



THEME :

**CARTOGRAPHIE DE LINEAMENTS POUR LA
DETERMINATION DE SITES PRODUCTIFS DE
FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU**

APPLICATION: TELEDETECTION

Mémoire pour l'obtention du diplôme de :
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES

Présenté et soutenu publiquement le 28 Juin 2016 par
N'ganon Husseyn **OUATTARA**

Travaux dirigés par : Dr Mahamadou **KOITA** Enseignant au 2iE (UTER GVEA)
M.Marc N'**GUESSAN** (Gauff INGENIEURE)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Angelbert **BIAOU**

Membres et correcteurs : Dr Mahamadou **KOITA**

M. Sina **THIAM**

M. Richard Anselme **SANOU**

Promotion 2014/2015

28 Juin 2016



DEDICACE

A la mémoire de mon oncle Dosso Vafi que j'appelais affectueusement "Tonton Dosso" qui de son vivant ma soutenu et prodiguer de très bon conseil

A mes parents Daouda et Naminignan OUATTARA pour le soutien indéfectible dont j'ai toujours bénéficié, et la confiance sans faille qu'ils m'ont toujours accordée.

Qu'ils trouvent ici le fruit de leurs efforts et la manifestation de ma reconnaissance.

REMERCIEMENTS

Aux termes de ces travaux, je tiens tout particulièrement à exprimer ma profonde gratitude à

- Mon encadreur, Monsieur Mahamadou KOITA, Enseignant-Chercheur à 2iE pour sa disponibilité et ses conseils avisés.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble du corps professoral du 2iE pour la qualité de la formation reçue, pour les conseils et les encouragements dont nous avons toujours bénéficiés. Merci chers enseignants.

Je tiens tout particulièrement à manifester ma reconnaissance au Chef d'agence de GAUFF INGENIEURE, M Albert ZOURE et à l'ensemble de son personnel. Mes remerciements vont notamment :

- Au Chef d'agence lui-même pour avoir accepté notre stage et surtout pour l'attention particulière dont il a fait preuve à notre égard ;
- A mon maitre de stage, Monsieur Djéni Marc N'GUESSAN, qui n'a ménagé aucun effort pour satisfaire nos multiples sollicitations grâce sa constante disponibilité et ses remarques très opportunes et pour son encadrement efficient ;

A Madame Thérèse Djélika KAMBOU née DIALLO, avec qui nous avons eu du plaisir à travailler et qui a Co-encadrer ces travaux de mémoire ;

- A Messieurs HOUIN, KOBENAN, Madame Hortense SANDWIDI pour leur assistance permanente ainsi qu'à l'ensemble du personnel de l'agence GAUFF INGENIEURE Ouagadougou pour leur accueil chaleureux.

Je remercie mes parents, mes frères et sœurs Alima, Malick, Latif, Rahman et Fatim OUATTARA, mes tantes Salimata FOFANA et Nawa BAMBA et leurs familles respectives pour leur soutien sans cesse renouvelé

- A mes tuteurs, la Famille YANKINE, qui ont rendu mon séjour agréable à OUAGADOUGOU.

Mes remerciements vont également à l'ensemble de mes collègues promotionnaires pour leur collaboration forte enrichissante et confraternelle.

RESUME

La ville de Ouagadougou au centre du Burkina est située sur un socle cristallin précambrien. Les fractures et fissures du socle constituent les zones d'écoulements préférentiels pour les réserves d'eaux souterraines.

Afin de mettre en évidence ces fractures, une étude linéamentaire a été menée à partir d'images Landsat-5 TM. La carte des linéaments obtenue a été validée à l'aide d'étude antérieure, et de fracturation obtenue sur l'affleurement. Cette carte montre que les directions dominantes sont $N0^{\circ}-10^{\circ}$; $N30^{\circ}40^{\circ}$; $N40^{\circ}-50^{\circ}$; $N130^{\circ}-140^{\circ}$.

Cette carte pourra être utilisée dans les prochaines campagnes d'hydraulique comme document de base pour l'implantation des forages.

Une étude à montrer l'influence de la proximité d'un forage à un linéament sur son débit. Ceux les plus productifs sont essentiellement ceux situés sur les linéaments majeures ou à proximité. Une étude statistique de l'influence des paramètres de forages (profondeur totale, épaisseur d'altération, niveau statique) sur le débit a été réalisée. L'ensemble de ces paramètres a ensuite fait l'objet d'une Analyse en Composante Principale (ACP). Cette analyse révèle que la profondeur totale n'a pas d'effet sur la productivité des forages. Une forte épaisseur d'altération augmente par contre les chances d'avoir un débit important.

L'analyse statistique a montré que la corrélation qui existe entre les différents paramètres cités plus haut est très faible.

Ces résultats améliorent la connaissance de l'aquifère fracturé de Ouagadougou. Ils orientent les futures campagnes d'hydraulique pour une meilleure implantation des ouvrages de captage.

Mots clés

Téledétection

Fractures

Linéaments

Ouagadougou

Images satellitaires

ABSTRACT

Ouagadougou is center of Burkina and is located on a Precambrian crystalline basement. The Fractures and cracks are the base of preferential flow zones for groundwater reserves.

To highlight these fractures, a lineament study was conducted from Landsat 5 TM images. The map of lineaments obtained was validated of using previous study, and fracturing obtained on the outcrop. This map shows that the dominant directions are $N0^{\circ}-10^{\circ}$; $N30^{\circ}-40^{\circ}$; $N40^{\circ}-50^{\circ}$; $N130^{\circ}-140^{\circ}$.

This card can be used in the coming hydraulic campaigns as a basic document for the implementation of drilling.

A study to show the influence of the proximity of a drilling and a lineament on its flow. The drillings most productive are essentially those located on major lineaments or nearby.

A statistical study of the influence of drilling parameters (total depth, thickness of alteration, level static) on the flow was performed. All these parameters have then the subject of a Principal Component Analysis (PCA). This analysis reveals that the total depth has no effect on the productivity of drilling. A thick weathering increases the chances of having a high flow rate.

Statistical analysis showed that the correlation between the various parameters mentioned above is very low.

These results enhance the knowledge of the fractured aquifer of Ouagadougou. They direct the future of hydraulic campaigns for better implementation of catchment works.

Keywords:

Teledetection

Fractures

Lineaments

Satellite Images

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composante Principal

ACPN : Analyse en Composante Principal Normée

Landsat : Land Satellite

TM : Thematic Mapper

CIEH : Comité Inter Etats d'Etudes Hydrauliques

CV : Coefficient de Variation

PDDO : Projet de Développement Durable de Ouagadougou

FIT : Front intertropical

ONEA : Office National de l'Eau et de l'Assainissement

SOMMAIRE

Table des matières	
DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
Mots clés	iii
ABSTRACT	iv
Keywords:	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
I. INTRODUCTION GENERALE	1
II. PRESENTATION DE LA ZONED'ETUDE.....	3
A. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET MILIEU PHYSIQUE DE LA VILLE DE OUAGADOUGOU	3
1) Situation géographique	3
2) Climat.....	4
3) Hydrographie.....	4
B. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU BURKINA FASO	5
1) La géologie du Burkina Faso	5
2) L'hydrogéologie en zone de socle	6
• Définitions des types d'aquifères	6
3) Contexte Geologique Et Hydrogeologique De Ouagadougou	6
III. DONNEES ET METHODES.....	9
A. DONNEES	9
1) Données satellitaire	9
2) Donnée de forage	10
3) Les logiciels de traitement.....	11
B. TELEDETECTION.....	11
1) La télédétection appliquée à l'hydrogéologie en contexte de socle	11
2) Technique de traitement de l'image Landsat	11
b) Combinaison de bande	12
c) Analyse en composante principale	12
d) Filtre directionnel	12

3) Extraction de linéaments	15
4) Validation des linéaments	15
5) Analyse statistique des données de forages	15
IV. RESULTATS ET DISCUSSION	16
A. TAITEMENT D'IMAGE	16
1) Analyse en composante principale	16
2) Filtres directionnels Sobel	18
3) Composition colorée	22
B. CARTE DE LINEAMENTS	22
1) Etude de la fracturation	23
2) Analyse des Linéaments,	25
3) Comparaison avec des résultats antérieurs	25
C. SUPERPOSITION DE LA CARTE DE LINEAMENT ET DES DONNEES DE FORAGE ..	26
V. ANALYSE DES DIFFERENTS PARAMETRES DE PRODUCTIVITE	29
A. INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES	29
1) Corrélation entre les débits des forages et leurs distances aux linéaments majeurs	29
2) Description des paramètres de forage.....	31
3) Corrélation entre débit et paramètre de forage	31
4) Analyse en composante principale normée	36
B. SYNTHESE.....	37
VI. CONCLUSION	37
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39
ANNEXES	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Matrice 7*7 des filtres directionnels SOBEL.....	14
Tableau 2 : Caractéristique de l'ensemble des Linéaments	24
Tableau 3: Evolution du débit en fonction de la distance entre forage et linéament	30
Tableau 4 : Statistique descriptive des paramètres de forage.....	31
Tableau 5 : Coefficients de corrélation	31
Tableau 6 : Pourcentage des débits en fonction des classes d'épaisseur	32
Tableau 7 : Pourcentage de forage en fonction du débit et des classes de profondeur.....	34
Tableau 8: Pourcentage de forage en fonction du débit et des classes de profondeur d'altération.....	36
Tableau 9 : Valeurs propres pourcentages et pourcentages cumulées.....	36
Tableau 10 : Matrice de corrélation entre les variables.....	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1: La situation géographique, découpage administratif de la ville de Ouagadougou	3
Figure 2 : Carte géologique du craton ouest-africain (Bessoles, 1977).....	5
Figure 3: Carte géologique de la ville de Ouagadougou (Castaing et al.2003).....	8
Figure 4 : Image satellitaire (Landsat) de la ville de Ouagadougou, (1985)	10
Figure 5: Superposition des forages à la carte géologique de Ouagadougou	10
Figure 6: Valeur des différentes bandes	16
Figure 7: Première composante de l'ACP.....	17
Figure 8: Image issue du filtrage et du rehaussement directionnel N-S	18
Figure 9 : Image issue du filtrage et du rehaussement directionnel E-O.....	19
Figure 10 : Image issue du filtrage et du rehaussement directionnel NE-SO.....	20
Figure 11 : Image issue du filtrage et du rehaussement directionnel NO-SE.....	21
Figure 12 : Composition colorée appliquée à l'image satellitaire (Ouattara, 2016)	22
Figure 13 : Rosace directionnel de l'ensemble des linéaments.....	24
Figure 14 : Rosace directionnel des linéaments relevés à l'affleurement (Yaméogo, 2008)	26
Figure 15 : illustration des débits en fonction des épaisseurs d'altération	32
Figure 16 : illustration des débits en fonction des profondeurs totales	33
Figure 17 : illustration des débits moyens en fonction des classes des profondeurs totales	34
Figure 18 : Illustration du niveau statique en fonction du débit.....	35
Figure 19 : Histogramme des classes de niveau statique en fonction des débits moyens	35

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Carte de linéament de la ville de Ouagadougou (Ouattara, 2016).....	23
Carte 2: Superposition des linéaments majeurs au forage à fort et faible débit	28
Carte 3 : Cartographie des forages à fort débit et des linéaments utilisés pour l'analyse productivité- distance.....	30

I. INTRODUCTION GENERALE

Les eaux souterraines en zone de socle sont une ressource majeure pour les populations rurales au Sud du Sahara étant donné que les eaux de surfaces ne sont pas pérennes à cause de la valeur élevée de l'évapotranspiration ou de leur qualité médiocre. Seule source d'eau pouvant être potable et de qualité sans traitement préalable, elles conditionnent aussi leur sécurité alimentaire. Cependant, la disponibilité et la mobilisation des ressources en eau souterraine en vue de la satisfaction des besoins des populations constituent une problématique majeure pour les autorités en charge des programmes d'hydraulique surtout en milieu de socle. De plus, les changements climatiques observés au cours de ces dernières décennies ont contribué à la mise en exergue des problèmes liés à l'eau (Brida, 2008). Ceux-ci se caractérisent par l'augmentation de la durée de la saison sèche et une tendance à la baisse en intensité et en fréquence de la pluviométrie durant la saison humide. Les conditions pluviométriques rendent difficile la recharge des aquifères posant ainsi un problème de renouvellement des eaux souterraines ; ce qui pourrait influencer indirectement sur le taux de succès des forages.

La ville de Ouagadougou connaît actuellement une croissance démographique assez accélérée, ce qui entraîne son expansion, d'où l'apparition d'habitats spontanés dans les zones périphériques augmentant la demande en eau. Avec plus d'un million d'habitants, le développement du réseau d'adduction de la ville de Ouagadougou ne se fait pas au même rythme que celui d'habitats spontanés.

Face à cela, l'état Burkinabé ne cesse de faire des efforts pour y remédier. C'est dans cette optique qu'il a initié le projet de Développement Durable de Ouagadougou (PDDO) entrepris de façon urgente pour la réhabilitation de la station de traitement existante de Paspanga qui a permis à la fin 2014, de fournir un volume additionnel journalier de 14.300 m³, et des travaux de réalisation de 43 nouveaux forages qui aurait permis en fin 2015 de fournir un débit additionnel journalier d'environ 15 000 m³. Grâce à ces mesures intermédiaires, par rapport à la situation actuelle, un débit total additionnel journalier d'environ 30 000 m³ devait apporter en fin 2015 en attendant le barrage Ziga II. (Contexte et justification Projet de Développement Durable de Ouagadougou (PDDO), 2014).

Notre étude s'inscrit dans le cadre de la réalisation des 43 nouveaux forages dans la ville de Ouagadougou, dont l'eau sera directement injectée dans le réseau existant. Cependant cette recherche d'eau reste un challenge, puisque ces forages doivent avoir de bon débit (supérieur à 7 m³/h).

Les travaux de Scanvic (1981) ; Yésou et Gwyn, (1988) menés en Afrique de l'Ouest ont montré que les gros débits (>7m³/h) sont liés à des fractures d'extension kilométrique, des intersections de fractures, et à des réseaux de fractures caractérisées par une forte interconnexion.

Plusieurs études (A.N. Savadogo, 1984) ; (Schneider et Zunino, 1994) ont été menées afin de maîtriser les paramètres influençant la productivité des ouvrages (la profondeur d'altération, la profondeur totale, le niveau statique) dans le domaine cristallin ; pour cela il existe plusieurs techniques de détection des fractures parmi lesquels il y a les techniques de télédétection toutefois le choix d'une méthode varie selon le problème posé. C'est dans cette lancée que nous allons nous intéresser à la télédétection afin de cartographier les différentes structures faillées qui se trouvent dans la zone de Ouagadougou. Selon O'hary et al. (1976), un linéament est un

trait linéaire simple ou composé, décelé en surface, dont les différentes parties, alignées selon une droite ou une courbe, ressortent distinctement de leur entourage et reflètent possiblement un phénomène engendré sous la surface. Ces linéaments s'associent à des éléments structuraux comme les failles, les fractures, les axes de plissements et les contacts lithologiques.

«L'objectif de la présente étude est d'optimiser les implantations de futurs forages de la ville de Ouagadougou . » Ainsi on devra:

- Cartographier les principales structures linéamentaires de la zone d'étude
- Valider la carte de linéament
- Identifier des corrélations éventuelles entre la productivité, et les paramètres de forages (Profondeur, épaisseur d'altération, niveau statique)

Des analyses statistiques permettront ensuite d'établir les liens éventuels entre les différents paramètres et la productivité des forages.

Les résultats de cette étude pourront servir à mieux orienter les futures campagnes d'hydrauliques de la ville de Ouagadougou afin de trouver les meilleurs points correspondants à des débits supérieurs à 7 m³/h pour l'alimentation en eau de la zone.

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

A. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET MILIEU PHYSIQUE DE LA VILLE DE OUAGADOUGOU

1) Situation géographique

Ouagadougou capitale politique du Burkina Faso se trouve dans le plateau central, dans la province du Kadiogo. Son altitude moyen est estimée à 316 m. Le relief de la ville est assez plat.

Ouagadougou s'étale dans les limites suivantes : 1°28 à 1°36 longitude ouest et 12°20 à 12° 26 latitude nord.

La commune de Ouagadougou couvre une superficie de 37 950 hectares². La province est limitée au nord-est et au nord-ouest par la province de l'Oubritenga et au sud-ouest par la province du Bazega. La ville de Ouagadougou est aussi la capitale de la région du Centre qui concentre le plus fort taux d'urbanisation du Burkina soit 77,5%. Elle compte 55 secteurs et 12 arrondissements. La situation géographique est présentée dans la figure N°1. Ouagadougou appartient à la zone climatique soudano sahélienne, marquée par une pluviométrie moyenne de 750 mm d'eau recueillie par an. La saison sèche commence à partir d'octobre jusqu'en mai. De novembre à février, Ouagadougou est sous l'influence d'un régime de vent appelé l'harmattan, vent sec venant du nord nord-est. (R Ulyse Emmanuel OUEDRAOGO , 2007)

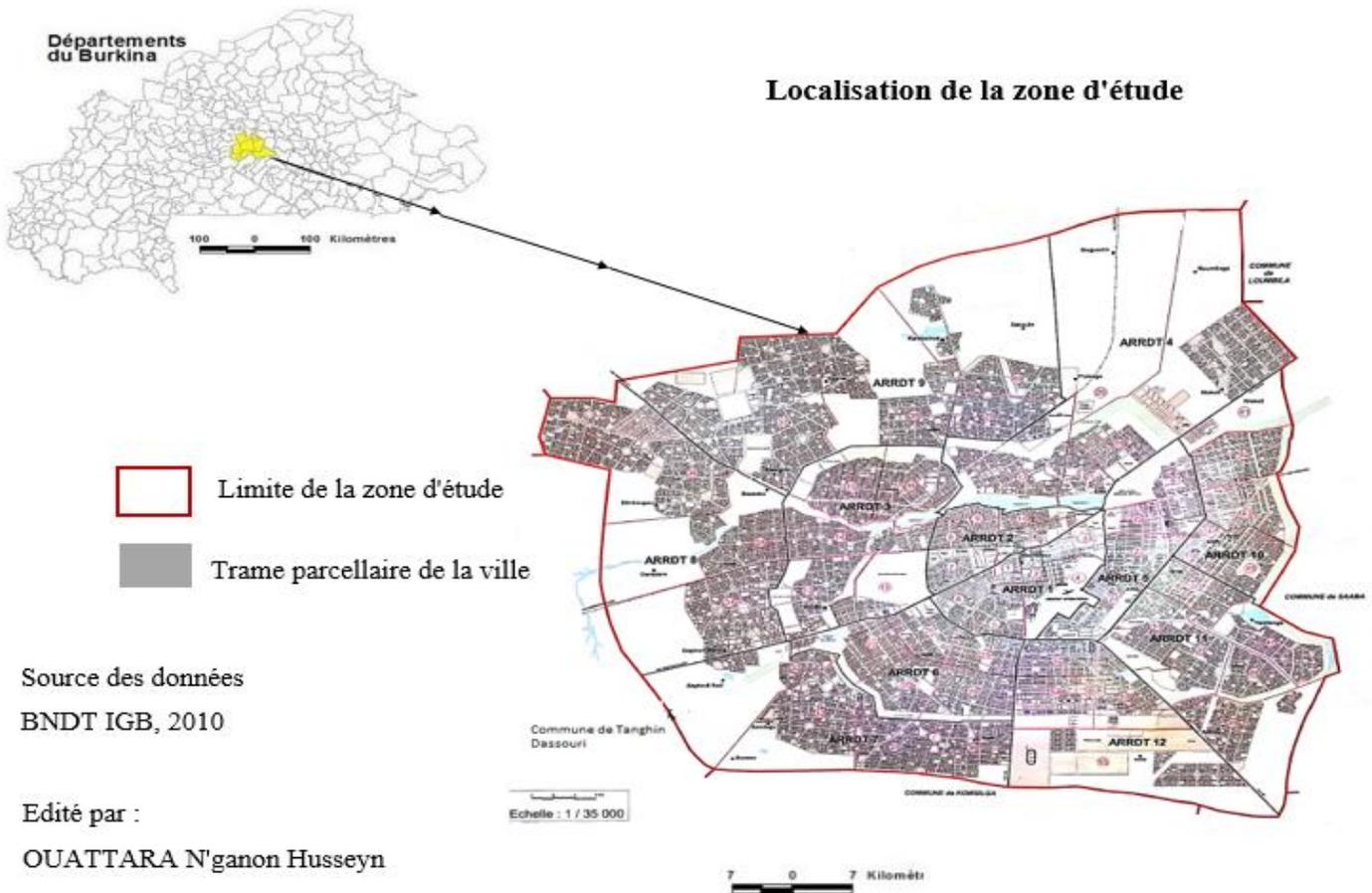


Figure 1: La situation géographique, découpage administratif de la ville de Ouagadougou

2) Climat

La ville est soumise à un climat de type soudano- sahélien caractérisé par l'alternance de deux saisons très contrastées : une saison sèche et une saison des pluies ou hivernage. Le rythme saisonnier est commandé par une influence alternée des vents sahariens et des moussons océaniques.

- La saison sèche est liée à l'harmattan, vent chaud et sec soufflant sur tout le Burkina Faso d'octobre à mars et du Nord Est vers le sud-ouest. De novembre à février, l'harmattan est relayé par l'Alizé boréal, vent frais et même froid soufflant dans le même sens que l'harmattan.
- La saison des pluies : à partir de mars, le Sahara surchauffé devient une zone de basses pressions aspirant les masses d'air océaniques. C'est la mousson qui se glisse sous l'harmattan dont elle est séparée par un plan incliné du sud vers le Nord. Ce plan est appelé Front intertropical, F.I.T. Le FIT fait la navette entre la côte et le sud du Sahara. Il passe donc deux fois sur la ville de Ouagadougou. Le climat à Ouagadougou va dépendre de la progression du FIT et de l'ampleur des manifestations pluviales qui s'y rattachent.
- Les précipitations : Les pluies sont suivies à Ouagadougou depuis 1902. Elles montrent dans les temps des variations énormes dans l'année et d'une année à l'autre. La courbe inter -annuelle a une allure en dents de scie. Alternant périodes humides et périodes sèches. La plus sévère de ces dernières a été enregistrée en 1913 (400 mm) et l'année la plus humide fut celle de 1962 (1200 mm). Le mois le plus pluvieux est celui du mois d'août. On note que depuis 1976, la pluviométrie connaît une tendance baissière. Même les périodes positives humides n'enregistrent guère plus de 900 mm/an. Les amplitudes des variations inter-annuelles sont atténuées avec des hauteurs pluviométriques comprises entre 600 et 800 mm. (C. Kédowidé, 2009)

3) Hydrographie

La ville de Ouagadougou est drainée par des affluents du Massili qui se jette dans le Nakanbé qui lui, joint ses eaux à celles des autres branches de la Volta au Ghana. L'affluent principal qui traverse la ville est coupé par quatre barrages colinéaires (barrage de Boulmiougou sur la route de Bobo Dioulasso, barrage n°1 route de Ouahigouya, barrage n°2 de Tanguaye, barrage n°3 route de Kaya). Le dernier participe à l'alimentation en eau potable de la ville. En effet, la capitale s'alimente en eau potable à partir d'eau de surface du barrage n°3 situé au cœur de la ville et du barrage de Loumbila édifié à 15km au nord sur la route Ouagadougou-Kaya. Les eaux des autres affluents drainant la ville sont endiguées par des canaux qui contournent le barrage n° 3 pour se rejoindre à l'Est de la ville. Un seul, celui de Kadiogo rejoint le barrage n°2.

B. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU BURKINA FASO

1) La géologie du Burkina Faso

L'histoire de la géologie du Burkina s'intègre dans celle du continent africain et plus particulièrement du craton ouest africain, dont les grandes lignes ont été esquissées par des auteurs tels que Ducellier, et Bessoles. D'après Bessoles en 1977, le continent africain est occupé par trois cratons qui sont : le craton ouest africain, le craton du Congo, le craton de Kalahari. Nous nous intéressons au craton ouest africain essentiellement constitué de formations très anciennes d'âge archéen (>2500 Ma) et paléo protérozoïque (2250-2000 Ma). On distingue deux grands ensembles qui sont la dorsale de Réguibat au Nord et la dorsale de LEO ou Dorsale de Man au Sud. Ces deux ensembles sont séparés par le grand bassin de Taoudéni où se sont accumulées des formations sédimentaires d'âge néo protérozoïque et paléozoïque (figure 2).

Le bassin de Taoudéni au Nord couvre les deux tiers du Mali et à l'Est une partie du Niger et dans une moindre mesure la partie Ouest et le Nord du Burkina.

Le Burkina Faso occupe la dorsale de LEO ou le bloc Baoulé Mossi dans le centre sud du craton Ouest africain. Il est essentiellement constitué d'un ensemble d'âge paléo protérozoïque, et une petite partie des formations sédimentaires du bassin de Taoudéni.

La figure ci-dessous présente la carte géologique du craton ouest-africain.

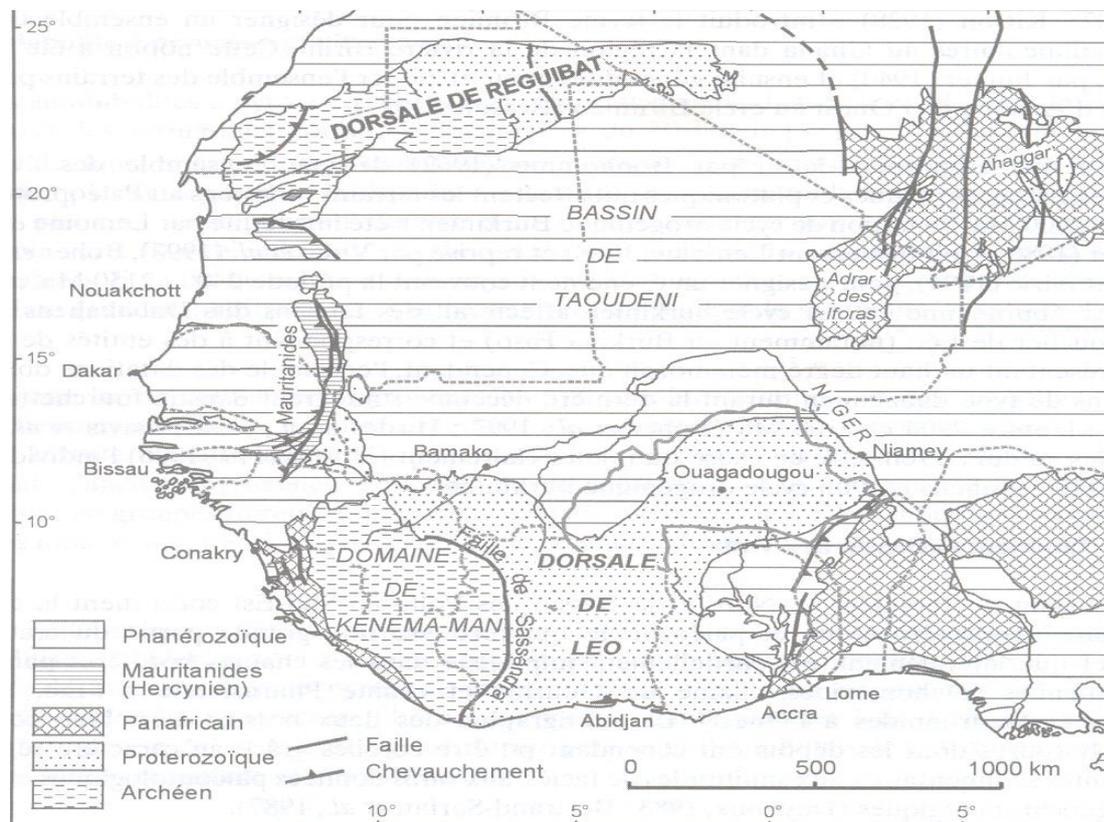


Figure 2 : Carte géologique du craton ouest-africain (Bessoles, 1977)

2) L'hydrogéologie en zone de socle

Cette étude concerne les nappes de socle cristallin fissuré/fracturé.

Ce concept de socle fracturé selon A.N. Savadogo (1984) caractérise un système bi couche constitué d'un recouvrement semi-perméable, le réservoir des altérites avec une bonne fonction capacitive et alimenté par la surface, surmontant un aquifère de fissures ou de fractures (socle au sens strict). Quant à Schneider et Zunino (1994), ils signalent le caractère libre des nappes des altérites et celui captif des aquifères de fissures.

Il faut aussi signaler le rôle très important des injections filoniennes et des zones de contact dans l'hydrogéologie de socle ancien. Les filons de quartz ou de pegmatite peuvent créer des discontinuités sous l'effet des contraintes postérieures à leur injection et assurer aussi un rôle de drain grâce à leur granulométrie souvent grossière.

✚ Définitions des types d'aquifères

• Aquifères superficiels

Ils sont constitués par les cuirasses latéritiques et les alluvions. La cuirasse est la partie la plus productive des horizons supérieurs des altérations quand elle est noyée. Ces nappes sont captées par les puits traditionnels ou modernes à grand diamètre à faible profondeur (3 m à 15 m).

Le comblement alluvial des lits mineurs des marigots constitue un aquifère exploité par les puisards qui alimentent les riverains en eau. Mais ces ouvrages sont vite abandonnés pendant la saison des pluies à cause des phénomènes d'écoulement.

• Aquifères profonds

Ces aquifères doivent leur existence aux réseaux de fractures qui se sont développés au sein des formations compactes du socle lors de mouvements tectoniques. Les fractures sont suffisamment denses et ouvertes pour conduire et stocker l'eau. On distingue plusieurs niveaux plus ou moins aquifères mais principalement deux types sont répertoriés :

- ✓ celui du socle altéré formé d'arènes très grossières et fluentes. Les arènes quand elles sont baignées d'eaux forment un aquifère d'assez bonne fonction capacitive ;
- ✓ celui du socle fissuré surmontant le substratum sain. Cet aquifère provient de la désagrégation du socle sain sous l'effet des contraintes tectoniques ayant affecté la zone. Cet aquifère assure une fonction drainante.

3) Contexte Géologique Et Hydrogéologique De Ouagadougou

La ville de Ouagadougou est située sur un socle cristallin précambrien constitué de granites très hétérogènes. Le socle n'affleure que par des pointements de petites dimensions au nord-ouest et à l'ouest de la ville. Partout ailleurs, le bed-rock est enfoui sous des altérites argilo - sableuses dont l'épaisseur atteint par endroit 40 m. Les réserves d'eau souterraines sont discontinues et se localisent dans les zones broyées induites par le dense réseau de failles qui affectent le substratum. Les réserves souterraines sont contenues dans deux types de nappe : l'une superficielle située à la base de la cuirasse latéritique et dans les altérites argileuses ainsi que les alluvions, l'autre plus profonde constituée par les arènes grenues et la frange fissurée du substratum. La recherche d'eau dans un tel contexte se ramène à la recherche et à la caractérisation des fractures. Tout comme les eaux de surface, les eaux des nappes superficielles sont très vulnérables aux pollutions diverses. Toutes deux sont également sensibles aux

variations interannuelles des précipitations. Le déficit pluviométrique s'accompagne d'une augmentation des prélèvements par évapotranspiration.

Il s'ensuit que la période sèche que connaît la région depuis 1976 s'accompagne d'un amenuisement des réserves en eau souterraine dont les niveaux piézométriques s'enfoncent d'année en année. Il n'existe plus de ce fait de réserves d'eaux souterraines exploitables de manière durable dans la sous-région. Le suivi de l'évolution du niveau du piézomètre du CIEH démontre bien ce phénomène. C'est dire qu'aujourd'hui modeste ou très faible par rapport aux prélèvements par évapotranspiration, toute extraction contribue à creuser le déficit nettement perceptible. La carte géologique de la ville de Ouagadougou est représenté dans la figure ci-dessous :

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

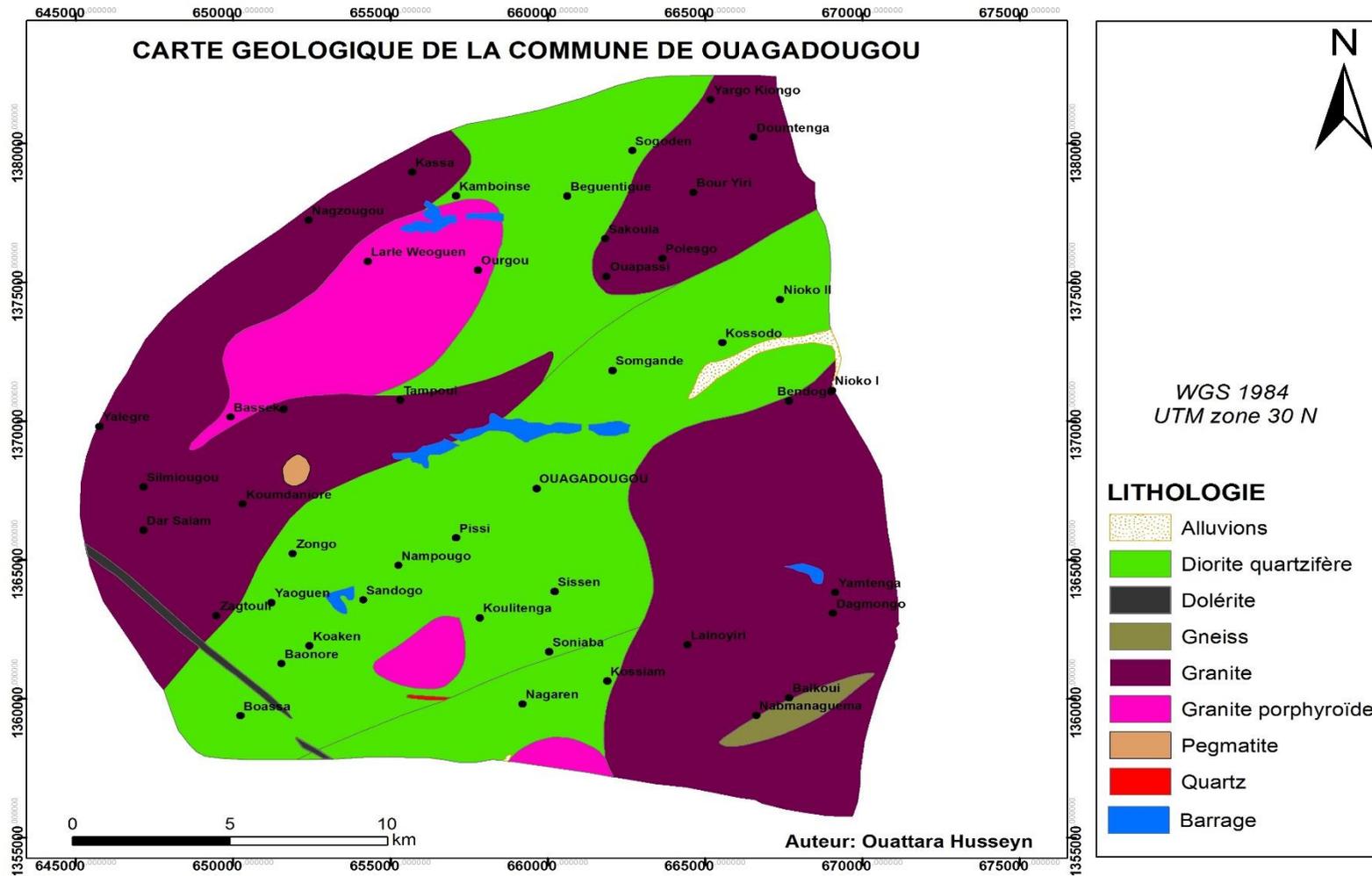


Figure 3: Carte géologique de la ville de Ouagadougou

III. DONNEES ET METHODES

A. DONNEES

1) Données satellitaires

La détection des linéaments sur des images satellitaires peut être influencée par certains facteurs d'ordre climatique, phénologique, hydrique ainsi que par la source d'éclairage au moment de l'acquisition des données. Il faut également noter que la qualité visuelle d'une image dépend des bandes spectrales utilisées, de la date de prise de vue et de l'échelle Tanguay et Seuthé (1983).

À cela, il faut ajouter l'étalement du capteur, les effets atmosphériques et la géométrie de visée auxquelles il faut tenir compte.

Les données utilisées proviennent du satellite Landsat-5 TM dont la diversité des canaux fournit une multitude d'informations à manipuler (7 bandes spectrales). L'image utilisée a été prise le 4 Juillet 1985 est extraite de la scène 195/51. Nous avons choisi d'exploiter l'image TM de Landsat du 4 juillet 1985, pour nous affranchir du paysage urbain actuel qui change de manière rapide.

De plus, les données Landsat présentent l'avantage de bien faire ressortir les linéaments, à cause de la basse valeur de l'angle solaire, de la suppression des détails spatiaux gênants et la couverture régionale (Sabins, 1986).

La perception des linéaments est d'autant plus accentuée lorsque l'élévation solaire est faible (Sabins, 1986). Les travaux de Drury (1986), et Singhroy et al. (1993) démontrent que les éléments linéaires d'orientation perpendiculaire à la source d'éclairage sont très bien rehaussés alors que ceux situés à un angle de plus ou moins 20° de cette même source n'apparaissent pas sur l'image.

La figure 3 ci-dessous présente l'image satellitaire de la ville de Ouagadougou. En faisant un zoom nous observons :

- Les 3 barrages de Ouagadougou ;
- L'aéroport de Ouagadougou ;
- Le parc Bangrwéogo ;
- La présidence (Kossyam) ;
- Le barrage de Boulmiougou.

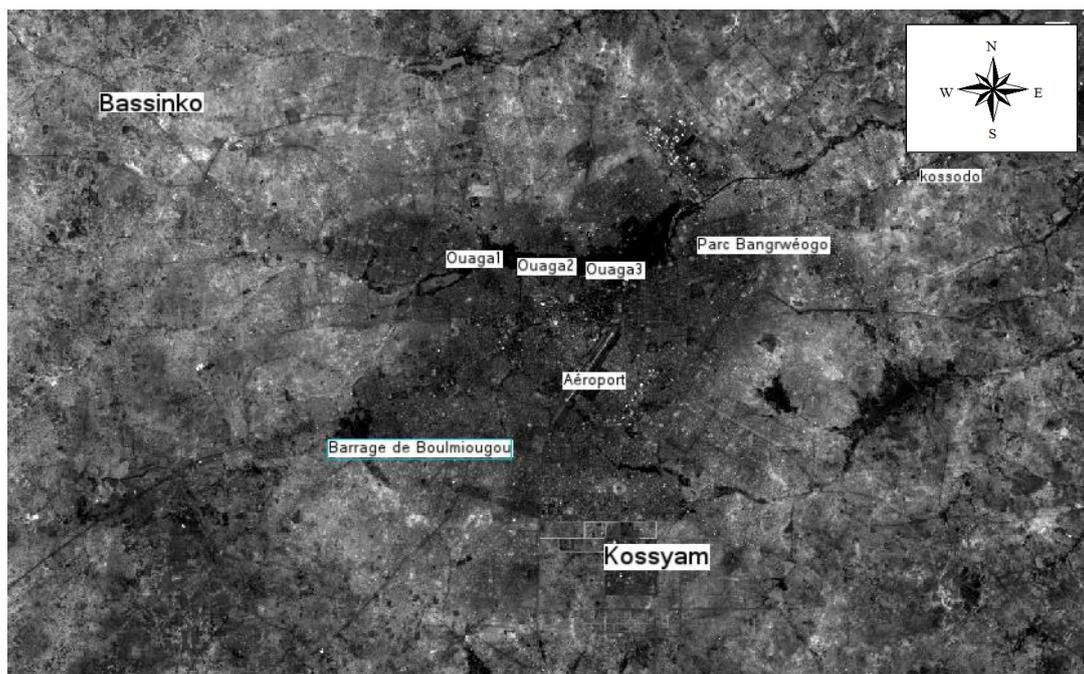


Figure 4 : Image satellitaire (Landsat) de la ville de Ouagadougou, (1985)

2) Donnée de forage

La base de données utilisée pour l'étude statistique dans ce mémoire provient de l'ONEA. Elle est fournie sous forme de feuille Excel qui recense quelques forages de la ville de Ouagadougou. Sur 230 forages recensés, 134 avaient tous les enregistrements nécessaires et ont donc fait l'objet de l'analyse. 95 ont un débit $Q > 7\text{m}^3/\text{h}$, et 39 ont un débit $Q < 7\text{m}^3/\text{h}$. Leurs caractéristiques sont en annexe III.

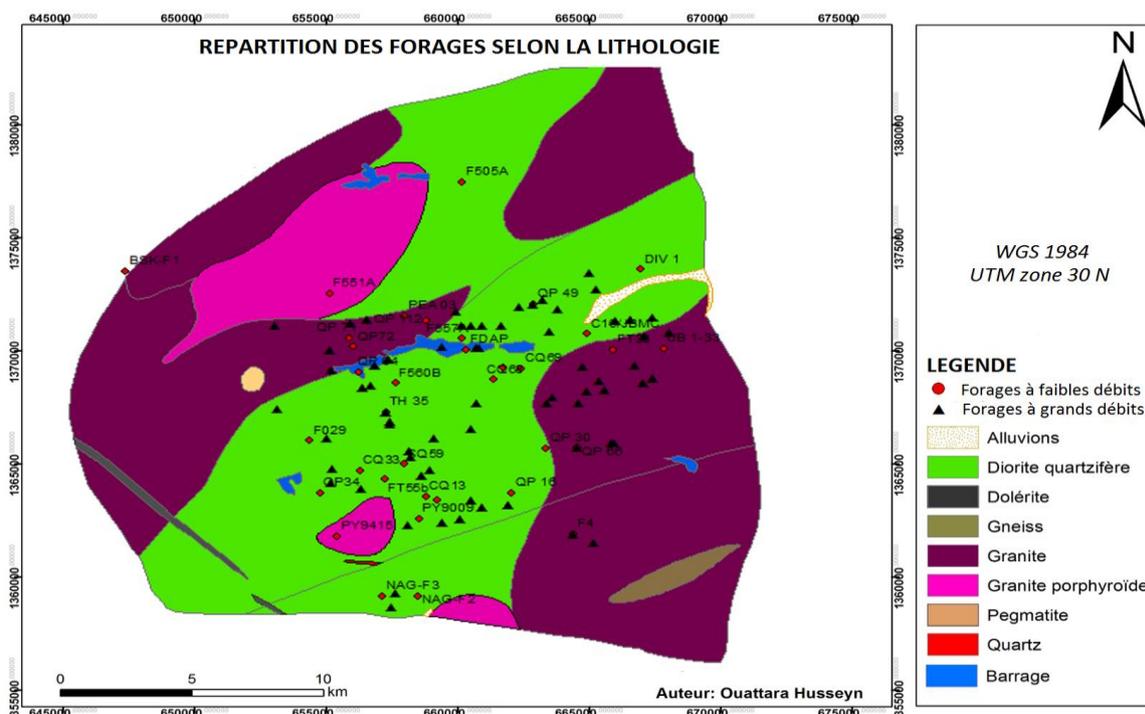


Figure 5: Superposition des forages à la carte géologique de Ouagadougou

3) Les logiciels de traitement

Les logiciels utilisés dans cette étude sont les suivants :

- ENVI 5.1 pour le traitement des images satellites (ACP, Filtres directionnels, composition colorées etc...);
- ArcView 3.2a pour l'analyse des linéaments :
- Excel et le complément XLSTAT ont servi pour la statistique des données de forages.

B. TELEDETECTION

1) La télédétection appliquée à l'hydrogéologie en contexte de socle

La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour l'acquisition d'informations sur un objet sans qu'il y ait un contact matériel entre l'instrument d'acquisition et l'objet de l'étude.

Plusieurs études hydrogéologiques ont été menées dans les contextes de socle à travers l'utilisation de la télédétection ; (Savané et al ,1997), (Savané et Biémi, 1998), (Kouamé et al ,1999), (Ta et al ,2008), (Ngo et al ,2010), (Koita et al ,2010). Elles avaient pour objectifs majeurs la proposition de méthodologies de caractérisation des accidents tectoniques et la détermination de leur rôle dans les écoulements souterrains. Toutes ces études s'orientent vers l'identification et la caractérisation de linéaments sur les images satellitaires.

Les linéaments sont des objets rectilignes ou curvilignes identifiables sur les images satellitaires qui traduisent des phénomènes géologiques profonds tels que les fractures, les failles ou les contacts géologiques. L'identification des linéaments dans les images satellitaires est tributaire de la capacité qu'a le capteur à détecter les légères variations de la réflectance associées à ces phénomènes géologiques (Dubois, 1999).

Selon El Hadani (1997), l'étude des linéaments permet de répondre à deux objectifs :

- l'orientation des campagnes de reconnaissance en définissant des zones potentiellement favorables,
- la sélection de sites ponctuels pour l'implantation de forages.

L'utilisation des images satellitaires peut dès lors constituer l'un des tout premiers moyens d'étude des aquifères avant la mise en œuvre des autres méthodes telles que la prospection géophysique ou les essais de pompages pour confirmer et/ou compléter éventuellement les résultats.

2) Technique de traitement de l'image Landsat

Nous avons choisi les images Landsat car elles ont une résolution spatiale un peu plus fine (30 m), les images Landsat permettent de relever des linéaments de taille plus petite. Et Nous y sommes parvenus à l'aide du logiciel ENVI 5.0

a) Composition colorée

Elle utilise le codage RVB qui représente l'espace des couleurs à partir de 3 couleurs ; Rouge (700,0 nm), Vert (546,1 nm), et Bleu (435,8 nm). Le résultat est une image colorée qui

superpose 3 bandes, chaque bande étant affectée à l'une des couleurs du codage RVB. La composition colorée est souvent dite en « fausses couleurs » car on n'utilise pas toujours les 3 bandes du visible pour cette opération.

Les compositions suivantes : (TM4, TM5, TM7), (TM7, TM5, TM2), (TM5, TM4, TM3) facilitent la discrimination visuelle des linéaments d'après Dickens (2005), N'Go et al (2010), et Koita et al (2010).

b) Combinaison de bandes

C'est une opération arithmétique effectuée sur 2 ou plusieurs bandes. Cette technique utilise des opérateurs de type ponctuel, c'est-à-dire qu'il traite le compte numérique (valeur du niveau de gris) dans chaque pixel indépendamment des comptes numériques des autres pixels de l'image. (Saley,2012)

Des linéaments ont été mis en évidence par les combinaisons suivantes : (TM7 + TM6), (TM4 + TM6), (TM5/TM4), (TM6 - TM7) / (TM6 + TM7) ; Kouamé et al (1999), Ta et al (2008), N'Go et al (2010). Ces différentes combinaisons ont été utilisées dans le cadre de cette étude.

c) Analyse en composante principale

L'ACP permet de dé-corréler l'information contenu sur les différentes bandes puis de les regrouper sur un minimum de nouvelles bandes appelées néocanaux. Elle permet ainsi de réduire le nombre de bande à manipuler par la suite. Les résultats de plusieurs études ont montré que généralement les 3 premières bandes résultantes de l'ACP concentrent l'essentielle de l'information (plus de 95%) des 7 bandes. (Scanvic ,1983), (Assoma ,2005), (Ngo et al. ,2010), (Koita et al. ,2010).

Ta et al. (2008) propose une ACP sélective qui consiste à utiliser les bandes 3 par 3, par exemple les bandes 1,2 et 3 puis 4, 5 et 6 pour la réalisation de plusieurs ACP.

Dans le cadre de cette étude une analyse en composante principale utilisant toute les 7 bandes a été adoptée.

d) Filtre directionnel

Le filtrage est une opération qui a pour but d'extraire une information ou d'améliorer l'aspect de l'image, par exemple en éliminant un bruit ou en améliorant les contours d'une image floue.

En fonction des opérations mathématique réalisées on peut dégager plusieurs types de filtre : filtre de convolution (passe bas, Sobel, Gradient), filtre morphologique, filtre adaptatif, filtre par transformer de fourrier etc.

Les filtres les plus utilisés pour l'identification des linéaments sont des filtres de convolutions de types Sobel, Gradient et Laplacien.

Filtre Sobel

Les filtres directionnels Sobel améliorent la perception des linéaments en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image comme si elle était éclairée par une lumière rasante (Marion, 1987).

De plus, ce type de filtre permet de rehausser les linéaments qui ne sont pas favorisés par la source d'éclairage (Drury, 1986).

Le rehaussement des linéaments a donc été effectué à partir de filtres directionnels utilisant l'opérateur de Sobel. Le filtre de Sobel est une variété plus sélective de filtres directionnels où les valeurs de la matrice de convolution sont déterminées selon la distance par rapport au pixel central. En d'autres termes, les points les plus près du centre dans la matrice (en ligne ou en colonne) interviennent avec un poids supérieur à ceux des extrémités dans la mesure du gradient directionnel (Deslandes, 1986). Il a été démontré par Abdou et Pratt (1979) que la réponse de l'impulsion de ce filtre était relativement indépendante de l'orientation des linéaments. Celui-ci peut détecter aussi bien les linéaments orientés verticalement, horizontalement et à 45° par rapport au gradient du filtre.

Le filtre de Sobel est un filtre directionnel qui met en évidence la majorité des structures linéaires sur une image. Il peut être un filtre de rang 3*3, 5*5, 7*7. Les différentes tailles de fenêtre sont :

Pour un filtre 3*3 : 1 pixel de part et d'autre du pixel transformé, soit 9 pixels. Pour un filtre 5*5 : 2 pixels de part et d'autre du pixel transformé, soit 25 pixels. Pour un filtre 7*7 : 3 pixels de part et d'autre du pixel transformé, soit 49 pixels. Le filtre 7*7 a le plus grand nombre de pixel, donc donne une meilleure résolution. Les différents filtres utilisés (7*7) sont représentés par le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Matrice 7*7 des filtres directionnels SOBEL

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

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

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

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

3) Extraction de linéaments

Cette étape est la dernière partie dans le traitement d'images en vue de l'identification des linéaments. Après l'application des techniques ci-dessus citées, l'image est rehaussée et les contours et limites sont mis en évidence. Avant l'extraction des linéaments les éléments linéaires d'origine anthropique (routes, pistes) sont recensés et superposés aux images afin d'éviter de les considérer comme des linéaments.

L'identification et le tracé des linéaments se fait ensuite à l'écran. Sur les images filtrées, les linéaments sont matérialisés par les limites formées par les zones sombres et claires (Ta et al, 2010). Les discontinuités et les changements brusques de tonalité observés sur les images rehaussées sont représentés par des segments de droite (Koita et al, 2010). Selon Saley (2003) l'échelle d'observation peut jouer sur le nombre de linéaments identifiés, parfois sur la direction dominante d'une classe de linéaments et suggère l'échelle 1/200 000 pour une identification maximale des linéaments.

4) Validation des linéaments

Les linéaments identifiés devront être validés. En effet les linéaments sont des discontinuités images qui sont censés traduire des phénomènes tectoniques profonds mais ce n'est pas toujours le cas. D'où la nécessité de valider la carte de linéaments obtenus suite à un traitement d'images par confirmation de la relation supposée entre linéaments et fractures.

Les techniques classiques de validation reposent sur l'utilisation des cartes géologiques et les relevés de fractures sur affleurements rocheux. On compare ainsi les directions principales mises en évidence avec les directions relevées sur les affleurements ou sur la carte géologique de la zone d'étude.

Ces techniques présentent cependant des limites lorsqu'on ne dispose pas de cartes géologiques détaillées de la zone ou lorsque l'épaisseur de l'altération est telle que des affleurements ne sont pas observables.

Dans le cas de cette étude, nous avons utilisé les relevés de fractures sur affleurements rocheux déterminés dans une étude antérieure.

5) Analyse statistique des données de forages

Lors de l'exécution d'un forage, plusieurs informations sont enregistrées par les équipes de foration afin de mieux comprendre l'ouvrage et de faciliter son exploitation à long terme. Ainsi sur les fiches de forages, on peut trouver des informations telles que : la profondeur totale forée, le niveau statique de la nappe, l'épaisseur d'altération etc.

Afin de mieux apprécier l'influence des paramètres ci-dessus cités sur les débits des forages des analyses statistiques sont réalisées sur les données de forages de l'ensemble de la ville de Ouagadougou.

On recherche également une corrélation sur l'ensemble de ces paramètres à partir d'une analyse en composantes principales.

Toutes ces analyses permettront de mettre en évidence les liens ou l'absence de liens entre l'évolution des différents paramètres. La connaissance de ces relations et leur interprétation permettra d'orienter au mieux les futures campagnes d'hydraulique dans la zone d'étude.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

A. TAITEMENT D'IMAGE

1) Analyse en composante principale

L'analyse en composantes principales a permis de dé-corréler les bandes et de rassembler l'information sur la première bande de L'ACP à savoir l'ACP1. En effet il concentre à lui seul 99% de l'information (figure 6). Les linéaments mis en évidences sont représentés en rouge sur la figure 7.

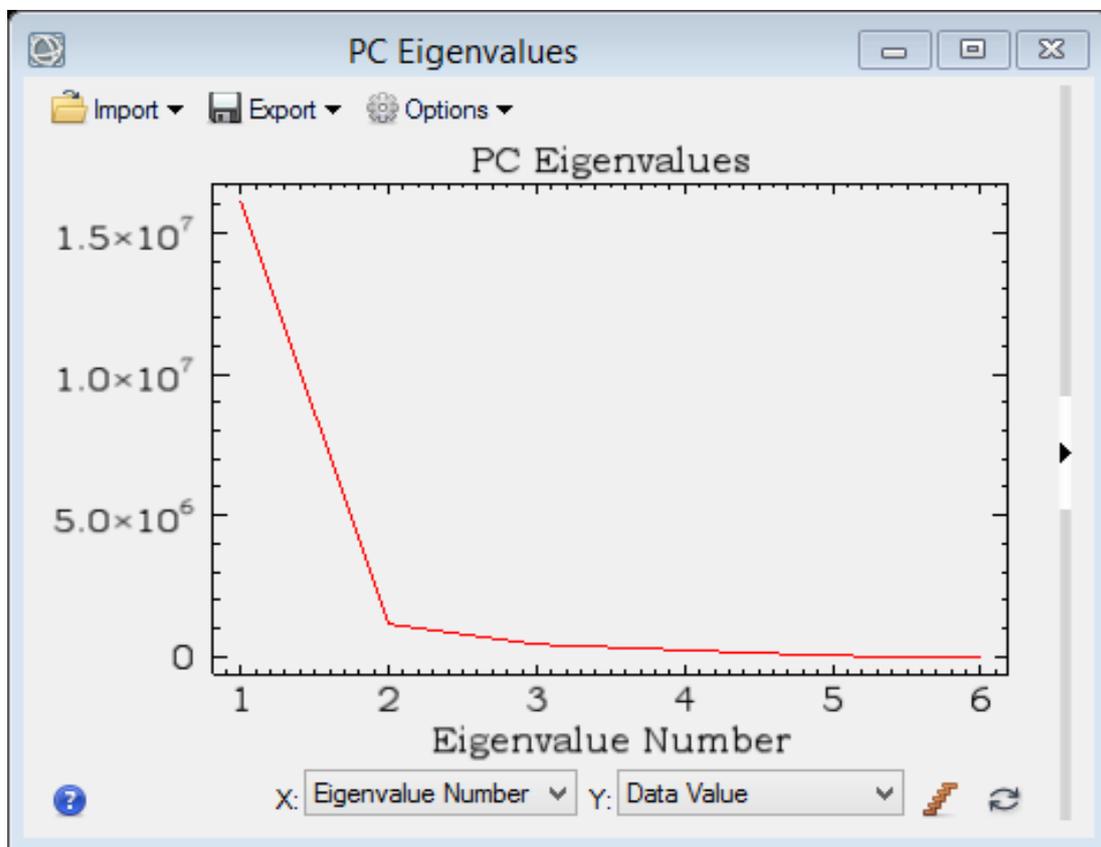


Figure 6: Valeur des différentes bandes

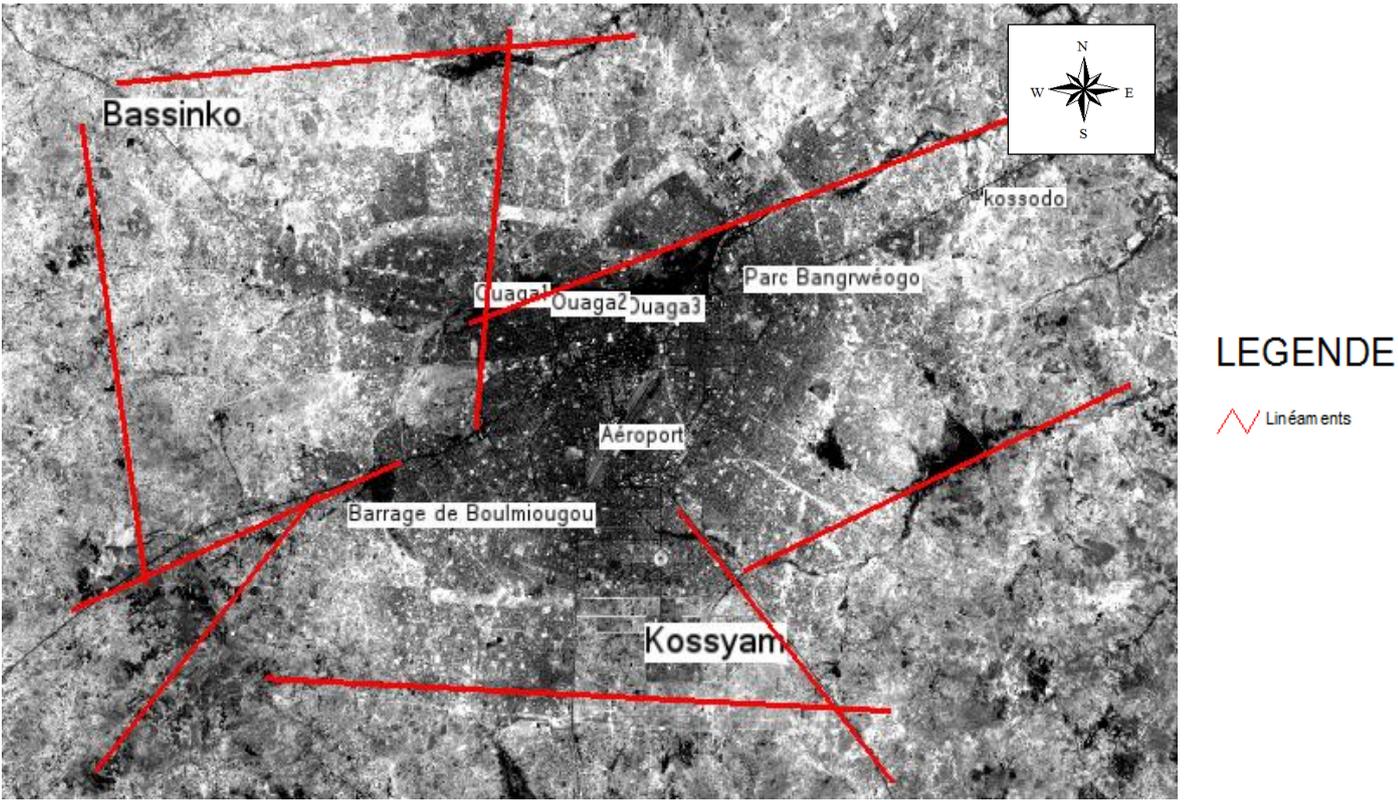
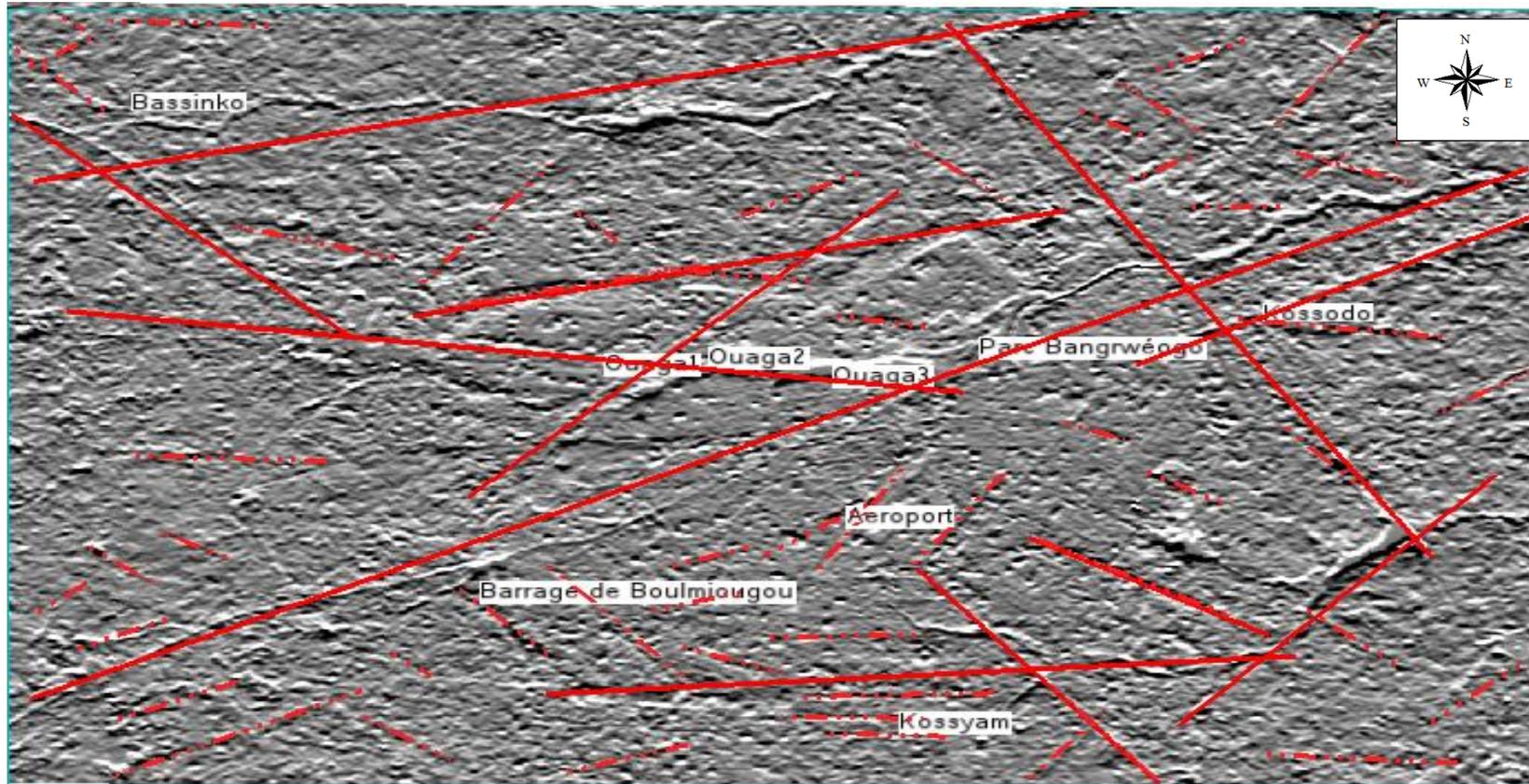


Figure 7: Première composante de l'ACP

2) Filtres directionnels Sobel

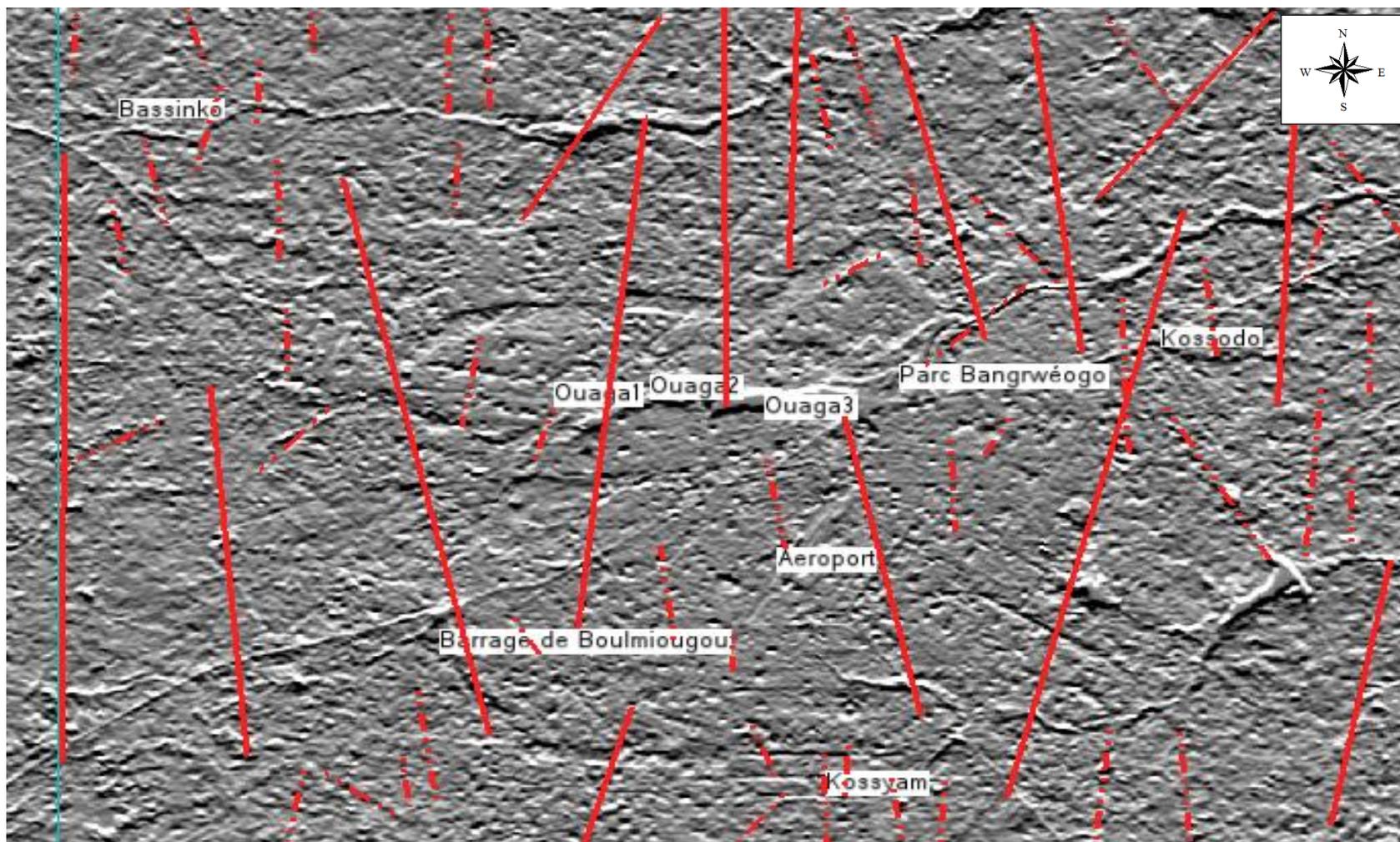
Les filtres Sobel 7*7 d'angles variables (N-S ; E-O ; NE-SO ; NO-SE) ont été appliqué à la combinaison de bande (TM6 - TM7) / (TM6 + TM7). Les figures ci-dessous présentent les linéaments mis en évidence sur l'image issu du filtrage et du rehaussement directionnel N-S ; E-O ; NE-SO ; NO-SE :



LEGENDE

 Linéaments

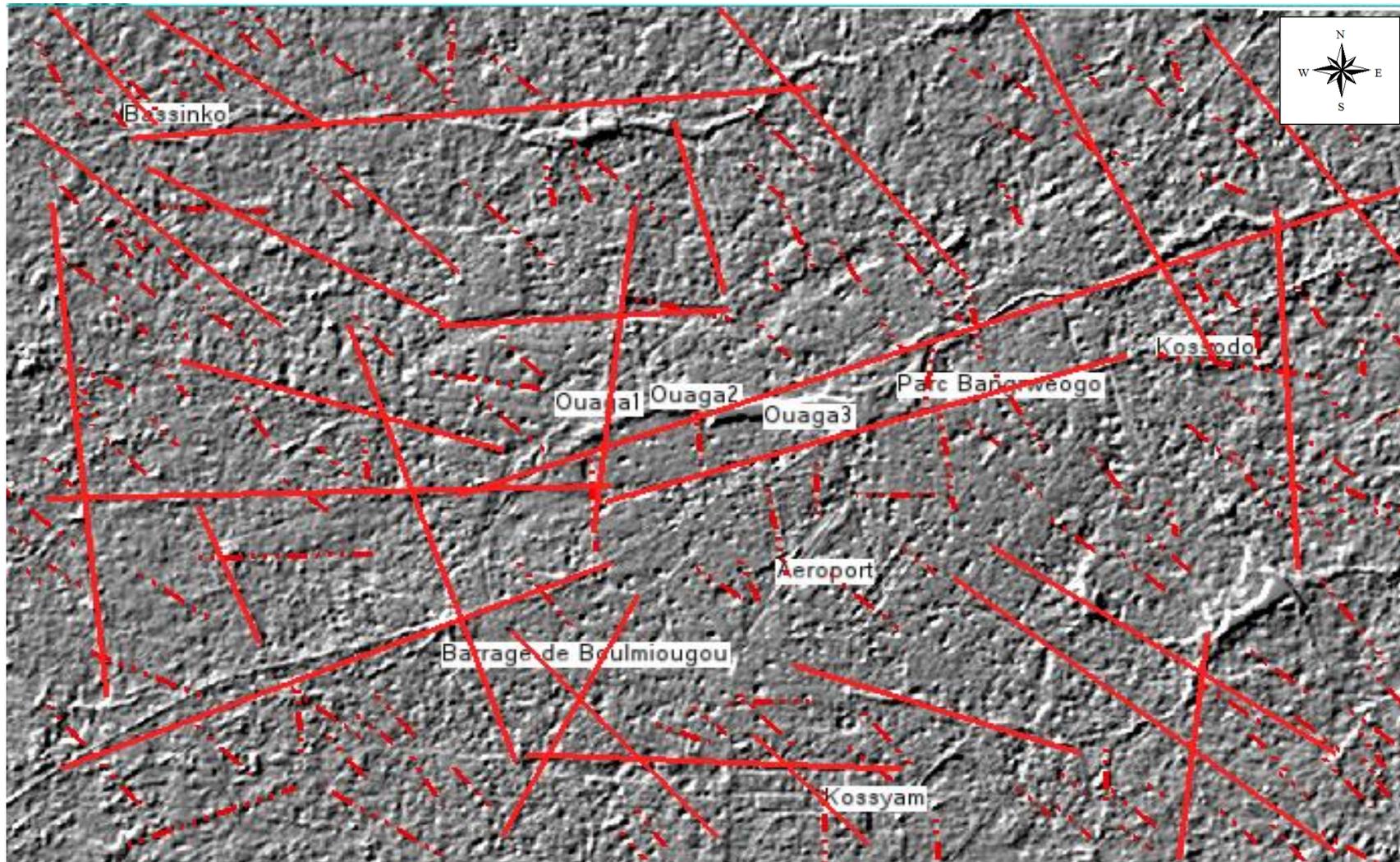
Figure 8: Image issue du filtrage et du rehaussement directionnel N-S



LEGENDE

Linéaments

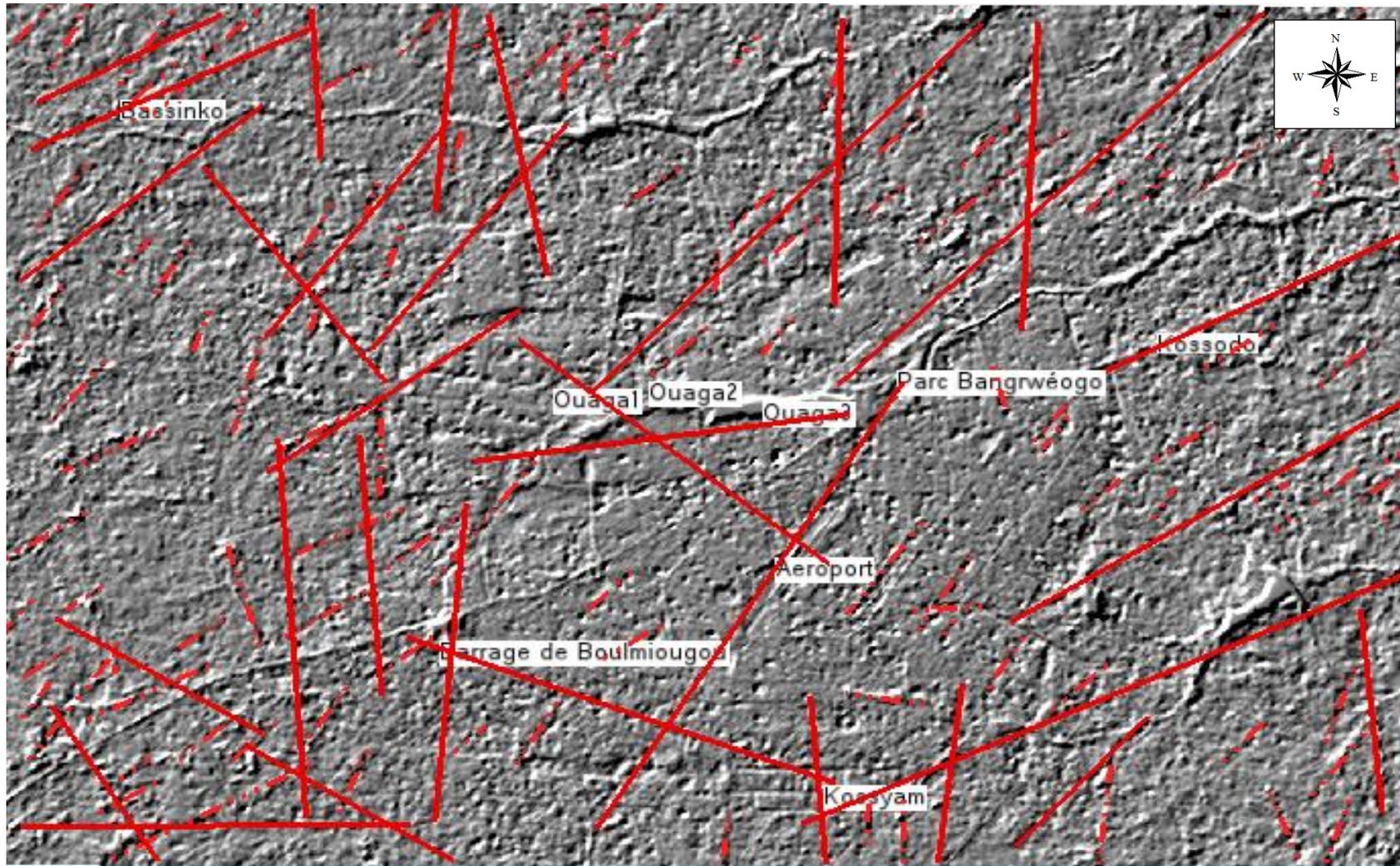
Figure 9 : Image issue du filtrage et du rehaussement directionnel E-O



LEGENDE

 Linéaments

Figure 10 : Image issue du filtrage et du rehaussement directionnel NE-SO



LEGENDE

Linéaments

Figure 11 : Image issue du filtrage et du rehaussement directionnel NO-SE

3) Composition colorée

Sur la figure 12, les surfaces en vert foncé correspondent à des résineux jeunes, le vert clair à des résineux en régénération et le vert bleuâtre à des résineux mars. Les différentes surfaces noires à travers toute l'image représentent le réseau hydrographique (lacs, rivières etc.). (Yaméogo, 2008)

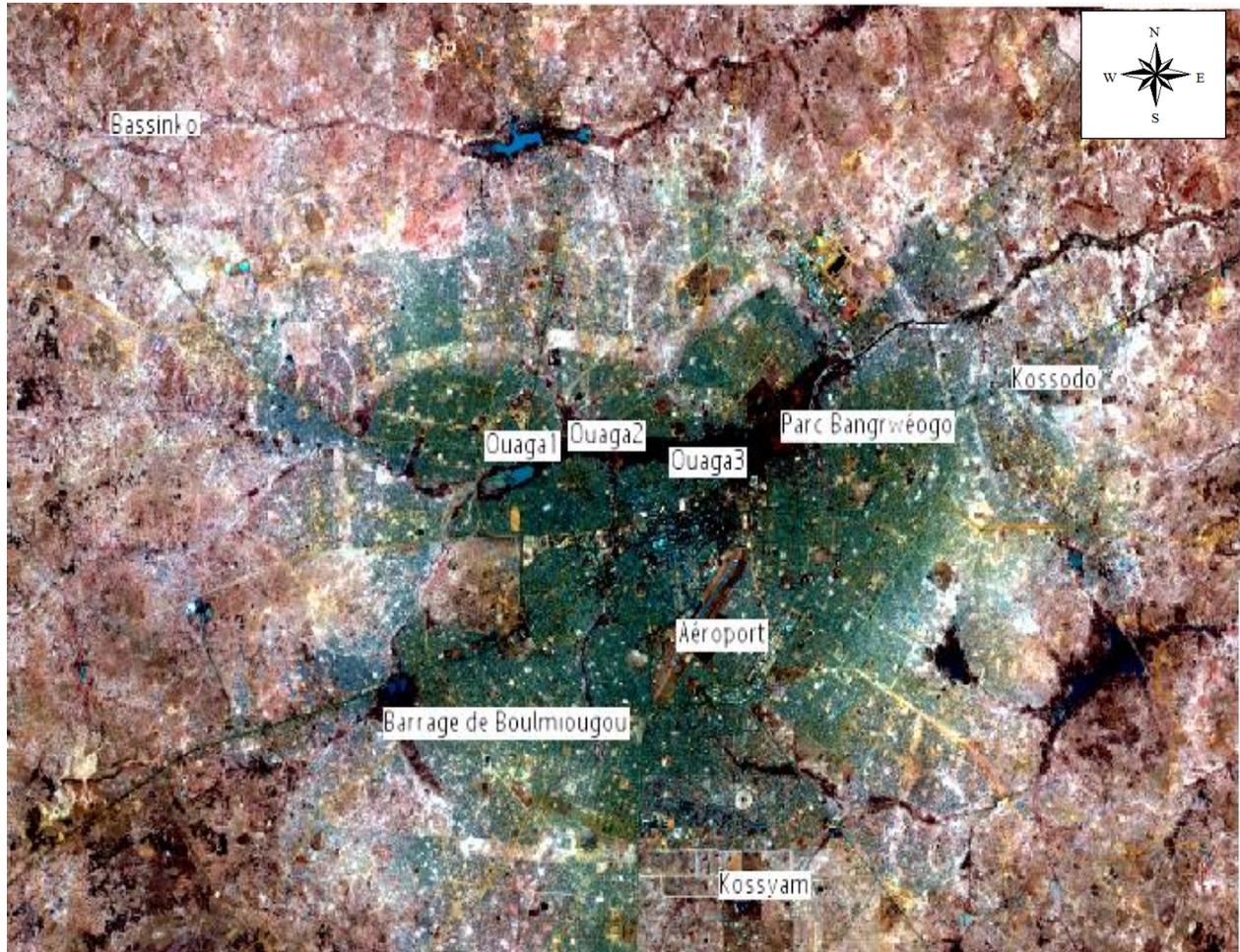


Figure 12 : Composition colorée appliquée à l'image satellitaire (Ouattara, 2016)

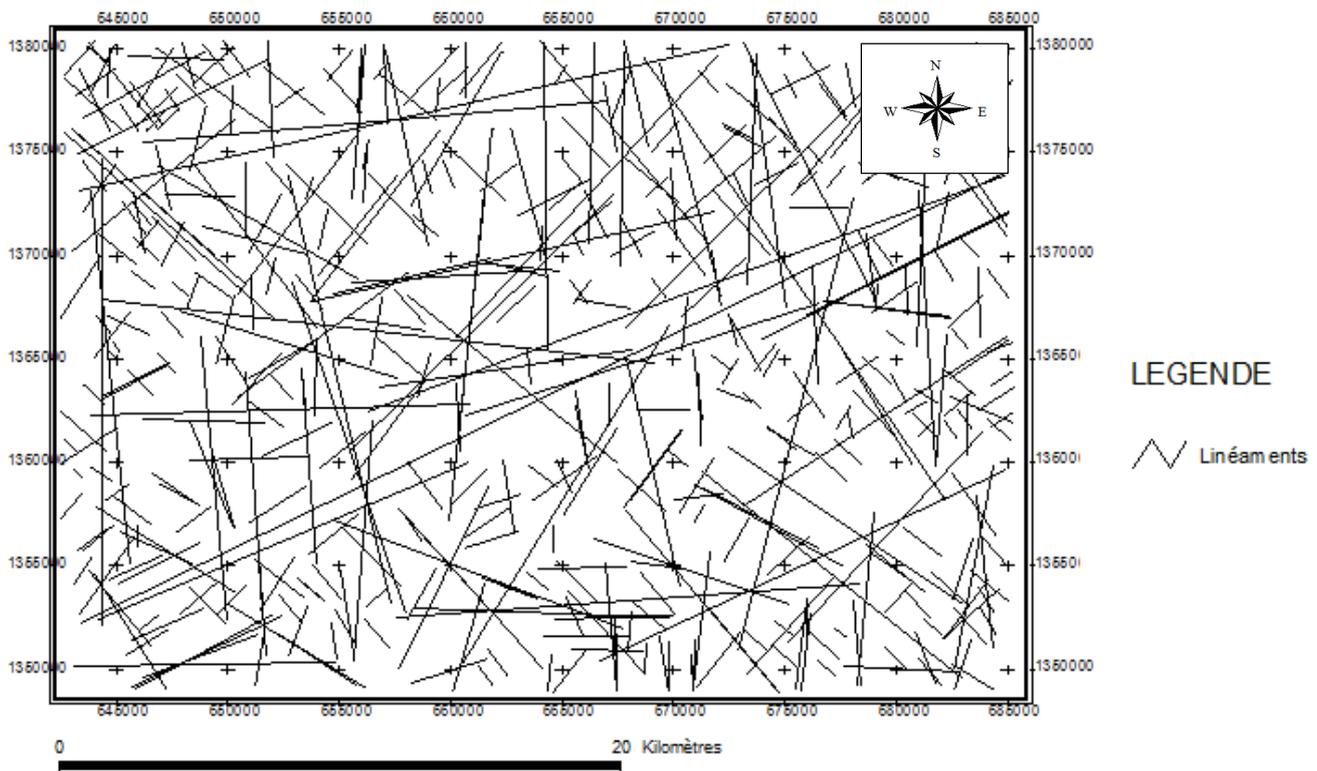
B. CARTE DE LINEAMENTS

La carte de linéaments de la ville de Ouagadougou montre que la région de Ouagadougou est bien fracturée et plusieurs intersections de linéaments sont présentes. Certaines des directions principales correspondent à celles du réseau hydrographique qui est donc orienté par la fracturation.

L'exploitation de l'image satellitaire fait ressortir des fractures d'importance régionale. Statistiquement les directions $N0^\circ$, $N60^\circ$ et $N170^\circ$ sont prédominantes au niveau des linéaments multi-kilométriques.

Une carte de synthèse a été obtenue en combinant les quatre cartes de linéaments obtenue dans les 4 directions, tout en procédant à une élimination de linéament qui se répétait plus d'une fois. La carte de synthèse est, quant à elle, donnée à la figure 12. Le tableau 4 nous montre les caractéristiques des différentes cartes obtenues.

Carte Linéamentaire de la ville de Ouagadougou



Carte 1 : Carte de linéament de la ville de Ouagadougou (Ouattara, 2016)

1) Etude de la fracturation

Une carte de linéaments a été élaborée. Elle couvre toute la zone d'étude allant de l'amont, la zone d'entrée (barrage de Boulmiougou) vers l'aval (zone exutoire Kossodo). Ce sont au total 85 méga linéaments et 178 linéaments secondaires que nous avons repérés. L'ensemble des détails se trouvent à l'annexe IV.

L'analyse a consisté à mesurer les angles que les linéaments font avec le Nord, et à calculer leurs longueurs cumulées. Ensuite ils ont été regroupés par classe de 10° en 10° pour leur traitement statistique, dans le but d'obtenir des classes de directions préférentielles qui sont reportées sur des rosaces de distributions directionnelles (figures 12).

Afin de prendre en compte chaque linéament dans la détermination des familles de direction, l'angle des linéaments a été déterminé automatiquement sous SIG à partir des coordonnées des extrémités des linéaments selon l'équation :

Tan α = $\frac{X_{end}-X_{start}}{Y_{end}-Y_{start}}$ avec X_{end} et X_{start} les longitudes (en m) respectives des extrémités du linéament, Y_{end} et Y_{start} les latitudes (en m) respectives des extrémités du linéament, a la mesure de l'angle exprimée en radian puis convertie en degré et notée θ . Les résultats obtenus sont inscrits dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 2 : Caractéristique de l'ensemble des Linéaments

Classe de direction	Nombre	Distance	%Nombre	%Distance
N-S	88	414388,793	33,46	31,44
E-O	33	276200,947	12,55	20,96
NE-SO	84	388261,193	31,94	29,46
NO-SE	58	239150,637	22,05	18,14

La figure ci-dessous présente la répartition sous forme de Rosace directionnelle

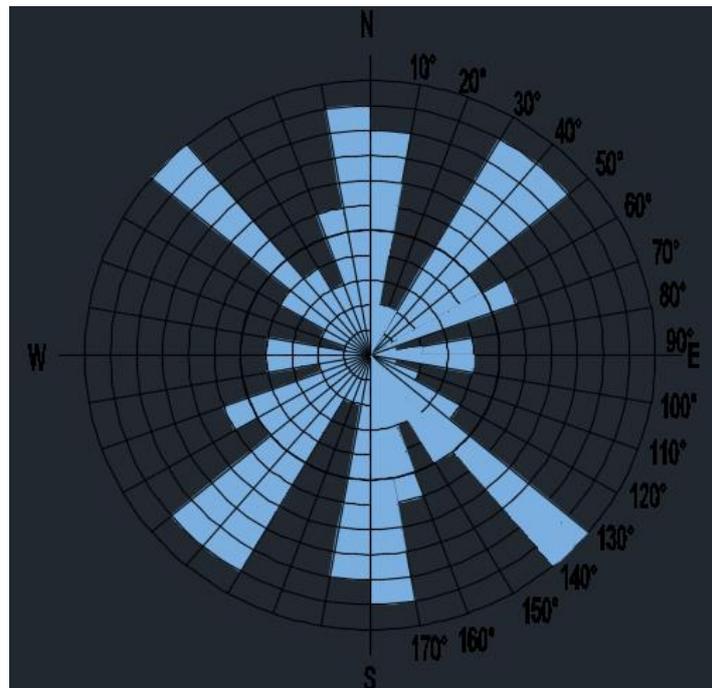


Figure 13 : Rosace directionnel de l'ensemble des linéaments

Les principales directions de linéaments représentées sur la rosace directionnelle sont : N-S ; NE-SO : N0-10° ; N30-40° ; N40-50° ; N130-140° ; N170-180°

Dans une proportion plus faible les directions N40-50° et N160-170° sont également représentées.

2) Analyse des Linéaments,

L'analyse statistique des linéaments a été explorée par plusieurs auteurs afin d'étudier la géométrie du réseau de linéaments et d'en dégager les directions dominantes à l'échelle régionale (Pretorius et Partridge, 1974 ; Deslandes et Gwyn, 1991).

L'analyse directionnelle de toutes les fractures relevées montre qu'il existe trois familles principales de directions privilégiées. On distingue par ordre de fréquence et d'importance décroissante les directions suivantes :

- une famille avec ; N130°-140° ; N170°-180° ; N30°-40° ; N40°-50°
- une famille avec N0°-10° Ces directions sont conformes aux deux directions prédominantes de la phase orogénique majeure éburnéenne (2150-2100 Ma) qui a affecté toutes les formations géologiques du Burkina, notamment celles de la région de Ouagadougou. YAMEOGO ;(2008)

Il est généralement conseillé de faire un contrôle par des relevés de terrain pour confirmer ou non l'existence des linéaments.

3) Comparaison avec des résultats antérieurs

La tectonique du Burkina est dominée par des fractures de directions NE-SW et NNE-SSW. Ces 2 directions sont représentées sur la carte de linéament de Ouagadougou par les directions N40-50° et N20-30°. Par ailleurs les mesures de terrain effectué par Yaméogo ; (2008) qui concordent parfaitement avec les directions principales et celles des injections de filons de quartz et de pegmatite sur l'affleurement (carrière de Kanazoé), a mis en évidence les directions N0°-10° ; N30°-40° ; N40°-50° ; N130°-140°.

Une différence apparait au niveau de la direction N170°-180° qui est bien représentée dans notre étude mais pas dans les études antérieures (Yaméogo, 2008). Cette différence peut être due à un biais d'échelle. Cette direction est néanmoins l'une des 4 directions d'Afrique de l'Ouest (E-O ; NE-SO ; N-S et NO-SE).

Les principales directions présentes sur la carte de linéament sont presque identiques à celles des études précédentes.

La figure ci-dessous présente l'histogramme de la fracturation d'une étude antérieure ;

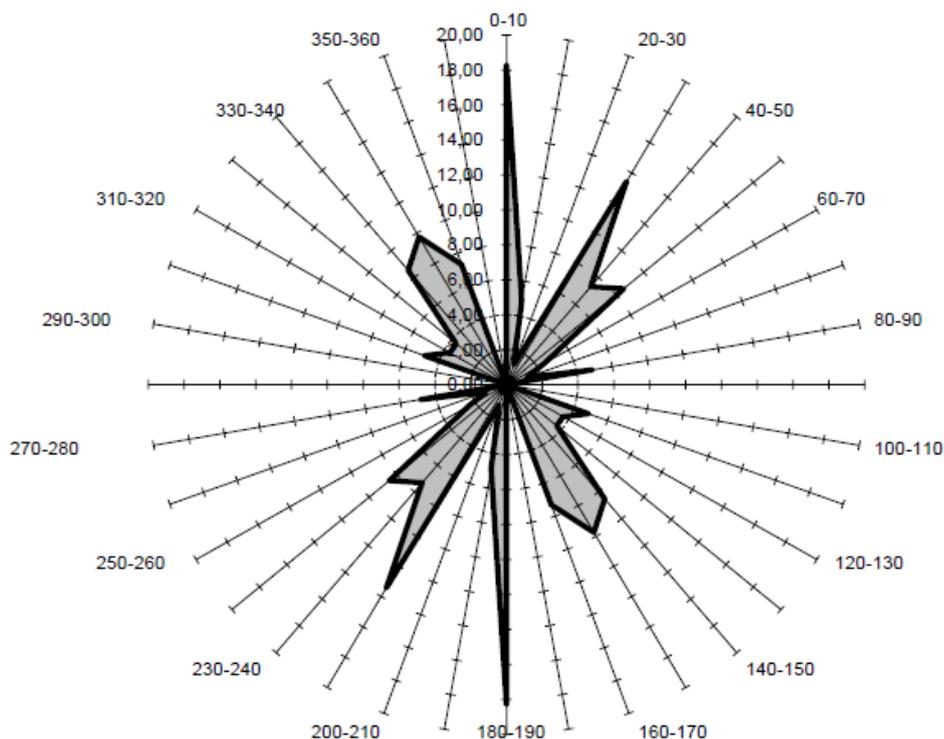


Figure 14 : Rosace directionnel des linéaments relevés à l'affleurement (Yaméogo, 2008)

C. SUPERPOSITION DE LA CARTE DE LINEAMENT ET DES FORAGES

L'identification des fractures contribuant aux écoulements peut se faire sur la base de techniques utilisant les directions des paléo-contraintes, des données gravimétriques et sismiques ; (Gaviglio, 1985) ; (Delaney et al, 1986) ; (Chorowicz et Deffontaines, 1993) ; (Lacombe et al. ,1996). Ces techniques ont été utilisées avec succès dans le fossé du Rhin et ont permis d'identifier les grandes fractures participant à l'écoulement (Chorowicz & Deffontaines, 1993). Dans cette étude, une fois réalisée la validation des linéaments, nous proposons d'identifier le rôle des linéaments dans les circulations souterraines à partir des données de différents forages. En effet, Andersson et al. (1992) stipulent qu'en plus de la cartographie linéamentaire, il est nécessaire de faire une analyse hydrogéologique en vue de l'identification et l'étude d'un certain nombre d'indices révélateurs de l'occurrence de l'eau,

notamment les phénomènes associés aux zones de recharge : la persistance du sol humide pendant la saison sèche, la nature lithologique des roches et la densité du réseau de drainage. Dans le cas des fracturations ouvertes, l'occurrence de l'eau souterraine devient plus perceptible à travers les linéaments visibles associés au développement de la végétation (alignement d'arbres) qui devient un indicateur indirect. La technique proposée consiste à analyser les corrélations entre le débit des forages et leur distance au linéament le plus proche. Les forages sont discriminés suivant deux classes de débit, la première correspondant aux 95 forages ayant un débit supérieur à 7 m³/h à l'air lift (forages à fort débit) et la seconde correspondant aux 43 forages ayant un débit à l'air lift inférieur à 7 m³/h (forages à faible débit). Cette classification (forages à fort débit et à faible débit) correspond à celle adoptée par l'Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) pour le Projet Développement Durable de Ouagadougou (PDDO, 2014).

Dans le socle granitique de Ouagadougou la fracturation joue un rôle déterminant dans la circulation des eaux souterraines en profondeur. En analysant la distribution des forages dans le champ des fractures de la carte on remarque que :

Les filons qu'ils soient de pegmatites ou de quartz observés sur le terrain sont orientés E-O, N-S et NE-SO et NO-SE.

Toutes les directions de fracturation n'ont probablement pas le même comportement hydraulique, les zones de fractures peuvent être des zones de drainage préférentiel des eaux et les zones les plus vulnérables.

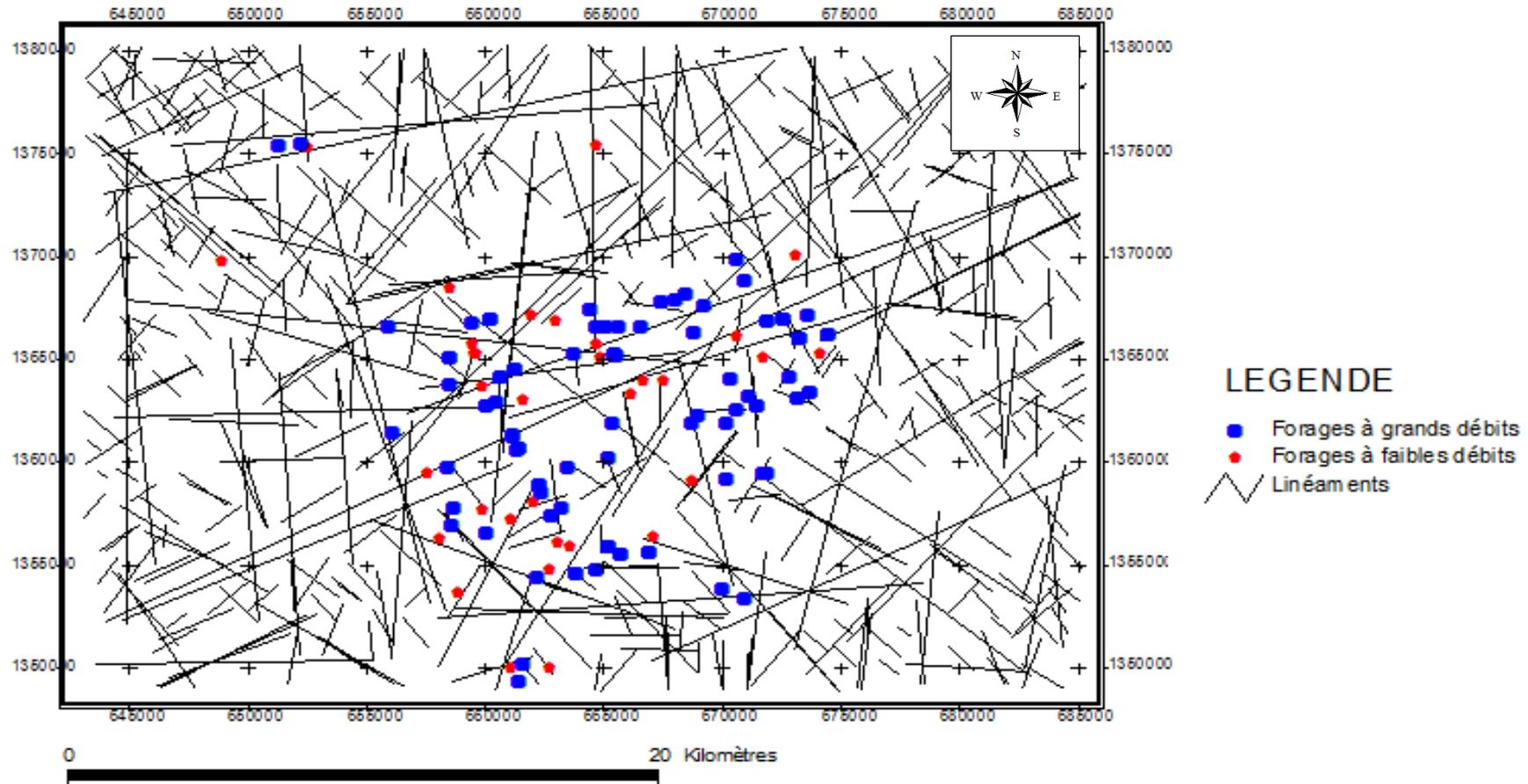
La plupart des forages surtout ceux positionnés sur les nœuds de fractures ont de bons débits : quatorze (14) forages situés sur des fractures débitent plus 30 m³/h et, 54 ont un débit entre 10 et 30 m³/h.

Ces débits confirment le caractère important au sein du socle fissuré de la perméabilité induite par les fractures qui améliore les débits.

Nous disposons d'un total de 134 forages, dont 95 ont des débits supérieur à 7 m³/h et 39 ont des débits inférieur à 7 m³/h (on s'est plus intéressé aux forages à fort débit parce que le but ici est de rechercher les sites productifs). A partir de ces données, une analyse statistique devra toutefois confirmer ces observations.

La figure ci-dessous présente la superposition des linéaments majeurs aux forages fort débit et à faible débit.

Superposition des linéaments et des forages



Carte 2: Superposition des linéaments majeurs au forage à fort et faible débit

V. ANALYSE DES DIFFERENTS PARAMETRES DE PRODUCTIVITE

A. INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES

1) Corrélation entre les débits des forages et leurs distances aux linéaments majeurs

Les débits des forages sont généralement élevés, ils varient entre 0.9 et 72 m³/h (débit à l'air lift durant la foration). Sur notre échantillon de 134 forages dans la ville de Ouagadougou, 95 ont un débit supérieur ou égal à 7 m³/h, et 39 ont un débit inférieur à 7 m³/h. La superposition des forages et de la carte de linéament montre que la plupart des forages à fort débit sont sur des linéaments majeurs ou à proximité de ceux-ci. En revanche, les forages à faible débit ne présentent pas d'organisation particulière par rapport aux linéaments (Fig. 16). Il est à noter que dans certaines zones où sont identifiés des forages à fort débit, sont également présents des forages à faible débit, ce qui tend à démontrer que la productivité des forages est localisée et non associée à une zone de socle, dans laquelle les circulations souterraines et la productivité seraient quasi généralisées étendue (Koïta et Al, 2010). Des cas similaires (forages à faible débit à proximité de forages à fort débit) sont connus dans le bassin de la Rivière Jundiaí au sud-est du Brésil (Neves & Morales, 2007) et à Sunnfjord à l'ouest de la Norvège (Henriksen & Braathen, 2005).

Les distances (ligne droite la plus courte perpendiculaire au linéament) de chacun de ces forages (forages à fort débit) au linéament le plus proche ont été calculées afin d'apprécier l'évolution du débit en fonction de la distance entre forage et linéament. Le Tableau 3 montre que, pour ces forages à fort débit, plus le forage est proche d'un linéament et plus son débit est important. Afin de mieux caractériser l'évolution du débit des forages à fort débit en fonction de la distance aux linéaments, nous avons considéré tous les linéaments ayant au moins deux forages à fort débit à proximité.

Une analyse détaillée de l'évolution du débit en fonction de la distance (Tableau 3) a donc été effectuée pour chaque linéament comprenant au moins deux forages à fort débit dans son voisinage (Fig. 17).

Cette analyse détaillée ne concerne que les forages à fort débit situés à une distance inférieure à 1 km des linéaments. Sept (07) linéaments de taille et d'orientation variables ayant au moins deux forages à fort débit dans leur voisinage répondent à ce critère de distance (1 km). Les forages à faible débit ne sont pas retenus pour cette analyse en raison de l'absence de corrélation entre distance au linéament et débit.

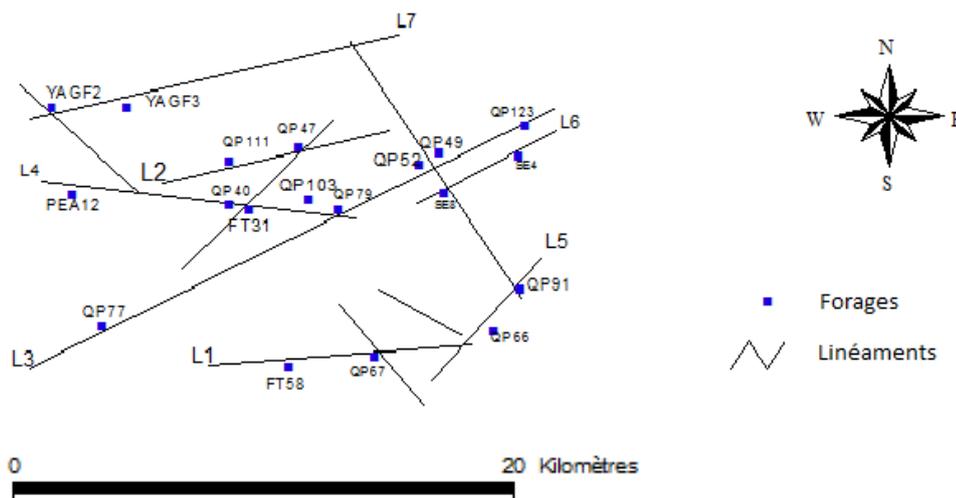
Le tableau ci-dessous présente l'évolution du débit en fonction de la distance entre forage et linéament :

Tableau 3: Evolution du débit en fonction de la distance entre forage et linéament

Linéament	Forage	Distance (m)	Débit (m ³ /h)
L1	QP67	93,66	24
	FT58	103,45	13,5
L2	QP47	100,63	20
	QP111	118,47	9
L3	QP123	51,6	45
	QP79	292,37	30,1
	QP77	404,16	9,9
	QP52	678,11	9
	QP49	765,33	8,57
L4	QP40	340,19	18,8
	FT31	498,53	18
	PEA12	526,21	13,58
	QP103	973,58	11,612
L5	QP91	219,74	19
	QP66	616,97	7,5
L6	SE8	116,17	22,5
	SE4	294,14	12,63
L7	YAG F2	256,61	9
	YAG F3	330,43	8

La figure ci-dessous présente les forages à fort débit et des linéaments utilisés pour l'analyse productivité-distance:

Cartographie des forages à fort débit et des linéaments utilisés pour l'analyse productivité-distance.



Carte 3 : Cartographie des forages à fort débit et des linéaments utilisés pour l'analyse productivité-distance

2) Description des paramètres de forage

Une analyse statistique a été menée à partir de données de 134 forages réalisés dans la ville de Ouagadougou. Les paramètres statistiques qui caractérisent ces forages sont consignés dans le tableau 1.

Les débits des forages (débits estimés) varient entre 0,9 m³/h et 72 m³/h avec une moyenne de 14.70 m³/h. Sur l'ensemble des 134 forages, 98 (soit 73.13 %) ont un débit supérieur à 7 m³/h. 20 forages (soit 14%) des débits sont supérieurs à 20 m³/h qualifié de débit fort par le CIEH.

Dans la ville de Ouagadougou, les profondeurs des forages réalisés varient entre 33 m et 74.88 m avec une profondeur moyenne de 57.54 m. Pour ce qui est de l'épaisseur d'altération, avec un minimum de 14.63 m, le maximum d'altération culmine autour de 50.71 m. Enfin les niveaux statiques varient entre 2.15 m et 37.70 m pour une moyenne de 13.54 m. Les coefficients de variation pour l'ensemble de ces paramètres sont inférieurs à 100%. Ce qui met en évidence une certaine homogénéité des variables donc une faible dispersion.

Tableau 4 : Statistique descriptive des paramètres de forage

Variable	Débit (m ³ /h)	Profondeur total(m)	Altération (m)	Niveau statique (m)
Minimum	0,9	33	14,63	2,15
Maximum	72	74,88	50,71	37,70
Moyenne	14,70	57,54	30,40	13,54
Ecart type	12,07	9,17	8,64	7,73
CV	2,24	-0,38	0,19	1,12

3) Corrélation entre débit et paramètre de forage

Tableau 5 : Coefficients de corrélation

Couple de paramètre	Coefficient de corrélation
Débit-Profondeur forée	0,015
Débit- Profondeur d'altération	0,064
Débit- Niveau statique	-0,199

Le tableau 5 montre une absence de relation significative entre les différents paramètres pris individuellement avec le débit. Cela se traduit par des valeurs de coefficients de corrélation faibles. Néanmoins dans la suite nous montrons que des tendances peuvent se dégager sous certaines conditions lorsqu'on observe les nuages de points.

a) Corrélation entre débits et épaisseur d'altération

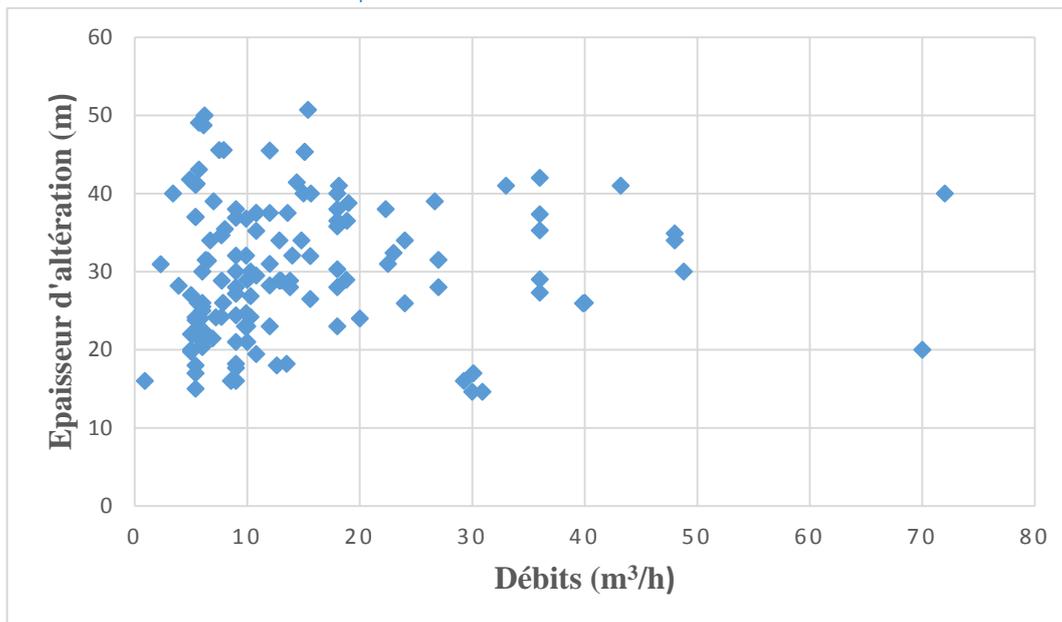


Figure 15 : illustration des débits en fonction des épaisseurs d'altération

Tableau 6 : Pourcentage des débits en fonction des classes d'épaisseur

Epaisseur d'altération	[0;20]	[20;30]	[30;40]	[40;70]	[70;+]
Débit					
[0;7]	4,5%	11,9%	6,7%	5,2%	0
[7;20]	6,0%	22,4%	19,4%	6,7%	0
[20;30]	1,5%	2,2%	3,7%	0,7%	0
[30;50]	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0
[50; +]	0,0%	0,7%	0,7%	0,0%	0

Des débits importants sont obtenus entre 20 m et 40 m, la majorité des forages à faible débit (<7 m³/h) soit 65.72% se retrouvent également dans cette plage. Il semble que le paramètre épaisseur d'altération à lui seul ne saurait garantir l'obtention d'un débit important mais que l'épaisseur d'altération augmente la probabilité d'obtenir des débits importants. Ces résultats sont similaires à ceux mis en évidence par Kouassi et al. (2012). Cet auteur stipule que dans les formations granitiques, la majorité des forages productifs se situe entre 5 et 45 m. Par ailleurs, de façon générale lorsque la profondeur d'altération est importante la probabilité d'obtenir un

débit important est très grande. Néanmoins il fait remarqué que cette relation n'est pas linéaire car dépendant de la nature de la formation sous-jacente. Dans le même ordre d'idée, Koïta et al. (2010) affirme qu'une couche d'altération importante est généralement présente dans les localités ou des débits importants sont implantés.

En effet dès lors que la couche d'altération est assez importante et considérée comme un acquis, la productivité du forage dépendra de la quantité d'eau contenue dans cette altération, de sa capacité à libérer l'eau qu'elle contient, puis de la capacité des fractures sous-jacentes à drainer le réservoir d'altérites.

b) Relation entre débits et profondeur totale

La figure ci-dessous nous montre l'évolution des débits en fonction de la profondeur totale ;

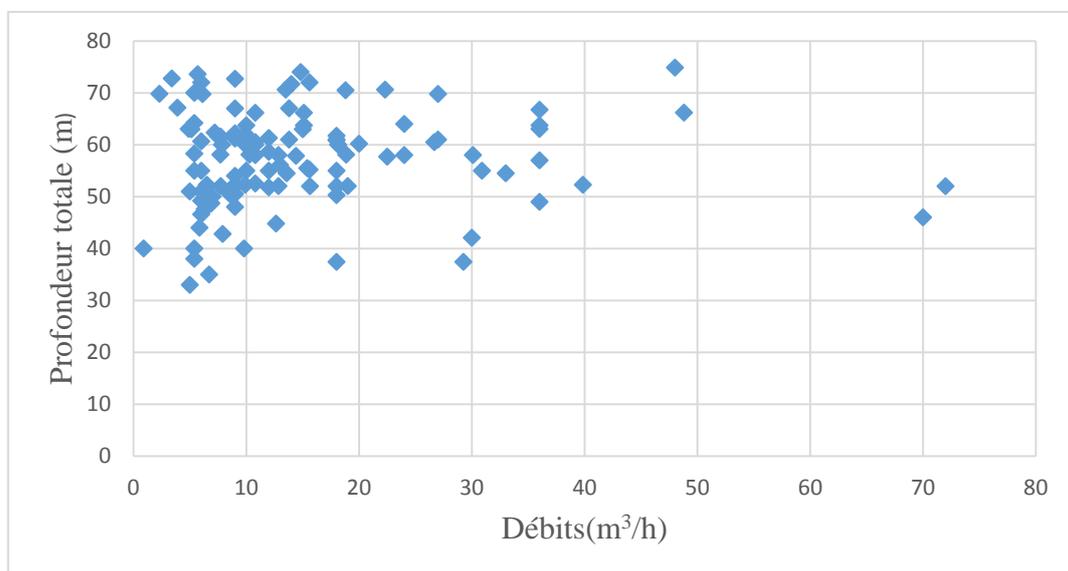


Figure 16 : illustration des débits en fonction des profondeurs totales

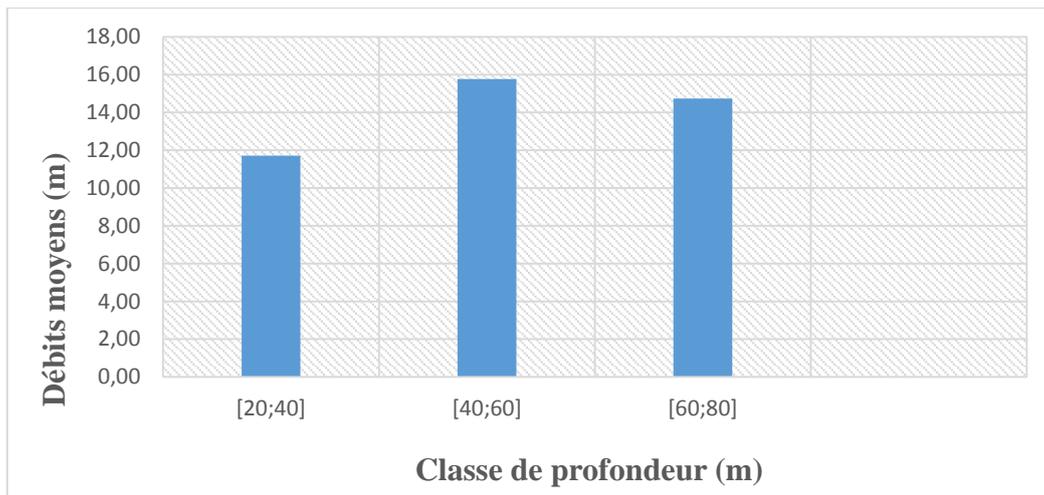


Figure 17 : illustration des débits moyens en fonction des classes des profondeurs totales

Tableau 7 : Pourcentage de forage en fonction du débit et des classes de profondeur

Profondeur totale	[0;30]	[30;40]	[40;50]	[50;60]	[60;70]	[70;+]
Débit						
[0;7]	0,0%	2,2%	6,0%	6,7%	6,7%	3,0%
[7;20]	0,0%	0,7%	2,2%	19,4%	16,4%	4,5%
[20;30]	0,0%	0,7%	0,7%	2,2%	3,7%	0,7%
[30;50]	0,0%	0,0%	0,7%	3,0%	2,2%	0,7%
[50; +	0,0%	0,0%	0,7%	0,7%	0,0%	0,0%

Pour la majorité des forages la profondeur totale se situe entre 50 et 70 m. Dans cette frange on retrouve 64% de débits fort ($> 7 \text{ m}^3/\text{h}$) et 13,4% de débits faibles ($< 7 \text{ m}^3/\text{h}$). On peut remarquer que les débits les plus forts ($> 7 \text{ m}^3/\text{h}$) ne correspondent pas aux profondeurs les plus élevées, l'essentiel de ces débits se situent entre 40 et 60m. On note que le débit moyen croît à partir de 20 m de profondeur jusqu'à 60 et qu'au-delà, le débit moyen a tendance à chuter. Ce qui semble indiquer qu'au-delà de 70 m si un débit conséquent n'est pas obtenu, il n'est pas nécessaire de continuer la foration. En effet à partir d'une certaine profondeur, les fractures deviennent moins denses et certaines se referment ou se colmatent réduisant ainsi les chances de rencontrer de débits importants (Lachassagne & Wyns, 2005). A cet égard Dibi et al. (2004) soutient que les forages les plus productifs se situent entre 40 et 60 m dans une étude menée en contexte de socle en Côte d'Ivoire. Dans le même contexte de socle Ngo et al (2005) et Koita et al. (2010) suggèrent les profondeurs comprises entre 40 et 70m comme profondeurs optimales.

En général, la profondeur maximale forée lors des programmes d'hydraulique est fixée dès le départ du projet ainsi qu'un débit jugé positif. Si ce débit positif est atteint, la foration est arrêtée immédiatement sans tenir compte de la possibilité de trouver des débits plus conséquents en profondeur. Dans le cas contraire certains forages sont prolongés à la recherche du débit imposé. Ce qui explique que les forages les plus profonds ont été occasionnés par l'absence de débit

conséquent dans les premiers mètres. Il n'y a donc aucune considération scientifique dans le choix de la profondeur du forage.

c) Relation entre débit et niveau statique

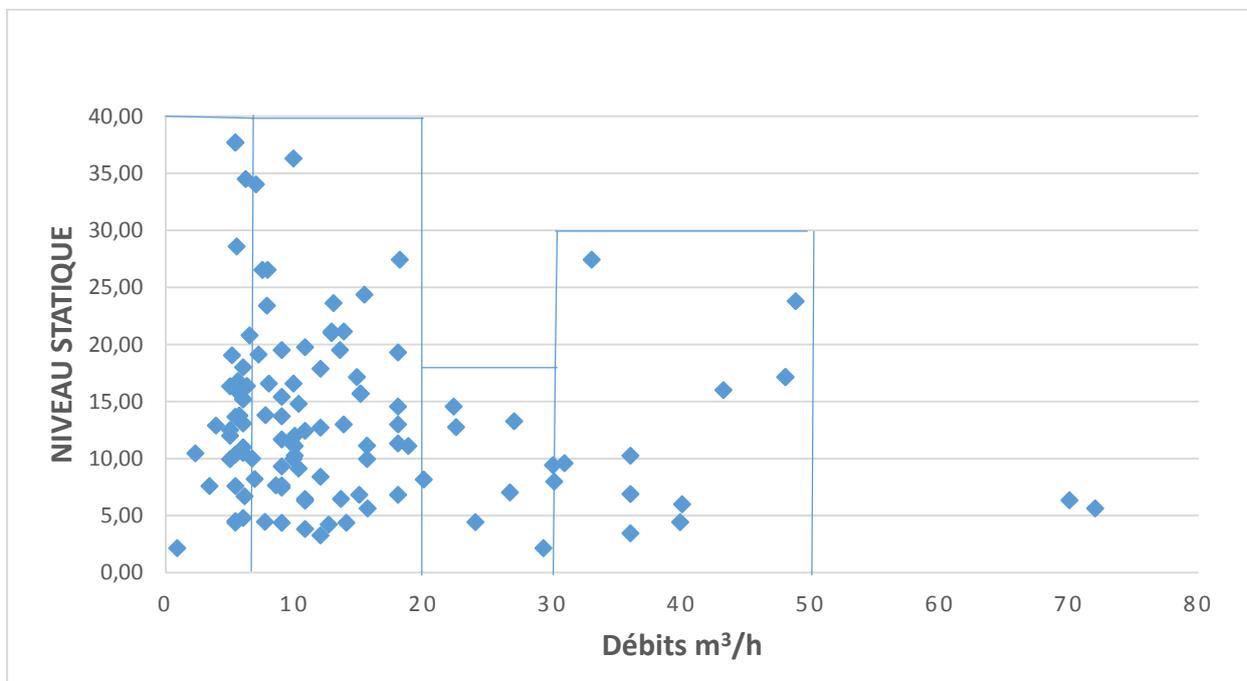


Figure 18 : Illustration du niveau statique en fonction du débit

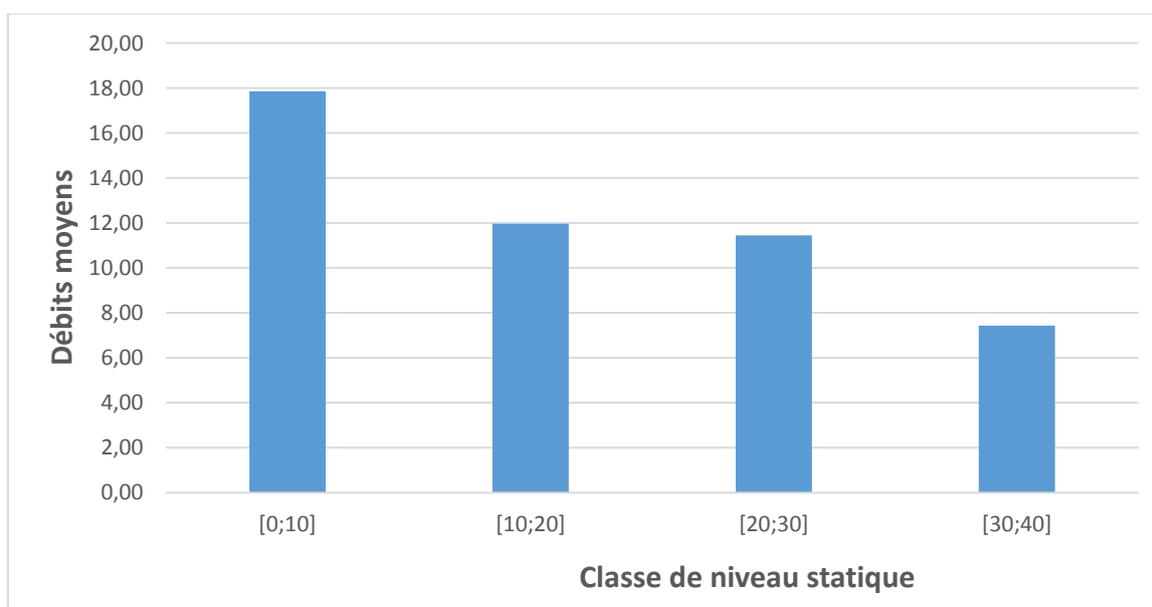


Figure 19 : Histogramme des classes de niveau statique en fonction des débits moyens

Tableau 8: Pourcentage de forage en fonction du débit et des classes de profondeur d'altération

Profondeur d'altération	[0;10]	[10;20]	[20;30]	[30;+]	
Débit					
[0;7]	7,5%	13,4%	0,7%	3,0%	
[7;20]	14,2%	21,6%	7,5%	0,7%	
[20;30]	2,2%	3,7%	1,5%	0,0%	
[30;50]	5,2%	2,2%	0,0%	0,0%	
[50; +	1,5%	0,0%	0,7%	0,0%	134

Sur l'histogramme, on observe que le débit moyen est plus élevé pour des profondeurs de 0 à 10 m et plus le niveau statique augmente plus de débit moyen diminue. Cependant même si les débits importants sont obtenus entre 0 m et 20 m, la majorité des forages à faible débit (<7 m³/h) se retrouve également dans cette plage soit 54.4%.

On peut émettre l'hypothèse selon laquelle le niveau statique permet de nous renseigner s'il y a bien de l'eau dans la fracture ; il nous renseigne déjà sur la quantité d'eau que l'on peut obtenir dans le forage

4) Analyse en composante principale normée

L'analyse en composante principale normée considère toutes les variables prises individuellement dans l'analyse précédente. Elle permet donc d'étudier simultanément les relations entre l'ensemble de ces variables et de déceler éventuellement les variables influencés par plusieurs paramètres.

Tableau 9 : Valeurs propres pourcentages et pourcentages cumulés

	F1	F2
Valeur propre	1,435	1,029
% Variance	35,875	25,735
% Cumulé	35,875	61,61

Les facteurs F1 et F2 expliquent à eux seuls 61 % des variables. Ils peuvent donc permettre d'interpréter les résultats obtenus.

Matrice de corrélation des variables :

Tableau 10 : Matrice de corrélation entre les variables

	Débit	Epaisseur d'altération	Profondeur	Niveau statique
Débit	1	0,016	-0,273	-0,107
Epaisseur d'altération		1	0,273	0,055
Profondeur			1	0,107
Niveau statique				1

L'analyse de la matrice de corrélation des plans factoriels ne fait pas ressortir une relation intéressante entre les différents paramètres. Par contre par rapport aux autres coefficients de la matrice, il existerait une faible corrélation entre la profondeur totale de l'ouvrage et le débit (-0,273). Cette corrélation signifierait que plus la profondeur de l'ouvrage augmente, moins le débit attendu est important.

B. SYNTHÈSE

Les forages ayant les plus grands débits sont essentiellement ceux situés sur les linéaments majeurs ou à proximité.

La profondeur d'un forage n'est pas le gage d'un débit important. Aussi à partir de 60 m de profondeur ou 30 m sous les altérites, les chances de rencontrer des débits importants sont réduites. La puissance des épaisseurs d'altérations influence positivement la productivité des ouvrages, seulement il faut qu'elle soit saturée et assez perméable pour libérer l'eau qu'elle contient dans une couche sous-jacente fissurée. En général les forages implantés sous plus de 60 m d'altération ont un débit supérieur à 7 m³/h.

VI. CONCLUSION

Les différentes techniques de traitement d'images de la ville ont permis d'extraire un réseau de linéaments. La superposition des forages productifs aux linéaments a permis l'identification des différents types de fractures susceptibles de constituer des réservoirs d'eau. La validation de ces linéaments à partir des données de fracturation relevées à l'affleurement par (Yaméogo, 2008) a montré l'existence de ces linéaments. Cette carte résultante a montré que la quasi-totalité des forages à fort débit est située à proximité des linéaments identifiés par imagerie satellitaire.

L'étude détaillée des corrélations spatiales, entre forages à fort débit et linéaments pris individuellement, a permis de constater que plus un forage à fort débit est proche d'un linéament et plus son débit est important. Ce n'est pas le cas des forages à faible débit qui ne présentent pas d'organisation particulière par rapport aux linéaments majeurs. Cette corrélation négative,

entre la productivité et la distance des forages à fort débit au linéament le plus proche, a montré que les linéaments détectés à l'aide de la méthodologie cartographique proposée sont les expressions surfaciques des accidents majeurs de la ville et que ceux-ci jouent un rôle primordial dans les écoulements souterrains de la ville de Ouagadougou.

L'analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages a permis de montrer que les paramètres tels que la profondeur totale, a une influence négative sur les débits car plus on va en profondeur plus la densité de la fracturation diminue. Le niveau statique aussi a une influence positive sur les débits car plus il est élevé plus le débit rencontré est fort. L'épaisseur d'altération a une influence positive sur les débits de par sa capacité à être perméable on voit que les forts débits ont été rencontrés à des grandes épaisseurs d'altération.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- El Hadani, D. (1997). Télédétection et système d'information géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. *Proceedings of Rabat Symposium S3, April 1997. IAHS Publ(242)*, 197-204
- Koita, M., Jourde, H., Ruelland, D., Koffi, K., Pistre, S., & Savane, I. (2010). Cartographie des accidents régionaux et identification de leur rôle dans l'hydrodynamique souterraine en zone de socle. Cas de la région de Dimbokro-Bongouanou (Côte d'Ivoire). *Hydrological Sciences Journal*, 55(5), 805-820.
- Kouamé, F., Gioan, P., Biémi, J., & Affian, K. (1999). Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitaires:exemple de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Cote d'Ivoire. *Télédétection*, 1, 139-156.
- Kouassi, A.M.; Ahoussi, K.E.; Yao, K.A; Ourega, W.E.J.A; Yao, K.S.B; Biemi, J. (2012) Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région de Nzi-Comoé (Centre-est de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 10, 57-74
- Ngo, A. Y., Lasm, T., Koita, M., & Savané, I. (2010). extraction par télédétection des réseaux de fracture majeures du socle Précambrien de la Région de Dimbroko (Centre Est de la Cote d'Ivoire). *Revue Télédétection*, 9(1), 33-42.
- Savané, I., GOZE, B., & Gwin, Q. (1997). Evaluation de la productivité des ouvrages dans le socle par l'étude des fractures et le GIS dans la région nord-ouest de la Côte d'Ivoire. *Hard Rock Hydrosystems (Proceedings of Rabat Symposium S2, May 19)(241)*.
- Savané, I., & Biémi, J. (1998). Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord Ouest de la Cote d'Ivoire). *Télédétection*, 1, 47-64.
- Ta, M., Lasm, T., Jourda, J., Kouamé, K., & Razack, M. (2008). Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des Réseaux de fracture du socle Précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Cote d'Ivoire). *Revue Télédétection*, 8(2), 119-135.
- Yaméogo, S. (2008). *Ressources en eau souterraines du centre urbain de Ouagadougou au Burkina faso, Qualité et Vulnérabilité*. Thèse de Doctorat.
- Dubois, J. (1999). *Identification des linéaments dans les images satellitaires par ajustement et suivi de segments*. Maitrise M. ING.
- DIBI, & B. (2004). Analyse statistique des paramètres influencant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboiso. pp. 22-31.
- Henriksen, H. & Braathen, A. (2005) Effects of fractures lineaments and in situ rock stresses on groundwater flow in hard rock: case study from sunnfjord, western Norway. *Hydrogeol. J.* 14, 444–461. Jourde, H. (2002) Flow behavior in a dual fracture network. *J. Hydrol.* 266, 99–119.

Gaviglio, P. (1985) A fault and stress field analysis in a coal mine (Gardonne, Bouches du Rhône, France). *Tectonophysics* 113, 349–366.

Delaney, P. T. (1986) Field relations between dikes and joints: emplacement processes and paleostress analysis. *J. Geophys. Res.* 91, 4920–4938.

Bessoles (1977). Géologie de l'Afrique : craton Ouest-Africain. *Mémoire B.R.G.M n° 88*.

Savadogo. A. N (1984). Géologie et Hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etudes régionale du bassin versant de la Sissili. *Thèse de Doctorat ès. Grenoble I*.

ANNEXES

ANNEXE I : Caractéristiques des aquifères de socle

ANNEXE I-1 : Schéma de gisement des eaux souterraines de socle (A.N. Savadogo)

ANNEXE I-2 : Coupes types de forages et épaisseurs des altérites des systèmes aquifères du socle

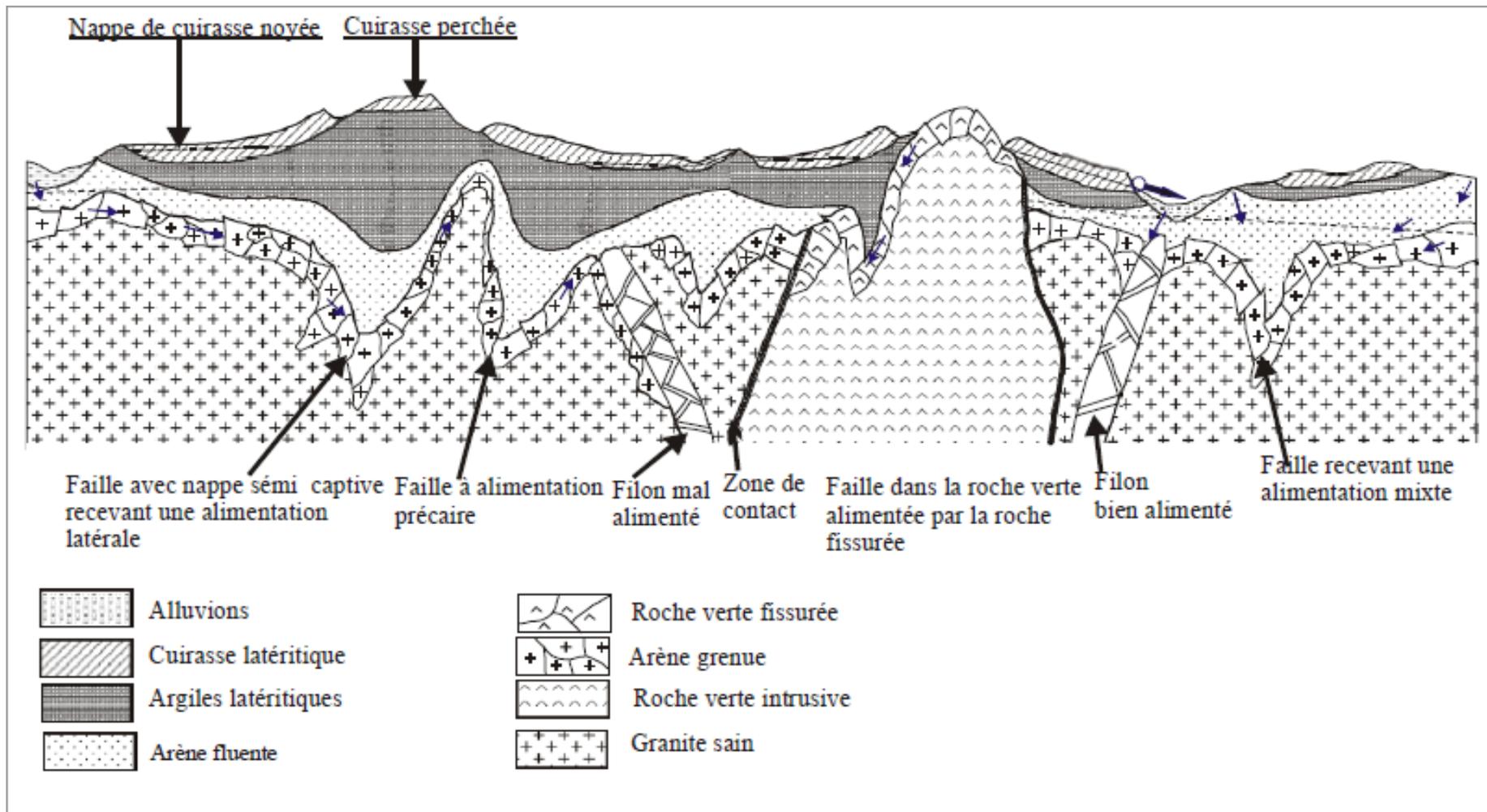
ANNEXE II : Influence de la pluviométrie sur les aquifères

ANNEXE III : Paramètres hydrogéologiques des 134 forages utilisés

ANNEXES IV : Caractéristiques des linéaments obtenus

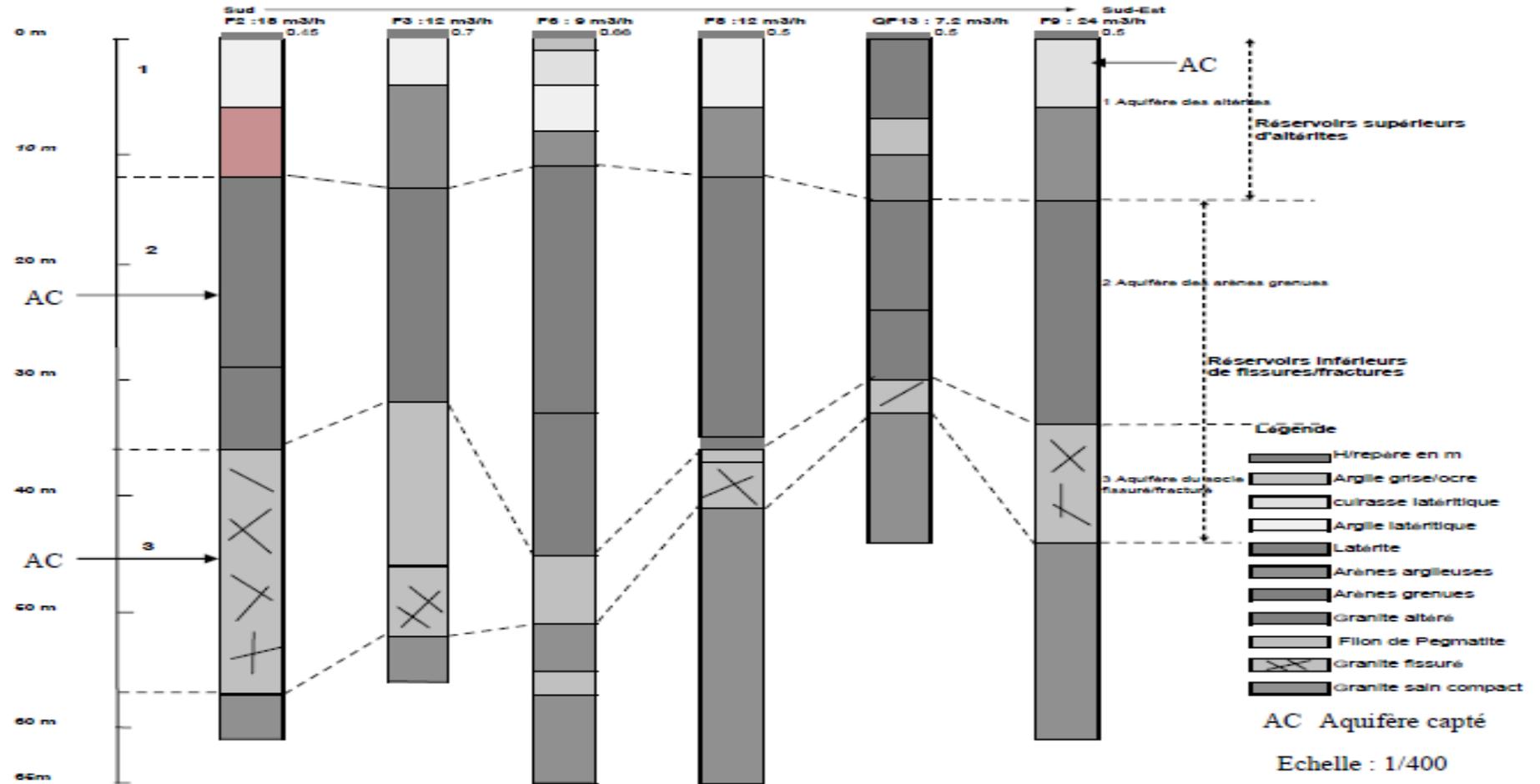
ANNEXE IV-1 : Caractéristique des linéaments

ANNEXE I : Caractéristiques des aquifères de socle



ANNEXE I-1 : Schéma de gisement des eaux souterraines de socle (A.N. Savadogo)

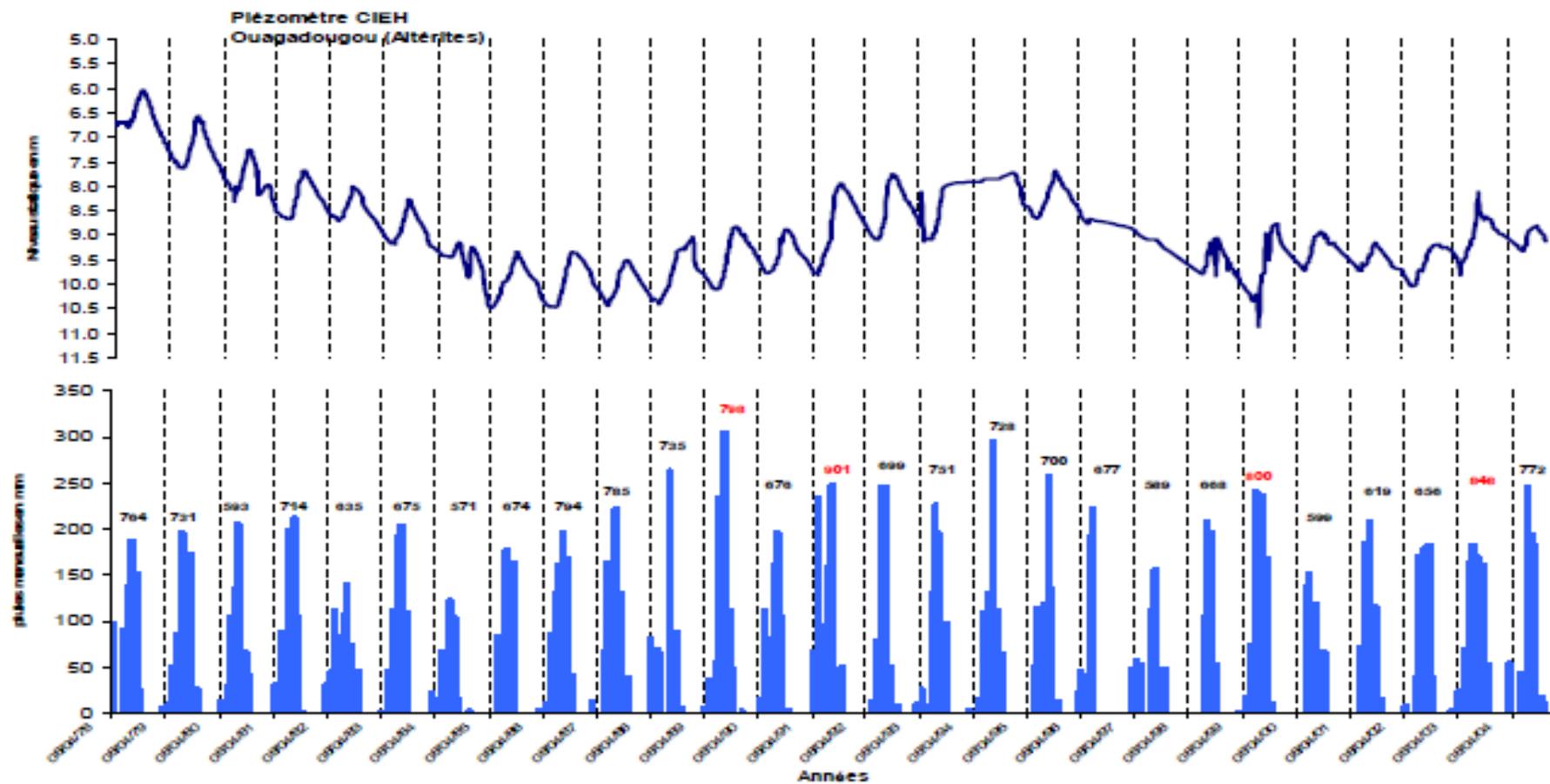
CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU



ANNEXE I-2 : Coupes types de forages et épaisseurs des altérites des systèmes aquifères du socle

ANNEXE II : Influence de la pluviométrie sur les aquifères

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU



ANNEXE III : Paramètres hydrogéologiques des 134 forages utilisés

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

Identification	Coordonnées Géographiques		Localisation (secteur du quartier)	Débit	Niveau statique	Altération	Date d'essais	Profondeur Forée
	X	Y						
1562	-1.563661°	12.369987°	Nonsin	18	6,83	40	29/07/1996	37,42
CQ 17	-1.479669°	12.369042°	Dassasgo	10	10,27	21	27/07/1996	61
CQ 8	-1.567049°	12.386287°	Tampouy	0,9	2,15	16	17/11/1995	40
FT 18	-1.469286°	12.378766°	Trame d'accueil	18	19,30	35,8	26/12/1995	52
FT 31	-1,45739	12,392087	Trame d'accueil	18	11,33	23	19/12/1995	55
FT 32	-1.476216°	12.396840°		72	5,64	40	08/12/1995	52
FT 39	1365470,07	665546,96	Trame d'accueil	5,4	37,70	37	07/06/1996	70
FT 58	1370666	652853	Tampouy	13,5	19,51	18,2	13/01/1996	70,62
FT33	-1.477176°	12.385066°	Dassasgo	3,4	7,59	40	25/01/1996	72,79
QP 13	-1.512985°	12.322099°	Patte d'oie	18	14,56	38	02/01/1996	61,73
QP 16	1363189	661782	Patte d'oie	5,4	4,52	23,79	02/01/1996	58,3
QP 18	1362840	660269	Patte d'oie	10,8	6,30	29,5	08/01/1996	66,15
QP 23	-1.574148°	12.337134°	Pissy	10,8	19,77	19,45	19/04/1996	52,54
QP 33	-1.562214°	12.397490°	Tampouy	15,1	15,70	45,33	13/02/1996	63,74

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

QP 37	-1.463230°	12.398457°	Ouayalgui	36	10,25	27,31	12/03/1996	49
QP 40	1370245	666777	Dassasgo	18,8	11,10	28,94	07/03/1996	70,5
QP 47	-1.515415°	12.394960°	Saabin	20	8,17	24	20/02/1996	60,21
QP 49	-1.504429°	12.403831°	Somgande	5,7	13,76	43,06	24/03/1996	73,6
QP 52	1371887	662909	Somgande	9,9	16,58	24,67	15/02/1996	60,06
QP 55	-1.488951°	12.363661°	Saint Camille	9	15,42	36,9	13/03/1996	62,21
QP 56	-1.529521°	12.395344°	Tanghin	9,9	9,97	32,06	26/02/1996	52,3
QP 59	1365475	665675	Trame d'accueil	9,9	36,30	36,77	08/03/1996	62,09
QP 63	1369554	654911	Tampouy	14	4,37	32,06	23/03/1996	71,7
QP 64	-1.564897°	12.376015°	Nonsin	7,7	4,46	34,64	28/03/1996	61,6
QP 6	-1.466724°	12.371763°	Trame d'accueil	12,3	24,37	50,71	27/11/1995	55,5
QP 66	1365220	664264	Trame d'accueil	7,9	26,53	45,57	18/03/1996	42,8
QP 71	1370078	655662	Tampouy	6,9	8,21	21,45	02/04/1996	48,71
QP 81	1362543	660710	Patte d'oie	30,9	9,60	14,63	26/04/1996	55
QP 83	-1.531256°	12.400877°	Tanghin	10,8	12,43	35,22	02/04/1996	60
QP 86	-1.525990°	12.395171°	Tanghin	9	11,68	21	26/07/1996	61,2
QP1	-1.463137°	12.373506°	Trame d'accueil	20	27,43	41	24/11/1995	54,5
TH 35	-1.555559°	12.359991°	Gounghin	10,3	14,80	30	05/02/1996	60,34

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

TH1	-1.470787°	12.397270°	Ouayalgui	10,8	6,46	37,5	12/12/1995	60,5
UB 1-33	-1.459515°	12.385699°	Trame d'accueil	6,5	20,80	31,4	28/07/1996	52,29
QP 111	-1.554532°	12.381303°	Hamdalaye	9		30		61,3
QP 67	-1.523889°	12.386065°	Dapoya Barrage N°2	24	4,43	25,95	24/11/1995	64
QP 73	-1.522979°	12.386042°	Dapoya	10,8	3,83	37,5	25/11/1995	58
QP 91	-1.497692°	12.366150°	Eglise St Camille	19		38,78		52,04
FT13	-1.529722°	12.316585°	Cissin	24		34		58
QP 84	-1.535862°	12.315307°	Cissin	13,8	21,13	28,84	24/11/1995	67,02
QP 100	-1.543213°	12.334403°	Cissin	9		24,41		72,72
QP 105	-1.574345°	12.331413°	Pissy	7,7		24,2		58,1
QP 107	-1.563941°	12.328809°	Pissy	4,9		41,8		63,05
QP 99	-1.547554°	12.344091°	Cissin	18		36,51		60,85
QP 109	-1.559207°	12.379040°	Nonsin	36		35,29		63,73
QP 112	-1.541633°	12.397091°	Tanghin Tambila	6		20,35		60,65
QP 124	-1.522320°	12.395314°	Tanghin	12		45,5		51,8
QP 77	-1.482854°	12.409850°	Kossodo	9	9,32	17,67	24/11/1995	67
QP 79	-1.485180°	12.416372°	Kossodo	30,1	7,98	17		58

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

QP 92	-1.486037°	12.368282°	Wemtenga	27		31,5		69,8
QP 93	-1.481736°	12.372679°	Wemtenga	18		30,3		50,3
QP 123	-1.495933°	12.401877°	Tanghin	23		32,4		
QP 74	-1.574724°	12.376862°	Nonsin	9		27,17		
GND38	664457	1368854	Zogona	28,8	23,8	30		66,2
PEA 11	665649	1370909	Wayalghin	15,652	5,64	40	02/01/1996	52
PEA 12	666239	1370960	Wayalghin	13,584	6,46	37,5	27/11/1995	54,5
QP 6	666697	1368141	Zone 1	14,4		41,43	24/11/1995	57,86
QP 1	667086	1368336	Zone 1	18,142	27,43	41		60
QP109	656636	1368890	Nonssin	26,67	7,04	39		60,5
FT58	656491	1367997	Nonssin	9	19,51	18,2		52
QP 111	657143	1369143	Nonssin	12	3,27	37,5		61,3
PEA 27	656157	1367886	Nonssin	15	6,83	40		63
QP 99	657924	1365031	Cissin	18,853		36,51		58,1
UF2	657998	1364779	Cissin	8,544	7,65	16		50,5
FZON	654841	1365628	Pissy	9	13,71	28		48
PEA 07	665291	1367832	Dassasgho	29,26	2,15	16		37,42
TH 35	657044	1366785	Gounghin	36,00	6,9	29		63,05

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

QP 13	661697	1362619	Patte d'Oie	22,31	14,56	38		70,62
QP 49	662577	1371665	Somgandé	5,70	13,76	49,06		70,5
PEA 8	656298	1370929	Tampouy	15,10	15,7	45,33		66,15
QP 100	658402	1363962	Cissin	10,28		24,2		58,1
QP 67	660472	1369688	Dapoya	39,85	4,43	25,95		52,29
QP 84	659213	1361854	Cissin	12,857	21,13	28,84		52,04
FT 13	659880	1361999	Cissin	12,857	21	34		58
GND	664128	1361337	Ouaga 2000	12,632	4,22	18		44,82
NK1258	664920	1360974	Ouaga 2000	22,5	12,76	31		57,7
NK19	658705	1364184	Ouaga 2000	13,793	13	28		61
TH 40	657231	1366267	Gounghin	14,815	17,15	34		74
UB13	657712	1371115	Tanghin	7,843	23,4	26		60
QP 30	663 086	1 365 194	Patte d'oie	6,116	6,7	48,73		69,75
QP 18	660 269	1 362 840	Patte d'Oie	7,731	13,8	28,84		52,04
QP 81	660 710	1 362 543	Patte d'Oie	13,00	23,63	28,87		56,06
QP 114	662 053	1 371 554	Somgandé	36,00		37,35		66,75
QP 63	654 911	1 369 554	Signoghin	9,00	4,37	32,06		52,3
QP 40	666 777	1 370 245	Wentenga	10,00	11,1	28,94		63,74

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

FT 39	665 547	1 365 470	Saniyri	5,4	37,7	37		55
QP 66	664 264	1 365 220	Sanyiri	7,5	26,53	45,57		61,6
FT 31	667 699	1 370 395	Wentenga	9,8	11,33	23		40
BUMIGEB	647 193	1 370 902	Bassinko	6	11	25		72
NK07	646 377	1 371 797	Bassinko	12	12,71	23		55
FK05	647 396	1 371 003	Bassinko	9	7,65	16		50,5
EA67	648 543	1 370 994	Bassinko	10	12	23		55
NK29	657 438	1 358 669	Nagrin	18	13	28		61
FPM	658 307	1 358 496	Nagrin	5	12	22		33
C1	656 964	1 358 514	Nagrin	7	34,04	39		50
FYD	657 287	1 358 033	Nagrin	36	3,45	42		57
CLJBO	650 101	1 377 084	Yagma	5,85	16	24		44
GND27	649 878	1 377 219	Yagma	15,6	11,14	26,5		55,2
GND37	649 137	1 377 137	Yagma	15,6	9,96	32		72

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

C26	660 455	1 367 234	Somgandé	12	17,88	31		
C28	659 439	1 348 578	Tampouy	40	6	26		
CQ67	660 280	1 366 035	Cissin	5,6	16,8	26		
CQ68	661 084	1 368 252	Dapoya	5,4	10,37	18		
CQ69	662 138	1 368 749	Cissin	6	18	26		
C13 univ	661 445	1 368 783	Cissin	3,9	12,9	28,2		67,16
C16/JBMC	664 606	1 370 330	Ouaga 2000	5,14	19,05	22		63
CQ13	658 558	1 362 986	Ouaga 2000	5,4	4,39	24,14		
F4	664 126	1 361 335	Ouaga 2000	7,2	19,12	24,15		62,35
DIV 1	666 608	1 373 229	Gounghin	6,7	10	34		35
QP34	654 583	1 363 142	Tanghin	6,2	34,5	50		

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

PY9415	655 215	1 361 185	Patte d'oie	5,5	28,6	41,25		
CQ33	656 061	1 364 138	Patte d'Oie	5	16,34	19,74		
CQ34	685 752	1 363 691	Patte d'Oie	5	9,94	20		
CQ59	657 721	1 364 454	Somgandé	6	15,2	22,5		
PY9003	658 999	1 362 835	Signoghin	5,4	16,08	41,1		64,2
PY9009	658 308	1 361 999	Wentenga	6	13,08	30		49,2
F551A	654 901	1 372 090	Saniyri	5,4	7,6	15		38
F557A	659 895	1 370 089	Sanyiri	6	10,49	21		51
F560B	657 399	1 368 078	Wentenga	5	12,5	27		51
F505A	659 857	1 377 125		5,4	13,66	17		40
FT55b	657 003	1 363 786		6	15,2	22,5		46,6

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

F029	654 153	1 365 487		6,3	16,36	31,5		47,57
FDAP	660 030	1 369 605		6	4,8	25,51		55
QP72	655 820	1 369 700		2,3	10,46	30,95		69,82
FBA5	655 699	1 370 790		8	16,57	35,44		
FT55	652 965	1 366 917		70	6,35	20		46
PY901	657 884	1 361 728		43,2	16	41		
C 14univ	657 234	1 366 365		48	17,15	34,89		74,88
C15hopital	657 044	1 366 799		27	13,27	28		61
TH46	658 893	1 365 628		10,3	9,13	26,86		
TH10	657 234	1 366 365		48	17,15	34		
SM12	659 142	1 369 747		9	7,45	38		54

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

SM13	663 083	1 367 218		12	8,4	28,23		58,64
F Parc	663 187	1 370 452		30	9,43	14,63		42,08

ANNEXES IV : Caractéristiques des linéaments obtenus

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

Annexe IV-1 : Caractéristique des linéaments

Linéaments	X Start	Y Start	X end	Y end	tan α	α rad	α deg	Longueur
1	643154	1375416,08	666407,32	1380669,6	4,42623612	1,34860107	77,2691496	23839,39
2	645449,18	1377168,68	661984,88	1378615,56	11,4285221	1,48351824	84,9993339	16598,88
3	643541,55	1375459,13	645005,65	1362196,13	0,11038981	0,10994466	6,29936479	13343,57
4	650689,79	1373143,38	654737,59	1360430,6	0,318404	0,30825452	17,6616832	13341,64
5	643541,55	1367492,72	657105,99	1367880,27	35,0004903	1,54223307	88,3634459	13569,98
6	653445,74	1367578,84	676053,14	1375932,81	2,7061864	1,21683542	69,7195341	24101,52
7	657493,54	1375373,01	656675,37	1366588,42	0,09313696	0,09286905	5,32100443	8822,61
8	643541,55	1367535,78	657705,99	1367923,33	36,5486776	1,54344238	88,4327343	14169,74
9	656890,68	1367449,66	669464,7	1371454,39	3,1397922	1,26246153	72,3337173	13196,36
10	650732,86	1372143,38	654866,78	1360473,66	0,35424329	0,34045002	19,5063493	12380,29
11	643842,98	1360172,23	656976,8	1365727,19	2,36434106	1,17066263	67,0740279	14260,25
12	673038,82	1375416,07	673641,68	1365770,25	0,06249961	0,06241842	3,57631219	9664,64
13	666751,81	1380626,54	671574,72	1371454,39	0,5258211	0,48409047	27,7363407	10362,86
14	659603,57	1380669,6	665546,08	1373521,36	0,83132491	0,69355181	39,7375915	9295,74
15	658440,9	1377612,22	659732,75	1373090,74	0,28571397	0,27829937	15,9453792	4702,41
16	652842,88	1372143,38	659818,88	1372617,06	14,727242	1,50299902	86,1155004	6992,06
17	650431,42	1376363,43	653402,68	1373521,36	1,0454563	0,80761757	46,2730782	4111,66
18	645996,07	1376277,3	653101,23	1372315,63	1,79347598	1,06215487	60,8569911	8134,99
19	642852,56	1377655,28	649053,45	1372100,32	1,11627987	0,84028838	48,1449778	8325,18
20	643498,49	1380669,6	646082,19	1377569,16	0,83333333	0,69473828	39,8055711	4035,87
21	645909,95	1380411,23	650259,18	1377439,97	1,46376621	0,97145574	55,6603136	5267,28
22	647158,73	1367191,28	648579,77	1363487,98	0,38372263	0,36639589	20,9929381	3966,58
23	643756,86	1360172,23	657062,93	1365813,31	2,35878059	1,16981718	67,0255874	14452,45
24	654479,22	1358578,94	657708,85	1364909,01	0,51020447	0,47177782	27,0308778	7106,36

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

Linéaments	X Start	Y Start	X end	Y end	tan α	α rad	α deg	Longueur
25	654651,47	1363961,66	659732,75	1358449,76	0,92187449	0,74476985	42,6721691	7496,70
26	654995,96	1360645,91	664081,98	1360258,35	23,4441635	1,52816763	87,5575555	9094,28
27	660593,99	1361162,65	663263,81	1358277,51	0,92536931	0,7466558	42,7802263	3930,90
28	661584,41	1363014,3	668431,22	1360732,09	3,00007887	1,24905366	71,5655031	7217,15
29	666235,07	1366330,05	674545,98	1360818,15	1,50781219	0,98518883	56,4471622	9972,58
30	670799,61	1358019,14	671445,54	1364090,84	0,10638371	0,10598509	6,0724981	6105,96
31	675062,72	1364564,52	675622,52	1359181,81	0,10399966	0,10362712	5,93739672	5411,74
32	668991,02	1370937,65	676096,2	1374684,02	1,89655053	1,08556907	62,1985263	8032,36
33	666794,87	1364220,03	676182,32	1370205,6	1,56834687	1,00317761	57,4778434	11133,34
34	661713,59	1358708,13	676139,26	1365554,94	2,1069184	1,12765251	64,6097295	15968,05
35	662531,76	1370507,04	672694,33	1380540,41	1,01287703	0,7917954	45,3665347	14280,98
36	670067,56	1361722,45	666967,12	1358234,45	0,88888761	0,72664163	41,6334986	4666,78
37	664986,28	1357717,71	665546,08	1362583,68	0,11504387	0,11454032	6,56267691	4898,06
38	666924,06	1372014,2	667182,43	1380282,04	0,03125	0,03123983	1,78991061	8271,88
39	661895,84	1362239,19	662316,45	1357631,59	0,09128614	0,09103383	5,21585419	4626,76
40	662445,64	1359827,73	652196,95	1363746,35	2,61538246	1,2055946	69,0754825	10972,29
41	664081,98	1370636,22	656804,56	1358622,01	0,60573438	0,54462529	31,2047304	14046,43
42	654866,78	1371626,64	662273,39	1365770,25	1,26470573	0,90175327	51,6666566	9442,20
43	653876,36	1368397,01	662833,19	1369818,05	6,30301047	1,41345341	80,9849147	9068,86
44	656632,31	1370334,79	665890,58	1380195,92	0,93886502	0,75387728	43,1939866	13526,18
45	662574,82	1380368,17	662445,64	1372789,31	0,01704478	0,01704313	0,97649939	7579,96
46	654091,67	1380454,29	655555,77	1373478,29	0,20987672	0,20687412	11,8530139	7127,98
47	651421,84	1371497,46	655934,32	1377439,97	0,7593559	0,64946204	37,2114339	7461,63
48	653574,93	1367277,41	652929	1358751,19	0,07575807	0,07561364	4,33234233	8550,65
49	648838,14	1368052,52	654823,72	1372530,94	1,33653833	0,92844724	53,1961086	7475,52
50	653273,5	1380583,48	652842,88	1375071,58	0,07812551	0,07796714	4,46718812	5528,70

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

Linéaments	X Start	Y Start	X end	Y end	tan α	α rad	α deg	Longueur
51	653101,25	1377483,02	648752,02	1371712,76	0,75373207	0,64588536	37,006505	7225,77
52	649053,45	1368999,88	649828,56	1358923,44	0,076923	0,07677182	4,39870101	10106,21
53	650129,99	1376535	649828,56	1380540,41	0,07525572	0,07511413	4,30372258	4016,74
54	652326,14	1358665,07	643024,81	1358578,94	107,991757	1,56153663	89,4694582	9301,73
55	648278,34	1360818,15	653402,68	1357760,77	1,67605597	1,03285197	59,1780589	5967,11
56	643756,86	1364263,09	648725,05	1361205,71	1,62498283	1,01913663	58,3922275	5833,57
57	643670,74	1361808,57	646254,44	1357717,71	0,63157869	0,56331608	32,2756338	4838,45
58	642981,75	1373176,86	648708,96	1377956,71	1,19819869	0,87531915	50,1520932	7459,75
59	643067,87	1376750,98	649871,62	1380066,73	2,05194903	1,11732667	64,0181026	7568,70
60	643326,24	1377999,77	647632,41	1380325,1	1,85185329	1,07566339	61,6309722	4893,90
61	643972,17	1376535,67	644015,32	1360043,04	0,00261632	0,00261631	0,14990376	16492,69
62	647460,17	1370248,67	648450,59	1360129,17	0,09787242	0,0975617	5,58987373	10167,85
63	650603,67	1375932,81	654177,79	1360732,03	0,23512741	0,2309327	13,2314689	15615,31
64	654995,96	1374856,27	658096,41	1380325,1	0,56693114	0,51574917	29,5502508	6286,56
65	656287,82	1363617,16	657838,04	1377612,22	0,11076909	0,11031935	6,32083339	14080,66
66	656460,06	1357674,65	657579,67	1361507,14	0,29213644	0,284227	16,2850076	3992,68
67	659818,88	1369731,93	659646,63	1380626,54	0,01581057	0,01580925	0,90580349	10895,97
68	662660,9	1369473,56	664469,54	1361377,95	0,22340997	0,21980052	12,5936419	8295,18
69	663780,55	1379851,43	665976,7	1371669,7	0,26842123	0,26223975	15,0252309	8471,35
70	667096,3	1380152,86	668258,97	1371239,09	0,13043527	0,12970302	7,43143545	8989,28
71	666579,56	1359138,75	670756,55	1375114,64	0,26145586	0,25573125	14,6523211	16512,91
72	668732,65	1375588,32	672780,45	1380583,48	0,81034441	0,68101676	39,0193862	6429,33
73	672909,63	1368947,23	673340,25	1378645,7	0,04440082	0,04437167	2,54230968	9708,03
74	674287,61	1358492,82	675708,64	1365641,06	0,19879439	0,19623605	11,2434974	7288,12
75	643197,06	1375459,13	666278,13	1380540,41	4,54237318	1,35410368	77,5844257	23633,77
76	642637,26	1377396,91	650173,05	1370894,59	1,15893866	0,85888448	49,2104558	9953,31

CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAIRES PAR IMAGES SATELLITAIRES POUR LA DETERMINATION DE SITES
PRODUCTIFS DE FORAGES DANS LA ZONE DE OUAGADOUGOU

Linéaments	X Start	Y Start	X end	Y end	tan α	α rad	α deg	Longueur
77	651507,97	1371454,39	665675,27	1374684,02	4,38666349	1,3466628	77,1580947	14530,76
78	643972,11	1371626,64	663565,24	1369258,25	8,27276335	1,45050137	83,1076066	19735,75
79	643197,06	1360086,1	675967,01	1375975,87	2,06233004	1,11931088	64,1317896	36419,15
80	644015,23	1371583,58	663608,31	1369258,25	8,42593524	1,45266769	83,2317279	19730,58
81	663220,75	1380066,73	673986,18	1364349,21	0,68493185	0,60054136	34,4084855	19050,85
82	667526,92	1370119,48	676182,32	1374597,9	1,93269055	1,09331524	62,6423487	9745,37
83	654479,22	1360301,41	670885,73	1361464,08	14,1110633	1,50004822	85,9464321	16447,66
84	662617,89	1363961,66	668000,6	1357717,71	0,86206808	0,71145862	40,7635762	8243,81
85	665115,47	1364909,01	670368,99	1362110	1,87692077	1,08126402	61,951865	5952,64