'étendant de mai-juin à septembre (4 à 5 mois), et une longue saison sèche qui dure le reste de l'année (7 à 8 mois).

L'analyse des données climatiques issues de la station synoptique de Ouagadougou, sur la période 1990–2023, révèle une pluviométrie annuelle oscillant entre 518,3 mm et 1003 mm, avec une moyenne interannuelle de 789,6 mm. Une variabilité interannuelle marquée est observée, avec une tendance générale à la diminution des précipitations entre 1990 et 2007, suivie d'une tendance haussière entre 2008 et 2023. Cette évolution est représentée dans la Figure 0-2.

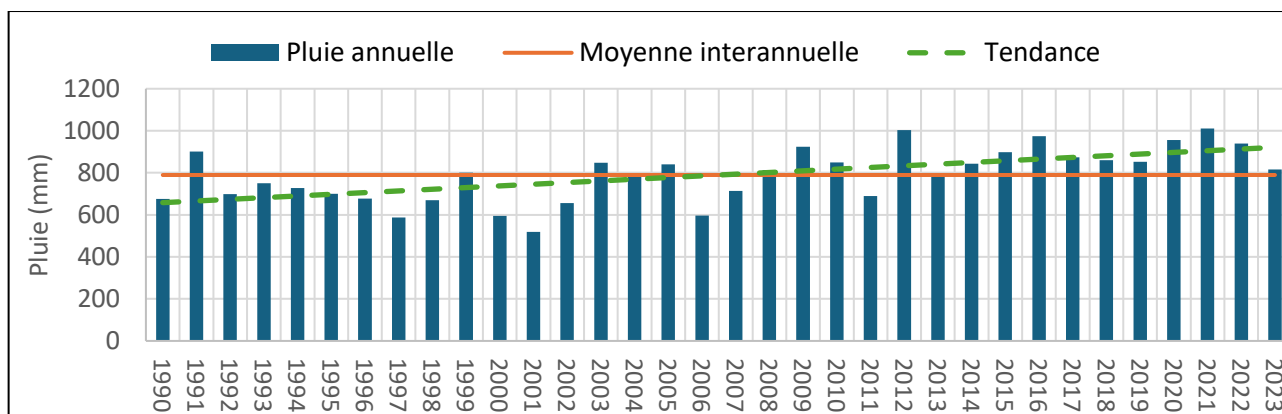


Figure 0-2 : Évolution des pluies annuelles à la station de Ouagadougou

L'étude de l'évaporation interannuelle, toujours sur la période 1990–2023, met en évidence une relative stabilité jusqu'en 2010, avec deux baisses notables enregistrées en 1994 et 2010. Toutefois, une baisse significative est observée entre 2020 et 2023. Ce constat souligne l'importance d'intégrer les processus d'évaporation et d'évapotranspiration dans toute approche de gestion durable des ressources en eau dans la zone d'étude (Voir Figure 0-3).

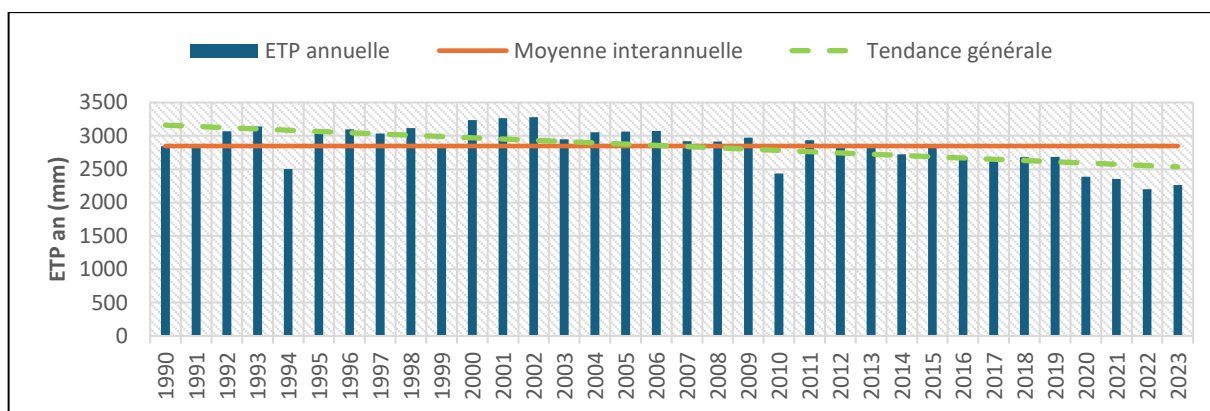


Figure 0-3 : Chronique des ETP annuelles 1990 - 2023

Les températures de la zone sont fortement influencées par la saisonnalité. Les extrêmes varient de 19 °C à 36 °C, pour une moyenne annuelle avoisinant 34,4 °C, comme le précise le tableau ci-après (tableau III-1).

Tableau 0-1 : Températures moyennes relevées dans la ville de Ouaga de 1991 – 2020 (ACID, 2024a)

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
Min (°C)	17,1	20	24,3	27,4	27,1	25,1	23,4	22,9	23,1	23,9	20,4	17,5	22,7
Max (°C)	33,5	36,5	39,3	40	38,4	35,6	32,9	31,6	33,1	36	36,7	34,4	35,7
Moy (°C)	25,3	28,2	31,8	33,7	32,8	30,4	28,2	27,2	28,1	30	28,6	26	29,1

1.3. Hydrographie

La commune de Ouagadougou est située majoritairement dans le bassin versant de la rivière Massili, dont le régime hydrologique joue un rôle central dans la dynamique des écoulements de surface de la ville. Le sens général d'écoulement des eaux pluviales est orienté du sud vers le nord, traversant plusieurs zones urbaines à travers un réseau hydrographique composé à la fois de marigots aménagés et non aménagés.

La Ceinture Verte de Ouagadougou est en grande partie drainée par le bassin versant du marigot Kadiogo, qui constitue un sous-bassin du bassin principal de la rivière Massili. Ce système est alimenté par plusieurs affluents qui sillonnent la Ceinture Verte et assurent l'évacuation des eaux vers la rivière Massili, notamment sur sa rive droite. Un second sous-bassin plus réduit draine la partie sud de la Ceinture Verte et contribue également à l'alimentation du réseau hydrographique global de la zone.

En saison des pluies, les plans d'eau de la Ceinture Verte sont essentiellement alimentés par les écoulements de surface issus des cours d'eau principaux des deux sous-bassins, ainsi que par des infrastructures hydrauliques telles que des barrages et des boulis aménagés localement. Dans le sous-bassin du marigot Kadiogo, on recense cinq plans d'eau permanents ou semi-permanents constitués par les barrages de Boulmiougou, ainsi que les barrages n°1, n°2 et n°3 de Ouagadougou. Ces infrastructures hydrauliques jouent un rôle crucial dans la régulation des eaux de surface et, pour certains (notamment les barrages n°1 et n°2), dans l'alimentation en eau potable de la ville (Commune de Ouagadougou, 2022).

Dans le second sous-bassin versant, un petit affluent en rive droite de la rivière Massili, les plans d'eau sont constitués principalement par le marigot central et trois boulis localisés à Sogdin, Widtenga et Yamtenga. Ces plans d'eau, de nature temporaire, ne persistent généralement pas au-delà du mois de février, en raison de l'assèchement progressif après la saison des pluies.

La Ceinture Verte est également traversée par plusieurs marigots, comme le marigot non aménagé de Tanghin et de Goundrin, conservent un rôle de drainage naturel. L'ensemble de ces cours d'eau contribue à l'évacuation des eaux de ruissellement issues de l'agglomération, notamment dans un contexte où l'urbanisation croissante accroît la pression sur les ressources hydriques et les capacités de drainage. Le fonctionnement hydrologique de la Ceinture Verte repose sur une combinaison de réseaux naturels et d'ouvrages anthropiques, qui interagissent pour assurer l'évacuation des eaux pluviales, la rétention temporaire ou permanente des volumes d'eau, et, dans certains cas, l'approvisionnement en eau potable.

I.4. Géomorphologie

Selon l'étude morphopédologique de la province du Kadiogo réalisée par le BUNASOLS (1998), il est établi cinq (5) grandes unités géomorphologiques que sont : le relief résiduel, le système de glacis subdivisé en pente supérieure, moyenne et inférieure, les terrasses alluviales et bas-fond :

- Le relief résiduel : il comprend l'ensemble des buttes et des plateaux cuirassés. Il est principalement localisé dans la partie sur de la Ceinture Verte constituant la partie la plus élevée du site étudié où prennent naissance les grands canaux d'évacuation des eaux de pluie de la ville. Par ailleurs, les cuirasses affleurent sous forme de dalle continue, recouverte parfois d'une mince couche de gravillons que l'on rencontre surtout dans les arrondissements n°3 et 4 ;
- Le glacis haut de pente : il fait suite au relief résiduel. Il se présente sous forme de versant avec des pentes convexes. Il constitue aussi avec le précédent des sommets d'interfluve. Sa surface est quelques fois recouverte de graviers ferrugineux ou même de cuirasses affleurantes. Il est également rencontré dans les arrondissements n° 3 et 4 ;
- Le glacis pente moyenne : ce sont des versants ou les flancs des interfluvés à pentes linéaires ou droites, généralement situés entre le glacis haut de pente et le glacis pente inférieure. Il est

peu marqué dans le site d'étude par sa position physiographique, mais tout de même remarqué dans l'arrondissement n°12 ;

- Le glacis pente inférieure : il présente un profil topographie concave, de pente faible, remontant légèrement vers l'amont où il se raccroche au précédent. Il laisse souvent entrevoir quelques plages de cuirasse ferrugineuses aux abords immédiats des cours d'eau (Arrondissement n°3). La rupture de pente avec le lit majeur du cours d'eau est parfois bien marquée ;
- Les terrasses alluviales et bas-fond : ce sont les fonds des petites vallées pouvant renfermer ou non des remblaiements colluviaux ou argileux provenant des versants (sud de l'arrondissement n°4 et amont du barrage de Boulmiougou dans l'arrondissement n°6). C'est dans ces zones que la production maraîchère est plus développée.

I.5. Relief et Topographie

Le milieu physique est un facteur qui permet de comprendre ou d'expliquer l'implantation et/ou la concentration des populations dans certaines zones. La commune urbaine de Ouagadougou à laquelle appartient la CVO se caractérise par un ensemble de terrains plats et par une absence de points élevés. Elle fait partie de la vaste pénéplaine de la région du Centre dont les altitudes varient entre 300 et 350 m. Elle se caractérise surtout par des pentes faibles qui varient entre 0,5 et 1% (PSAGEV, 2022; Sana, 2001).

Sur le plan géomorphologique, la commune de Ouagadougou fait partie du vieil ensemble cristallophyllien d'âge antécambrien, aplani et recouvert d'un manteau assez continu, mais d'épaisseurs irrégulières d'altérités, de cuirasses et de dépôts détritiques (PSAGEV, 2022). La topographie du territoire présente un relief faiblement ondulé avec pour principaux modelés, des glacis d'érosion entaillés par un réseau hydrographique assez dense, faiblement encaissé et en grande partie à écoulement saisonnier (Ouandaogo/Yameogo, 2008). Le substratum d'ensemble est constitué en grande partie de migmatites et de granites indifférenciés.

I.6. Sols et végétation

Les sols sur lesquels repose la commune de Ouagadougou sont de cinq types (tableau III-2) mais tous sont peu profonds et pauvres en éléments nutritifs. Ils sont de types ferrugineux tropicaux lessivés, développés sur des matériaux sableux, sablo-argileux ou argileux. Ils sont très riches en oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse. Ce qui leur donne une couleur rougeâtre. Ces sols se caractérisent aussi par leur faible teneur en potassium, phosphore, avec une structure fragile très sensible à l'érosion (5-RGPH, 2002).

Tableau 0-2 : Superficie (km²) des types de sols dominants dans la commune de Ouagadougou (5-RGPH, 2002)

Type de sols	Sols ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes	Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés moyennement profonds	Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés peu profonds	Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés superficiels	Sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et à concrétions	Sols Hydromorphes peu humifères à pseudogley de surface	Lithosols sur cuirasse ou sur roche	Sols Peu évolués d'apport alluvial, hydromorphes
Superficie (km ²)	15,51	113,52	137,05	0,19	60,81	30,23	26,1	0,01

La formation végétale initiale de la commune urbaine de Ouagadougou a presque disparu du fait de l'intense exploitation de l'espace à des fins agricoles et d'habitation. Seules les espèces telles que le karité, le raisinier, le manguier, l'eucalyptus, la pomme d'acajou, le caïlcédrat ont été conservées ou plantées à l'intérieur ou aux alentours des concessions le long des rues (5-RGPH, 2002).

La Ceinture Verte, créée avant la période révolutionnaire (1983-1987) pour jouer un rôle de barrière écologique contre les vents, les poussières et l'érosion, était à l'origine constituée de végétation soudano-sahélienne avec des arbres comme *Vitellaria paradoxa* (karité), *Adansonia digitata* (baobab) et *Acacia sp.* Elle a été renforcée entre 1976 et 1986 par la plantation d'environ 500 000 arbres. Des actions complémentaires ont été menées jusqu'en 1990, avant l'arrêt du projet pour manque de financement (5-RGPH, 2002; ACID, 2024a). Cependant, la forte pression anthropique (habitats spontanés, exploitation des ressources, surpâturage) a conduit à une dégradation avancée de la végétation et à l'érosion de la biodiversité. De nombreuses espèces indigènes ont disparu, remplacées par des espèces exotiques lors des reboisements, entraînant une altération profonde de l'écosystème naturel de la Ceinture Verte.

1.7. Activités socio-économiques

La Ceinture Verte de Ouagadougou accueille plusieurs activités socio-économiques, bien que sa vocation initiale soit écologique. Parmi celles-ci, l'agriculture urbaine occupe une place prépondérante, notamment le maraîchage pratiqué autour des plans d'eau. Cette activité, portée en grande partie par des femmes et des jeunes, contribue à la sécurité alimentaire et à la génération de revenus locaux (Ouedraogo et al., 2019).

L'élevage extensif est également présent, bien que souvent non contrôlé. Le pâturage, notamment des petits ruminants, participe à la pression sur la végétation. En parallèle, la collecte de bois, de sable et d'autres ressources naturelles est fréquente et représente une source de revenus pour certaines populations, mais contribue à la dégradation de l'environnement.

On observe aussi une prolifération d'activités artisanales et commerciales informelles. Des garages, ateliers, kiosques et lieux de lavage de véhicules s'installent progressivement dans certaines portions de la Ceinture Verte, entraînant l'occupation et la fragmentation de l'espace (ACID, 2024b; Barro, 2024).

Par ailleurs, l'urbanisation rapide de la ville a favorisé l'émergence d'habitats spontanés et de lotissements au sein de la Ceinture Verte, réduisant considérablement sa couverture végétale et ses fonctions écologiques.

Face à ces enjeux, quelques initiatives de revalorisation ont vu le jour, visant à encadrer les activités économiques tout en promouvant la restauration écologique. Elles s'appuient notamment sur le développement d'emplois verts et l'agroforesterie durable, avec l'appui de partenaires techniques et financiers.

DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE D'ÉVALUATION DES POTENTIALITÉS EN EAU SOUTERRAINE

I.8. Approche planifiée

L'évaluation des potentialités en ressources en eau est une tâche importante pour la gestion de l'eau à l'échelle locale, régionale et nationale. La méthodologie adoptée dans le cadre de cette étude repose sur une approche intégrée et systémique, combinant l'analyse des contextes géologique, hydrogéologique, hydrochimique et environnemental de la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO). Elle vise à évaluer les potentialités en eau souterraine, leur dynamique, leur qualité, leur vulnérabilité ainsi que les risques de pollution, en lien avec les usages agroécologiques et les aménagements paysagers en milieu périurbain sahélien. La démarche se décline selon les étapes ci-après :

1. Analyse du contexte géologique et structural

Cette phase permet de caractériser l'architecture géologique de la zone d'étude à partir :

- des données cartographiques géologiques à différentes échelles (feuille du Degré Carré de Ouagadougou) ;
- de la description des formations lithologiques et structurales de la région du Centre et de la CVO ;
- de l'étude du cadre tectonique local et régional.

Ces éléments sont essentiels pour comprendre les structures de contrôle des écoulements souterrains et la géométrie des aquifères.

2. Caractérisation hydrogéologique des aquifères

Cette étape vise à :

- inventorier les ouvrages hydrauliques existants (forages, piézomètres) et capitaliser les données disponibles ;
- analyser la nature des aquifères (fracturés, altérites), leur géométrie (profondeur, niveau statique, épaisseur saturée) et leurs paramètres hydrodynamiques (transmissivité, débit, débits spécifiques, coefficients d'emménagement) ;
- dresser une synthèse hydrogéologique spatialisée de la zone d'étude.

3. Suivi et dynamique des eaux souterraines

Cette phase comprend :

- le suivi de la piézométrie dans les sites ;
- l'analyse des fluctuations temporelles des niveaux d'eau pour identifier les périodes de recharge et d'étiage ;
- la mise en évidence des tendances saisonnières et interannuelles de l'évolution des nappes.

4. Estimation de la recharge des nappes

Une approche bilantaire spatialisée, basée sur les paramètres climatiques et hydrologiques (pluviométrie, évapotranspiration, infiltration) pour l'estimation de la recharge de nappes souterraines.

5. Évaluation du potentiel en eau souterraine (Analyse Multicritère - AMC)

Cette étape intègre :

- la sélection et la hiérarchisation de plusieurs critères hydrogéologiques et environnementaux (densité de drainage, taux de succès des forages, épaisseur d'altération, recharge, etc.) ;
- la standardisation et la pondération des critères pour générer trois indicateurs clés : potentialité, accessibilité, et exploitabilité ;
- la production de cartes thématiques et la validation des résultats par confrontation avec les données de terrain.

6. Analyse de la qualité des eaux souterraines (hydrochimie)

Cette analyse repose sur :

- la collecte, la vérification et l'analyse des données issues des institutions techniques (DGRE, DREAE, CVTD, etc.) ;
- la classification des eaux (diagrammes de Piper, indice de Ryznar, balance ionique) ;
- l'interprétation spatiale des teneurs en éléments physico-chimiques ;
- l'évaluation de l'aptitude des eaux aux différents usages (irrigation, consommation, etc.).

7. Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères

La méthode DRASTIC est utilisée pour cartographier la vulnérabilité des eaux souterraines en intégrant les facteurs physiques influençant la sensibilité à la pollution (profondeur de la nappe, type d'aquifère, recharge, sol, pente, etc.).

8. Analyse des risques de pollution

Cette dernière phase vise à :

- caractériser les sources de pollution naturelles (géologie, climat, érosion) et anthropiques (agriculture, rejets urbains et industriels) potentielles ;
- évaluer les risques hydrochimiques potentiels en fonction de l'occupation du sol et des pratiques locales ;
- proposer des mesures de prévention, de protection et d'atténuation adaptées au contexte périurbain sahélien.

Cette approche méthodologique structurée permet d'intégrer les dimensions physiques, chimiques et sociales liées à l'eau, et de formuler des recommandations pertinentes pour la gestion durable des ressources hydriques dans la Ceinture Verte de Ouagadougou.

L'organigramme ci-dessous est une synthèse de l'approche méthodologique de l'étude.

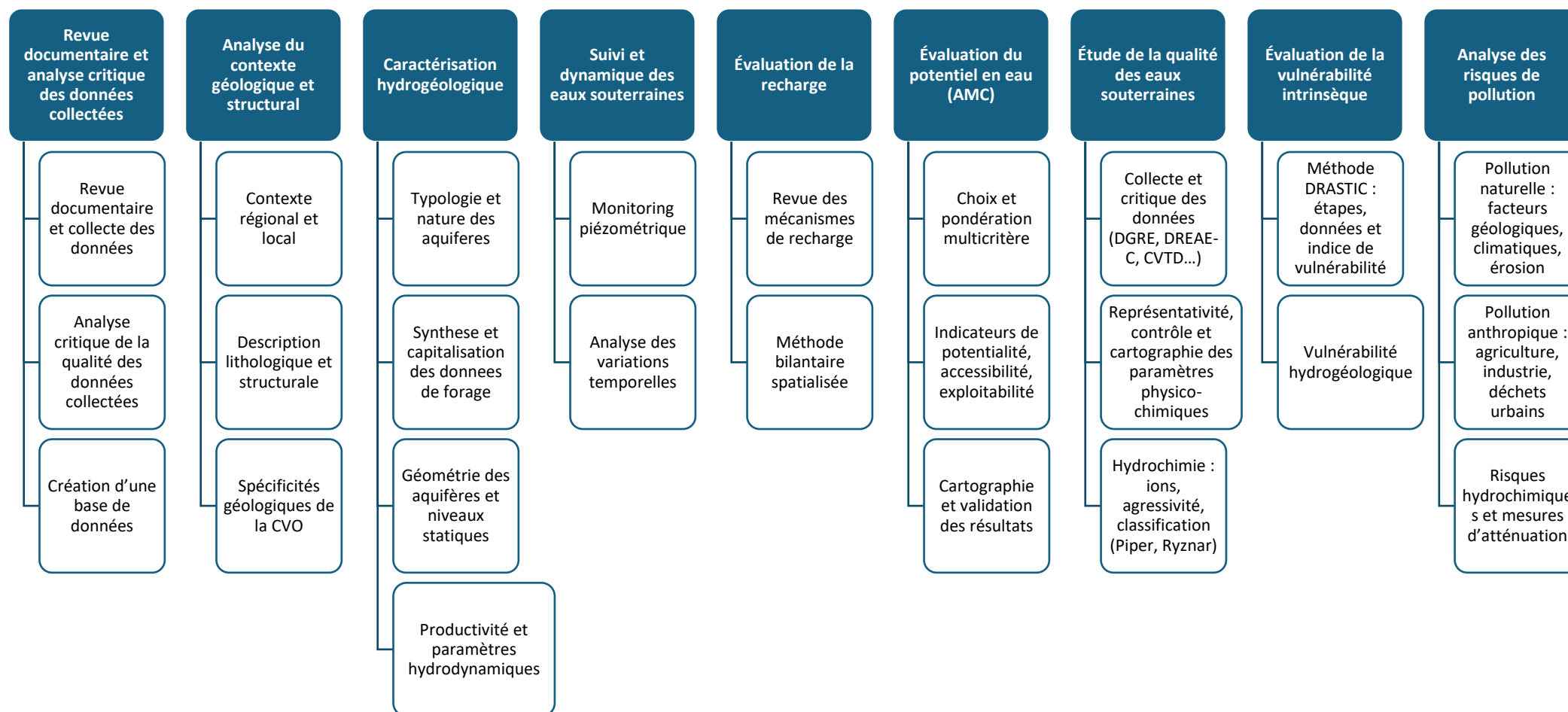


Figure 0-1 : Approche conceptuelle de la mission

I.9. Organisation de la mission

L'exécution de l'étude hydrogéologique et hydrologique de la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO) s'est appuyée sur une organisation rigoureuse et progressive, combinant revue documentaire, mobilisation des parties prenantes et mise en œuvre d'activités de terrain. Cette démarche intégrée visait à garantir la fiabilité des résultats, la cohérence méthodologique et l'appropriation des actions par les acteurs locaux.

En amont de toute intervention, une revue bibliographique détaillée a été conduite. Elle a porté sur l'ensemble de la documentation administrative, technique et scientifique disponible en lien avec les ressources en eau dans la zone d'étude. Les thématiques analysées incluent notamment l'hydrogéophysique, la climatologie, la géologie et la tectonique, l'hydrogéologie, les caractéristiques des forages existants, la qualité chimique des eaux, les risques de pollution et les dispositifs de gestion des ouvrages hydrauliques. Cette phase de capitalisation a permis d'identifier les données disponibles, d'évaluer leur pertinence et leur fiabilité, et de cibler les besoins en informations complémentaires devant faire l'objet d'une collecte des données sur le terrain.

Pour compléter ces informations, des lettres officielles ont été envoyées aux structures détentrices de données techniques pertinentes, notamment les directions régionales en charge de l'eau, de l'environnement, de l'agriculture, de l'assainissement, les services techniques communaux, les centres de recherche, les universités et autres acteurs institutionnels concernés. Cette démarche a permis de collecter un ensemble substantiel de données géoréférencées : cartes géologiques et structurales, fiches de forages, séries piézométriques, résultats d'analyses hydrochimiques, données climatiques et documents d'études antérieures. Ces éléments ont nourri la base d'analyse de l'étude. Des données complémentaires sur la géologie du pays ont été acquises auprès du Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina Faso.

Dans un souci de concertation et de transparence, plusieurs rencontres techniques ont été organisées avec les parties prenantes et tierces.

- Une réunion de démarrage a permis de présenter les objectifs, les résultats attendus et le périmètre d'intervention de l'étude.
- Une réunion de cadrage méthodologique a ensuite été tenue afin de valider les choix techniques, préciser les données disponibles, et affiner les priorités de terrain.
- une réunion d'avancement a été réalisée pour faire le point sur l'état de mise en œuvre, partager les premiers constats et intégrer les retours techniques et institutionnels.
- Enfin plusieurs rencontres d'échanges, de collectes de données et de participations à des ateliers sur des études en cours sur la CVO ont été initiés auprès des DREAE, l'ONEA, les mairies d'arrondissement concernées, les représentants de la société civile, les directions générales de l'environnement, de la pêche, etc...

Cette dynamique collaborative a favorisé une bonne coordination interinstitutionnelle et une appropriation partagée des enjeux liés à l'eau dans la Ceinture Verte.

Les activités de terrain se sont déroulées en deux volets principaux. Dans un premier temps, des visites de reconnaissance ont été effectuées sur les sites sélectionnés pour les campagnes de prospection géophysique. Ces visites avaient pour objectifs de vérifier l'accessibilité physique des sites, leur

représentativité géologique et leur pertinence par rapport aux objectifs de l'étude. Dans un second temps, les campagnes de prospection géophysique proprement dites ont été menées, utilisant des méthodes non destructives, principalement la tomographie de résistivité électrique et l'électromagnétisme très basse fréquence, pour caractériser les structures souterraines.

Dans l'ensemble, l'organisation de cette mission témoigne d'une planification méthodique rigoureuse, d'une mobilisation efficiente des ressources, et d'une articulation fluide entre les dimensions scientifique, institutionnelle et opérationnelle. Ce dispositif garantit la qualité des données collectées et constitue une base solide pour les analyses ultérieures et l'élaboration de recommandations pertinentes pour une gestion durable des ressources en eau de la Ceinture Verte de Ouagadougou.

SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES GÉOLOGIQUES ET STRUCTURALES

La synthèse des connaissances géologiques et structurales vise à rassembler les informations géologiques et structurales disponibles en vue d'une description du milieu et ses caractéristiques qui conditionnent les ressources en eau souterraine de la zone de la Ceinture verte. Ces informations se retrouvent dans les différents rapports produits dans le cadre de projets et programmes antérieurs, les rapports d'études et thèses, les cartes et leurs notices explicatives.

La géologie et l'hydrogéologie du Burkina Faso ont fait l'objet de plusieurs travaux d'instituts (BRGM, BUMIGEB, CIEH, 2iE...), de projets (SYSMIN, PADSEM, Bilan d'Eau, etc.), et de recherches académiques (thèses et mémoires d'études). Plus d'une centaine d'ouvrages et de cartes avec notices sont donc disponibles, accompagnés de références bibliographiques fournies. On peut mettre en relief les travaux suivants :

Une carte géologique du centre et du Nord du Burkina Faso a été proposée par J. Ducellier (1963). Ses travaux, réalisés entre 1949 et 1963, concernent la géologie du socle du Burkina Faso. Dans le centre et le nord du pays, il a reconnu et décrit trois grands ensembles :

- des schistes épimétamorphiques qu'il a appelés « formations du groupe de Riziam » ;
- des roches basiques volcaniques ou plutoniques rassemblées dans le « groupe de Dacula » ;
- des roches cristallines regroupant les granites de type Baoulé et les granites de type Bondoukou ainsi que des migmatites diverses. Il intègre également dans cet ensemble des plagioclases non métamorphiques et probablement postérieures à la tectogenèse birimienne.

En 1971, une cartographie de "l'Arc de Goren" effectuée par Y. Muller (BRGM) dans le cadre de reconnaissances minières, concerne, entre autres, le Nord-Est de la feuille Ouagadougou.

Plus récemment, ce même secteur Nord-Est a été cartographié par U. Wenmeng (1986) dans le cadre d'une thèse d'université. Ce travail fournit également une pétrographie détaillée des formations du secteur.

Par ailleurs, la géologie du Burkina Faso a été synthétisée sur une carte à 1/1 000 000 par G. Hottin et O.F. Ouédraogo (1976).

Les travaux particulièrement exploités dans cette étude sont ceux précités et spécifiquement les travaux ci-après :

- La carte de synthèse géologique, structurale et des substances minérales du Burkina Faso au 1/1 000 000 du projet PADSEM (2018) ;
- La carte géologie de Hottin et Ouédraogo (1975) ;
- La carte géologique et minière du Burkina Faso au 1/1 000 000 par Castaing et al. (2003) ;
- Les cartes géologiques au 1/200 000 du Projet SYSMIN.

I.10. Contexte géologique ⁱ

I.10.1. Contexte géologique régional

L'Afrique de l'Ouest est en grande partie constituée de terrains archéens et Paléoproterozoïques, communément appelés "craton ouest-africain" (Figure 0-1). Celui-ci affleure en deux ensembles, la

dorsale Réguiat au nord et la dorsale de Léo-Man (ou dorsale de Man) au sud, séparés par un très vaste bassin sédimentaire néoprotérozoïque et phanérozoïque : le bassin de Taoudéni. Le craton est limité au nord et à l'est par les bassins de Tindouf et des Volta. Il est par ailleurs bordé à l'ouest et à l'est par plusieurs chaînes panafricaines et calédono-hercyniennes (Rokelides, Mauritanides, Dahomeyides). La plus grande partie du territoire du Burkina Faso appartient à la dorsale de Léo-Man. Les confins occidentaux et septentrionaux du pays sont recouverts par les sédiments de bordure du bassin de Taoudéni.

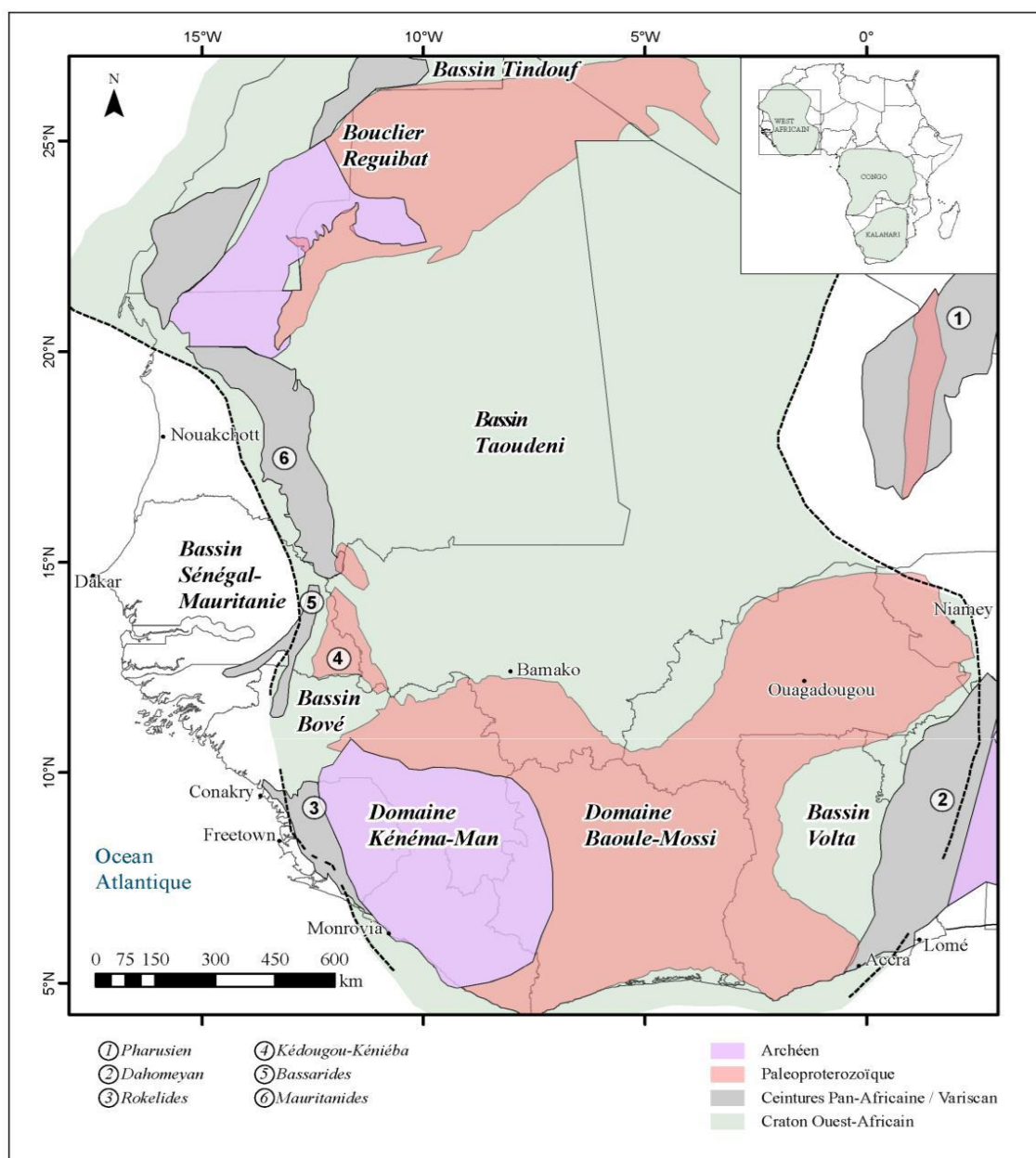


Figure 0-1 : Carte géologique du craton ouest-africain (adapté de WAXI, 2013)

La dorsale de Léo-Man comprend un ensemble archéen (domaine de Kénéma–Man) à l'ouest et un ensemble paléoprotérozoïque (domaine Baoulé–Mossi) localisé dans le centre et l'est de la dorsale. La limite entre ces deux domaines est classiquement associée à une faille majeure (faille de Sassandra). Le domaine archéen est affecté sur ses bordures par la tectonique, le métamorphisme et la granitisation Paléoprotérozoïques.

I.10.2. Contexte géologique du Burkina Faso

De différentes sources on peut retenir que le Burkina Faso est situé en grande partie sur le socle cristallin du domaine du Baoulé-Mossi et en bordure ouest sur les formations sédimentaires du bassin de Taoudéni (figure V-2). On constate au Burkina Faso plusieurs réseaux de failles et de fractures dont les plus importants ont été remplis par les filons mafiques de dolérite.

Les formations du socle sont d'origine volcano sédimentaire (Ceinture Volcano Sédimentaire : CVS) ou métamorphique (Complexe Métamorphique et Anatectique : CMA).

Les complexes métamorphiques et anatectiques (CMA) sont constitués d'orthogneiss migmatitiques et anatectiques ; leurs produits de fusion partielle et d'intrusions felsiques foliées se trouvent en alternance avec les CVS. Ils se sont mis en place pendant une période de réchauffement crustal.

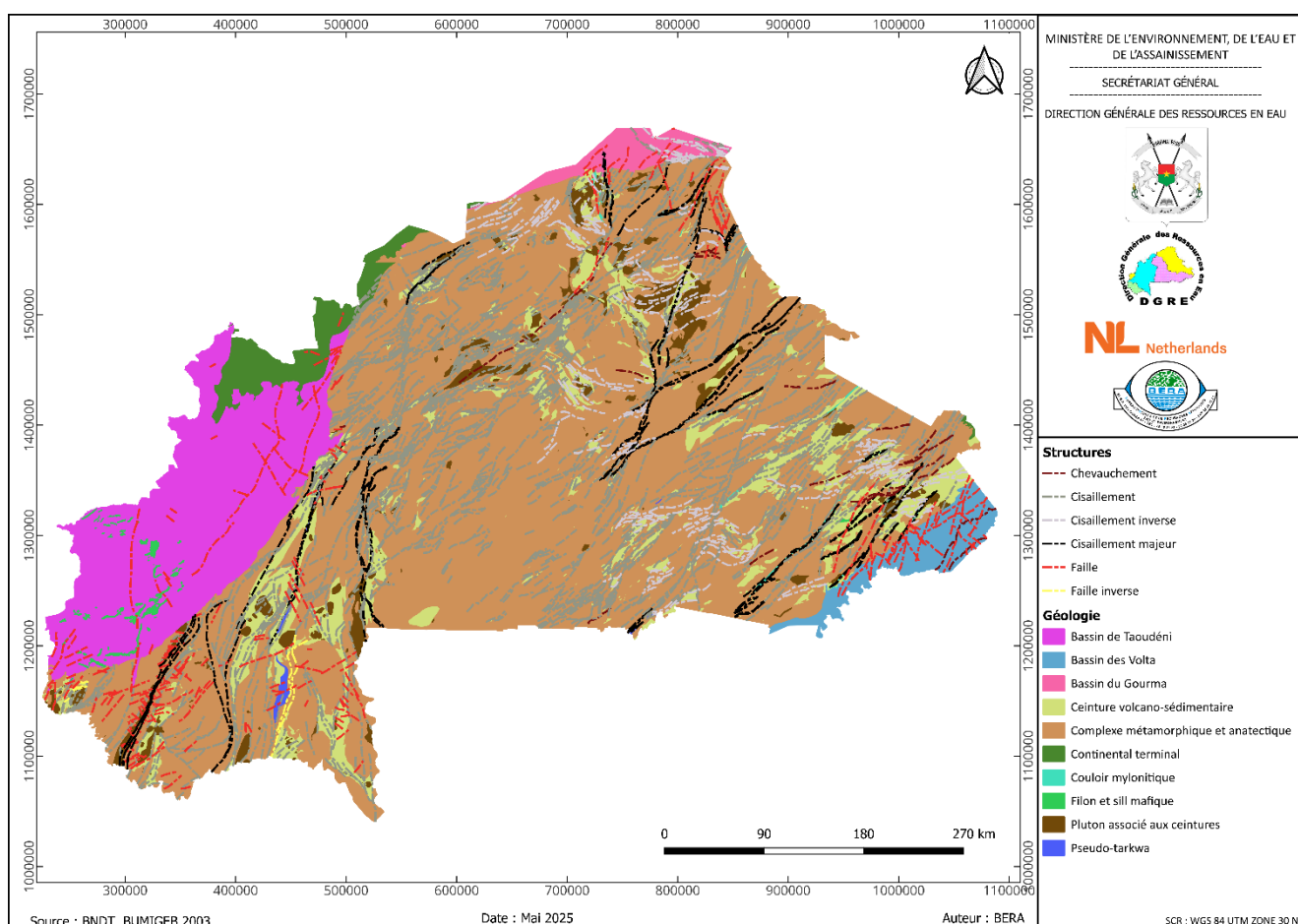


Figure 0-2 : Carte du schéma structural montrant les principaux domaines structuraux, les cisaillements et les couloirs de déformation¹

Un grand nombre d'intrusions envahissent les ceintures volcano-sédimentaires, les complexes métamorphiques et les contacts entre ces deux domaines.

Ces intrusions sont regroupées en 7 groupes :

1. Intrusions tonalite-trondhjémite-granodiorite (TTG) ;

¹ Source : Notice explicative, carte de synthèse géologique, structurale et des substances minérales du Burkina Faso à l'échelle 1/1 000 000, (2018)

2. *Groupe des granodiorites, monzonites et granites potassiques (ME3) ;*
3. *Groupe des granites alcalins et syénites (ME4) ;*
4. *Intrusions de diorite-gabbro à hornblende (ME5) d'âge indéterminé ;*
5. *Intrusion de granite à muscovite et magnétique anorogénique ;*
6. *Intrusions mafiques et ultramafiques ;*
7. *Filons de dolérite (gabbro).*

Les formations sédimentaires à l'Ouest du pays constituent l'extension Sud-Est du bassin de Taoudenni dont le remplissage a débuté vers 1,3 milliards d'années. La superficie de la bordure Sud Est de ce bassin (Mali et Burkina Faso) est d'environ 260.000 km², dont 45.000 km² (soit près de 20%) sont situés au Burkina Faso. Dans sa partie burkinabè, ces formations sont essentiellement gréseuses. Elles s'empilent régulièrement les unes sur les autres en couches subhorizontales affectées d'un léger pendage vers le Nord-Ouest (2° environ).

Elles ont été subdivisées en 3 groupes par Ouédraogo C., 1998 :

- Un Groupe Inférieur qui comprend la formation des Grès Inférieurs (GI), la formation de Kawara-Sindou (GKS) et la formation des Grès Fins Glauconieux (GFG) ;
- Un Groupe Moyen constitué des cinq (05) formations allant de la formation des Grès à Granules de Quartz (GGQ) à la formation des Siltstones et Grès-Quartzite de la passe de Fo (SQ) regroupés sous l'appellation Grès Silto-Dolomitiques (ou GSD) dans la partie malienne ;
- Un Groupe Supérieur constitué par les Grès de Fo Bandiagara (GFB) et les formations du Continental Terminal (CT).

I.10.2.1. Contexte géologique de la feuille du Degré Carré de Ouagadougou (DCO)

Ouagadougou et sa Ceinture Verte -CVO occupe le centre de la Région du Centre, qui elle-même occupe le centre du Degré Carré de Ouagadougou -DCO. Le Degré Carré de Ouagadougou « DCO » est situé sur les formations cristallines du Paléoprotérozoïque du Baoulé-Mossi (Figure 0-3).

Ce domaine Paléoprotérozoïque du Baoulé-Mossi est composé de bassins volcano-sédimentaires et de granitoïdes datant d'il y a environ deux mille millions d'années. Le terme « **Birimien** » initialement introduit par Kitson en 1928 pour désigner les terrains volcano-sédimentaires du Ghana, dans la région de la rivière Birim, est devenu à l'usage, l'appellation commune pour désigner l'ensemble des terrains Paléoprotérozoïque d'Afrique de l'Ouest. En majorité, le degré carré de Ouagadougou se trouve sur le Complexe Métamorphique et Anatectique (CMA).

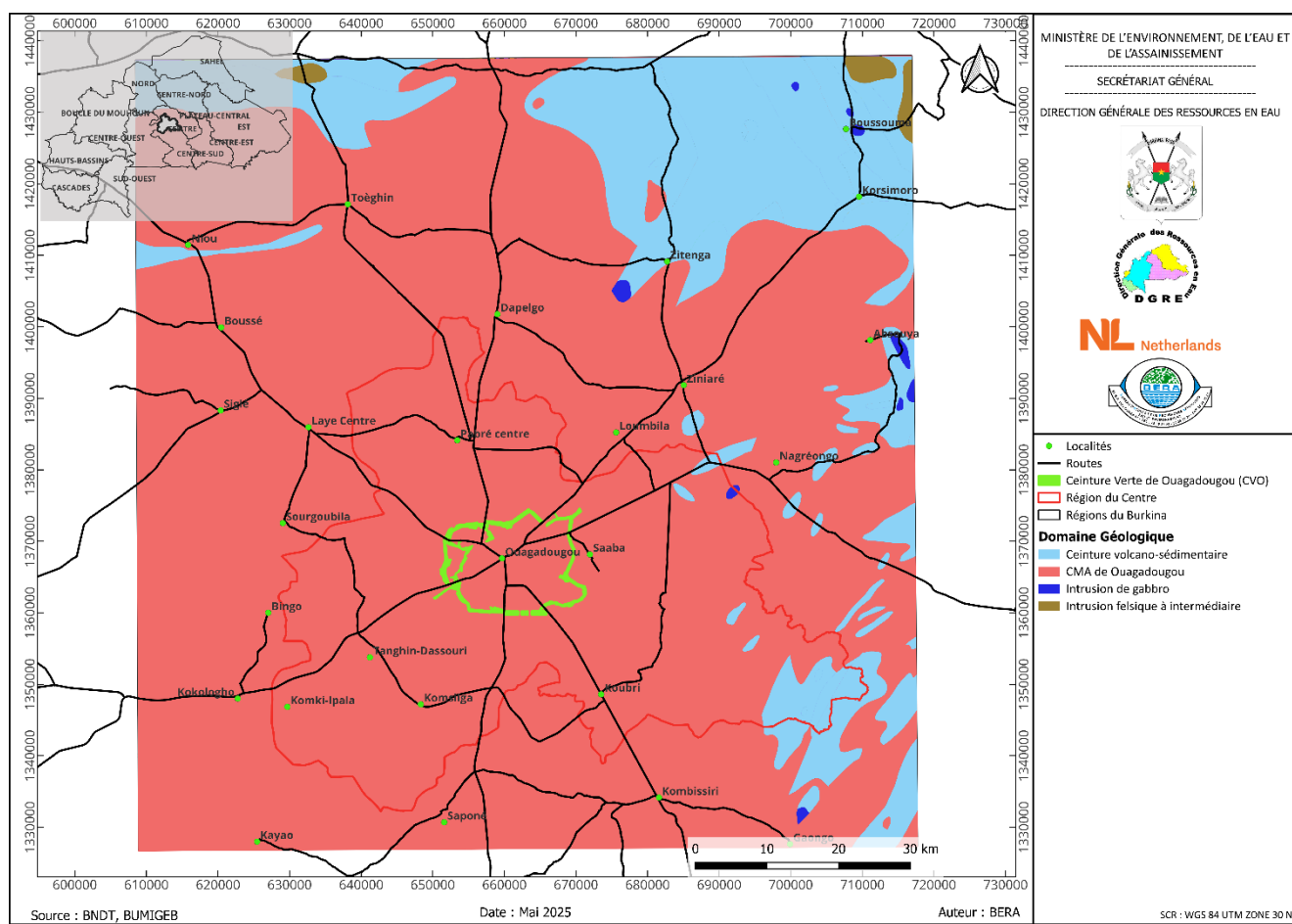


Figure 0-3 : Principaux domaines géologiques du Degré Carré de Ouagadougou (DCO)

Les formations plutoniques intrusives de granitoïdes couvrent au moins les 4/5 de la feuille. Elles consistent principalement en un granite à biotite (à grain moyen, en partie porphyroïde, parfois à amphibole) qui couvre des surfaces considérables. Des plages de tonalitique à granodioritique (2140 ± 6 Ma), folié ou non, forme de forment des enclaves dans le faciès de granitoïdes ainsi que des massifs intrusifs de terrains volcano-sédimentaires.

Dans le quart Sud-Ouest, une bande de granite hétérogène correspond à un faciès daté à 2136 ± 8 Ma.

Enfin, une série de syéno-granitique forme de petits massifs d'âges 1825 ± 25 Ma (Wenmenga, 1986) dans l'Est de la feuille.

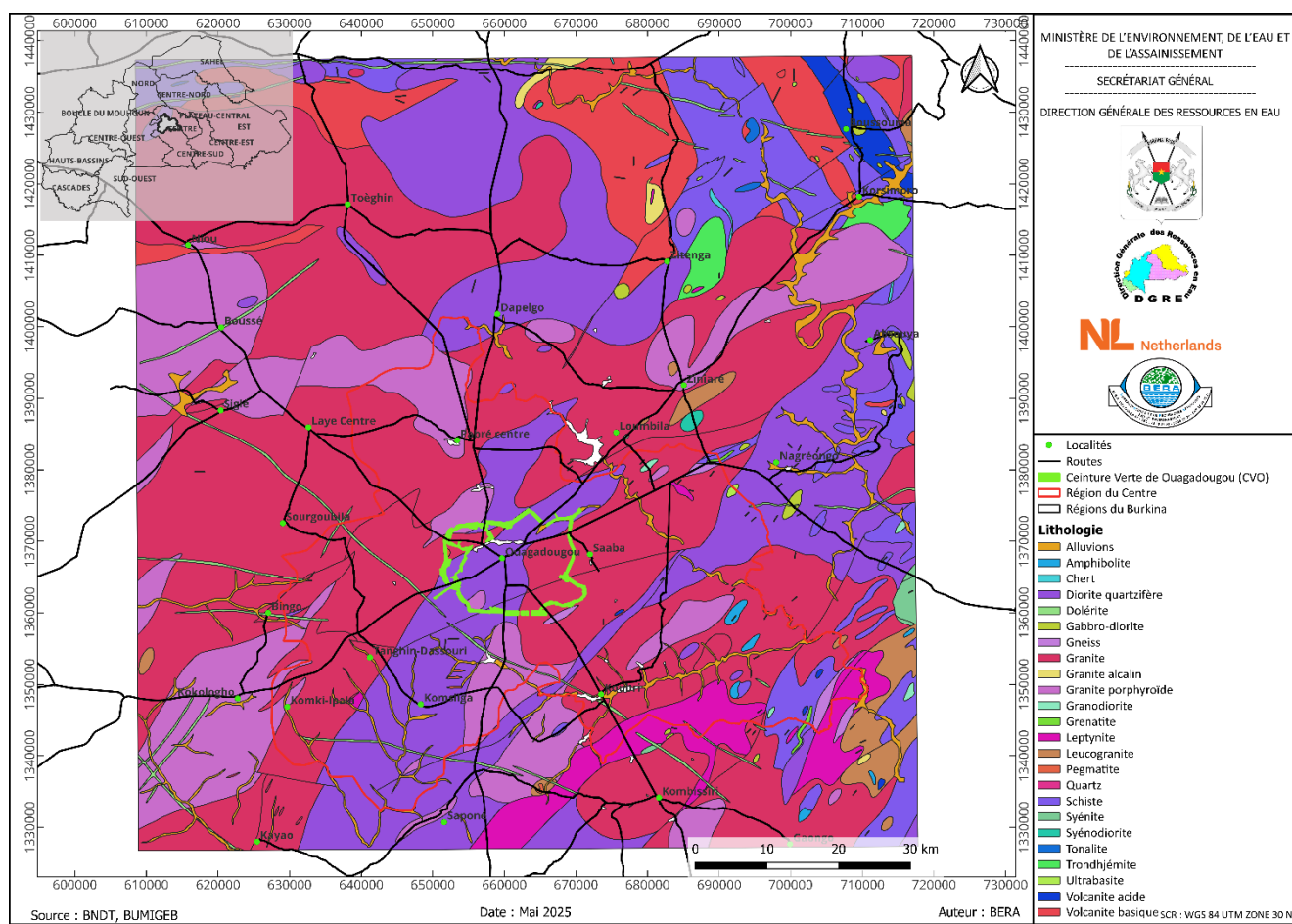


Figure 0-4 : Principale lithologie du degré carré de Ouagadougou

I.10.2.2. Description des terrains de la Région du Centre

La majeure partie de la Région du Centre est occupée par des formations granitoïdes. C'est seulement en bordure sud qu'on trouve bande de formations métamorphiques et une langue fourchue des formations de la ceinture volcano-sédimentaire. Le tableau V-1 et la figure V-5 donnent la synthèse et l'illustration des formations de la région du Centre.

Tableau 0-1 : terrains de la Région du Centre

Description	Groupe	Lithologie
Granite à grain fin à biotite	Granitoïde	Granite
Granodiorite, tonalite, diorite quartzifère	Granitoïde	Diorite quartzifère
Granite porphyroïde à biotite	Granitoïde	Granite porphyroïde
Complexe de leptynite, granite et granodiorite	Métamorphique	Leptynite
Schiste volcano-sédimentaire	Ceinture volcano-sédimentaire	Schiste

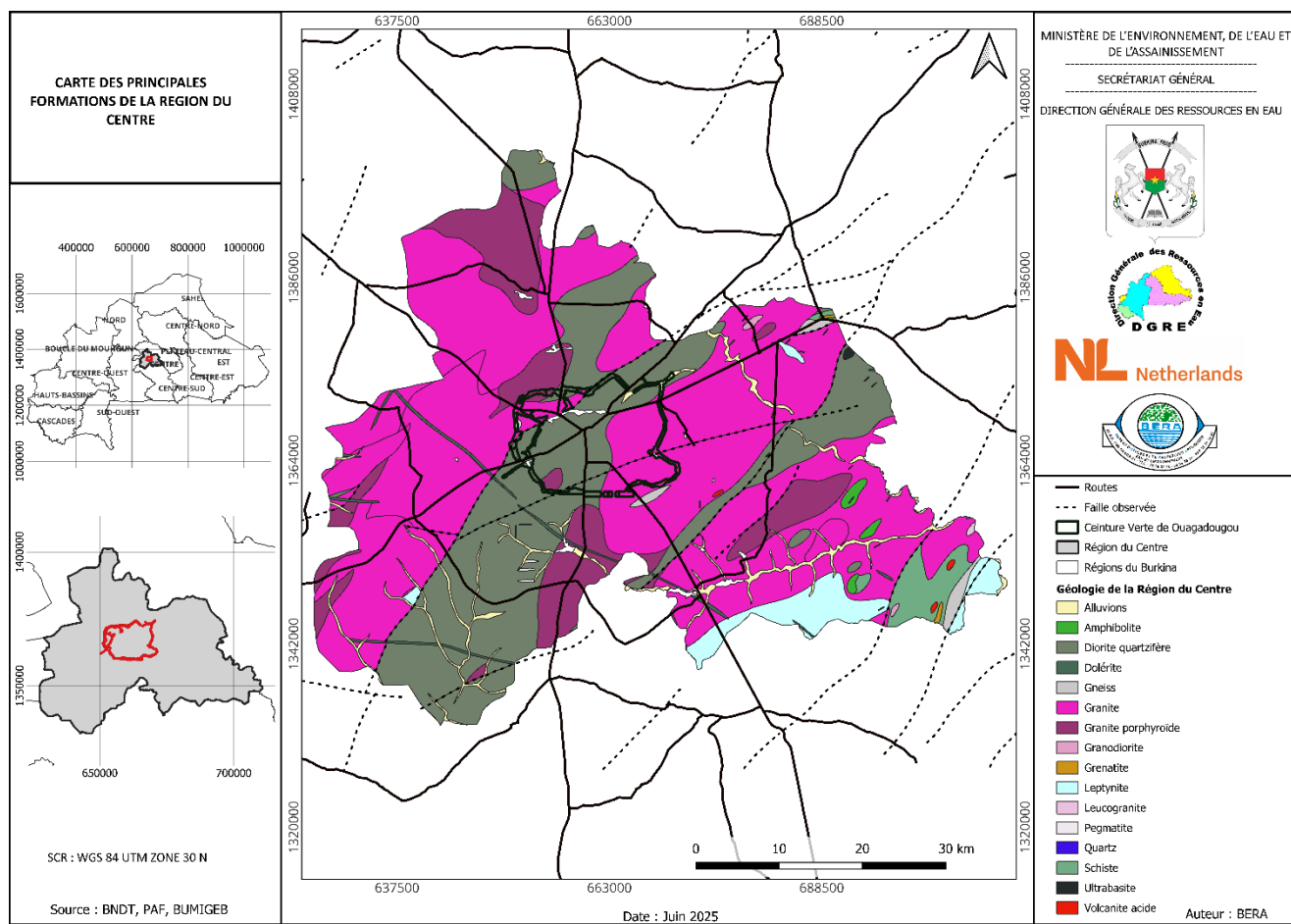


Figure 0-5 : Principales formations de la Région du Centre

I.10.2.2.1. Le Granite

Le granite à amphibole et biotite est folié et présente une texture grenue hypidiomorphe avec disposition planaire des silicates ferromagnésiens. Il y a de l'oligoclase, du microcline, du quartz, de la biotite verte associée à de l'amphibole verte et des minéraux accessoires tels que l'épidote, l'apatite, le sphène, la magnétite et le zircon. A l'intérieur de ce massif, certains faciès ont une composition de monzonite quartzifère à pyroxène, amphibole et biotite. Le granite occupe une grande partie de l'ouest et du centre est de la Région.

I.10.2.2.2. La diorite quartzifère

Le faciès granodiorite, tonalite et diorite quartzifère couvre une surface importante dans le centre de la région. À l'affleurement, il se présente en boules et blocs ou bien en dômes ou dalles au ras du sol. La roche est homogène, à grain moyen, voire grossier. L'amphibole et la biotite sont présentes en proportions variables. Le quartz n'est jamais abondant. Les enclaves sont globalement rares et peu nombreuses.

Les filons recoupant cette formation sont relativement rares ; il s'agit généralement d'aplo-pegmatites leucocrates. La diorite quartzifère montre une texture plus ou moins orientée. Le plagioclase, l'amphibole (hornblende verte) et la biotite brune sont largement prédominants. Le quartz, recristallisé, représente environ 10% de la roche. Les minéraux accessoires sont l'épidote, le sphène (en grands cristaux associés aux ferromagnésiens), l'apatite et la magnétite.

I.10.2.2.3. Granite porphyroïde à biotite et rare amphibole

Le faciès plutonique qui prédomine sur le territoire de la feuille Ouagadougou est un granite à biotite, monotone, qui se présente sous deux faciès étroitement associés spatialement : l'un, porphyroïde avec des tablettes de feldspath potassique, l'autre, à grain moyen pouvant présenter localement une tendance porphyroïde avec quelques tablettes de feldspath potassique.

Un passage progressif entre ces deux faciès apparaît sur certains affleurements où, soit les deux faciès coexistent, soit quelques gros cristaux automorphes de feldspath potassique sont dispersés au sein du faciès à grain moyen.

Quelques données de terrain et l'aspect cartographique d'ensemble de la feuille Ouagadougou suggèrent que cette entité est intrusive dans les roches à anisotropie planaire plus ou moins, tandis qu'elle est recoupée par les granites de grain fin à moyen.

Les affleurements sont nombreux, souvent de grandes dimensions et de morphologie très diverse.

I.10.2.2.4. Complexe de leptynite et granodiorite

Les leptynites et granodiorites associées constituent une formation particulière bien visible dans la carrière dite « Tintin » située sur la route nationale RN5, à mi-chemin entre Ouagadougou et Kombissiri. Dans la carrière, la roche présente un aspect rubané très accentué orienté N30°E. Des faciès de leptynites ayant une composition tonalitique alternent avec des faciès plus foncés de composition micro-monzodioritique pouvant correspondre à des faciès hypo-volcaniques. De nombreux filons aplopegmatitiques injectent et recoupent ces faciès.

D'un point de vue cartographique, les faciès ci-dessus, associés à des granodiorites à amphibole et biotite, forment deux entités bien individualisées dans le Sud et le Sud-Est de la feuille. À l'affleurement, le rubanement forme parfois des plis isoclinaux et d'une manière générale s'incurve comme la principale bande affleurante d'une direction NE à une direction SE.

I.10.2.2.5. Schiste volcano-sédimentaire

Cette formation sédimentaire et volcano-sédimentaire est constituée principalement de "schistes" au sens large, du terme qui englobe des faciès purement sédimentaires à volcaniques (tufs fins). On observe principalement des schistes sériciteux clairs associés à des métagrès, des schistes tufacés et probablement des tufs vrais. Ils correspondent à une série métamorphisée, grésopélitique à tufs intercalés, à l'origine. Des schistes et quartzites noirs, des quartzites blancs à silicate d'alumine et des niveaux de "grenatite" sont également intercalés en masses parfois importantes.

La forte dispersion et la mauvaise qualité des affleurements souvent altérés ne permettent pas d'établir une stratigraphie précise des différents faciès. On observe localement dans ces schistes des faciès de métamorphisme de contact, à proximité d'intrusions plutoniques (schistes à andalousite (Wenmenga, 1986)).

I.10.2.3. Description des terrains de la CVO

Au sein de la CVO, les terrains sont constitués essentiellement par des granodiorites, des granites, des alluvions et des pegmatites à aplites. Le tableau ci-dessous et la Figure 0-6 illustrent la nature des terrains de la CVO.

Tableau 0-2 : terrains de la Région du Centre

Description	Groupe	Lithologie
Granodiorite porphyroïde à amphibole et biotite	Granitoïde	Granite porphyroïde
Granodiorite, tonalite, diorite quartzifère	Granitoïde	Diorite quartzifère
Granite à grain moyen à biotite	Granitoïde	Granite
Alluvions	Superficiel	Alluvions
Pegmatite et aplites	Filon magmatique	Pegmatite

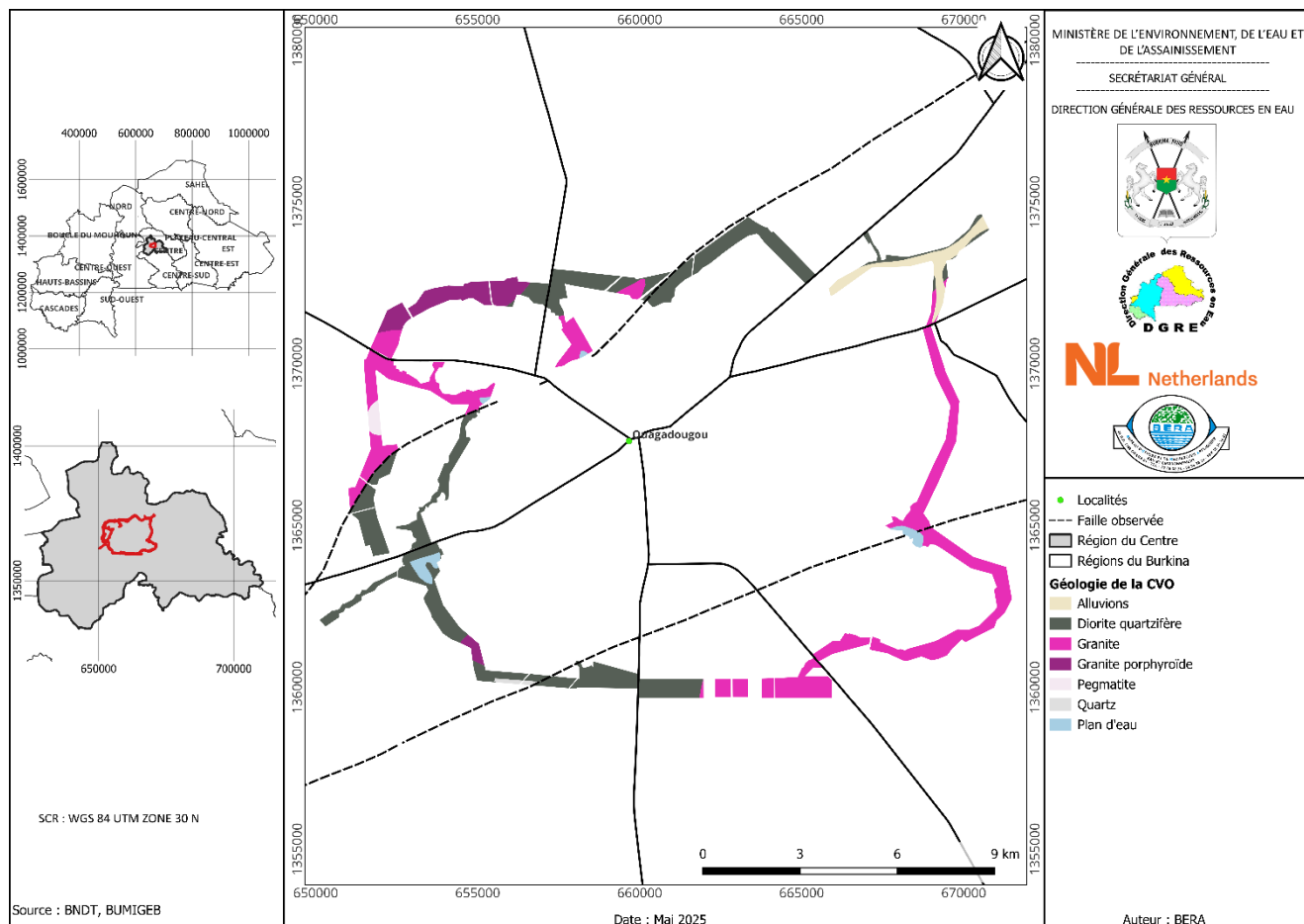


Figure 0-6 : Principales formations de la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO)

Les Granites porphyroïdes, les Diorites quartzifères et les Granites ont été décrits précédemment.

I.10.2.3.1. Pegmatite et aplites

Ces faciès particuliers de leucogranite apparaissent très fréquemment sous forme de filons recoupant les autres types de roches plutoniques, à l'exception du leucogranite à grain moyen

Les affleurements les plus spectaculaires se trouvent à Pissi, à 16 km à l'Ouest de Kombissiri ; ils montrent une aplo-pegmatite, c'est-à-dire un leucogranite caractérisé par des passages rapides d'un grain fin (≤ 1 mm) à un grain grossier (≥ 1 cm).

Au Sud de la ville de Ouagadougou, se trouvent trois filons de direction N80°E. Le plus septentrional affleure sous forme d'une dalle et de boules isolées avec une nette prédominance d'un leucogranite à grain fin-moyen sur la pegmatite. Le plus méridional comprend un passage de pegmatite graphique. Le filon intermédiaire correspond à un « dos de baleine » constitué d'une alternance de rubans de

pegmatite de 10 à 30 cm de puissance et de rubans de leucogranite à grain fin-moyen ; dans la pegmatite, la longueur des cristaux de feldspath potassique rose atteint 10 cm.

I.10.2.3.2. Alluvions

Les alluvions observées se rencontrent dans les cours d'eau ou sur les berges jusqu'à parfois une assez grande distance (plurihectométrique à plurikilométrique) du lit principal (plaine d'inondation). Elles sont constituées de graviers, de sables et d'argiles (plaine d'inondation).

I.11. Contexte structural

I.11.1. Contexte structural général du Burkina Faso²

✓ Création de la croûte birimienne (2300-2150 Ma)

L'âge le plus ancien obtenu à ce jour sur les roches du Burkina Faso est 2238 ± 5 Ma. Cela suppose qu'une croûte océanique existait avant 2238 Ma dans le domaine Baoulé Mossi, croûte océanique dont rien ne semble avoir subsisté en surface. D'un point de vue paléogéographique, l'hypothèse généralement retenu est l'existence de 2 arcs volcaniques et de 2 arcs tonalitiques.

Les arcs volcaniques sont :

- l'arc volcanique externe représenté par la ceinture de Houndé et sa continuité vers les zones situées à l'Ouest et peut-être au Nord de la ceinture arquée de Djibo ;
- l'arc volcanique interne représenté par la ceinture de Boromo et sa continuité vers la zone située au Sud de la ceinture arquée de Goren.

Entre ces deux arcs devait exister un bassin arrière-arc, localisé actuellement entre les ceintures de Houndé et Boromo et au niveau des ceintures arquées de Goren et Djibo.

Les arcs tonalitiques sont :

- l'arc tonalitique externe (2210-2160 Ma) localisé à l'Est du Burkina Faso mais aussi à l'Ouest et peut-être au Nord des structures arquées de Goren et Djibo ;
- l'arc tonalitique interne (2150-2140 Ma) localisé au Sud de la ceinture arquée de Goren et à l'Ouest du Burkina Faso.

Un domaine tonalitique intermédiaire (2130-2100 Ma) a été différencié au sein de la zone de bassin arrière-arc définie ci-dessus.

✓ Cratonisation éburnéenne (2150-2095 Ma)

Au Burkina Faso, à partir de 2150 Ma, débutent des processus de convergence de l'ensemble des blocs géologiques, à l'origine d'une cinématique de raccourcissement crustal globalement orientée NW-SE (cinématique définie d'après l'orientation NE-SW et NNE-SSW des corps géologiques, des principaux décrochements et des trajectoires de schistosité).

² SYSMIN. (2003). PROJET SYSMIN "CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE AU BURKINA FASO". *Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000, feuille de Ouagadougou*

Les systèmes d'arcs volcaniques et les bassins sédimentaires associés vont petit à petit se rapprocher, initialisant ainsi « l'orogène d'accrétion » éburnéen.

Au sein des arcs, les processus de convergence entraînent la subduction et la fusion de matériaux provenant non seulement de la croûte océanique basaltique tholéitique, mais aussi de matériaux plus différenciés tels que des volcanites intermédiaires à acides, tonalites et sédiments. Cette fusion est à l'origine des magmas qui vont recouper les formations tonalitiques, donnant naissance aux domaines granitiques éburnéens.

2 pulsions granitiques sont mises en évidence, la première, datée entre 2150 et 2130 Ma, se traduit par l'intrusion de granitoïdes dans l'arc tonalitique externe et la deuxième, datée entre 2115 et 2095 Ma, est à l'origine de la mise en place d'un vaste complexe de granites potassiques, qui recoupe les granitoïdes des domaines tonalitiques antérieurs.

Durant cette phase granitique se forment de grandes zones de cisaillement

Les premiers cisaillements orientés NE-SW commencent à partir de 2150 Ma dans la moitié Est du pays. Ces cisaillements de l'Est sont recoupés par la grande zone de cisaillements de Tiébélé-Dori-Markoye qui traverse le pays en direction NNE. Cette grande zone de cisaillement délimite une région Est qui inclut les principaux cisaillements NE-SW et une zone Ouest qui comprend les arcs de Goren et de Djibo.

Plus à l'Ouest, une autre grande zone de cisaillement, de Houndé-Ouahigouya, également d'orientation NNE et date de 2136 Ma.

Les ceintures arquées de Goren et Djibo peuvent être considérées comme le prolongement des ceintures volcano-sédimentaires de Houndé et Koudougou jouxtées par les domaines tonalitiques externe et interne. Les structures arquées en forme de « S » se positionnent entre les deux grandes zones de cisaillement majeures, celle de Houndé-Ouahigouya et celle de Tiébélé-Dori-Markoye.

✓ **Tectonique et déformation éburnéenne**

C'est également entre 2150 et 2095 Ma que se déroulent les événements tectono-métamorphiques majeurs. Les forces qui vont s'exercer sur les formations vont être la résultante du régime de contrainte régional (raccourcissement NW-SE) et des contraintes plus locales induites par la mise en place et le gonflement des plutons ainsi que par le fonctionnement des cisaillements. La déformation et le métamorphisme ne vont pas être uniformes à l'échelle du pays, mais localisés dans des zones particulières telles que la périphérie des plutons et le voisinage de zones de cisaillement.

Dans les ceintures volcano-sédimentaires, la déformation se traduit par le redressement de la stratification, notamment en bordure des plutons, ainsi que par l'acquisition d'une schistosité généralement verticale et d'intensité variable, formée dans des conditions épizonales à mésozonales. Certaines zones montrent un métamorphisme de plus haut degré.

✓ **Évolution post cratonique**

A partir de 2095 Ma, la majorité des plutons granitiques se sont mis en place et ont cristallisé. L'énorme volume de granites éburnéens a assuré la cratonisation de l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Les contraintes dues à la convergence vont continuer à s'exercer sur le bâti rocheux, induisant un « rejeu »

fragile de cisaillements favorable à la mise en place de filons de quartz. Vers 1890 Ma, des massifs localisés de syénites et granites alcalins vont se mettre en place, traduisant la transition vers un régime intraplaque et localement extensif. Ensuite, à partir de 1810 Ma et jusqu'au Mésozoïque, le craton Ouest-africain va être le siège de l'intrusion d'une succession de dykes doléritiques, dont l'intensité culminera au Jurassique inférieur en relation avec l'ouverture de l'Atlantique Sud.

I.11.2. Contexte structural du DCO et de la CVO

Au niveau du degré carré de Ouagadougou, les linéaments et cisaillements ont une orientation générale SW-NE, avec filons SE-NW.

Les principales directions structurales identifiées sur le DCO sont :

- la direction N60°-N70°E, qui est présentée sur toute la feuille traduite sur la carte géologique par plusieurs fractures importantes ;
- la direction N100°-N110°E correspond orientations de dykes doléritiques qui traversent toute la feuille ;
- la direction N120°-N130°E, surtout dans la moitié Nord-Est se manifeste plus par son effet sur la morphologie, comme le long de la vallée de la rivière Massili, au Nord de Ouagadougou, que par des failles ;
- la direction N180°-N10°E, traduite principalement par deux alignements en limite Est et Ouest de la feuille.

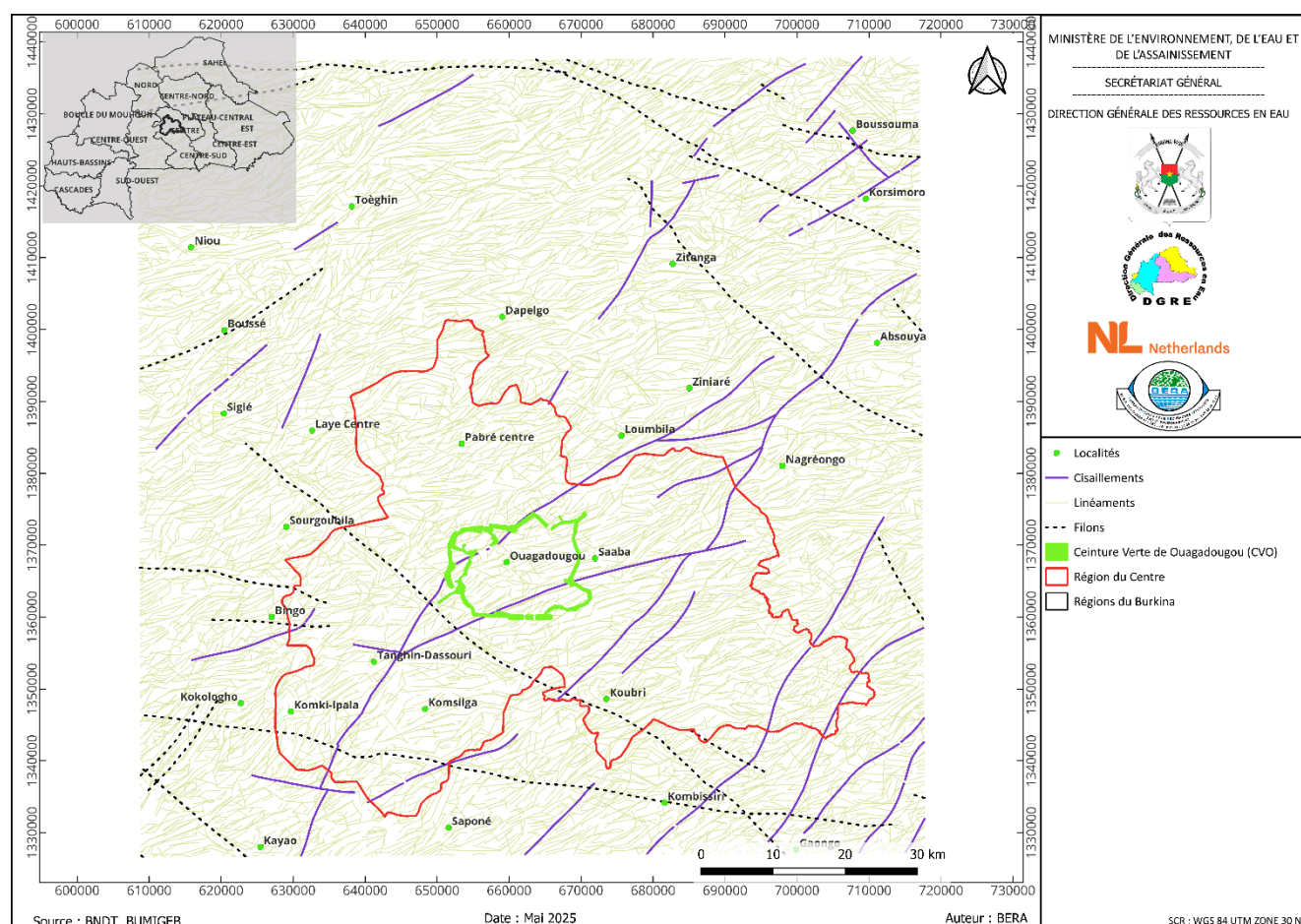


Figure 0-7 : Système structural du DCO

CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Dans la littérature, on distingue dans la zone d'étude (CVO) le système aquifère de la zone de socle. Ces aquifères de socle, tributaire de l'altération et des phénomènes tectoniques, sont discontinues et d'extension limitée. A l'état sain les roches cristallines sont dépourvues de porosité. Elles ne constituent des aquifères importants qu'à la suite de phénomènes secondaires de fracturation et d'altération.

Les réseaux aquifères dans les formations cristallines sont : les zones fracturées et broyées et les horizons d'altérations. Les fractures jouent le rôle de drains et les couches altérées celui de réservoir (emmagasinement). On distingue généralement deux types de systèmes aquifères en zone de socle : le réservoir de la zone altérée, celui de la zone fissurée et enfin le substratum peu fracturé.

Le manteau d'altérites : Les formations du socle cristallin (ONESCO, 1987) sont généralement recouvertes par un manteau d'altérites, représentant le résultat d'une désagrégation physicochimique. Ce recouvrement altéritique superficiel a une épaisseur qui varie régionalement suivant la latitude et localement en fonction du faciès géologique, de la pluviométrie et de la géomorphologie. Son épaisseur peut atteindre les 50 m.

Ce manteau d'altérites (saprolite/rigolite), provenant de l'altération profonde de la roche mère, est caractérisée par une porosité élevée et une perméabilité modérée, lui conférant un rôle capacitif (stockage d'eau). Son épaisseur varie en fonction du climat, de la lithologie et de l'évolution géomorphologique (Tardy, 1993). Les altérites grossières (arènes sablo-argileuses) offrent les meilleures potentialités hydrogéologiques. Le manteau d'altérites peut être considéré comme milieu à porosité d'interstices.

La zone fissurée (horizon de transition) : Sous-jacente aux altérites, cette couche présente une densité de fractures décroissante avec la profondeur. Les fissures et diaclases sont partiellement colmatées par des produits d'altération, réduisant progressivement la perméabilité. Cette zone joue un rôle essentiel dans le drainage vertical et horizontal des eaux vers les fractures profondes. Selon la roche mère, les caractéristiques suivantes peuvent être relevées : les roches intrusives acides telles que les granites, les granodiorites, les aplites, les porphyres quartzeux et les pegmatites possèdent une capacité d'emmagasinement élevée, car ce sont des roches fragiles ; les intrusions de pegmatites sont le plus souvent très friables et par conséquent hautement perméables (plus le grain est gros plus la pegmatite est friable et plus la roche est friable plus le débit potentiel d'eau souterraine est élevé).

Le milieu est hétérogène et ses caractéristiques hydrauliques sont conditionnées par la densité, la géométrie de ses fissures et la recharge à partir du manteau d'altérites. La continuité hydraulique y est dépendante de l'interconnexion des fissures.

La roche saine (substratum peu fracturé) : Peu perméable, sauf au droit des fractures majeures (failles, zones de cisaillement). Ces fractures profondes constituent des drains préférentiels pour les écoulements souterrains.

I.12. Nature et typologie des aquifères

Dans le cadre de l'analyse de la nature et de la typologie des aquifères dans CVO, une approche géophysique a été intégrée afin de caractériser la structure du sous-sol et d'identifier les zones favorables à la circulation et au stockage des eaux souterraines. Cette section repose à la fois sur la capitalisation des données existantes issues de la littérature scientifique, des rapports techniques antérieurs et des bases de données géologiques disponibles, ainsi que sur la réalisation de levés géophysiques ciblés sur les sites préalablement sélectionnés. L'objectif principal de cette démarche est de mieux comprendre l'organisation hydrogéologique en milieu de socle, de différencier les types d'aquifères (altération, fracturation, contacts lithologiques), et de guider de manière rationnelle l'implantation des forages à venir. L'association entre les données bibliographiques, structurales et géophysiques permet ainsi de construire un modèle conceptuel cohérent des aquifères dans cette zone périurbaine. Pour une meilleure organisation, le travail a été scindé en plusieurs parties et étapes comme suit :

Partie 1 : Activités préparatoires à la prospection géophysique

Étape 1 : Choix des sites de prospection

Activité 1-1 : Situation administrative, géologique et cadastrale des sites de la CVO

Activité 1-2 : Cartographie de l'occupation des sols

Activité 1-3 : Validation des sites sur le terrain

Étape 2 : Cartographie des linéaments majeures

Activité 2-1 : Acquisition et traitement d'images et de données

Activité 2-2 : Extraction de linéaments et des densités de fracturation

Activité 2-3 : choix des directions des profils géophysiques

Étape-3 : Propositions des directions des levées géophysiques

Partie 2 : Prospection géophysique proprement et proposition d'un modèle conceptuel hydrogéologique

Étape 4 : Prospection géophysique proprement dite

Activité 4-1 : méthodes géophysiques proposées

Activité 4-2 : Critères et paramètres de prospection géophysiques

Activité 4-3 : Déploiement des équipes et équipement de mesures

Étape 5 : Analyse et interprétation des résultats

Activité 5-1 : Analyse et interprétation des résultats de la méthode VLF

Activité 5-2 : Analyse et interprétation des résultats de l'ERT

Activité 5-3 : Mise en commun des interprétations

Étape 6 : Construction du modèle conceptuel

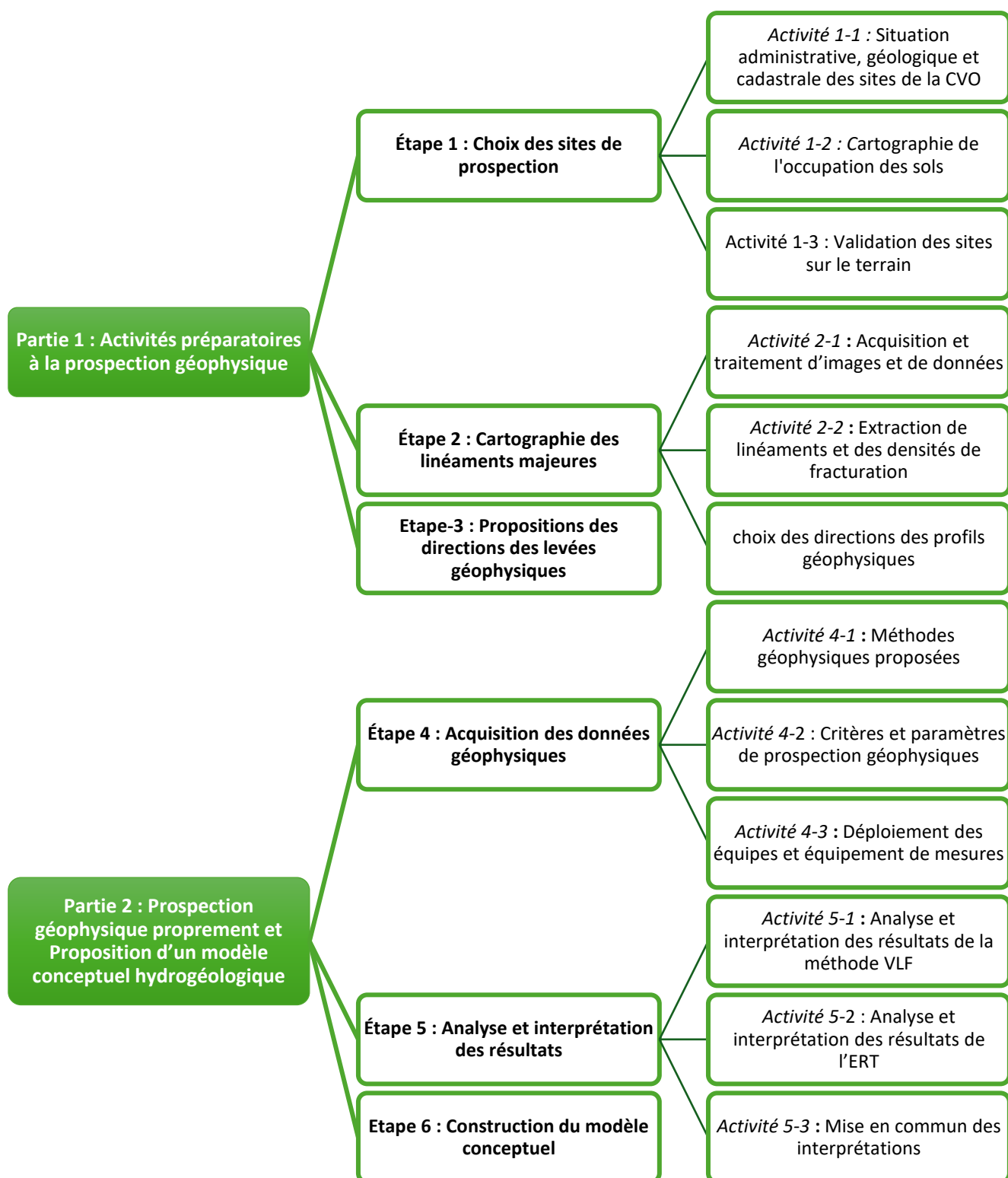


Figure 0-1 : démarche planifiée de la géophysique

I.12.1. Activités préparatoires à la prospection géophysique

I.12.1.1. Matériel et méthode

Les activités préparatoires à la prospection géophysique s'inscrivent dans le cadre de l'identification de sites propices à l'exploration et à l'exploitation des eaux souterraines dans la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO). Elles ont été réalisées suivant une méthodologie rigoureuse, basée sur la combinaison de critères géographiques, géologiques, structuraux, environnementaux et d'occupation du sol, afin de sélectionner un site représentatif dans chacun des six arrondissements que couvre la CVO.

I.12.1.1.1. Choix des sites pour la prospection géophysique

La démarche adoptée repose sur l'analyse croisée de données géographiques (limites administratives, accessibilité), de données thématiques (géologie, tectonique, occupation du sol), ainsi que sur des observations de terrain. Les outils utilisés incluent principalement des systèmes d'information géographique (QGIS, ArcGIS), des images satellites récentes (Google Earth), des données géologiques (BUMIGEB 2018) et des bases de données issues du projet PAF (Plan d'aménagement forestier).

I.12.1.1.1.1. Découpage administrative

La Ceinture Verte de Ouagadougou couvre six arrondissements : les arrondissements 3, 4, 6, 10, 11 et 12. Ce découpage administratif a été utilisé comme base pour assurer une répartition spatiale équilibrée des zones prospectées, avec un site sélectionné par arrondissement. Cette organisation permet une couverture représentative de l'ensemble du périmètre étudié.

I.12.1.1.1.2. Contexte géologique

La sélection des sites s'est appuyée sur la cartographie géologique du BUMIGEB (2018), qui met en évidence la diversité des formations lithologiques présentes dans la CVO. Parmi celles-ci, on retrouve principalement des unités de roches métamorphiques (migmatites, gneiss, amphibolites), des intrusions granitiques, et des formations sédimentaires alluviales récentes. L'analyse structurale issue de la cartographie de 2003 et 2018 révèle plusieurs failles majeures traversant la zone. Les sites sélectionnés sont positionnés de manière à inclure, autant que possible, des contextes géologiques contrastés, incluant des zones de contact lithologique ou d'intrusion, jugées favorables à la circulation des eaux souterraines.

I.12.1.1.1.3. Cartographie de l'occupation des sols et îlots d'habitation

L'analyse de l'occupation du sol a été réalisée à partir de la cartographie de l'occupation des sols de 2022 et des îlots d'habitation mise à jour par le Bureau ACID. Les zones de construction ont été délimitées à l'aide d'une image Google Earth de mars 2025 et d'interprétations manuelles. Les sites retenus se trouvent en dehors des zones urbanisées ou en cours d'urbanisation, et ne se superposent pas à des zones sensibles telles que les forêts classées, les bosquets, les cimetières ou les cours d'eau. Cette étape a permis d'écarter les emplacements incompatibles avec les opérations de terrain ou d'éventuelles futurs forages.

I.12.1.1.1.4. Validation des sites sur le terrain

La phase finale du processus de sélection des sites de prospection a consisté en une mission de terrain conjointe, réalisée avec l'équipe technique du bureau d'étude et des agents de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE). Cette visite avait pour objectif de valider la faisabilité pratique de la mise en œuvre des investigations géophysiques, notamment les techniques de tomographie de résistivité électrique (ERT) et de prospection électromagnétique VLF. Elle a permis de vérifier l'accessibilité effective des sites, la disponibilité d'un linéaire suffisant pour le déploiement des profils géophysiques, ainsi que l'absence d'obstacles majeurs (infrastructures, végétation dense ou lieux sacrés, occupations humaines, cours d'eau...) susceptibles de perturber les mesures. Cette reconnaissance de terrain a ainsi confirmé la compatibilité entre les zones sélectionnées à partir des critères cartographiques et leur réalité physique, garantissant la bonne exécution des levés prévus.

I.12.1.1.2. Cartographie tectonique

Cette partie vise à cartographier les structures tectoniques affectant les formations géologiques des sites de prospection retenus dans la CVO. Il s'agit notamment d'identifier les failles majeures, les zones de cisaillement et les linéaments susceptibles de constituer des zones de faiblesse structurale et hydrogéologique. La cartographie tectonique a mobilisé plusieurs types de données complémentaires. Les cartes structurales du BUMIGEB (2003 et 2018) ont constitué la base documentaire initiale. Elles ont été enrichies avec les données issues de différentes sources de données (imagerie optique, infrarouge et radar). Ces sources ont été intégrées et analysées au sein d'un système d'information géographique afin d'aboutir à une cartographie cohérente et interprétative des structures, fondée sur des bases méthodologiques scientifiquement éprouvées (Jourda, 2005).

I.12.1.1.2.1. Matériel et données

Les données satellitaires utilisées proviennent de plusieurs sources. L'imagerie multispectrale Sentinel-2 (niveau L2A) à résolution de 10 à 20 m a été utilisée pour son accessibilité et sa richesse spectrale (Drusch et al., 2012). Les images ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), plus particulièrement les bandes SWIR (4 à 9), ont permis de capter les variations minéralogiques des formations (Yamaguchi et al., 1998). Le MNT ALOS PALSAR RTC (Advanced Land Observing Satellite – Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), niveau 2.2 en polarisation HH, a permis d'extraire les éléments morphologiques de la surface avec une résolution de 12,5 m.

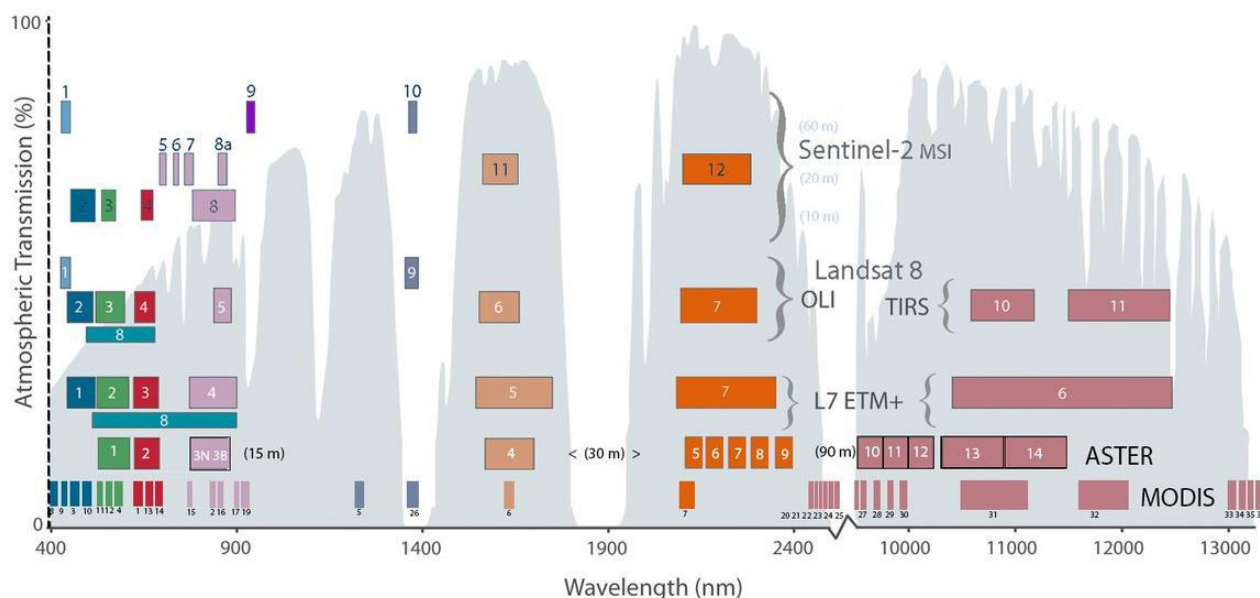


Figure 0-2 : Comparaison des images ASTER et LandSat OLI 8 (NASA)

Pour la conduite de cette étude, un ensemble d'outils logiciels spécialisés a été mobilisé afin d'assurer l'analyse, le traitement, l'interprétation et la valorisation des données collectées. Ces logiciels comprennent notamment ENVI 5.3, QGIS 3.36, Orfeo Toolbox, SAGA GIS, Google Earth Pro et Geomatica. L'ensemble des données et du matériel mobilisé constitue une base technique indispensable à l'atteinte des objectifs de l'étude, en cohérence avec la méthodologie détaillée dans les sections suivantes.

1.12.1.1.2.2. Structures de contacts et des failles (BUMIGEB 2003 et 2018)

Les données structurales fournies par le BUMIGEB offrent une représentation régionale des failles, zones de contact lithologique, cisaillements et intrusions magmatiques. Ces données, bien que précieuses, présentent parfois une généralisation liée à l'échelle cartographique. Elles ont été utilisées pour contextualiser et orienter les analyses plus fines issues de la télédétection. En particulier, les grands accidents identifiés y ont servi de repères pour la validation des linéaments détectés par image.

1.12.1.1.2.3. Cartographie des linéaments

L'identification des linéaments structuraux a été réalisée à partir de trois sources principales : Sentinel-2, ASTER et ALOS PALSAR. Cette approche multi-capteurs permet de croiser des informations d'origines optique, spectrale et topographique, renforçant ainsi la robustesse de l'interprétation structurale. Le processus méthodologique a été structuré en plusieurs phases complémentaires. Le prétraitement des images inclut leur téléchargement, leur reprojection dans le système UTM zone 30, leur découpage selon les limites de la zone d'intérêt, ainsi que la correction radiométrique pour ASTER. Les images Sentinel-2 L2A étant déjà corrigées, elles ont été directement utilisées.

➤ Données Sentinel-2

L'analyse des images Sentinel-2 a débuté par la création de combinaisons colorées (par exemple B8/B4/B3) afin de mettre en évidence les contrastes spectro-lithologiques. Deux traitements majeurs ont ensuite été appliqués :

- Technique de ratio des bandes ou des canaux : elle permet d'atténuer les effets d'ombre liés à la topographie et de faire ressortir les ruptures spectrales associées aux discontinuités géologiques. Cette première phase de traitement consiste à générer des composites colorés à partir des combinaisons de bandes les plus pertinentes. Pour Sentinel-2, la combinaison B8 (NIR) – B4 (Red) – B3 (Green) a été utilisée.
- Analyse en composante principale (ACP) : Cette méthode statistique permet de concentrer l'information spectrale en réduisant la redondance des données (Richards & Jia, 2006). Les premières composantes concentrent l'essentiel de la variabilité, et révèlent souvent les structures linéaires masquées dans les bandes. Les trois premières composantes, qui regroupent plus de 95 % de l'information spectrale utile, ont été retenues pour l'interprétation structurale.

➤ **Données ASTER**

Les données ASTER, notamment les bandes SWIR (Shortwave Infrared), sont particulièrement sensibles à la composition minéralogique. La combinaison B4 (SWIR1) – B6 (SWIR3) – B8 (SWIR5) permet de faire ressortir les signatures lithologiques (Sabins, 1999). L'ACP a également été appliquée sur ces bandes pour maximiser la discrimination lithologique et faire ressortir les zones de discontinuité. L'interprétation visuelle de ces composantes a permis de localiser des anomalies spectrales compatibles avec des failles ou des contacts lithologiques majeurs.

➤ **MNT ALOS PALSAR**

Le MNT ALOS PALSAR RTC a été utilisé pour générer des ombrages de relief (hillshades) simulant un éclairage sous différents azimuts. Ces ombrages révèlent les structures topographiques linéaires, souvent en lien avec des discontinuités géologiques. L'analyse multi-directionnelle (azimuts 45°, 135°, 225°, 315°) a permis de réduire les effets directionnels et de croiser les structures visibles sous différents angles.

➤ **Technique d'analyse des formes**

Les différentes images traitées (composantes principales, hillshades) ont été soumises à une analyse morphostructurale. Celle-ci repose sur l'interprétation visuelle des ruptures linéaires continues, renforcée par des filtres directionnels (Sobel et multidirectionnel de LEE). Enfin, un traitement semi-automatique des linéaments a été réalisé grâce à l'algorithme LINE de Geomatica, qui détecte et vectorise les formes linéaires selon des critères géométriques. Le résultat est une couche vectorielle de linéaments automatiquement extraits.

Ces linéaments ont ensuite été validés par interprétation manuelle experte dans QGIS à partir des couches prétraitées. Cette étape a consisté à identifier les linéaments visibles sur le terrain, à les digitaliser et à caractériser leur orientation, longueur et densité.

Enfin, une analyse spatiale des linéaments a été effectuée. Des cartes de densité ont été générées avec SAGA GIS et les orientations principales ont été synthétisées sous forme de diagrammes de rose via le plugin Rose Diagram de QGIS. La densité des nœuds de fracture a été calculée pour chacun des sites de la CVO afin d'évaluer le degré de fracturation.

I.12.1.2. Résultats et analyses

I.12.1.2.1. Sites retenus pour la prospection

Sur la base de l'ensemble des critères retenus, à savoir la répartition spatiale équitable par arrondissement, le contexte géologique et tectonique favorable, l'accessibilité logistique, la disponibilité foncière, l'occupation des sols, ainsi que la présence potentielle de structures favorables à l'accumulation ou à la circulation des eaux souterraines, six sites ont été identifiés pour la mise en œuvre de la prospection géophysique. Ces sites, répartis dans les arrondissements 3, 4, 6, 10, 11 et 12 de la Ceinture Verte de Ouagadougou, répondent à la fois aux exigences techniques, logistiques et environnementales définies lors de la phase préparatoire. La carte synthétique des sites retenus illustre leur localisation précise au sein de la CVO ainsi que leur positionnement par rapport aux limites administratives et aux unités géologiques. Elle a constitué une base de référence pour l'organisation des campagnes de terrain, notamment les levés de tomographie de résistivité électrique (ERT) et de VLF.

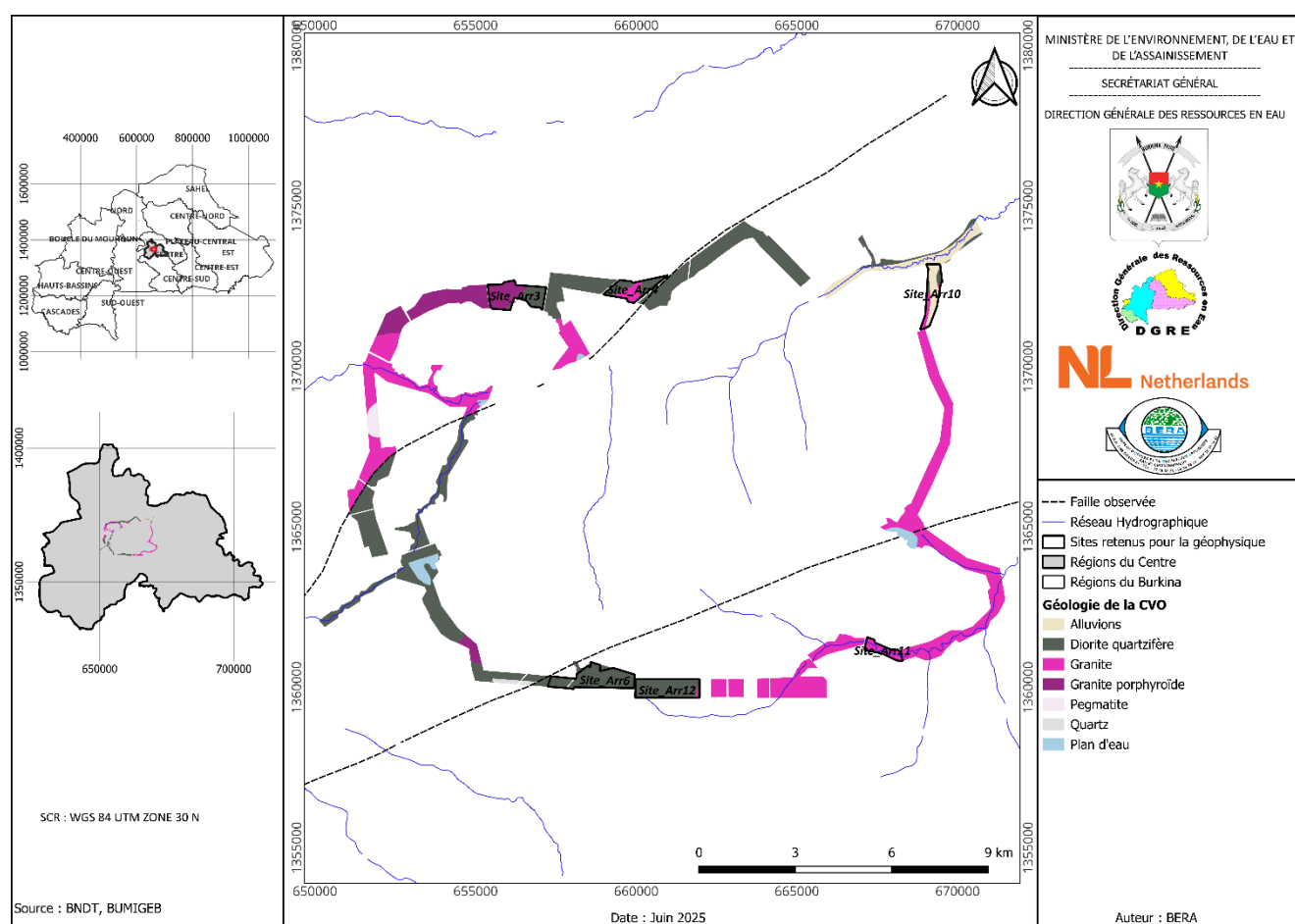


Figure 0-3 : Localisation des sites retenus pour la géophysique

I.12.1.2.2. Cartographie des linéaments de chaque site

I.12.1.2.2.1. Site de l'arrondissement 3

La cartographie structurale du site de l'arrondissement 3 met en évidence un réseau de linéaments modérément à fortement dense, bien organisé spatialement (Figure 0-5). Les linéaments sont distribués selon deux orientations principales NNE-SSW et NW-SE, formant un réseau conjugué (Figure 0-4). Les croisements des linéaments au centre et au sud du site suggèrent la présence de zones d'intersection structurale à haute connectivité, où les discontinuités naturelles du socle cristallin sont susceptibles de former des zones de perméabilité secondaire accrues. Ces intersections jouent un rôle fondamental dans la migration et l'accumulation des eaux souterraines, notamment en contexte de socle fracturé à faible porosité primaire. Les profils géophysiques devraient donc être orientés de manière perpendiculaire à ces directions dominantes pour mieux intercepter les contrastes de résistivité

associés aux zones de fracture et orienter efficacement les forages vers des réservoirs exploitables.

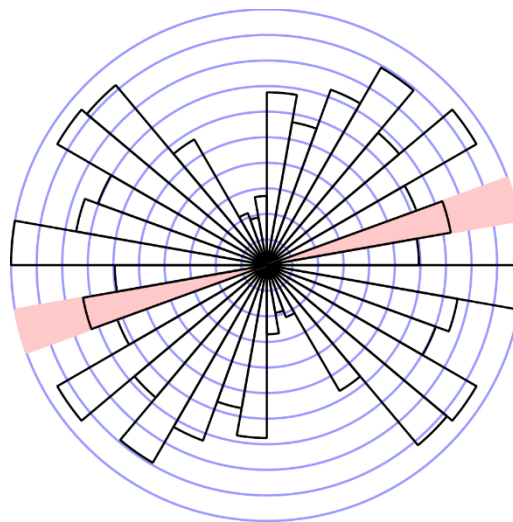


Figure 0-4 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 3

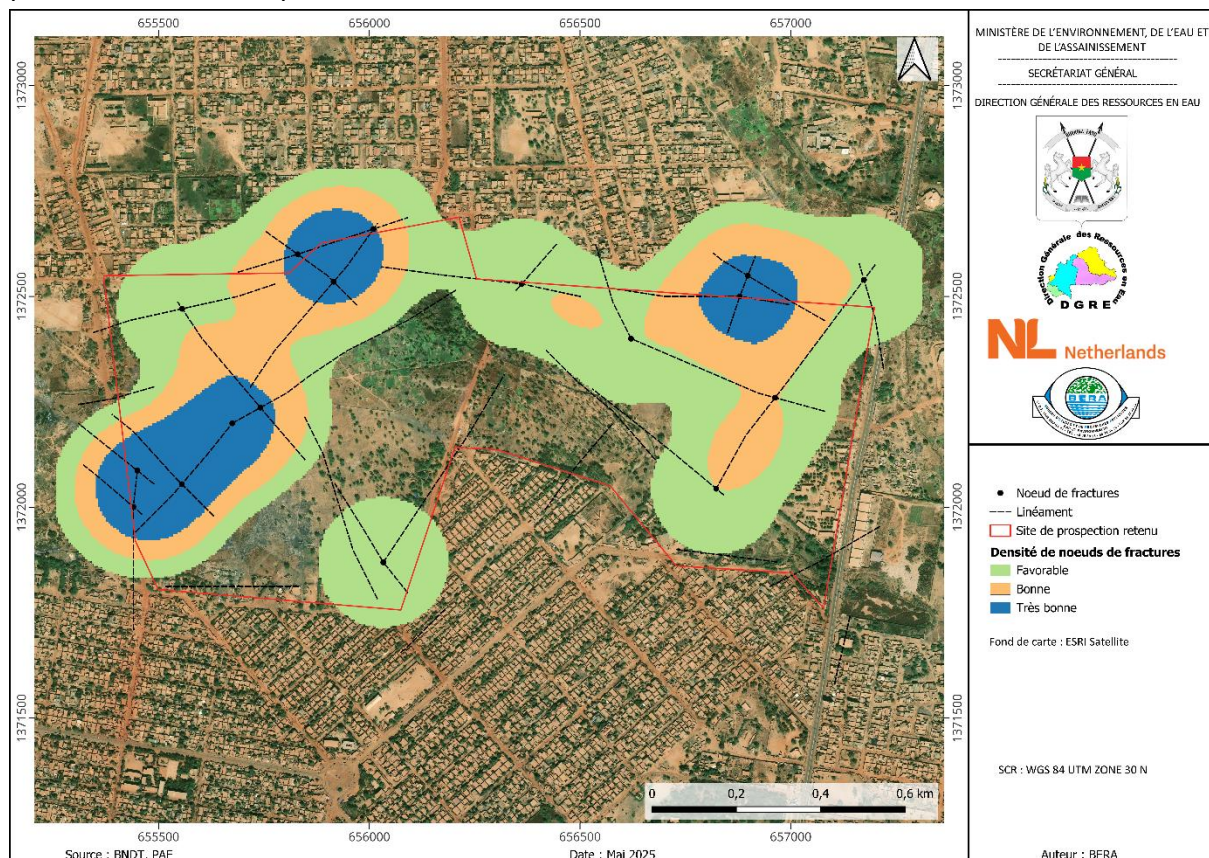


Figure 0-5 : Carte de fracturations du site de l'arrondissement 3

1.12.1.2.2.2. Site de l'arrondissement 4

Le réseau de linéaments dans ce site se caractérise par une densité modérée mais une continuité remarquable (Figure 0-7). Les structures observées sont nettement rectilignes, avec une orientation préférentielle E-W et des occurrences secondaires NE-SW (Figure 0-6). En contexte hydrogéologique, la continuité des linéaments sur de longues distances est un indicateur de bon drainage souterrain et de transmissivité potentiellement élevée. Cela signifie que ces fractures peuvent faciliter l'infiltration et la migration latérale de l'eau dans le socle, en particulier lorsqu'elles recoupent des lithologies homogènes. Ce site présente ainsi des conditions favorables à l'implantation de forages à rendement soutenu, en particulier dans les secteurs de contact entre

unités lithologiques ou au niveau des fractures majeures continues.

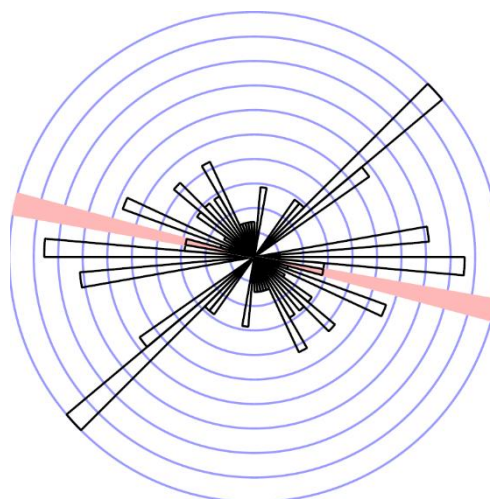


Figure 0-6 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 4

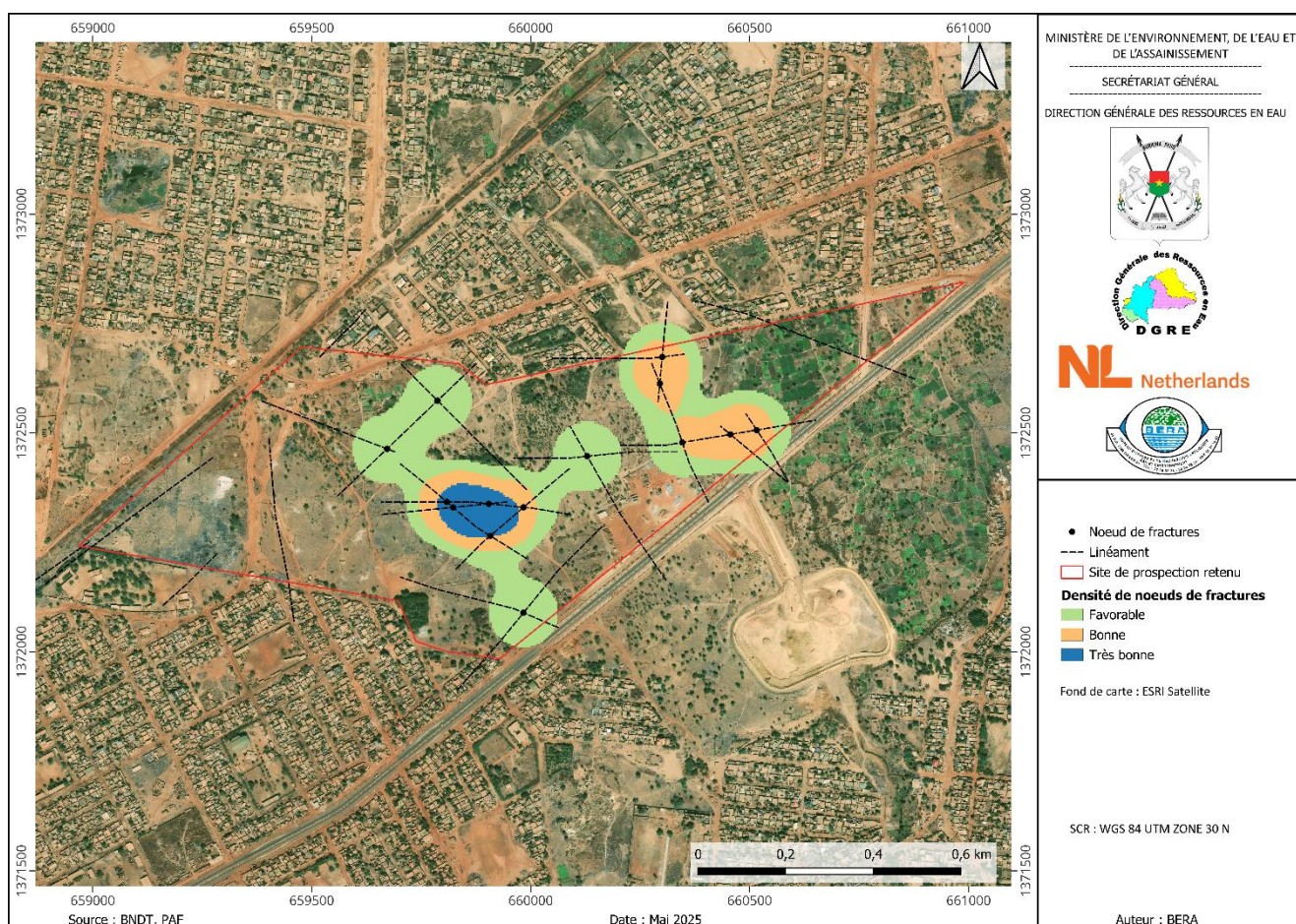


Figure 0-7 : Carte de fracturations du site de l'arrondissement 4

1.12.1.2.2.3. Site de l'arrondissement 6

Le site de l'arrondissement 6 se distingue par une très forte densité de linéaments, principalement courts et morcelés, suggérant une fracturation intense mais à dominante superficielle. Ce type de réseau est typique d'un système de microfracturation induit par des contraintes tectoniques secondaires ou localement réactivées. La direction dominante observée est WNW-ESE, accompagnée d'une direction secondaire NE-SW. Cette configuration peut traduire un régime de cisaillement conjugué ou un effet de zone de transition lithologique fracturée. D'un point de vue hydrogéologique, la forte densité de fractures peut offrir une capacité d'infiltration importante, mais la faible longueur des linéaments suggère une connectivité hydrodynamique potentiellement limitée. Les profils géophysiques permettront de valider la continuité verticale et latérale de ces structures, notamment pour identifier les fractures les plus ouvertes et connectées en

profondeur, aptes à constituer des drains souterrains exploitables.

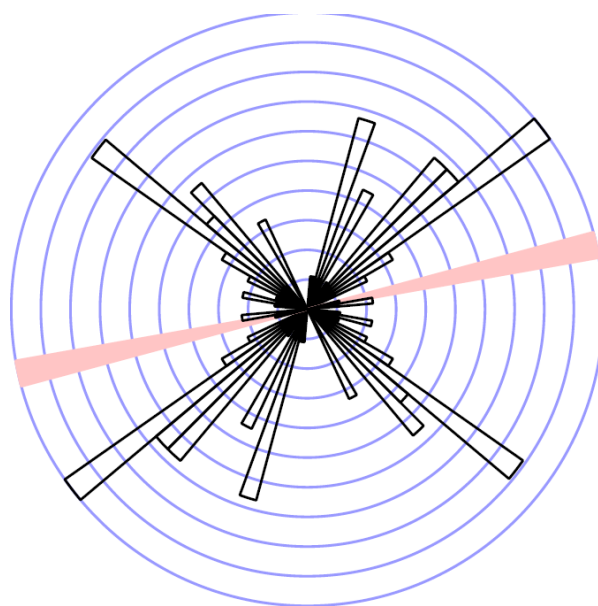


Figure 0-8 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 6

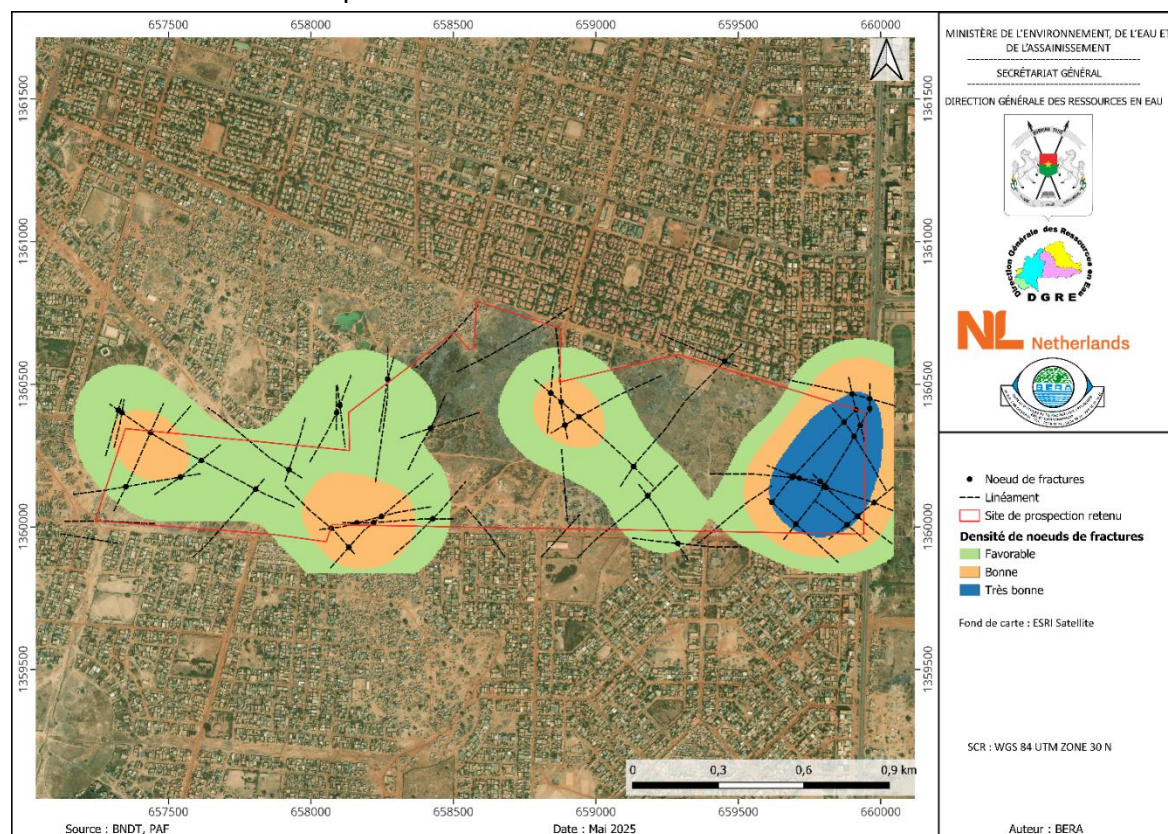


Figure 0-9 : Carte de fracturations du site de l'arrondissement 6

1.12.1.2.2.5. Site de l'arrondissement 11

Le site présente un réseau de linéaments modérément dense, structuré autour de deux familles orthogonales : E-W dominante et N-S secondaire. Cette configuration en croix correspond à un réseau conjugué typique des contextes de cisaillement transpressif ou de déformation mixte. La superposition de ces directions peut générer des zones d'ouverture secondaire, où les contraintes tectoniques ont favorisé l'ouverture des fractures et leur interconnexion. En environnement cristallin, ce type de structuration est hautement favorable à la circulation souterraine, notamment dans les zones d'intersection entre les deux familles. La disposition orthogonale permet également d'optimiser l'implantation des profils géophysiques pour intercepter les deux directions. La présence simultanée de structures verticales et transverses favorise la mise en place de volumes

fracturés tridimensionnels, avec une porosité et une transmissivité accrues.

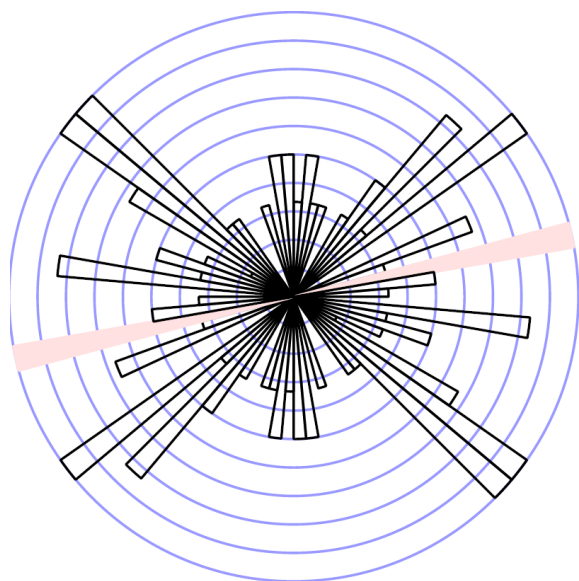


Figure 0-12 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 11

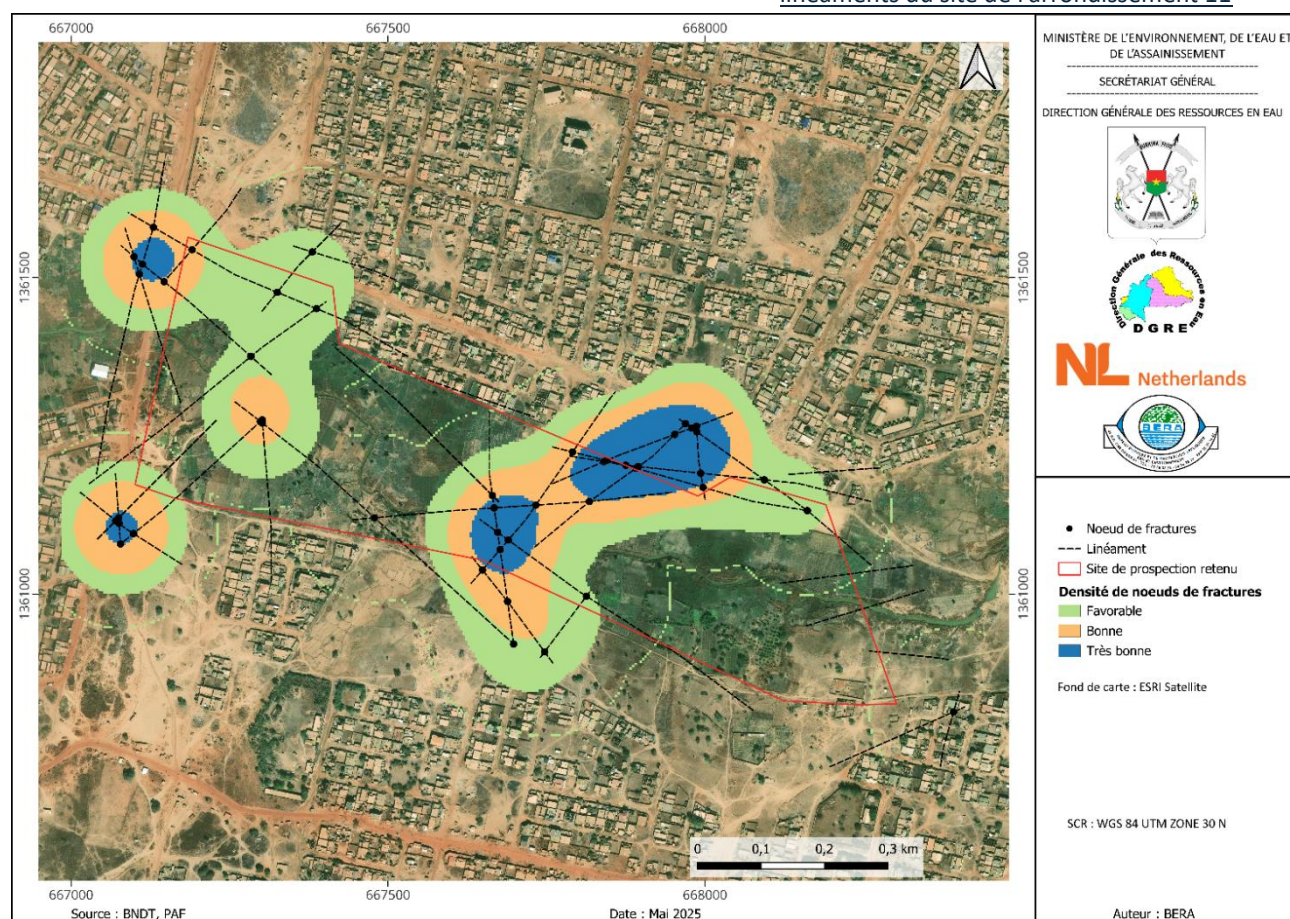


Figure 0-13 Carte de fracturations du site de l'arrondissement 11

1.12.1.2.2.6. Site de l'arrondissement 12

L'arrondissement 12 présente une des structures tectoniques les plus complexes parmi les six sites analysés. Le réseau de linéaments y est extrêmement dense, avec une distribution quasi radiale, traduisant une fracturation multidirectionnelle. Une famille principale émerge de la rosace directionnelle : NNE-SSE. Une telle structuration isotrope est caractéristique des zones d'intersection de failles majeures ou d'anciens dômes tectoniques. En hydrogéologie structurale, cette configuration est optimale pour la recharge, la percolation et la rétention des eaux dans le socle. La multiplicité des directions favorise une interconnectivité élevée entre les fractures, générant un réseau tridimensionnel très favorable à la circulation de l'eau. Ce site constitue ainsi une cible de choix pour l'implantation de forages d'eau à fort potentiel, avec une priorité

donnée aux zones de densité maximale et aux croisements de linéaments structuraux majeurs.

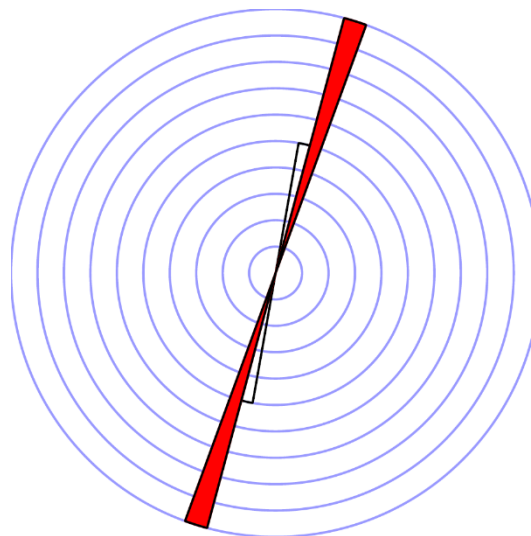


Figure 0-14 : Rosaces directionnelles des linéaments du site de l'arrondissement 12

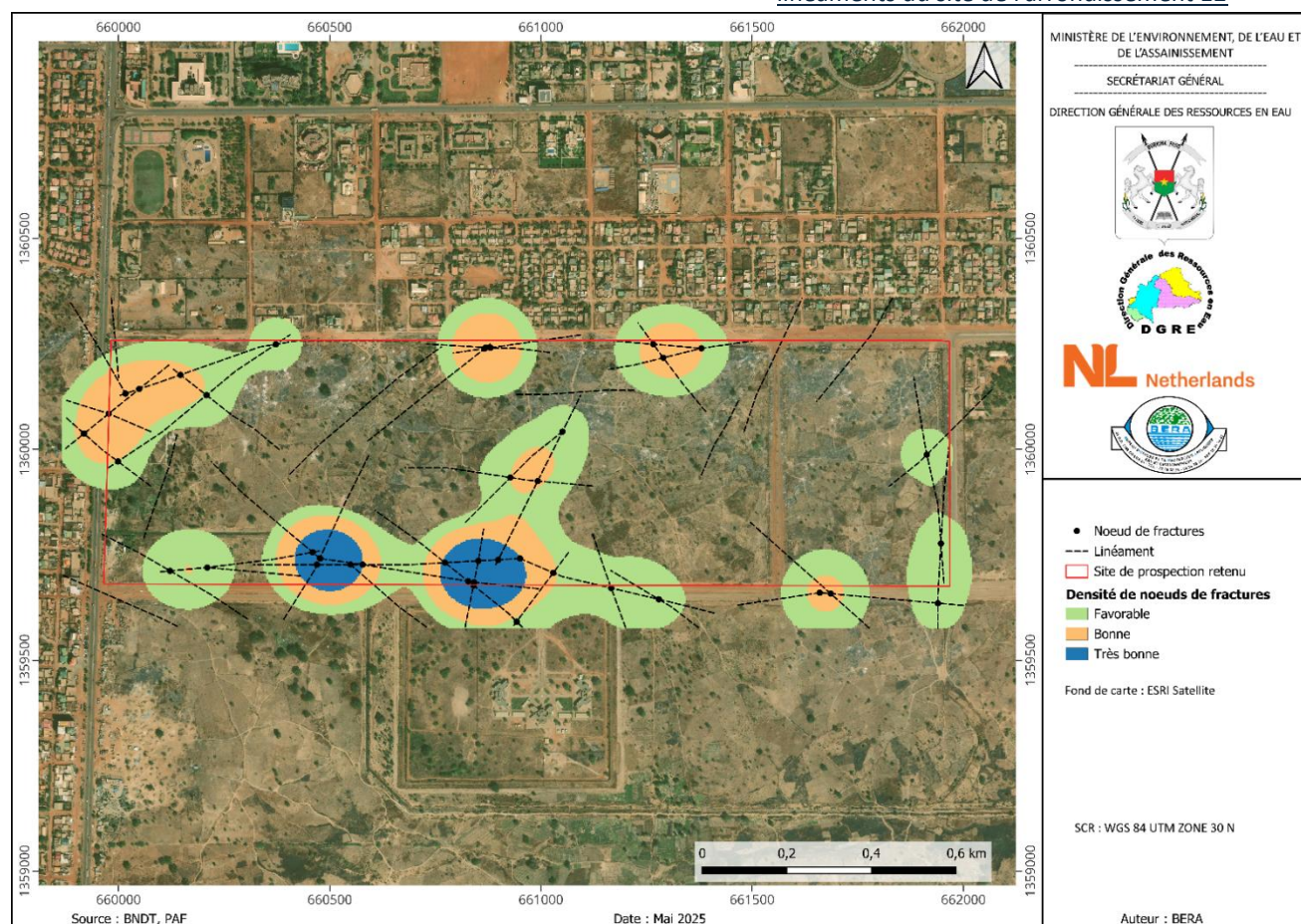


Figure 0-15 : Carte de fracturations du site de l'arrondissement 12

I.12.1.3. Propositions des directions des levées géophysiques

Dans le cadre d'une prospection géophysique utilisant la tomographie de résistivité électrique (ERT) et le VLF, l'orientation des profils est un paramètre stratégique. En règle générale, les profils doivent être orientés perpendiculairement aux principales structures tectoniques, c'est-à-dire aux linéaments dominants, afin de maximiser le contraste de résistivité entre les milieux fracturés et les zones intactes, et ainsi détecter les discontinuités structurales majeures.

Pour les sites présentant une orientation dominante unique (par exemple NNE-SSW à l'arrondissement 3 ou NE-SW à l'arrondissement 10), l'orientation optimale des profils est celle qui croise ces structures, c'est-à-dire WNW-ESE et NW-SE respectivement. En revanche, dans les cas où le réseau de fractures est orthogonal (arrondissements 4 et 11), une combinaison de profils selon les deux directions principales est recommandée, afin d'échantillonner la structure dans ses différentes composantes. Enfin, pour le site de l'arrondissement 12, caractérisé par un réseau radial et une forte densité de fractures multidirectionnelles, il est judicieux de mettre en œuvre un maillage croisé de plusieurs profils géophysiques (N-S, E-W, NE-SW), afin d'explorer l'ensemble des directions actives et de localiser les zones d'intersection les plus favorables.

Tableau 0-1 : Linéaments et directions préférentielles pour les profils géophysiques

Site	Densité	Direction dominante	Direction préférentielle pour les profils géophysiques
Arr. 3	Moyenne à forte	NNE-SSW / NW-SE	WNW-ESE
Arr. 4	Moyenne	N-S / E-W	E-W
Arr. 6	Forte (morcelée)	WNW-ESE	NE-SW
Arr. 10	Faible à modérée	NE-SW	NW-SE
Arr. 11	Moyenne	E-W / N-S	E-W et N-S
Arr. 12	Très forte	Radiale (N-S, E-W, NE-SW)	N-S, E-W et NE-SW

I.12.2. Prospection géophysique proprement dite

I.12.2.1. Matériel et méthode

Pour atteindre les objectifs fixés, deux méthodes ont été déployées :

- La méthode de tomographie de résistivité électrique ;
- La méthode électromagnétique très basse fréquence appelée en anglais « electromagnetic Very Low Frequency method » (EM – VLF).

I.12.2.1.1. Principe de la méthode de tomographie de résistivité électrique

La tomographie de résistivité électrique ou imagerie électrique permet d'étudier le changement de résistivité horizontalement et verticalement dans le but d'obtenir une image en 2D du sous-sol.

Le principe de la méthode consiste à injecter le courant électrique à travers deux électrodes et de mesurer la différence de potentiel entre une série de paires d'électrodes prédéfinies (séquence) selon une configuration donnée.

La Figure 0-16 montre le principe de déploiement du dispositif sur le terrain.

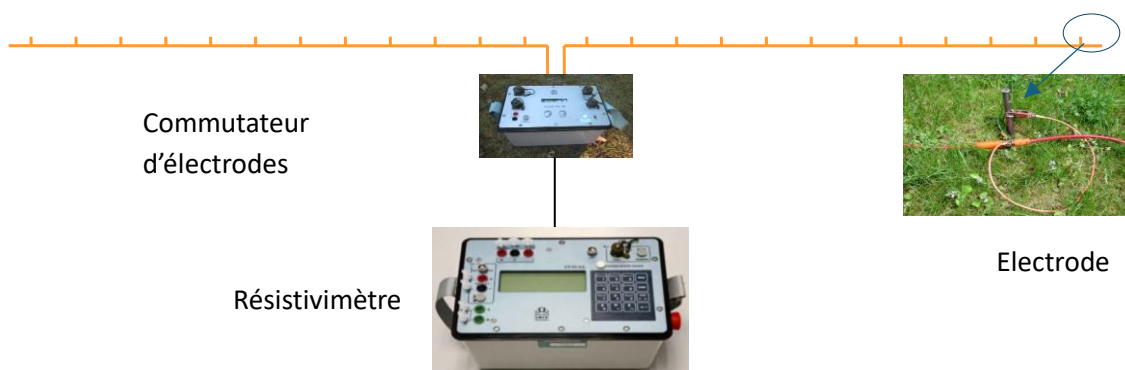


Figure 0-16: déploiement du dispositif sur le terrain

Les configurations sont choisies en fonction des objectifs à atteindre (résolution verticale, résolution horizontale, profondeur d'investigation...).

Les mesures acquises sur le terrain sont inversées et modélisées. Les résultats obtenus après inversion et modélisation sont donnés sous la forme d'une section de distribution des résistivités vraies du sous-sol. A partir de la distribution des résistivités du sous-sol, il est possible de déduire la nature des couches géologiques et/ou la présence éventuelle des structures géologiques.

La Figure 0-17 donne un exemple d'interprétation réalisée à partir de la section de distribution de résistivité électrique.

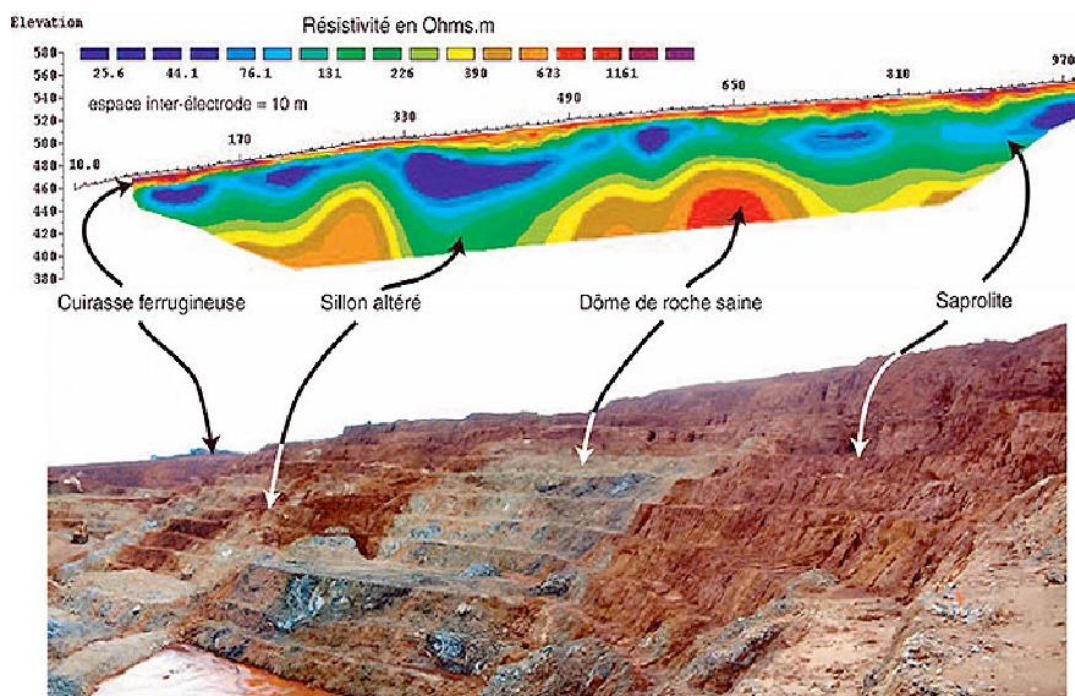


Figure 0-17 : Interprétation géologique d'une section 2D de distribution de résistivité électrique

1.12.2.1.2. Principe de la méthode électromagnétique très basse fréquence (EM-VLF)

Les stations de communication militaire disposées à travers plusieurs pays dans le monde émettent des ondes électromagnétiques (EM) comprenant deux composantes : un champ électrique vertical et un champ magnétique horizontal, parallèle à la surface du sol et perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde EM. Ces ondes se propagent à des très basses fréquences comprises entre 15 à 30 KHz.

A une très grande distance de la station, la composante magnétique (champ magnétique primaire) peut être considérée comme une onde plane. Ce champ se propage dans l'air et dans le sous-sol. En présence d'un corps conducteur dans le sous-sol, le champ magnétique primaire induit une différence de potentiel appelé « Eddy current » formant un champ électrique secondaire. Ces courants génèrent à leur tour un champ magnétique appelé champ magnétique secondaire en quadrature de phase avec le champ primaire et de faible amplitude. L'intensité de ce champ est fonction de la conductivité du sous-sol ou des structures géologiques enfouies.

La superposition de deux champs magnétiques (primaire et secondaire) donne un champ magnétique résultant qui forme une ellipse polarisée comme le montre la Figure 0-18. L'orientation de cette ellipse est aléatoire mais s'étend grandement dans la direction de propagation du champ primaire. Les paramètres d'intérêt sont :

- L'orientation de l'axe majeur de l'ellipse par rapport à l'horizontal (angle d'inclinaison ou tilt angle) ;
- Le rapport entre l'axe mineur et l'axe majeur de l'ellipse (ellipticité).

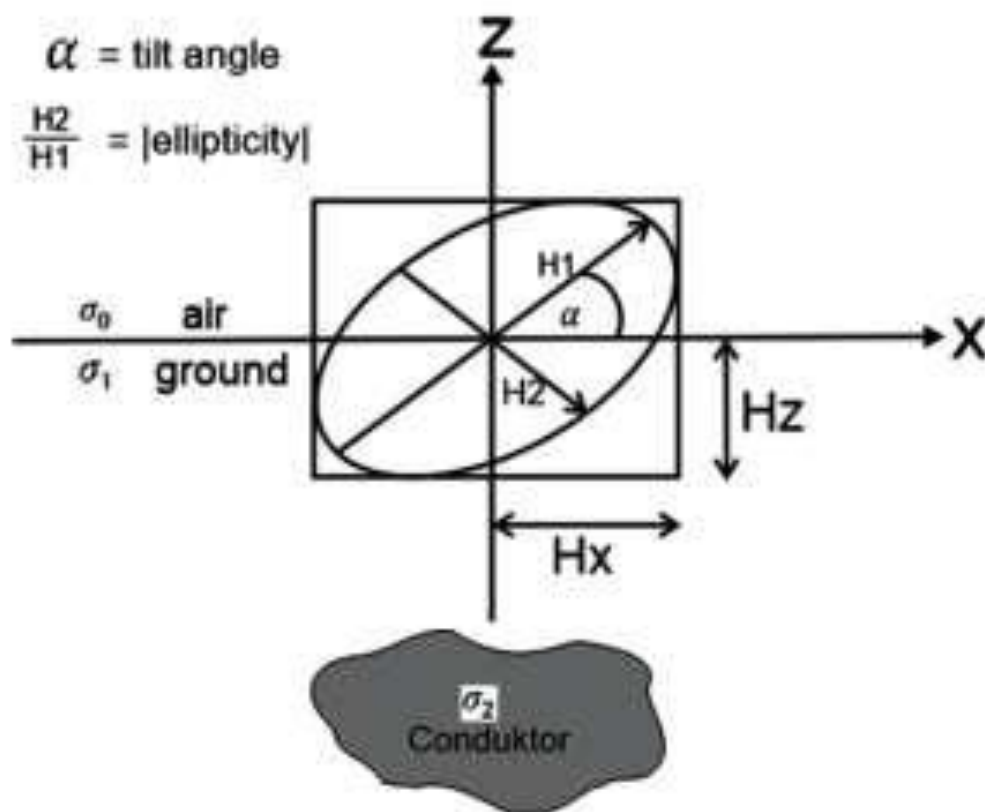


Figure 0-18 : Ellipse de polarisation dû à la présence d'un conducteur dans le champ magnétique

Ces deux paramètres sont équivalents à la partie réelle (In-phase) et la partie imaginaire (Out-phase) du champ secondaire.

En effet, à chaque point de mesure il est possible de donner un scalaire B défini par : $HS_z = B \cdot HS_y$ appelé en anglais « Tipper » avec HS_z , la composante verticale du champ secondaire et HS_y , la composante horizontale du champ secondaire.

Ce scalaire est un nombre complexe issu du retard de temps entre les composantes verticale et horizontale du champ secondaire dû au phénomène d'induction du champ électromagnétique. Sur une portion 2D du sous-sol, ce nombre varie le long du profil de mesure montrant une grande valeur dans les zones de forts contrastes de résistivité. Les parties réelle et imaginaire de ce scalaire dans le cas de la méthode VLF-EM sont mesurées en pourcentage du champ magnétique primaire.

1.12.2.1.3. La grille de mesures

La grille de mesures de levé géophysique a été réalisée à partir des cartes des linéaments (voir annexe 6) de chaque secteur concerné par le levé. Le Tableau 0-2 donne les coordonnées géographiques des différents profils levés par la méthode électromagnétique très basse fréquence. Ces profils ont été positionnés dans l'objectif de recouper le maximum de linéaments et de couvrir dans la mesure du possible les zones supposés potentiellement favorables du point de vue hydrogéologique.

Tableau 0-2 : Coordonnées géographiques des profils EM-VLF levés

Arrondissement	Profil	Coordonnées géographiques en UTM			
3		Début		Fin	
		x	y	x	y
3	1	655740,054	1372111,94	655741,96	1372344,02
	2	655685,975	1372059	655704,647	1372307,21
	3	655641,988	1372030	655657,049	1372322,99
	4	655545,049	1371980,92	655566,992	1372247,95
4	1	659978,175	1372068,43	659984,009	1372409,94
	2	659957,068	1372070,86	659939,075	1372316,78
	3	659930,62	1372075,8	659904,953	1372411,94
	4	659873,003	1372211,99	659876,977	1372417,98
	5	659848,044	1372223,02	659851,532	1372438,19
6	1	657359,242	1360379,97	657297,946	1360006,54
	2	657409,467	1360385	657346,347	1360007,02
	3	657458,128	1360377,63	657397,97	1359995,02
	4	657515,992	1360377,94	657445,366	1360000,47
	5	657563,379	1360364,7	657500,573	1359989,38
10	1	669283,048	1371735	669277,013	1372098,03
	2	669234,503	1371929,7	669224,986	1372107,02
	3	669193,303	1371723,08	669182,049	1372104,99
	4	669124,033	1371724	669134,858	1372067,77
11	1	667819,428	1361069,46	667785,927	1361239,62
	2	667786,959	1361040,95	667761,227	1361241,14
	3	667755,97	1361019,98	667723,965	1361232,96
	4	667723,985	1361021,01	667695,953	1361223,95
12	9	660457	1359676	660456	1359861
	8	660476	1359679	660480	1359865
	7	660513	1359680	660517	1359874
	6	660451	1359682	660552	1359864

Les profils de tomographie de résistivité électrique ont été positionnés après les résultats partiels de EM-VLF. L'objectif était de confirmer les anomalies (zones fracturées) détectées par cette dernière méthode. Trois profils de tomographie de résistivité électrique ont été planifiés sur chaque site.

Tableau 0-3 : Coordonnées géographiques des profils de tomographie de résistivité électrique levés

Arrondissement	Profil	Coordonnées géographiques en UTM			
3		Début		Fin	
		x	y	x	y
3	1	655742,96	1372340,05	655734,959	1371987,8
	2	655734,959	1371987,8	655681,272	1371942,71
	3	655651,973	1372316,66	655650,735	1371960,14
4	1	660002,645	1372323,32	659944,381	1371985,95
	2	659942,771	1371982,07	659938,305	1371963,79
6	5	657561,965	1360364,8	657503,389	1360011,85
	4	657511,677	1360371,39	657446,549	1360023,04
	3	657459,989	1360375,43	657402,372	1360026,01
10	1	669239,468	1371563,5	668958,796	1371474,8
11	1	667827,772	1361055,9	668005,953	1360751,5
	2	667786,025	1361090,06	667932,342	1360765,23
12	1	660215,903	1359767,51	660565,848	1359685,36

Tous les profils planifiés pour les levés électromagnétiques très basse fréquence et par la méthode de tomographie de résistivité électrique sont plus ou moins de direction Nord – Sud.

I.12.2.1.4. Les paramètres de mesures

I.12.2.1.4.1. Paramètres de mesures de la méthode de tomographie de résistivité électrique

Les paramètres suivants ont été utilisés :

- Pas de mesure : cinq (05) mètres
- Configuration : Wenner
- Nombre d'électrodes du système utilisé : soixante-douze (72)

I.12.2.1.4.2. Paramètres de mesure de la méthode électromagnétique très basse fréquence

Le déploiement de la méthode électromagnétique très basse fréquence a été réalisé en utilisant les paramètres suivants :

- Fréquence de la station : 23,4 khz ;
- Pas de mesure : 5 mètres.
- Distance entre les profils : variable

I.12.2.1.5. Equipement utilisé

I.12.2.1.5.1. Equipement de tomographie de résistivité électrique

L'étude géophysique a été réalisée en utilisant le matériel suivant, comme le montre la Figure 0-19.

- Un (01) Syscal Switch Pro 72 ;
- Quatre flûtes (câbles) électriques recevant chacun dix-huit électrodes avec des sorties tous les cinq (05) mètres ;
- Un (01) lot d'accessoires : soixante-douze (72) électrodes, fils de contact, marteaux, batterie comme source d'énergie ;
- Un (01) ordinateur de terrain ;
- Un GPS.

I.12.2.1.5.2. Equipement de levé électromagnétique très basse fréquence

Le déploiement a été réalisé en utilisant le système électromagnétique Wadi composé de trois unités :

- Unité de contrôle ;
- L'antenne ;
- Le système contrôle ;
- Un ordinateur de terrain.



Figure 0-19 : Déploiement sur le terrain de l'équipement de tomographie de résistivité électrique (Syscal Switch Pro 72)

I.12.2.2. Traitement et interprétation des données

I.12.2.2.1. Traitement des données

I.12.2.2.1.1. Traitement des données de tomographie de résistivité électrique

Le traitement des données brutes acquises sur le terrain s'est fait en trois étapes :

- Etape 1 : Contrôle de qualité des données, il a été réalisé à l'aide du logiciel Prosys II de la société Iris instruments. Il consiste à éliminer les données erronées de la série des mesures pouvant impacter sur les résultats et les modèles de distribution de résistivité finaux ;
- Etape 2 : Inversion et modélisation des données contrôlées ; les données contrôlées ont été inversées et modélisées en utilisant le logiciel RES2DINV de la société SEEQENT. Les données topographiques ont été intégrées dans l'inversion afin de tenir compte du relief de la zone.
- Etape 3 : Modélisation géologique des sections inversées ; les données inversées sont traitées à l'aide du logiciel SURFER pour obtenir un modèle géologique.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de section de distribution de résistivité électrique 2D et sous forme de modèle géologique du sous-sol.

La Figure 0-20 montrent les sections 2D de distribution de résistivité électrique et des modèles géologiques des profils réalisés sur le site du secteur 4. Les résultats des profils des autres secteurs sont situés en annexes.

Les différentes couleurs indiquent l'intervalle des valeurs de résistivité électrique. La couleur bleue représente de faibles résistivités électriques et la couleur rouge foncé représente de fortes valeurs de résistivités électriques.

I.12.2.2.1.2. Traitement des données électromagnétiques très basse fréquence

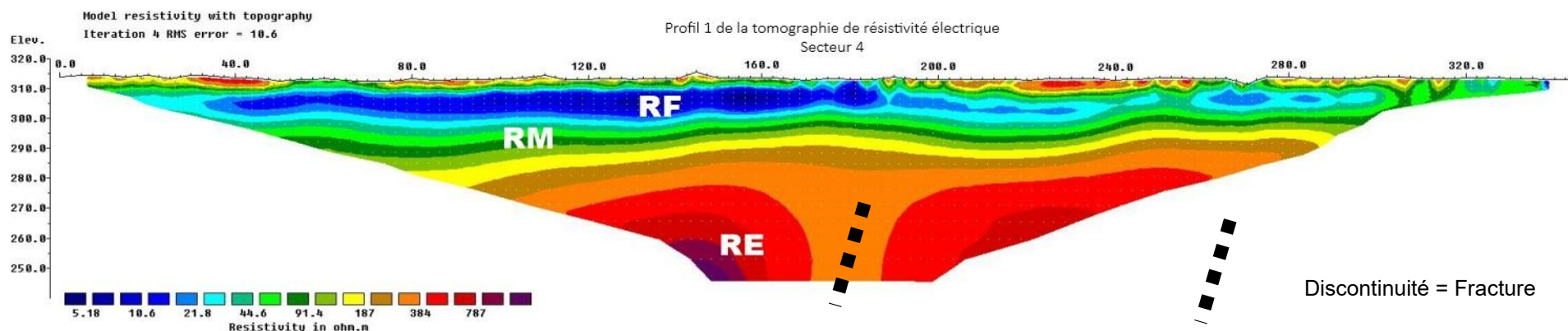
Les données brutes du levé électromagnétique très basse fréquence ont été traitées en deux étapes :

- Etape 1 : Filtrage des données brutes par la méthode de Fraser à l'aide du logiciel RAMAG. Cette opération consiste à transformer les points d'inflexion des courbes des valeurs brutes situés à l'aplomb des anomalies en pics (fortes amplitudes). Les données filtrées sont représentées sous forme de courbes In-phase et Out-phase et/ou sous forme de section 2D de distribution de densité de courant (du paramètre In-phase) du sous-sol
- Etape 2 : Etablissement des cartes d'iso valeurs (carte de distribution de densité de courant) en combinant plusieurs profils parallèles à l'aide du logiciel RockWorks.

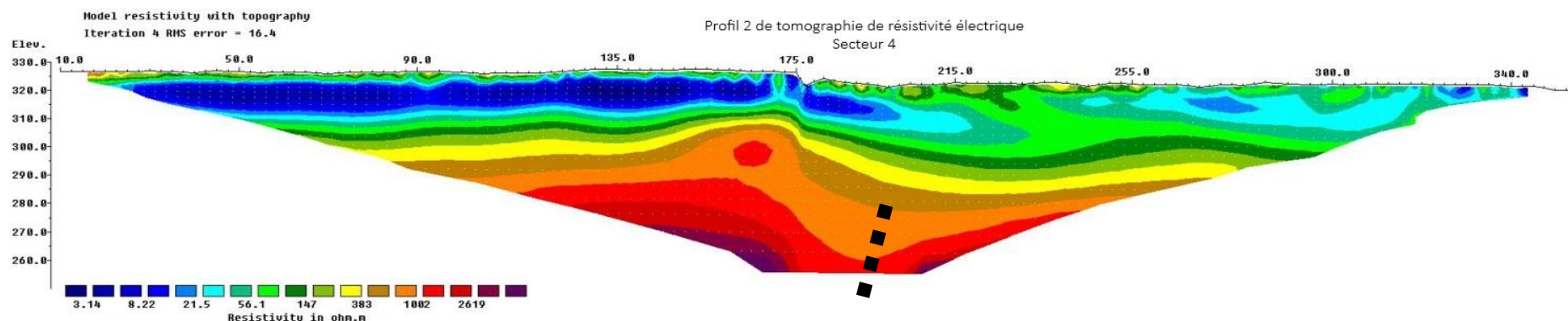
Les valeurs de densité de courant du paramètre In-phase traduit la conductivité du sous-sol. Ainsi à partir de la section ou de la carte In-phase, il est possible de localiser les corps géologiques conductrices et résistantes. Les structures géologiques conductrices sont représentées par des zones de fortes valeurs de densité de courant In-phase (couleur rouge) par contre les structures géologiques résistantes sont représentées par les faibles valeurs (couleur bleue) au niveau de la section ou de la carte In-phase. La Figure 0-21 montre la carte obtenue après traitement des données acquises sur cinq (05) profils réalisés sur site de l'arrondissement 4. Les cartes des autres arrondissements sont situées en annexe. Cette carte est en coordonnées locales (Y : distance parcourue sur un profil et X : distance entre les profils).

I.12.2.2.2. Interprétation des données

Cette section concerne l'interprétation globale des levés de six sites prospectés. Les résultats de tous les sites sont présentés en annexe. L'interprétation des cartes des données électromagnétiques très basse fréquence filtrées est purement qualitative. Elle permet de déterminer la position et l'extension des zones conductrices (couleur allant de jaune à orange ou rouge) supposées être des zones fracturées et susceptibles de constituer des aquifères du socle.



(a)



(b)

Figure 0-20 : Sections 2D de distribution de résistivité électrique obtenue après inversion des données brutes corrigées à l'aide du logiciel Res2DInv. (a) : Profil 1 ; (b) : profil 2

(b)

Carte de distribution de la conductivité du sous-sol

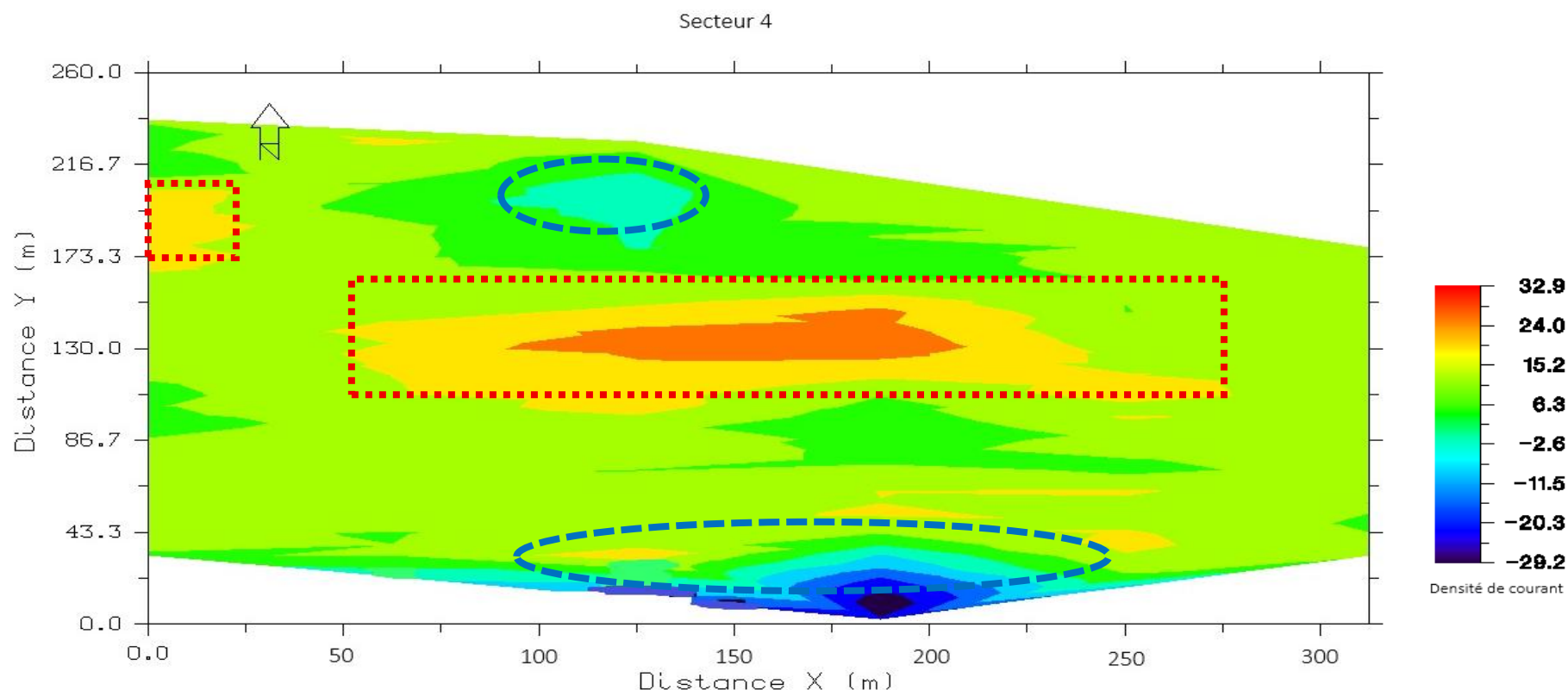


Figure 0-21 : carte de distribution de densité de courant du paramètre In-phase traduisant la distribution de la conductivité du sous-sol sur le site de l'arrondissement 4

Au niveau de la carte EM-VLF de l'arrondissement 4, on note deux anomalies conductrices : une petite anomalie au Nord-Ouest et une grande anomalie plus importante au centre allant de l'Est vers l'Ouest. Au sud de la carte, on observe des petites anomalies conductrices moins significatives et aussi un corps résistant (bleu ciel ou bleu foncé) qui peut être une intrusion.

Les deux sections montrent chacune une discontinuité (fracture) dans le socle entre 45 et 50 mètres de profondeur. Ces discontinuités sont situées entre les positions 180 et 200 mètres pour la première section (Profil 1) et entre les positions 195 et 215 mètres pour la deuxième section (Profil 2).

L'interprétation des données traitées des autres arrondissements sont récapitulées dans le Tableau 0-4 ci-dessous :

Tableau 0-4 : Interprétation des données

Arrondissement	Anomalie carte EM-VLF et zone d'implantation des forages positifs	Présence de discontinuité sur la section de tomographie de résistivité électrique
3	- Une zone conductrice au Nord-Est avec extension au centre (zone d'implantation des forages positifs)	Sur les trois profils entre les positions 160 et 180 mètres
6	- Trois anomalies conductrices : deux au Nord-Est et une au Sud-Est (zone d'implantation des forages positifs) - Un corps résistant au centre qui traverse toute la zone d'Est à l'Ouest	
10	- Une anomalie conductrice au Sud-Est (zone d'implantation des forages positifs) - Un corps résistant au Sud-Est en dessous de l'anomalie conductrice	
11	- Deux zones conductrices : une qui traverse la zone au centre de l'Est à l'Ouest et une au Sud-Ouest (zone d'implantation des forages positifs) - Un important corps résistant qui entoure l'anomalie conductrice centrale	Au niveau du profil 2 à la position 200 mètres
12	- Deux anomalies conductrices : une au Nord-Est et l'autre au Sud-Ouest (zone d'implantation des forages positifs) - Un corps résistant qui traverse la zone de l'Est à l'Ouest au-dessus de l'anomalie conductrice située au Nord-Est	Présence de discontinuité à 190 mètres

I.12.3. Modèles hydrogéologiques conceptuel

Les sections 2D inversée de la tomographie de résistivité électrique de la même zone, donnent un modèle géologique à trois couches :

- Couche RF (résistivité faible) : argile et/ou latérite (saprolite) qui peuvent un intérêt hydrogéologique pour l'exploitation de la nappe superficielle ;
- Couche RM (résistivité moyenne) : zone de transition entre l'altération et le socle ;
- Couche RE (résistivité élevée) : socle sain. La profondeur du socle varie entre 25 et 35 mètres.

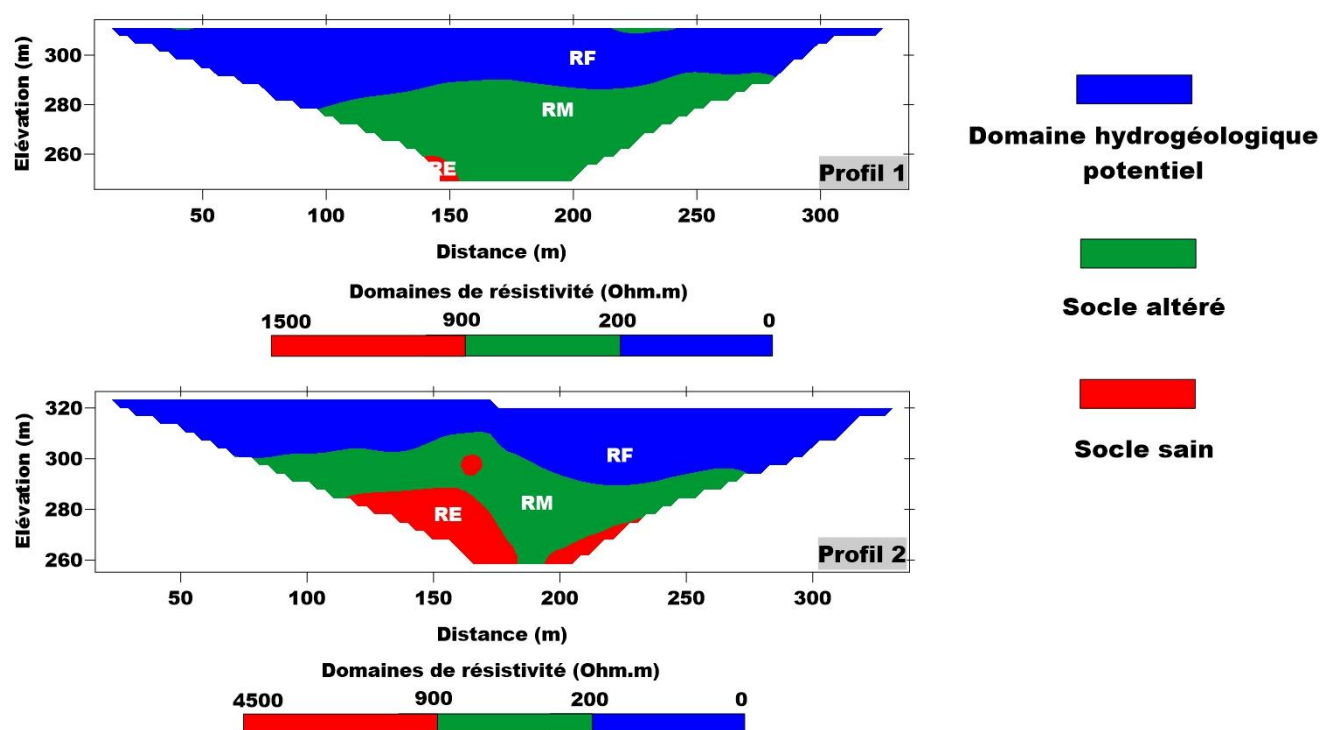


Figure 0-22 : Modèles géologiques des deux sections inversées des profils 1 et 2 de l'arrondissement 4

Tableau 0-5 : Récapitulatif du modèle conceptuel

Arrondissement	Modèle conceptuel
3	- Trois couches avec la présence d'une couche résistante au-dessus (cuirasse) - Profondeur du socle à environ 30 mètres
6	- Trois couches - Profondeur du socle entre 20 à 25 mètres
10	- Trois couches avec la présence d'une couche résistante au-dessus (cuirasse) - Profondeur du socle à environ 35 mètres
11	- Trois couches, l'altération présente un grand intérêt avec la présence de nombreux puits - Profondeur du socle entre 20 à 25 mètres
12	- Trois couches - Profondeur du socle entre 25 à 30 mètres

Les modèles réalisés sur la base de la géophysique sont en accord avec les données de la littérature résumées dans la partie ci-dessous. Comme présenté plus haut, la région du centre repose sur des

formations cristallines et cristallophylliennes d'âge paléoprotérozoïque, essentiellement composées de granitoïdes injectés de filons de quartz, pegmatites et dolérites (Wenmenga, 1986; C. CASTAING et al., 2003 ; Ouandaogo-Yameogo, 2008). Ces formations sont affectées par un réseau de fractures majeures orientées selon plusieurs directions (N-S, NE-SW, NW-SE), qui jouent un rôle essentiel dans la circulation des eaux souterraines.

Le socle est recouvert par un manteau d'altération dont l'épaisseur peut atteindre 40 mètres, constitué principalement d'altérites argileuses, de latérites et de cuirasses latéritiques (Ouandaogo-Yameogo et al., 2013). Ce manteau d'altération est à l'origine de la formation des aquifères superficiels et intermédiaires. Les études hydrogéologiques menées depuis plusieurs décennies ont permis de caractériser deux grands systèmes aquifères superposés dans le socle cristallin de Ouagadougou (Compaore, 1997 ; Courtois et al., 2010 ; Faillat, 1987 ; Savadogo, 1984).

Le premier, dit aquifère superficiel, est constitué par la cuirasse latéritique et les altérites argileuses qui forment un horizon poreux à surface libre. Cet aquifère est capté par de nombreux puits traditionnels peu profonds (3 à 15 m), dont la ressource est fortement dépendante des précipitations et très vulnérable à la pollution d'origine urbaine et domestique (Ouandaogo-Yameogo et al., 2013). La qualité de l'eau y est souvent dégradée, avec des teneurs en nitrates dépassant les normes de l'OMS dans près de 60 % des cas, en raison notamment de la proximité des latrines et rejets non traités (Ouandaogo-Yameogo, 2008).

Le second système, plus profond et souvent captif, est constitué par les arènes grenues et le socle fissuré sous-jacent, séparés du premier par un aquitard argileux. Cet aquifère profond est exploité par des forages relativement profonds, fournissant des débits plus importants et une eau de meilleure qualité (Dewandel et al., 2006 ; Ouandaogo-Yameogo et al., 2013). La recharge de cet aquifère est plus lente et souvent indirecte, via des infiltrations localisées à partir des mares et marigots, avec un temps de transfert pouvant s'étendre sur plusieurs années voire décennies.

La Figure 0-23 montre que l'étude des coupes lithologiques de forages, permet une caractérisation précise des différents horizons aquifères superposés dans la zone de Ouagadougou. Ces données confirment la prédominance géologique de formations granitoïdes injectées de filons de quartz et de pegmatite, caractéristiques du socle cristallin ouest-africain (Dewandel et al., 2006 ; Ouandaogo-Yameogo, 2008).

Les profils de forage révèlent un manteau d'altération dont l'épaisseur varie localement de 0 à 40 mètres, composé essentiellement d'une matrice argileuse à faible perméabilité. Ce manteau constitue la zone d'altération des roches massives et joue un rôle crucial dans la formation des horizons aquifères superficiels. La présence d'une composante argileuse importante confère à cette zone une porosité interstitielle notable mais limite la perméabilité effective, ce qui influence directement la dynamique de recharge et la transmissivité des eaux souterraines (Machard, 2017).

Les coupes de forages permettent de distinguer trois horizons aquifères principaux, superposés et différenciés par leurs caractéristiques lithologiques et hydrodynamiques (Figure 0-23) :

Constitués du recouvrement quaternaire, ces horizons regroupent des argiles grises, des latérites et une cuirasse latéritique, ainsi que des arènes argileuses fines. Ces formations, exploitées traditionnellement par des puits à grand diamètre et des puisards, représentent des nappes à surface

libre. Leur profondeur est généralement faible, comprise entre 3 et 15 mètres, ce qui les rend particulièrement sensibles aux variations climatiques saisonnières et aux impacts anthropiques, notamment la pollution urbaine. Ces aquifères superficiels fournissent souvent des ressources temporaires, fortement dépendantes des précipitations (Ouandaogo-Yameogo et al., 2013).

- **Les horizons superficiels des altérites**

Cette couche, issue de l'altération mécanique et chimique de la roche mère, est caractérisée par une dominance argileuse qui lui confère une porosité interstitielle significative mais une perméabilité modérée à faible. Lorsqu'elle est saturée, cette formation joue un rôle de réservoir important, assurant une capacité de stockage non négligeable au sein du système aquifère régional. La nature fluente et granulaire des arènes favorise une certaine mobilité de l'eau, bien que limitée par la matrice argileuse environnante (Dewandel et al., 2006).

- **La frange sous-jacente formée d'arènes fluentes et grenues**

Le dernier horizon, le plus profond, est constitué de granite fracturé sur plusieurs dizaines de mètres. La présence de fissures et de diaclases, souvent injectées de filons de pegmatite, augmente significativement la perméabilité et la productivité de cet aquifère. La fréquence des fractures tend à diminuer avec la profondeur, ce qui limite la transmissivité dans les couches les plus basses. Ce niveau est généralement atteint par la majorité des forages profonds réalisés dans la région de Ouagadougou. Il est considéré comme l'aquifère principal d'exploitation en raison de ses débits plus élevés et de la meilleure qualité de l'eau (Dewandel et al., 2006 ; Ouandaogo-Yameogo, 2008).

- **Le socle fissuré**

Cette stratification lithologique correspond à deux nappes principales : une nappe supérieure, capacitive, correspondant à la cuirasse latéritique saturée, et une nappe inférieure, transmissive, regroupant les arènes et le socle fissuré. Ces deux nappes présentent des comportements hydrodynamiques distincts, avec une vulnérabilité accrue et une recharge rapide pour la nappe superficielle, et une recharge plus lente mais une meilleure productivité pour la nappe profonde (Machard, 2017).

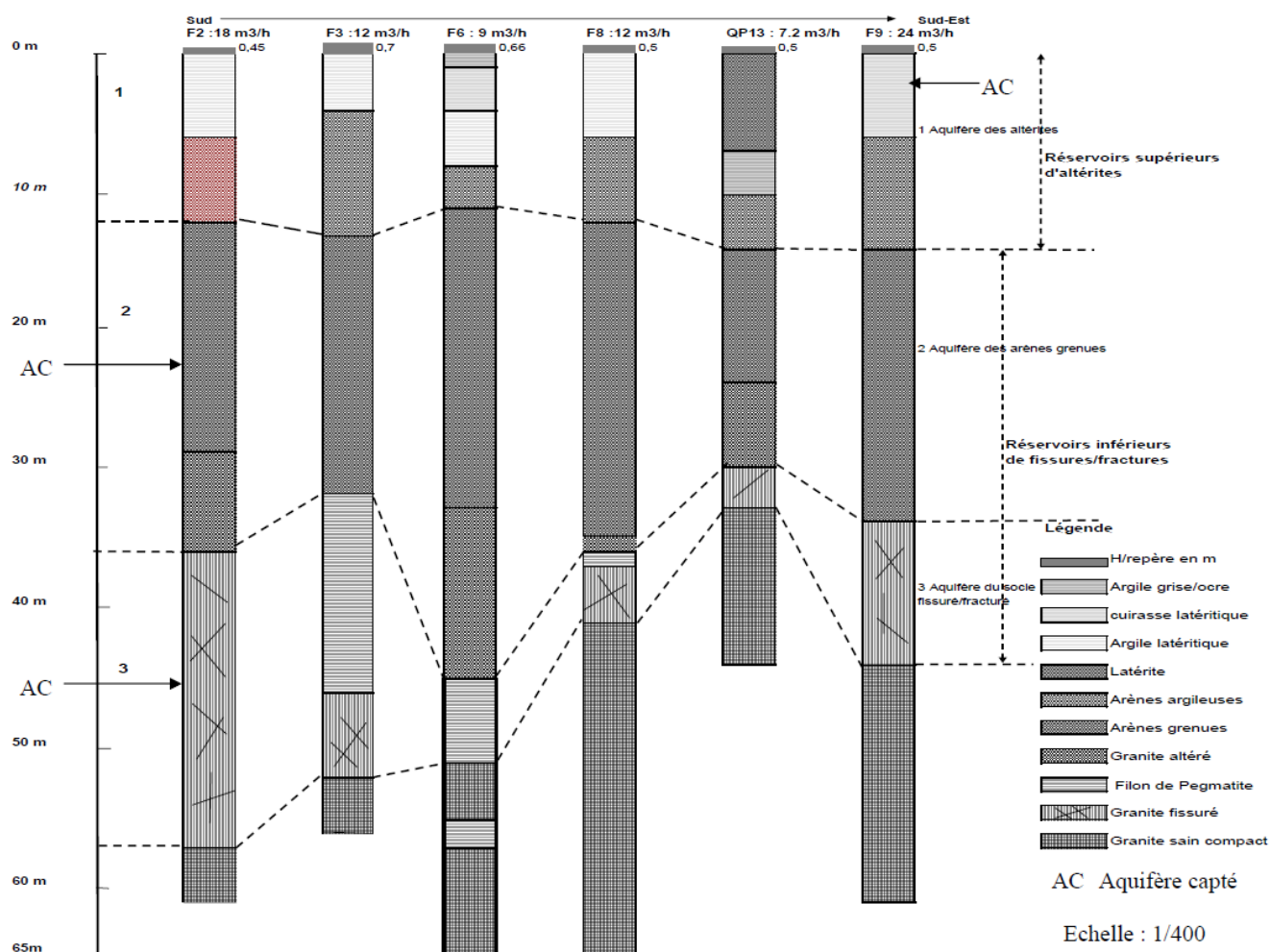


Figure 0-23 : Coupes types de forages de Ouagadougou avec corrélations litho stratigraphiques (Ouandaogo-Yameogo, 2008)

I.13. Ouvrages hydrauliques recensés et capitalisation des données

Les ressources en eau souterraine au Burkina Faso peuvent être évaluées de manière approfondie grâce à plusieurs bases de données de forages clés. Parmi celles-ci, la base de données du Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB), la base de données des Ouvrages de Mobilisation des Eaux Souterraines (BD-OMES), ainsi que le Réseau Piézométrique National (RPN) de la Direction de l'Eau et de l'Information sur l'Eau (DEIE) se distinguent par leur richesse. De plus, les informations de la base de données BEWACO ont permis d'enrichir les données collectées. Une collecte de données sur les forages a également été réalisée, et ces informations ont été intégrées dans notre étude.

À l'échelle de la région du centre, en données brutes, la base de données BEWACO compte 895 ouvrages, tandis que la BD-OMES-BUMIGEB en recense 1183 et l'ensemble des forages diverses 134. Une analyse exploratoire des données pertinentes ayant des coordonnées géographiques et relatives aux variables d'intérêt dans ces bases de données est présentée dans le Tableau 0-6. Il convient de souligner que certaines informations se retrouvent en double au sein des différentes bases ou dans la même base de données. La première étape de notre traitement a consisté à fusionner ces bases de données tout en supprimant les doublons identifiés. De plus, un nettoyage des valeurs aberrantes a été effectué, en particulier pour les débits et les niveaux statiques négatifs, nuls ou inexistantes, les

profondeurs nulles ou celles inférieures à l'épaisseur d'altération, entre autres. Ces données sont jugées suffisamment robustes pour permettre la poursuite de certaines analyses. Cependant, il est à noter que les paramètres hydrodynamiques tels que la conductivité hydraulique, la transmissivité, le coefficient d'emménagement et le débit spécifique ne sont disponibles que pour les piézomètres du RPN.

Tableau 0-6 : Résumé des données de forages à l'échelle de la région du centre

Base de données	Nombre d'ouvrages base brute	Principales données valorisées
BD-OMES_BUMIGEB	1183	Débits
		Profondeurs d'altération
		Niveau statique
		Profondeur ouvrage
		Lithologie/géologie
BEWACO	895	Profondeur ouvrage
		Altération
		Niveau statique
		Débit
Forages thèse Suzanne OUANDAOGO/YAMEOGO 2008	193	Profondeur ouvrage
		Altération
		Niveau statique
		Débits
RPN de DEIE	6	Profondeurs forées
		Débit de foration
		Chronique de niveau d'eau
		Lithologie
		Transmissivités
		Coefficient d'emménagement

I.14. Caractéristiques hydrogéologiques des aquifères de la région du centre

Les caractéristiques essentielles des aquifères de la région du centre en général et de la CVO en particulier sont présentées dans les sections suivantes. Ces données ont été capitalisées à partir des bases de données consolidées, principalement celles de l'OMES, du BUMIGEB, de BEWACO et de la DEIE, ainsi que des rapports d'études relatifs aux unités hydrogéologiques en question.

I.14.1. Géométrie des aquifères et niveau de nappes

La géométrie des aquifères a été définie en se basant sur les données relatives aux profondeurs des forages et aux épaisseurs d'altération. En l'absence d'informations détaillées sur les profondeurs des différents horizons hydrogéologiques, ces paramètres constituent les seules références disponibles pour caractériser la géométrie des aquifères. Les niveaux de nappes quant à eux se basent sur les niveaux d'eau dans les bases de données.

I.14.1.1. Aquifères des altérites

Les aquifères d'altération sont des formations hydrogéologiques, où l'eau est stockée et circule principalement dans la zone altérée des roches massives. Cette zone d'altération développe une porosité et une perméabilité suffisantes pour constituer un réservoir d'eau souterraine exploitable.

Les statistiques présentées dans le Tableau 0-7 concernent un ensemble de 22 forages pour les profondeurs et épaisseurs d'altération, ainsi que 19 forages pour les niveaux statiques.

Les profondeurs de forages varient de 19 m à 56 m, avec une moyenne de 39,8 m et une médiane proche à 41 m, indiquant une distribution relativement symétrique. La variabilité modérée est confirmée par un coefficient de variation de 28 %, et les percentiles P10 et P90 situent 80 % des forages entre 20,4 m et 54,6 m.

Les épaisseurs d'altération s'étendent de 15 m à 51 m, avec une moyenne de 37,7 m et une médiane de 40 m, traduisant également une répartition équilibrée des données. La variabilité est similaire à celle des profondeurs, avec un CV de 27 % et une majorité des valeurs comprises entre 20,4 m (P10) et 49,7 m (P90).

Concernant les niveaux statiques, les valeurs vont de 6,5 m à 27,3 m, avec une moyenne de 14,7 m et une médiane légèrement inférieure à 13,2 m, suggérant une légère asymétrie vers des niveaux plus élevés. La variabilité est plus importante avec un CV de 38 %, et 80 % des niveaux se situent entre 8,4 m et 21,5 m.

Ces résultats montrent que les profondeurs de forages et épaisseurs d'altération présentent des distributions symétriques et une variabilité modérée, tandis que les niveaux statiques sont plus dispersés, ce qui reflète probablement des différences locales dans les conditions hydrogéologiques.

Tableau 0-7 : Profondeur des forages, épaisseur d'altération et profondeur de niveau statique des aquifères d'altération de la région du centre

	Profondeur forages (m)	Épaisseur altération (m)	Niveau statique (m)
Nombre forages	22	22	19
Minimum	19,0	15,0	6,5
Moyenne	39,8	37,7	14,7
Maximum	56,0	51,0	27,3
Écart-type	11,0	10,1	5,6
CV (%)	28 %	27 %	38 %
P10	20,4	20,4	8,4
Médiane	41,0	40,0	13,2
P90	54,6	49,7	21,5

La Figure 0-24 présente les principales statistiques descriptives relatives aux profondeurs de forages, épaisseurs d'altération et niveaux statiques d'eau dans les aquifères d'altération de la région du centre. Pour chaque paramètre, les valeurs minimales, maximales, moyennes, médianes ainsi que les percentiles P10 et P90 sont représentés, permettant de caractériser la distribution des données et d'identifier les tendances générales.

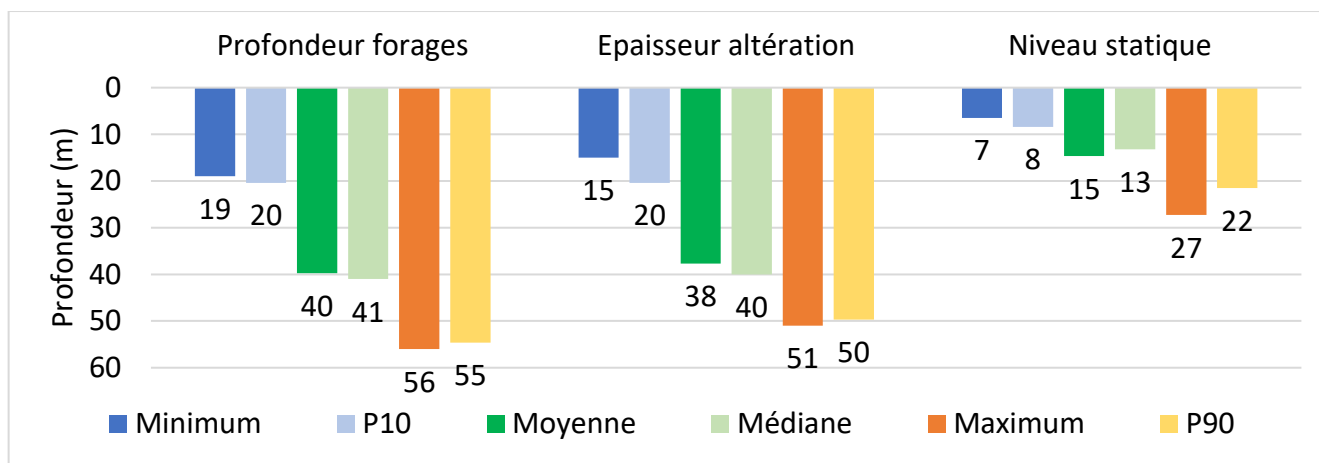


Figure 0-24 : Statistique des profondeurs de forages, épaisseur d'altération et profondeur de niveau statique des aquifères d'altération de la région du centre

Pour ce qui concerne la profondeur des forages, la moyenne enregistrée est de 55 m, tandis que la médiane atteint 41 m. Cette différence suggère une légère dissymétrie dans la répartition des profondeurs, mais la moyenne reste globalement représentative de l'ensemble des données. Les valeurs extrêmes varient de 19 m à 56 m. Les percentiles indiquent que 10 % des forages ont une profondeur inférieure à 20 m, alors que 90 % ne dépassent pas 55 m, ce qui montre que la majorité des forages se concentrent dans une plage relativement étroite autour de la moyenne. La distribution spatiale des profondeurs de forages est présentée dans la figure ci-dessous.

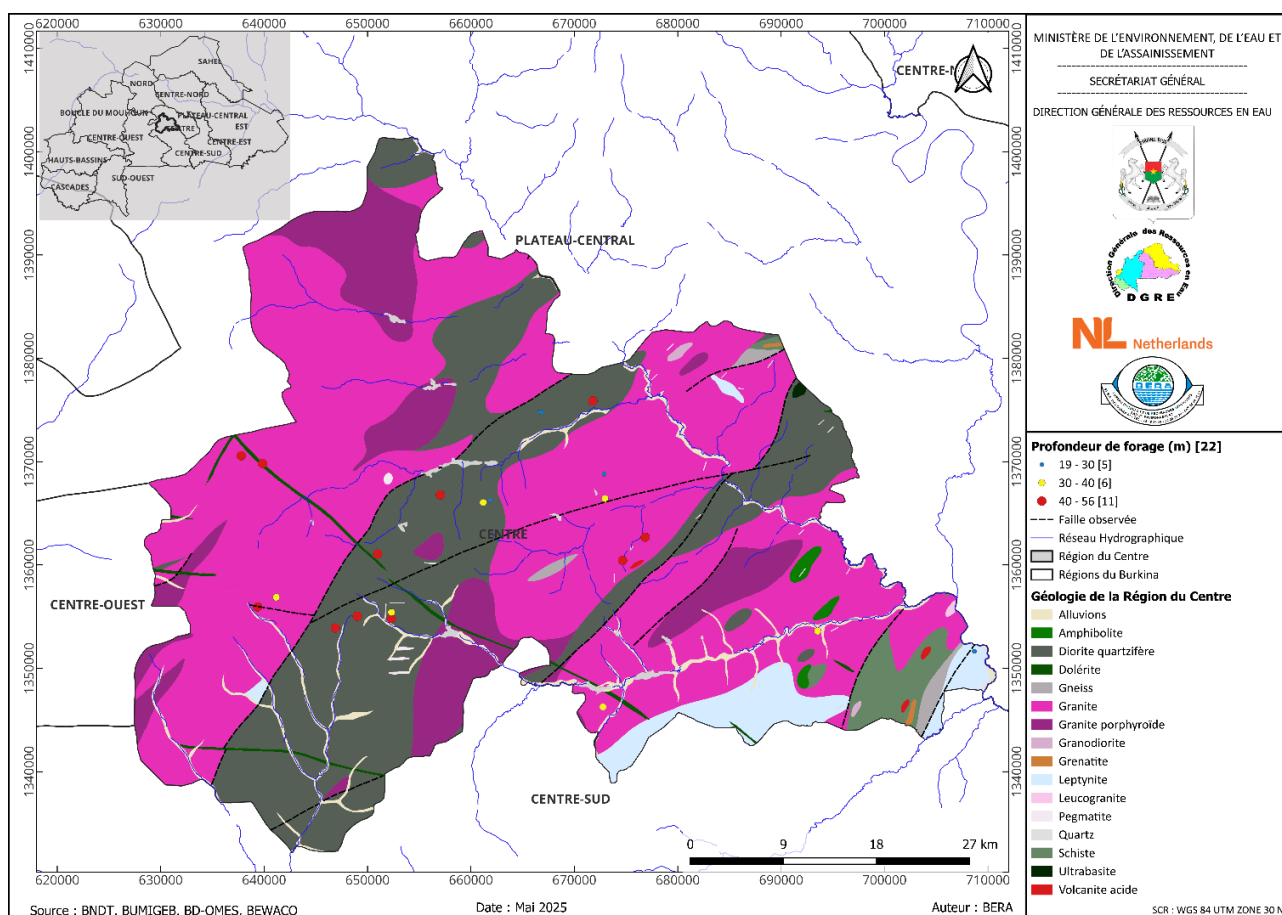


Figure 0-25 : Distribution spatiale des profondeurs des forages des aquifères d'altération de la région du Centre

En ce qui concerne l'épaisseur d'altération, la moyenne (38 m) et la médiane (40 m) sont très proches, ce qui traduit une distribution assez équilibrée. Les valeurs oscillent entre 15 m et 51 m, avec 80 % des mesures comprises entre 20 m (P10) et 50 m (P90). Cette homogénéité suggère une certaine régularité du processus d'altération dans la zone étudiée.

Pour le niveau statique de la nappe, la moyenne est de 15 m, la médiane de 13 m, et les valeurs s'étendent de 7 m à 27 m. Les percentiles montrent que 10 % des niveaux sont inférieurs à 8 m, tandis que 90 % ne dépassent pas 22 m, ce qui indique une variabilité modérée des niveaux d'eau souterraine. La distribution spatiale des profondeurs de niveaux statiques des forages est présentée dans la figure ci-dessous.

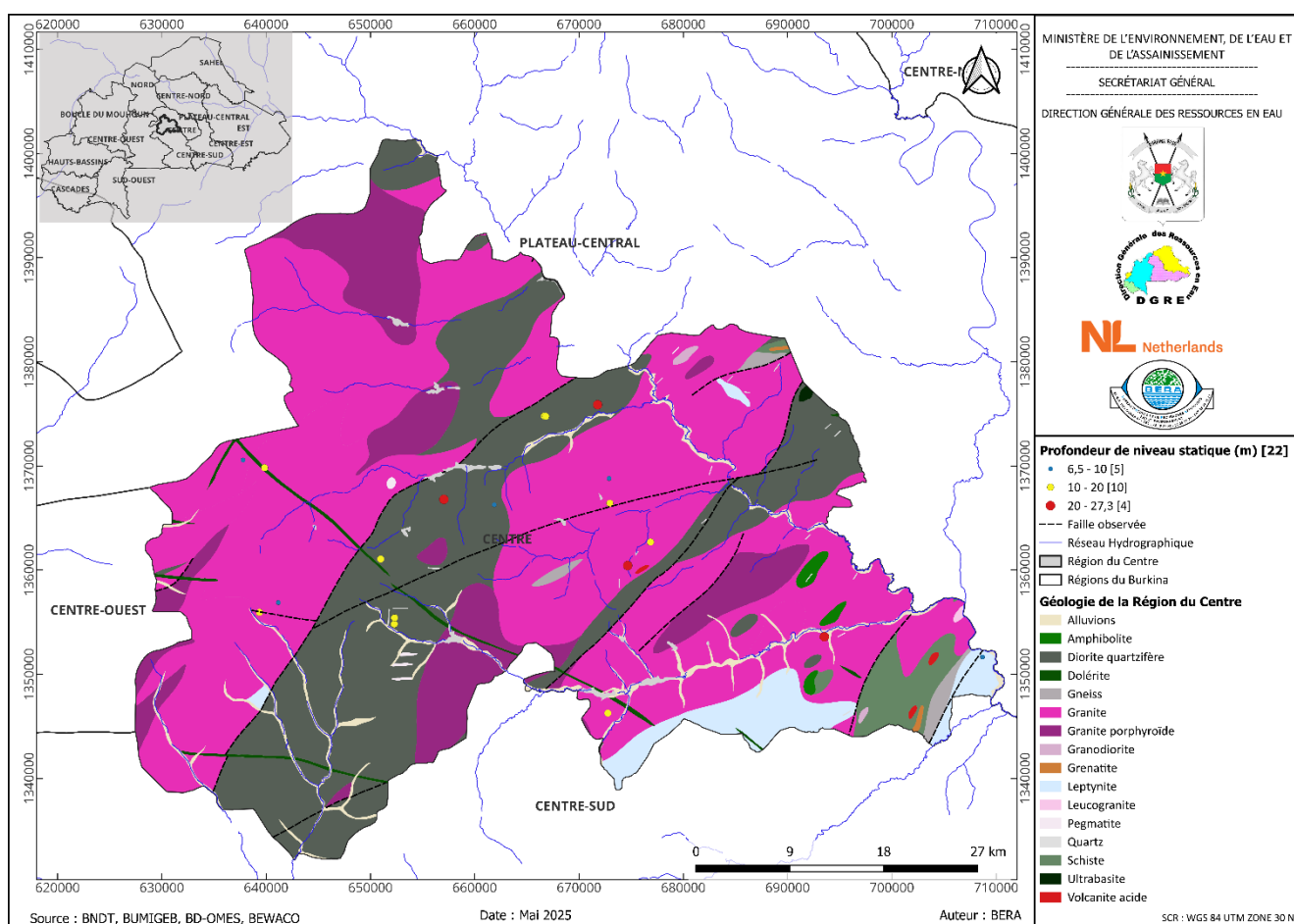


Figure 0-26 : Distribution spatiale des profondeurs de niveaux statiques des forages des aquifères d'altération de la région du Centre

La proximité entre les moyennes et les médianes pour l'ensemble des paramètres témoigne de la fiabilité des moyennes pour décrire les caractéristiques de ces aquifères. Les intervalles définis par les percentiles permettent de mieux cerner la répartition des valeurs, ce qui constitue un atout pour la planification de nouveaux forages et l'évaluation du potentiel en eau souterraine.

I.14.1.2. Aquifères de fractures

Les aquifères fracturés sont des formations géologiques où l'eau est principalement stockée et transmise à travers des fractures dans la roche consolidée. Dans le cadre de cette étude, les aquifères

de fractures font référence aux forages dont la profondeur de foration dans le socle est supérieure à 5 m.

Les statistiques relatives aux données de profondeur des forages, d'épaisseur d'altération et de niveau des nappes sont présentées dans le Tableau 0-8. Il est à noter que tous les forages recensés se trouvent au sein des formations granitoïdes. Toutefois, il convient de mentionner que certaines informations ne sont pas disponibles pour l'ensemble des forages.

Au total, 1055 données de forages ont été collectées dans la région du Centre pour analyser la géométrie des granitoïdes, qui constituent l'unique unité hydrogéologique de cette zone.

Les profondeurs des forages montrent une large variabilité, allant de 24,0 m à 105,0 m, avec une moyenne de 55,1 m. Les épaisseurs d'altération varient également, allant de 1,0 m à 59,0 m, avec une moyenne de 27,1 m. Concernant le niveau statique, les valeurs vont de 0,8 m à 49,2 m, avec une moyenne de 14,9 m.

L'écart-type pour les profondeurs est de 12,3 m, ce qui indique une dispersion relativement faible autour de la moyenne, suggérant que la plupart des forages se situent près de cette valeur. En revanche, l'épaisseur d'altération présente un écart-type de 10,6 m, ce qui indique une dispersion modérée. Pour le niveau statique, l'écart-type est de 8,3 m, montrant également une certaine variabilité.

Le coefficient de variation (CV) est de 22 % pour les profondeurs, ce qui indique que la dispersion est relativement faible par rapport à la moyenne, renforçant l'idée que les profondeurs des forages sont assez homogènes.

En revanche, le CV pour les épaisseurs d'altération est de 39 %, ce qui indique une dispersion plus importante autour de la moyenne, suggérant que les valeurs d'épaisseur d'altération sont plus variées. Enfin, le CV pour le niveau statique est de 56 %, ce qui montre une grande variabilité dans les niveaux d'eau statiques mesurés.

En résumé, dans la région du Centre, la dispersion des données est relativement faible pour les profondeurs des forages, tandis qu'elle est plus marquée pour les épaisseurs d'altération et les niveaux statiques, ce qui pourrait avoir des implications pour la gestion des ressources en eau dans cette région.

Tableau 0-8 : Profondeur des forages, épaisseur d'altération et profondeur de niveau statique des aquifères de fracture de la région du centre

	Profondeur forages (m)	Épaisseur altération (m)	Niveau statique (m)
Nombre forages	1055	850	995
Minimum	24,0	1,0	0,8
Moyenne	55,1	27,1	14,9
Maximum	105,0	59,0	49,2
Écart-type	12,3	10,6	8,3
CV (%)	22 %	39 %	56 %
P10	40,8	13,0	5,5
Médiane	54,2	27,4	13,5
P90	70,1	40,0	26,9

La

Figure 0-27 représente les valeurs statistiques des profondeurs de forages, d'épaisseurs d'altération et de niveau d'eau des granitoïdes.

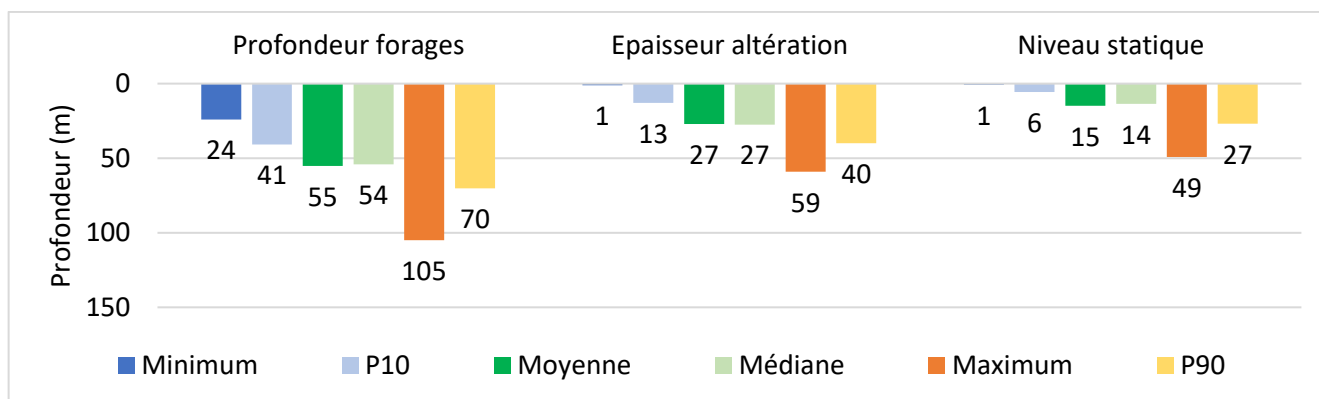


Figure 0-27 : Statistique des profondeurs de forages, épaisseur d'altération et profondeur de niveau statique des aquifères de fracture de la région du centre

Pour les données de profondeur de forages, la moyenne des profondeurs de forages est de 55 m, tandis que la médiane est de 54 m. Cette faible différence (1 m) montre que la distribution des profondeurs est relativement symétrique, sans présence marquée de valeurs extrêmes qui pourraient fausser la moyenne. Les valeurs de P10 et P90 révèlent que 10 % des forages ont une profondeur inférieure à 41 m, tandis que 90 % sont profonds de moins de 70 m. Cela signifie que la majorité des forages se situe dans une plage relativement resserrée autour de la moyenne, et que les valeurs moyennes et médianes sont toutes deux représentatives de l'ensemble des données. La profondeur maximale atteint 105 m, indiquant une variabilité assez modérée dans les profondeurs de forage. La distribution spatiale des profondeurs de forages est présentée dans la figure ci-dessous.

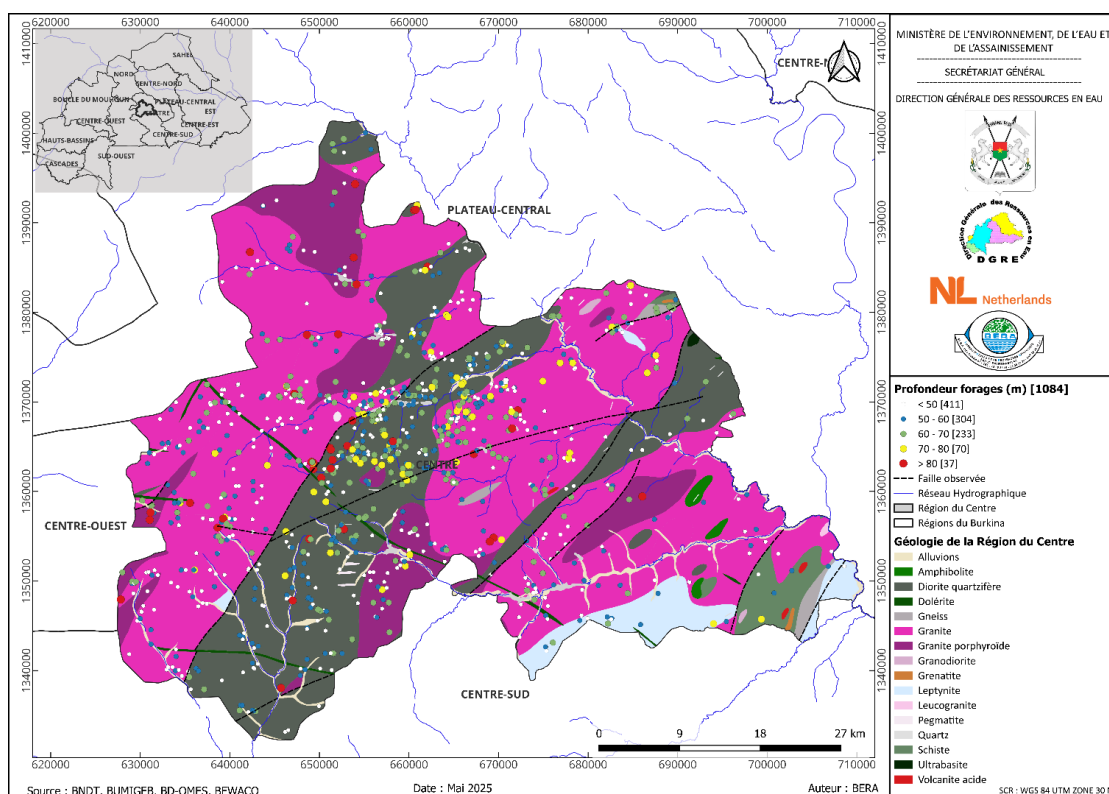


Figure 0-28 : Distribution spatiale des profondeurs des forages des aquifères de fracture de la région du Centre

Pour l'épaisseur d'altération, la moyenne (27 m) et la médiane (27 m) sont égales. Cette égalité indique une distribution symétrique et suggère que la moyenne est représentative des données. Les percentiles montrent que 10 % des zones ont une épaisseur d'altération inférieure à 13 m, et 90 % présentent une épaisseur inférieure à 40 m. L'épaisseur maximale observée est de 59 m. La distribution spatiale des épaisseurs d'altération de forages est présentée dans la figure ci-dessous.

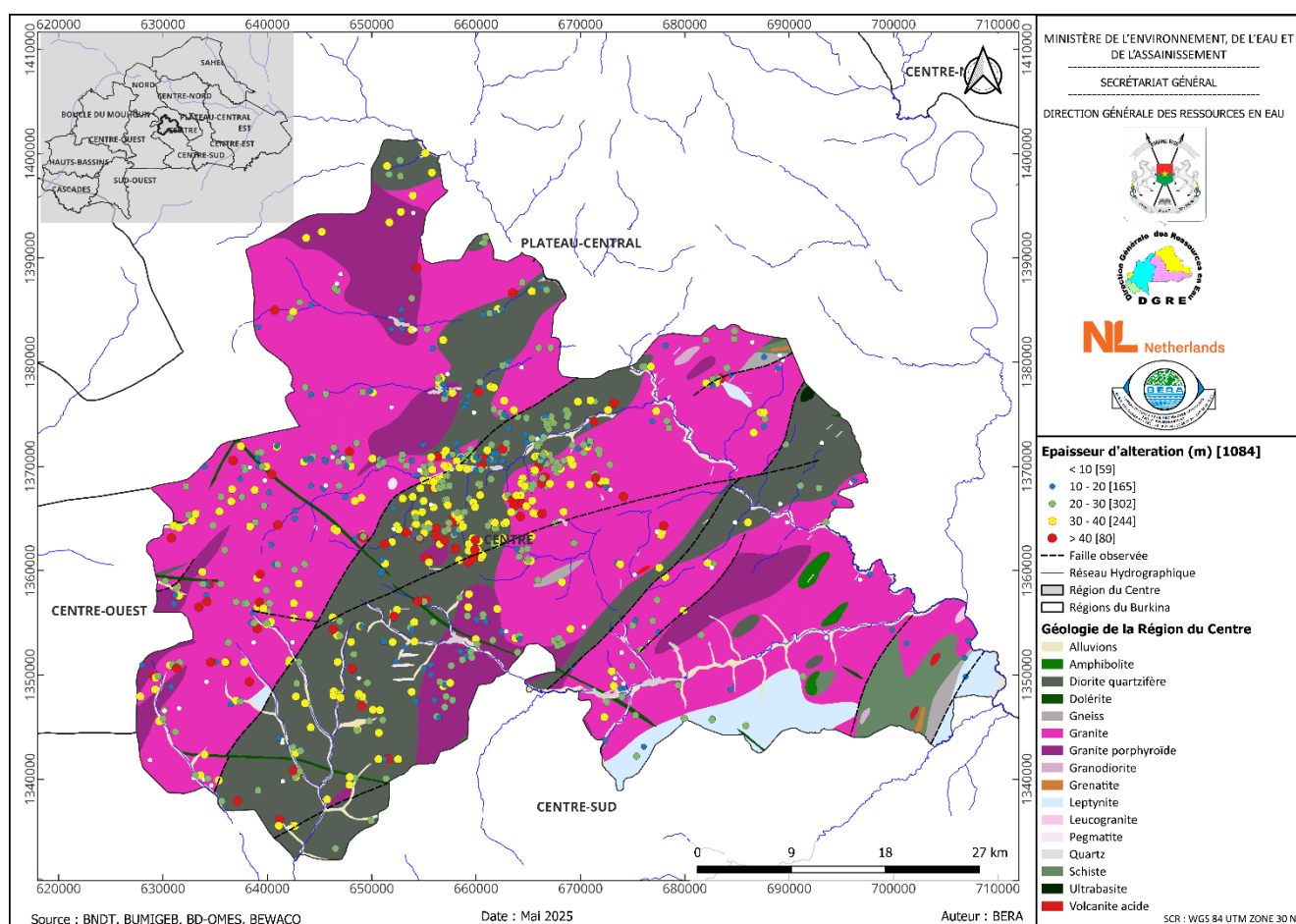


Figure 0-29 : Distribution spatiale des épaisseurs d'altération des forages des aquifères de fracture de la région du Centre

Le niveau statique présente également une bonne cohérence entre moyenne (15 m) et médiane (14 m), avec seulement 1 m de différence. Cette proximité confirme la représentativité de la moyenne pour cette variable. Les percentiles indiquent que 10 % des points ont un niveau statique inférieur à 6 m, tandis que 90 % sont inférieurs à 27 m. Le niveau maximum atteint 49 m de profondeur. La distribution spatiale des profondeurs de niveaux statiques des forages est présentée dans la figure ci-dessous.

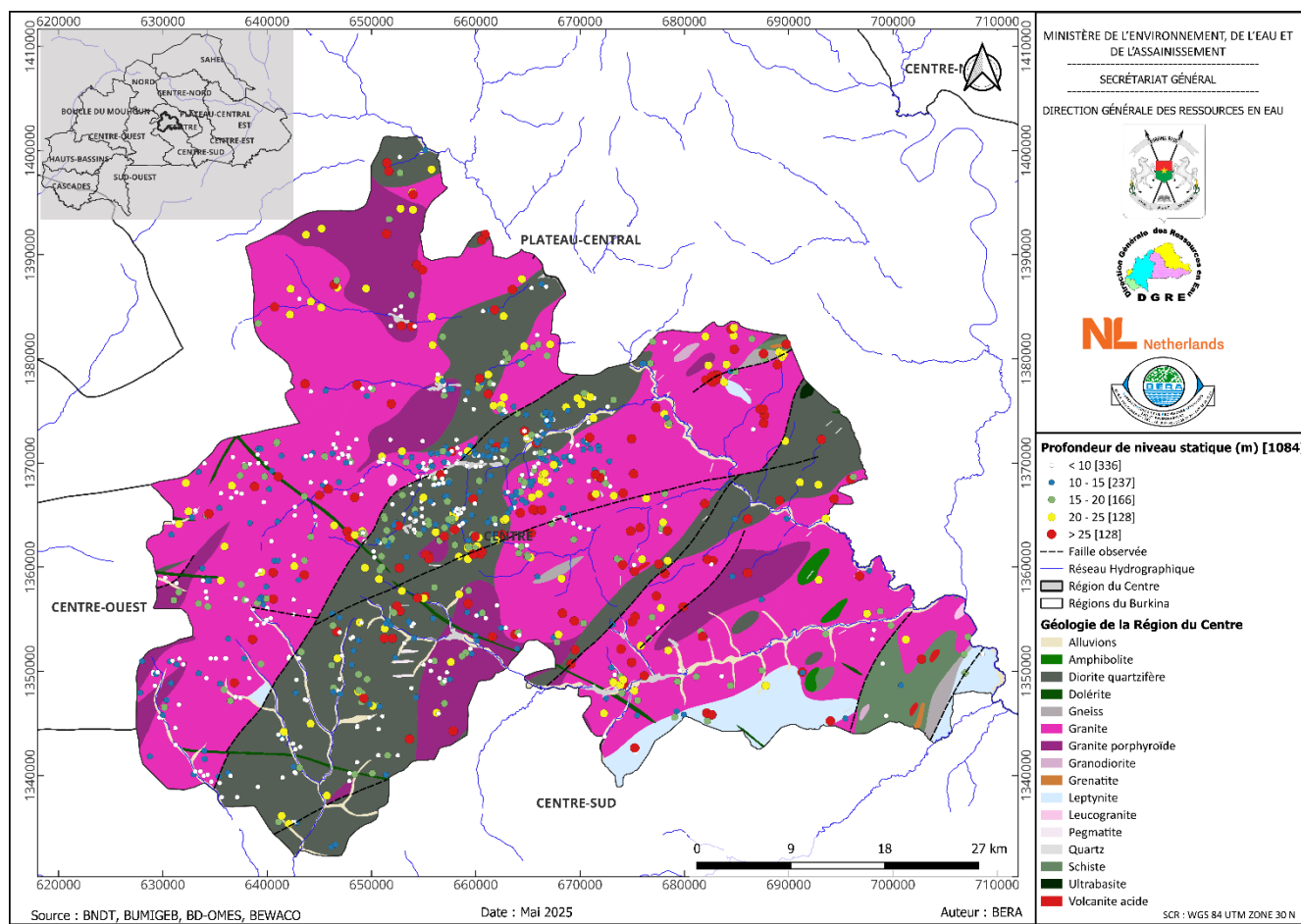


Figure 0-30 : Distribution spatiale des profondeurs de niveaux statiques des forages des aquifères de fracture de la région du Centre

La faible différence entre moyenne et médiane pour les trois paramètres confirme que les valeurs moyennes sont fiables pour décrire les caractéristiques hydrogéologiques des granitoïdes de région du centre. Les percentiles permettent de situer la majorité des valeurs dans des intervalles précis, utiles pour la planification de nouveaux forages ou l'évaluation du potentiel hydrogéologique de la zone.

I.14.2. Productivité des aquifères et paramètres hydrodynamiques

L'évaluation de la productivité des différentes unités aquifères s'est appuyée sur l'analyse des débits d'exploitation et des données de transmissivité et de débits spécifiques des forages. La répartition de ces débits a été effectuée en suivant la classification CIEH, telle que présentée dans le Tableau 0-9, le

Tableau 0-10 et le Tableau 0-11 (Mboudou et al., 2017 ; Yao et al., 2010).

Tableau 0-9 : Classification des débits selon CIEH

Intervalles	Classe
$Q \text{ (m}^3\text{/h)} < 1$	Débits très faibles
$1 < Q \text{ (m}^3\text{/h)} < 2,5$	Débits faibles
$2,5 < Q \text{ (m}^3\text{/h)} < 5$	Débits moyens
$5 < Q \text{ (m}^3\text{/h)} < 10$	Débits forts
$Q \text{ (m}^3\text{/h)} > 10$	Débits très forts

Tableau 0-10 : Classification des transmissivités selon CIEH

Intervalles	Classe
$T \text{ (m}^2/\text{s)} < 10^{-5}$	Faible
$10^{-5} < T \text{ (m}^2/\text{s)} < 10^{-4}$	Moyenne
$T \text{ (m}^2/\text{s)} > 10^{-4}$	Forte

Tableau 0-11 : Classification des débits spécifiques selon CIEH

Intervalles	Classe
$Q_s \text{ (m}^3/\text{h/m)} < 0,1$	Domaine de l'hydraulique villageoise
$0,1 < Q_s \text{ (m}^3/\text{h/m)} < 0,36$	Domaine de la petite hydraulique agricole (jardins)
$0,36 < Q_s \text{ (m}^3/\text{h/m)} < 1$	Domaine de l'hydraulique agricole
$Q_s \text{ (m}^3/\text{h/m)} > 1$	Domaine de l'hydraulique urbaine

1.14.2.1. Aquifères des altérites

Pour les aquifères d'altération, les débits enregistrés dans 22 forages varient de 0,3 à 15 m³/h, avec une moyenne de 4,4 m³/h et une médiane de 2,4 m³/h. L'écart-type est élevé (4,5), ce qui, combiné à un coefficient de variation de 102 %, révèle une forte dispersion des débits.

Tableau 0-12 : Débit des aquifères d'altération de la région du centre

	Nombre forages	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-type	CV (%)	P10	Médiane	P90
Débit (m ³ /h)	22	0,3	4,4	15,0	4,5	102 %	1	2,4	11,97

Bien que la moyenne soit plus faible que celle des aquifères de fracture, certaines valeurs maximales (jusqu'à 15 m³/h) montrent qu'une bonne productivité peut exister lorsque l'épaisseur de la zone altérée est importante et hydrauliquement active. Toutefois, la faible taille de l'échantillon limite la représentativité statistique globale.

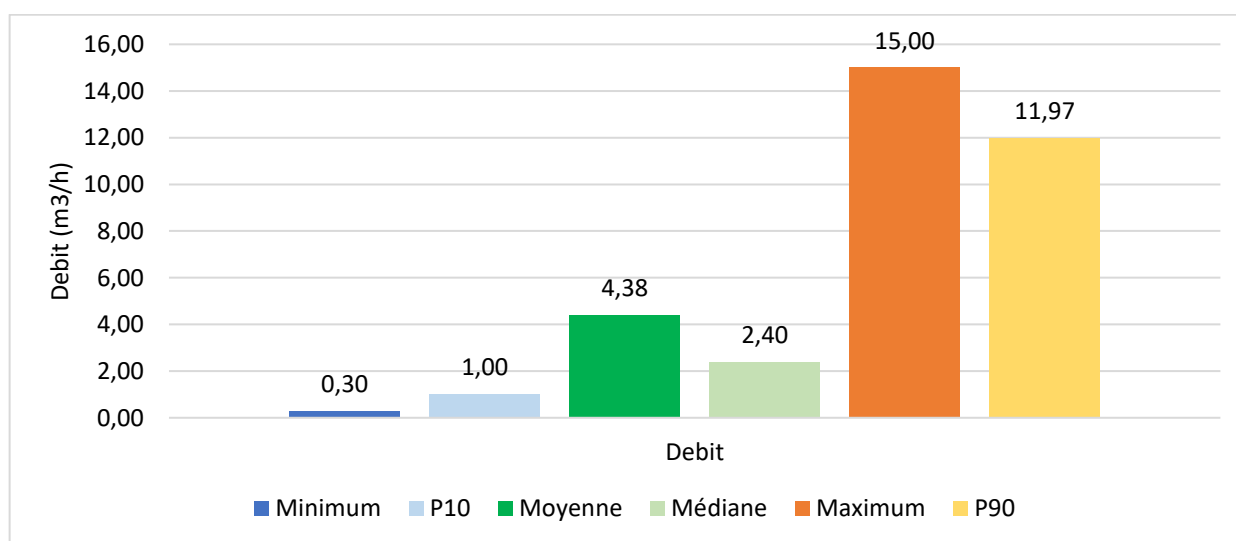


Figure 0-31 : Statistique des débits des aquifères d'altération de la région du centre

La Figure 0-32 montre que la majorité des forages d'altérites ont des débits faibles à moyens soit 63 % (1 à 5 m³/h), ce qui reflète des conditions modérément favorables à la circulation de l'eau.

Les débits très faibles sont peu fréquents, ce qui est cohérent avec le fait que les altérites, lorsqu'elles sont bien développées (épaisseurs > 20 m), peuvent offrir une porosité relativement élevée. Quelques

forages à débits supérieurs à 10 m³/h confirment le potentiel local de certains secteurs altérés bien développés.

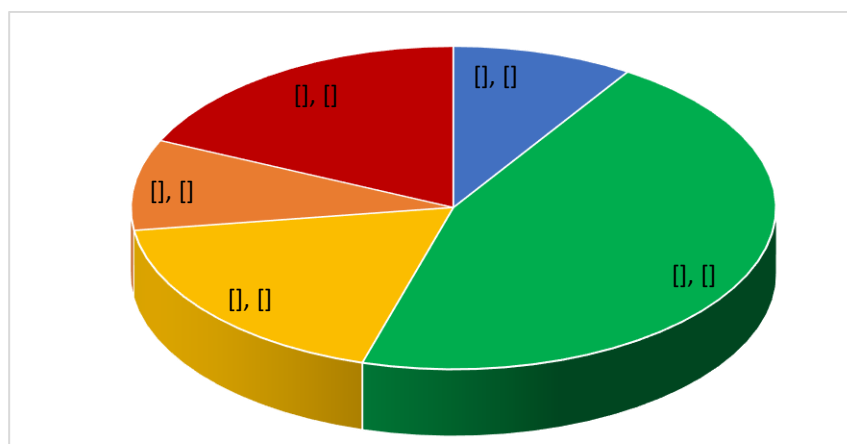


Figure 0-32 : Fréquence des classes de débits des aquifères d'altération de la région du centre

La distribution spatiale montre une variabilité très localisée, avec des points à fort débit isolés, notamment dans le centre de la ville de Ouagadougou. La plupart des forages présentent cependant des débits faibles à moyens.

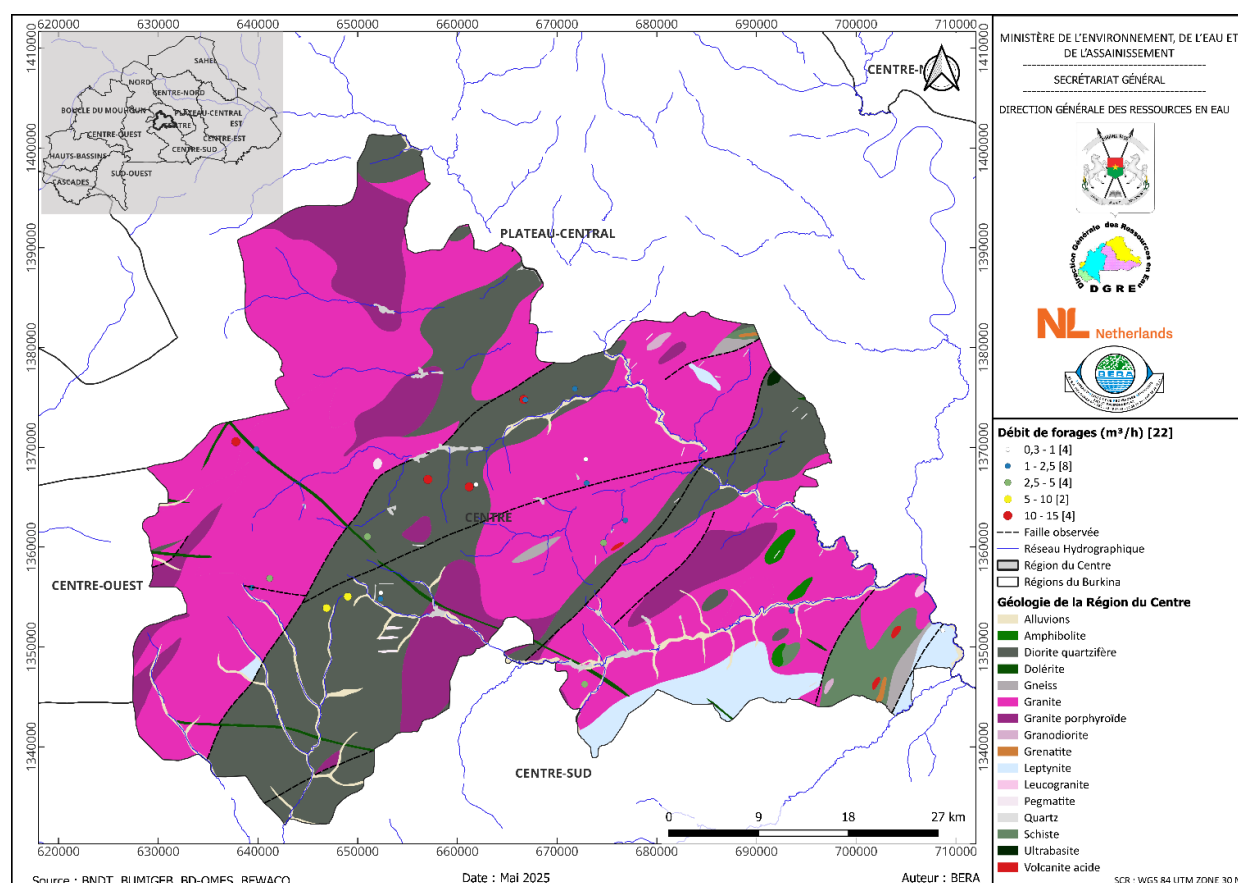


Figure 0-33 : Distribution spatiale des débits des forages des aquifères d'altération de la région du Centre

I.14.2.2. Aquifères de fractures

Les résultats des statistiques des débits, débits spécifiques, transmissivités et coefficients d'emménagement des forages captant les aquifères de fracture dans la région du Centre sont représentés dans le Tableau 0-13. Ce tableau permet de caractériser la productivité et la dynamique des aquifères de socle de la région étudiée, à travers une analyse statistique complète.

Le débit varie dans cette série entre 0,1 m³/h (minimum) et 72,0 m³/h (maximum), avec une moyenne de 6,9 m³/h. La médiane de 3,5 m³/h, nettement inférieure à la moyenne, indique une distribution asymétrique, où quelques forages très productifs tirent la moyenne vers le haut. L'écart-type élevé de 8,4 et le coefficient de variation (CV) de 122 % confirment une forte dispersion des valeurs.

Tableau 0-13 : Débits, débits spécifiques et des transmissivités et coefficient d'emménagement des aquifères de fracture de la région du centre

	Débit (m ³ /h)	Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	S
Nombre forages	1084	308	103	6
Minimum	0,1	0,01	2,9E-05	1,0E-03
Moyenne	6,9	0,7	5,9E-04	4,2E-02
Maximum	72,0	9,2	6,5E-03	1,0E-01
Écart-type	8,4	1,1	7,1E-04	4,4E-02
CV (%)	122 %	171 %	120 %	105 %
P10	0,8	0,0	2,0E-04	1,0E-03
Médiane	3,5	0,2	4,5E-04	2,6E-02
P90	18,0	1,6	1,0E-03	1,0E-01

Les percentiles P10 (0,8 m³/h) et P90 (18,0 m³/h) montrent que 80 % des forages ont des débits compris dans cette plage, illustrant un contraste important entre les forages peu productifs (souvent inférieurs à 1 m³/h) et quelques sites exceptionnellement performants (>20 m³/h). Cette hétérogénéité est typique des aquifères de fracture, où la présence ou l'absence de discontinuités hydrauliquement actives conditionne fortement la productivité. La Figure 0-34 représente très bien cette situation.

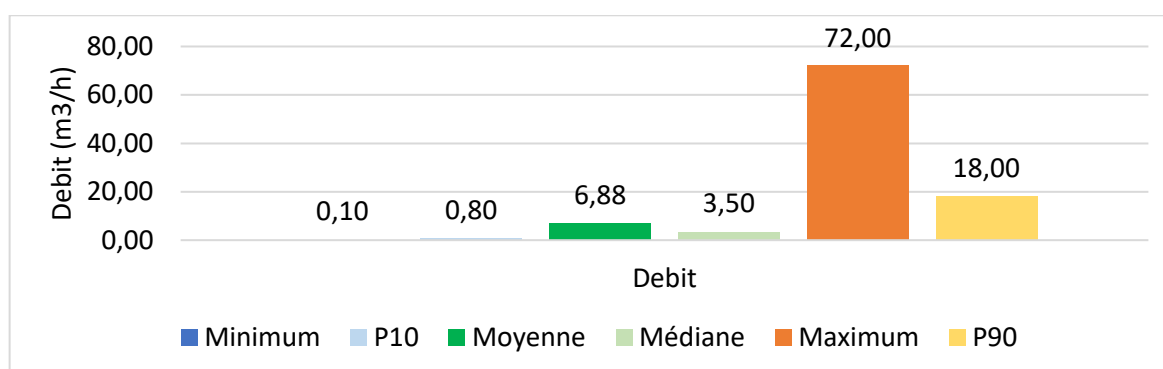


Figure 0-34 : Statistique des débits des aquifères de fracture de la région du centre

La Figure 0-35 classe les débits selon les catégories de la CIEH. On observe une dominance des débits faibles à moyens, correspondant à des plages de 1 à 5 m³/h. Les débits très faibles (<1 m³/h) et les débits forts (5 à 10 m³/h) sont minoritaires, confirmant une distribution centralisée autour des faibles productivités. Cela reflète l'importance de la variabilité structurale à petite échelle dans ces aquifères. 24 % des forages atteignent des débits très forts (>10 m³/h), suggérant une assez bonne productivité des aquifères de la région du Centre.

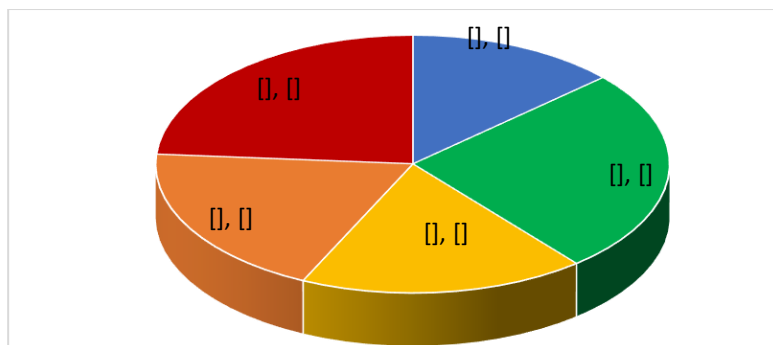


Figure 0-35 : Fréquence des classes de débits des aquifères de fracture de la région du centre

La carte ci-dessous (Figure 0-36) révèle une hétérogénéité spatiale marquée des débits. Certaines zones, notamment au centre, à l'ouest et au sud-ouest de la région, présentent des concentrations de forages à fort débit, suggérant la présence de corridors de fracture favorables à la circulation d'eau. D'autres secteurs, notamment au nord et à l'est, sont dominés par des débits très faibles à faibles, traduisant une fracturation moins dense ou peu connectée. Cette structuration spatiale pourrait être liée à des linéaments géologiques majeurs ou à des variations lithologiques locales.

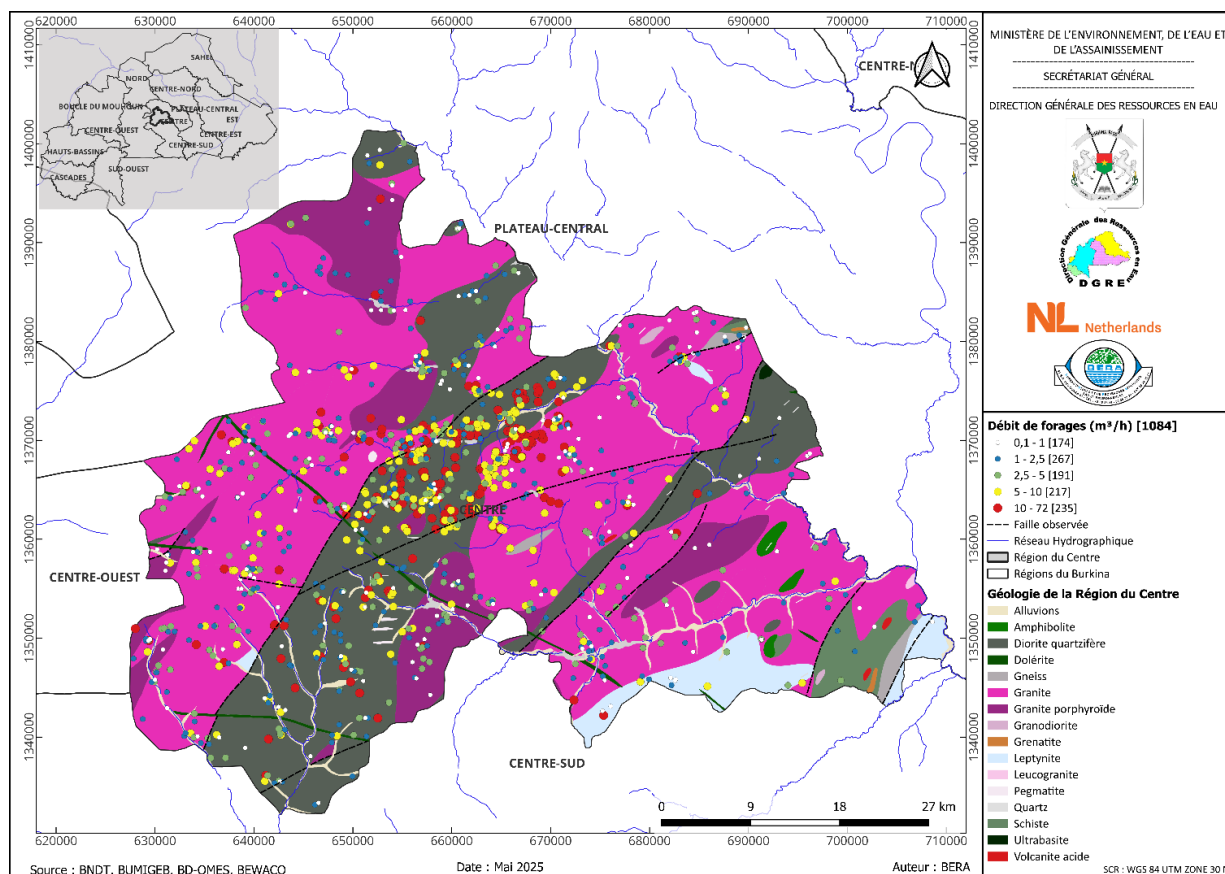


Figure 0-36 : Distribution spatiale des débits des forages des aquifères de fracture de la région du Centre

Cette Figure 0-37 représente les classes de débit spécifique (Q_s) et de transmissivité (T) pour caractériser les usages potentiels des forages. Les forages à Q_s compris entre $0,1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ et $0,36 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ sont les représentés avec 32,8 % mais de manière générale, les quatre classes sont bien représentées. La majorité des points se situent dans les domaines villageois ($Q_s < 0,1$) ou agricoles ($0,1 < Q_s < 1$), indiquant que les forages de fracture sont adaptés aux petits systèmes d'approvisionnement.

Les transmissivités fortes ($>10^{-4}$ m²/s) dominantes confirment un système à perméabilité intéressante et forte hétérogénéité.

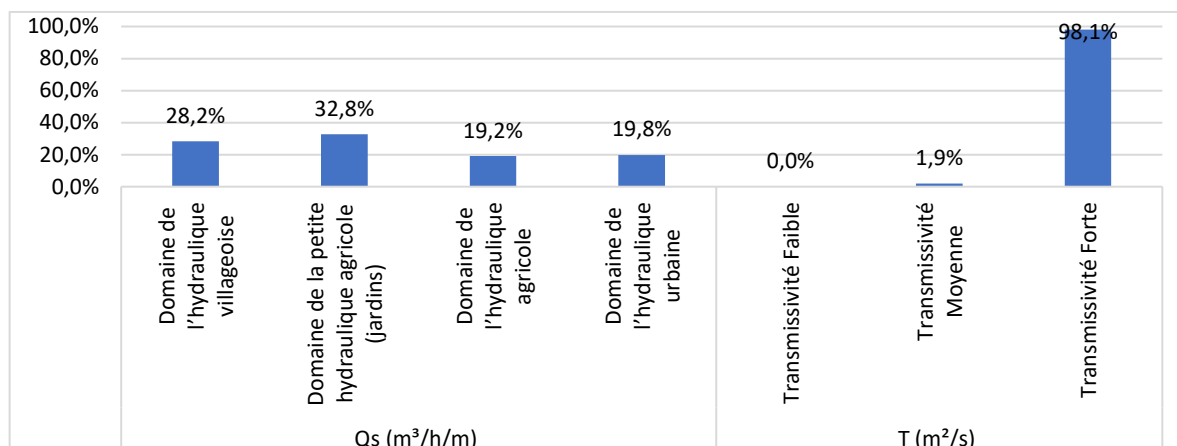


Figure 0-37 : Classification des débits spécifiques et transmissivité des forages de fracture de la région du Centre

La carte ci-dessous (Figure 0-38) montre que les débits spécifiques élevés (>1 m³/h/m) sont localisés de manière très ponctuelle, notamment dans les zones du centre de Ouagadougou et du sud-ouest. Le reste de la région est dominé par des valeurs faibles, confirmant une efficacité modeste des forages par mètre de colonne d'eau. Les zones les plus favorables peuvent coïncider avec des structures tectoniques actives ou des hétérogénéités géomorphologiques (vallées encaissées, failles), qui augmentent la connectivité et la transmissivité.

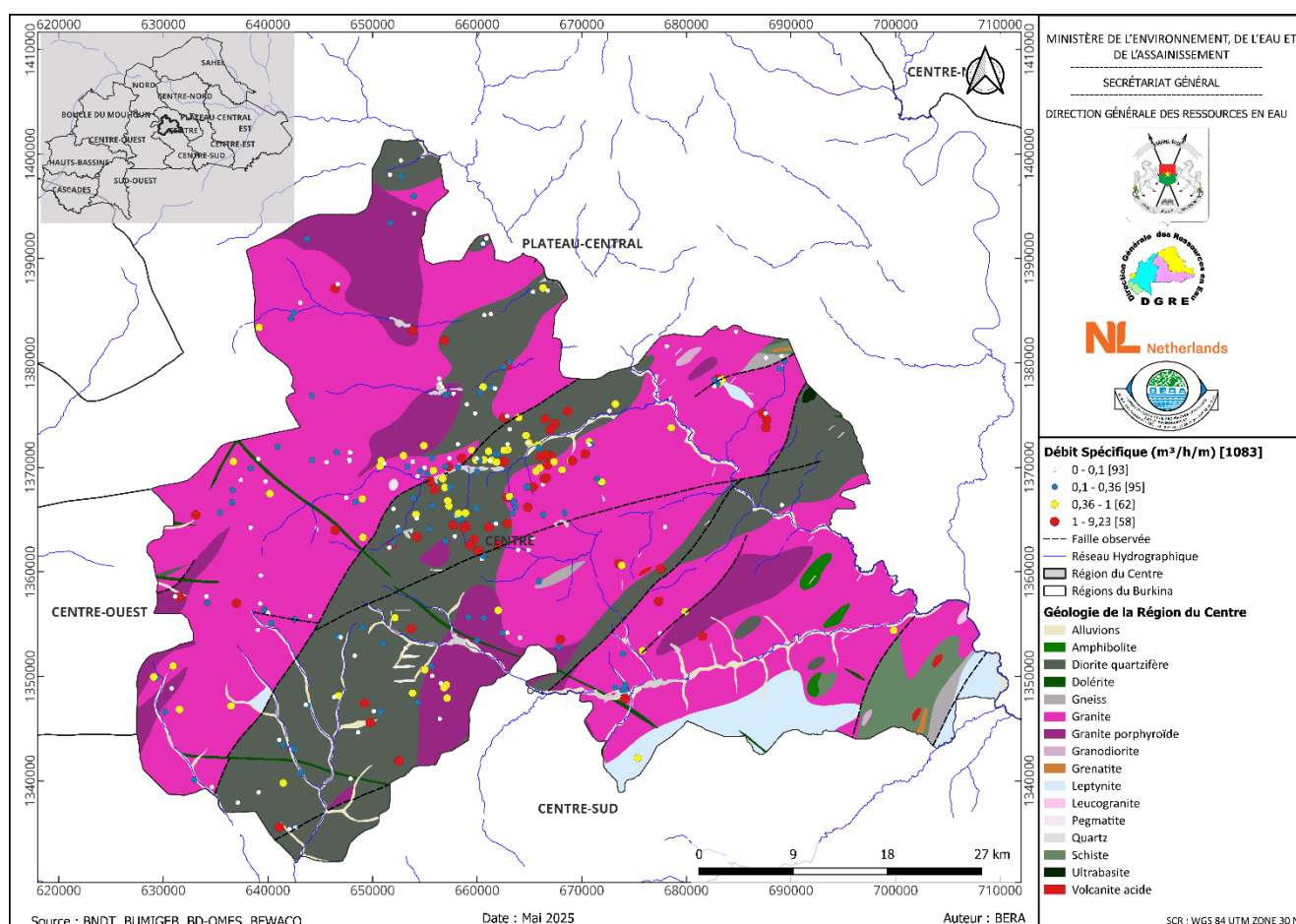


Figure 0-38 : Distribution spatiale des débits spécifiques des forages des aquifères de fracture de la région du Centre

La Figure 0-39 met en évidence des valeurs de transmissivité globalement fortes. Tous les forages dont les données de transmissivité sont disponibles sont concentrés dans la zone de Ouagadougou. Seuls deux forages sur les 103 appartiennent à la classe des transmissivités moyennes.

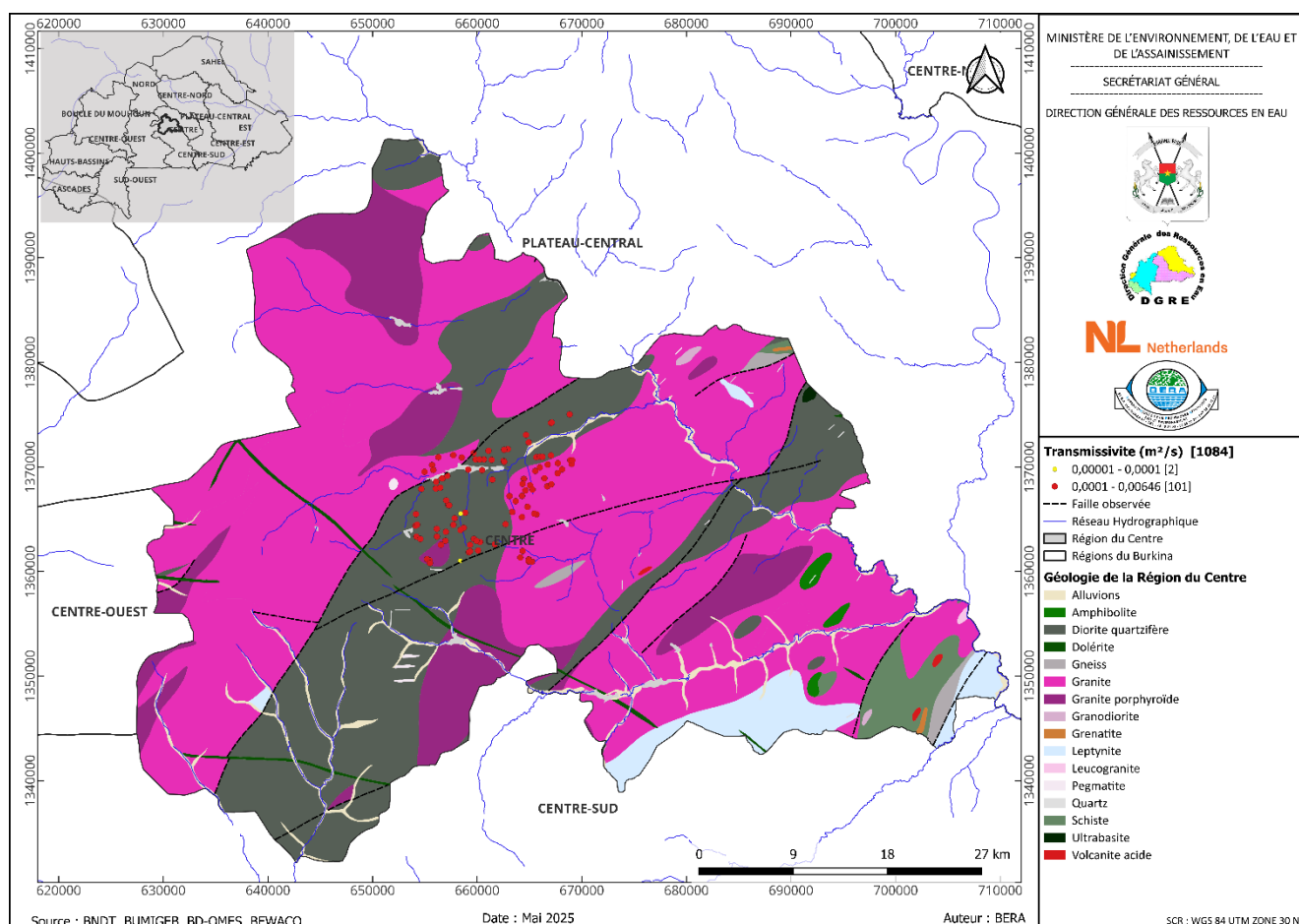


Figure 0-39 : Distribution spatiale des transmissivités des forages des aquifères de fracture de la région du Centre

I.15. Caractéristiques hydrogéologiques des forages de la CVO

I.15.1. Géométrie des aquifères et niveau de nappes

L'analyse des tableaux, graphiques et cartes portant sur la géométrie des aquifères et les niveaux statiques de la nappe phréatique dans la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO) permet de caractériser les paramètres structurants le système aquifère. Cette analyse repose principalement sur les données du Tableau 0-14, des Figure 0-40 à 42 qui permettent d'examiner la variabilité des grandeurs hydrogéologiques fondamentales.

Tableau 0-14 : Profondeur de forages, épaisseur d'altération et niveau statique des aquifères de fracture de la CVO

	Profondeur forages (m)	Épaisseur altération (m)	Niveau statique (m)
Nombre forages	26	19	26
Minimum	38,0	15,0	0,8
Moyenne	62,9	27,9	10,4
Maximum	105,0	43,0	30,0
Écart-type	15,8	9,5	6,6
CV (%)	25 %	34 %	64 %
P10	46,5	16,6	4,2
Médiane	62,0	24,0	9,1
P90	76,0	40,2	16,3

La profondeur des forages étudiés varie de 38,0 m à 105,0 m, avec une moyenne de 62,9 m. La médiane, située à 62,0 m, est très proche de la moyenne, ce qui suggère une distribution relativement symétrique des données. L'écart-type est de 15,8 m, soit un coefficient de variation (CV) de 25 %, traduisant une hétérogénéité modérée dans la profondeur des ouvrages. Le premier décile (P10) est à 46,5 m, tandis que le neuvième décile (P90) atteint 76,0 m, ce qui montre que 80 % des forages sont compris entre ces deux bornes. Ces valeurs indiquent que la majorité des captages sont peu profonds, ce qui est typique des aquifères de socle. La Figure 0-40 confirme cette répartition, où l'intervalle interquartile reste assez resserré, malgré quelques valeurs extrêmes. La Figure 0-41, représentant la distribution spatiale de la profondeur des forages, met en évidence des zones du nord-est et du sud-ouest de la CVO où les forages sont significativement plus profonds. Cette tendance spatiale est certainement liée à la répartition spatiale non homogène des forages capitalisés dans la CVO.

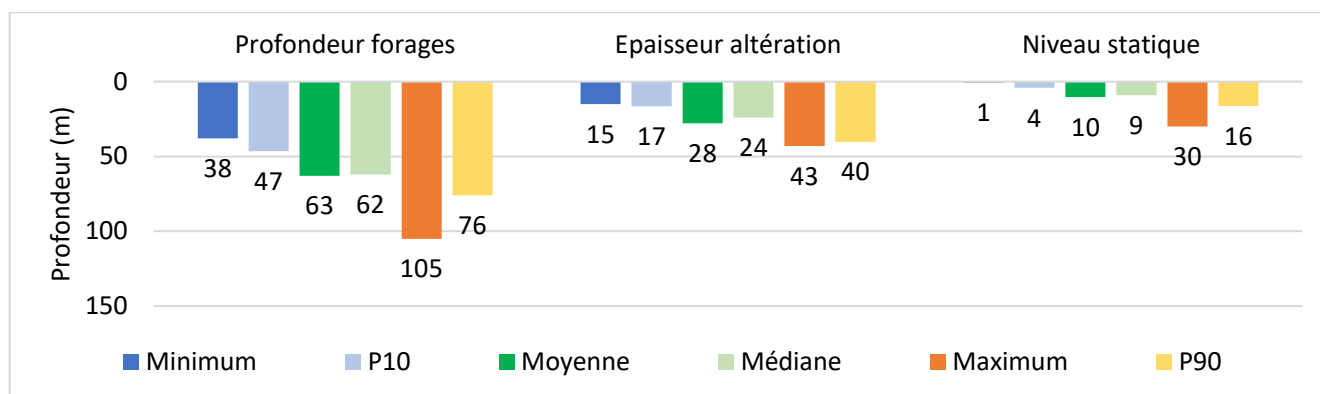


Figure 0-40 : Statistiques des profondeurs de forage, épaisseur d'altération et niveau statique des aquifères de fracture de la CVO

L'épaisseur de la zone altérée présente une variabilité plus marquée que la profondeur des forages. Les valeurs observées s'échelonnent entre 15,0 m et 43,0 m, avec une moyenne de 27,9 m et une médiane de 24,0 m, ce qui suggère une légère asymétrie vers les fortes valeurs. L'écart-type atteint 9,5 m, avec un coefficient de variation élevé de 34 %, ce qui traduit une grande hétérogénéité de la couverture altérée.

La Figure 0-42 permet de localiser les zones où l'épaisseur altérée est la plus importante, notamment au centre-ouest et au sud-est de la CVO. Ces zones correspondent à des contextes géologiques plus favorables à l'altération profonde (roches granitoïdes). Les statistiques de P10 (16,6 m) et P90 (40,2 m) révèlent que la majorité des zones d'altération se situent dans une fourchette assez large.

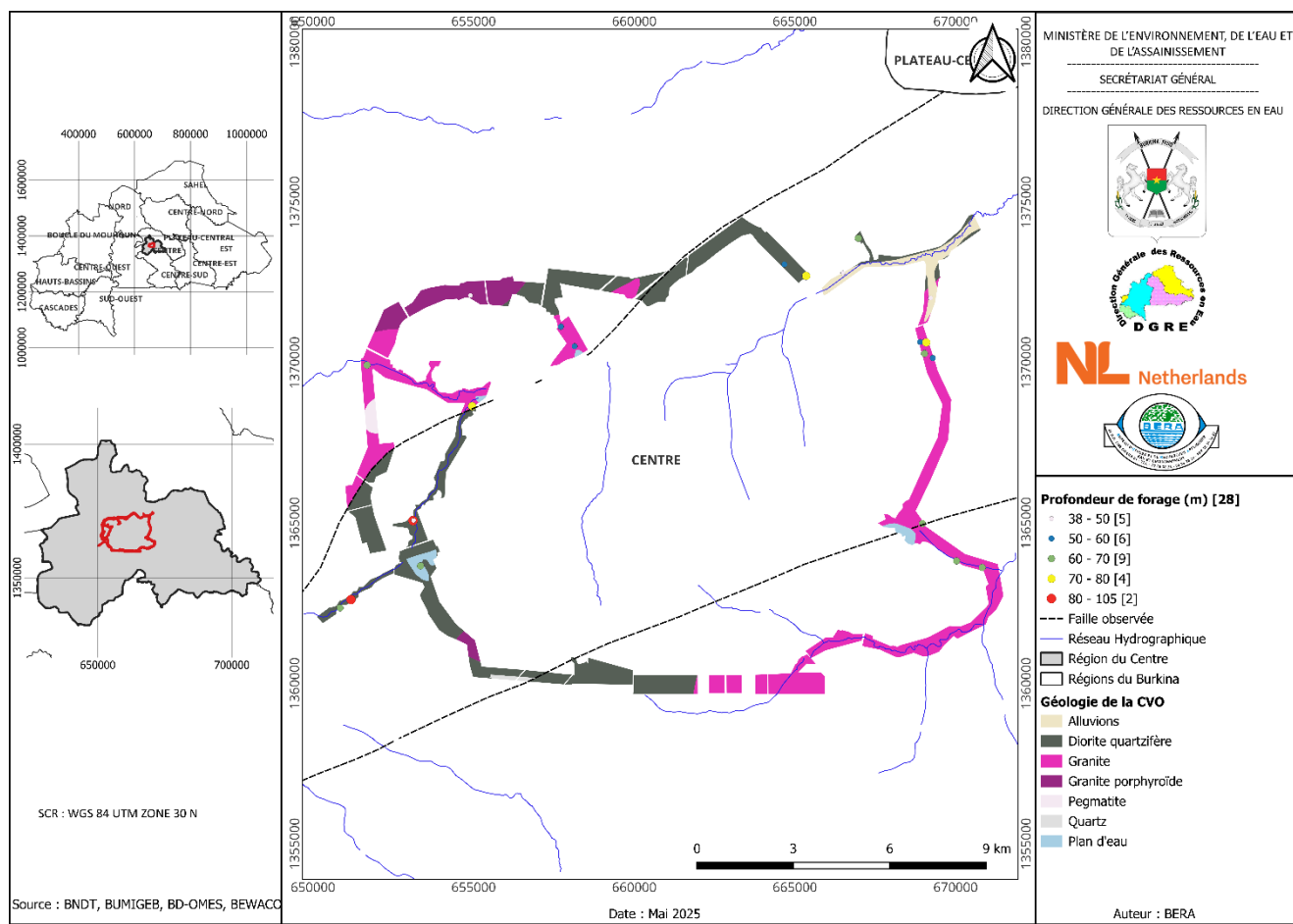


Figure 0-41 : Distribution spatiale des profondeurs des forages de la CVO

Le niveau statique mesuré dans les forages, qui reflète la profondeur de la nappe phréatique sous la surface du sol, présente une très grande hétérogénéité, avec des valeurs allant de 0,8 m à 30,0 m, pour une moyenne de 10,4 m et une médiane de 9,1 m. Le coefficient de variation est ici particulièrement élevé (64 %), ce qui témoigne d'une très grande variabilité spatiale du niveau d'eau dans la zone. Cette variabilité peut être liée à plusieurs facteurs : la topographie, la recharge locale, les propriétés hydrauliques du milieu (perméabilité), l'influence de la pression anthropique (pompage domestique), à l'hydraulité variable des formations fracturées ou à une connexion hydraulique avec d'autres réservoirs.

Le P10 à 4,2 m et le P90 à 16,3 m montrent une large dispersion des niveaux statiques, ce qui se traduit par des conditions d'accessibilité très variables de la ressource en eau souterraine. La Figure 0-43, qui illustre la répartition spatiale des niveaux statiques, indique que les zones proches du centre et du nord-est de la CVO présentent les niveaux d'eau les plus profonds, parfois supérieurs à 20 m, tandis que d'autres zones au sud-ouest enregistrent des niveaux très proches de la surface (moins de 5 m). Ces écarts peuvent traduire une recharge plus active dans certaines zones notamment dans les zones d'alluvions.

Sur la Figure 0-40, le graphique du niveau statique montre une distribution étalée, avec de nombreuses valeurs éloignées de la médiane, confirmant cette hétérogénéité forte. L'écart entre la moyenne et la médiane indique une distribution légèrement asymétrique vers les valeurs plus profondes, suggérant que certaines zones très profondes tirent la moyenne vers le haut.

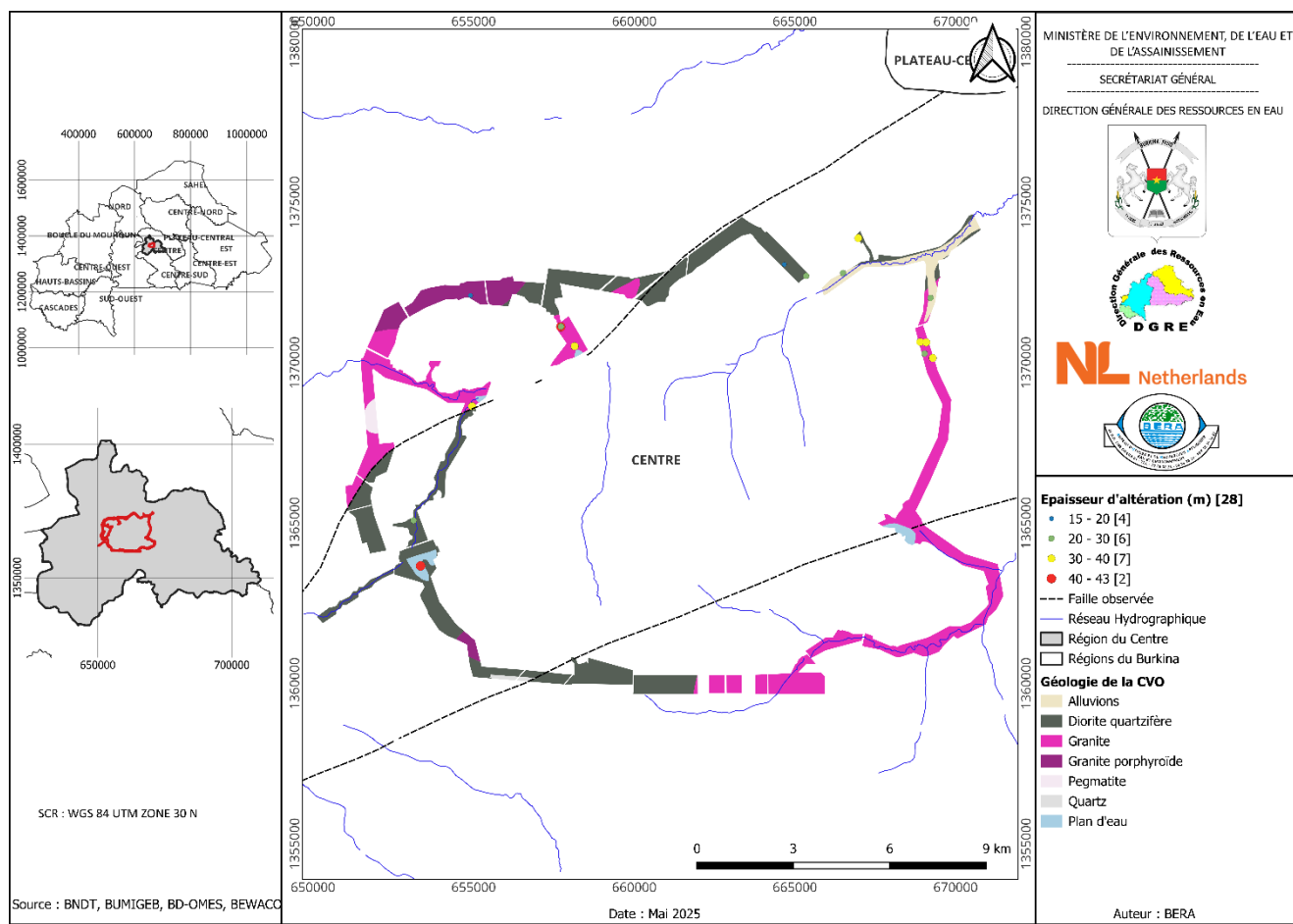


Figure 0-42 : Distribution spatiale des épaisseurs d'altération des forages de la CVO

L'interprétation croisée des données montre qu'il n'existe pas nécessairement de corrélation directe entre la profondeur du forage et le niveau statique, ce qui indique que l'eau peut être présente à des niveaux très variables indépendamment de la profondeur des forages. Toutefois, des zones à faible épaisseur d'altération sont souvent associées à des niveaux statiques plus profonds, suggérant que l'altération joue un rôle crucial dans la capacité de stockage superficiel. Par ailleurs, les zones où l'altération est plus épaisse coïncident parfois avec des niveaux statiques moins profonds, ce qui renforce l'hypothèse que cette couche altérée pourrait être l'un des principaux réservoirs de la nappe.

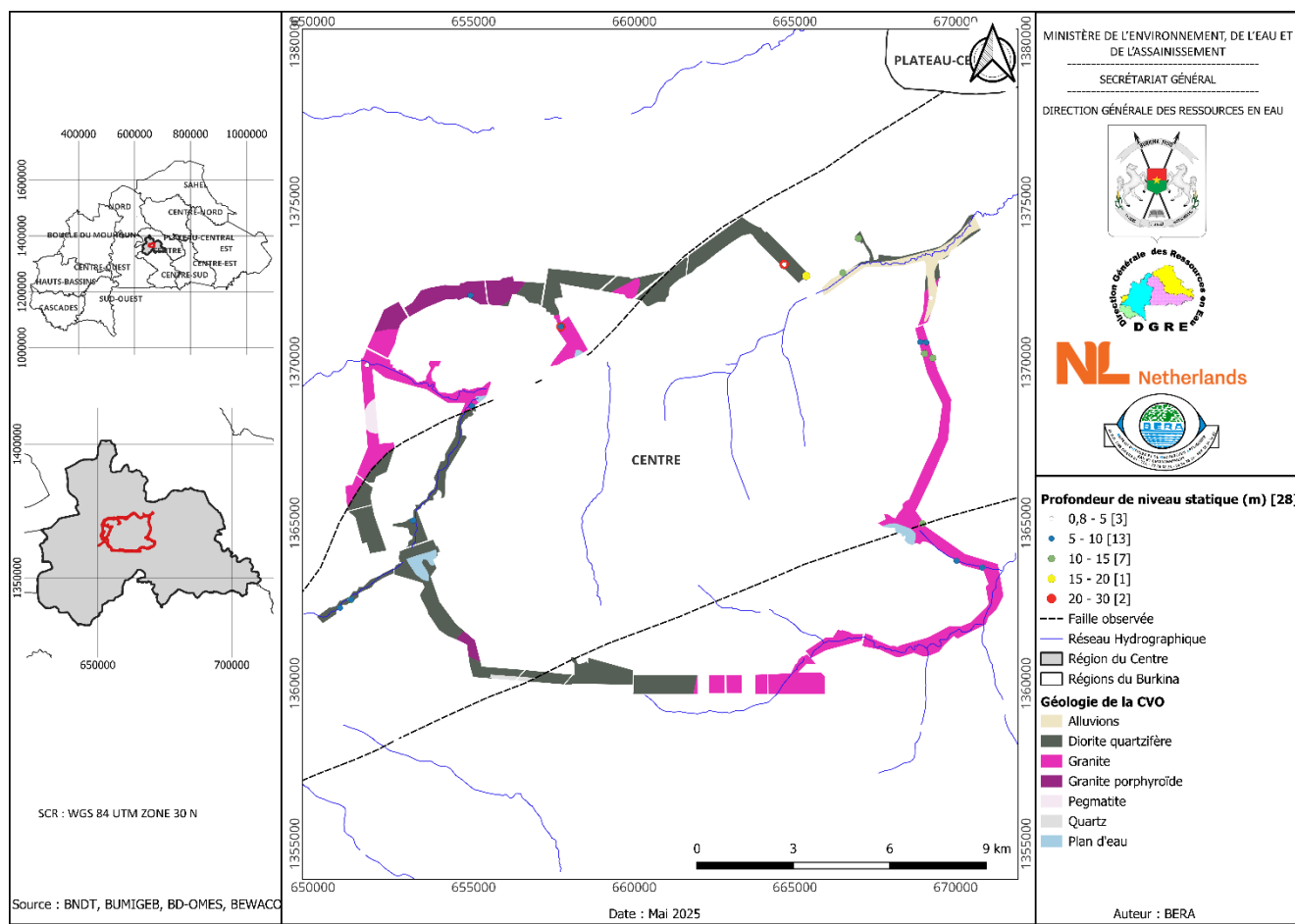


Figure 0-43 : Répartition spatiale des profondeurs de niveau statique de la CVO

I.15.2. Productivité des aquifères et paramètres hydrodynamiques

Le tableau ci-dessous synthétise les valeurs statistiques des trois principaux paramètres hydrodynamiques mesurés dans les forages : le débit (Q), le débit spécifique (Qs) et la transmissivité (T). Les valeurs de débit sont comprises entre 0,4 m³/h et 48,0 m³/h, avec une moyenne de 16,8 m³/h et un écart-type élevé (14,8), traduisant une forte dispersion des données (CV = 88 %). Cela indique une hétérogénéité importante des structures aquifères de fracture, où les performances des forages varient fortement selon la nature et la connectivité des fractures interceptées.

Tableau 0-15 : Débits, débits spécifiques et des transmissivités des aquifères de fracture de la CVO

	Débit (m ³ /h)	Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /s)
Nombre forages	28	4	5
Minimum	0,4	0,41	2,7E-04
Moyenne	16,8	1,0	4,1E-04
Maximum	48,0	2,2	5,7E-04
Écart-type	14,8	0,7	1,1E-04
CV (%)	88 %	69 %	27 %
P10	2,9	0,5	2,8E-04
Médiane	12,5	0,7	4,4E-04
P90	42,0	1,8	5,3E-04

Le débit spécifique, défini comme le rapport du débit au rabattement, varie entre 0,41 m³/h/m et 2,2 m³/h/m, avec une moyenne de 1,0 m³/h/m. Le coefficient de variation (69 %) confirme une

variabilité élevée mais légèrement plus modérée que celle du débit brut. Cela suggère que certains forages atteignent des débits élevés avec une charge relativement faible, indiquant une bonne efficacité hydraulique du point captant.

La transmissivité, comprise entre $2,7 \times 10^{-4}$ et $5,7 \times 10^{-4}$ m²/s, est en revanche plus stable, avec une moyenne de $4,1 \times 10^{-4}$ m²/s et un CV plus faible (27 %). Cela témoigne d’une certaine homogénéité dans les capacités de transfert de l’aquifère de fracture à l’échelle locale, même si la productivité varie en fonction du captage effectif des discontinuités les plus conductrices.

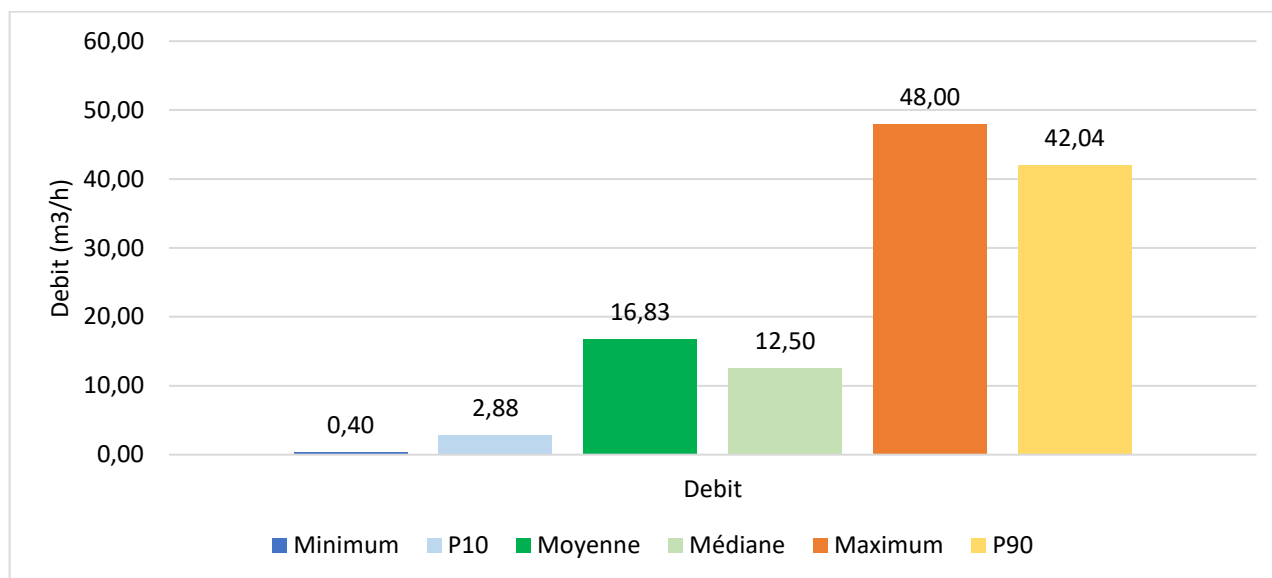


Figure 0-44 : Statistiques des débits, des aquifères de fracture de la CVO

La figure ci-dessous classe les débits des forages en fonction des catégories définies par le CIEH. Il ressort que les débits forts à très forts (>5 m³/h) représentent une part importante des forages analysés dans la CVO. En particulier, la classe des 10–30 m³/h domine avec 54 %. Les débits faibles à moyens (1–5 m³/h) sont présents mais minoritaires, tandis que les débits très faibles (<1 m³/h) sont pratiquement absents dans cette série.

Cette distribution témoigne d’une productivité globalement élevée des forages dans cette zone spécifique, en contraste avec les valeurs régionales souvent plus faibles. Cette caractéristique particulière de la CVO pourrait s’expliquer par des conditions géostructurales favorables à la circulation de l’eau souterraine, ou par la sélection de sites de forage sur la base de critères géophysiques ou topographiques adaptés.

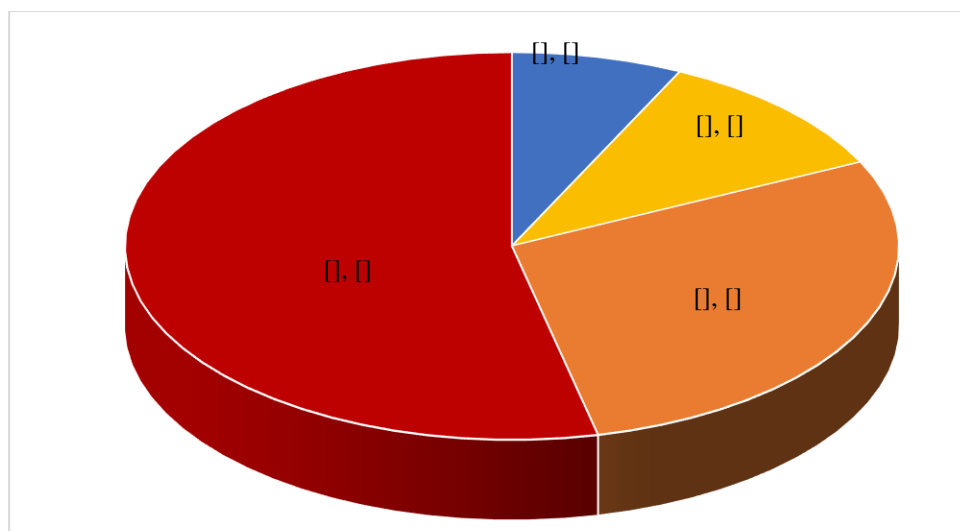


Figure 0-45 : Fréquence des classes de débits des forages de la CVO

La carte ci-dessous illustre la distribution géographique des débits des forages dans la Ceinture Verte. Elle révèle une forte variabilité spatiale, avec des concentrations de forages très productifs dans certaines zones du sud et du centre-ouest, tandis que d'autres secteurs, notamment au nord et à l'est, présentent des débits plus faibles.

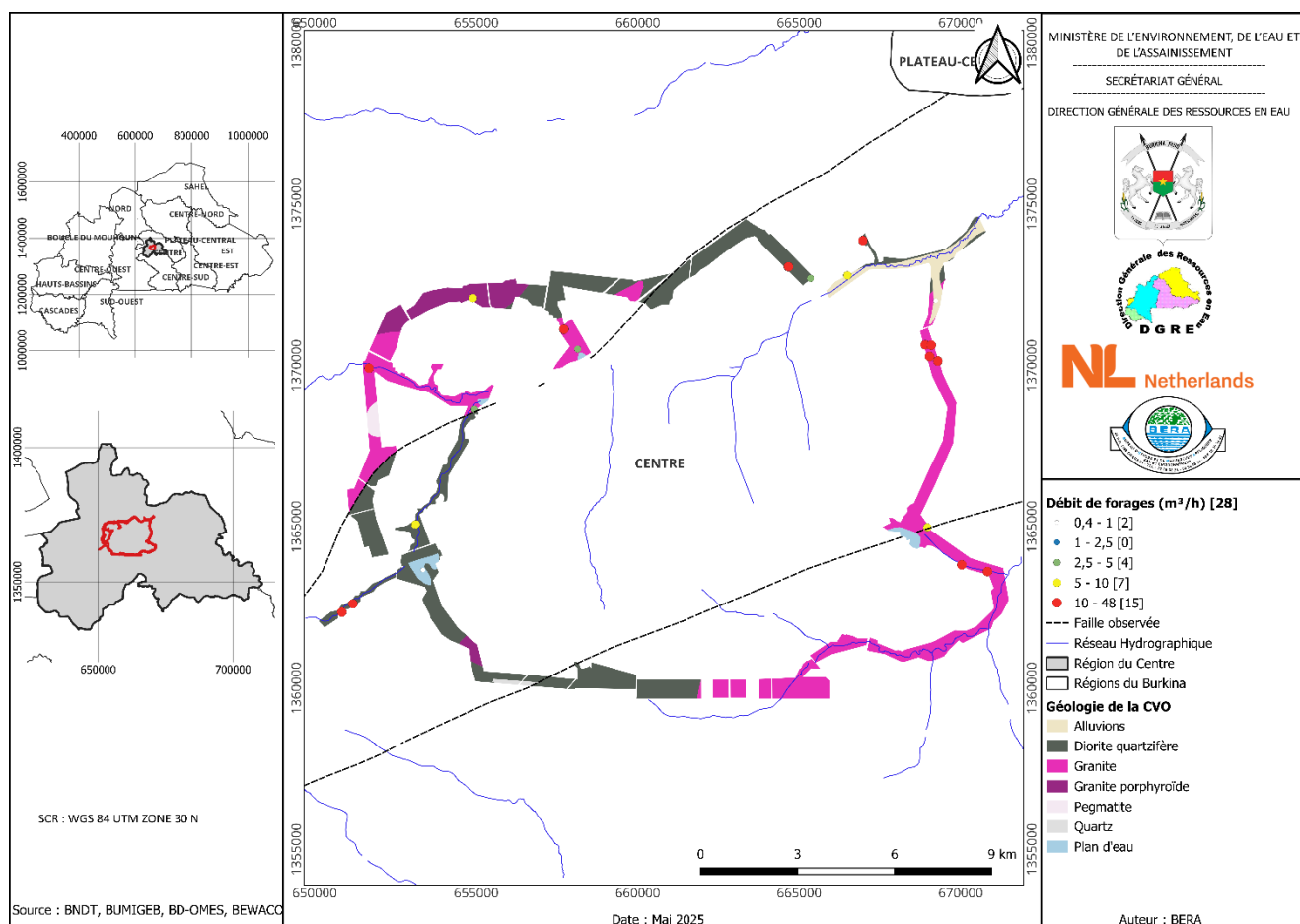


Figure 0-46 Répartition spatiale des débits de forages de la CVO

I.16. Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques de la CVO

Les aquifères de fracture de la région du Centre se distinguent par des profondeurs de forage généralement élevées, traduisant la nécessité d'atteindre des zones de discontinuités hydrauliquement actives situées en profondeur. La variabilité est modérée, ce qui reflète une certaine homogénéité géologique à l'échelle régionale. Les cartes de distribution spatiale montrent que les forages les plus profonds se concentrent au centre de Ouagadougou. Les aquifères d'altération, en revanche, se développent dans les horizons superficiels et sont exploités à des profondeurs nettement plus faibles. Dans la CVO, les profondeurs des forages sont comparables à celles des aquifères de fracture régionaux, sans particularité marquée sur ce paramètre.

L'épaisseur de la zone altérée, déterminante pour le stockage et la percolation des eaux, montre une grande variabilité dans les aquifères de fracture de la région du Centre. Cette hétérogénéité résulte des différences lithologiques et du degré d'altération du socle. Les zones les plus épaisses coïncident souvent avec des forages plus productifs, comme le montrent les cartes spatiales. Dans les aquifères d'altération, cette zone constitue le réservoir principal : la productivité dépend donc directement de sa continuité et de son épaisseur. Les aquifères de la CVO présentent localement des épaisseurs d'altération importantes, notamment au centre de Ouagadougou, au centre-ouest et sud-est.

Dans les aquifères de fracture de la région du Centre, les niveaux statiques varient fortement d'un site à l'autre. Cette variabilité est influencée par la topographie, le régime de recharge et la nature des formations traversées. Les aquifères d'altération, généralement localisés plus près de la surface, présentent des niveaux statiques plus faibles, facilitant l'accessibilité à la ressource. Dans la CVO, les niveaux statiques montrent également une hétérogénéité spatiale mais restent souvent plus proches de la surface, en lien avec une recharge localisée et une perméabilité plus favorable.

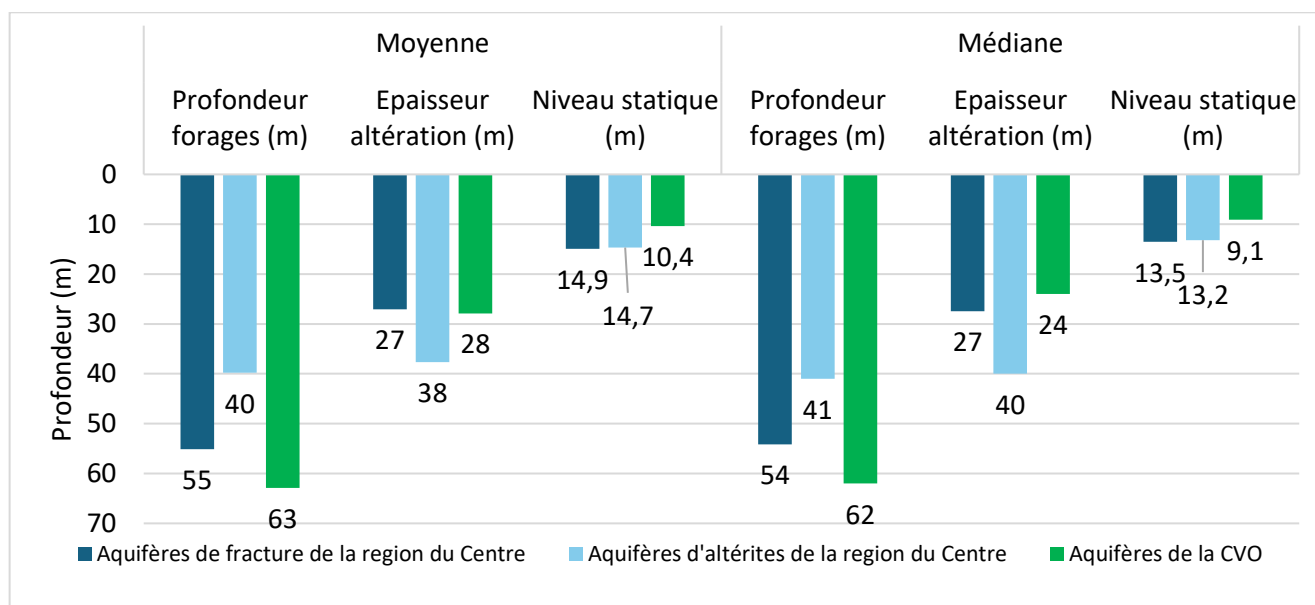


Figure 0-47 : Valeurs moyennes et médianes des profondeurs de forages, épaisseurs d'altération et niveau des nappes des forages

Les aquifères de fracture de la région du Centre présentent une très forte variabilité des débits entre les forages, témoignant d'un système hétérogène conditionné par la présence, l'orientation et l'interconnexion des fractures. Quelques forages très productifs coexistent avec une majorité à faible

débit. Les aquifères d'altération, bien que moins performants globalement, montrent une distribution plus homogène des débits, avec une majorité de valeurs moyennes à faibles. Dans la CVO, les débits sont nettement plus élevés en moyenne, et la proportion de forages à haut débit est significative, ce qui reflète des conditions hydrogéologiques localement très favorables. Les cartes montrent une concentration des forages productifs dans des zones bien fracturées ou à altération épaisse.

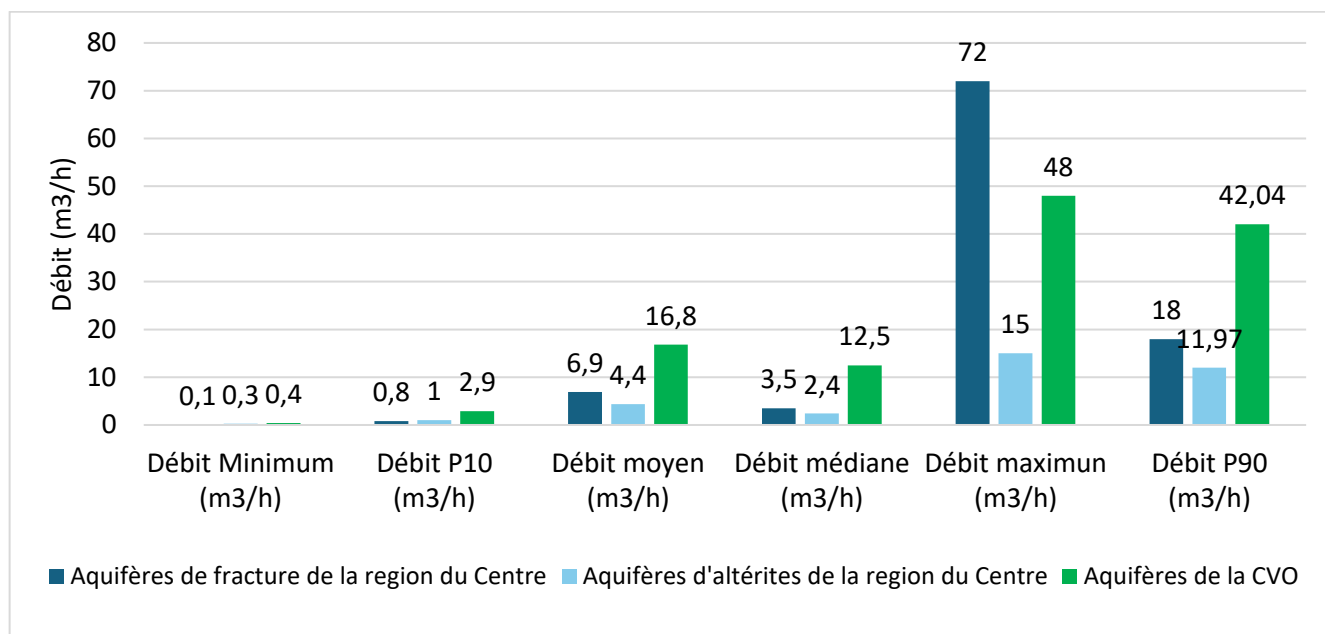


Figure 0-48 : Statistiques des débits des forages

Le débit spécifique, indicateur d'efficacité hydraulique, montre une dispersion importante dans les aquifères de fracture de la région du Centre, allant de forages très peu efficaces à quelques-uns très performants. Dans les aquifères d'altération, même si les données sont moins disponibles, on peut considérer que les débits spécifiques restent généralement modestes, compte tenu des faibles profondeurs et de la transmissivité modérée. La CVO se démarque par des débits spécifiques plus élevés en moyenne, traduisant une meilleure efficacité des forages.

Les aquifères de fracture affichent des valeurs de transmissivité très variables. Les zones de transmissivité élevée sont localisées et peu fréquentes, ce qui confirme la nature discontinue du système aquifère. Les aquifères d'altération, bien que moins documentés sur ce paramètre, sont généralement caractérisés par une transmissivité modérée, influencée par la texture des matériaux altérés.

SUIVI ET ÉVOLUTION DES EAUX SOUTERRAINES

I.17. Le réseau piézométrique national

I.17.1. Généralités

Le suivi de la piézométrie dans la région repose principalement sur les données issues du Réseau Piézométrique National (RPN), illustré à la Figure 0-1. Ce dispositif est complété par les piézomètres gérés par l'ONEA (Figure 0-6), installés spécifiquement pour assurer le suivi des fluctuations des niveaux des nappes exploitées à des fins d'alimentation en eau potable dans les zones urbaines et semi-urbaines.

Le RPN comprend six piézomètres répartis sur trois sites distincts (Tableau 0-1) : Ouagadougou, Silmissin et Bassinko, équipés respectivement en 1985, 1985 et 2009. La Figure 0-1 présente la localisation de ces différents sites et de leurs piézomètres associés. Chaque site peut comporter entre un et trois ouvrages d'observation, en fonction de l'objectif de suivi et de la configuration hydrogéologique locale.

Bien que le RPN présente certaines lacunes en matière de régularité de mesure, notamment en raison de contraintes logistiques ou techniques, il demeure une source précieuse d'informations sur la dynamique des nappes souterraines, en particulier pour l'analyse des tendances de long terme et l'évaluation des effets des variations climatiques sur la recharge. Il est à noter qu'à l'échelle de la CVO il n'existe aucun piézomètre.

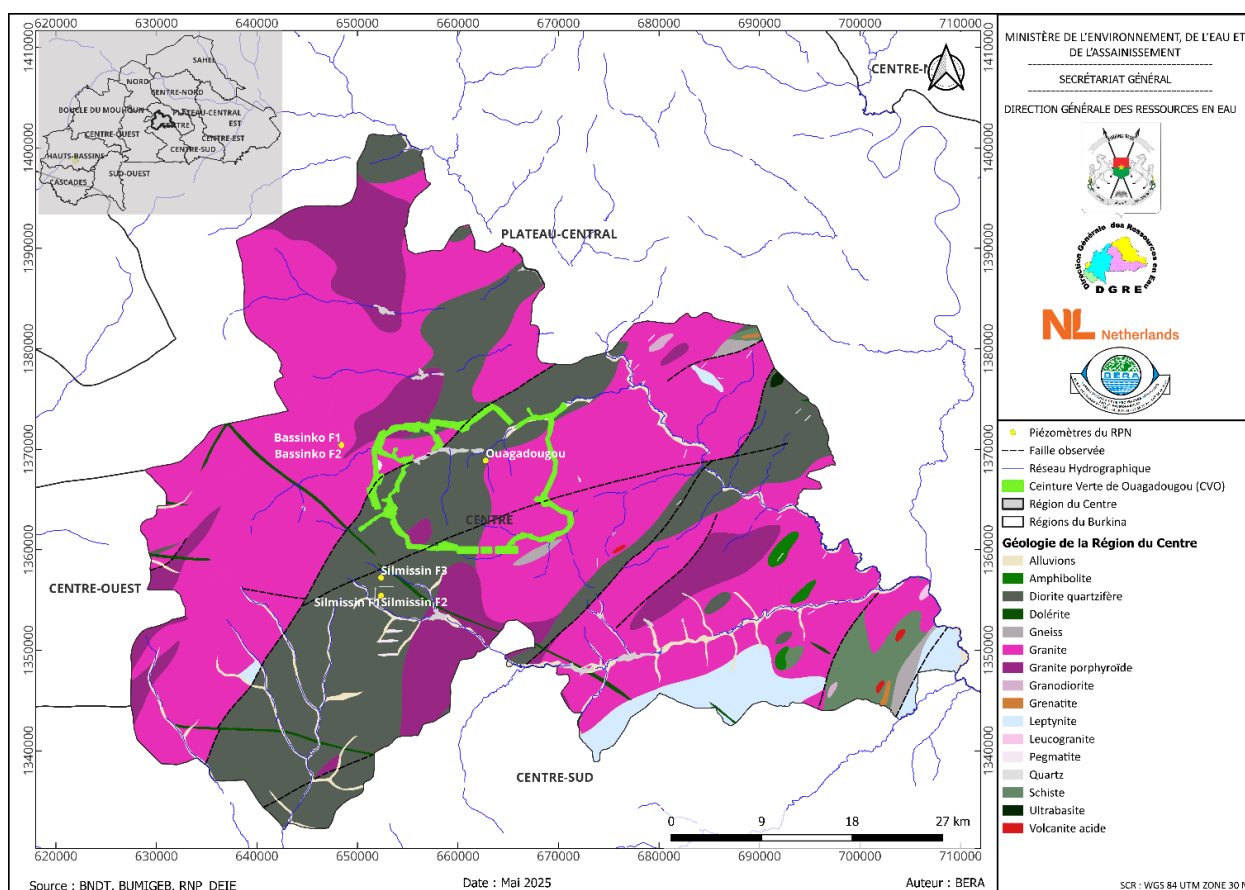


Figure 0-1 : Localisation des piézomètres du RPN de la région du Centre

Tableau 0-1 : Caractéristiques des piézomètres du RPN sur l'étendue de la région du Centre

Nom	Création	Profondeur(m)	Altération(m)	X_dd	Y_dd	Sonde	BUMIGEB description
Bassinko F1	1984-11-07	58	30	-1,64	12,39	Non	Granite à biotite
Bassinko F2	1984-11-08	54	11	-1,63	12,39	Auto	Granite à biotite
Ouaga	1978-05-12	20	11	-1,50	12,38	Non	Granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées
Silmissin F1	1984-11-20	64	10	-1,60	12,26	Auto	Granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées
Silmissin F2	1985-03-13	35	35	-1,60	12,26	Non	Altérites de granodiorite
Silmissin F3	1984-11-19	54	36	-1,60	12,27	Auto	Franche fissurée des Granodiorites, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées

I.17.2. Typologie des piézomètres du Réseau Piézométrique National

La typologie des piézomètres du RPN a été pensée et conçue sur chaque site dans l'optique de suivre l'hydrodynamisme des aquifères souterrains (superficiels et profonds), les interactions, les flux d'eau et les possibles transferts de contaminants entre des niveaux réservoirs superficiel, intermédiaire et/ou profond.

Pour ce faire RPN conçu a été installé selon les contextes géomorphologique (plateau, versant ou basfond) et avec plusieurs tubes piézométriques captant des niveaux aquifères différents, il est ainsi constitué soit :

- ✓ d'un tube piézométrique unique captant un seul niveau aquifère ou,
- ✓ d'un doublet de tubes piézométriques : captant un niveau superficiel et un niveau profond. Le tube piézométrique du niveau superficiel est appelé « P » pour petit tube et celui profond « G » pour Grand tube piézométrique
- ✓ ou d'un triplet de tubes piézométriques captant dans ce cas un niveau superficiel, un niveau intermédiaire et un niveau profond (Figure 0-2).

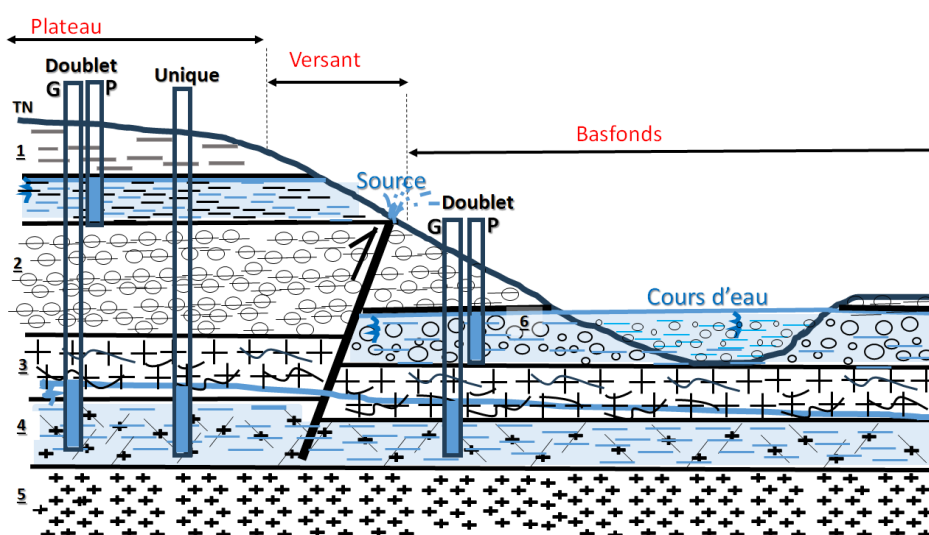


Figure 0-2 : Exemple type du réseau piézométrique national actuel. Légende : 1 : cuirasse latéritique, 2 : aquifère superficiel dans les latérites, 3 : argiles latéritiques, 4 : arène grenue, 5 : aquifère profond dans la roche fissurée, 6 : roche saine, 7 : aquifère superficiel dans les alluvions ou aquifère alluvial (aquifère d'interfluve), TN : Terrain Naturel, G : Grand tube piézométrique, P : Petit tube piézométrique Centre

Dans la présente étude Les informations des 03 sites du RPN dans le DCO et qui seront analysés dans cette étude donne la typologie ci-après :

- Site de Bassinko : constitué d'un doublet de tubes piézométriques nommé Bassinko F1 et Bassinko F2 captant les mêmes types d'aquifères profonds granitiques mais implantés sur un versant et un plateau
- Site de Silmissin : constitué d'un triplet de tubes piézométriques captant les 03 niveaux aquifères du socle cristallin (franche altérée, fissurée et fracturée profonde)
- Site de Ouagadougou : captant l'horizon intermédiaire, l'aquifère de socle fissurée

I.17.3. Variation temporelle de la piézométrie

L'analyse des variations temporelles de la piézométrie est présentée dans les lignes ci-après. Elle est réalisée sur les 6 piézomètres du RPN des trois sites décrits ci-dessus, tous présents dans le DCO mais en dehors de l'espace de la CVO.

I.17.3.1. Site de Bassinko

Le graphique ci-dessous présente l'évolution temporelle des niveaux piézométriques mesurés dans deux piézomètres (Bassinko F1 et Bassinko F2) installés sur les versants et plateaux cristallins, ainsi que la pluviométrie enregistrée à la station de l'Aéroport de Ouagadougou, sur la période 1986-2022. Des discontinuités apparaissent dans les séries, notamment autour des années 1996-1998 et 2002-2007, probablement liées à des interruptions de mesures ou à des problèmes d'instrumentation. Ces lacunes ne remettent cependant pas en cause la cohérence globale des tendances observées,

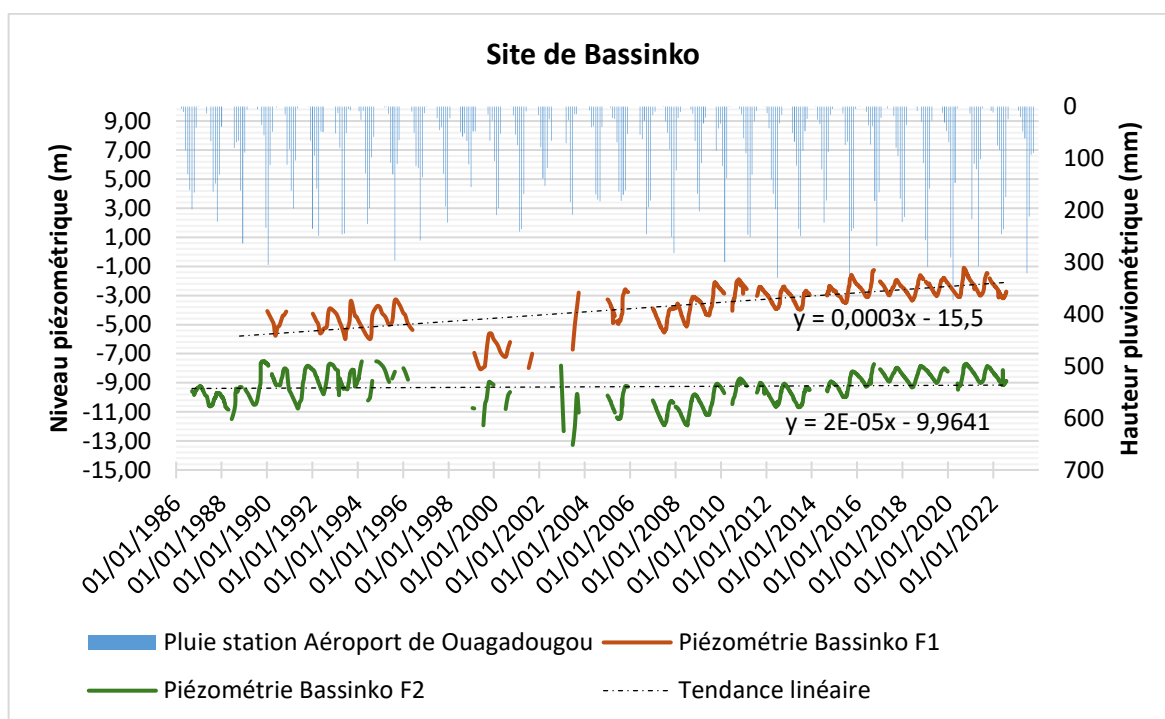


Figure 0-3 : Chroniques des profondeurs du niveau statique sur le site de Bassinko et de la pluviométrie mensuelle

Les séries piézométriques de Bassinko F1 (courbe orange) et F2 (courbe verte) montrent des variations globalement synchrones, malgré une différence de niveaux d'eau d'environ 4 m entre ces deux piézomètres. Cette évolution montre que les deux piézomètres du site de Bassinko capteraient les

mêmes formations aquifères à des niveaux de fracturation différent. Une différence imposée soit par la profondeur forée, les différences de contextes géomorphologiques du site (versant et plateau) ou des caractéristiques hydrodynamiques propres à chaque point de mesure.

L'analyse des tendances linéaires indique une évolution contrastée entre les deux piézomètres :

- Pour Bassinko F1, la tendance linéaire est légèrement positive ($y = 0,0003x - 15,5$), traduisant une très légère remontée du niveau piézométrique sur la période d'observation.
- Pour Bassinko F2, la tendance est quasiment stable ($y = 2E-05x - 9,9641$), suggérant une stabilité du niveau d'eau à long terme, malgré des fluctuations saisonnières.

Ces tendances, bien que faibles, témoignent d'un système aquifère relativement équilibré, sans déclin marqué du niveau d'eau sur la période considérée. Cela contraste avec certains contextes où l'exploitation ou la sécheresse entraînent une baisse continue des niveaux piézométriques.

Les variations piézométriques présentent un comportement saisonnier en phase avec les épisodes de précipitations. Les pics de pluviométrie, matérialisés par les barres bleues, correspondent généralement à des remontées du niveau piézométrique, traduisant une réponse de l'aquifère à la recharge par infiltration des eaux de pluie. Toutefois, l'amplitude des fluctuations reste relativement modérée, ce qui peut indiquer une recharge diffuse, un effet tampon du système aquifère, ou une faible transmissivité locale.

On note que la réponse piézométrique n'est pas strictement instantanée par rapport aux épisodes de pluie, ce qui suggère l'existence d'un délai de transfert entre la surface et la nappe, typique des systèmes où la zone non saturée joue un rôle de filtre ou de stockage temporaire,

L'absence de fluctuations piézométriques majeures et l'absence de tendance à la baisse marquée suggèrent que le site de Bassinko ne subit pas de pression anthropique excessive (pompage, exploitation intensive), ou que la recharge naturelle compense les prélèvements éventuels. La synchronisation avec la pluviométrie confirme le rôle dominant de la recharge naturelle dans la dynamique de la nappe.

L'analyse du site de Bassinko met en évidence :

- Une dynamique piézométrique relativement stable à long terme, avec une légère tendance à la hausse pour Bassinko F1 qui serait certainement liée à la topographie ou le contexte géomorphologique facilitant une alimentation rapide de ce piézomètre.
- Des fluctuations saisonnières en phase avec la pluviométrie, traduisant une recharge effective de l'aquifère lors des saisons pluvieuses,
- L'absence de déclin piézométrique suggère un équilibre entre recharge et décharge, et une pression anthropique limitée sur la ressource,

I.17.3.2. Site de Silmissin

Le graphique ci-dessous présente l'évolution temporelle des niveaux piézométriques mesurés dans le triplet des tubes piézométriques (Silmissin F1, F2 et F3), ainsi que la pluviométrie enregistrée à la station de l'Aéroport de Ouagadougou sur la période 1986-2022.

Pour plus lisibilité le graphique, les courbes de F2 et F3 ont été respectivement expressément décalés vers le bas de 5 m et 10 m. Des interruptions de mesure sont visibles notamment entre 1997 et 2010 pour tous les piézomètres et entre 2018 et 2021 pour F2.

Ces lacunes peuvent être dues à des défauts d'instrumentation, arrêt de surveillance, ou changement d'équipement, sans altérer significativement l'interprétation globale.

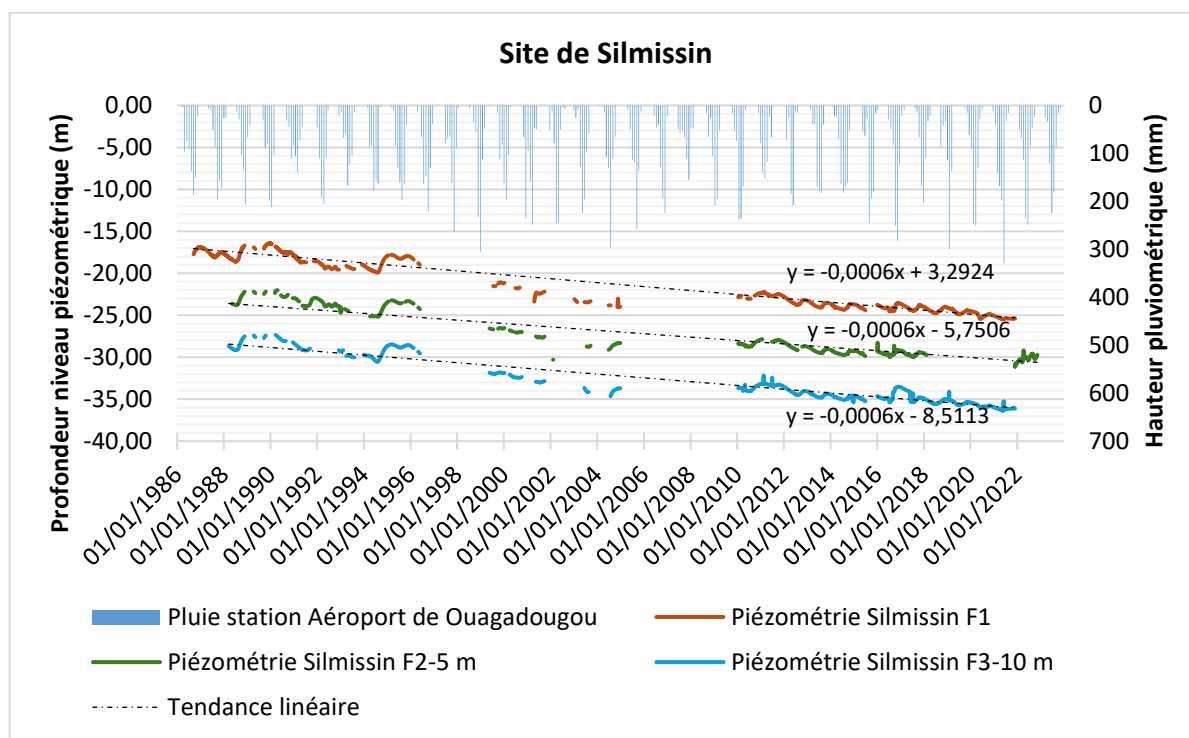


Figure 0-4 : Chroniques des profondeurs du niveau statique sur le site de Silmissin et de la pluviométrie mensuelle

Tout comme à Bassinko, les séries piézométriques mesurés dans les trois tubes piézométriques de Silmissin F1 (courbe orange), F2 (courbe verte) et F3 (courbe bleue) montrent des variations globalement synchrones. Ces ouvrages étant sensés captés les niveaux altérés, fissurés et fracturés des granodiorites aquifères, cette tendance piézométrique similaire au niveau des trois tubes piézométriques confirmerait la similarité des matériaux aquifères captés et une même réponse aux évènements pluvieux. Toutefois, les tubes piézométriques présentent une tendance uniformément décroissante du niveau piézométrique sur la période observée, avec une pente similaire (environ - 0,0006x) mais des ordonnées différentes (lie au décalage volontaire des courbes) :

- Silmissin F1 : $y = -0,0006x + 3,2924$
- Silmissin F2 : $y = -0,0006x - 5,7506$
- Silmissin F3 : $y = -0,0006x - 8,5113$

Ces tendances indiquent une baisse progressive des niveaux d'eau souterraine, traduisant soit une recharge insuffisante pour compenser les pertes (évapotranspiration, drainage naturel, pompages), une possible augmentation de la pression anthropique (pompage, urbanisation) ou encore une réponse différée à une évolution climatique (sécheresse progressive).

Les barres bleues représentant la pluviométrie annuelle indiquent une variabilité interannuelle importante, avec des épisodes de fortes pluies et des années plus sèches. Les fluctuations

piézométriques présentent un comportement globalement en phase avec la pluviométrie, même si le signal est atténué et parfois décalé, traduisant :

- Une réponse différée de l'aquifère liée au temps de transfert dans la zone non saturée ;
- Un effet tampon ou inertiel du système aquifère, probablement à transmissivité faible à moyenne.

L'analyse du site de Silmissin met ainsi en évidence :

- Une baisse continue des niveaux piézométriques sur la période 1986-2022 pour les trois tubes piézométriques pour les trois niveaux aquifères captés, suggérant une pression croissante ou une recharge insuffisante.
- Une bonne synchronisation inter-piézométrique, traduisant une connexion hydrogéologique probable entre les points de mesure,
- Une réponse saisonnière modérée aux épisodes pluvieux, indiquant une recharge effective mais freinée par les caractéristiques du milieu (profondeur de la nappe, faible transmissivité, etc.).
- L'absence de remontée significative malgré les précipitations montre que l'équilibre recharge/décharge est rompu au profit d'un déficit, nécessitant une attention particulière en termes de gestion de la ressource.

I.17.3.3. Site de Ouagadougou

Le graphique présente l'évolution du niveau piézométrique d'un ouvrage situé à Ouagadougou, en parallèle avec la pluviométrie annuelle mesurée à la station de l'Aéroport de Ouagadougou, pour la période 1978-2014.

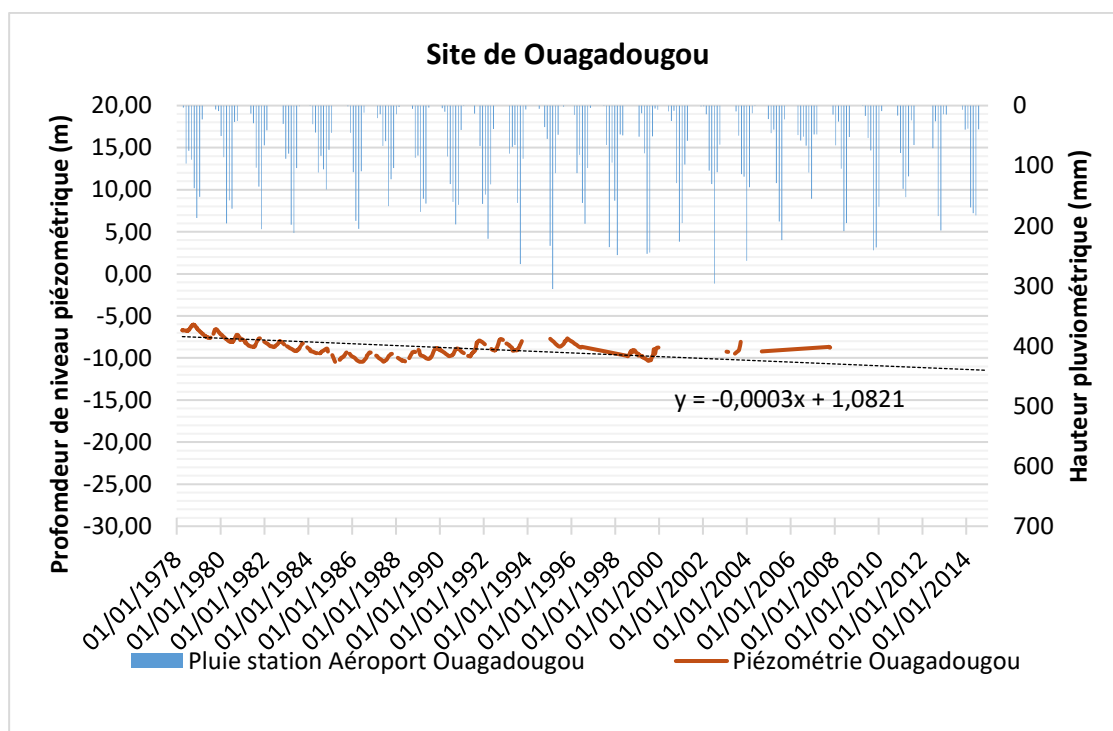


Figure 0-5 : Chroniques des profondeurs du niveau statique sur le site de Ouagadougou et de la pluviométrie mensuelle

La courbe orange représente le niveau piézométrique, tandis que les barres bleues indiquent les hauteurs annuelles de pluie. Le niveau d'eau est exprimé en profondeur par rapport au sol (en m), de sorte que des valeurs plus basses (plus négatives) correspondent à des niveaux plus profonds. Des lacunes importantes apparaissent entre 2000 et 2004 et entre 2006 et 2008, puis au-delà de 2010. Ces interruptions sont probablement dues à des arrêts de mesures, pannes d'équipement, ou des changements de protocole. Malgré cela, la tendance globale reste lisible.

La tendance linéaire affichée pour la piézométrie est : $y = -0,0003x + 1,0821$.

Cela traduit une lente mais constante baisse du niveau piézométrique au fil du temps, soit environ 0,3 mètre par millier de jours (environ une baisse de 3 cm par an sur la période observée). Cette tendance indique, une possible influence de prélèvements anthropiques (eau domestique, forage) dans un contexte urbain ou une réduction progressive de la recharge liée à la baisse de la pluviométrie ou à une imperméabilisation croissante du sol due à l'urbanisation.

La pluviométrie montre une forte variabilité interannuelle, avec des années très humides et d'autres, nettement plus sèches, notamment après 1984. Malgré cette variabilité, le niveau piézométrique ne réagit pas fortement aux fluctuations de la pluie. Pas de remontée nette du niveau d'eau lors des années pluvieuses, ce qui peut être dû à une recharge lente ou difficile. Cela suggère un système aquifère peu réactif, caractérisé par une zone non saturée épaisse, une perméabilité faible ou une recharge indirecte très localisée (infiltration via fissures, mares, etc.).

L'analyse du site met en évidence :

- Une baisse lente mais continue du niveau piézométrique sur plus de trois décennies ;
- Une faible réponse de l'aquifère aux variations de pluviométrie, suggérant une recharge limitée ou retardée ;
- L'influence probable de facteurs anthropiques et urbains, notamment le pompage et l'imperméabilisation croissante des sols ;
- Une situation à surveiller dans un contexte de demande croissante en eau et de changement climatique.

I.18. Le réseau piézométrique de l'ONEA

Il existe un réseau piézométrique pour le compte de l'ONEA, composé de 13 ouvrages tous localisés dans la ville de Ouagadougou, mais en dehors de la Ceinture Verte (Figure 0-6). Toutefois, l'absence d'informations précises sur la disponibilité et l'accessibilité des données issues de ces piézomètres constitue un obstacle majeur à leur exploitation pour des analyses piézométriques approfondies sur les aquifères concernés. Les caractéristiques techniques de ces ouvrages sont néanmoins résumées dans le Tableau 0-2, permettant d'identifier leur localisation et leur profondeur en dépit de l'impossibilité d'intégrer leurs mesures dans l'interprétation de l'hydrodynamisme.

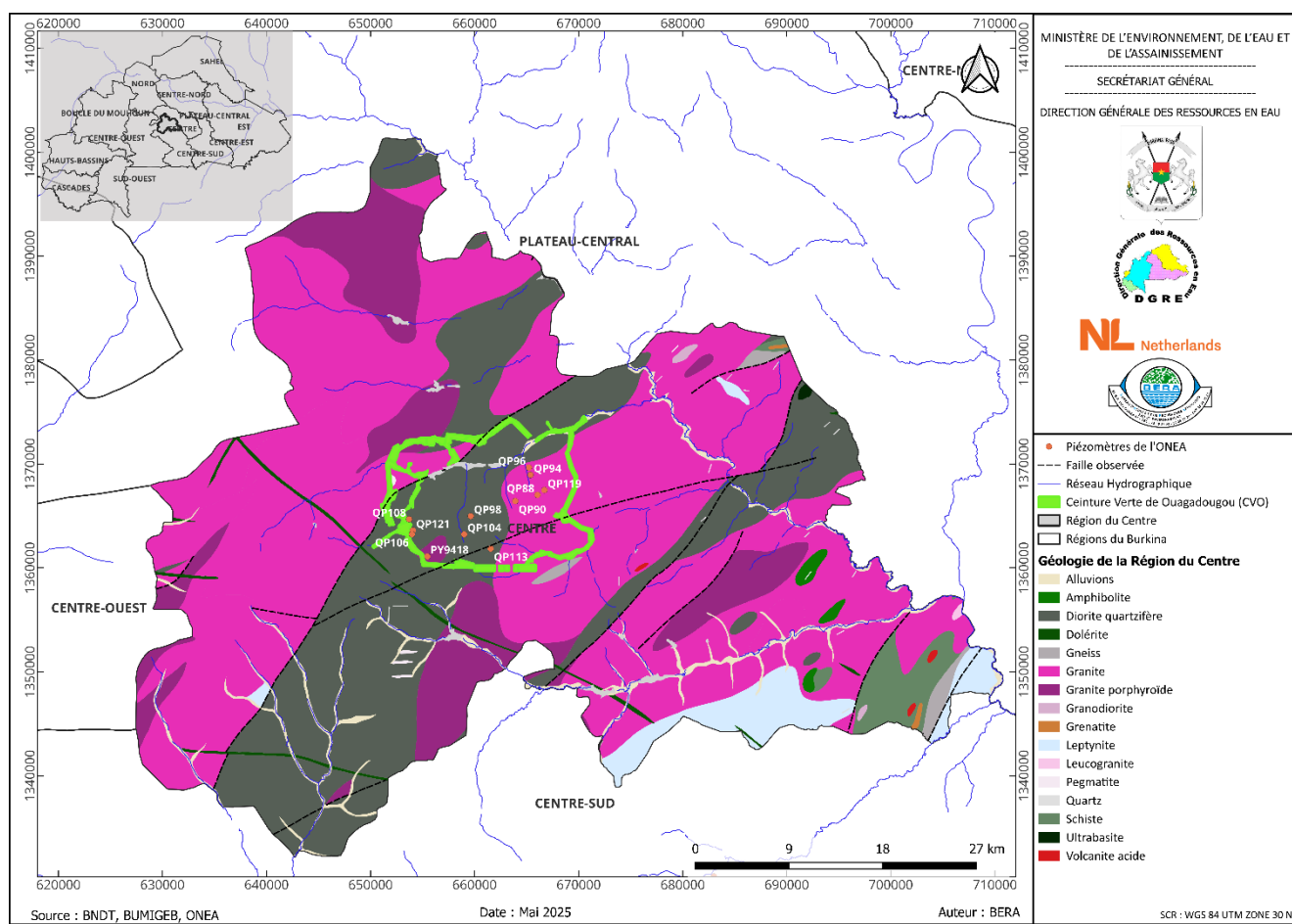


Figure 0-6 : Localisation des piézomètres de l'ONEA sur l'étendue de la région du Centre

Tableau 0-2 : Caractéristiques des piézomètres de l'ONEA sur l'étendue de la région du Centre

Captage	Nom	X_utm30n	Y_utm30n	NS (m)	Débit (m³/h)	Prof équipée (m)	Crépine (m)	BUMIGEB description
Zone ZACA (Ouaga 2000)	F11			24,74	3,77	76	64,70-74,50	
Sect,17 côté pharmacie Boulmiougou	QP121	654073	1363605	5,63	4,5	72,8	30,36-48,12 ; 59,96-71,80	Granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées
Sect,17, École primaire Adventiste	QP106	653984	1363236					Granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées
Sect,17, Restaurant Yampoutin	QP108	653704	1364679	6,96	2,1	71,5	22,64-37,44 ; 49,28-70,00	Granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées
Sect,16, Télécentre Trikouni	QP104	658999	1363233	7	0	69,75	30,14-33,90 ; 59,84-68,75	Granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées
Sect,7, Face École ONATEL	QP98	659624	1364987	11,48	2,8	69,15	25,15-54,15 ; 59,95-68,65	Granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées
Sect,29, Cour de la mosquée	QP90	663906	1366425					Granite à biotite
Sect,28, Ecole Wend-Panga	QP94	665372	1368952	9,67	1,2	73,05	24,49-45,32 ; 57,20-72,05	Granite à biotite
Sect,28, Télécentre Eben-Ezer	QP96	665217	1369658	8,15	0,5	73	27,45-42,3 ; 57,15-72,00	Granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées
Sect,28, Shell, Ecole Bao Yam	QP119	666709	1367485					Granite à biotite
Sect,28, Ecole Bao Yam	QP88	666047	1367020	25,15	0,6	67,26	33,59-48,44 ; 51,41-66,26	Granite à biotite
Sect,23, Pharmacie METEBA (Tanghin)	QP113	661549	1361849	12,34	0,5	70,74	40,40-57,90 ; 63,82-69,74	Granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées
Pissy 2	PY9418	655456	1361107					Granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées et foliées

ÉTUDE DES MÉCANISMES DE RECHARGES ET ESTIMATION DE LA RECHARGE

I.19. Généralités sur la recharge des aquifères

L'estimation de la recharge des aquifères est un enjeu central pour la gestion durable des ressources en eaux souterraines. La recharge se définit comme le volume d'eau atteignant la nappe phréatique après infiltration à travers la zone non saturée, renouvelant ainsi le réservoir souterrain (de Vries and Simmers, 2002). Ce processus dépend principalement des précipitations, mais aussi de la fonte des neiges et, dans certains contextes, de l'apport d'eau par les rivières, les lacs ou des activités humaines telles que l'irrigation ou les fuites de réseaux (Sophocleous, 2004).

La recharge potentielle correspond à la quantité d'eau infiltrée disponible pour la recharge, après soustraction de l'évapotranspiration et du ruissellement. Cependant, seule une fraction de cette eau atteint effectivement la nappe, constituant la recharge réelle. Ce différentiel est particulièrement marqué dans les zones arides et semi-arides, où les pertes par évapotranspiration et les ruissellement dits d'intensités sont très importantes (Healy, 2010; Sauret E., 2013).

La recharge peut être d'origine naturelle ou anthropique. Les sources naturelles incluent les précipitations, les lacs, les rivières et les échanges entre aquifères. Les sources anthropiques comprennent les pertes d'irrigation, les fuites de conduites d'eau, les égouts et l'irrigation urbaine excessive (Sophocleous, 2004). L'importance relative de ces sources varie selon le contexte climatique, géologique et l'occupation du sol.

Trois grands mécanismes de recharge sont distingués (Lerner, 2002, 1990) :

- **Recharge directe (ou diffuse)** : Elle correspond à la percolation verticale des précipitations à travers la zone vadose, sans concentration particulière. Elle domine dans les milieux humides, où la fréquence des pluies favorise la saturation des sols et la percolation profonde. Dans les milieux arides, la saisonnalité des précipitations et l'évapotranspiration élevée limitent fortement ce mécanisme, qui devient alors sporadique et spatialement hétérogène (Scanlon et al., 2002).
- **Recharge indirecte** : Elle résulte de l'infiltration à partir des lits de rivières, de lacs ou d'autres aquifères. Ce mécanisme est particulièrement important dans les zones où les échanges entre eaux de surface et eaux souterraines sont significatifs, bien que leur quantification demeure délicate (Healy, 2010),
- **Recharge localisée** : Elle est liée à l'infiltration concentrée en certains points du paysage, tels que les fissures, dolines ou dépressions topographiques. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les milieux arides, où les écoulements de surface convergent vers des points bas, générant des épisodes de recharge ponctuelle mais parfois très intenses (Leduc et al., 2003).

L'intensité et l'efficacité de la recharge sont contrôlées par de nombreux paramètres : la texture et la perméabilité du sol, la morphologie du terrain, la couverture végétale, le climat (quantité, fréquence et intensité des précipitations, évapotranspiration), la proximité de

masses d'eau de surface et les caractéristiques hydrogéologiques du sous-sol (Healy, 2010). Cette variabilité explique l'hétérogénéité des taux de recharge observés à différentes échelles spatiales et temporelles (Scanlon et al., 2002).

Il convient de noter que dans la majorité des cas, la recharge des aquifères résulte de plusieurs de ces mécanismes. Leur importance respective varie selon les conditions climatiques. Dans les milieux humides, la recharge diffuse est généralement dominante, tandis que dans les milieux arides, la recharge localisée tend à jouer un rôle plus significatif (Lerner, 2002). L'eau peut ainsi atteindre la nappe de plusieurs façons : par écoulement diffus (mouvement en piston), par infiltration lente à travers la microporosité du sol, ou par des flux préférentiels empruntant des fissures ou des zones racinaires. Ces mécanismes coexistent souvent, mais leur contribution varie selon les conditions du sol et la structure du sous-sol (de Vries and Simmers, 2002).

L'estimation de la recharge, notamment en zones arides et semi-arides, demeure un défi scientifique majeur. Les faibles flux hydriques, la prédominance de l'évapotranspiration et la variabilité spatiale des précipitations rendent la quantification de la recharge délicate (Scanlon et al., 2002). Les méthodes développées pour les climats tempérés sont souvent inadaptées aux environnements arides (de Vries and Simmers, 2002).

On distingue principalement :

- **Méthodes physiques**

Les méthodes physiques reposent sur l'observation directe ou indirecte des flux d'eau et des propriétés du sol. Parmi les techniques les plus courantes figurent la méthode de fluctuation de la nappe phréatique (WTF), la méthode du plan à flux nul, la loi de Darcy, l'utilisation de lysimètres et le bilan hydrique (Patel et al., 2020). Ces méthodes sont simples et peu coûteuses, mais leur application peut être limitée par la disponibilité des données et la variabilité des propriétés du milieu.

- **Techniques de traçage**

Les techniques de traçage utilisent des traceurs naturels (chlorure, tritium, isotopes stables) ou anthropiques (CFCs, SF₆, ³⁶Cl, ¹²⁹I) pour évaluer la recharge sans recourir à des mesures directes des fluctuations d'eau (Hillel et al., 2008). Ces approches sont particulièrement utiles pour caractériser la recharge sur des périodes longues ou dans des contextes où les flux sont faibles.

- **Approches numériques**

Les approches numériques s'appuient sur la modélisation informatique des écoulements souterrains et de la recharge, à l'aide de modèles spatialisés, conceptuels ou de type boîte noire. Elles permettent d'intégrer la complexité des processus et des interactions entre les différentes composantes du système hydrogéologique, mais nécessitent des données d'entrée fiables et une calibration rigoureuse (Healy, 2010).

En tenant compte des données disponibles et exploitables dans ce contexte, la méthode bilantaire spatialisée a été utilisée.

I.20. Évaluation par approche bilantaire spatialisée

Cette méthode consiste à estimer la quantité d'eau qui s'infiltre dans le système aquifère et recharge les réserves souterraines. Pour appliquer la méthode bilantaire, plusieurs paramètres tels que les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface et la variation de stock d'eau dans le sol doivent être pris en compte.

Ainsi l'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et s'exprime comme suit, pour une période de temps Δt et sur un système donné :

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

P : la précipitation (mm) ;

ETR : l'évapotranspiration réelle (mm) ;

I : l'infiltration profonde ou Recharge (mm) ;

R : l'écoulement de surface (mm) ;

ΔS : la variation de stock d'eau dans le sol (mm),

L'évaluation de la recharge a été réalisée de manière spatialisée, c'est-à-dire en utilisant des paramètres distribués spatialement sur l'ensemble de la zone d'étude, à partir des données climatiques globales (FLDAS, CHIRPS, etc.).

Les données hydro-climatiques collectées et traitées (principalement par QGIS et par Google Earth Engine) s'étendent sur une période de 10 années, allant de 2014 à 2023. Le pas de temps du traitement et du calcul de la recharge est mensuel.

Les principaux résultats issus de l'approche bilantaire spatialisée appliquée à la période 2014-2023 sont présentés ci-après. Les cartes et le graphique permettent de visualiser la dynamique spatiale de la recharge annuelle, mettant en évidence sa variabilité interannuelle ainsi que sa distribution géographique au sein de la région du Centre.

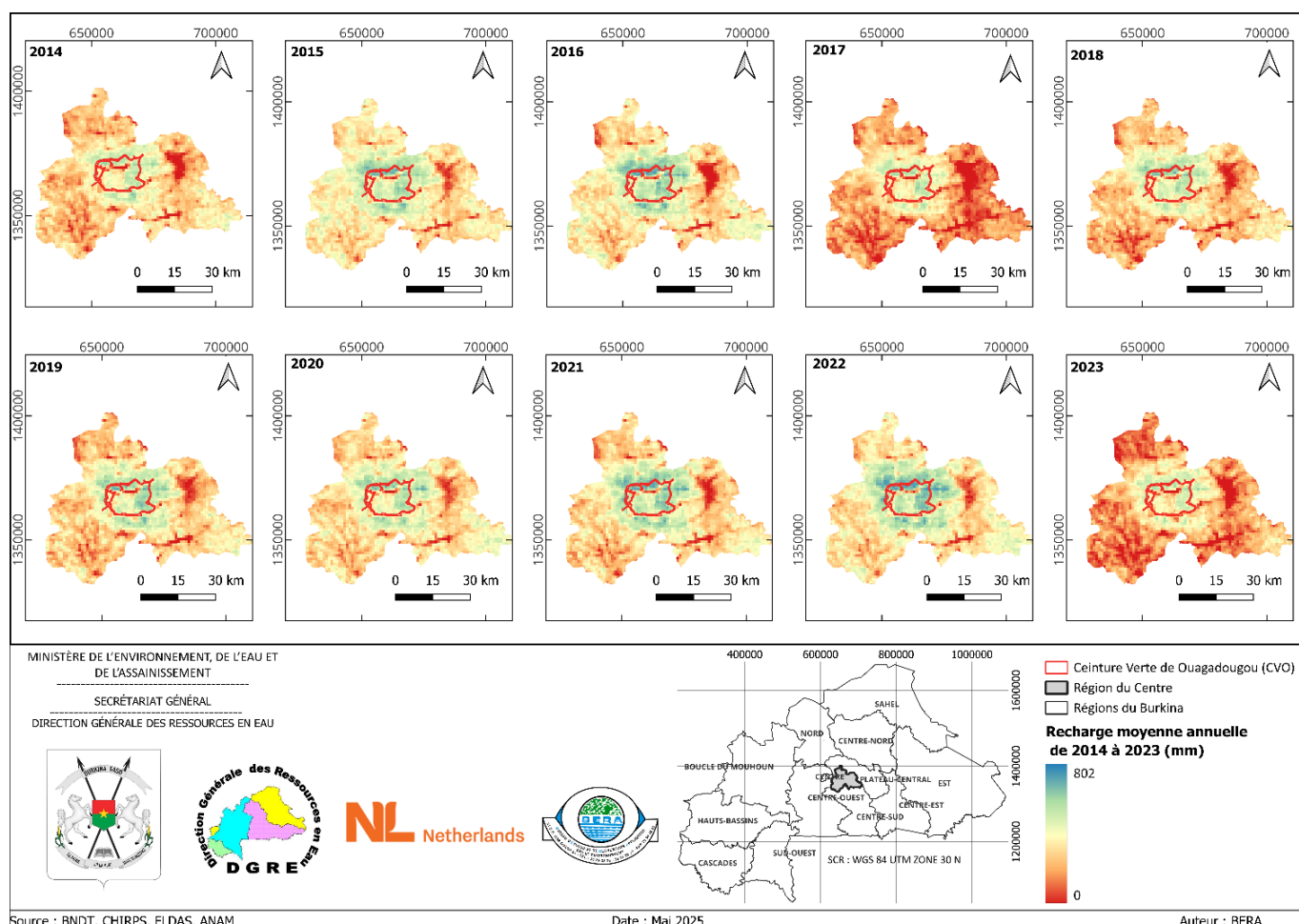


Figure 0-1 : Spatialisation de la recharge bilantaire annuelle de la période 2014 à 2023

Dans la région du Centre, l'analyse des résultats montre que la recharge bilantaire annuelle varie en lien avec les conditions pluviométriques, mais sans suivre une relation strictement proportionnelle. De manière générale, les années les plus arrosées tendent à présenter les recharges les plus significatives, comme en témoignent les années 2016 et 2022, qui se démarquent par des recharges particulièrement étendues, cohérentes avec les fortes précipitations enregistrées durant ces périodes. Cette tendance est confirmée par la courbe des recharges annuelles en fonction de la pluviométrie (Figure 0-2), où les pics de recharge correspondent globalement aux années de haute pluviométrie.

Cependant, une analyse plus fine met en évidence des discontinuités dans cette relation : la recharge ne croît pas de manière linéaire avec les pluies. Par exemple, l'année 2021, bien qu'ayant reçu une pluviométrie plus importante que 2022, présente une recharge inférieure. Cette observation suggère que d'autres facteurs que la seule quantité de pluie influencent la recharge effective, tels que l'intensité et la répartition temporelle des pluies, la capacité d'infiltration des sols, l'occupation du sol, ou encore les pertes par ruissellement. Ces résultats soulignent la complexité des mécanismes de recharge dans les aquifères de socle du Centre, et l'importance de considérer des paramètres complémentaires à la seule hauteur de pluie dans l'évaluation de la recharge.

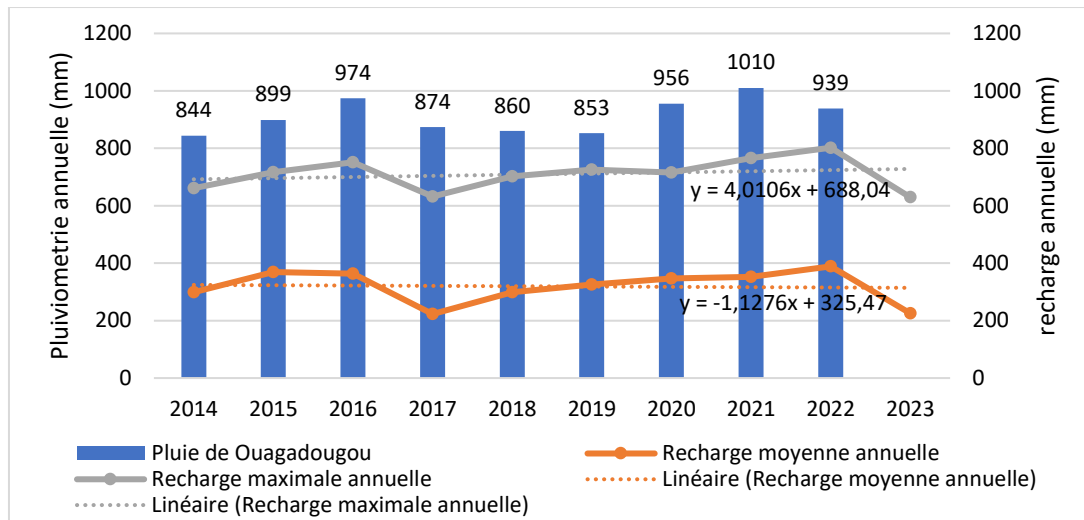


Figure 0-2 : Graphique de la recharge bilantaire moyenne et maximale annuelle de la région du Centre pour la période 2014 à 2023

La Figure 0-3 présente la répartition spatiale de la moyenne de la recharge calculée par la méthode bilantaire. L'évaluation indique des valeurs de recharge annuelle variant spatialement entre 0 et 680 mm dans la région du Centre. La recharge moyenne est de 319 mm. Elle est plus élevée dans la zone des périphéries de Ouagadougou et plus faible dans le centre de la ville et les lits des cours d'eau. Ces zones ne facilitent effectivement pas la recharge directe des aquifères.

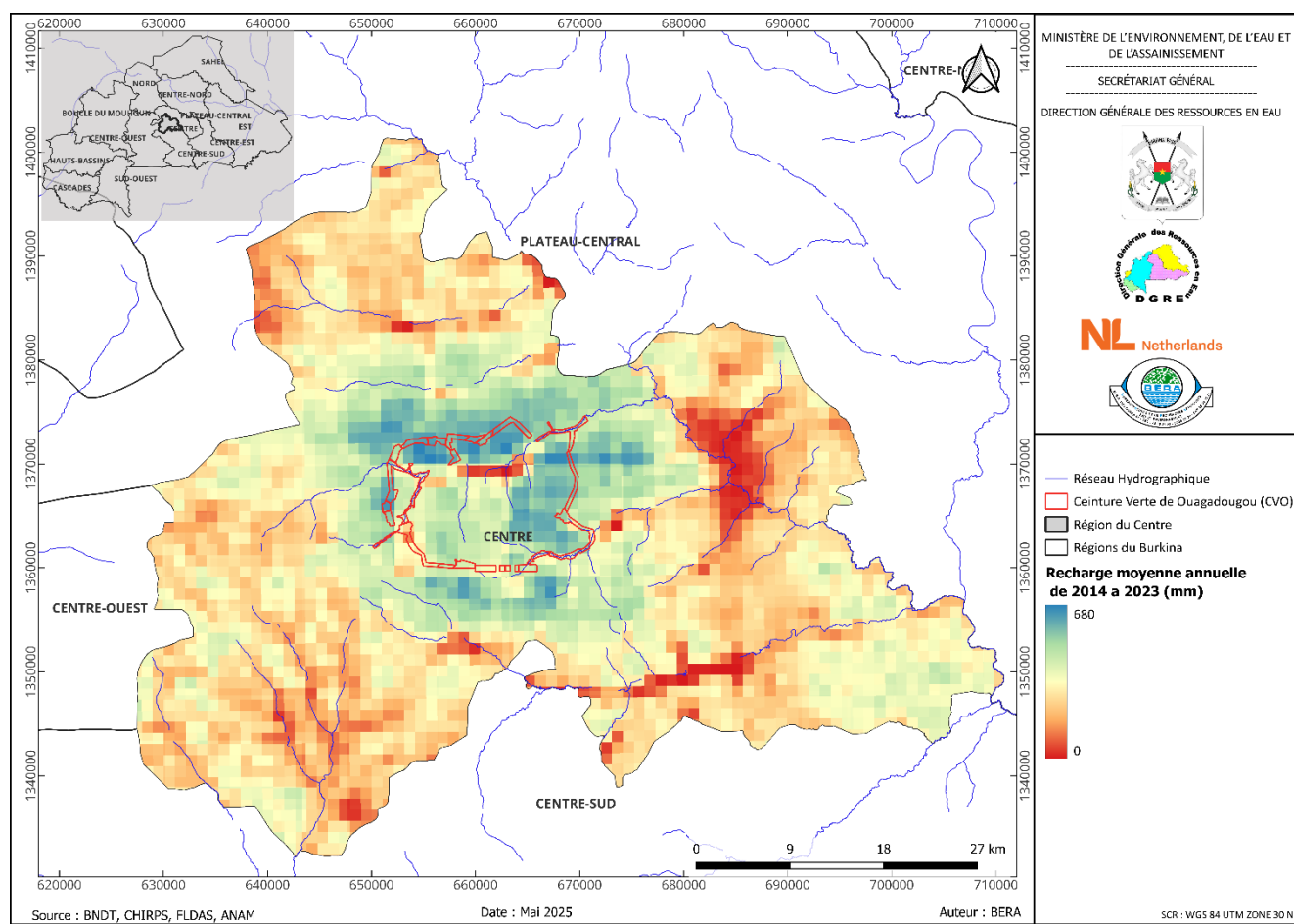


Figure 0-3 : Répartition spatiale de la recharge bilantaire moyenne annuelle de 2014 à 2023

ÉVALUATION DU POTENTIEL EN EAU SOUTERRAINE / ANALYSE MULTICRITERES (AMC)

I.21. Généralités

Le sous-sol cristallin est très complexe, la recherche d'eau souterraine nécessite la détection des conditions hydrogéologiques spécifiques pour augmenter les chances de réalisation des forages positifs. Parmi les méthodologies de détection des zones aux conditions favorables, on a la méthode d'Analyse Multicritère (AMC).

Il existe plusieurs méthodes d'analyses multicritères. Chaque méthode a une approche spécifique et peut produire des résultats différents. Leur objectif commun est d'aider l'opérateur à formaliser un problème et à expliciter le contexte de décision avant d'évaluer et de comparer les solutions.

Dans cette étude, nous utiliserons la méthode d'analyse hiérarchique (AHP) développée par Saaty en 1980. Cette approche a été employée avec succès dans plusieurs études similaires, notamment celles de Ahmed et al. (2021), Al-Djazouli et al. (2021), Benjmel et al. (2020), Dar, Rai, et Bhat (2020), Singh (2020), Mussa et al. (2020), Kumar et al. (2020), Siddi Raju et al. (2019), Zabihi et al. (2019), Mokadem et al. (2018), Das et Pardeshi (2018), Mukherjee et Oularé et al. (2017), Ibrahim, Karambiri, et Polcher (2014), Fashae et al. (2013) Assemian, Biemi, et Kouame (2013), Haouchine et al. (2010) et Hernández-Mora, Llamas, et Cortina (2001).

Cette technique d'analyse permet de prendre en compte de multiples critères et les incertitudes éventuelles. L'approche consiste à :

- Simplifier un problème en le décomposant en plusieurs sous-problèmes dans un système hiérarchique.
- Puis, on compare les différents critères deux à deux pour établir une matrice carrée selon l'échelle proposée par Saaty.

La méthode d'analyse hiérarchique (AHP) adoptée pour la cartographie des zones à potentiel aquifère favorable à la réalisation de forages à gros débits se résume comme suit :

1. Identification et reclassification des critères les plus pertinents influençant le potentiel aquifère en zone de socle (contexte géologique de la zone d'étude) ;
2. Standardisation et Pondération de ces critères ;
3. Combinaison et production de la carte thématique (indicateur hydrogéologique de disponibilité/d'accessibilité/d'exploitabilité de la ressource ;
4. Validation de la carte de disponibilité hydrogéologique.

Notons que les analyses et traitements des données d'entrée se feront à l'échelle de la région du Centre pour des questions de représentativités des données d'entrée, mais les cartes thématiques finales seront éditées à l'échelle de la ceinture verte de Ouagadougou

La démarche méthodologique de cette étude d'analyse multicritère est résumée dans le logigramme ci-après :

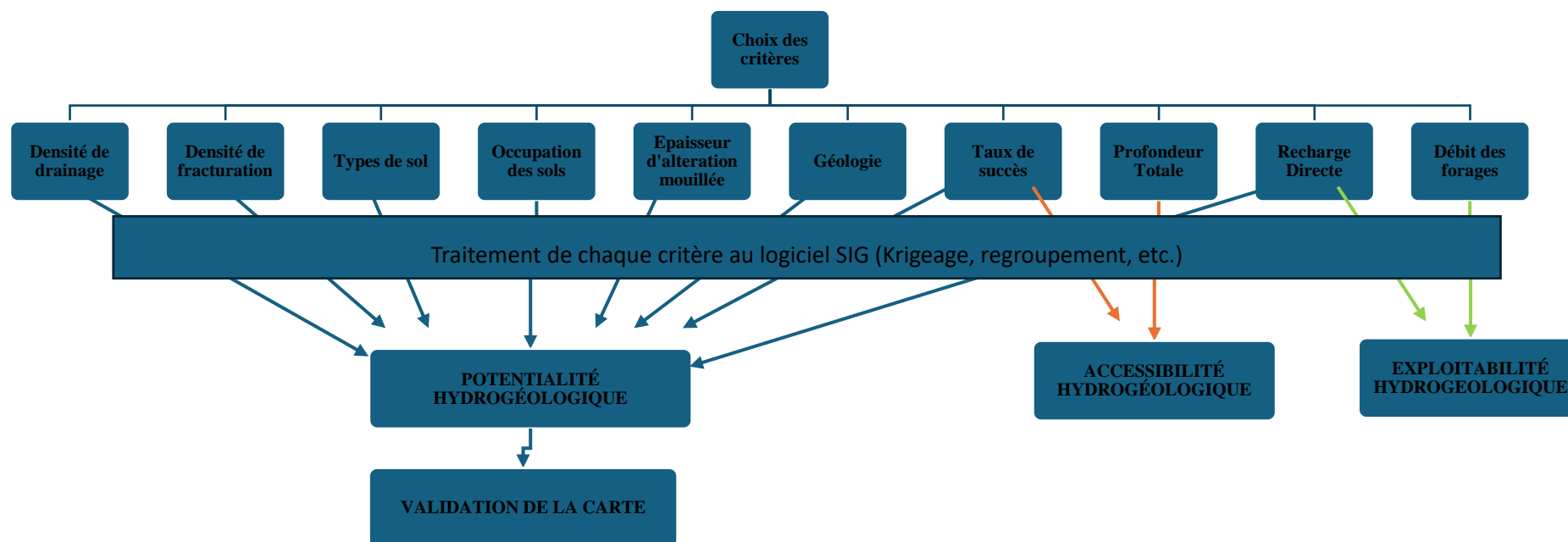


Figure 0-1 : Logigramme de la démarche méthodologique pour l'étude d'analyse multicritère (AMC) par la méthode AHP de Saati

I.22. Choix des critères

A la suite à une revue documentaire sur les travaux antérieurs de l'Analyse Multicritère (AMC) portant sur la cartographie des potentialités des aquifères en zone de socle cristallin, les critères les plus importants pour chaque indicateur retenu sont consignés dans le Tableau 0-1.

Tableau 0-1 : Listes des critères retenus pour la réalisation de l'étude de potentialités par l'analyse multicritères

Critère	Unité d'expression
Disponibilité	
Densité de drainage	(km/km ²)
Densité de fracturation	(km/km ²)
Type de sols	U
Occupation des sols	U
Épaisseur d'altération mouillée	m
Géologie	U
Taux de succès	%
Recharge directe	mm
Accessibilité	
Profondeur Totale	m
Taux de succès	%
Exploitabilité	
Débit des forages	m ³ /h
Recharge directe	mm

Les couches raster d'entrée seront ré-échantillonnées pour uniformiser la résolution (**on prendra 30 m comme résolution**) et reprojeter les couches thématiques d'entrée en **WGS 84/UTM Zone 30N**, qui est le système de coordonnées de la zone d'analyse.

Ensuite, une reclassification de ces rasters sera effectuée pour mettre toutes les classes des critères retenus dans une échelle cohérente, allant de **1 à 5 (très faible, faible, moyenne, forte, très forte)**. Chaque critère retenu sera ainsi subdivisé en classes représentant soit un intervalle de valeurs, soit un milieu particulier.

Les différents traitements sont effectués sur des logiciels SIG (ARCGIS, QGIS, ...).

I.22.1. Densité de drainage

La densité de drainage indique le taux de percolation de l'eau et est proportionnelle au ruissellement superficiel. Elle est indicatrice des propriétés des formations géologiques. Par conséquent, un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. À l'inverse, un bassin formé de roches imperméables, mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, va souvent présenter une densité de drainage élevée. En terme hydrogéologique les zones à faible densité de drainage ont un potentiel hydrogéologique élevé, car le ruissellement est moindre. Une densité de drainage plus élevée

implique un ruissellement plus important, ce qui signifie que moins d'eau s'infiltrera dans l'aquifère (Shaban, Khawlie, et Abdallah 2006).

La densité de drainage est obtenue en faisant le rapport de la longueur totale des cours d'eau de la zone d'étude par rapport à la superficie de cette zone. Elle s'exprime en (km/km²) (RAMBERT, 1973).

Le principe de la densité de drainage (DD) est obtenu par la formule suivante :

$$DD = \frac{\sum L_c}{A}$$

DD = densité de drainage en km/km² ;

L_c = Longueur totale des cours d'eau en km ;

A = surface de la zone en km²

Après traitement au logiciel SIG, la carte des densités de drainage suivante a été produite.

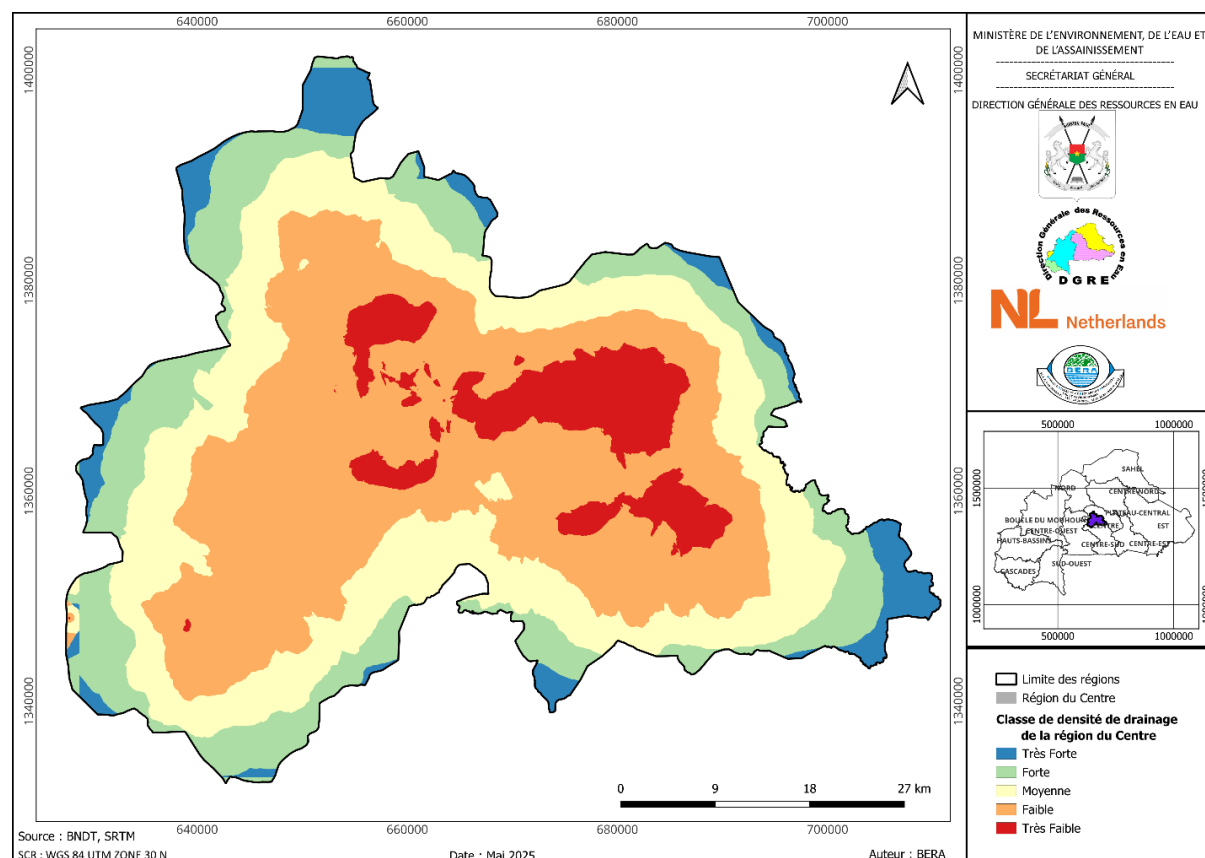


Figure 0-2 : Carte de densité de drainage de la région du Centre

Un détail explicatif complémentaire est fourni à la suite de la carte des densités pour préciser la qualification faite pour le critère au niveau de la légende. Le détail explicatif est résumé dans le tableau ci-après.

Tableau 0-2 : Détails explicatifs sur la légende de la carte de drainage

Critère	Valeurs Quantitatives	Valeurs Qualitatives
Densité de drainage	$\leq 0,16$	Très Forte
	0,16 - 0,26	Forte
	0,26 - 0,35	Moyenne
	0,35 - 0,45	Faible
	$> 0,45$	Très Faible

I.22.2. Densité de fracturation

La densité de fracturation est un critère essentiel en hydrogéologie de socle, car les aquifères y sont discontinus. Les forages productifs se trouvent souvent dans des fractures, filons, et contacts anormaux, qui sont des marqueurs de la déformation cassante. Dans l'application des procédures de l'AMC pour identifier les zones aquifères potentielles en zone de socle, la fracturation est un critère important. Les hydrogéologues utilisent divers paramètres déduits de la fracturation, comme la proximité d'une discontinuité majeure, les nœuds des fractures, et l'orientation des fractures pour la recherche de forages productifs. La densité des fractures donne des indications sur le degré de fracturation des roches, permettant d'identifier les zones hautement fracturées qui sont perméables et facilitent l'infiltration de l'eau (Krishnamurthy, 1996 ; Sener et al., 2005).

La densité des linéaments est l'un des facteurs d'influence les plus importants dans les aquifères du socle cristallin consolidé et fracturé.

Le principe de la densité de fracturation est traduit par la formule suivante :

$$DF = \frac{\sum L_f}{A}$$

Avec :

DF= Densité de fracturation en km/km² ;

L_f= Longueur totale des fractures en km ;

A = surface de la zone en km² ;

Après traitement et rastérisation au logiciel SIG, la carte des densités de fracturation suivante a été produite :

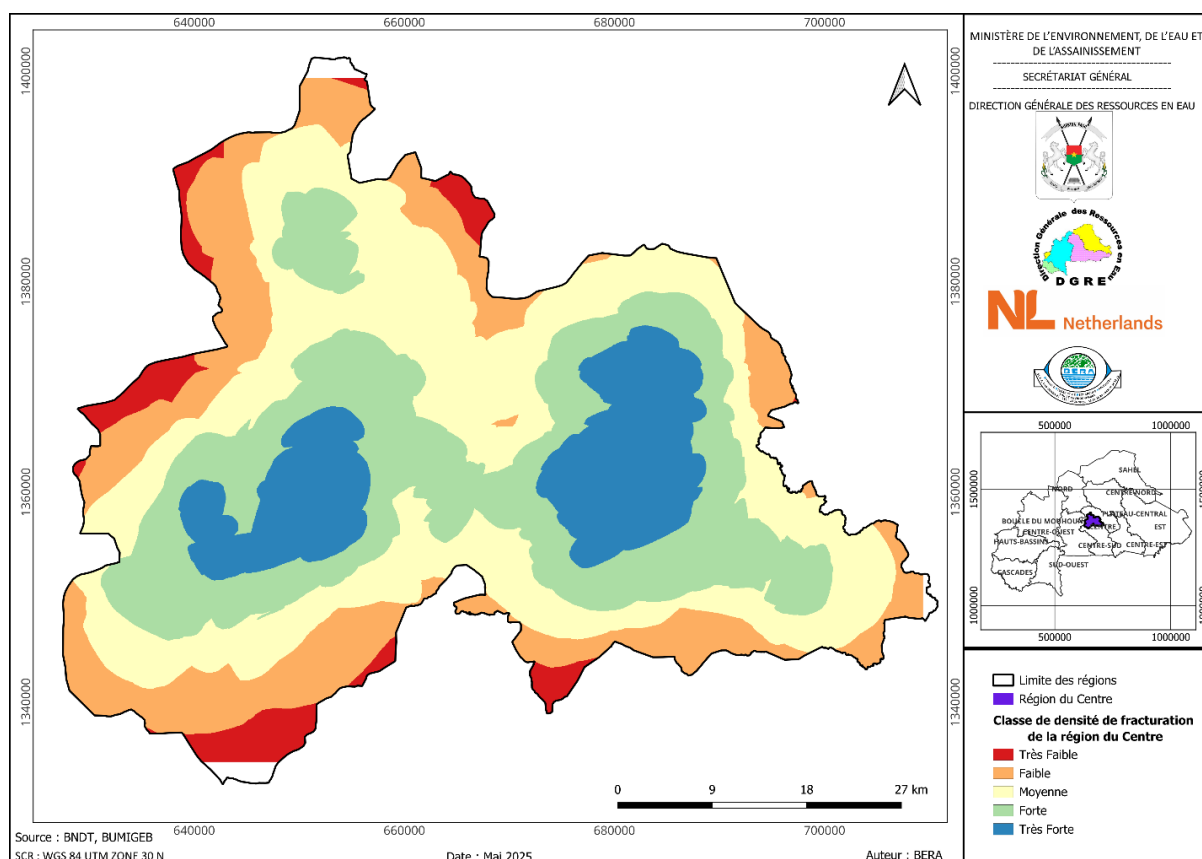


Figure 0-3 : Carte de densité de fracturation de la région du Centre

Un détail explicatif complémentaire est fourni à la suite de la carte de fracturation pour préciser la qualification faite pour le critère au niveau de la légende. Le détail explicatif est résumé dans le tableau ci-après :

Tableau 0-3 : Détails explicatifs sur la légende de la carte de fracturation

Critère	Valeurs Quantitatives	Valeurs Qualitatives
Densité de fracturation	$\leq 0,24$	Très Faible
	0,24 - 0,42	Faible
	0,42 - 0,61	Moyenne
	0,61 - 0,80	Forte
	$> 0,80$	Très Forte

I.22.3. Type de sol

L'importance du type de sol sur les potentialités hydrogéologiques est basée sur la capacité d'infiltration. Les sols à haute teneur en argile favorisent la rétention d'eau en surface, tandis que les sols riches en sable présentent un taux d'infiltration élevé. La carte des types de sols fournie par le BUNASOL sera utilisée pour cette analyse.

La carte des types de sols suivante a été retenue.

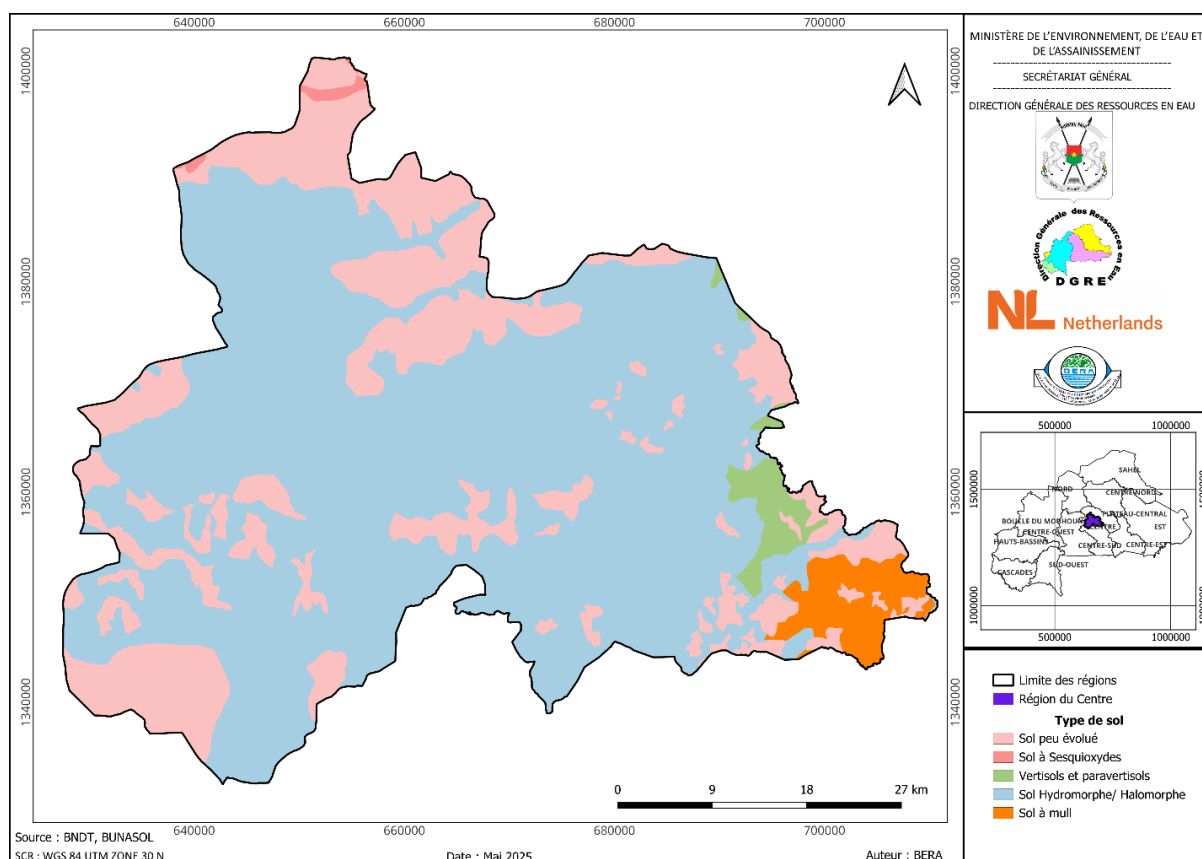


Figure 0-4 : Carte des types de sols de la région du Centre

I.22.4. Occupation du sol

L'occupation du sol englobe divers paramètres à la surface qui influencent la disponibilité d'eau souterraine. Les plus importants en termes hydrogéologiques sont la couverture végétale et les surfaces imperméables. Les surfaces imperméables (bâtiments, routes, etc.) retardent considérablement l'infiltration en favorisant le ruissellement (Bou Kheir et al., 2003). En revanche, la couverture végétale améliore l'infiltration en confinant l'eau dans le sol et réduisant l'évaporation directe.

La carte d'occupation du sol est obtenue à partir de la base de données de Copernicus Global Land Service (CGLS). Le CGLS fournit une carte d'occupation du sol en format raster avec une résolution de 250 m pour l'année 2022, illustrant les forêts, prairies, terres cultivées, plans d'eau, zones humides, et zones habitées.

À l'aide de logiciel SIG, la carte d'occupation du sol de la zone d'étude suivante a été retenue :

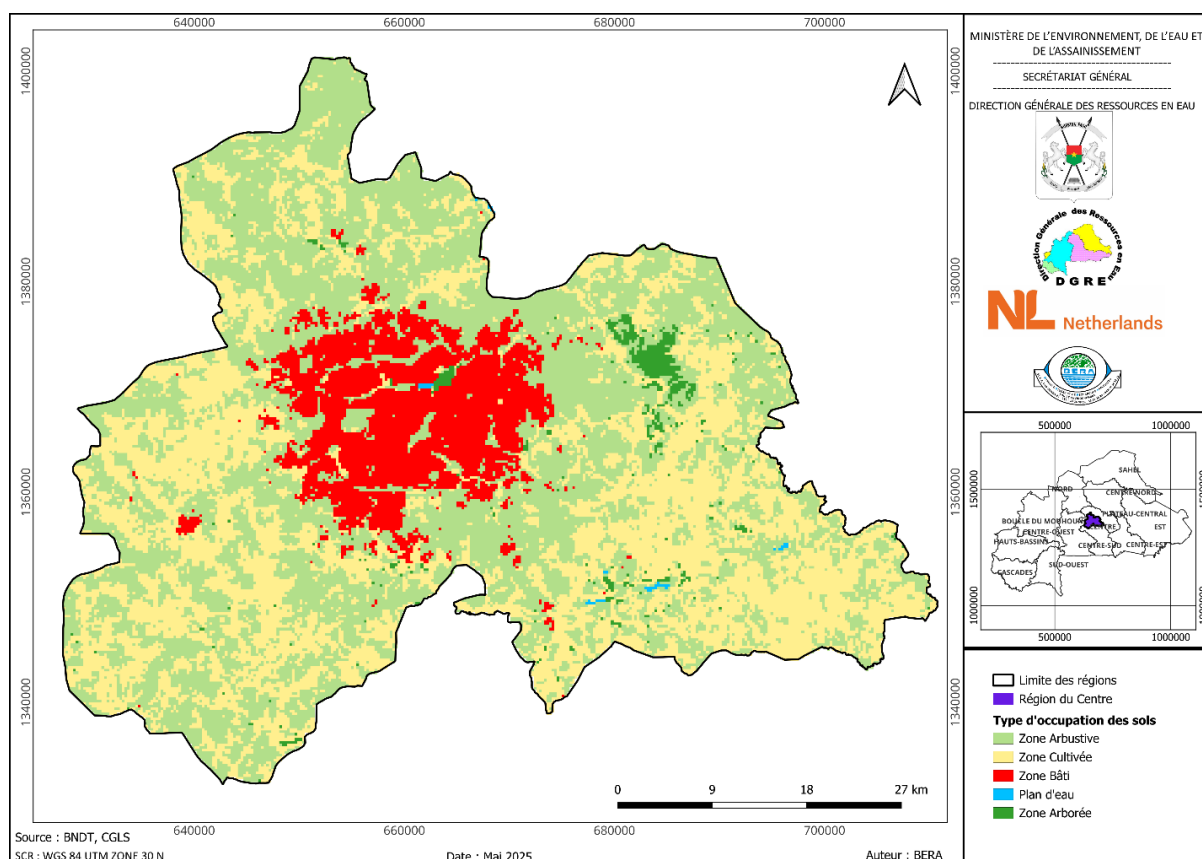


Figure 0-5 : Carte d'occupation des sols de la région du Centre

I.22.5. Épaisseur d'altération saturée

Les altérites, formations géologiques résultant de l'altération physico-chimique de la roche mère, contiennent souvent des aquifères qui constituent le réservoir d'eau. Des études montrent que certaines épaisseurs d'altérites sont propices à la recharge des eaux souterraines. Les zones de forte épaisseur d'altérites sont plus susceptibles de contenir des réservoirs dans les aquifères de socle comparés aux zones de faible épaisseur (Sener, Davraz, et Ozcelik 2005).

Le niveau statique, représentant la profondeur de la nappe captée par le forage par rapport au terrain naturel, est un indicateur important pour évaluer l'exploitabilité de la ressource en eau.

L'épaisseur d'altération saturée est déterminée en soustrayant le niveau statique de l'épaisseur d'altération totale. Elle fait référence à l'épaisseur de la couche de sol en dessous de la nappe phréatique qui est continuellement saturée en eau. Une carte de cette épaisseur sera réalisée.

Après traitement au logiciel SIG, la carte des épaisseurs d'altération suivante a été générée :

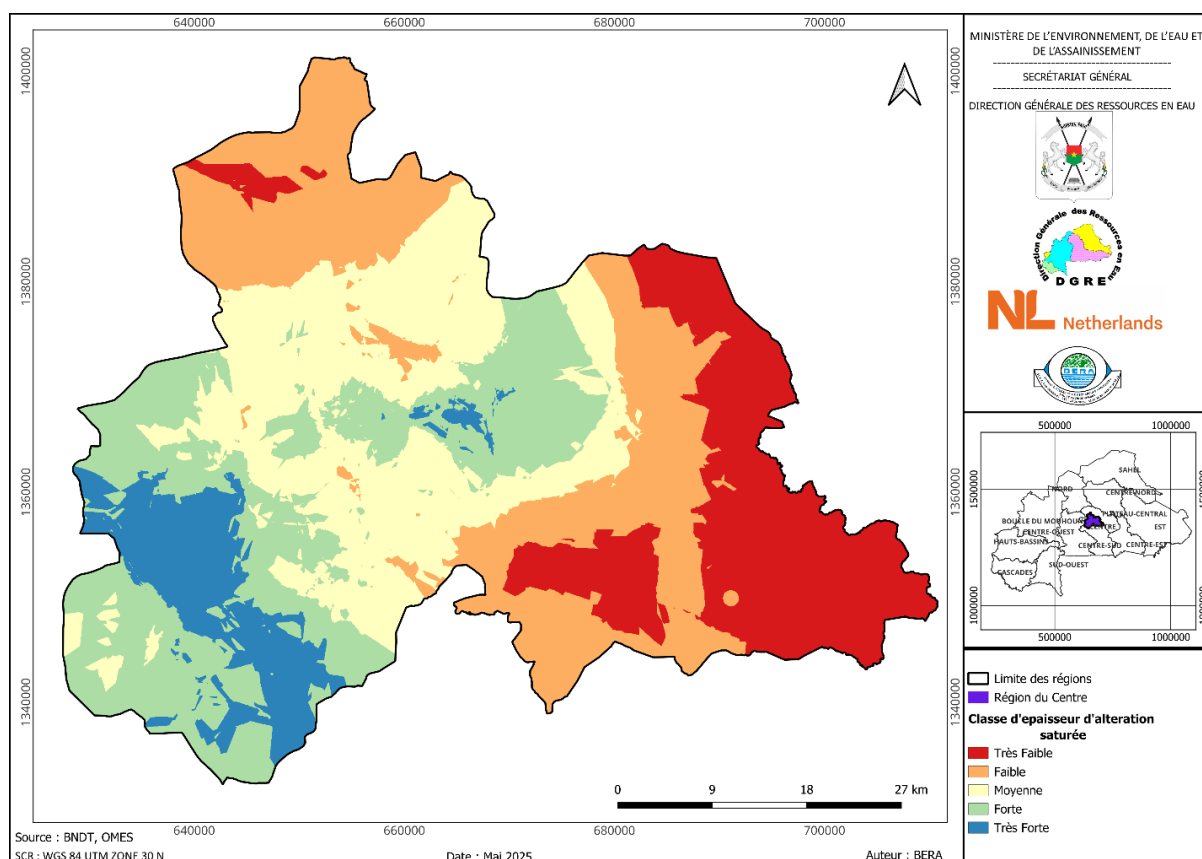


Figure 0-6 : Carte des épaisseurs d'altération saturée de la région du Centre

Un détail explicatif complémentaire est fourni à la suite des épaisseurs d'altération saturée pour préciser la qualification faite pour le critère au niveau de la légende. Le détail explicatif est résumé dans le tableau ci-après :

Tableau 0-4 : Détails explicatifs sur la légende de la carte des épaisseurs d'altération saturée

Critère	Valeurs Quantitative (m)	Valeurs Qualitatives
Épaisseurs d'altération saturée	≤ 5	Très Faible
	5 - 10	Faible
	10 - 15	Moyenne
	15 - 20	Forte
	> 20	Très Forte

1.22.6. Géologie

Certaines roches, comme le granite porphyroïde, les granites pré ou syntectoniques et les migmatites, sont plus propices à fournir de bons débits de forage hydraulique que d'autres, telles que les schistes et les roches vertes. La géologie a donc été retenue comme critère dans l'AMC. Pour les besoins de l'AMC, une carte simplifiée a été produite en regroupant les niveaux géologiques aux caractéristiques hydrogéologiques similaires. La source de cette cartographie est la carte géologique du BUMIGEB de 2018 à l'échelle 1/200 000^e.

Après traitement au logiciel SIG, la carte géologique suivante a été retenue.

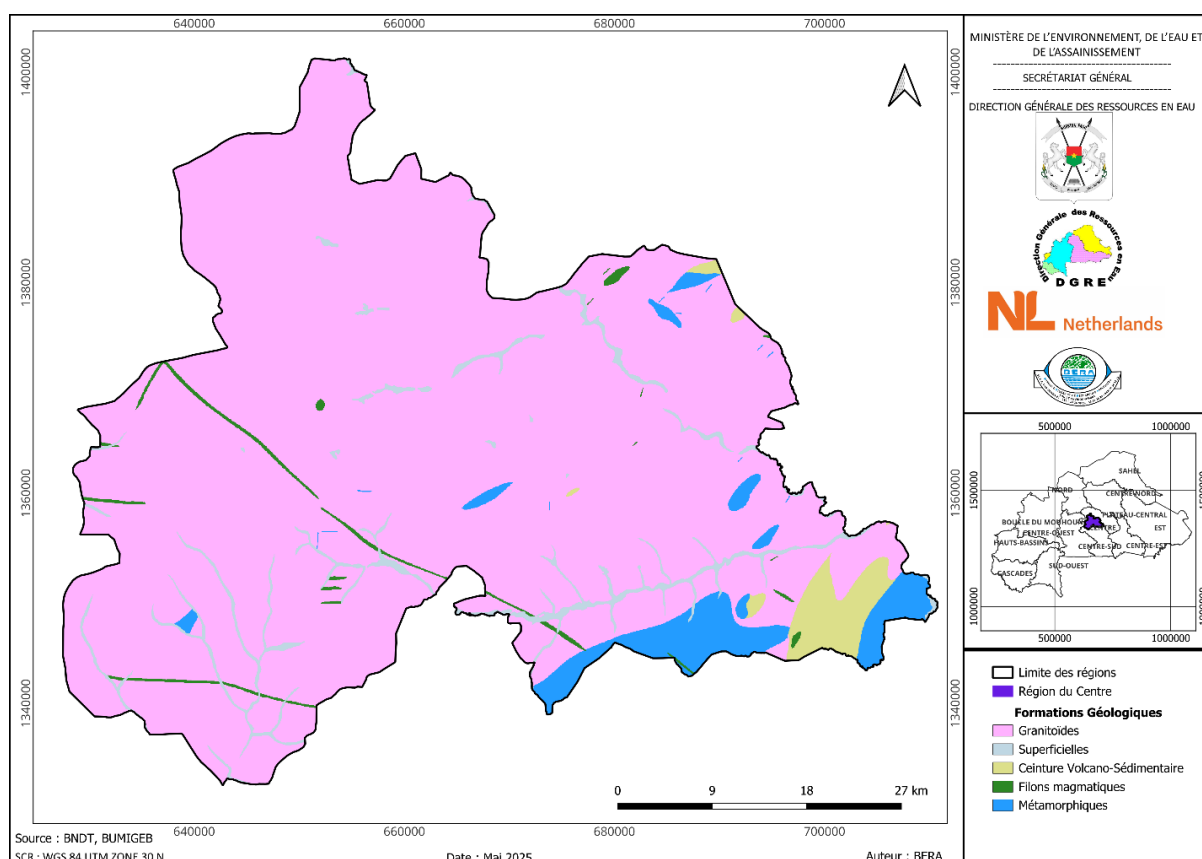


Figure 0-7 : Carte géologique de la région du Centre

Un détail explicatif complémentaire est fourni à la suite de la carte de la géologie pour préciser la qualification faite pour le critère au niveau de la légende. Le détail explicatif est résumé dans le tableau ci-après :

Tableau 0-5 : Détails explicatifs sur la légende de la carte de la géologie

Critère	Valeurs Quantitative	Nombre d'ouvrages observés	Valeurs Qualitatives
Géologie	Granitoïde	759	Très Forte
	Superficielle	19	Forte
	Ceinture volcano-sédimentaire	5	Très faible
	Filon magmatique	11	Faible
	Métamorphique	17	Moyenne

1.22.7. Taux de succès

Le taux de succès est un critère essentiel pour évaluer les potentialités en eau souterraine du Burkina Faso. La répartition spatiale des forages positifs et négatifs à travers le pays est obtenue à partir des données de la base de données. L'indice de succès, qui indique la probabilité de réussite d'un forage, est calculé par l'équation suivante :

$$a = \frac{\text{Nombre de forages positifs}}{\text{Nombre total de forages}} \times 100$$

avec :

a : indice de succès en pourcentage (%),

Après traitement au logiciel SIG, la carte des taux de succès suivant a été produite.

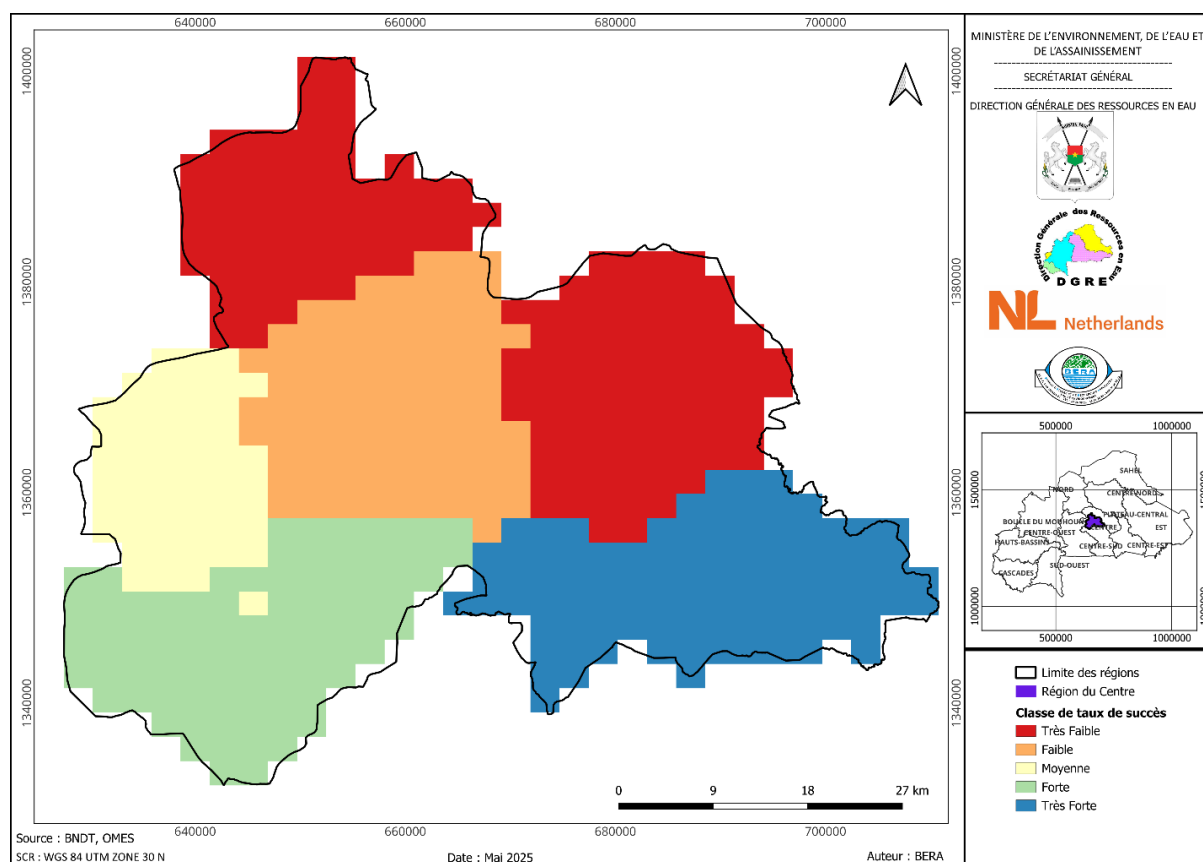


Figure 0-8 : Carte des taux de succès de la région du Centre

Un détail explicatif complémentaire est fourni à la suite de la carte des taux de succès pour préciser la qualification faite pour le critère au niveau de la légende. Le détail explicatif est résumé dans le tableau ci-après :

Tableau 0-6 : Détails explicatifs sur la légende de la carte des taux de succès

Critère	Valeurs Quantitative (%)	Valeurs Qualitatives
Taux de succès	<= 50	Très Faible
	50 - 53	Faible
	53 - 56	Moyenne
	56 - 59	Forte
	> 59	Très Forte

I.22.8. Recharge directe

La recharge directe a déjà été estimée par une approche bilantaire dans le paragraphe III (ETUDE Mécanismes de recharges et estimation de la recharge). Cette même approche sera utilisée pour calculer la recharge sur une période décennale (2014-2023).

Après traitement au logiciel SIG, la carte de recharge directe suivante a été produite (figure IX-9).

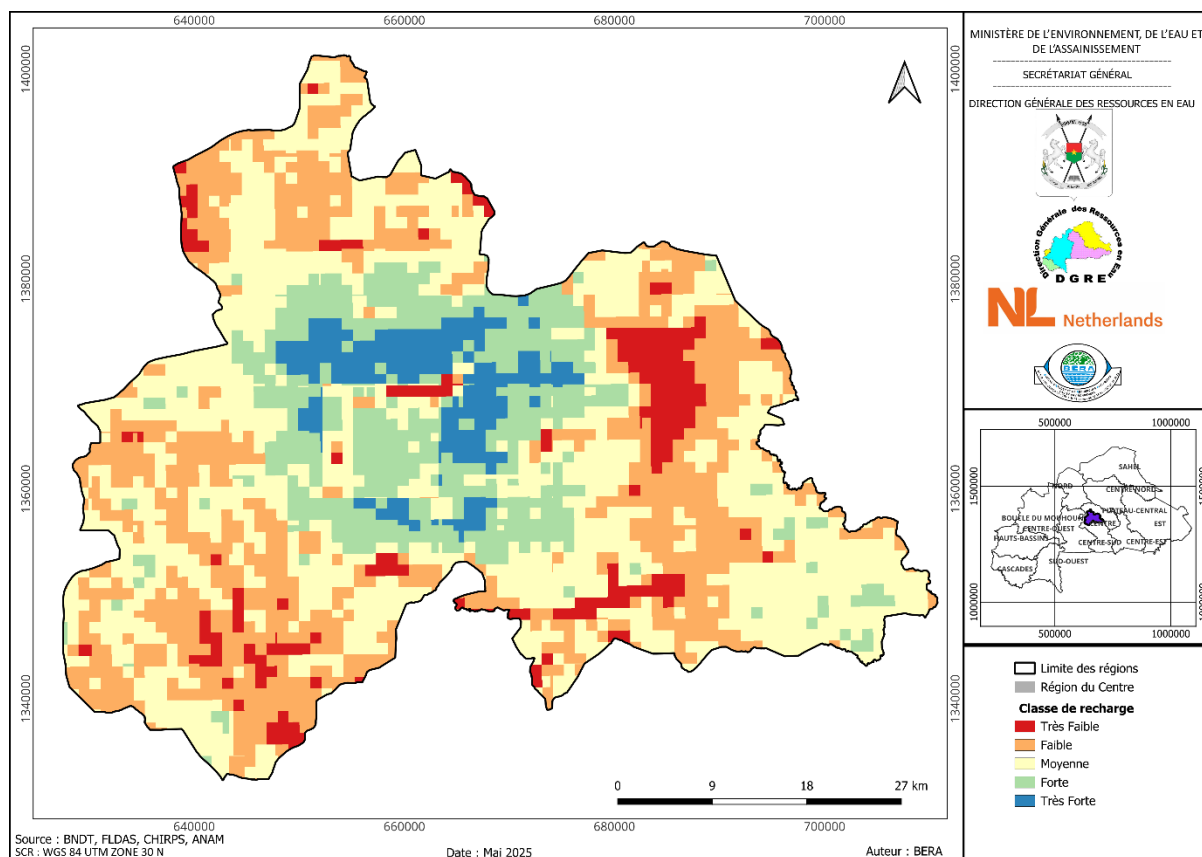


Figure 0-9 : Carte de la recharge de la région du Centre

Un détail explicatif complémentaire est fourni à la suite de la carte de recharge pour préciser la qualification faite pour le critère au niveau de la légende. Le détail explicatif est résumé dans le tableau ci-après :

Tableau 0-7 : Détails explicatifs sur la légende de la carte de recharge

Critère	Valeurs quantitatives (mm)	Valeurs qualitatives
Recharge directe	≤ 136	Très Faible
	136 – 272	Faible
	272 - 408	Moyenne
	408 - 544	Forte
	> 544	Très Forte

I.22.9. Débit des forages

Les débits en fin de foration sont des indicateurs importants de l'exploitabilité. Bien que les débits en général en zone de socle cristallin ne soient pas très importants (moins de 5 m³/h), l'exploitabilité d'un forage dépend fortement de son débit.

Les données de débits sont obtenues grâce à la base de données des forages acquis dans le cadre cette étude. Il s'agit de la BD OMES ou de base de données locales.

Le traitement des données de la base de données OMES à l'aide des outils SIG a permis d'obtenir la carte des débits en fin de foration suivante :

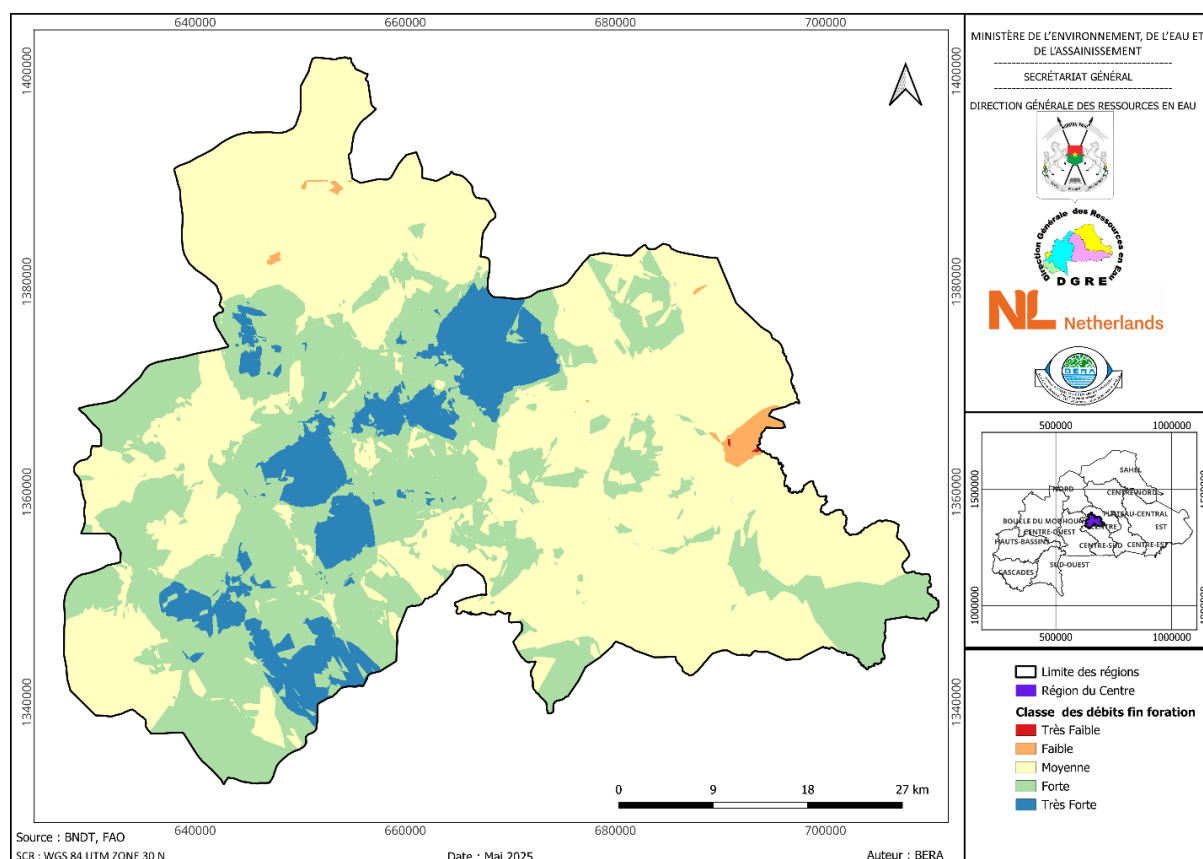


Figure 0-10 : Carte des débits en fin de foration des forages de la région du Centre

Un détail explicatif complémentaire est fourni à la suite de la carte de débit en fin de foration pour préciser la qualification faite pour le critère au niveau de la légende. Le détail explicatif est résumé dans le tableau ci-après :

Tableau 0-8 : Détails explicatifs sur la légende de la carte des débits en fin de foration

Critère	Valeurs Quantitative (mm)	Valeurs Qualitatives
Débits en fin de foration	$\leq 0,7$	Très faible
	0.7 - 1	Faible
	1 - 3	Moyen
	3 - 5	Fort
	> 5	Très fort

I.22.10. Profondeur totale du forage

La profondeur totale d'un forage correspond à la profondeur au cours de laquelle, l'on a pu obtenir un débit optimum. Le critère de la profondeur totale des forages est un critère important de l'indicateur hydrogéologique d'accessibilité, car les forages profonds sont coûteux réduisant ainsi l'accessibilité à la ressource. (Assemian and Koffi, 2023)

Les données de débits sont obtenues grâce à la base de données des forages acquis dans le cadre de cette étude. Il s'agit de la BD OMES, BUMIGEB ou de base de données locales.

Après traitement au logiciel SIG, la carte des profondeurs totales suivante a été produite.

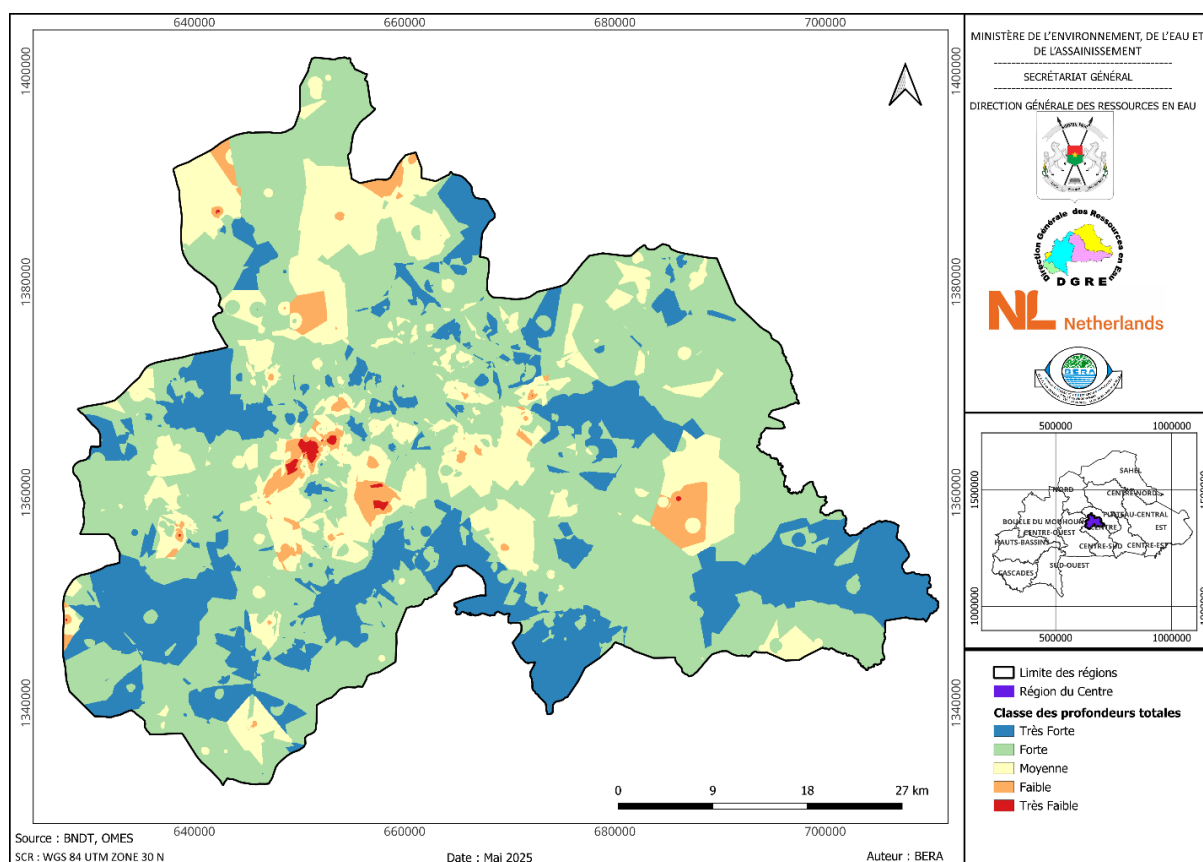


Figure 0-11 : Carte des profondeurs totales des forages de la région du Centre

Un détail explicatif complémentaire est fourni à la suite de la carte des profondeurs totale pour préciser la qualification faite pour le critère au niveau de la légende. Le détail explicatif est résumé dans le tableau ci-dessous.

Tableau 0-9 : Détails explicatifs sur la légende de la carte des profondeurs totales

Critère	Valeurs Quantitative (mm)	Valeurs Qualitatives
Profondeur Totale du forage	<= 50	Très forte
	50 - 60	Forte
	60 - 70	Moyenne
	70 - 80	Faible
	> 80	Très faible

I.23. Standardisation des critères pour les indicateurs hydrogéologiques

La standardisation des critères consiste à affecter des cotes (notes) aux différentes classes des paramètres retenus, en fonction de leur influence sur la potentialité en eau souterraine. Selon l'échelle d'évaluation de Haouchine (Tableau 0-10), des cotes variant de 1 à 10 seront

attribuées aux classes de chaque critère en fonction de leur influence relative sur la potentialité des eaux souterraines (Brunnelli, 2015).

La cote 10 est attribuée à la classe « très forte », indiquant les zones à fort potentiel hydrogéologique. Inversement, la cote 1 est attribuée à la classe « très faible ». Les valeurs intermédiaires seront attribuées aux classes intermédiaires selon la même logique.

Tableau 0-10 : Échelle d'évaluation des différents paramètres vis-à-vis de la potentialité hydrogéologique (HAOUCHINE et al., 2010).

Classe	Très forte	Forte	Forte à moyenne	Moyenne	Moyenne à faible	Faible	Très faible
Cote	10	8	6,5	5	3,5	2	1

L'application de la méthodologie de standardisation des critères a permis de faire les tableaux récapitulatifs pour les indicateurs de potentialité, d'accessibilité et d'exploitabilité suivants :

Tableau 0-11 : Récapitulatif de la standardisation des critères pour l'indicateur de potentialité (Haouchine et al., 2010; Saaty, 1977)

Critère	Classes	Qualificatif du critère	Cotes
Densité de drainage (km/km ²)	<= 0,16	Très fort	10
	0,16 - 0,26	Fort	8
	0,26 - 0,35	Moyen	5
	0,35 - 0,45	Faible	3
	> 0,45	Très faible	1
Densité de fracturation (km/km ²)	<= 0,24	Très faible	1
	0,24 - 0,42	Faible	3
	0,42 - 0,61	Moyen	5
	0,61 - 0,80	Fort	8
	> 0,80	Très fort	10
Type de sol	Sol peu évolué	Fort	8
	Sol à Sesquioxydes	Très fort	10
	Vertisols et paravertisols	Faible	3
	Sol Hydromorphe/Halomorphe	Moyen	5
	Sol à mull	Très faible	1
Occupation du sol	Zones arbustives	Faible	3
	Zones agricoles	Moyen	5
	Zones bâties	Très Faible	1
	Plan d'eau	Très fort	10
	Zones arborées	Fort	8
Épaisseur d'altération saturée (m)	<= 5	Très Faible	1
	5 - 10	Faible	3
	10 - 15	Moyen	5
	15 - 20	Fort	8
	> 20	Très Fort	10
Géologie	Granitoïde	Très Forte	10
	Superficielle	Forte	8
	Ceinture volcano-sédimentaire	Très faible	1
	Filon magmatique	Faible	3
	Métamorphique	Moyenne	5
Taux de succès	<= 50	Très faible	1
	50 - 53	Faible	3
	53 - 56	Moyen	5
	56 - 59	Fort	8
	> 59	Très fort	10
Recharge (mm)	<= 136	Très faible	1
	136 – 272	Faible	3
	272 - 408	Moyen	5
	408 - 544	Fort	8
	> 544	Très fort	10

Pour les indicateurs d'accessibilité et d'exploitabilité, la standardisation est récapitulée dans les tableaux ci-après :

Tableau 0-12 : Récapitulatif de la standardisation des critères pour l'indicateur d'accessibilité

Critère	Classes	Qualificatif du critère	Cotes
Profondeur totale	<= 50	Très fort	10
	50 - 60	Fort	8
	60 - 70	Moyen	5
	70 - 80	Faible	3
	> 80	Très faible	1
Taux de succès	<= 50	Très faible	1
	50 - 53	Faible	3
	53 - 56	Moyen	5
	56 - 59	Fort	8
	> 59	Très fort	10

Tableau 0-13 : Récapitulatif de la standardisation des critères pour l'indicateur d'exploitabilité

Critère	Classes	Qualificatif du critère	Cotes
Débit	<= 0,7	Très faible	1
	0,7 - 1	Faible	3
	1 - 3	Moyen	5
	3 - 5	Fort	8
	> 5	Très fort	10
Recharge (mm)	<= 136	Très faible	1
	136 - 272	Faible	3
	272 - 408	Moyen	5
	408 - 544	Fort	8
	> 544	Très fort	10

I.24. Pondération des critères pour les indicateurs hydrogéologiques

I.24.1. Méthodologie de pondération

La méthode consiste à effectuer les étapes suivantes :

- **Comparaison des différents critères deux à deux pour établir une matrice carrée selon l'échelle proposée par Saaty.**

Cette matrice permet de déterminer les coefficients de pondération à partir des vecteurs propres de ces facteurs. Dans notre étude, l'importance relative de chaque paramètre sur la potentialité des eaux souterraines a été évaluée à l'aide d'une échelle à neuf points, comme le montre le Tableau 0-14. Sur cette échelle, une note de 1 indique une importance égale entre deux facteurs, tandis qu'une note de 9 indique une importance extrême d'un facteur par rapport à un autre (Haouchine et al., 2010; Saaty and Vargas, 1980).

L'échelle numérique de comparaisons binaire se présente comme indiquée dans le tableau IX-14.

Tableau 0-14 : Échelle numérique de comparaison binaire (Saaty, 1984)

Expression d'un critère par rapport à un autre	Intensité de l'importance
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
Valeur intermédiaire entre deux jugements (utilisées pour affiner son jugement)	2, 4, 6, 8

Il s'en suit les étapes suivantes :

- **Calcul des Vecteurs propres**

Les valeurs des vecteurs propres (vp) sont obtenues en calculant leur moyenne géométrique par ligne, selon la formule ci-dessous :

$$V_p = \sqrt[n]{\prod_i^n x_i}$$

où :

Vp : vecteur propre ;

n : nombre de critères ;

xi : note du critère i.

- **Calcul du coefficient de pondération**

Le coefficient de pondération (Cp) est calculé pour exprimer les poids relatifs de chaque facteur sur l'indicateur hydrogéologique. Il est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$C_p = \frac{V_p}{\sum V_p}$$

Où :

Cp: Coefficient de pondération (poids du critère) ;

Vp : Vecteur propre du critère ;

$\sum V_p$: somme des vecteurs propres de tous les critères.

Un coefficient élevé indique une influence plus forte sur le potentiel des eaux souterraines, tandis qu'un coefficient faible correspond à une influence plus faible, comme évoqué dans les études antérieures.

- **Évaluation de la cohérence de la matrice de comparaison par paire.**

Les incohérences dans les comparaisons par paires augmentent à mesure que le nombre de comparaisons augmente (Saaty, 1980a, b). Ainsi, pour évaluer la cohérence des évaluations effectuées lors de la construction de la matrice de comparaison par paires, on détermine le ratio de cohérence.

Le ratio de cohérence (RC) est donné par la formule suivante :

$$Rc = \frac{I_c}{I_A}$$

Où l'indice de cohérence (IC) s'exprime par la formule :

$$Ic = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

n, étant le nombre de critères comparés

λ_{max} , une valeur calculée sur la base de la matrice issue de la comparaison par paire de Saaty (1980), des vecteurs propres et de n ; et l'indice aléatoire (I_A) issu d'une matrice de même dimension (Tableau 0-14 : Échelle numérique de comparaison binaire (Saaty, 1984)).

Tableau 0-15 : Valeur de l'Indice Aléatoire (I_A) (Saaty, 1990)

Nombre de critères (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I_A	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Selon Saaty (1990), si le Ratio de Cohérence (RC) dépasse 10 %, cela indique une incohérence dans les comparaisons par paires, ce qui nécessiterait une réévaluation de la matrice issue de ces comparaisons.

I.24.2. Résultats obtenus

I.24.2.1. Indicateur de potentialité

La comparaison par paire des critères de l'indicateur de potentialité est résumée dans le tableau IX-16 ci-dessous.

Tableau 0-16 : Matrice de comparaison par paire des critères de l'indicateur de potentialité

Paramètres	Densité de drainage	Densité de fracturation	Type de sol	Occupation du sol	Epaisseur d'altération mouillée	Géologie	Taux de succès	Recharge directe
Densité de drainage	1	1/3	3	3	1/5	1/5	1/3	1/3
Densité de fracturation	3	1	3	5	3	1/3	3	3
Type de sol	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3
Occupation du sol	1/3	1/5	3	1	3	1/3	1/3	1/5
Epaisseur d'altération mouillée	5	1/3	3	1/3	1	3	1/3	1/3
Géologie	5	3	5	3	1/3	1	1/3	3
Taux de succès	3	1/3	3	3	3	3	1	1/3
Recharge directe	3	1/3	3	5	3	1/3	3	1

Pondération des critères

- Matrice de comparaison par paire des critères

Dans le Tableau 0-17, tous les critères sont pondérés en se basant sur une revue de la littérature et en considération de leur importance hydrologique pour le potentiel en eau souterraine. L'attribution des poids aux critères varie d'un auteur à l'autre malgré la similarité des études dans des conditions climatiques et géologiques similaires. Cependant, certains chercheurs (Assemian et al 2014, Brou et al 2015, Cocker et al 2020) ont souligné que **la densité de fracturation, la géologie, la recharge directe et le taux de succès** sont les facteurs les plus cruciaux dans les bassins d'eaux souterraines semi-arides et fracturés, tandis que **la densité de drainage, l'occupation du sol et le type de sol** sont considérés comme moins importants.

Tableau 0-17 : Valeurs des vecteurs propres et coefficients de pondération

Paramètres	Vecteur propre	Coefficient de pondération (Cp)
Densité de drainage	0,58	0,06
Densité de fracturation	2,12	0,23
Type de sol	0,36	0,04
Occupation du sol	0,58	0,06
Epaisseur d'altération mouillée	0,93	0,10
Géologie	1,72	0,18

Taux de succès	1,51	0,16
Recharge directe	1,61	0,17
Somme	9,41	1,00

- **Évaluation de la cohérence de la matrice**

Dans le cadre de cette étude, le nombre de critères retenus **N = 8**, la valeur correspondante est égale à **1,41** alors **IA= 1,41** (Tableau 0-15 : Valeur de l'Indice Aléatoire (IA) (Saaty, 1990))

Ainsi, le ratio de cohérence (Rc) est obtenu suivant une approche méthodologique scindée en plusieurs étapes (Al-Djazouli et al. 2021 ; Lentswe et Molwalefhe 2020). On a pour cette étude les valeurs de paramètres résumés dans le tableau ci-après :

Tableau 0-18 : Valeurs de cohérence

λ_{max}	n	Ic	IA	Rc
8,14	8,00	0,02	1,41	1 %

Remarque : On a un **Rc < 10 %** ce qui veut dire que la matrice de hiérarchisation présentée est considérée comme cohérente.

1.24.2.2. Indicateur d'accessibilité

En application de la méthodologie développée ci-dessus pour l'indicateur de potentialité hydrogéologique, on a obtenu le tableau la matrice de comparaison, celui des valeurs des vecteurs propres et coefficients de pondération et celui de l'évaluation de la cohérence de la matrice ci-après :

Tableau 0-19 : Matrice de comparaison par paire des critères de l'indicateur d'accessibilité.

Paramètres	Profondeur Totale	Taux de succès
Profondeur Totale	1	1/2
Taux de succès	2	1

Tableau 0-20 : Valeurs des vecteurs propres et coefficients de pondération pour l'indicateur d'accessibilité

Paramètres	Vecteur propre	Coefficient de pondération (Cp)
Profondeur Total	0,71	0,33
Taux de succès	1,41	0,67
Somme	2,12	1,00

- **Évaluation de la cohérence de la matrice**

Pour cet indicateur, le nombre de critères retenus **N = 2**, la valeur correspondante est égale à **0** alors **IA= 0** (Tableau 0-15 : Valeur de l'Indice Aléatoire (IA) (Saaty, 1990))

Ainsi, le ratio de cohérence (Rc) obtenu sera pris égal à 0

1.24.2.3. Pour l'indicateur d'exploitabilité

En application de la méthodologie développée ci-dessus pour l'indicateur de potentialité hydrogéologique, on a obtenu le tableau et la matrice de comparaison, celui des valeurs des vecteurs propres et coefficients de pondération et celui de l'évaluation de la cohérence de la matrice ci-après :

Tableau 0-21 : Matrice de comparaison par paire des critères de l'indicateur d'exploitabilité.

Paramètres	Débit	Recharge directe
Débit	1	2
Recharge directe	1/2	1

Tableau 0-22 : Valeurs des vecteurs propres et coefficients de pondération pour l'indicateur d'exploitabilité

Paramètres	Vecteur propre	Coefficient de pondération (Cp)
Débit	1,41	0,67
Recharge directe	0,71	0,33
Somme	2,12	1,00

- **Évaluation de la cohérence de la matrice**

Pour cet indicateur, le nombre de critères retenus **N = 2**, la valeur correspondante est égale à **0** alors **IA= 0** (Tableau 0-15 : Valeur de l'Indice Aléatoire (IA) (Saaty, 1990))

Ainsi, le ratio de cohérence (Rc) obtenu sera pris égal à 0

Résultats obtenus pour chaque indicateur (potentialité, accessibilité et exploitabilité)

Cette étape de combinaison implique la multiplication de chaque critère par son coefficient de pondération correspondant, à l'aide d'outils SIG. Ce processus combinatoire des critères permettra de générer la carte des zones de potentialité hydrogéologique, d'accessibilité et d'exploitabilité de la ressource dans la zone d'étude. Cette approche est résumée par l'équation suivante :

$$I = \sum_{i=1}^n W_i X_i$$

avec :

- I : le résultat ou l'indice ;
- Wi : le poids du critère i ;
- Xi : la valeur standardisée du critère i.

Le raster résultant sera reclassé pour produire une carte divisée en **cinq classes : Très bonne, bonne, moyenne, défavorable et médiocre**. Ce choix de cinq (5) classes vise à assurer une meilleure lisibilité et une interprétation facilitée de la carte finale. Pour cette étude la combinaison des critères avec leurs pondérations a permis de générer la carte de potentialité, d'accessibilité et d'exploitabilité suivante.

I.25. Cartes des indicateurs hydrogéologiques

I.25.1. Indicateur de potentialité

La carte de potentialité hydrogéologique de la ceinture verte se présente comme le montre l'illustration de la IX-12 ; et les classes de potentialité sont réparties suivant les proportions récapitulées dans le tableau IX-23.

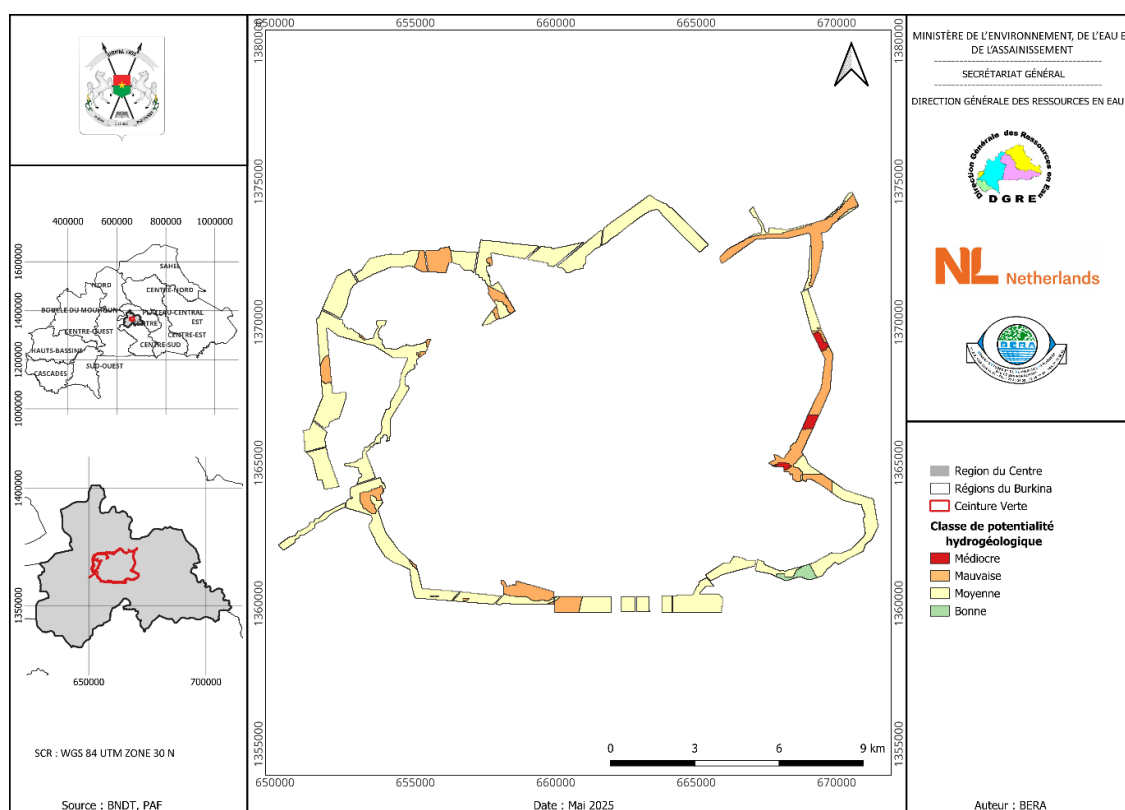


Figure 0-12 : Carte de potentialité de la ceinture verte

Tableau 0-23 : Occupation par classes de potentialité de la ceinture verte

Classe	Superficie couverte (Ha)	Taux de couverture (%)
Médiocre	45,74	1,38
Mauvaise	738,93	22,39
Moyenne	2479,5	75,14
Bonne	37,27	1,13
Très Bonne	0	0
Total	3 299,76	100

L'analyse de la carte de potentialité de la ceinture verte pour l'indicateur de disponibilité de la ressource en eau souterraine montre une large domination de zone à potentialité moyenne (près de 75 %) suivie des zones de mauvaise potentialité (22,39 %) puis des zones de médiocre potentialité (1,38 %) et enfin les zones de potentialité bonne (1,13 %). Globalement les zones de potentialité d'intérêt hydrogéologique couvrent 76,27 % de la ceinture verte contre 23,73 % pour les zones moins intéressantes. On remarque une absence des zones de potentialité très bonne.

Les zones de mauvaise et médiocre potentialité sont localisées beaucoup plus dans la zone Nord-Est et Est correspondant respectivement aux arrondissements, 4 et 10. Les zones de moyennes potentialités quant à elle sont localisées dans la partie Nord, Ouest et Sud. La zone de bonne potentialité occupe une faible zone dans la partie Sud-Est de la ceinture verte.

I.25.2. Indicateur d'accessibilité

L'accessibilité à la ressource est un indicateur important dans le domaine de l'eau. En effet, s'agissant de l'eau souterraine, les couts des projets de forage seront d'autant plus élevés si l'effet des forages profonds s'ajoute à celle du faible taux de succès. L'accessibilité à la ressource en eau souterraine dans ces zones sera dite « très difficile », car l'accès à la ressource demandera des moyens très importants. Les différents critères considérés sont la profondeur totale et le taux de succès tels que exposés précédemment. La conjugaison des deux (2) critères de l'indicateur d'accessibilité a permis de générer la carte d'accessibilité à l'échelle de la ceinture verte suivante :

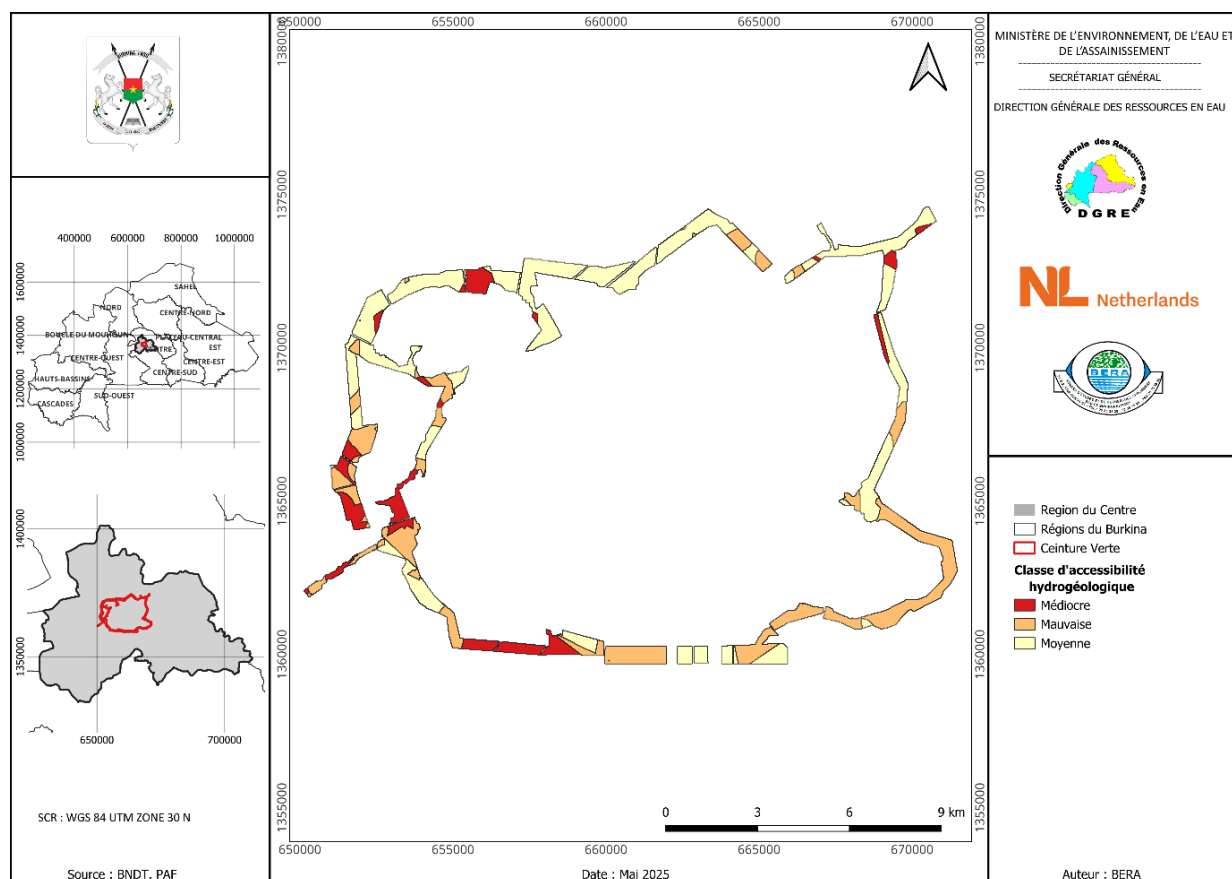


Figure 0-13 : Carte d'accessibilité de la ceinture verte

Les classes d'accessibilité sont réparties suivant les proportions récapitulées dans le tableau ci-après :

Tableau 0-24 : Occupation par classes d'accessibilité de la ceinture verte

Classe	Superficie couverte (Ha)	Taux de couverture (%)
Médiocre	472,77	14,33
Mauvaise	1123,01	34,03
Moyenne	1703,98	51,64
Bonne	0	0
Très Bonne	0	0
Total	3 299,76	100

La carte d'accessibilité hydrogéologique de la ceinture verte va des zones moyennes aux zones médiocres avec une légère domination des zones moyennes (51,64 %) suivie des zones mauvaises (34,03 %) et des zones médiocres (14,33 %). L'accessibilité est partagée quasi également entre les offrants une facile accessibilité et les zones difficiles d'accès à la ressource.

I.25.3. Indicateur d'exploitabilité

La carte d'exploitabilité conditionne l'utilisation de la ressource pour l'approvisionnement des populations en eau potable, car elle permet de fixer les limites de son exploitation. Ainsi, le débit fin foration et la recharge directe ont été les critères d'entrées de l'indicateur d'exploitabilité des ressources en eau de la zone d'étude. Le choix de ses deux (2) critères pour cet indicateur hydrogéologique a été motivé par le fait que l'exploitation de la ressource dépend de ses capacités de production (débit) et de renouvellement de la ressource (recharge directe). Le traitement au logiciel SIG de la combinaison des deux critères d'exploitabilité a permis de générer la carte d'exploitabilité à l'échelle de la ceinture verte suivante :

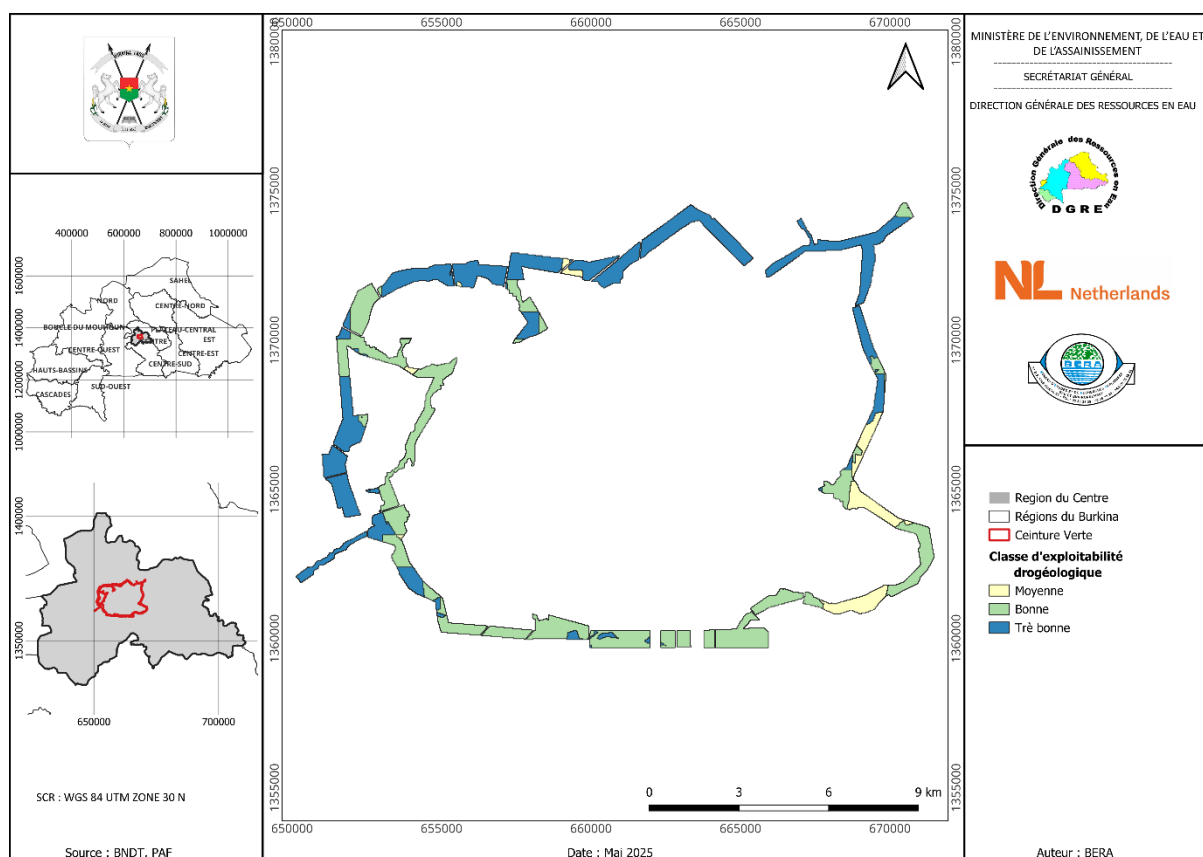


Figure 0-14 : Carte d'exploitabilité de la ceinture verte

Les classes d'exploitabilité sont réparties suivant les proportions récapitulées dans le tableau ci-après :

Tableau 0-25 : Occupation par classes d'accessibilité de la ceinture verte

Classe	Superficie couverte (Ha)	Taux de couverture
Médiocre	0	0
Mauvaise	0	0
Moyenne	271,02	8,21
Bonne	1461,31	44,29
Très Bonne	1567,44	47,50
Total	3 299,76	100

L'exploitabilité hydrogéologique basée sur les critères de débit des forages et de la recharge montre une ceinture verte globalement avec une bonne exploitabilité de la ressource en eau. En effet la zone intéressante couvre plus de 100 % de la ceinture verte. Il y a 8 % de zones d'exploitabilité moyenne, 44 % de zone de bonne exploitabilité et 48 % de zone de très bonne exploitabilité. Le Nord de la ceinture verte est la zone qui a la zone d'exploitabilité la plus intéressante, car on y trouve presque toute la très bonne potentialité de la ceinture. Elle est suivie de l'Ouest avec les zones très bonne et bonne. L'Est et le Sud viennent en troisième position avec des zones moyennes, avec quelques zones bonne et très bonne.

I.26. Validation de la carte de potentialité hydrogéologique

La validation des données est essentielle après la conception de tout modèle afin d'évaluer la fiabilité des résultats prédits. Pour valider la carte des zones de potentialité hydrogéologique dans la zone d'étude, la méthode de superposition par les débits de forage sera utilisée. Cette méthode de validation adoptée est celle proposée par plusieurs auteurs (Ake et al., 2019, Oscar et al., 2016, Koudou et al., 2013).

Pour cette méthode un critère indépendant ou partiellement utilisé pour créer la carte des zones de potentialité hydrogéologique et provenant exclusivement de la zone d'étude est sélectionné. On prendra ici le critère des débits avec les données de débit des forages exclusivement à gros débit (supérieur à 5 m³/h) pour les données de BD OMES, mais aussi les données de forage de la mairie de Ouagadougou.

Le nombre des forages à gros débits de la base de données OMES sera utilisé et superposé à la carte générée pour établir une corrélation entre les différentes zones de potentialité hydrogéologique et les forages disponibles dans la zone d'étude.

Pour chaque classe de potentialité de la carte, le nombre de forages correspondant est relevé, et le pourcentage de chaque classe par rapport au nombre total de forages est calculé.

Pour que la carte résultante soit validée, il est essentiel de constater dans les zones de potentialité hydrogéologique qualifiées de très bonnes, bonnes et moyennes une prédominance significative du nombre de forages à gros débits.

Les résultats de la méthode de superposition du nombre de forages à gros débits de la base de données OMES traitée sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau 0-26: Nombre de forages par classe de sensibilité avec la base de données OMES

N° Classe	Classe de Potentialité	Nbre de Forage	Taux de forage à gros débits observé		
1	Médiocre	6	2,49	22	Zone Défavorable
2	Mauvaise	47	19,50		
3	Moyenne	165	68,46	78	Zone Favorable
4	Bonne	20	8,30		
5	Très Bonne	3	1,24		

Total général	260	100
----------------------	------------	------------

La validation de la carte de potentialité montre 78 % des forages à gros débits dans les zones de moyenne, bonne et très bonne potentialité contre 22 % des forages dans les zones de mauvaise et médiocre potentialité. On a donc une grande domination des forages à gros débits dans les zones favorables.

Cette statistique valide la carte de potentialité hydrogéologique produite.

ÉTUDE DE L'HYDROCHIMIE ET LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

I.27. Hydrochimie des eaux souterraines

L'analyse hydrochimique constitue un outil fondamental pour la compréhension des systèmes aquifères, en permettant la caractérisation des propriétés physico-chimiques des eaux souterraines. Ces paramètres, incluant la température, le pH, la conductivité électrique, ainsi que les concentrations en éléments majeurs, mineurs et en oligo-éléments, définissent la signature chimique de l'eau et orientent son interprétation hydrogéologique (Serghini et al., 2010). La composition chimique influe directement sur la qualité de l'eau et conditionne son aptitude à différents usages : alimentation en eau potable, irrigation, activités industrielles, etc...

Selon les prescriptions du ministère en charge de l'eau au Burkina Faso, toute infrastructure de captage d'eau souterraine, notamment les forages, doit faire l'objet d'une évaluation systématique de la qualité de l'eau prélevée. Cette analyse conditionne la décision d'équipement et d'exploitation du forage. Par ailleurs, un dispositif de suivi périodique à l'échelle nationale a été instauré afin de surveiller l'évolution de la qualité des eaux après la mise en service des ouvrages.

Malgré ces efforts, l'état des connaissances relatives à la qualité des ressources en eau, aussi bien souterraines que superficielles, demeure insuffisant au niveau national. Ce déficit concerne aussi bien les données scientifiques que les mécanismes de suivi opérationnel. Afin de remédier à cette situation, l'État burkinabè a lancé en 2011 une initiative visant à dresser un inventaire national de la qualité des eaux. Cet inventaire devait servir de référence pour toute évaluation future des évolutions ou pollutions (BUGEGO, 2023).

Étant donné l'ampleur de l'opération, la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) a procédé à une sectorisation par bassin hydrographique, avec l'élaboration d'états des lieux techniques de la qualité des eaux dans les principaux bassins versants :

- Bassin du Nakanbé : évaluation réalisée entre 2012 et 2017, avec une campagne de prélèvements effectuée de novembre 2012 à juillet 2013 ;
- Bassin du Mouhoun : diagnostic mené entre 2017 et 2019, dont les résultats ont été validés en 2020 ;
- Bassin de la Comoé : état des lieux en cours de réalisation ou planifié ;
- Bassin du Niger : évaluation projetée ou en phase préparatoire.

Dans le cadre de l'élaboration d'un état des lieux de la qualité des eaux souterraines de la Ceinture verte de Ouagadougou, il sera impératif de collecter les données existantes auprès des structures compétentes en matière de contrôle et de suivi de la qualité des eaux. Cette collecte d'informations permettra de dresser un diagnostic précis et actualisé de la qualité des eaux souterraines dans la zone d'étude. Cette démarche est présentée par la Figure 0-1.

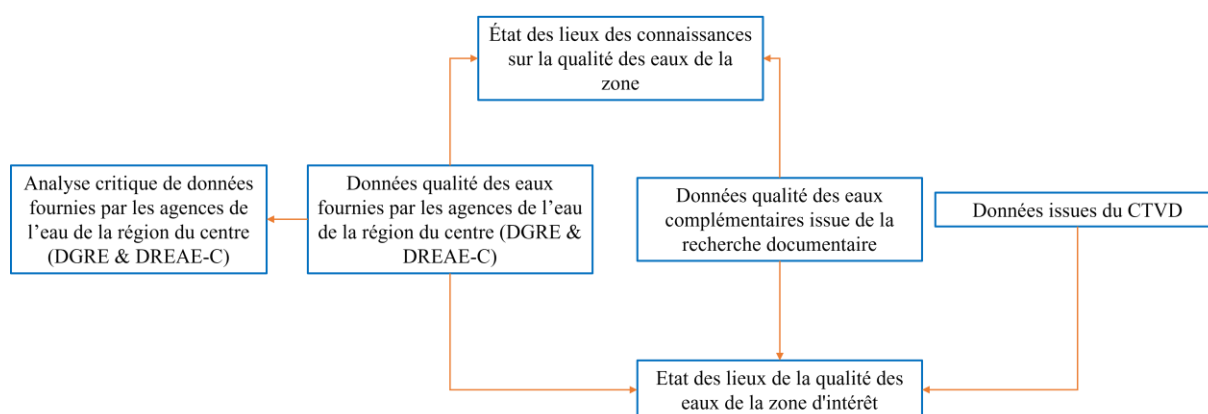


Figure 0-1 : Schéma de l'enchaînement des activités suivant les données

I.28. État des lieux des connaissances sur la qualité des eaux

I.28.1. Collecte des données

Il ressort de la documentation sur l'état des lieux de la qualité des eaux souterraines des agences de l'eau de la région du centre que les données sont largement insuffisantes et qu'une collecte de données complémentaires devient indispensable si l'on désire faire l'état des lieux. Le récapitulatif des données complémentaires collectées est présenté dans le Tableau 0-1.

Tableau 0-1 : Récapitulatif des données collectées sur la qualité des eaux souterraines dans la région du Centre

Structure	Type de données	Analyses obtenues	Avec coordonnées	Nombre de paramètres	Paramètres majeurs Complets
DGRE	Données sur la qualité des eaux des forages dans la région du Centre	27	27	21	21
DREAE_C	Données tout venant sur la qualité des eaux de la région du Centre	25	8	28	12
CTVD	Données sur la qualité des eaux des forages dans la région du Centre	29	16	39	39
Documentations	Données des études sur la qualité des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou	56	56	12	12

I.28.2. Analyse critique des données collectées

Pour ce qui concerne l'analyse critique des données collectées, l'attention sera portée surtout sur le cas de la DGRE, de la DREAE C, du CTVD et des données obtenues dans la documentation des études antérieures.

I.28.2.1. Données collectées de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE)

En tant qu'organe central de gestion des ressources en eau, la DGRE devrait théoriquement disposer de l'ensemble des données à travers le Système National d'Information sur l'Eau (SNIEau). Toutefois, la fragmentation institutionnelle et l'absence de synergie entre les structures (ONEA, DGEP, agences de l'eau, ONG, etc.) limitent la centralisation des données. Les données obtenues concernent des forages, des puits et des eaux de surface dans la région du Centre. Néanmoins, aucun forage localisé ne se trouve directement dans la zone de la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO) par contre seulement 3 forages se trouvent dans la commune de Ouagadougou, comme illustré à la Figure 0-2.

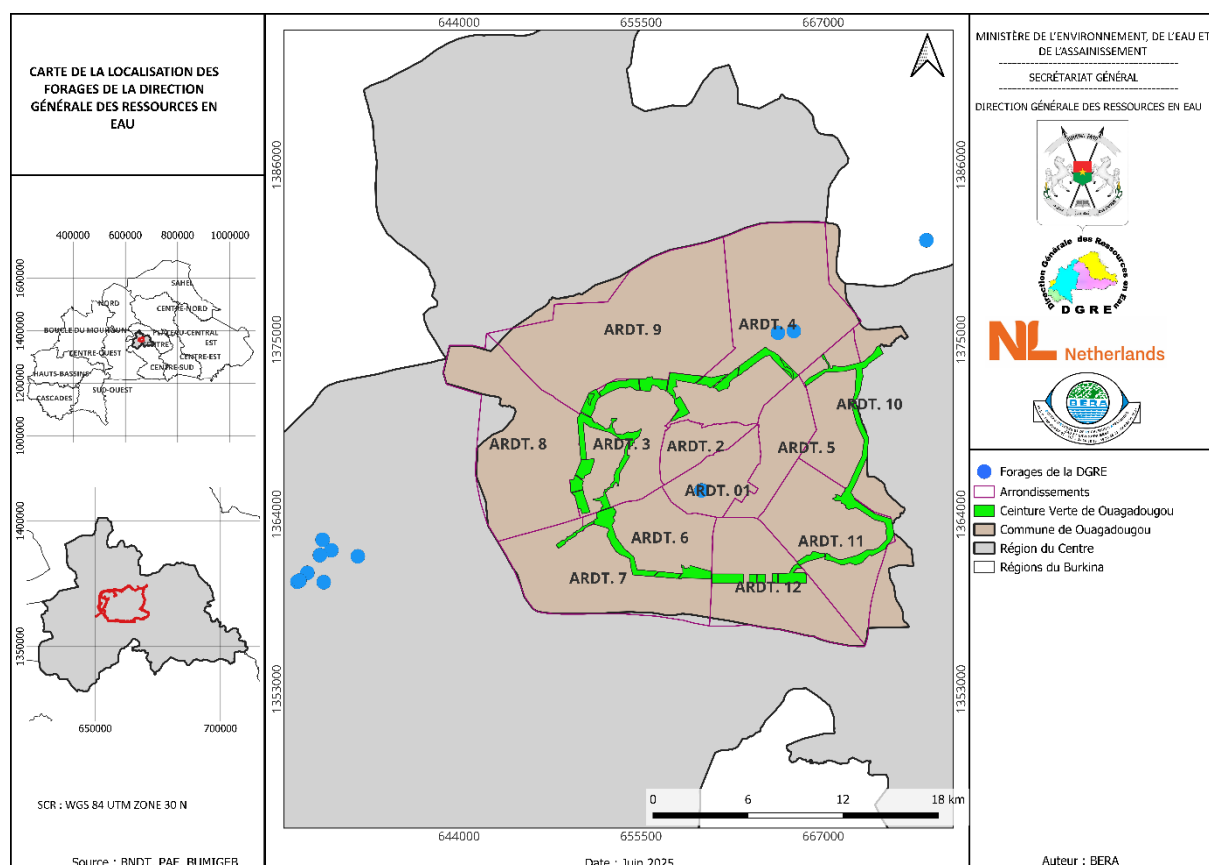


Figure 0-2 : Localisation des forages de la DGRE dans la région du centre

1.28.2.2. Données collectées de la Direction Régionale de l'Eau et l'Assainissement de l'Environnement du centre (DREAE C)

La DREAE Centre a fourni les données de 25 points de prélèvement d'eau souterraine, issues principalement de projets privés. Une grande partie de ces données n'est pas géoréférencée, ce qui limite leur intégration cartographique. Cependant, aucune des données ne se retrouvent dans la CVO, par contre seulement 3 forages se trouve dans la commune de Ouagadougou (voir Figure 0-3).

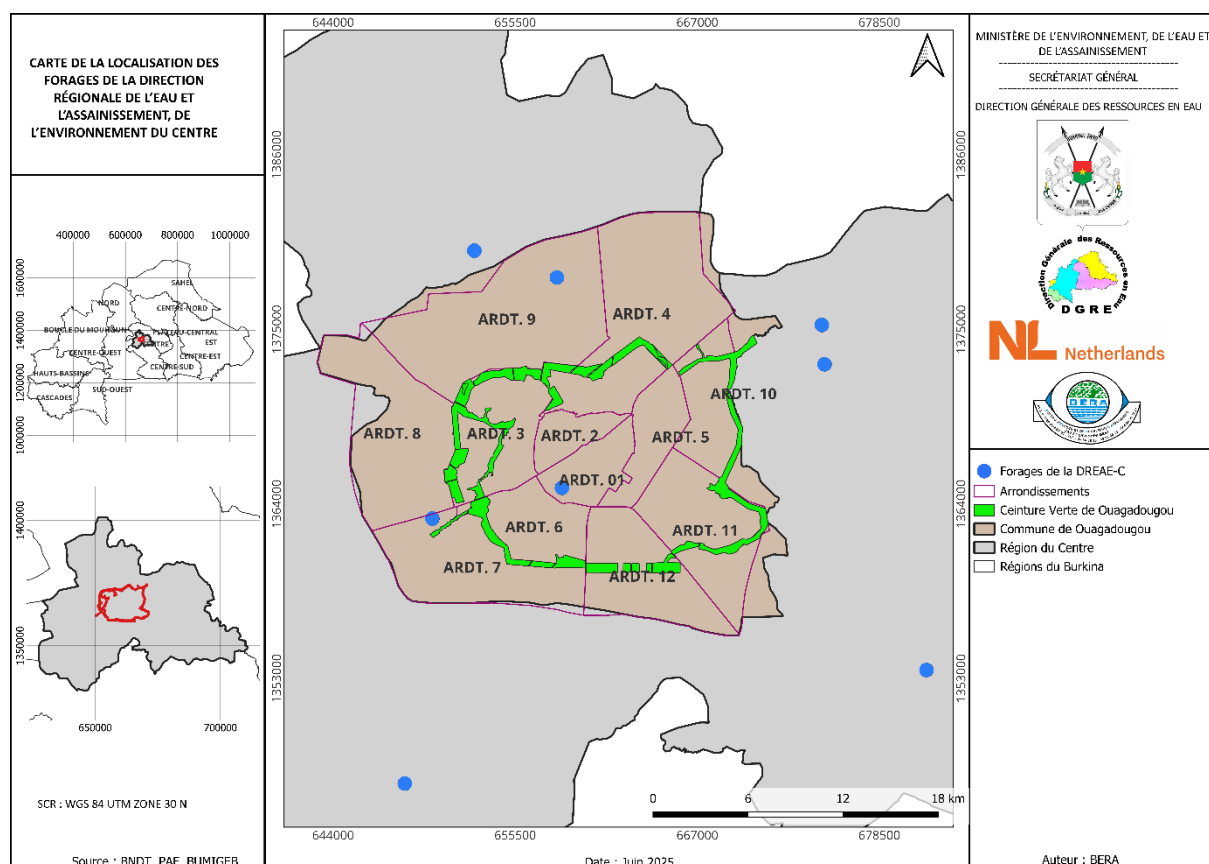


Figure 0-3 : Localisation des forages de la DREAE-C dans la région du centre

1.28.2.3. Données collectées du Centre de Traitement et de Valorisation des Déchets (CVTD)

Les données du CVTD concernent les résultats d'analyses physico-chimiques de forages situés dans la commune de Ouagadougou. Elles sont bien structurées, complètes et géolocalisées. Bien que les forages ne soient pas explicitement situés dans la CVO, leur proximité et localisation dans la commune de Ouagadougou permet d'alimenter l'interprétation (voir Figure 0-4).

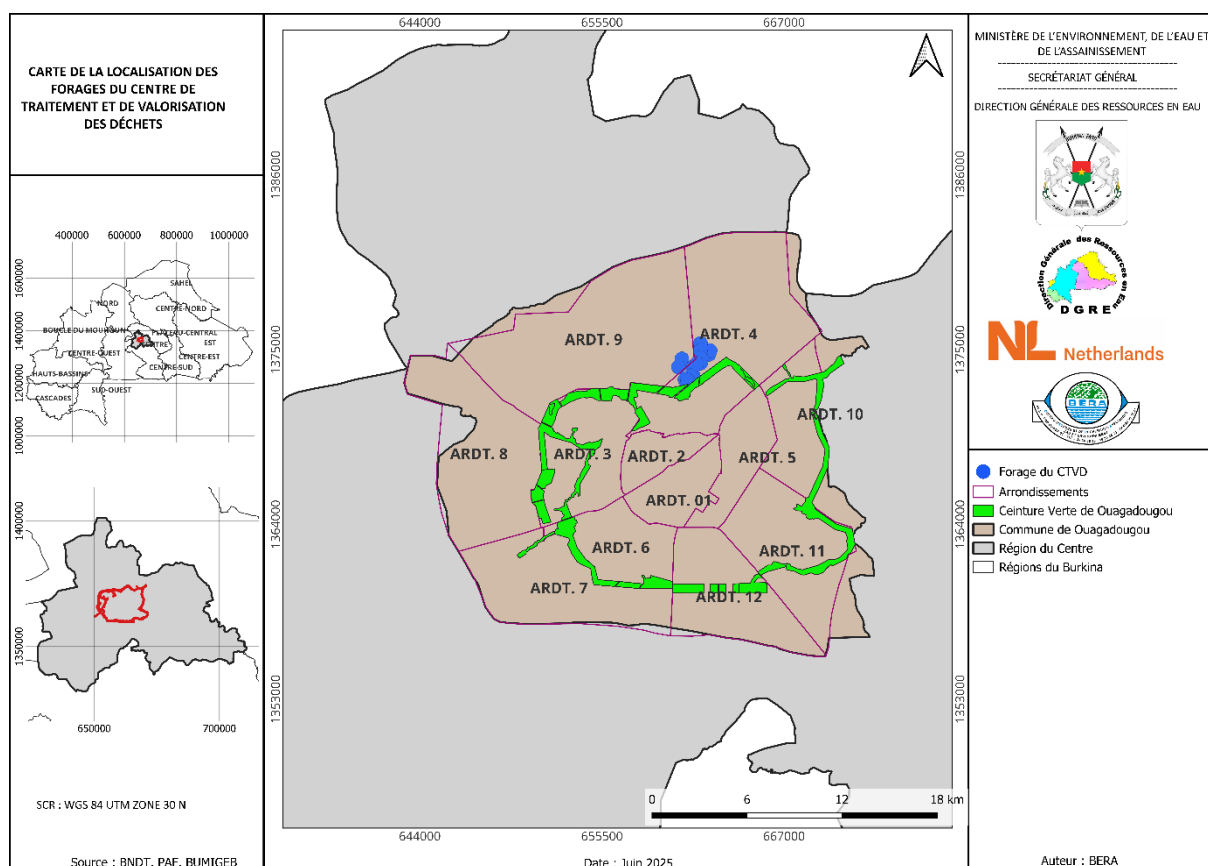


Figure 0-4 : Localisation des forages du CTVD dans la commune de Ouagadougou

1.28.2.4. Données collectées de la documentation des études antérieures

Cette catégorie regroupe les données collectées dans le cadre d'études antérieures menées sur la commune de Ouagadougou. Bien que hétérogènes dans leur forme, elles fournissent 56 fiches complètes, dont certaines soit 3 forages se retrouve dans la Ceinture Verte de Ouagadougou (Ouandaogo/Yameogo, 2008). Ces données sont précieuses pour établir l'évaluation de la qualité des eaux dans la zone (voir Figure 0-5).

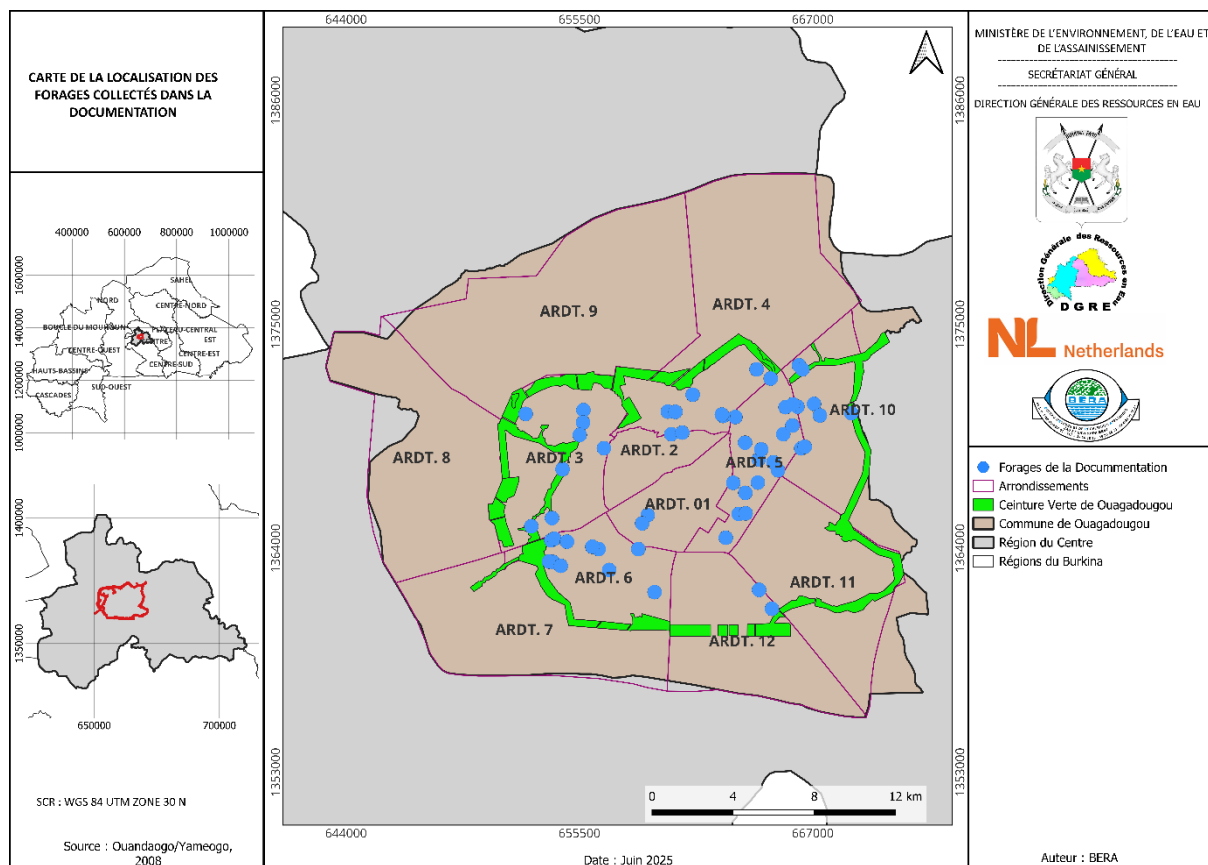


Figure 0-5 : Localisation des forages collectés dans la documentation de la commune de Ouagadougou

I.28.3. Conclusion de l'état des lieux des connaissances sur la qualité des eaux

L'analyse des sources de données disponibles révèle une situation contrastée : bien que plusieurs structures aient fourni des informations précieuses, les données disponibles sont souvent incomplètes, non harmonisées, et parfois non localisées. Le déficit de coordination entre les acteurs, la dispersion des informations et l'absence de centralisation constituent des obstacles majeurs à une analyse cohérente de la qualité des eaux souterraines à l'échelle de la CVO. Il apparaît nécessaire de renforcer les mécanismes de partage et d'harmonisation des données pour optimiser la surveillance environnementale et la gestion durable des ressources en eau.

En raison de l'absence de données suffisantes et directement localisées dans la CVO, l'analyse de la qualité des eaux souterraines dans le cadre de cette étude se fondera exclusivement sur les données disponibles dans les limites administratives de la commune de Ouagadougou. Cette approche, bien que partielle, permet de s'appuyer sur un sous-ensemble de données plus ciblé et potentiellement représentatif des conditions hydrochimiques dans et autour de la Ceinture Verte.

Les traitements réalisés à partir de ces données ont permis de dégager certaines tendances hydrochimiques préliminaires (notamment sur le pH, la conductivité électrique, les concentrations en nitrates, chlorure, Sodium, etc.). Bien qu'incomplets, ces résultats

fournissent des indications utiles sur la qualité des eaux souterraines, tout en jetant les bases d'une compréhension du fonctionnement hydrochimique de l'aquifère dans la zone d'étude.

Ils permettent également de cibler des zones prioritaires pour des investigations complémentaires, en vue de combler les lacunes existantes et d'améliorer la représentativité des données. À terme, l'enrichissement de cette base de données contribuera à un diagnostic plus fiable et à une meilleure gestion des ressources en eau souterraine dans la commune de Ouagadougou.

I.29. État des lieux de la qualité des eaux

I.29.1. Représentativité des données

L'état des lieux de la qualité des eaux souterraines vise à fournir une image instantanée et fiable des conditions hydrochimiques d'une zone donnée. Pour cela, il est théoriquement nécessaire de disposer d'un inventaire exhaustif des points d'eau, stratégiquement répartis sur l'ensemble du territoire étudié. Dans cette optique, l'État burkinabè a mis en place, dès 2011, un maillage national de 10 km de côté, avec pour objectif de prélever entre 2 et 6 points d'eau par maille, en fonction de la densité des ouvrages hydrauliques, afin d'assurer une représentativité adéquate à l'échelle nationale (BUGEGO, 2023).

Dans le cadre de la présente étude, seules les données localisées dans la commune de Ouagadougou ont été retenues, afin de garantir une certaine pertinence vis-à-vis de la zone cible, à savoir la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO). Toutefois, l'analyse de la représentativité de ces données met en évidence plusieurs limites majeures : si certaines parties de la commune sont relativement bien couvertes, la Ceinture Verte, quant à elle, reste totalement dépourvue de données directement localisées, ce qui empêche d'atteindre les objectifs de représentativité définis au niveau national. Cette situation souligne la nécessité de mener, à l'avenir, des campagnes de collecte spécifiques de données géoréférencées dans la CVO pour combler ces lacunes.

I.29.2. Vérification, contrôle

I.29.2.1. Vérifications

Dans le cadre de l'analyse des données collectées sur la qualité des eaux souterraines dans la zone d'étude, plusieurs vérifications ont été réalisées afin d'assurer la fiabilité et la pertinence des traitements. Ces vérifications se sont appliquées à l'ensemble des données issues des différentes sources (DGRE, DREAE-C, CTVD, études documentaires) et ont notamment concerné :

- Nombre de paramètres par échantillon analysé : Vérification de la diversité et de l'exhaustivité des paramètres mesurés pour chaque échantillon, afin d'obtenir une analyse hydrochimique complète.

- Correspondance entre les valeurs et les paramètres : Confirmation que les valeurs mesurées correspondent précisément aux paramètres qu'elles représentent, garantissant ainsi la cohérence des résultats.
- Erreurs de saisie : Détection et correction des erreurs potentielles dans la saisie des données, pour prévenir les incohérences pouvant altérer les analyses.
- Homogénéité des données et valeurs aberrantes : Analyse de la cohérence interne des données, en identifiant et en excluant les valeurs aberrantes susceptibles de fausser les résultats

1.29.2.2. Contrôle des résultats

Le contrôle des résultats consiste en un examen approfondi des résultats d'analyses pour vérifier leur cohérence et leur fiabilité. Cette étape critique vise à garantir que les données obtenues sont représentatives de la qualité réelle des eaux souterraines et qu'elles peuvent être utilisées de manière fiable pour des analyses hydrochimiques.

Parmi les diverses méthodes de contrôle disponibles, la balance ionique est l'approche la plus courante et sera employée dans ce cas.

La balance ionique repose sur le principe que, dans un échantillon d'eau, la somme des charges des ions positifs (cations) doit être en équilibre avec celle des ions négatifs (anions). Un déséquilibre important peut indiquer des erreurs dans la mesure des concentrations d'ions, des imprécisions de laboratoire ou des anomalies dans la composition chimique de l'eau (Dende L, 2022). En appliquant la balance ionique aux résultats d'analyses, il sera possible d'évaluer la qualité et la précision des données, et ainsi de s'assurer que celles-ci sont robustes pour l'état des lieux de la qualité des eaux. Ainsi, on sélectionne d'abord les ions majeurs sur lesquels portera la balance, ensuite on compare la somme des cations en milliéquivalents par litre à celle des anions dans la même unité. L'écart est rapporté à la somme de ces mêmes cations et anions puis ramené en pourcentage. Elle est déterminée par l'expression de la formule suivante :

$$BI(\%) = \frac{\Sigma cations - \Sigma anions}{\Sigma cations + \Sigma anions} \times 100$$

Avec :

$\Sigma cations$: somme des cations (Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^{+} ; K^{+} ; Fe^{2+} et Mn^{2+}) en meq/L.

$\Sigma anions$: somme des anions (HCO_3^{-} ; SO_4^{2-} ; NO_3^{-} et Cl^{-}) en meq/L.

En règle générale les résultats des analyses sont considérés de la manière suivante ;

- $1\% < BI < 1\%$: Fiabilité excellente ;
- $5\% < BI < 5\%$: Fiabilité acceptable ;
- $10\% < BI < 10\%$: Fiabilité médiocre.
- $BI < -10\%$ ou $BI > 10\%$: Mauvaise fiabilité.

La théorie de la balance ionique suppose une égalité des charges dans les échantillons d'eau, c'est-à-dire que la somme des cations doit égaler celle des anions. En pratique, un écart est toujours présent en raison des limites analytiques et des incertitudes de mesure. Cet écart, qui dépend de la concentration totale des ions, doit idéalement être faible pour garantir la fiabilité des résultats.

I.29.3. Traitement et interprétations des données

Le traitement et les interprétations commence par la détermination de paramètres supplémentaires tels que l'indice d'agressivité et se poursuivront par l'interprétation des données par une analyse statistique et des représentations de cartes de teneur dans la limite des données disponibles.

I.29.3.1. Balance ionique

Pour le calcul de la balance ionique, le logiciel non commercial « Diagramme » a été utilisé. Cet outil permet de vérifier la qualité des données analytiques en réalisant d'abord la balance ionique, puis en appliquant, en cas d'incohérences, un contrôle de conductivité selon la méthode de Dienert. Ce processus permet d'identifier les ions problématiques nécessitant une révision. Le logiciel offre également la possibilité de calculer certains paramètres complémentaires tels que les matières dissoutes totales (MADIS) et l'indice de Ryznar (IR).

Après traitement, seulement 13 des 26 jeux de données issus de la DGRE ont présenté une balance ionique comprise dans la plage acceptable de $\pm 10\%$. Parmi celles-ci, seules 3 données localisées dans la commune de Ouagadougou ont été retenues pour l'analyse. En ce qui concerne les 8 données géoréférencées fournies par la DREAE-C, 5 elles sont conformes à la balance ionique exigée, mais seulement 2 d'entre elles se trouvent dans la commune de Ouagadougou et ont donc été conservées.

Enfin, l'ensemble des 16 données géoréférencées du CTVD ainsi que les 56 données issues de la documentation des études antérieures, toutes situées dans la commune de Ouagadougou, présentent une balance ionique correcte ($\pm 10\%$) et ont été jugées exploitables pour la suite de l'analyse. Au total, 77 données valides, comportant 12 paramètres physico-chimiques, ont été sélectionnées pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines (Voir Tableau 0-2).

Tableau 0-2 : Ensemble des données collectées sur la qualité des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou

Dénominations	Sources	Longitude	Latitude	T°C	pH	CE (us/cm)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
F1	CTVD	662261	1374718	28.8	6.81	254.32	28.56	12.1	15	3.3	115.23	0	50.2	1	7.3
F2	CTVD	662327	1374945	28.7	6.78	335.31	20.4	24.2	15	2.5	125.6	0	45.2	1	16.2
F4	CTVD	661746	1375141	25.6	6.9	156	16.32	14.3	12.6	3.9	115	0	0.29	1	8.3
F6	CTVD	661720	1375400	26.2	7.1	183	24.48	10.3	8.32	2.9	138.13	0	0.31	1	12.5
F15	CTVD	660545	1374425	28	6.65	282.85	28.56	16.94	15	2.2	139.81	0	51.2	1	19.7
F21	CTVD	661227	1373899	26.2	7.28	331	40.8	20.37	14.2	4	200.6	0	26.5	22	10.21
F22	CTVD	661261	1373393	25.8	7.22	338	44.88	9.2	10.3	3.9	190	0	0.23	11	8.2
F23	CTVD	661124	1373351	26	7.32	380	46.7	19.2	12.2	3.3	238	0	0.67	6	3.4
F26	CTVD	660868	1372927	25.7	7.2	238	28.56	7.26	13.65	4.7	172.3	0	5.3	1	1.8
F27	CTVD	660737	1373125	26.1	7.5	185	20.4	5.81	13.6	2.5	118	0	9.6	1	2.3
F28	CTVD	660339	1373914	28.2	6.59	245.21	28.56	12.1	15	3.3	145.8	0	29.2	2	16.2
F31	CTVD	661712	1374945	25.9	6.98	153	20.4	7.2	9.1	2.4	117	0	0.85	2	3.9
FN39	CTVD	660909	1373069	25.9	7.13	237	31.81	13.62	10.6	3.5	171	0	0.31	2.13	2.15
FN40	CTVD	661731	1374164	25.6	6.98	208	18.4	12.3	9.38	2.62	131	0	0.18	1.9	4.3
FN41	CTVD	661742	1374495	26	7.15	1512	22.14	7.13	9.31	4.2	118.23	0	0.31	1.6	2.6
FN42	CTVD	661482	1374141	28.1	7.8	380.93	30.1	24.71	15	5.1	250.46	0	25.71	1	7.9
Kossodo	DGRE	665147.626	1375551.484	35,4	6,957	518	51,78336	20,48	20,81	6,39	171,288	0	-	0	36,2
Polosgo	DGRE	664139.572	1375444.341	33,6	6,235	280	29,01792	16,32	16,13	3,81	130,784	0	-	38	15,2
Baskuy sect 7	DGRE	659316.905	1365517.085	34,6	6,075	222	29,2584	7,632	15,52	2,99	144,082	0	-	-2	1,7
Zagtouli_Arr7	DREAE_C	650263.909	1363078.545	-	-	206	28	14,6	-	-	174,8	0	-	3	15,4
Samandin	DREAE_C	658456	1365018	-	6,69	295	17,6	8,748	-	-	111,874	0	4,97	0	2,64
F024	Documentation	654194	1363336	33	6	307	22	13	12	5	165	0	7	1	17,00
F029	Documentation	654153	1365487	31,99	6,48	301,25	30,35	13,19	10,5	4,15	202,19	0	4,03	1,68	2,29
FZON	Documentation	653127	1365083	30,7	6,18	182,5	18	7,27	6,01	3,12	107,23	0	6,26	2	0,55
FBAS	Documentation	655699	1370790	30,7	6,53	156,33	12,07	3,71	13,82	2,85	80,6	0	5,36	1,71	6,19
FDAP	Documentation	660030	1369605	29,73	6,57	294	22,12	6,8	17,79	3,07	124,5	0	14,81	1,48	14,84
FPARC	Documentation	663187	1370452	29,69	6,29	344,38	31,45	15,48	9,18	5,21	141,83	0	40,29	10,29	3,80
FKOS	Documentation	666322	1372992	32,52	6,7	346,5	28,91	13,66	11,03	6,68	142,48	0	9,74	2,48	43,62
FT26	Documentation	666494	1372794	32,17	6,57	358	28	17,21	8,72	4,26	153,8	0	8,37	1,47	37,55
F092	Documentation	665289	1367833	32,9	7,5	182	24,8	11,4	7,9	2,8	150	0	10,5	0	3,96
F093	Documentation	665062	1368232	33	7	215	21,2	12,6	11,6	3,2	148,8	0	8,5	0	15,20
F099	Documentation	654112	1364391	35,6	7,5	116	19,6	8,2	7,8	1,3	112,2	0	8	0	0,00
F0100	Documentation	656449	1363966	35,7	7,2	163	15,2	7,3	5	2,5	92,7	0	6	0	0,00
F0101	Documentation	656968	1362940	32	7	102	22,8	9,7	5	2,5	125,7	0	11,9	1	0,88
F0102	Documentation	658406	1363963	35,1	7,5	176	15,2	4,8	5,7	2,1	68,3	0	7,8	7	5,72
F0103bis	Documentation	663676	1366728	33	6,98	170	23,2	14	8,7	2,5	146,4	0	16,6	0	0,00
F0107	Documentation	654266	1364471	30,7	7,5	79	10	3,1	8,5	1,3	61	0	5,75	0	1,76
F0109	Documentation	663666	1369189	32,7	10,2	167	20	11,8	9,5	1,1	131,8	0	8,5	12,2	3,52
F0111	Documentation	660569	1369687	32,4	9,3	431	16,4	8	7,3	1,3	102,5	0	6,2	0	0,00
F0112	Documentation	659854	1370717	31,8	7	155	12,4	7	10,4	1,7	86,6	0	7,5	0	7,90

ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE DE LA CEINTURE VERTE DE OUAGADOUGOU AU BURKINA FASO
 LIVRABLE 2 – ÉVALUATION DU POTENTIEL HYDROGÉOLOGIQUE ET DES RISQUES DE POLLUTION DES AQUIFERES DE LA CEINTURE VERTE DE OUAGADOUGOU

Dénominations	Sources	Longitude	Latitude	T°C	pH	CE (us/cm)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
F0118	Documentation	664334	1368374	31,4	7	182	14,4	7,7	7	1,3	97,6	0	4,9	0	4,40
F0120	Documentation	656138	1364080	32,6	7	221	21,6	10,6	3,6	1	122	0	7,5	0	9,20
F0122	Documentation	654001	1363350	31,35	7	265	24	14	7,9	2,1	154,9	0	6,5	0	3,08
F0123	Documentation	660236	1370706	30,5	7	550	27,6	11,6	7,5	0,7	151,3	0	9,8	0	20,20
F0124	Documentation	661085	1371549	32	7,8	160	18,4	7,7	8,7	2,1	104,9	0	9,7	0	3,52
9.TH35	Documentation	656708	1368920	31	9,2	350	13,7	7,7	8,4	3,1	103,7	0	4,6	1	3,10
15.QP13	Documentation	664991	1361029	31	8,2	600	21,6	9,2	8,8	4,2	185,4	0	6,4	0	0,00
15.QP16	Documentation	664354	1361961	31	7,6	261	27,2	14,8	9,2	3,8	165,9	0	6,5	0	2,20
15.QP18	Documentation	659203	1361848	31	7,6	219	21,2	8,7	9,2	3,2	131,8	0	7,6	0	1,30
16.QP25	Documentation	656138	1364080	31	7,8	298	16	8	8,5	2,1	104,9	0	5,4	0	0,00
17.44QP34	Documentation	654583	1363142	30,2	7,7	187	21,2	12,2	8,1	1	136,6	0	8,3	0	0,00
17.474QP23	Documentation	654893	1364329	32	6,7	566	22,8	12,1	17,2	5	157,4	0	8,1	5	7,00
19.QP74	Documentation	654669	1367886	30	7,4	610	20,8	9,2	11,3	2,5	129,3	0	4	1	8,60
22.QP71	Documentation	655682	1370181	33	7,5	291	22	8,9	7	2,8	119,6	0	4,4	1	0,70
27.FT32	Documentation	665658	1370934	32	7,9	450	20,4	8,9	8,7	3,3	123,2	0	4,3	8	0,00
27.QP37	Documentation	666246	1370960	32	7,2	620	18,1	7,3	13,5	4,2	90,3	0	18,3	3	0,00
27.TH1	Documentation	667062	1371095	32	8,2	400	17,2	8,7	8,7	2,2	101,3	0	3,5	9	0,00
28.FT31	Documentation	665550	1369608	32	7,7	167	19,2	6,5	7,1	1,5	114,7	0	5,1	0	3,50
28.QP1	Documentation	666431	1368912	31	7,9	540	23,6	9,7	12	3,9	141,5	0	4,2	9	0,00
28.QP40	Documentation	668902	1370641	30	8,8	690	25,6	9,2	10,9	3,3	146,4	0	6	1	0,40
29.QP55	Documentation	664294	1367230	32	7,5	275	20,5	9,7	4,5	2,9	112,2	0	6,1	1	0,40
30.QP59	Documentation	662717	1364520	31	7,7	228	21,8	8,2	10,9	2	122	0	4,6	2	4,40
30.QP66	Documentation	663350	1365692	31	7	530	19,8	10	5	2	114,7	0	5	2	0,00
7.FT14	Documentation	658863	1365628	30,2	7,6	207	25,2	9,7	11,4	2,8	142,7	0	3	15	0,00
17.FT15	Documentation	658593	1365227	30	8,7	650	36	9,4	11,2	2	176,9	0	7	6	0,40
28.FT18	Documentation	666607	1368990	31	8,2	640	22,4	14,3	9,2	3,3	173,2	0	6,5	0	13,60
28.FT31	Documentation	667354	1370530	32	7,7	167	19,2	6,5	7,1	1,5	114,7	0	5,1	0	3,50
27.FT32	Documentation	666021	1371076	32	7,9	450	20,4	8,9	8,7	3,3	123,2	0	4,3	8	0,00
28.FT33	Documentation	665997	1370031	32	8,3	440	23,2	7,5	7,4	1,5	148,8	0	5	0	0,40
21.FT58	Documentation	652855	1370604	30	8,6	740	34	17,7	10,5	4,6	195,2	0	7	1	0,70
14.SM13	Documentation	663083	1367218	30,1	7,7	257	29,6	11,6	5,8	1,2	161	0	7	10	0,00
30.CQ14	Documentation	663696	1365716	29,3	7,7	191	23,6	9,7	8,7	3,9	136,6	0	3,8	9	0,00
24.CQ21	Documentation	662581	1370503	30,3	7,7	163	22	8	9,4	3,3	119,6	0	3,8	9	0,00
CQ8	Documentation	655519	1369573	32	7,3	430	22	12,2	10	2,8	123,2	0	3,6	10	0,00
QP73	Documentation	664463	1368857	30	7,6	190	28	13	10,4	1,2	151,3	0	15,6	3	0,00
QP77/Koss	Documentation	664928	1372343	30	7,7	297	28	14,5	8,1	1	164,7	0	6,5	4	0,40
QP79/Koss	Documentation	662521	1370573	29	7,7	65	14	6	4,5	1	78,1	0	6,6	0	0,00

1.29.3.2. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper, couramment utilisée pour représenter les paramètres physico-chimiques, a été choisi pour cette étude des eaux souterraines. Il permet d'identifier le faciès chimique de l'eau, c'est-à-dire sa composition en lien avec les roches traversées ou contenant l'eau, un aspect particulièrement utile en hydrogéologie. Le diagramme de Piper est structuré autour de deux triangles équilatéraux, séparés par un losange : le triangle de gauche représente les cations et celui de droite les anions. Les éléments chimiques présents dans chaque échantillon sont projetés dans ces triangles, puis reportés dans le losange central pour obtenir le faciès chimique de l'eau. Ce faciès est défini par le nom de l'anion majeur et le prénom du cation dominant, offrant ainsi une vue synthétique et claire de la composition des eaux étudiées (Dende L, 2022).

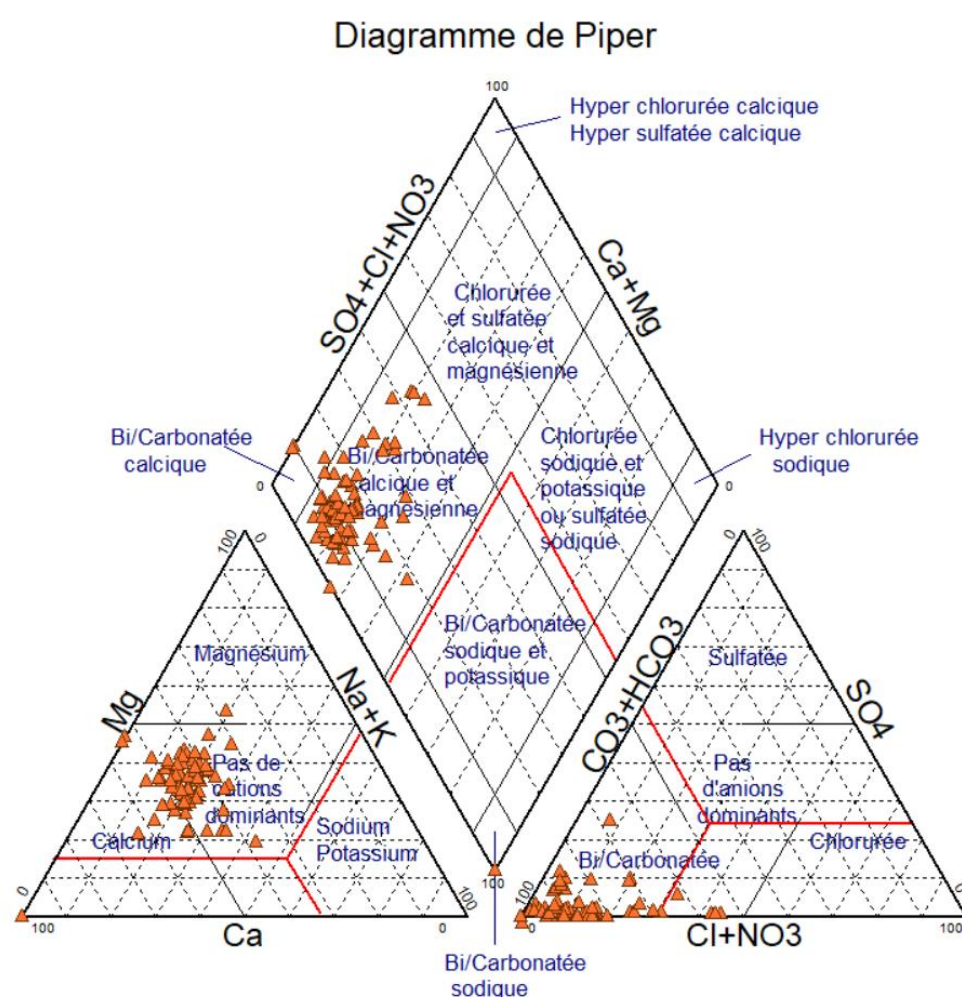


Figure 0-6 : Diagramme de Piper des analyses des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou

L'analyse des échantillons d'eau souterraine prélevés dans la commune de Ouagadougou (voir Figure 0-6) révèle une forte influence des caractéristiques géologiques locales sur la composition chimique des eaux. Cette méthode, comme l'ont souligné Amadou et al., 2014; et Ouandaogo/Yameogo, 2008, permet d'évaluer les proportions relatives des composants chimiques et de les classer en faciès distincts. Du point de vue des anions (triangle de droite),

le bicarbonate (HCO_3^-) est largement dominant dans tous les échantillons, conférant un caractère bicarbonaté aux eaux souterraines de la zone. Concernant les cations (triangle de gauche), certains points présentent une dominance nette du calcium (Ca^{2+}), mais pour la majorité des échantillons, aucun cation ne prédomine de façon significative, traduisant une répartition équilibrée entre calcium, magnésium, sodium et potassium. Dans le losange central, deux principaux faciès se dégagent :

- Le faciès bicarbonaté calcique et magnésien, observé dans la majorité des points, caractéristique des eaux d'origine naturelle peu altérées, issues d'interactions avec des roches carbonatées ou silicatées.
- Un unique échantillon présente un faciès bicarbonaté sodique-potassique, souvent associé à des processus de contamination anthropique ou à une évolution chimique avancée des eaux.

1.29.3.3. Indice d'agressivité ou indice de Ryznar (IR)

L'analyse de la qualité de l'eau est aussi importante pour la préservation et la protection des installations et du réseau. Il s'agit ici d'évaluer le caractère agressif, corrosif ou incrustant/entartrant de l'eau à travers des indices calculés avec les valeurs de concentration en certains ions.

L'Indice de Ryznar est un paramètre global permettant de définir le caractère agressif ou incrustant d'une eau. Il fait intervenir le pH, la Température, le titre alcalimétrique complet (TAC), la dureté calcique et les solides dissouts. L'agressivité est définie vis-à-vis des canalisations, des ouvrages ou de l'exhaure (BUGEGO, 2023). Une eau aggressive peut provoquer la corrosion du ciment ou des métaux des canalisations avec entraînement une pollution en métaux lourds (Plomb, Zinc, Cu, Cr...). À terme l'exhaure peut se détériorer assez vite et entraîner la perte même du point d'eau.

Lorsqu'une eau a tendance à déposer du calcaire, elle est dite entartrante ou incrustante. Ce type d'eau ne présente pas vraiment de danger pour la santé, mais plutôt des inconvénients liés à l'entartrage des réseaux et des appareils ménagers, limitant ainsi la durée de vie de toute l'installation. La détermination de l'indice de Ryznar fait appel à 5 paramètres et se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$IR = 2pH_s - pH$$
$$pH_s = A + B - \log[\text{Ca}^{2+}] - \log[\text{TAC}]$$

Avec :

IR : indice de Ryznar ; pH_s : pH de saturation ; pH : pH de l'échantillon ; A : une variable fonction de la température ; B : une variable fonction des matières dissoutes (MADIS) ; $[\text{Ca}^{2+}]$: concentration en calcium exprimé en mg/L de CaCO_3 ; [TAC] : Titre alcalimétrique complet exprimé en mg/L de CaCO_3 .

La Figure 0-7 illustre la carte de l'indice de Ryznar (IR) des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou, établie à partir des données issues de 77 points d'eau. L'indice de Ryznar, qui permet d'évaluer le caractère entartrant ou corrosif de l'eau vis-à-vis des infrastructures hydrauliques, présente des valeurs comprises entre 5,4 et 10,3 dans la zone étudiée. Les résultats montrent :

- 1 point d'eau présentant un caractère entartrant ($IR < 5,5$), signalant une tendance au dépôt de calcaire ;
- 26 points d'eau dont les eaux sont équilibrées, c'est-à-dire ni agressives ni entartrantes ($5,5 < IR < 8$), ce qui est favorable pour la durabilité des installations ;
- Les 50 points d'eau restants révèlent des eaux agressives ($8 < IR < 12$), susceptibles d'entraîner une corrosion des matériaux (béton, métaux) à température ambiante, avec des risques potentiels pour la longévité des ouvrages et la qualité de l'eau (contamination métallique).

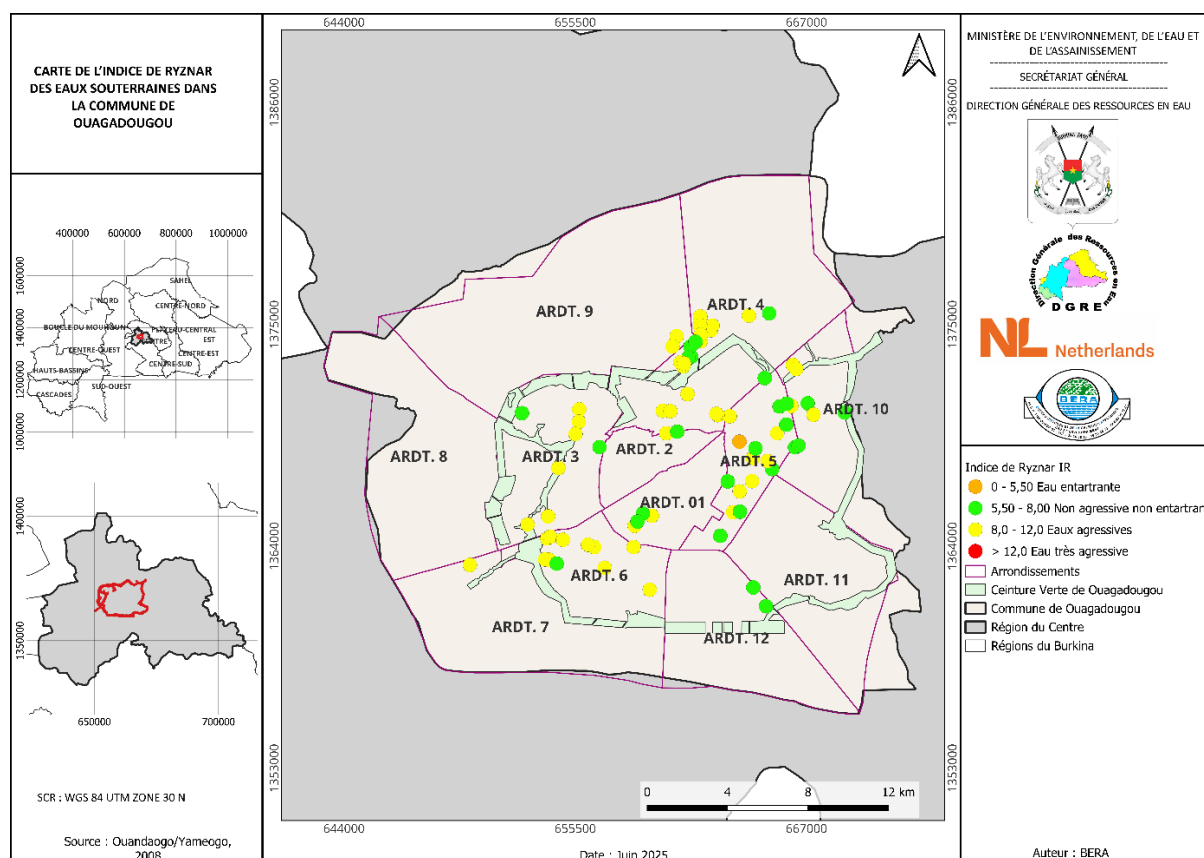


Figure 0-7 : carte de l'indice de Ryznar des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou

I.29.3.4. Cartes de teneurs et interprétation des paramètres physico-chimiques

I.29.3.4.1. Analyses statistiques

Les données hydrochimiques collectées portent sur quelques paramètres physico-chimiques essentiels, mesurés sur 77 forages situés dans la commune de Ouagadougou. Le tableau ci-après résume les statistiques descriptives de ces paramètres et offre une première appréciation de la qualité chimique des eaux souterraines de la zone.

Tableau 0-3 : Statistiques des paramètres physico-chimiques de tous les ouvrages

Paramètres	T°C	pH	CE (us/cm)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
Nombre de forage	75	76	77	77	77	75	75	77	77	73	77	77
Minimum	25,6	6	65	10	3,1	3,6	0,7	61	0	0,2	0	1,7
Moyenne	30,6	7,4	321,2	23,7	10,9	10	2,9	136,4	0	9,3	3,4	9,4
Maximum	35,7	10,2	1512	51,8	24,7	20,8	6,7	250,5	0	51,2	38	36,2
Mode	32	7,7	167	20,4	9,7	8,7	3,3	123,2	0	7	0	16,2
Médiane	31	7,3	265	22	9,7	9,2	2,9	131,8	0	6,4	1	7,9
Ecart -type	2,5	0,7	209	7,5	4,3	3,4	1,3	34,9	0	10,6	5,8	8,4
CV (%)	8,3	10,1	65,1	31,7	39,4	33,9	44,2	25,6	0	114,3	171,9	89

Le tableau ci-dessus présente les statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques analysés sur 77 ouvrages dans la commune de Ouagadougou. Ces résultats fournissent une vue d'ensemble de la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude.

- Les températures enregistrées varient de 25,6°C à 35,7°C, avec une moyenne de 30,6°C et un écart-type de 2,5°C, traduisant une faible dispersion. Cette variation pourrait s'expliquer par la profondeur des forages, l'ensoleillement ou la conductivité thermique des formations traversées ;
- La valeur moyenne du pH est de 7,4, ce qui indique des eaux globalement neutres à légèrement basiques, favorables à la potabilité. Les valeurs s'étendent de 6,0 à 10,2, révélant des écarts notables avec un écart-type de 0,7 et un coefficient de variation (CV) de 10,1 %, ce qui traduit une légère hétérogénéité du pH entre les forages. Certains points présentent donc une alcalinité prononcée, à surveiller pour prévenir des effets de corrosion ou d'entartrage ;
- La conductivité moyenne de 321,2 µS/cm reflète une minéralisation modérée des eaux souterraines. Cependant, les valeurs varient considérablement, de 65 à 1512 µS/cm, avec un écart-type de 209 et un CV de 65,1 %, témoignant d'une grande disparité en concentration ionique. Cette variabilité est probablement liée à des conditions géologiques hétérogènes ou à des apports anthropiques ponctuels.
- Le calcium (Ca²⁺) varie entre 10 et 51,8 mg/L avec une moyenne de 23,7 mg/L, tandis que le magnésium (Mg²⁺) fluctue de 3,1 à 24,7 mg/L, avec une moyenne de 10,9 mg/L. Ces deux éléments, responsables de la dureté de l'eau, présentent des écarts-types respectifs de 7,5 et 4,3, témoignant d'une variabilité modérée à élevée, probablement liée aux types de roches traversées.
- Le sodium (Na⁺) affiche une moyenne de 10 mg/L, et le potassium (K⁺) 2,9 mg/L. Les concentrations maximales atteignent respectivement 20,8 mg/L et 6,7 mg/L mais sont en dessous du seuil de l'OMS de 75 mg/L. Ces éléments peuvent provenir de minéraux naturels, mais également de sources anthropiques, comme les rejets domestiques ou agricoles.
- Les bicarbonates dominent le faciès anionique avec une moyenne de 136,4 mg/L et un maximum de 250,5 mg/L, ce qui est cohérent avec la nature bicarbonatée des eaux révélée par le diagramme de Piper. L'écart-type de 34,9 mg/L indique une bonne homogénéité relative à ce paramètre.

- Les concentrations en chlorures présentent une moyenne modérée de 9,3 mg/L, mais peuvent atteindre jusqu'à 51,2 mg/L. Bien que ces valeurs demeurent largement inférieures au seuil fixé par l'OMS (250 mg/L). Le coefficient de variation élevé (114,3 %) témoigne d'une grande hétérogénéité spatiale, suggérant que certaines zones sont plus exposées à des sources de contamination que d'autres/ ;
- Les Sulfates (SO_4^{2-}) présente une moyenne de 3,4 mg/L et une valeur maximale de 38 mg/L, les sulfates restent globalement faibles dans la zone. Cependant, les fortes variations (CV de 171,9 %) indiquant une distribution très inégale et peuvent refléter une influence locale de matériaux soufrés ou d'intrusions anthropiques.
- Nitrates (NO_3^-) : Ce paramètre, indicateur clé de pollution d'origine agricole ou domestique, présente une moyenne de 9,4 mg/L, mais peut atteindre jusqu'à 36,2 mg/L. Bien que cette valeur reste en dessous du seuil de l'OMS de 50 mg/L, elle nécessite une vigilance particulière, surtout pour les points proches des habitations ou des zones cultivées. Le CV de 89 % indique une très forte hétérogénéité.

I.29.3.4.2. Cartes des eaux souterraines

I.29.3.4.2.1. Carte du potentiel Hydrogène (pH)

La Figure 0-8 illustre la répartition spatiale du pH des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou, à partir des données recueillies sur 77 points d'eau. Les valeurs varient entre 6,0 et 10,2, traduisant une eau globalement neutre à légèrement basique, bien que certaines valeurs atteignent les limites des normes de potabilité définies par l'OMS et le Burkina Faso ($6,5 < \text{pH} < 8,5$). Parmi les 3 points d'échantillonnage situés dans la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO), un seul présente un pH conforme à cette norme. La carte révèle une distribution hétérogène du pH sur l'ensemble de la commune, avec une couverture insuffisante dans la zone de la CVO, ce qui limite l'interprétation locale.

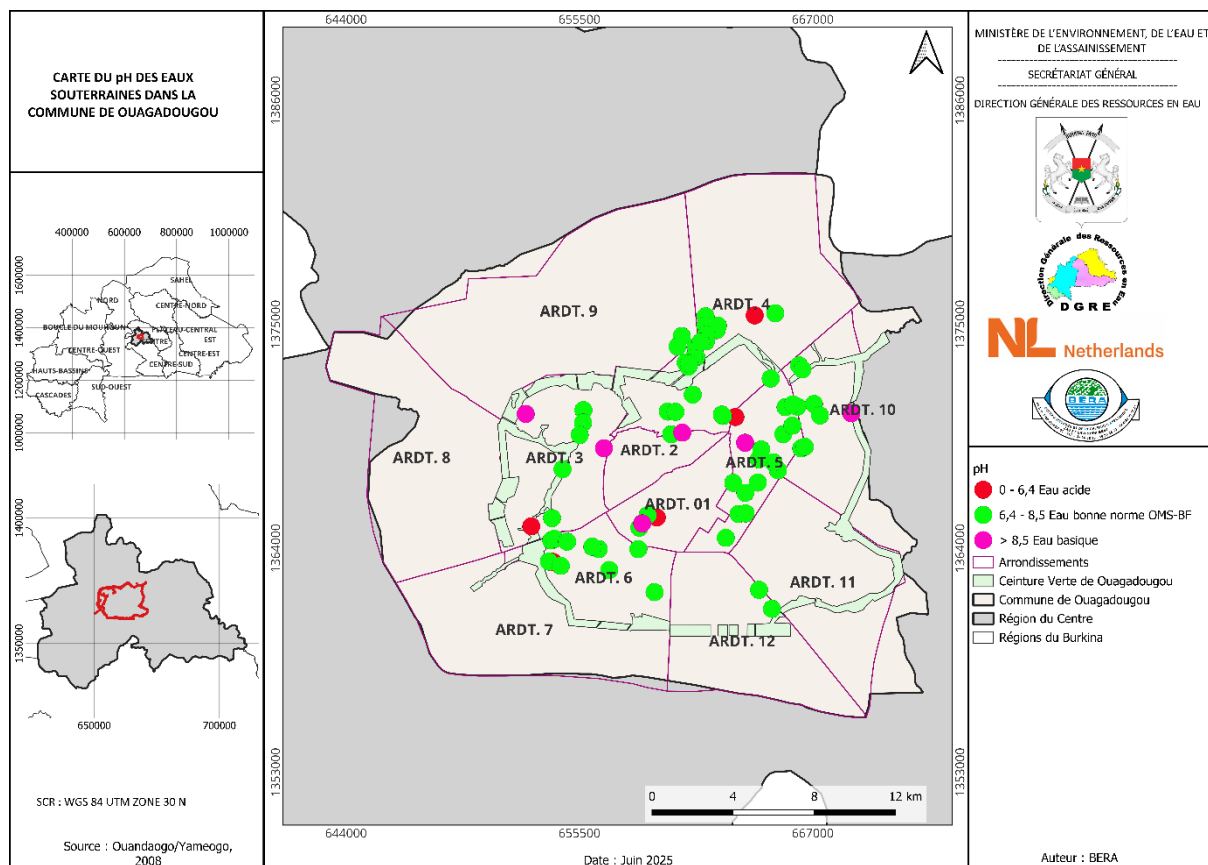


Figure 0-8 : Carte du pH des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou

1.29.3.4.2.2. Carte de la conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) est un indicateur de la minéralisation globale des eaux. Elle est également utilisée dans la méthode de Dienert, en lien avec les solides dissous totaux, pour évaluer la cohérence des analyses chimiques. La Figure 0-9 présente la carte de la CE des eaux souterraines à partir des données de 77 points d'eau dans la commune.

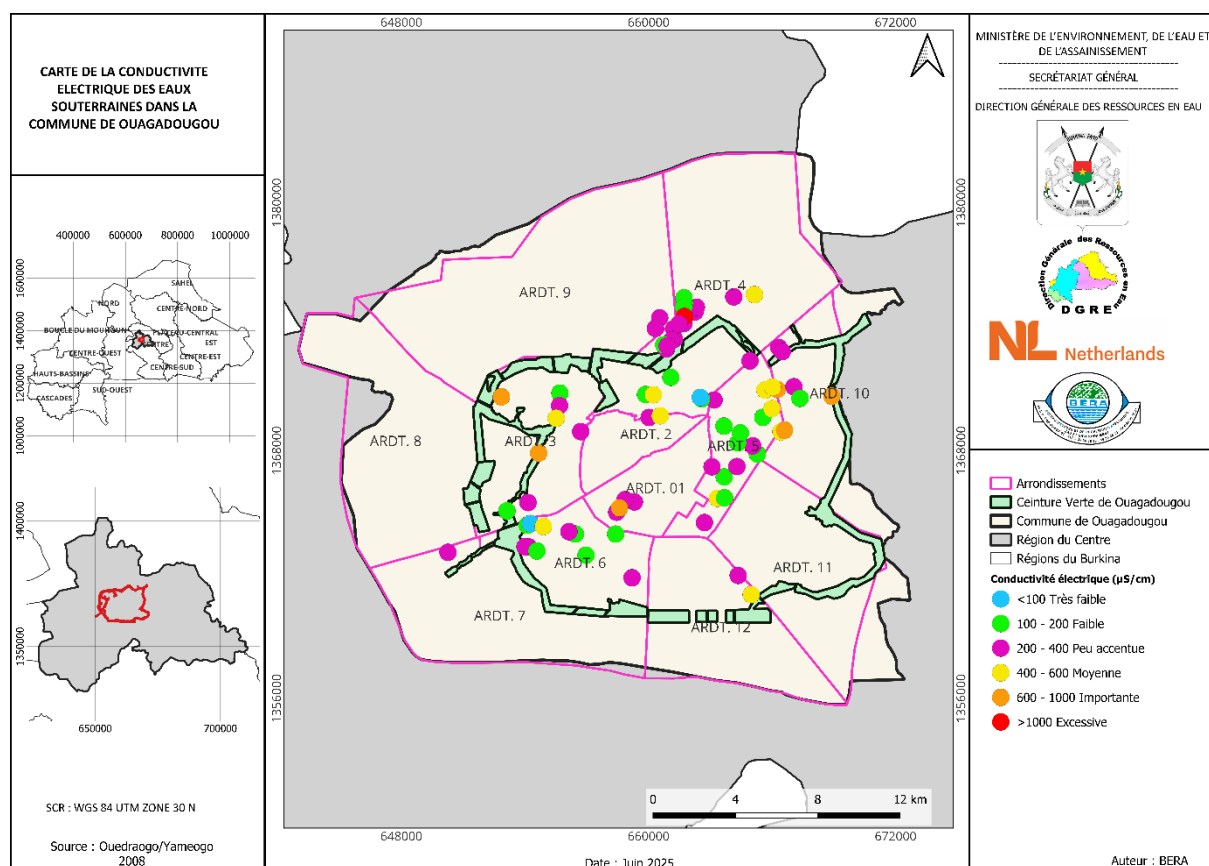


Figure 0-9 : carte de conductivité électrique des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou

Les valeurs de conductivité varient de 65 à 1512 $\mu\text{S}/\text{cm}$, permettant de classer les points d'eau comme suit : (i) 2 points à très faible minéralisation ; (ii) 22 points à faible minéralisation ; (iii) 34 points à minéralisation peu accentuée ; (iv) 11 points à minéralisation moyenne ; (v) 7 points à minéralisation importante et (vi) 1 point à conductivité excessive sur base de la classification proposée par Potelon et Zysman, (1993). Sur l'ensemble des points analysés, 75,3 % sont caractérisés par une eau de qualité excellente, 14,3 % par une qualité bonne, et 10,4 % par une eau jugée utilisable.

Concernant la CVO, sur les 3 points étudiés, 1 présente une conductivité faible, une conductivité peu accentuée et une conductivité moyenne, ce qui reflète une minéralisation modérée à faible et une qualité des eaux excellente à bonne dans cette zone.

Tableau 0-4 : Classification des eaux de boisson en fonction de la conductivité d'après Potelon et Zysman, (1993)

Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Degré de Minéralisation	Qualité de l'eau
$C < 100$	Très faible	Excellente
$100 < C < 200$	Faible	Excellente
$200 < C < 400$	Peu accentuée	Excellente
$400 < C < 600$	Moyenne	Bonne
$600 < C < 1000$	Importante	Utilisable
$C > 1000$	Excessive	Utilisable

1.29.3.4.2.3. Carte de la teneur en nitrates

La carte des nitrates (NO_3^-) permet de suivre le niveau de pollution des eaux souterraines en lien avec des sources naturelles (décomposition de matière organique) ou anthropiques (engrais, élevage, rejets domestiques). Les nitrates sont particulièrement dangereux pour la santé, notamment chez les nourrissons. La valeur guide de l'OMS pour la consommation humaine est fixée à 50 mg/L.

La Figure 0-10 représente la carte de la teneur en nitrates dans la commune, basée sur 77 points d'eau, dont 3 situés dans la CVO. Les résultats indiquent que tous les points analysés, y compris ceux de la CVO, présentent des concentrations en nitrates inférieures à la norme OMS, témoignant d'une absence de pollution nitrate notable à l'échelle de la commune.

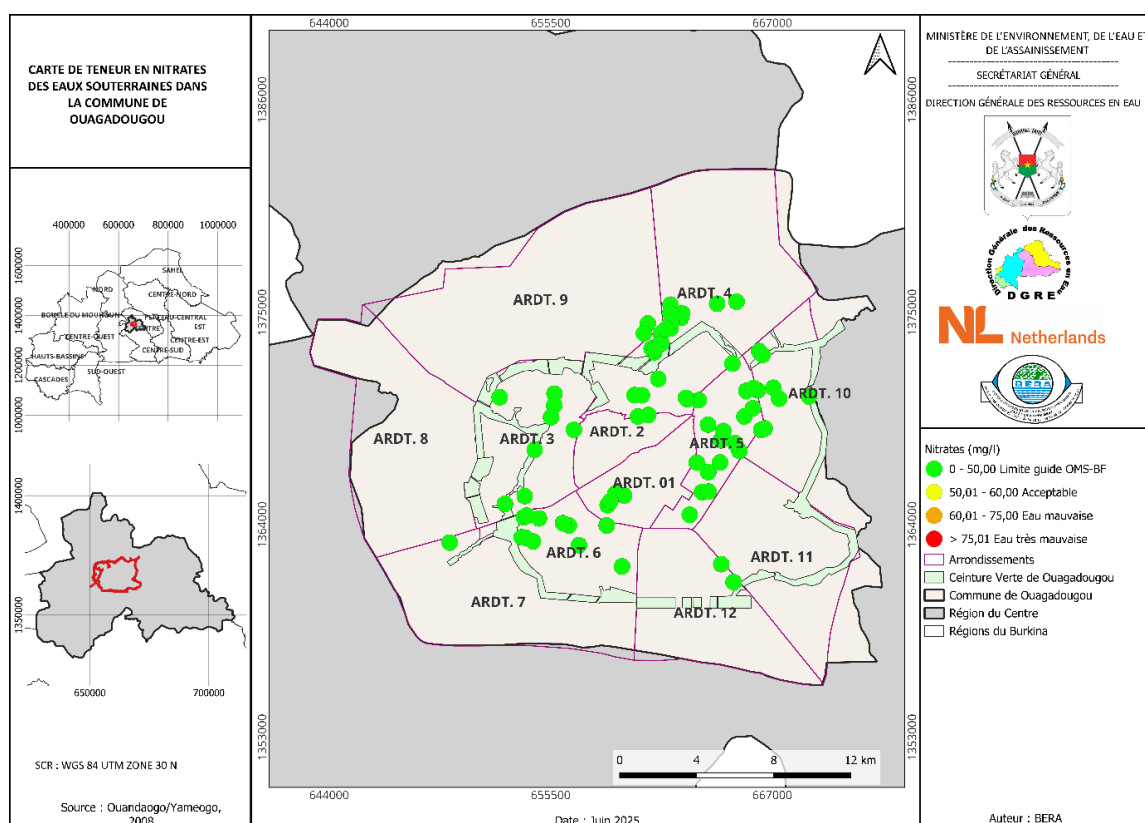


Figure 0-10 : carte de teneur en nitrates des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou

L'analyse hydrochimique des eaux souterraines dans la commune de Ouagadougou révèle une qualité globalement acceptable, avec des eaux neutres à légèrement basiques, une minéralisation modérée et une faible contamination en nitrates. Toutefois, certaines disparités spatiales existent, notamment en termes de conductivité et de pH. En ce qui concerne la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO), les résultats indiquent une qualité d'eau globalement satisfaisante, bien que la densité de points d'échantillonnage y soit limitée. Les trois points analysés dans la CVO présentent des teneurs en nitrates faibles, des pH majoritairement conformes et des conductivités faibles à moyennes, suggérant une influence limitée des pressions anthropiques actuelles. Il est recommandé d'étendre la couverture d'échantillonnage dans cette zone stratégique pour renforcer la surveillance et prévenir d'éventuelles contaminations futures.

II. ÉTUDE DE LA VULNERABILITE INTRINSEQUE DES EAUX SOUTERRAINES

La vulnérabilité des aquifères à la pollution, introduite en hydrogéologie par Albinet et Margat dans les années 1960, désigne la sensibilité des nappes souterraines à une contamination potentielle. Il s'agit d'une notion relative, non mesurable directement, qui dépend à la fois des caractéristiques intrinsèques du milieu et de la qualité des données disponibles (Didi, 2018).

Protéger les ressources en eaux souterraines contre les risques de pollution nécessite une identification rigoureuse des zones les plus exposées. À cet effet, la cartographie de la vulnérabilité constitue un outil stratégique, permettant une planification adaptée, des réponses rapides en situation d'urgence, une gestion préventive de l'occupation du sol, et une préservation durable de la qualité des réserves en eau (Didi, 2018; GOUGO, 2016).

Comme le souligne Sinan et al. (2003), le degré de vulnérabilité d'une nappe reflète sa propension à être affectée par une source de pollution : plus une contamination atteinte rapidement la nappe, plus cette dernière est considérée comme vulnérable. L'évaluation de cette vulnérabilité repose sur une analyse intégrée des paramètres géographiques, géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques propres au site étudié.

À l'échelle mondiale, plus d'une vingtaine de méthodes ont été développées pour évaluer la vulnérabilité des aquifères, parmi lesquelles figure la méthode DRASTIC (Civita, 1993). Dans le cadre de cette étude, cette méthode sera appliquée pour évaluer la vulnérabilité à la pollution des aquifères de la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO).

II.1. Description de la méthode DRASTIC

C'est une méthode empirique, conçue dans les années 1980 par la Nationale Water Well Association aux États-Unis. C'est actuellement la plus utilisée dans le monde pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des ressources en eau, à cause de sa simplicité (CAMARA, 2017; GOUGO, 2016; NOBA, 2018).

Elle repose sur ces quatre principales hypothèses :

- Le territoire d'application couvre une superficie de plus de 0,4 km² ;
- Le contaminant se propage dans le milieu à partir de la surface du sol par infiltration des précipitations ;
- Le contaminant se déplace verticalement vers le bas à la même vitesse que l'eau ;
- Le contaminant ne se dégrade pas.

L'appellation DRASTIC est un acronyme dont chaque lettre désigne un paramètre pris en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque. Il y a donc sept (7) paramètres hydrogéologiques :

- D : Profondeur de la nappe ;
- R : Recharge nette ;
- A : Nature lithologique de l'Aquifère ;
- S : Type de Sol ;

- T : Topographie des terrains ;
- I : Impact de la zone non saturée ;
- C : Conductivité Hydraulique (perméabilité) de la zone saturée.

L'évaluation de la vulnérabilité par cette méthode est faite en trois étapes :

II.1.1. Étape 1

Des poids paramétriques allant de 1 à 5 sont assignés à sept paramètres, reflétant leur rôle dans le transport et la réduction des contaminants (Saaty, 1977 cité par (Camara, 2017; Lia et al., 2014; Mbuluyo et al., 2017; Poromna et al., 2022; Youan, 2008). Par exemple, attribuer un poids de 5 au paramètre « D » et un poids de 1 au paramètre « T » indique que la profondeur de la nappe a un impact significatif sur la vulnérabilité de l'aquifère en lien avec la topographie ;

II.1.2. Étape 2

Chaque paramètre reçoit une cote de 1 à 10 en fonction des conditions environnementales. Par exemple, une faible cote pour le paramètre « D » indique une grande profondeur de la nappe et donc une faible vulnérabilité, tandis qu'une cote élevée indique une faible profondeur et une vulnérabilité élevée à la contamination. Consultez le Tableau II-1 pour un résumé des deux premières étapes.

Tableau II-1 : Classes, notes et poids attribués aux paramètres DRASTIC

Profondeur de l'eau (m)		Recharge (mm)		Matériaux de l'aquifère		Type de sol		Topographie (pente %)		Impact de la zone vadose		Conductivité (m/jr)	
Classe	Côte	Classe	Côte	Classe	Côte	Classe	Côte	Classe	Côte	Classe	Côte	Classe	Côte
(0 - 1,5)	10	(0 - 50,8)	1	Schiste massif	2	Mince ou absent	10	(0 - 2)	10	Aquifère confiné	1	(0,04 - 4,1)	1
(1,5 - 4,6)	9	(50,8 - 101,6)	3	Ignées/métamorphiques	3	Gravier	10	(2 - 6)	9	Limon/argile	3	(4,1 - 12,3)	2
(4,6 - 9,1)	7	(101,6 - 177,8)	6	Métamorphique ligneux	4	Sable	9	(6 - 12)	5	Shale	3	(12,3 - 28,7)	4
(9,1 - 15,2)	5	(177,8 - 254)	8	Séquence de grès, calcaire et shale	5	Tourbe	8	(12 - 18)	3	Sable, gravier avec limon et argile	6	(28,7 - 41)	6
(15,2 - 22,8)	3	(> 254)	9	Lits de grès calcaire	6	Argile rétractable	7	(> 18)	1	Calcaire	6	(41 - 82)	8
(22,8 - 30,4)	2	Pondération 4		Grès ou calcaire massif	6	Loam sableux	6	Pondération 1		Grès	10	(> 82) 10	
(> 30,4)	1			Sable et gravier	8	Loam	5			Sable et gravier	8		
Pondération 5				Basalte	9	Loam limoneux	4			Basalte	9		
				Calcaire karstique	10	Loam argileux	3			Karst calcaire	10		
				Pondération 3		Boue	2			Pondération 5			
						Argile non rétractable	1						
						Pondération 2							

II.1.3. Étape 3

Une fois les données des paramètres DRASTIC collectées, des valeurs sont attribuées aux critères correspondants. Ensuite, l'indice de vulnérabilité DRASTIC propre à chaque unité hydrogéologique est calculé en faisant la somme du produit des poids et des côtes des différents paramètres de la manière suivante :

$$DPI = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw$$

Avec : D, R, A, S, T, I et C représentant respectivement les différents paramètres définis ci-dessus. r pour Rating (cote) et w pour weights (poids).

L'Indice DRASTIC (Id) évalue la vulnérabilité d'une unité hydrogéologique. Une valeur élevée d'Id indique une vulnérabilité plus élevée, mais un Id bas ne garantit pas l'absence de contamination. Cependant, il suggère une moindre probabilité de contamination par rapport à une unité avec un Id élevé. L'équation 1 permet d'effectuer la conversion des indices DRASTIC en pourcentage afin de mieux procéder à la détermination des classes de degré de vulnérabilité (Tableau II-2).

$$Indice\ en\ \% = \frac{Id - 23}{203} \times 100 \quad Eq.1$$

En 1995, le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec a introduit une nouvelle approche qui implique la segmentation de l'échelle de vulnérabilité hydrogéologique en trois grandes catégories (Camara, 2017 ; Youan, 2008)(Tableau II-3).

Tableau II-2 : Degrés de vulnérabilité selon l'indice DRASTIC (Mbuluyo et al., 2017)

Indice DRASTIC	Vulnérabilité	Couleur représentative
23 à 84 (0 à 30 %)	Très faible	Bleue
84 à 115 (31 à 45 %)	Faible	Verte
115 à 145 (46 à 60 %)	Moyenne	Jaune
145 à 170 (60 à 75 %)	Élevée	Orange
170 à 226 (76 à 100 %)	Très élevée	Rouge

Tableau II-3 : Indices DRASTIC en pourcentage et vulnérabilité hydrogéologique

Indices de vulnérabilité en %	Conclusion
Catégorie 1 0 à 35 %	Assurément bien protégé
Catégorie 2 comprise entre 35 et 75 %	Protection hydrogéologique incertaine
Catégorie 3 75 à 100 %	Assurément vulnérable

II.2. Données des bases

La profondeur de la nappe qui correspond aux niveaux statiques obtenus sur les fiches techniques (base des données BUMIGEB) provenant de l'ensemble des données collectées. Ce paramètre évalue

l'épaisseur des matériaux que les contaminants doivent traverser avant d'atteindre la nappe d'eau (Chandoul et al., 2008). En règle générale, une plus grande profondeur d'eau entraîne un retard dans l'atteinte de la nappe par les polluants.

La recharge nette ou infiltration efficace définit la quantité de l'eau par unité de surface qui s'infiltre et atteint la zone saturée. Cette eau permet de transporter le polluant de la surface du sol vers la zone saturée en traversant la zone vadose. Elle a été évaluée de manière spatialisée en utilisant la méthode du bilan hydrologique. Les données climatiques globales (FLDAS) ont été utilisées pour estimer la recharge.

La lithologie de l'aquifère et la nature de la zone non saturée sont déterminées à partir de la carte géologique. Le type de sol influe sur la recharge et la migration des polluants dans la zone vadose. Son rôle clé réside dans son potentiel d'atténuation de la pollution (Gougo, 2016, 2016 ; Lia et al., 2014). Comme pour les milieux aquifères, les informations sur les sols sont liées aux informations géologiques.

Les données de sol sont celles fournies par le BUNASOL et utilisées dans le cadre de l'AMC des potentialités hydrogéologiques de la CVO.

Le paramètre topographie est évalué dans cette étude par la pente. Elle (la pente) est générée à partir de la digitalisation de la pente issue de l'image SRTM. La topographie influe sur l'infiltration de l'eau et le ruissellement en fonction de la pente. Une forte pente favorise le ruissellement, tandis qu'une pente douce favorise l'infiltration. Les pentes élevées limitent l'infiltration et favorisent le ruissellement, tandis que les pentes faibles retiennent l'eau, potentiellement augmentant la migration des contaminants (Gougo, 2016).

La conductivité hydraulique guide la vitesse de propagation des polluants dans l'aquifère, en lien avec la lithologie. Un paramètre élevé accélère la transmission des polluants (Youan, 2008). Ce paramètre est calculé en utilisant la méthode de Francis (1970) pour analyser la carte détaillée des fractures, qui est créée à partir du traitement des images satellitaires.

II.3. Détermination de la vulnérabilité méthode DRASTIC

À partir des données collectées sur les paramètres DRASTIC, une carte des indices de vulnérabilité à la pollution des nappes a été élaborée à l'aide du logiciel QGIS. Chaque paramètre du modèle (profondeur de la nappe, recharge, aquifère, sol, pente, impact de la zone non saturée, conductivité hydraulique) a été traité sous forme de couche SIG, à laquelle un poids a été attribué en fonction de son influence sur la vulnérabilité de l'aquifère. Les couches ont ensuite été combinées selon l'équation DRASTIC, en veillant à leur parfaite compatibilité spatiale (projection, unités, étendue, résolution) afin d'assurer la validité des opérations matricielles en mode raster.

La carte obtenue permet de visualiser spatialement les niveaux de vulnérabilité, facilitant ainsi l'identification des zones les plus sensibles à la pollution. Cette information est essentielle pour orienter les décisions de planification et de gestion des ressources en eau, notamment en matière de protection des nappes exploitées pour l'alimentation en eau potable.

Pour respecter l'exigence méthodologique minimale de la méthode DRASTIC (superficie $\geq 0,4 \text{ km}^2$), l'analyse a été conduite à l'échelle de la région du Centre avant d'extraire la zone d'étude spécifique à la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO). L'analyse a permis de produire deux cartes principales : une carte d'indice de vulnérabilité DRASTIC et une carte de vulnérabilité hydrogéologique. Ces résultats offrent une vision spatiale précise du niveau de protection des nappes phréatiques de la zone d'étude face aux risques de pollution.

II.3.1. Indice de la vulnérabilité DRASTIC

L'analyse de l'indice DRASTIC a permis de classifier la zone selon différents niveaux de vulnérabilité à la pollution (Voir Figure II-1) :

- Très faible vulnérabilité (52,1 %) : Cette classe couvre plus de la moitié de la zone étudiée. Elle correspond à des zones où les conditions géologiques et hydrogéologiques (profondeur importante de la nappe, sol peu perméable, etc.) limitent fortement la pénétration et la propagation des polluants.
- Faible vulnérabilité (44,4 %) : Représente également une large part de la zone. Ces terrains, bien que relativement protégés, présentent une sensibilité légèrement plus élevée, nécessitant une vigilance particulière en matière d'aménagement et de gestion des déchets.
- Vulnérabilité moyenne (2,9 %) : Concentrée dans certaines portions localisées, cette catégorie indique des conditions modérées de protection. Des mesures de suivi et de contrôle peuvent être envisagées.
- Vulnérabilité élevée (0,6 %) : Très peu représentée dans la zone, elle identifie néanmoins des secteurs à risque où une attention renforcée est indispensable, notamment pour limiter les activités potentiellement polluantes.

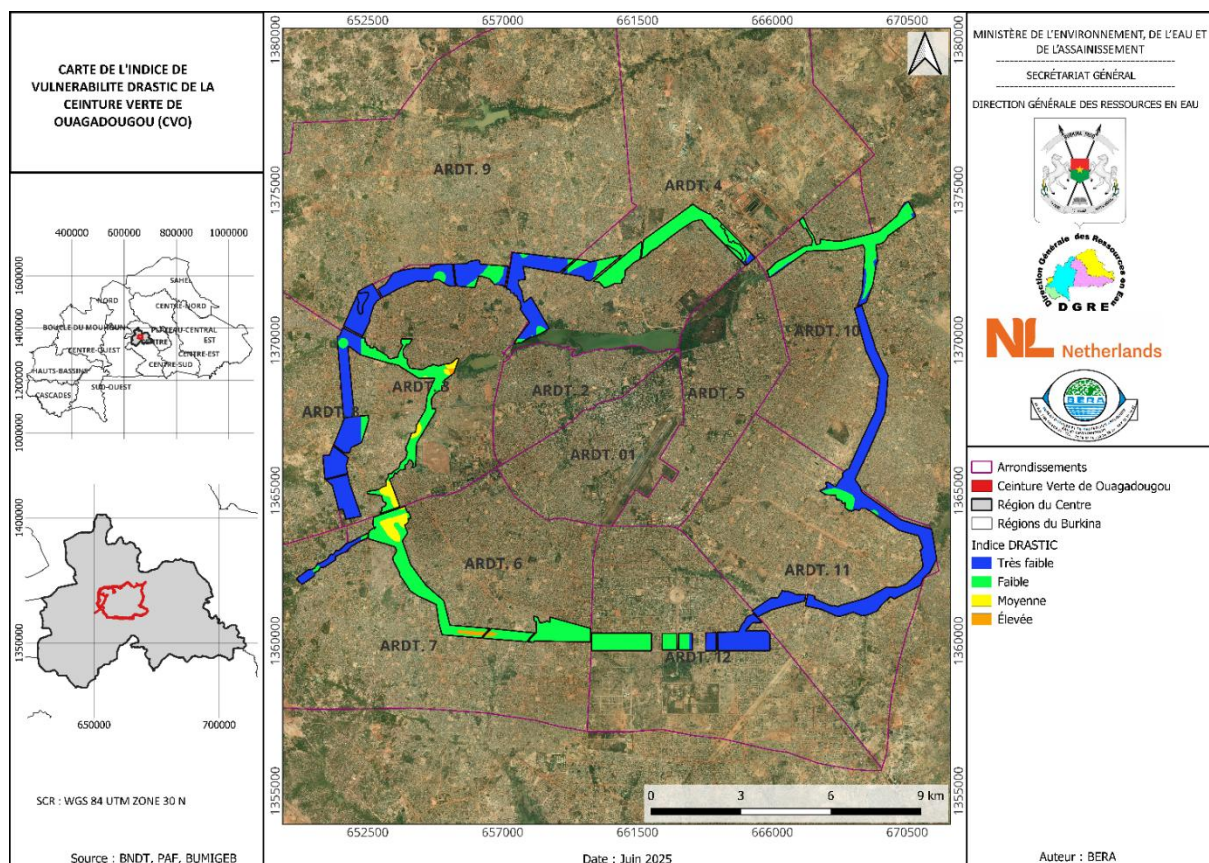


Figure II-1 : Indice de vulnérabilité DRASTIC

II.3.2. Vulnérabilité hydrogéologique

L'analyse de la vulnérabilité hydrogéologique a permis de distinguer plusieurs niveaux de vulnérabilité à la pollution dans la zone étudiée (Voir Figure II-2) :

- Zones assurément bien protégées (63,7 %) : Ces secteurs bénéficient de conditions géologiques et hydrogéologiques naturellement défavorables à la pollution (épaisse couche de couverture, faible perméabilité, etc.).
- Zones à protection incertaine (36,3 %) : Ces zones pourraient être exposées à une contamination en cas d'activités anthropiques mal contrôlées. Elles justifient un suivi plus régulier et des aménagements de prévention.

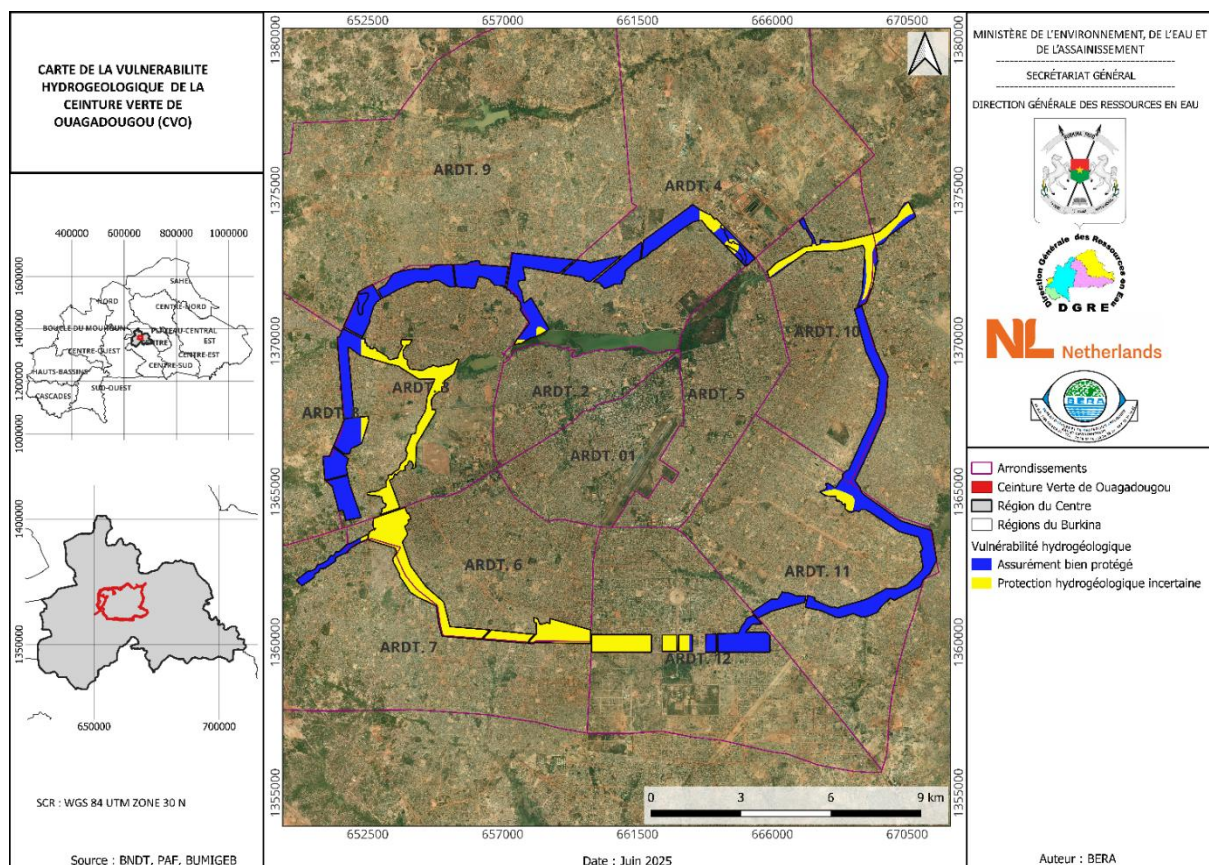


Figure II-2 : Vulnérabilité hydrogéologique

Ces cartes constituent des outils d'aide à la décision essentiels pour une gestion rationnelle des ressources en eau souterraine dans la Ceinture Verte de Ouagadougou. Elles permettront aux autorités locales, urbanistes et acteurs du secteur de l'eau d'orienter les politiques de prévention, de planification urbaine et de protection de l'environnement de manière ciblée et efficace.

III. ÉTUDE DE POLLUTION ET RISQUE DE POLLUTION DES EAUX

III.1. Types de pollution des eaux dans la zone d'intérêt

La Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO), conçue initialement comme un outil de lutte contre la désertification et de régulation du microclimat urbain, subit aujourd'hui des pressions anthropiques croissantes compromettant ses fonctions écologiques (Barro, 2024; Coulibaly, 2021; PSAGEV, 2022). Cette partie évalue spécifiquement les risques de pollution des eaux souterraines liés aux diverses activités observées dans cette zone, en distinguant les pollutions d'origine naturelle et anthropique (artificielle).

- La pollution naturelle est causée par des éléments présents dans l'environnement. Dans le contexte burkinabé, elle résulte principalement des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des formations, ainsi que du processus de recharge des aquifères ;
- La pollution artificielle, quant à elle, provient des activités humaines destinées à assurer la survie et le développement, telles que l'agriculture, l'urbanisation ou l'exploitation industrielle.

Face à la pollution naturelle, les actions sont généralement limitées à l'observation et à la réduction des effets. En revanche, pour la pollution artificielle, il est possible d'agir à deux niveaux : en amont, par l'adoption de pratiques et de méthodes moins polluantes, et en aval, en atténuant l'impact des pollutions déjà présentes. Une prise de conscience collective de l'importance de la ressource est nécessaire pour garantir une gestion durable.

Pour évaluer l'impact sur les eaux souterraines, cette étude s'appuie sur :

- Une analyse des données existantes (rapports, projets, cartes) ;
- Une évaluation des risques basée sur la vulnérabilité des sols et la nature des polluants.

III.1.1. Analyse de la pollution naturelle dans la zone d'intérêt

Dans la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO), l'analyse de la pollution naturelle révèle l'influence combinée des facteurs géologiques, hydrologiques et climatiques sur la qualité des eaux souterraines.

III.1.1.1. Facteurs géologiques

La nature lithologique des formations géologiques sous-jacentes conditionne la composition chimique naturelle des eaux souterraines. En effet, les roches du socle précambrien de la DCO, principalement constituées de granitoïdes et de formations métamorphiques, libèrent par altération des éléments tels que le fer, le manganèse ou encore certains sels minéraux, contribuant à la minéralisation naturelle des nappes. La nature des formations géologiques influence la composition chimique naturelle des eaux souterraines

III.1.1.2. Facteurs climatiques

Les conditions climatiques de la région, déjà marquées par une variabilité interannuelle élevée, sont de plus en plus influencées par le changement climatique (voir Figure 0-2). L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations durant la saison des pluies intensifie l'infiltration des eaux de surface dans le sol, entraînant une dissolution accrue des minéraux et, par conséquent, une élévation des concentrations naturelles en éléments tels que le fer et le manganèse dans les eaux souterraines. Ces pics de concentration coïncident généralement avec les périodes de recharge des nappes phréatiques.

Inversement, les périodes de sécheresse prolongée ou de faibles précipitations réduisent la recharge naturelle des nappes, affaiblissant leur capacité de dilution et de régénération face aux pollutions diffuses. De plus, la diminution de la couverture végétale due aux sécheresses successives accentue l'érosion des sols, facilitant le transfert de particules fines et de polluants vers les zones d'infiltration.

III.1.1.3. Érosion hydrique et éolienne

Les phénomènes d'érosion, qu'ils soient hydriques ou éoliens, jouent un rôle non négligeable dans le transfert de polluants vers les aquifères (voir Figure III-1). Ils se traduisent notamment par :

- Le transport des polluants d'origine agricole (engrais, pesticides) et urbaine (hydrocarbures, métaux lourds, déchets) vers les zones d'infiltration ;

- La dégradation des sols, entraînant une perte de leur capacité naturelle de filtration, en particulier dans les zones appauvries et exposées.



a) Zone d'érosion hydrique dans l'arrondissement 3 (Tampouy) de la CVO



• Zone d'érosion hydrique dans l'arrondissement 6 (Sandogo) de la CVO



b) Érosion éolienne dans l'arrondissement 6 (Sandogo) de la CVO

Figure III-1 : Coins d'érosion hydrique et éolienne dans la CVO

III.1.2. Analyse de la pollution artificielle dans la zone d'intérêt

Dans la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO), la pollution artificielle des eaux souterraines est influencée par diverses activités économiques, incluant le secteur primaire, secondaire et tertiaire. Parmi ces activités, l'agriculture, pollution industrielle et artisanale et les dépotoirs d'ordures non contrôlés sont les principales sources de contamination, posant des menaces significatives pour la qualité des ressources en eau souterraine. Cette analyse se concentre sur ces secteurs afin de mettre en lumière les principales sources de pollution et leurs impacts.

III.1.2.1. Menace de pollution d'origine agricole

L'occupation souvent anarchique et non réglementée d'une part significative de la CVO à des fins agricoles (cultures vivrières et maraîchage) a favorisé l'usage intensif d'intrants chimiques tels que les engrais minéraux, herbicides et pesticides (voir Figure III-2). En l'absence de pratiques agroécologiques durables, ces substances sont susceptibles de s'infiltrer dans les sols et d'atteindre les nappes phréatiques. Les impacts associés comprennent :

- La présence accrue de nitrates et phosphates dans les eaux souterraines, indicateurs d'un apport excessif d'engrais ;

- La contamination par des composés organiques volatils et semi-volatils, notamment des pesticides persistants ;
- Le risque d'eutrophisation des eaux de surface hydrauliquement connectées aux nappes, dû à l'excès de nutriments.

Par ailleurs, l'élevage extensif pratiqué par les populations riveraines (bovins, ovins, caprins) constitue un facteur aggravant. Le pâturage incontrôlé contribue à la dégradation de la couverture végétale, tandis que les déjections animales accentuent la charge organique et microbiologique dans les sols, avec des risques de lessivage vers les nappes.

Outre les pratiques agricoles non encadrées, la municipalité de Ouagadougou appuie le développement de l'agriculture urbaine à travers plusieurs projets structurants, ayant pour objectif de concilier sécurité alimentaire, agroécologie et adaptation au changement climatique. Parmi les projets en cours, on note :

- Le projet "Nourrir la ville" : mis en œuvre par ACRA et ses partenaires (Mani Tese, Mairie de Ouagadougou, Association Watinoma, Ital Watinoma ODV, Ke du Burkinabé, Etifor et Gnucoop), cofinancé par l'Agence Italienne pour la Coopération au Développement (AID 012590/01/1). Il vise la promotion d'un système agroalimentaire durable par l'expérimentation de techniques agroécologiques sur 15 ha dans les arrondissements 3, 4 et 11 de la CVO, tout en favorisant les échanges de bonnes pratiques entre producteurs locaux.
- Le projet d'appui à l'adaptation fondée sur les écosystèmes (EbA) : intitulé "Élaboration de politiques fondées sur des données probantes pour la promotion de l'approche EbA dans le développement de la ceinture verte à Ouagadougou". Ce projet bénéficie à environ 186 000 personnes (dont 50 % de femmes) sur trois sites (Tampouy, Tanghin 1 et Tanghin 2), par le biais de campagnes de sensibilisation, de renforcement de la résilience climatique, et d'amélioration de la sécurité alimentaire.
- Le projet d'agriculture durable initié par la Mairie de Ouagadougou : soutenu par des partenaires techniques, ce projet encourage l'intégration de l'agriculture et de la foresterie. Cependant, l'utilisation d'espèces forestières inadaptées pour accompagner le maraîchage pourrait compromettre les équilibres écologiques locaux, notamment en termes de gestion de l'eau et de concurrence hydrique



a) Le lieu de culture dans l'arrondissement 4 (Tanghin) de la CVO



b) Le lieu de culture dans l'arrondissement 11 (Karpala) de la CVO



c) Le lieu de cultrure dans l'arrondissement 12 (Ouaga 2000) de la CVO

Figure III-2 : Illustration de quelques lieux de culture dans la CVO

III.1.2.2. Menace de pollution urbaine et industrielle

La Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO) fait face à des pressions croissantes liées à l'urbanisation incontrôlée et aux activités industrielles informelles. La pollution d'origine urbaine se manifeste principalement par la présence d'infrastructures diverses (publiques et privées), d'habitations spontanées, et surtout par la prolifération de décharges sauvages. Ces facteurs dégradent les sols, altèrent la qualité des eaux souterraines et compromettent la fonction écologique de la CVO.

- **Décharges sauvages et pollution des sols**

La CVO est devenue un site de dépôts anarchiques de déchets ménagers et d'emballages plastiques de toutes sortes. Cette pratique, en contradiction avec les dispositions du décret n°98-323/PRES/PM/MEE/MEF/MATS/MIHU/MS/MTT réglementant le transport, le traitement et l'élimination des déchets urbains, engendre une pollution sévère des sols. Les lixiviats issus de ces déchets contiennent des substances toxiques, notamment :

- Métaux lourds (plomb, cadmium, mercure, etc.) ;
- Polluants organiques persistants (POP) ;
- Perturbateurs endocriniens issus des plastiques.

Ces composés, en s'infiltrant dans les horizons pédologiques, peuvent atteindre la nappe phréatique, posant ainsi un risque majeur pour la qualité de l'eau souterraine (voir Figure III-3).



a) Dépotoir d'ordure dans l'arrondissement 6 (Sandogo) de la CVO



b) Dépotoir d'emballages plastiques dans l'arrondissement 6 (Sandogo) de la CVO



c) Dépotoir d'emballages plastiques dans l'arrondissement 11 (Karpala) de la CVO



d) Dépotoir d'ordure dans l'arrondissement 3 (Tampouy) de la CVO

Figure III-3 : Coins de décharge sauvage dans la CVO

- **Urbanisation spontanée et occupation non réglementée**

La croissance démographique rapide de la capitale a entraîné une expansion désorganisée dans la CVO, avec l'implantation de diverses structures commerciales et sociales telles que (voir Figure III-4) :

- Boutiques, kiosques, maquis, buvettes ;
- Lieux de fabrication et de vente de briques ou d'agréats ;
- Points de vente informels de carburant ;
- Lieux de culte, établissements scolaires, cimetières, etc.

Ces installations, souvent non conformes aux normes environnementales et sanitaires, rejettent des effluents liquides et solides non traités. Les eaux usées domestiques et issues de la restauration sont fréquemment déversées directement dans le milieu naturel, augmentant les risques de pollution microbiologique (coliformes fécaux, pathogènes entériques) et chimique.



a) Lieux de fabrication et de vente de briques ou d'agréats dans l'arrondissement 12 (Ouaga 2000) de la CVO



b) Lieux de culte dans l'arrondissement 3 (Tampouy) de la CVO



c) Établissements scolaires dans l'arrondissement 6 (Sandogo) de la CVO



d) Établissements scolaires dans l'arrondissement 4 (Tanghin) de la CVO



e) Habitats spontanés ou non lotis dans l'arrondissement 10 (Nioko 1) de la CVO



f) Maquis dans l'arrondissement 3 (Tampouy) de la CVO



g) Lieux de prière dans l'arrondissement 4 (Tanghin) de la CVO



h) Buvette dans l'arrondissement 11 (Karpala) de la CVO

Figure III-4 : Structures commerciales et sociales dans la CVO

- **Activités artisanales et pollutions industrielles**

La présence d'ateliers de mécanique, de garages automobiles et de stations de vente d'essence dans la zone constitue une menace importante (voir Figure III-5). Ces unités rejettent dans l'environnement :

- Hydrocarbures et huiles usagées ;
- Solvants organiques ;
- Résidus métalliques et poussières contaminées.

L'absence de dispositifs de confinement et de traitement entraîne la migration de ces contaminants vers les sols et les eaux souterraines par percolation, augmentant le risque de pollution chronique.



a) Atelier de mécanique dans l'arrondissement 6 (Sandogo) de la CVO



b) Atelier de mécanique dans l'arrondissement 3 (Tampouy) de la CVO



c) Garages automobiles dans l'arrondissement 6 (Sandogo) de la CVO



d) Garages automobiles dans l'arrondissement 3 (Tampouy) de la CVO

Figure III-5 : Activités artisanales et pollutions dans la CVO

• Infrastructures publiques et risques associés

Certaines infrastructures publiques, comme le Centre de Traitement et de Valorisation des Déchets (CTVD), mal planifiées ou mal entretenues, peuvent perturber les écoulements naturels des eaux de ruissellement.

Enfin, la construction d'une future raffinerie d'or dans les environs de la CVO représente une menace potentielle en cas de mauvaise gestion des substances chimiques utilisées dans le processus d'extraction, notamment le cyanure et le mercure, deux agents hautement toxiques pour les écosystèmes aquatiques et les eaux souterraines.

III.2. Risques de pollution

Les risques de pollution regroupent l'ensemble des menaces susceptibles d'altérer la qualité des ressources en eau, tant de surface que souterraines. Avant d'identifier ces menaces spécifiques potentielles, il est fondamental de comprendre le lien intrinsèque entre qualité des eaux et pollution.

III.2.1. Relation entre qualité des eaux et pollution

La surveillance de la qualité des ressources en eau vise à acquérir des données fiables sur leur état physico-chimique et biologique, afin d'en suivre l'évolution dans le temps. Ces informations permettent une gestion intégrée et rationnelle des ressources hydriques, en lien avec les usages domestiques, agricoles, industriels et environnementaux. Ainsi, à toute mesure de quantité d'eau doit être systématiquement associée une mesure de qualité. C'est pourquoi chaque station piézométrique devrait être couplée à une station de contrôle de la qualité des eaux. La Figure III-6 représente ce couplage nécessaire des stations qualité des eaux avec les stations hydrométriques et piézométriques.

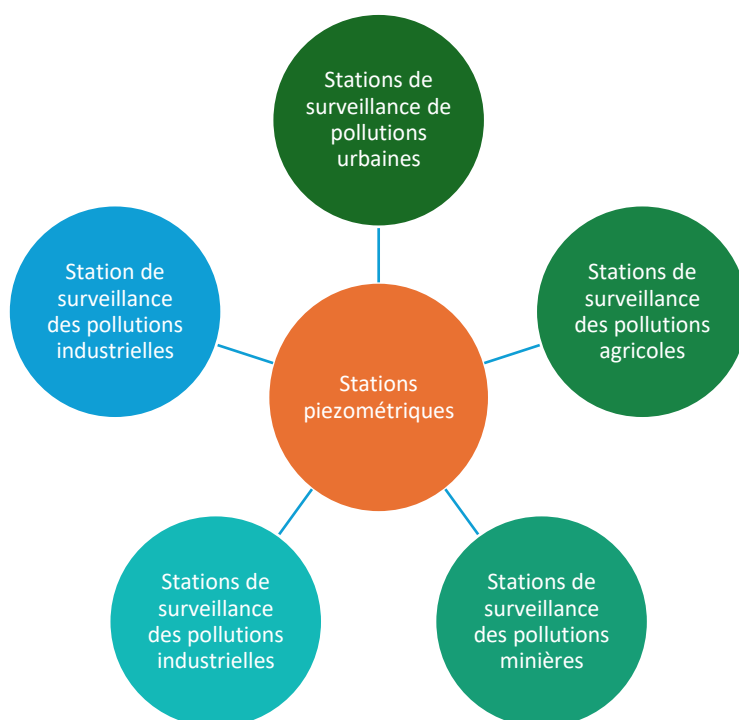


Figure III-6 : Illustration du couplage stations piézométriques et stations de qualité des eaux (Source : Rapport Étude technique préliminaire AEM 2022)

III.2.2. Menaces de pollution en zone urbaine

Dans les zones urbaines de la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO), les menaces de pollution des eaux souterraines sont principalement dues à l'inadéquation des infrastructures de gestion des déchets et des eaux usées

III.2.2.1. Eaux usées

Le rejet non traité ou mal traité des eaux usées domestiques et industrielles dans l'environnement constitue une source majeure de pollution des eaux souterraines (voir Figure III-4 et Figure III-5). Les infiltrations de ces effluents, riches en agents pathogènes, nutriments et produits chimiques, peuvent contaminer les nappes phréatiques, rendant l'eau impropre à la consommation.

III.2.2.2. Déchets solides

L'accumulation de déchets solides dans les décharges non contrôlées, souvent situées à proximité des zones d'habitation, favorise la lixiviation de substances toxiques dans les sols et les eaux souterraines (voir Figure III-3). Les lixiviats produits par la décomposition des déchets peuvent contenir des métaux lourds, des composés organiques toxiques, et d'autres contaminants dangereux pour la santé humaine et l'environnement.

III.2.2.3. Boues de vidange

La gestion inadéquate des boues de vidange issues des fosses septiques et des installations sanitaires constitue une autre menace significative (voir Figure III-7). Les pratiques de déversement non réglementé de ces boues peuvent entraîner une contamination biologique et chimique des nappes phréatiques.



a) Latrine publique dans l'arrondissement 6 (Sandogo) de la CVO



b) Points de défécation à l'air libre dans l'arrondissement 4 (Tanghin) de la CVO

Figure III-7 : Illustration d'une gestion inadéquate des installations sanitaires dans la CVO

III.2.3. Menaces de pollution en zone péri-urbaine

En périphérie urbaine, la pollution est majoritairement liée aux pratiques agricoles et à l'absence d'un système structuré de gestion des déchets.

- Agriculture : l'utilisation excessive de fertilisants et de pesticides dans l'agriculture peut entraîner le lessivage de ces substances vers les nappes phréatiques, surtout dans les sols perméables (voir Figure III-2). Ce phénomène est aggravé par l'absence de pratiques de gestion durable des sols et de protection des zones de captage.

- Gestion des Déchets : le manque de services d'enlèvement des ordures dans les périphériques conduit à l'abandon des déchets solides et organiques à proximité des concessions et des puits (voir Figure III-3). Cette proximité favorise la migration de contaminants chimiques et microbiologiques dans les eaux de boisson.

III.3. Analyse des Risques Hydrochimiques

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des principales sources potentielles de pollution, des polluants associés et de leurs effets sur la qualité des eaux souterraines dans la zone d'étude.

Tableau III-1 : analyse des risques hydrochimiques

Source de pollution	Polluants potentiels	Effets sur les eaux souterraines
Agriculture intensive (rizières, maraîchage)	Nitrates, phosphates, pesticides	Eutrophisation, pollution chronique, toxicité pour la faune microbienne
Garages, ateliers mécaniques, Sites essence	Hydrocarbures, huiles usées, métaux lourds	Contamination chimique, altération des propriétés physico-chimiques de l'eau
Déchets solides, plastiques, ordures ménagères	Lixiviats, microplastiques, PCB	Pollution persistante, dégradation des sols et de la recharge des nappes
Élevage et abattage d'animaux	Nitrates, charges organiques, pathogènes	Contamination biologique, risques sanitaires élevés pour les populations

III.4. Mesures de prevention et d'attenuation

Face aux risques de pollution identifiés dans la Ceinture Verte de Ouagadougou (CVO), il est essentiel de mettre en œuvre un ensemble cohérent de mesures préventives et curatives, afin de préserver la qualité des eaux souterraines et de garantir une gestion durable de cette ressource stratégique. Ces mesures s'articulent autour de trois axes principaux : la gouvernance environnementale, les bonnes pratiques territoriales et la sensibilisation communautaire.

1. Renforcement de la gouvernance et du cadre réglementaire

- Renforcer l'application des textes existants sur la gestion des déchets solides et liquides (ex. : décret n° 98-323/PRES/PM/MATS/MIHU/MS/MTT du 28 juillet 1998 sur les déchets urbains) ;
- Intégrer systématiquement la protection des ressources en eau dans les documents de planification urbaine et environnementale ;
- Instituer un zonage hydroprotecteur dans la CVO interdisant certaines activités à risque autour des points d'eau et dans les zones d'infiltration ;
- Établir un système de suivi qualité des eaux souterraines couplé aux stations piézométriques pour un monitoring en temps réel.

2. Promotion de pratiques agroécologiques et de gestion intégrée

- Promouvoir l'**agriculture durable et écologique** : utilisation raisonnée des intrants, compostage, lutte intégrée contre les ravageurs, cultures adaptées ;
- Interdire l'usage des pesticides et engrais chimiques à proximité immédiate des puits et forages ;
- Développer des **zones tampons végétalisées** entre les périmètres maraîchers et les points de captage pour limiter les écoulements polluants.

3. Amélioration de la gestion des déchets et du cadre bâti

- Éliminer les **décharges sauvages** par la mise en place de centres de tri communautaires et de points de collecte formels.
- Contrôler l'implantation des **activités artisanales** et industrielles à proximité des ouvrages hydrauliques : obligation de confinement et de traitement des effluents ;
- Mettre en œuvre un **programme de réhabilitation des sols dégradés**, notamment par la reforestation, l'aménagement de drains écologiques, et la stabilisation des berges.

4. Sensibilisation, éducation environnementale et implication communautaire

- Lancer des **campagnes de sensibilisation** auprès des agriculteurs, artisans, ménages et scolaires sur les risques de pollution et les bonnes pratiques de gestion des ressources en eau ;
- Renforcer la **participation des communautés locales**.

BIBLIOGRAPHIE

- 5-RGPH, 2002. Résultats cinquième recensement général de la population et de l'habitation Monographie de la commune de Ouagadougou.
- ACID, 2024a. Etude pédologique et cartographique de la ceinture verte de la ville de Ouagadougou.
- ACID, 2024b. Etude socioéconomique de la ceinture verte de Ouagadougou.
- Al-Djazouli, M.O., Elmorabiti, K., Rahimi, A., Amellah, O., Fadil, O.A.M., 2021. Delineating of groundwater potential zones based on remote sensing, GIS and analytical hierarchical process: a case of Waddai, eastern Chad. *GeoJournal* 86, 1881–1894. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10160-0>
- Amadou, H., Laouali, M.S., Manzola, A.A., 2014. Caractérisation hydro chimique des eaux souterraines de la region de Tahoua (Niger. *J. Appl. Biosci.* 7161–7172.
- Assemian, E.A., Koffi, A.K., 2023. Cartographie des zones d'accessibilité et d'exploitabilité en eau souterraine par SIG dans le département de Yamoussoukro, Centre-Sud de la Côte d'Ivoire.
- Barro, L.F., 2024. Diagnostic évolutif de la ceinture verte de Ouagadougou.
- BUGEGO, 2023. Projet épanouissement socio-économique des populations vulnérables au sahel (ESEPVS-sahel) ; schéma directeur d'approvisionnement en eau potable des communes de Dori, Falangountou et Gorom - Gorom (SDAEP) — phase 1.
- C. CASTAING, M. BILLA, J.P. MILESI, D. THIEBLEMONT, J. LE METOUR, E. EGAL, C. GUERROT, A. COCHERIE, P. CHEVREMONT, M., M. TEGYEY, Y. ITARD (BRGM), B. ZIDA, I. OUEDRAOGO, S. KOTE, B.E. KABORE, C. OUEDRAOGO (BUMIGEB), J.C. KI, C. ZUNINO (ANTEA), 2003. Notice explicative de la Carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1 000 000.
- CAMARA, S.F., 2017. Evaluation de la vulnérabilité a la pollution des eaux souterraines du district de Chaoyang, Ceijing, Chine.
- Camara, S.F., 2017. Evaluation de la vulnerabilite a la pollution des eaux souterraines du district de chaoyang, beijing, chine.
- Compaore, G., 1997. Evaluation de la fonction capacitive des altérités: site expérimental de Sanon (Burkina Faso): socle granito-gneissique sous climat de type Soudano-Sahélien. Avignon.
- Coulibaly, A.A., 2021. Contribution à l'élaboration d'un plan de restauration de la ceinture verte de Ouagadougou.
- Courtois, N., Lachassagne, P., Wyns, R., Blanchin, R., Bougaïré, F.D., Somé, S., Tapsoba, A., 2010. Large-Scale Mapping of Hard-Rock Aquifer Properties Applied to Burkina Faso. *Groundwater* 48, 269–283. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00620.x>
- de Vries, J.J., Simmers, I., 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol. J.* 10, 5–17. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>
- Dende L, Z., 2022. Évaluation de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de la rivière Houet recevant les eaux de la STEP et leur aptitude d'usage a l'irrigation d'appoint en saison pluvieuse : cas du site maraicher de Dogona à Bobo-Dioulasso.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.-C., Krishnamurthy, N.S., 2006. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *J. Hydrol.* 330, 260–284.
- Didi, S., 2018. Reconnaissance hydro-géophysique et structurale de la zone Nord-Est du bassin sédimentaire du Tadla et étude de la vulnérabilité à la pollution intrinsèque de la nappe phréatique.
- Faillat, J.-P., 1987. Aquifères fissurés en zone tropicale humide: structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest).

- GOUGO, A.K., 2016. Etude de la vulnérabilité à la pollution agricole de l'aquifère alluvial de Karfiguela (Banfora, Burkina Faso).
- Gougo, A.K., 2016. Etude de la vulnérabilité à la pollution agricole de l'aquifère alluvial de Karfiguela (Banfora, Burkina Faso).
- Haouchine, A., Abderrahmane, B., Haouchine, F.Z., Nedjaï, R., 2010. Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride. *EUROJOURNALS* 45, 1.
- Healy, R.W., 2010. Estimating groundwater recharge. Cambridge university press.
- Hillel, D., Braimoh, A.K., Vlek, P.L., 2008. Soil degradation under irrigation, in: *Land Use and Soil Resources*. Springer, pp. 101–119.
- Leduc, C., Beji, R., Calvez, R., 2003. Les ressources en eau du barrage d'el Haouareb et des nappes adjacentes, vallée du Mergellil, Tunisie centrale, in: *Atelier Du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) Sur La Gestion Intégrée de l'Eau Au Sein d'un Bassin Versant*. Cirad-IRD-Cemagref, pp. 7-p.
- Lentswe, G.B., Molwalefhe, L., 2020. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 28, 100674. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100674>
- Lerner, D.N., 2002. Identifying and quantifying urban recharge: a review. *Hydrogeol. J.* 10, 143–152. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0177-1>
- Lerner, D.N., 1990. Groundwater recharge in urban areas. *Atmospheric Environ. Part B Urban Atmosphere* 24, 29–33.
- Lia, D., Ana, C.T., José, A.G., Antonion, J., Guerner, D., Jorge, E.M., 2014. Assessing Groundwater Vulnerability to Pollution through the DRASTIC Method A GIS Open Source Application. *Int. Publ. Switz.* 4, 386–400.
- Machard, H., 2017. AMELIORATION DE LA CONNAISSANCE ET DE LA GESTION DES EAUX AU BURKINA FASO (Rapport définitif).
- Mboudou, G.E., Bon, A.F., Bineli, E., Ntep, F., Ombolo, A., 2017. Caractérisation de la Productivité des Aquifères du Socle de la Région de l'extrême Nord, Cameroun. *J. Cameroon Acad. Sci.* 14, 25–38.
- Mbuluyo, M., Mashauri, F., M'putu, P., 2017. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe souterraine d'Isiro (Nord-est de la RD Congo) à partir de la méthode DRASTIC. *Afr. Sci.* 13, 125–139.
- NOBA, W.G., 2018. Cartographie de la vulnérabilité liée à la ressource en eau dans le sous-bassin de la Nouhao (Burkina Faso).
- Oeudraogo, D.B., Delwendé, I.K., Gnankambary, Z., Belém, B., 2019. Analyse des contraintes et des opportunités de l'agriculture urbaine dans la ceinture verte de Ouagadougou, Burkina Faso. *Agric. For. Pêche*.
- Ouandaogo/Yameogo, S., 2008. Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso qualité et vulnérabilité.
- Ouandaogo-Yameogo, S., 2008. Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso, qualité et vulnérabilité (Thèse de doctorat). Avignon.
- Ouandaogo-Yameogo, S., Blavoux, B., Nikiema, J., Savadogo, A.N., 2013. Caractérisation du fonctionnement des aquifères de socle dans la région de Ouagadougou à partir d'une étude de la qualité chimique des eaux. *Rev. Sci. L'eau* 26, 173–191.
- Patel, P.M., Saha, D., Shah, T., 2020. Sustainability of groundwater through community-driven distributed recharge: An analysis of arguments for water scarce regions of semi-arid India. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 29, 100680.
- Poromna, H., Gado, A.R., Messanh, K.D., Gnandi, K., Ameyapoh, Y., 2022. Evaluation de la Vulnérabilité des Nappes Phréatiques à la Pollution engendrée par la Mauvaise Gestion des boues de Vidange ans la Ville d'Aného au Togo. *Eur. Sci. J. ESJ* 18.

- PSAGEV, 2022. Plan stratégique d'aménagement et de gestion des espaces verts de la commune de Ouagadougou.
- Saaty, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. J. Math. Psychol. 15, 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T.L., Vargas, L.G., 1980. Hierarchical analysis of behavior in competition: Prediction in chess. Behav. Sci. 25, 180–191. <https://doi.org/10.1002/bs.3830250303>
- Sana, A., 2001. Contribution à l'élaboration d'un plan de restauration de la ceinture verte de Ouagadougou.
- Savado, N., 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta: Etude régionale du bassin versant de la Sissili (PhD Thesis). Université scientifique et médicale de Grenoble.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeol. J. 10, 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>
- Serghini, A., Fekhaoui, M., El Abidi, A., El Blidi, S., Akkane, B., 2010. Caractérisation hydrochimique d'un site Ramsar : le complexe zones humides de Mohammedia (Maroc). Bull. L'Institut Sci. Rabat Sect. Sci. Vie 2.
- Sophocleous, M., 2004. Groundwater recharge. EOLSS Publishers Groundwater, UNESCO.
- Yao, K.A., Kouassi, A.M., Koffi, Y.B., Biemi, J., 2010. Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire). J. Environ. Hydrol. 18, 1–15.
- Youan, T.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).

1 Notice explicative, carte de synthèse géologique, structurale et des substances minérales du Burkina Faso à l'échelle 1/1 000 000, (2018)

ANNEXES

ANNEXE 1 : TDR DE L'ÉTUDE



Cahier des charges de l'étude hydrogéologique et hydrologique de la Ceinture Verte.

Référence : OUA 2169552

Cahier des charges de l'étude hydrogéologique et hydrologique de la Ceinture Verte OUA 219552

1

CONTEXTE ET JUSTIFICATION

La ceinture verte de Ouagadougou, une initiative écologique au Burkina Faso, a été pratiquement abandonnée mais connaît un renouveau depuis 2018. Elle joue un rôle crucial dans la protection de la capitale contre les effets néfastes de la désertification et de la dégradation environnementale.

La ceinture verte de Ouagadougou a été lancée en 1976 dans le but de protéger la ville du vent, de l'érosion et de la poussière. Elle agit comme un bouclier écologique grâce au reboisement et à la préservation des milieux naturels. Elle offre un espace de cultures maraîchères et permet aux femmes de subvenir à leurs besoins sans mendier. Les arbres et les cultures contribuent à la régulation du climat, à la protection des sols et à la biodiversité.

Face à la désertification, la ceinture verte est un outil précieux pour la ville. Cependant, elle doit faire face aux implantations informelles et aux défis sécuritaires. La ceinture verte de Ouagadougou est un projet d'envergure où l'eau et la végétation sont des atouts essentiels. Plus qu'un projet de reboisement, elle incarne la résilience, la paix et le développement durable pour la capitale burkinabè.

Dans cette perspective, le Ministère de l'environnement, de l'eau et de l'assainissement, envisage d'améliorer sa ceinture verte dans le but de promouvoir la durabilité environnementale et améliorer la qualité de vie des populations. Cependant, la gestion efficace de l'eau pour ce projet est entravée par une connaissance insuffisante des ressources en eau souterraine et de surface.

Dans le cadre de l'aménagement de la ceinture verte, le MEEA bénéficie de l'accompagnement de l'Ambassade des PaysBas au Burkina Faso pour soutenir une étude hydrologique et hydrogéologique afin de combler cette lacune de connaissances, essentielle à la planification et à la mise en œuvre efficaces des aménagements projetés.

OBJECTIFS GLOBAL ET SPECIFIQUE DE LA MISSION

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les ressources en eau souterraine et de surface dans la zone de la ceinture verte de Ouagadougou afin de guider les efforts d'aménagement et de gestion durable de cette zone.

Plus spécifiquement cette étude vise à :

- évaluer le potentiel hydrogéologique et les risques de pollution des aquifères de la ceinture verte ;

- évaluer le potentiel en eau de surface de la ceinture verte ;
- proposer des options d'aménagements assorti d'un plan de gestion des ressources en eau (PGRE).

RESULTAT ATTENDUS

Aux termes de l'étude, les résultats suivants sont escomptés :

- Le potentiel hydrogéologique et les risques de pollution des aquifères de la ceinture sont connus ;
- Le potentiel en eau de surface de la ceinture verte est connu ;
- Des propositions d'aménagements assorties d'un plan de gestion des ressources en eau (PGRE) est proposé.

METHODOLOGIE

Les consultants travailleront sous la supervision directe d'un groupe de travail auquel il rendra compte régulièrement de l'exécution de leur mandat. La supervision générale sera assurée par la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE). L'étude est scindée en trois composantes et chaque composante fera l'objet d'un livrable intermédiaire validé par le groupe de travail et remis à la DGRE. La validation finale de l'étude sera faite par l'équipe de supervision de la DGRE. Au terme de son mandat, le consultant devra restituer à la DGRE tous les documents qui lui auront été remis pour les besoins de l'étude.

Pour chaque rapport finalisé, le consultant devra transmettre une copie électronique en français plus un résumé en anglais de trois (3) pages maximum au bailleur de fonds, l'Ambassade des Pays Bas au Burkina.

La méthodologie sommaire adoptée pour chacune des composantes est la suivante :

4.1. Evaluer le potentiel hydrogéologique et les risques de pollution des aquifères de la ceinture verte

La méthodologie pour cette composante consistera à :

- réaliser une revue de littérature présentant une synthèse de l'ensemble des études géologiques et hydrogéologiques conduites dans la ceinture verte ;
- caractériser la géologie structurale et l'ensemble des discontinuités majeures présentes dans la zone ;
- cartographier l'ensemble des ouvrages hydrogéologiques en se focalisant sur ceux présentant de très bons débits ;
- caractériser les propriétés hydrodynamiques des aquifères ;
- réaliser des travaux géophysiques sur le terrain pour la validation des structures cartographiées par les méthodes interprétatives ;
- proposer un modèle hydrogéologique de la zone en mettant en exergue le sens d'écoulement des eaux souterraines, les différents mécanismes de la recharge, les zones de recharge et de décharge.
- cartographier les potentialités aquifères ;
- proposer une cartographie hydrogéologique ;
- proposer une cartographie des sites favorables pour l'implantation de forages positifs ;
- évaluer la qualité de l'eau souterraine et les risques de pollution des aquifères de la ceinture verte.

4.2. Evaluer le potentiel de la ceinture verte en eau de surface

La démarche méthodologique consistera à :

- cartographier le réseau hydrographique de la ceinture verte ;
- caractériser le degré d'intermittence des cours d'eau ;
- évaluer les termes du bilan hydrologique ;
- présenter les sites potentiels à l'implantation des ouvrages de stockage d'eau de surface.

4.3. Proposer des options d'aménagement assorties d'un plan de gestion des ressources en eau (PGRE).

La méthodologie qui sera déroulée consistera à :

- évaluer les besoins en eau des usagers (maraichers, sylviculteurs, arboristes, pépiniéristes, etc.) ;
- caractériser l'évolution spatio-temporelle des besoins en eau des usagers ;
- mettre en place un modèle numérique intégrant les informations des objectifs précédents ;
- simuler les conditions prévisionnelles en fonction de l'évolution démographique croissante, le changement climatique, la réduction des zones préférentielles d'infiltration et l'augmentation des besoins en eau (irrigation, domestique, élevage, industriel) ;
- proposer des options d'aménagement de la ceinture verte ;
- effectuer une étude de scénarii de gestion de la ressource en faisant ressortir le scénario optimal et le scénario concerté : le scénario faisant le compromis entre la disponibilité des ressources en eau de la ceinture verte et l'évolution des besoins en eau à un horizon de cinquante (50) ans sera considéré comme optimal. Lorsque le scénario optimal est validé par tous les acteurs, il sera considéré comme le scénario concerté ; -proposer un schéma de protection des ressources en eau souterraine et de surface ; -proposer un dispositif de suivi de la ressource en eau.

MOBILISATION DES EXPERTS

Cette étude nécessitera la mobilisation des experts suivant :

5.1. Un expert international hydrogéologue sénior, chef de mission

Diplôme sollicité	BAC+5 en hydrogéologie au moins
Expériences professionnelles requises	<ul style="list-style-type: none"> - Au moins dix (10) ans d'expériences professionnelles dans la recherche ou dans la conduite d'études sur la connaissance des ressources en eau souterraine. - Justifier d'au moins cinq (5) ans d'expériences similaires ; - Avoir une expérience confirmée dans l'hydrogéologie du domaine de socle au Burkina ; - Avoir une bonne expérience dans l'interprétation des images satellitaires ; - Maitriser les outils de la géophysique ; - Disposé d'un diplôme de doctorat en hydrogéologie ou équivalent serait un atout - Parler et écrire couramment le Français. (niveau C1 au moins)

5.2. Un sociologue spécialisé

Diplôme sollicité	Diplôme Bac + 5 en sociologie	Taches
Expériences professionnelles requises	<ul style="list-style-type: none"> - Au moins dix (10) ans d'expériences professionnelles en sociologie ; - avoir une bonne connaissance des organisations sociales, des interactions sociales, des institutions et des structures qui influencent la société ; - Avoir une bonne connaissance en communication et la capacité à présenter des résultats de recherches à des publics variés ; - Justifier d'au moins trois (3) projets similaires 	<ul style="list-style-type: none"> - Coordonner les activités socio économiques ; - Assurer l'élaboration des fiches d'enquête ; - La supervision et la coordination des équipes d'enquêteurs ; - Analyser les dynamiques sociales et les interactions au sein de la population occupant la ceinture verte en particulier en ce qui concerne l'utilisation d'accès à l'eau ; - Analyser les pratiques et les coutumes culturelles liées à l'eau au niveau de la CVO - Analyser les conflits potentiels liés à l'eau

5.3. Expert en qualité de l'eau ;

Diplôme sollicité	BAC+5 en Hydrogéochimie ou en chimie de l'eau
Expériences professionnelles requises	<ul style="list-style-type: none"> - Au moins cinq (5) ans d'expériences professionnelles dans la recherche ou dans la conduite d'étude sur la qualité des eaux de surface ou souterraines. - Justifier d'au moins trois (3) projets similaires (études en hydrochimie) ; - Avoir une expérience confirmée dans l'hydrogéochimie ; - Avoir une bonne expérience dans l'interprétation des résultats d'analyse de l'eau ; - avoir des connaissances en pollution

5.4. Expert SIG/Téledétection ;

Diplôme sollicité	Diplôme Bac + 5 en SIG ou Ingénieur de l'eau ayant une spécialisation en SIG/Téledétection appliqué à l'hydrogéologie/Hydrologie
Expériences professionnelles requises	<ul style="list-style-type: none"> - Au moins sept (7) ans d'expériences professionnelles en SIG et téledétection - Avoir une bonne connaissance en SIG/ téledétection appliqué à l'hydrogéologie/Hydrologie/GIRE ; - Avoir au moins cinq (5) ans d'expériences professionnelles spécifiques en SIG et téledétection appliquée à l'hydrogéologie/hydrologie/GIRE ;

	-Une bonne expérience dans l'interprétation des images satellitaires pour cartographier les méga linéaments.
--	--

5.5.Expert environnementaliste

Diplôme sollicité	Diplôme Bac + 5 en environnement	
Expériences professionnelles requises	<ul style="list-style-type: none"> - Au moins cinq (5) ans d'expériences professionnelles en science environnementale ; - Avoir une bonne connaissance en aménagement forestier ; - Justifier d'au moins cinq (5) projets similaires en sauvegarde environnementale et aménagement forestier ; - Avoir une connaissance sur les sols 	<p>En plus de ce qui est proposé dans la méthodologie, l'expert environnementaliste est chargé de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Evaluer l'impact des aménagements sur l'environnement de la CVO et son emprise ; - Analyser les différentes zones environnementales de la CVO et proposer les activités appropriées, - Proposer des espèces végétales appropriées pour chaque scénario d'aménagement ; - Proposer le cadre de gestion environnementale et sociale.

5.6.Expert en Hydrologie/GIRE

Diplôme sollicité	Diplôme Bac + 5 en hydrologie GIRE
Expériences professionnelles requises	<ul style="list-style-type: none"> - Au moins cinq (5) ans d'expériences professionnelles dans les études hydrologiques et d'aménagements des bassins versants - Avoir une bonne maîtrise du diagnostic des réseaux hydrographiques ; - Avoir au moins cinq (5) études similaires en lien avec la connaissance des ressources en eau de surface.

CRITERES D'EVALUATION

Les offres seront évaluées en fonction des critères suivants :

- La qualité du personnel affecté à la mission (diplôme requis, expériences (générales et spécifiques))
- les capacités techniques à réaliser la prestation (compréhension des TDR, pertinence de l'approche méthodologique et cohérence du chronogramme)
- la démonstration d'expériences similaires (études similaires, expériences dans les travaux géophysiques) - la proposition financière (la plus compétitive)

LIVRABLES DE L'ETUDE

A l'issues de cette étude, les livrables suivants devront être fournis :

1.TACHES, LIVRABLES ET DELAIS	
Livrables	Délais
Rapport de démarrage (méthodologie d'exécution de la mission et plan de travail)	1 ^{er} mois
Rapport de l'évaluation du potentiel hydrogéologique et des risques de pollution des aquifères de la ceinture verte	6 ^{ème} mois
Rapport de l'évaluation du potentiel en eau de surface de la ceinture verte	7 ^{ème} mois
Rapport de la proposition d'aménagement assortie d'un plan de gestion des ressources en eau (PGRE)	8 ^{ème} mois
Rapport final de la consultance prenant en compte tous les livrables	9 ^{ème} mois

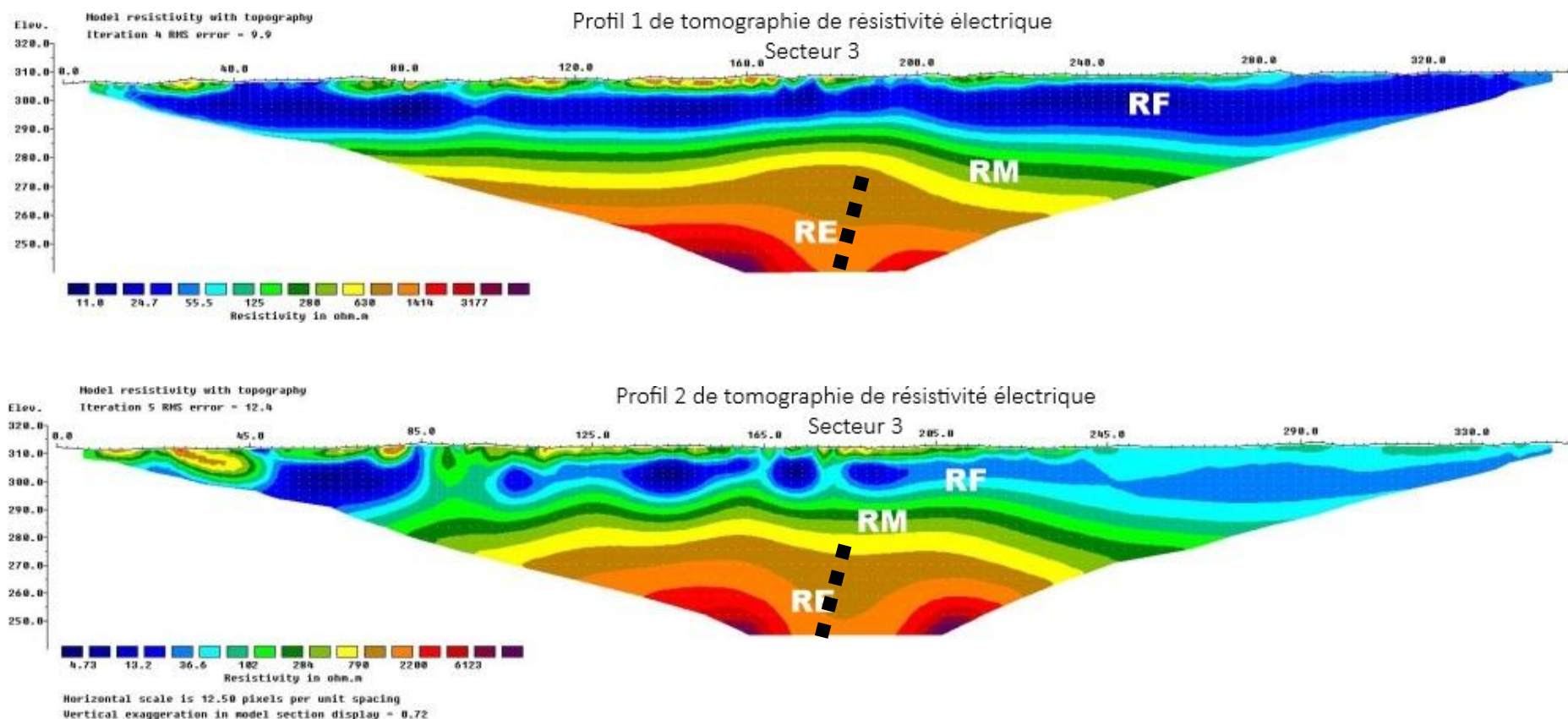
DUREE DE LA MISSION

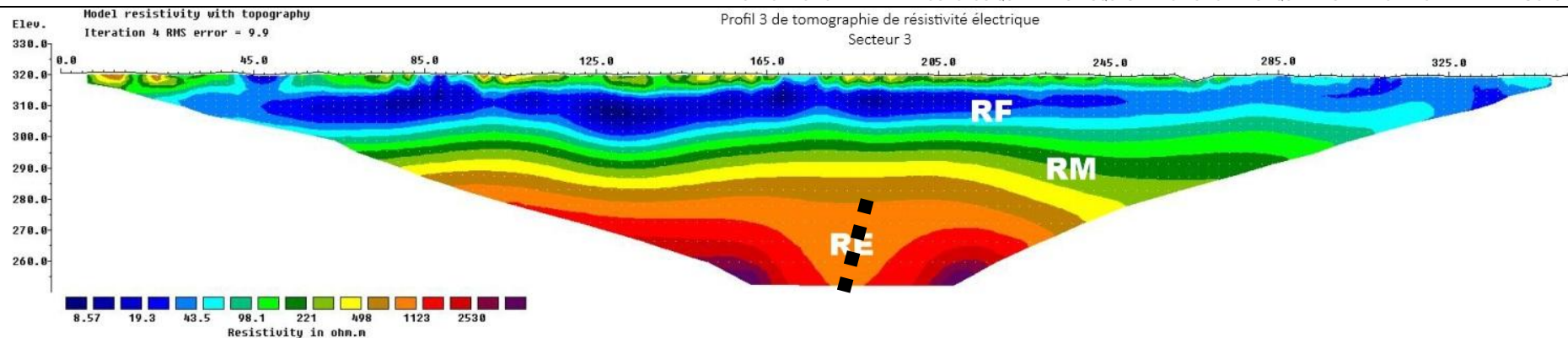
La durée de la prestation est fixée à neuf (9) mois, à compter de la date de démarrage de l'étude.

Toutefois, en cas de force majeure, cette durée peut être prolongée pour une durée maximale de trois mois supplémentaires. La prolongation sera accordée sur demande formelle de l'attributaire, devant être adressée à la mission au moins une (1) fois par mois et justifiée par des éléments probants liés à la situation.

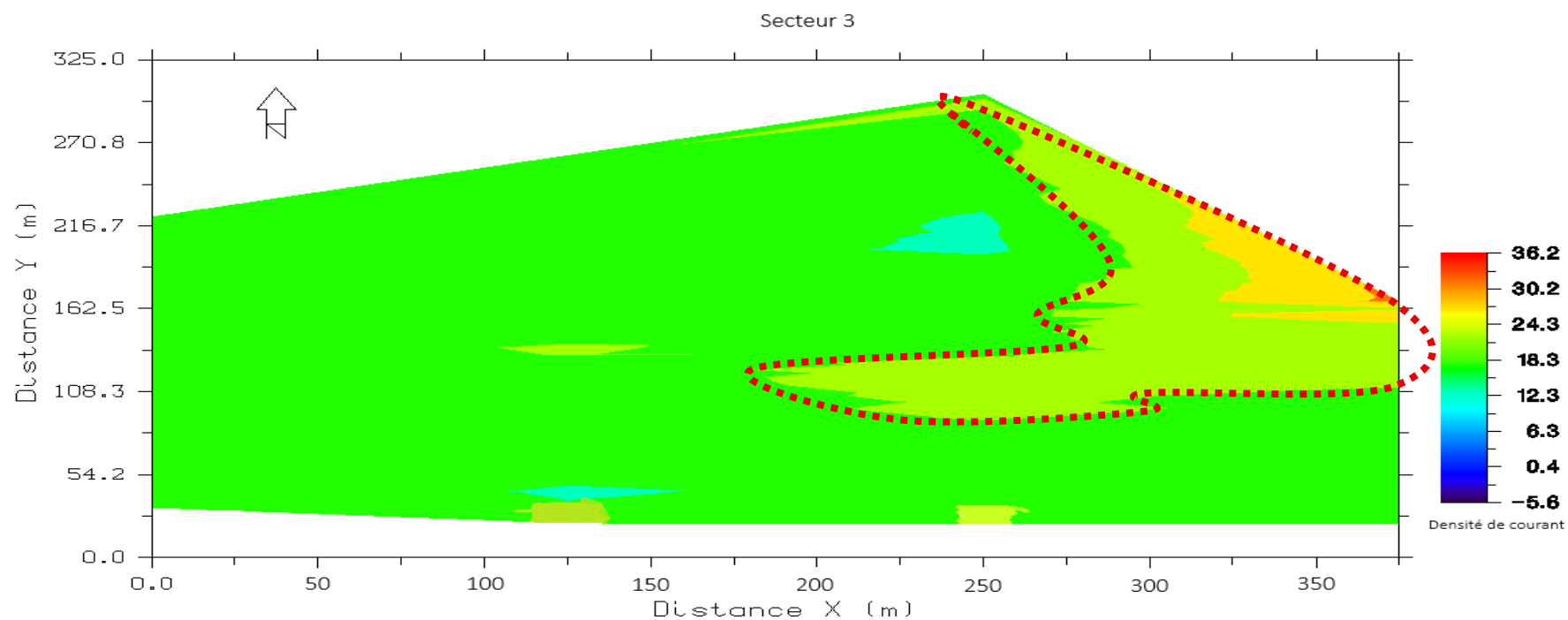
ANNEXE 2 : SECTIONS DE TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE, MODELES GEOLOGIQUES ET CARTE DE DISTRIBUTION DE CONDUCTIVITE DU SOUS-SOL

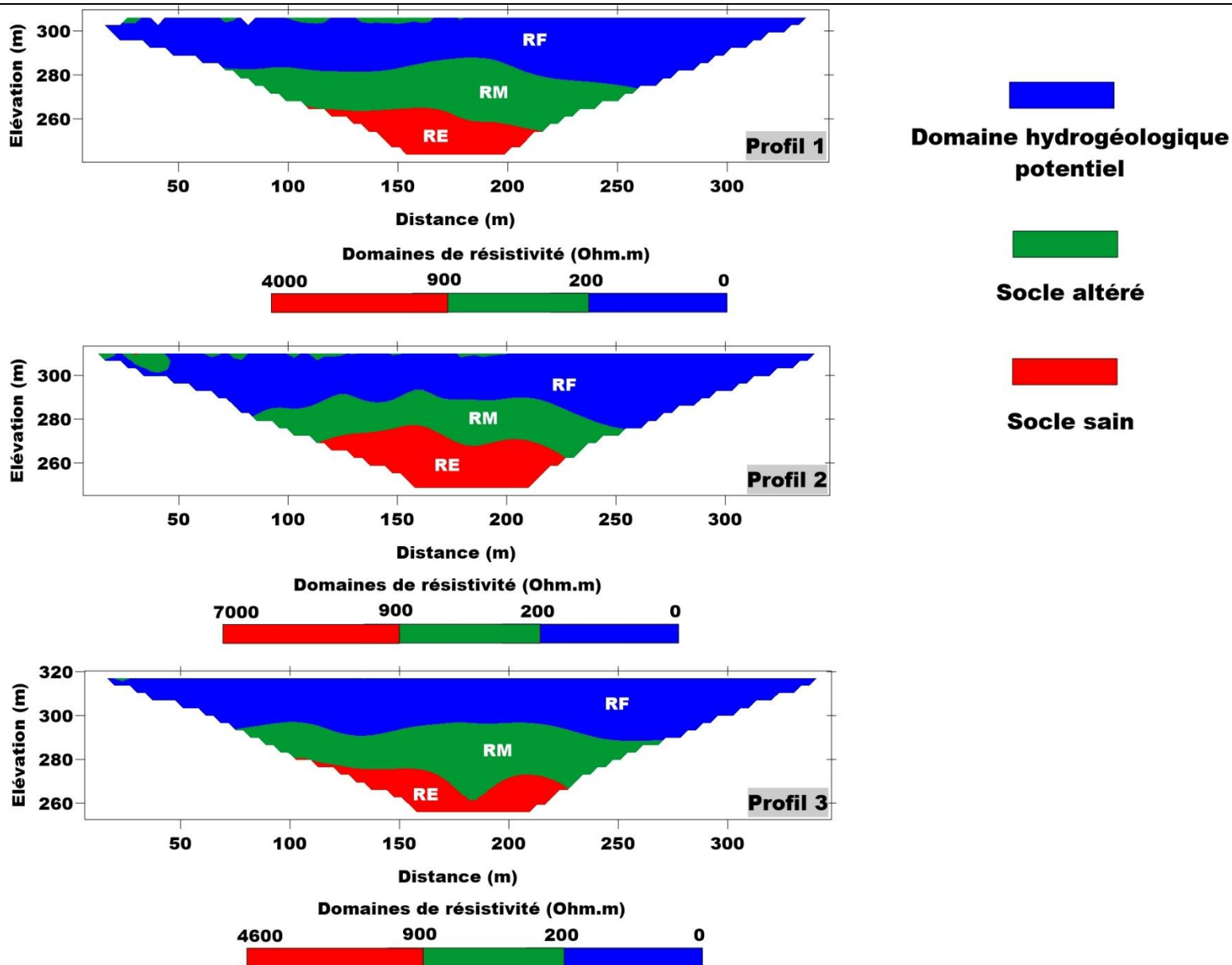
➤ Site de l'arrondissement 3



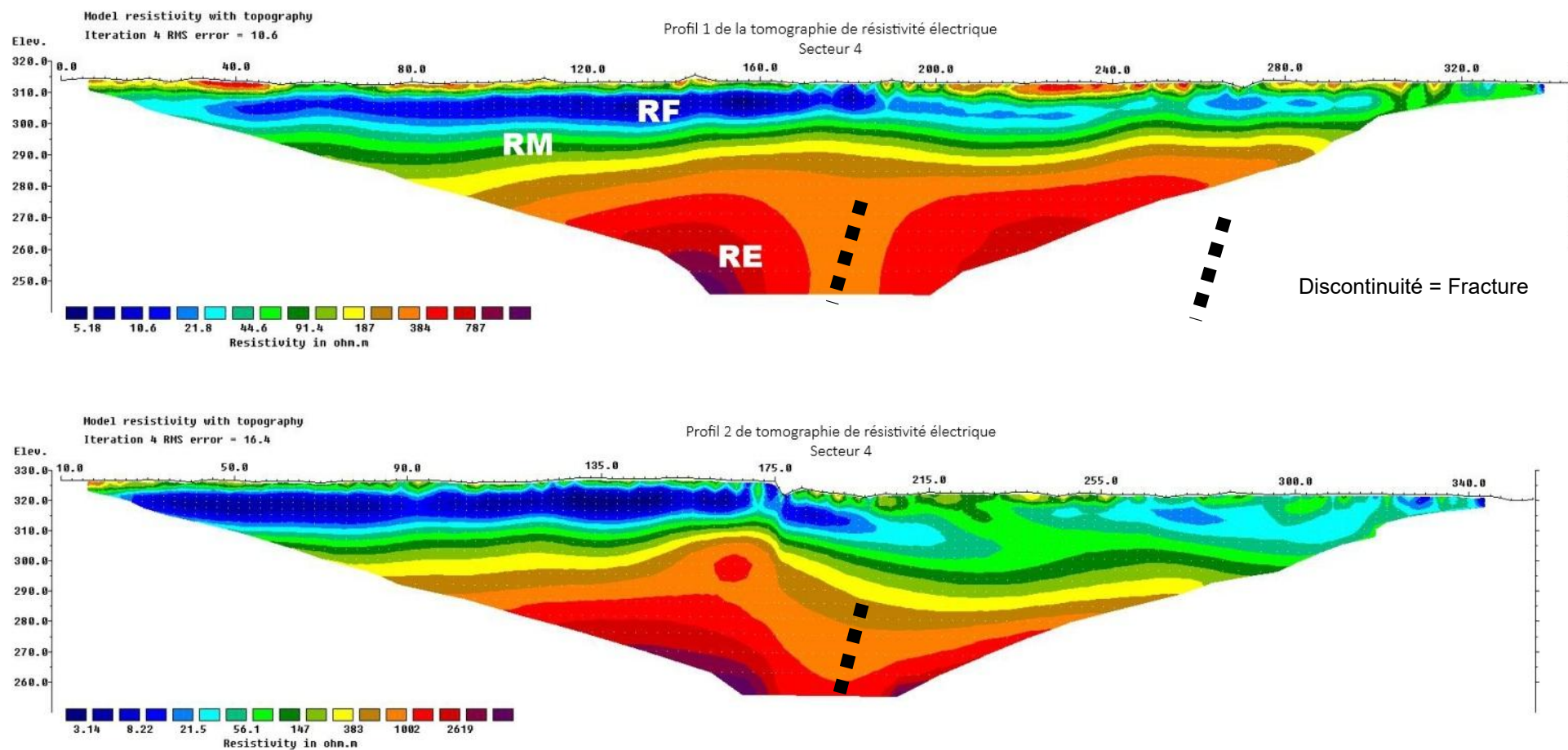


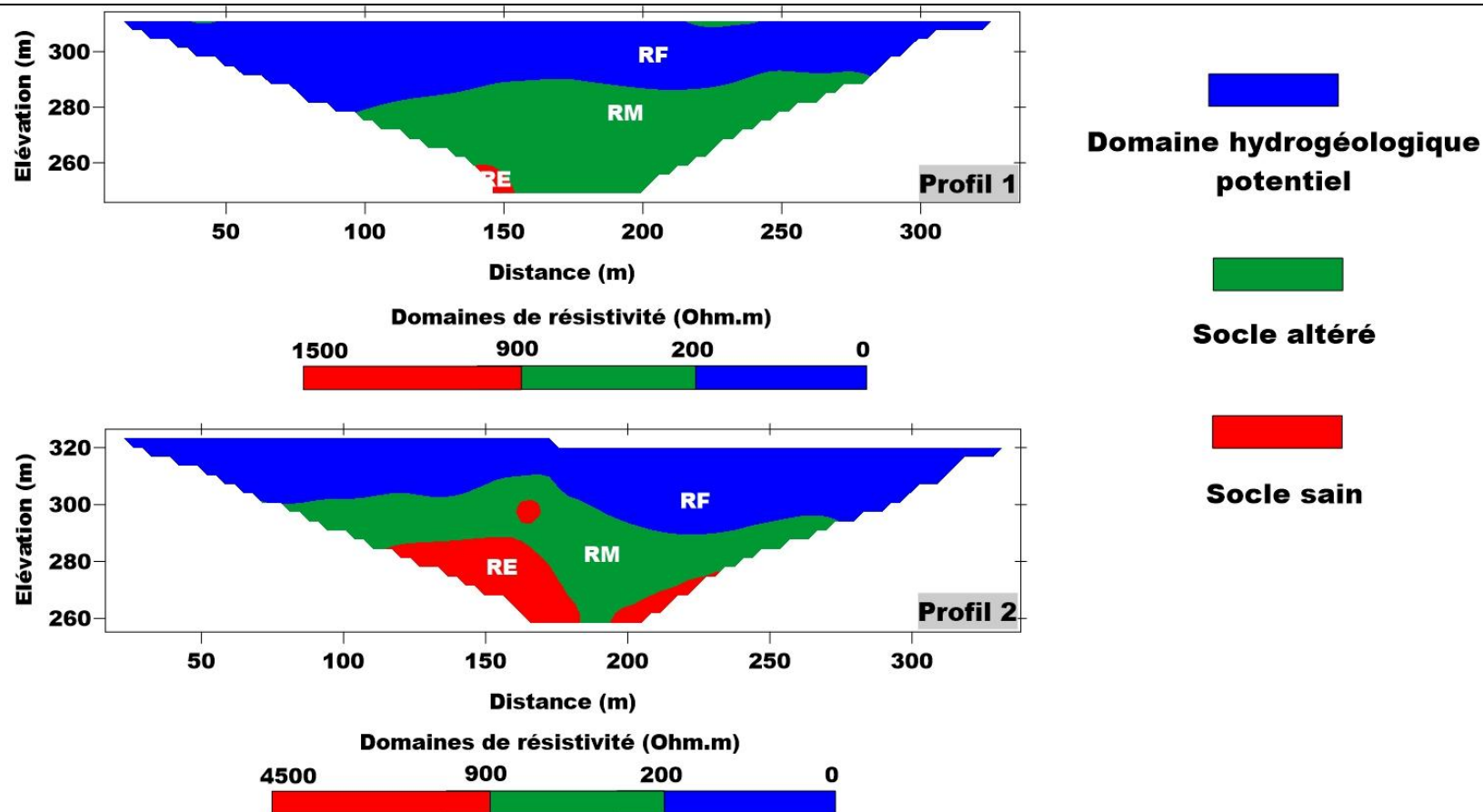
Carte de distribution de la conductivité du sous-sol





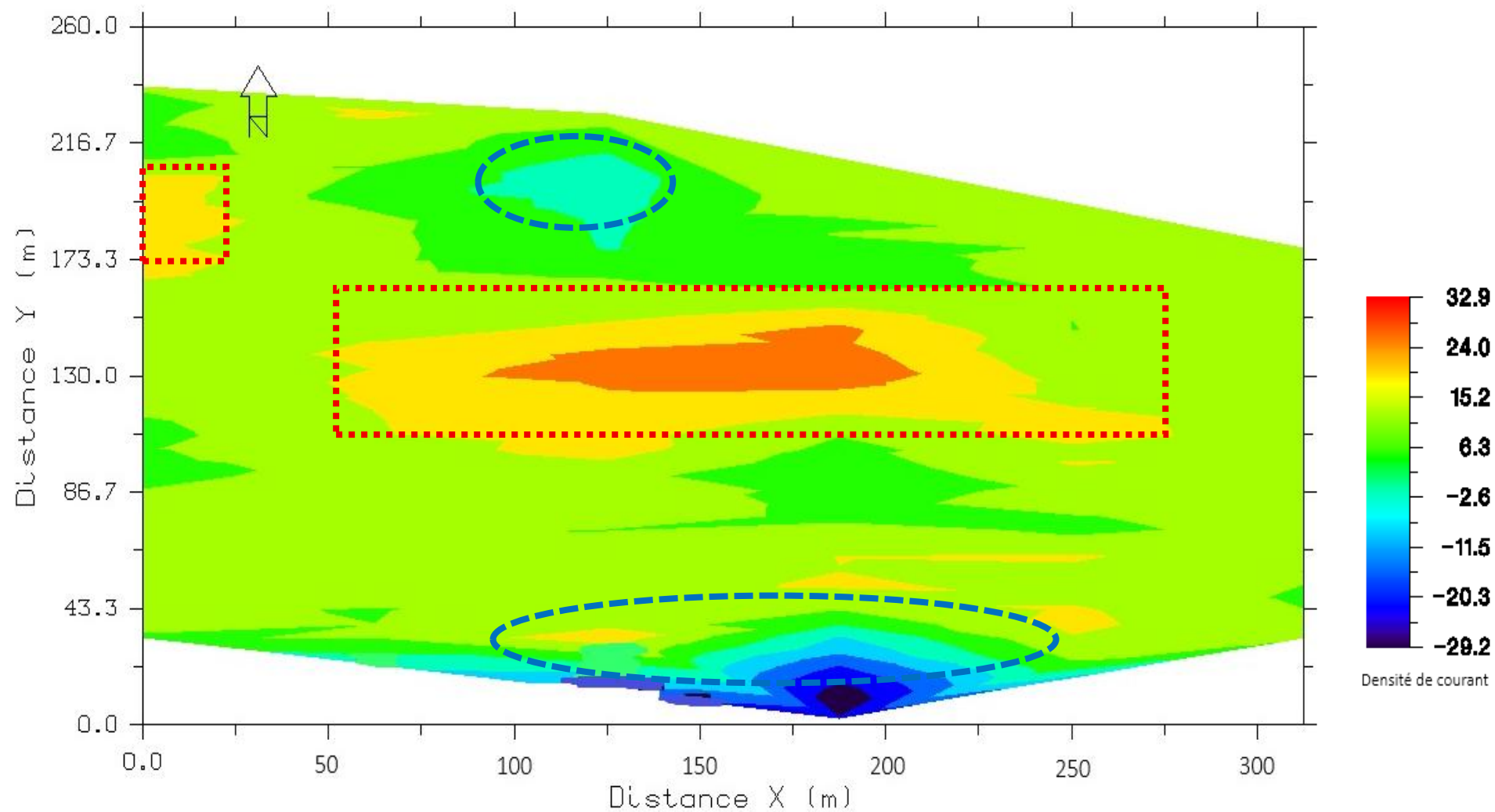
➤ Site de l'arrondissement 4



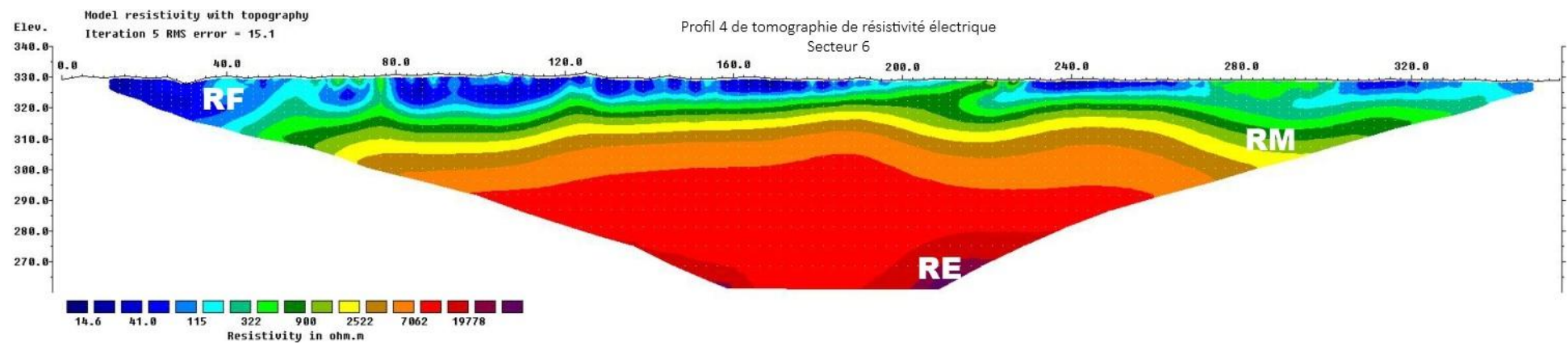
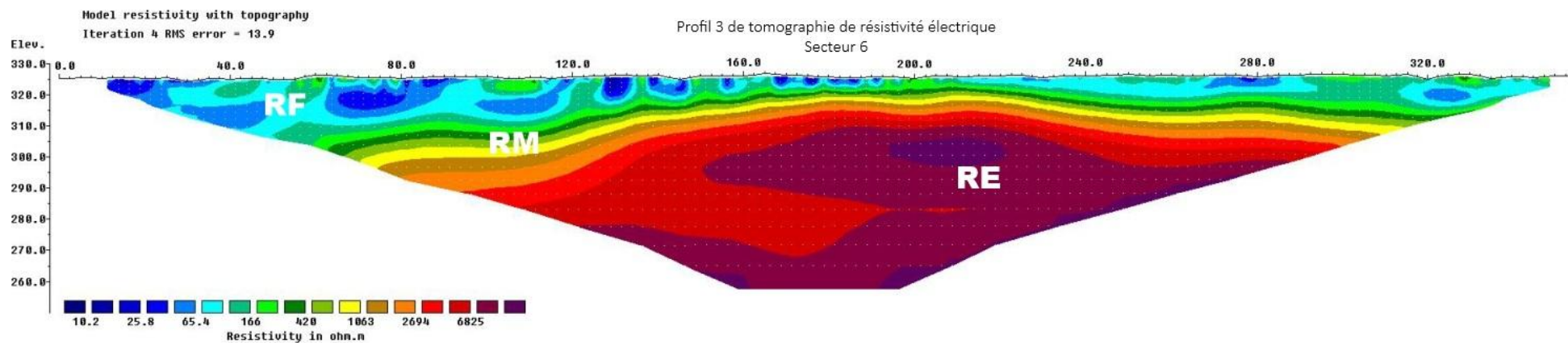


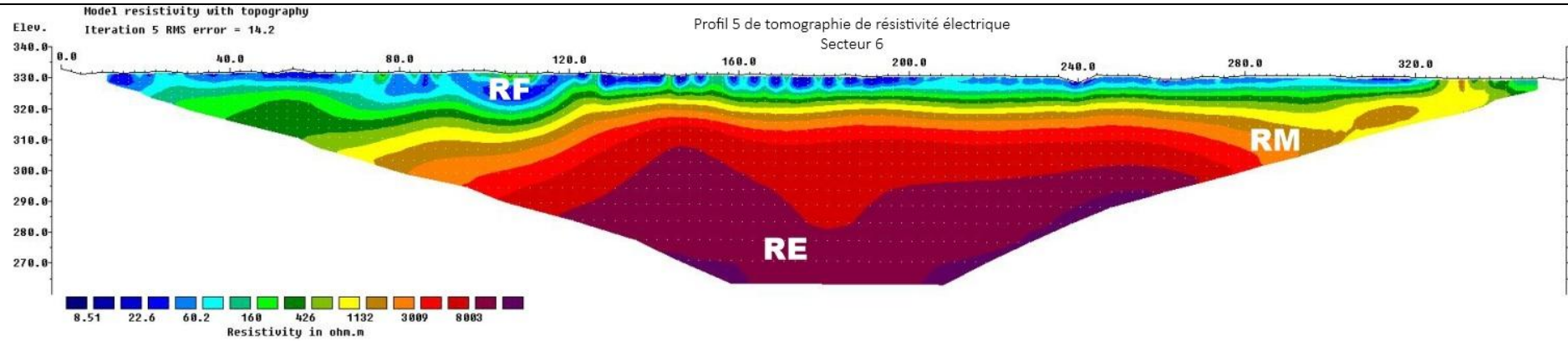
Carte de distribution de la conductivité du sous-sol

Secteur 4

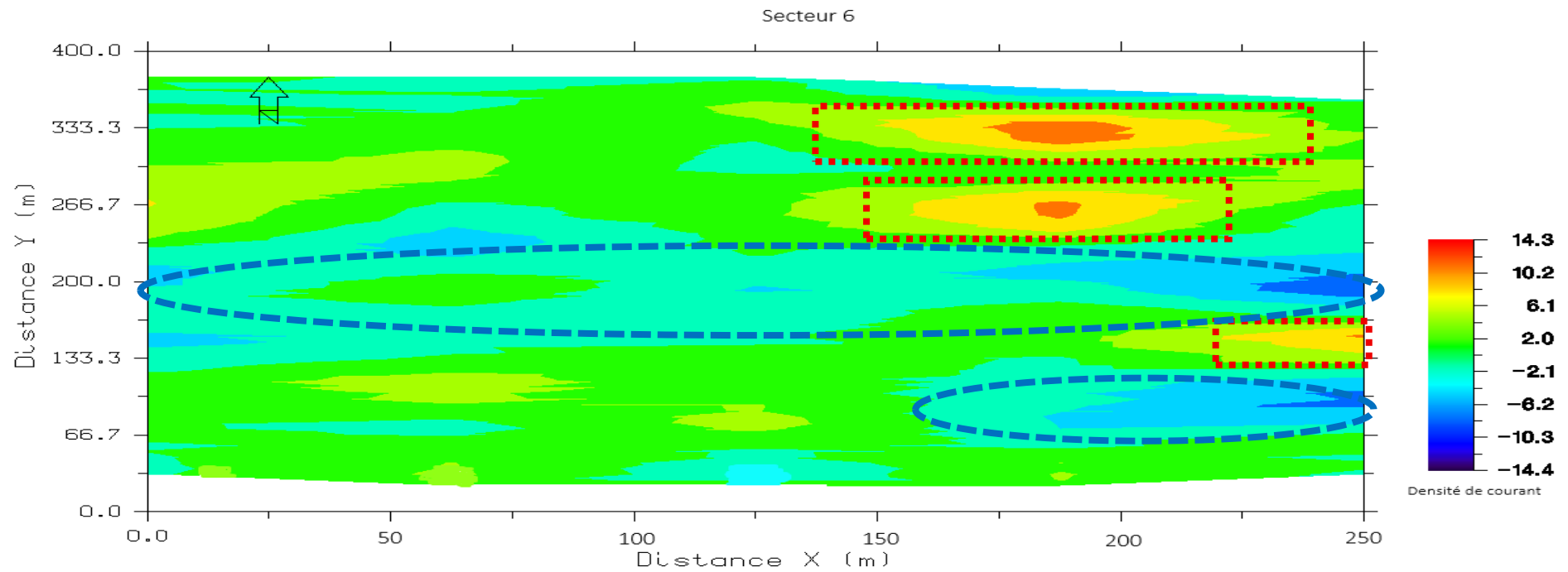


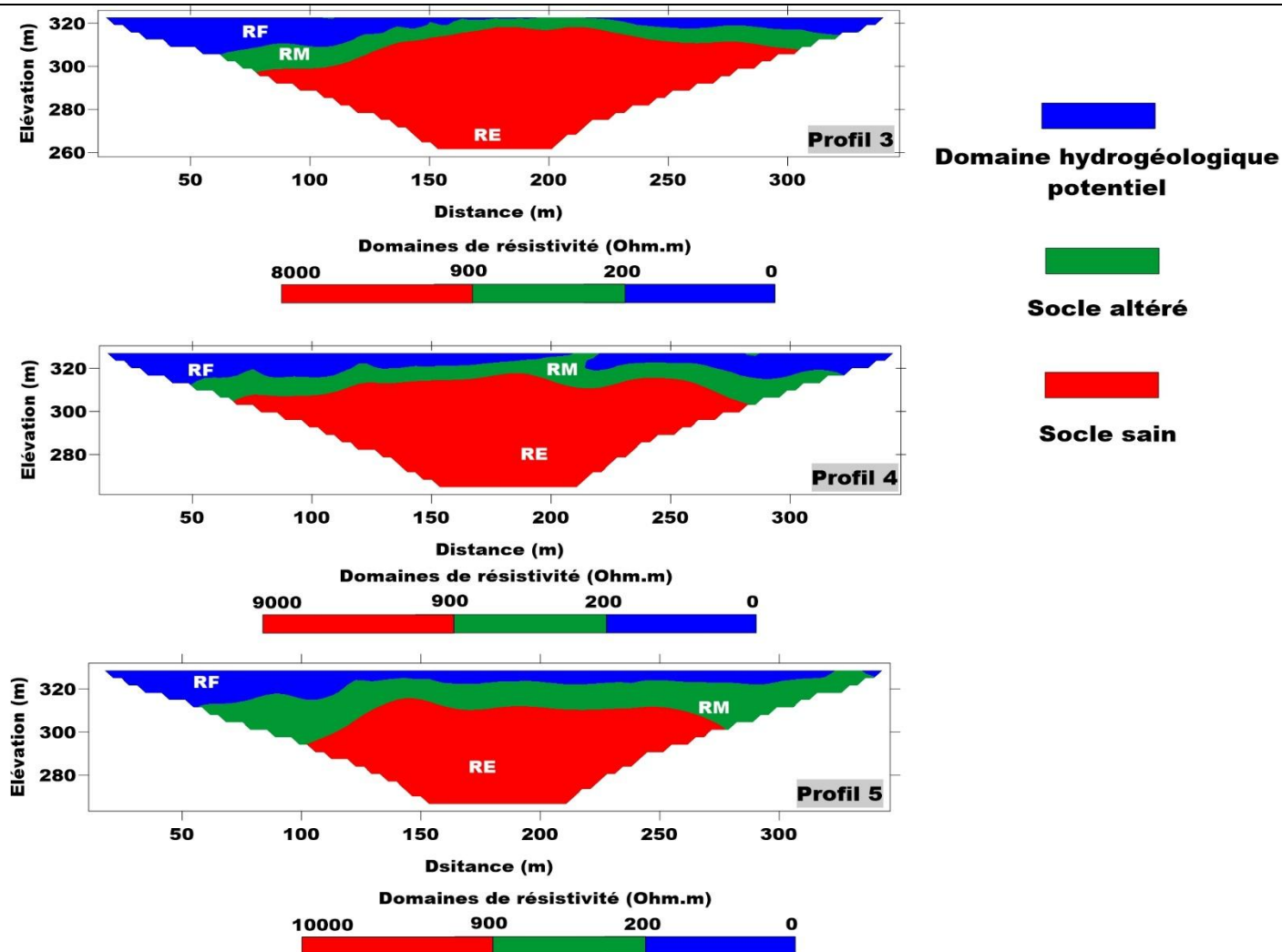
➤ Site de l'arrondissement 6



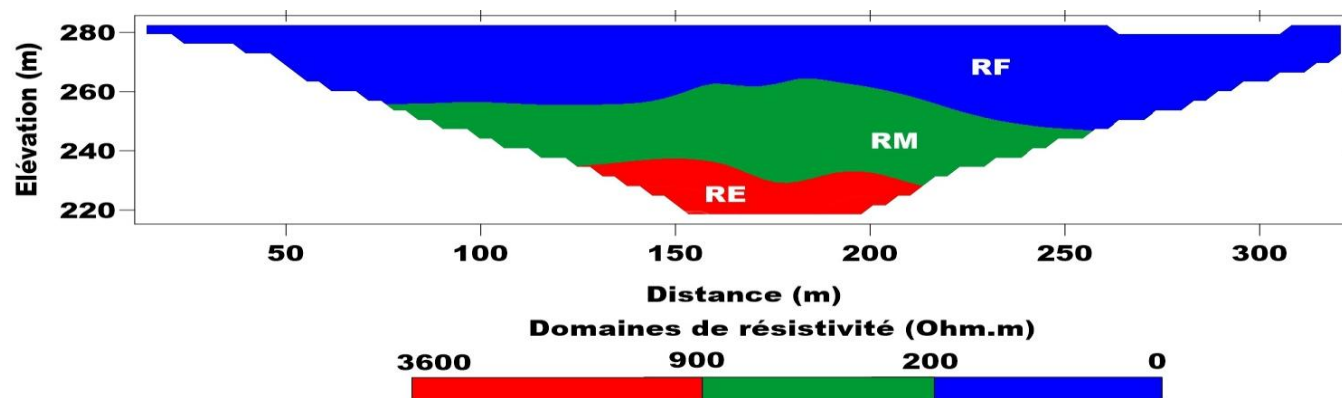
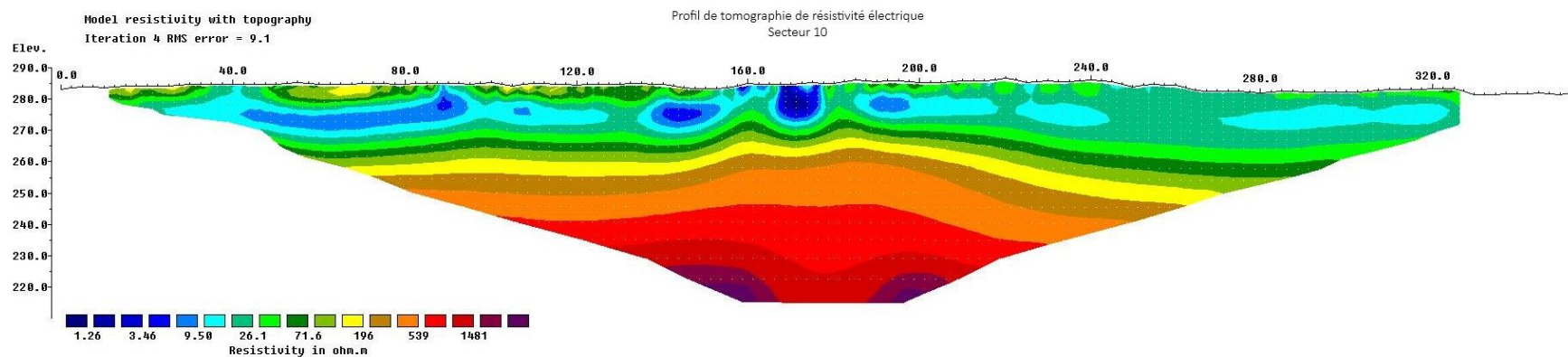


Carte de distribution de la conductivité du sous-sol

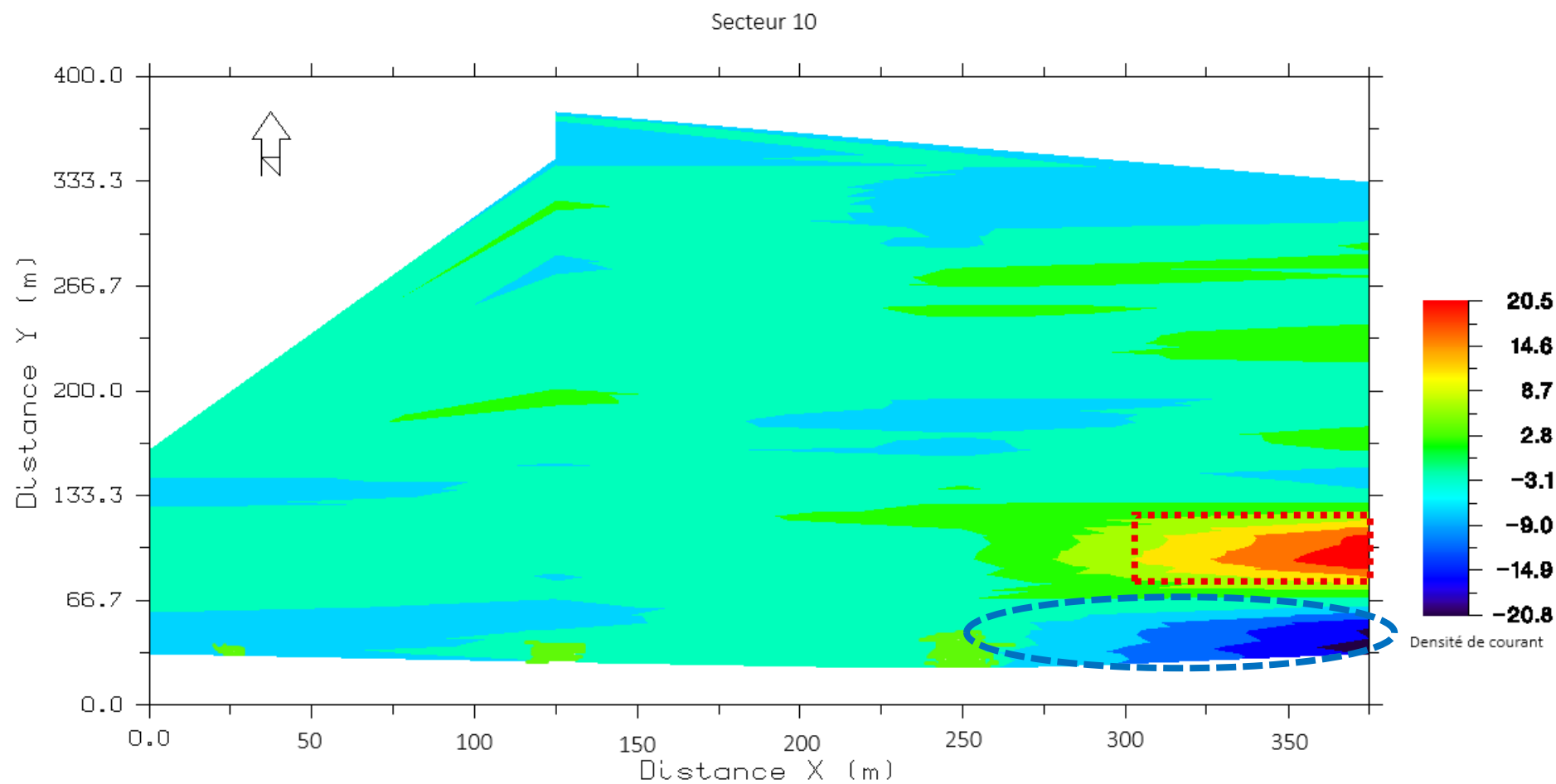




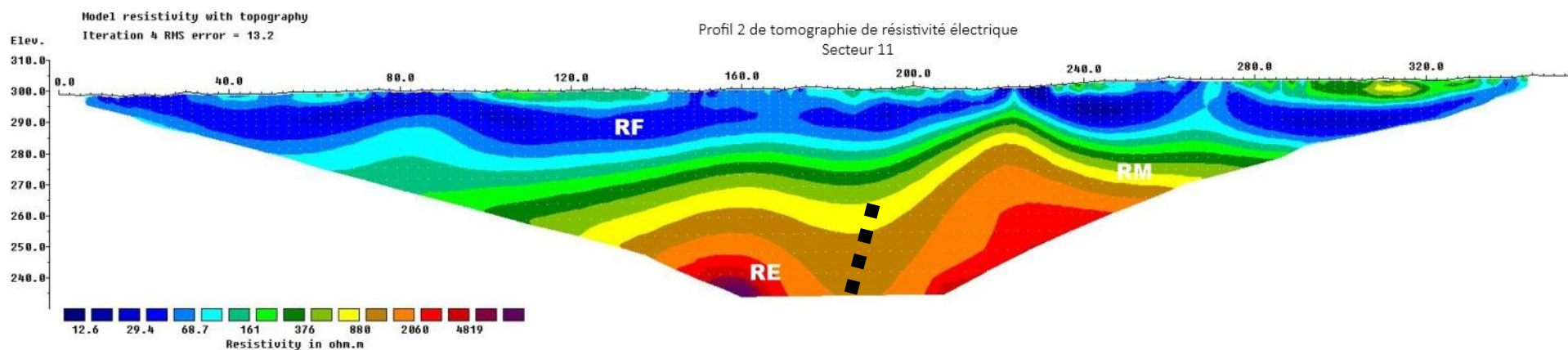
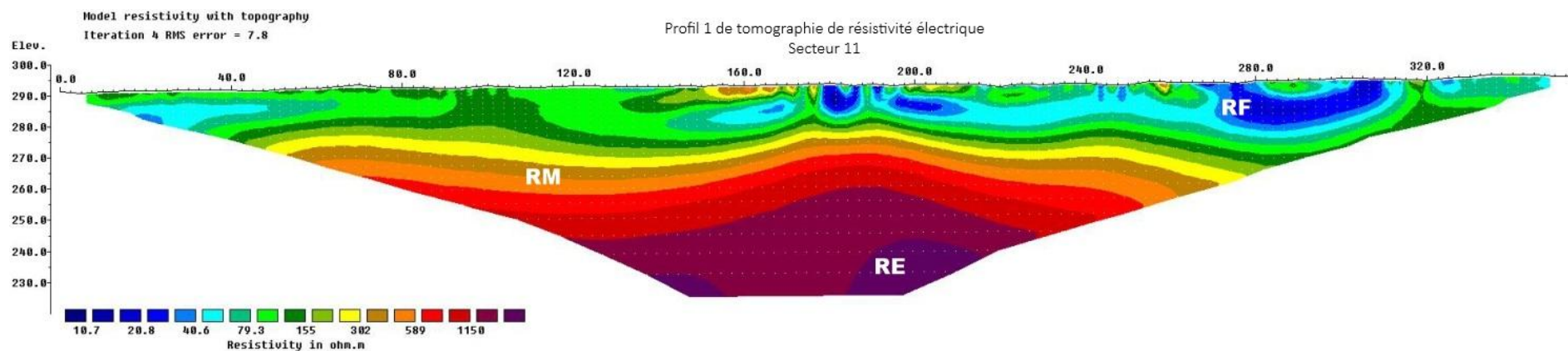
➤ Site de l'arrondissement 10

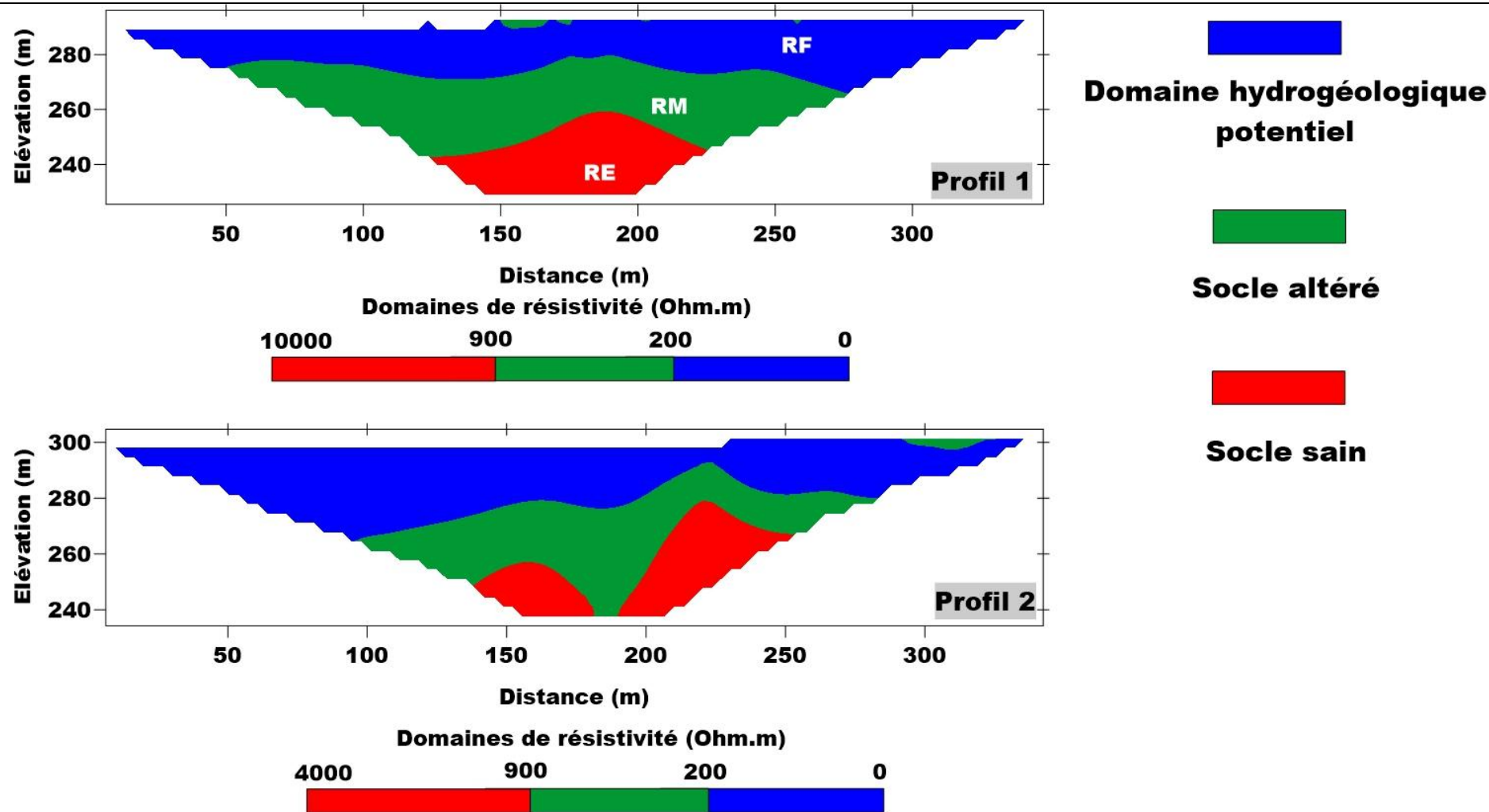


Carte de distribution de la conductivité du sous-sol

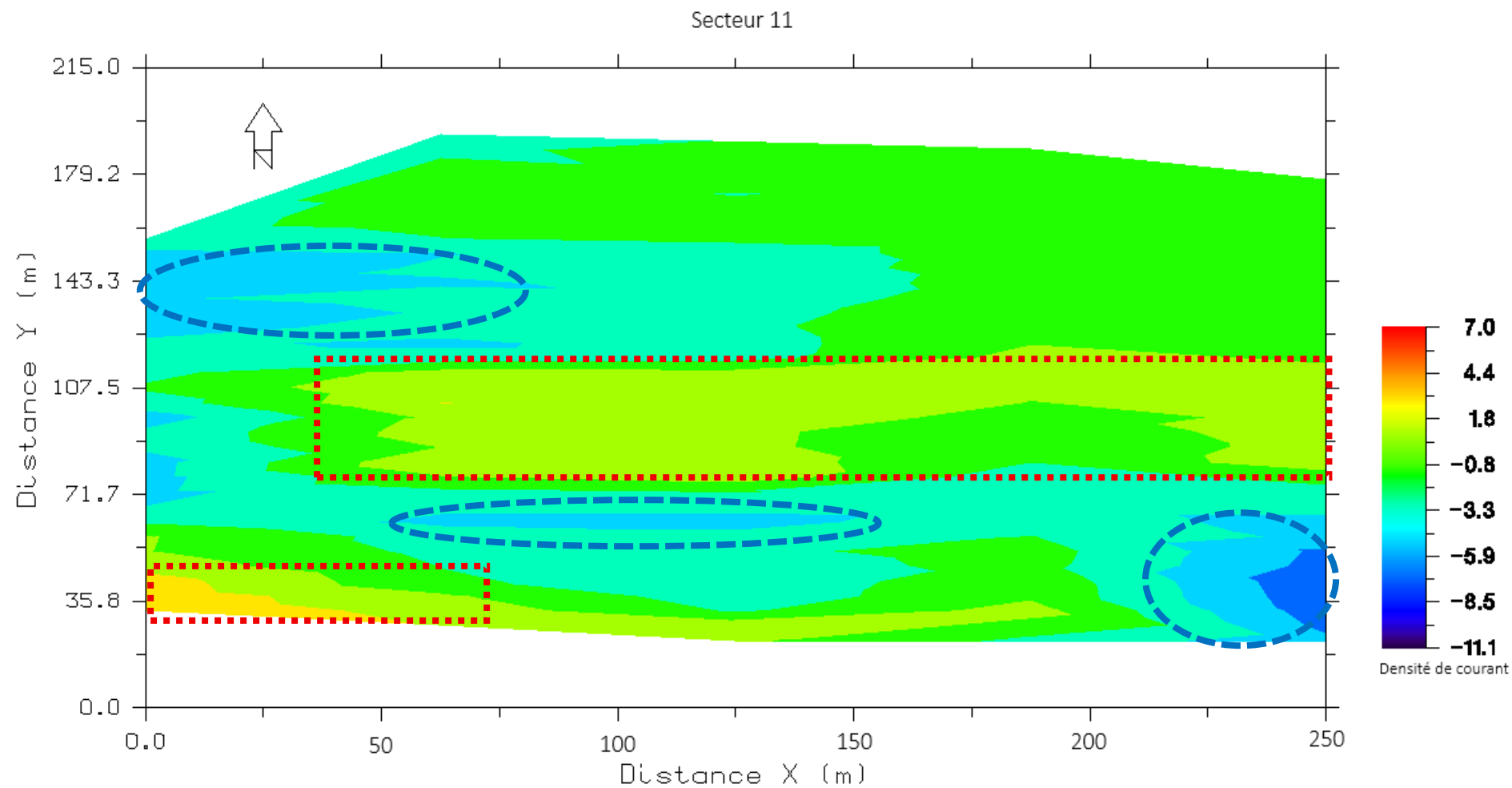


➤ Site de l'arrondissement 11

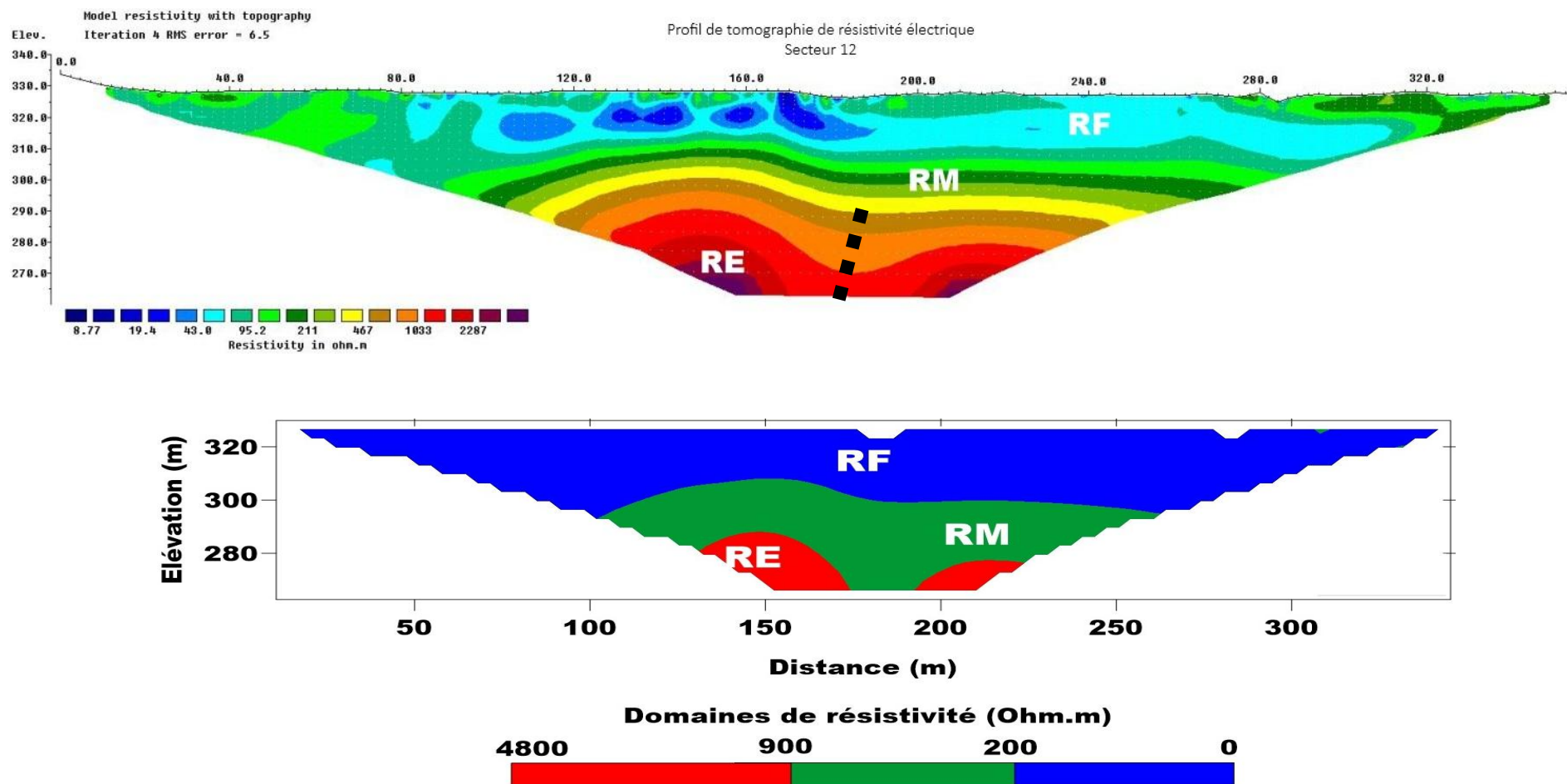




Carte de distribution de la conductivité du sous-sol



➤ Site de l'arrondissement 12



Carte de distribution de la conductivité du sous-sol

Secteur 12

