



IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DES ÉMERGENCES D'EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN DE LA COMOÉ : BAS-FOND DE SINDOU

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE  
**MASTER**

**SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL ET HYDRAULIQUE**



Présenté et soutenu publiquement le 26 Janvier 2021 par

**KINGLO Mahoubé August Abdon (2017 0474)**

**Directeur de mémoire** : Dr (MC) Mahamadou KOITA, Enseignant-Chercheur en Hydrogéologie  
2iE

**Co-directeur de mémoire** : Dr SAURET Elie Serge Gaëtan, Chargé de recherche en  
Hydrogéologie et Environnement à l'INERA

**Structure d'accueil du stage** : INERA – Station de Farakoba – Bobo Dioulasso

Jury d'évaluation du mémoire

Président : Dr Malick ZOROM

Membres et correcteurs : Dr Chabi Angelbert BIAOU, Maître Assistant, enseignant chercheur  
2iE

M Axel BELEMTUGRI, (LEHSA) 2iE

**Promotion [2020/2021]**

## IN MÉMORIAM

L'une des sources de ma motivation c'est le désir de rendre fière ma famille. J'aurais donc voulu que vous soyez témoin de mon élévation au grade d'ingénieur de conception en génie civil et Hydraulique option Irrigation et drainage, conséquence de toutes les prières que vous avez faites à mon intention. Hélas, le temps en a décidé autrement. Je formule ici le vœu de toujours vous rendre fière à jamais tendre grand-mère ABALO Leticia et grand père BRAHI Eugène.

## DÉDICACES

Merci à notre cher Papa KINGLO Epiphane pour m'avoir toujours soutenu, et permis de fréquenter au collège Catholique Père Aupiais (CCPA), et tous les sacrifices qu'il a fait pour mon éducation et celle de mes frères. Merci à notre chère Maman BRAHI Félicité puisse Dieu vous donner la santé et la longévité. Sachez que tous vos sacrifices pour nous n'ont pas été vains. Merci à mes frères et sœurs pour leurs soutiens indéfectibles, en particulier mes Grand frère KINGLO Hyacinthe et KINGLO Thierry pour avoir été bien plus que des frères pour moi depuis tout petit.

## REMERCIEMENTS

Avant et après tout, j'adresse toute ma gratitude à l'endroit du Dieu créateur de l'univers, il n'a cessé de m'émerveiller pour ses œuvres dans ma vie, en voici encore un : ce mémoire de fin d'étude d'ingénieur. Il m'est permis dans ce rapport de remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire de recherche de Master 2. Je tiens donc à remercier mes encadreurs

- Dr SAURET S. G. Elie pour sa disponibilité, ses apports hautement déterminant dans l'aboutissement de ce travail. Je n'oublierai pas de sitôt les travaux sur le terrain et les nombreux échanges constructifs tenues tard le soir. Trouvez dans ce rapport l'expression du sérieux et de la rigueur que vous aviez su me communiquer.
- Dr KOITA Mahamadou pour m'avoir fait découvrir et aimer l'Hydrogéologie et les techniques de mobilisations des ressources en eau souterraines. Je vous dis merci pour les nombreux conseils d'orientations durant mon cursus, et les multiples apports qui ont permis de réussir ce mémoire.
- Mes remerciements vont aussi à l'endroit des membres du jury d'évaluation de mon mémoire, Dr Malick ZOROM, Dr Chabi Angelbert BIAOU, M Axel BELEMTOUGRI.

A tout le corps professoral et le corps administratif de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), à la Banque Africaine de Développement (BAD) et à la Fondation Nelson Mandela j'adresse mes sincères gratitude. A ma famille, mes parents, mes frères et sœurs c'est avec fierté et gratitude que je vous dis merci, vous êtes mon carré VIP. Je profite aussi de l'occasion pour remercier mes camarades de classe, à ceux qui m'ont permis de m'émanciper merci, à COMPAORE Hillary merci pour l'esprit d'entraide pour les apports, pour les coups de mains sur le terrain, très bonne chance à nous.

## RÉSUMÉ

Les sources d'eau ou émergences souterraines constituent des écosystèmes importants. Malheureusement elles sont aussi les plus menacées, mal étudiées et mal protégées de la planète. La présente étude a concerné les sources d'eau du périmètre irrigué de Sindou, utilisées pour l'irrigation des spéculations agricole et vise à améliorer la connaissance des émergences d'eaux souterraines afin d'assurer leur gestion durable. A cet effet la démarche méthodologique a concerné premièrement l'étude diachronique de l'évolution des superficies agricoles ayant permis de déterminer la superficie du site d'étude, de faire l'inventaire des sources d'eau, et d'apprécier l'évolution des superficies agricoles. Il s'en est ressorti que la superficie du périmètre irrigué de Sindou est de 256,3 ha, abritant 12 sources d'émergences souterraines. De plus l'évolution des superficies cultivées de 1995 à 2020 est marquée par une tendance qui est globalement décroissante. Deuxièmement il s'est agi d'expliquer les conditions d'émergences des sources au travers de l'étude du contexte géologique, tectonique, hydrogéologique, géomorphologique et de l'équilibre calco-carbonique et des âges relatifs des eaux. Il en ressort que l'intrusion du CMA (Complexe Métamorphique Anatectique de Yendéré) s'accompagnerait de phénomènes de fracturation qui conduirait à l'émergence de ces eaux donnant naissance aux zones d'émergence constituée des sources n°1, n°2, n°3, n°7, n°8, n°9 et n°11. Les coupes topographiques réalisées à proximité des sources n°10, n°4, n°5, n°6 montrent un changement de pente brusque suivi de l'affleurement du socle birimien, justifiant l'écoulement des eaux au niveau des grès fracturés en surface. Sur la base de l'étude hydrochimique l'ensemble des eaux de ces sources est adapté à l'agriculture et seraient des eaux récentes qui proviendraient d'une part des eaux de la pluie, de la nappe superficielle et des eaux souterraines (Kawara-Sindou). Deuxièmement l'étude quantitative réalisé révèle que les sources d'eau constituent une ressource en eau pouvant fournir un débit égal à 65,55m<sup>3</sup>/h avec un volume d'eau mobilisable de 235980 m<sup>3</sup> pour la campagne sèche (150j). La détermination des paramètres hydrodynamiques a montré une transmissivité moyenne de  $2,4 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$  et un coefficient d'emménagement moyen de  $S_A=1 \cdot 10^{-3}$  et  $S_B=7,4 \cdot 10^{-2}$ . Les besoins en eau évalués pour la saison sèche s'élèvent à 2391270 m<sup>3</sup> pour une superficie de 202 ha de riz et une efficacité théorique de 70 %. La ressource en eau constituée par les sources ne permet pas de satisfaire ce besoin, un recours à la nappe superficielle a donc été trouvé nécessaire.

Mots Clés :

---

- 1 – Etude Hydrométrique
- 2 – Hydrogéologie
- 3 – NDVI
- 4 – Propriétés hydrodynamique
- 5 – Sources d'eau

## ABSTRACT

Underground water sources or emergencies are important ecosystems. Unfortunately, they are also the most threatened, poorly studied and poorly protected on the planet. The present study concerned the water sources of the irrigated perimeter of Sindou, used for the irrigation of agricultural speculations and aims at improving the knowledge of groundwater emergences in order to ensure their sustainable management. To this end, the methodological approach concerned firstly the diachronic study of the evolution of the agricultural surfaces which made it possible to determine the surface area of the study site, to make an inventory of the water sources, and to assess the evolution of the agricultural surfaces. It emerged that the surface area of the irrigated perimeter of Sindou is 256.3 ha, sheltering 12 underground springs. Moreover, the evolution of cultivated areas from 1995 to 2020 is marked by a trend that is globally decreasing. Secondly, it was a question of explaining the conditions of emergence of the springs through the study of the geological, tectonic, hydrogeological, geomorphological context, the calco-carbonic balance and the relative ages of the waters. It emerges that the intrusion of the CMA (Yendéré Anatectic Metamorphic Complex) would be accompanied by fracturing phenomena that would lead to the emergence of these waters giving rise to the emergence zones consisting of springs n°1, n°2, n°3, n°7, n°8, n°9 and n°11. The topographic sections carried out near springs n°10, n°4, n°5, n°6 show a sudden change in slope followed by the outcrop of the Birimian base, justifying the flow of water at the level of the fractured sandstones on the surface. On the basis of the hydrochemical study, all the water from these springs is suitable for agriculture and would be recent water coming from rainwater, surface water and groundwater (Kawara-Sindou). Secondly, the quantitative study carried out reveals that the water sources constitute a water resource that can provide a flow rate equal to 65.55m<sup>3</sup>/h with a volume of water that can be mobilised of 235980 m<sup>3</sup> for the dry season (150 days). The determination of the hydrodynamic parameters showed an average transmissivity of 2.4.10<sup>-4</sup>m<sup>2</sup>/s and an average storage coefficient of SA=1.10<sup>-3</sup> and SB=7.4.10<sup>-2</sup>. The estimated water needs for the dry season amount to 2391270 m<sup>3</sup> for an area of 202 ha of rice and a theoretical efficiency of 70%. The water resource constituted by the springs does not allow to satisfy this need, a recourse to the surface water table was thus found necessary.

Key words :

---

- 1 – Hydrodynamic properties
- 2 – Hydrogeology
- 3 – Hydrometric study
- 4 – NDVI
- 5 – Springs

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACP	Analyse en Composante Principale
AFC	Analyse Factorielle
AFD	Analyse Factorielle Discriminante
CE	Conductivité Électrique
CT	Continental Terminal
GKS	Grès de Kawara Sindou
GPS	Global Positioning System
INERA	Institut National de l'Environnement et de Recherches Agricoles
ORC	Opération Riz Comoé
pH	Potentiel hydrogène
Q	Débit
Qc	Débit colonne ou capacitif
RS	Résidu Sec
S	Coefficient d'emmagasinement
T	Transmissivité
TAC	Taux d'alcalinité totale
TDS	Totale de Solide Dissous
V	Vitesse
Vc	Vitesse colonne
VLf	Very Low Frequency
ICT	Infracambrien terminal
Tmoyair	Température moyen de l'air ambiant

## TABLES DES MATIERES

<b>RÉSUMÉ</b> .....	iv
<b>INTRODUCTION</b> .....	8
<b>I. Présentation de la zone d'étude</b> .....	11
<b>I.1.Situation géographique</b> .....	11
<b>I.2.Population</b> .....	11
<b>I.3.Climat</b> .....	12
<b>I.4.Relief et hydrographie</b> .....	13
<b>I.5.Végétation et sols</b> .....	14
<b>I.6.Contexte géologique</b> .....	15
<i>I.6.1.Contexte géologique régionale</i> .....	15
<i>I.6.2.Contexte géologique locale</i> .....	15
<i>I.6.2.1.Groupe de la falaise du Bassin sédimentaire de Taoudéni</i> .....	16
<i>I.6.2.2.Complexe métamorphique et anatectique</i> .....	19
<b>I.7.Contexte hydrogéologique</b> .....	19
<i>I.7.1.Contexte hydrogéologique régionale</i> .....	19
<i>I.7.2.Contexte hydrogéologique locale</i> .....	20
<b>II. Revue bibliographique</b> .....	21
<b>II.1.Généralités sur les émergences d'eaux souterraines</b> .....	21
<i>II.1.1.Classifications des émergences d'eaux souterraines</i> .....	21
<i>II.1.1.1.Caractéristiques hydrogéologiques</i> .....	21
<i>II.1.1.2.Caractéristique physique, chimique et écologique</i> .....	22
<i>II.1.2.Conditions d'émergences des eaux souterraines</i> .....	23
<i>II.1.3.Quelques définitions des types d'émergences d'eaux souterraines</i> .....	23
<b>II.2.Méthodes de caractérisation des sources d'eaux</b> .....	26

II.2.1.	<i>Détermination des conditions d'émergence des sources d'eaux.....</i>	26
II.2.2.	<i>Etude qualitative des eaux des émergences souterraines.....</i>	27
II.2.3.	<i>Etude quantitative des émergences d'eaux souterraines.....</i>	28
<b>III.</b>	<b>Matériels.....</b>	31
<b>III.1.</b>	<b>Présentation des outils et données utilisés.....</b>	31
III.1.1.	<i>Appareils de mesures.....</i>	31
III.1.2.	<i>Outils informatiques.....</i>	31
III.1.3.	<i>Données utilisées.....</i>	32
<b>IV.</b>	<b>Méthodes.....</b>	33
<b>IV.1.</b>	<b>Etude diachronique de l'évolution des superficies cultivées en saison sèche</b>	33
IV.1.1.	<i>Cartographie de la zone d'étude et des sources d'eau.....</i>	33
IV.1.2.	<i>Evolution des superficies cultivées.....</i>	33
<b>IV.2.</b>	<b>Détermination des conditions d'émergences des sources d'eau.....</b>	35
IV.2.1.	<i>Etude du géologique et tectonique.....</i>	35
IV.2.1.1.	<i>Analyse structurale par la prospection électromagnétique.....</i>	35
IV.2.2.	<i>Etude du contexte géomorphologique et hydrogéologique.....</i>	37
IV.2.3.	<i>Etude de l'hydrochimie des eaux souterraines.....</i>	38
IV.2.3.1.	<i>Travaux de terrains et de laboratoire.....</i>	38
IV.2.3.2.	<i>Etude des faciès hydrochimique des eaux.....</i>	39
IV.2.3.3.	<i>Etude de l'origine des eaux et des mélanges éventuels.....</i>	39
<b>IV.3.</b>	<b>Etude de la qualité physico-chimique des eaux de sources.....</b>	41
<b>IV.4.</b>	<b>Quantification de la ressource en eau et des besoins en eau d'irrigation.....</b>	42
IV.4.1.	<i>Etude hydrométrique des sources.....</i>	42
IV.4.1.1.	<i>Choix des points de mesure.....</i>	42
IV.4.1.2.	<i>Choix des méthodes de mesure.....</i>	42
IV.4.2.	<i>Etude hydrodynamique de la nappe.....</i>	44

<i>IV.4.2.1.Choix du site d'implantation des ouvrages de captage.....</i>	<i>44</i>
<i>IV.4.2.2.Détermination du débit de pompage longue durée .....</i>	<i>44</i>
<i>IV.4.2.3.Réalisation de l'essai de pompages et interprétation.....</i>	<i>44</i>
<i>IV.4.3.Evaluation du volume d'eau disponible .....</i>	<i>45</i>
<i>IV.4.4.Etude des besoins en eau agricole.....</i>	<i>46</i>
<i>IV.4.4.1.Cartographie de l'occupation du bas-fond de Sindou .....</i>	<i>47</i>
<i>IV.4.4.2.Evaluation des paramètres climatiques.....</i>	<i>47</i>
<i>IV.4.4.3.Evaluation des paramètres culturaux.....</i>	<i>48</i>
<i>IV.4.4.4.Evaluation de l'aptitude pédologique du sol à l'irrigation.....</i>	<i>48</i>
<b>V. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>51</b>
<b>V.1.Etude diachronique de l'évolution des superficies cultivées .....</b>	<b>51</b>
<i>V.1.1.Extension actuelle de la zone d'étude.....</i>	<i>51</i>
<i>V.1.2.Evolution des superficies cultivées .....</i>	<i>52</i>
<i>V.1.3.Discussion.....</i>	<i>56</i>
<b>V.2.Conditions d'émergences des sources d'eau souterraines .....</b>	<b>57</b>
<i>V.2.1.Contexte géologique et tectonique .....</i>	<i>57</i>
<i>V.2.2.Contexte géomorphologique et hydrogéologique .....</i>	<i>59</i>
<i>V.2.3.Contexte hydrochimique .....</i>	<i>60</i>
<i>V.2.3.1.Caractéristique physique des eaux .....</i>	<i>60</i>
<i>V.2.3.2.Analyse des faciès hydrochimique .....</i>	<i>62</i>
<i>V.2.3.3.Origine et mélanges éventuels des eaux .....</i>	<i>64</i>
<i>V.2.4.Discussion.....</i>	<i>66</i>
<b>V.3.Qualité physico-chimique des eaux de sources .....</b>	<b>69</b>
<i>V.3.1.Paramètres physico-chimiques .....</i>	<i>69</i>
<i>V.3.2.Métaux lourds .....</i>	<i>70</i>
<b>V.4.Quantification de la ressource en eau et des besoins en eau d'irrigation.....</b>	<b>71</b>

<i>V.4.1.Débits des sources d'eaux du site d'étude</i> .....	71
<i>V.4.2.Etude hydrodynamique de la nappe</i> .....	73
<i>V.4.2.1.Géométrie de la nappe</i> .....	73
<i>V.4.2.2.Essais de puits</i> .....	73
<i>V.4.2.3.Paramètres hydrodynamiques de la nappe superficielle</i> .....	74
<i>V.4.2.4.Débit d'écoulement de la nappe superficielle</i> .....	75
<i>V.4.3.Etude des besoins en eau agricole</i> .....	76
<i>V.4.3.1.Cartographie des spéculations</i> .....	76
<i>V.4.4.Quantification des besoins en eau d'irrigation</i> .....	77
<i>V.4.5.Discussion</i> .....	78
<b>V.5.Synthèse des discussions</b> .....	80
<b>VI. CONCLUSION</b> .....	83
<b>VII. RECOMMANDATIONS</b> .....	84

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Nomenclature des assemblages litho stratigraphiques (Ouédraogo et al., 2018) ...	16
Tableau II : Paramètres hydrodynamiques des aquifères présents sur le site d'étude .....	20
Tableau III : Classification des émergences d'eaux souterraines (1).....	21
Tableau IV : Classification des émergences d'eaux souterraines (2).....	22
Tableau V : Images satellitaires sélectionnées de la scène 197_053 .....	34
Tableau VI : Failles ou fractures présentes dans la zone d'étude .....	58
Tableau VII : Paramètre physique des eaux de sources, pluie et puits .....	61
Tableau VIII : Concentration des cations majeurs présents dans les eaux prélevées .....	62
Tableau IX : Concentration des anions majeurs et mineurs dans les eaux prélevées .....	63
Tableau X : Valeurs des paramètres SAR, %Na, Résidu Sec (RS) et Pression Osmotique ( $\pi$ )	69
Tableau XI : Concentrations en métaux lourds .....	70
Tableau XII : Valeurs de débit des sources d'eaux mesurées .....	72
Tableau XIII : Caractéristique des essais de pompage.....	74
Tableau XIV : Données sur les points pivots utilisés avec la méthode de Boulton Streltsova.	75
Tableau XV : Paramètres hydrodynamique de la nappe .....	75
Tableau XVI : Besoins en eau d'irrigation (mm/mois).....	78
Tableau XVII : Synthèses des différents résultats .....	81

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du périmètre irrigué de Sindou .....	11
Figure 2 : Pluviométrie annuelle (mm) Sindou 1981 – 2010.....	12
Figure 3 : Moyenne des hauteurs pluviométrique mensuelles sur chaque 5ans.....	12
Figure 4 : Réseau hydrographique et sous bassin de la Comoé (Compaoré, 2016).....	13
Figure 5 : Partie Nord du périmètre irrigué des pics de Sindou.....	14
Figure 6 : Carte pédologique du bas-fond de Sindou Barke Guide (2020).....	14
Figure 7 : Répartitions spatiales des unités géologiques du Burkina Faso (IGB, 2015).....	15
Figure 8 : Unités géologique de la zone d'étude (Ouédraogo et al., 2018).....	16
Figure 9 : Formation de Kawara-Sindou, membre de Kawara (Ouédraogo et al., 2018). .....	17
Figure 10 : Formation de Kawara-Sindou, membre de Sindou (Ouédraogo et al., 2018) .....	17
Figure 11 : Orientation des fractures locale (Compaoré, 2016; Ouédraogo et al., 2018) .....	18
Figure 12 : Représentation des émergences souterraines (Springer et Stevens, 2009).....	24
Figure 13 : Représentation des émergences souterraines (Archambault, 1987) .....	25
Figure 14 : Direction des profils géophysique : Électromagnétique .....	36
Figure 15 : Mesure de la charge piézométrique .....	38
Figure 16 : Méthodes de mesure du débit .....	43
Figure 17 : Essai de pompage dans un ouvrage à grand diamètre. ....	45
Figure 18 : Bilan hydrique au niveau de la parcelle.....	46
Figure 19 : Carte de la zone d'étude .....	51
Figure 20 : Corrélations NDVI et Superficies cultivées .....	52
Figure 21 : Etat d'avancement des superficies cultivées.....	55
Figure 22 : Courbe filtrée de la partie réelle/imaginaire et cross section des profils.....	57
Figure 23 : Unités géologique et tectonique du bas-fond de Sindou .....	58
Figure 24 : Carte piézométrique du site d'étude .....	59
Figure 25 : Coupe topographie et évolution spatiale de la piézométrie S11-S12 .....	59
Figure 26 : Coupe topographique.....	60
Figure 27 : Conductivité électrique des eaux analysées.....	61
Figure 28 : Classification des eaux à partir du diagramme de Piper.....	63
Figure 29 : Relation IS du Dolomite vs. Ca+Mg+HCO <sub>3</sub> , IS de Aragonite vs. Ca+HCO <sub>3</sub> , IS du Calcite vs. Ca+HCO <sub>3</sub> .....	64
Figure 30 : pCO <sub>2</sub> vs. pH.....	65
Figure 31 : Diagramme ISD/ISC des eaux prélevées.....	66

Figure 32 : Classification des eaux dans le diagramme de Wilcox et Richards.....	70
Figure 33: Emplacement des points de mesures de débit des sources .....	71
Figure 34 : Valeurs de débits des sources mesurées .....	72
Figure 35 : Sondage électrique réalisé sur les puits 1 et 2 .....	73
Figure 36 : Résultats des essais de puits par paliers de débits non enchaînés.....	74
Figure 37 : Carte piézométrique du bas-fond de Sindou.....	76
Figure 38 : Cartographie des spéculations en saison sèche.....	77
Figure 39 : Carte de la zone d'étude .....	80

## INTRODUCTION

L'accroissement des impacts du changement climatique fait peser la menace d'un stress hydrique d'ici 2025 sur la moitié des pays de l'Afrique. Ce stress hydrique, couplé à l'augmentation de la population africaine, implique une évolution des besoins en eau pour l'irrigation, qui devrait s'accroître d'environ 400% de 2000 à 2080 (Frenken, 2005). De ce fait, la disponibilité et la mobilisation des ressources en eau restent un enjeu majeur pour le développement de l'agriculture irriguée dans les pays d'Afrique.

Au Burkina Faso, la zone la mieux arrosée, la zone des Cascades renferme plus de 80% des ressources en eau souterraine du pays à cause de l'extension du bassin sédimentaire de Taoudéni, ensemble géologique et hydrogéologique favorable à la rétention d'immenses ressources en eau souterraine (Compaoré, 2016). Cette région regorge de zones d'émergences d'eau souterraines qui, à cause de mauvaises pratiques et une mauvaise utilisation des terres, sont en disparition (Compaoré, 2014). La disparition de ces sources d'eau, qui ont pour exutoire les cours d'eau (Léraba orientale, Léraba occidentale, Comoé etc.), entraîne une diminution drastique des débits des cours d'eau en période d'étiage (Compaoré, 2014). Il est à souligner que les sources d'eau ou émergences d'eaux souterraines bien qu'elles soient parmi les écosystèmes les plus biologiquement et culturellement importants, sont aussi les plus menacées, mal étudiées et mal protégées de la planète (Stevens et Meretsky, 2008). Malgré les recherches consacrées aux sources au Burkina Faso, dont l'étude réalisée par l'Agence de l'eau des Cascades et du Mouhoun, l'information existante demeure minime, fragmentée et largement inaccessible pour les gestionnaires des ressources en eau et des organisations de conservation.

Ces sources d'eau représentent les principales ressources en eau exploitées pour la pratique de l'agriculture irriguée, dont dépend l'essentiel de l'économie locale tant par sa contribution à la création d'emplois que pour la recherche de la sécurité alimentaire. Il a donc été trouvé intéressant dans le cadre de ce mémoire de procéder à une étude sur les sources d'eau. À cet effet le périmètre de Sindou, bas-fond exploité pour la pratique de la riziculture a constitué le site expérimental de l'étude. En effet, dans le périmètre irrigué des pics de Sindou, vaste de 300 ha, à cheval entre la zone sédimentaire et de socle, des sources naturelles sont utilisées pour l'irrigation. Toutefois l'origine de ces sources, leurs conditions d'émergence et mécanismes d'écoulement sont peu et mal connus.

L'objectif général poursuivi dans cette étude est d'améliorer la connaissance des émergences d'eaux souterraines afin d'assurer une gestion durable des eaux de sources du bas-fond de Sindou. Pour l'atteinte de cet objectif il sera spécifiquement question de :

- faire l'étude diachronique de l'évolution des superficies agricoles du bas-fond de Sindou
- expliquer les conditions d'émergences des sources d'eaux du bas-fond de Sindou ;
- étudier la qualité physico-chimique des eaux des sources ;
- apprécier l'adéquation entre la ressource en eau et les besoins en eau d'irrigation.

### **Organisation du document**

Ce document s'articule autour de trois (03) grandes parties :

La première partie est consacrée à la description du contexte biophysique (climat, sol, géologie et hydrogéologie) du site d'étude, et une revue bibliographique sur les émergences d'eaux souterraines. La deuxième partie concerne le matériel utilisé et la méthodologie adoptée pour l'atteinte des objectifs fixés. Enfin la troisième partie consistera à présenter les résultats obtenus et à mener une discussion de ces résultats suivis de recommandations.

## **PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS**

## I. Présentation de la zone d'étude

La présente étude de caractérisation des émergences d'eaux souterraines porte sur le bas-fond de Sindou. Ce choix est justifié par son contexte géologique à cheval entre le sédimentaire et le socle, la présence de source d'eau utilisée pour l'irrigation du périmètre agricole aménagé dans le bas-fond, et la disponibilité des données issues des travaux antérieurs.

### I.1. Situation géographique

Le périmètre irrigué, objet de l'étude est situé au Sud-Ouest du Burkina Faso dans la région des Cascades. Elle est limitée par les parallèles 10°38' et 10°40' de latitude Nord et les méridiens 5°09' et 5°06'30'' de longitude Ouest. D'une superficie d'environ 300 ha, la zone d'étude est administrativement située entre le département de Sindou et celui de Douna de la province de la Léraba (Figure 1).

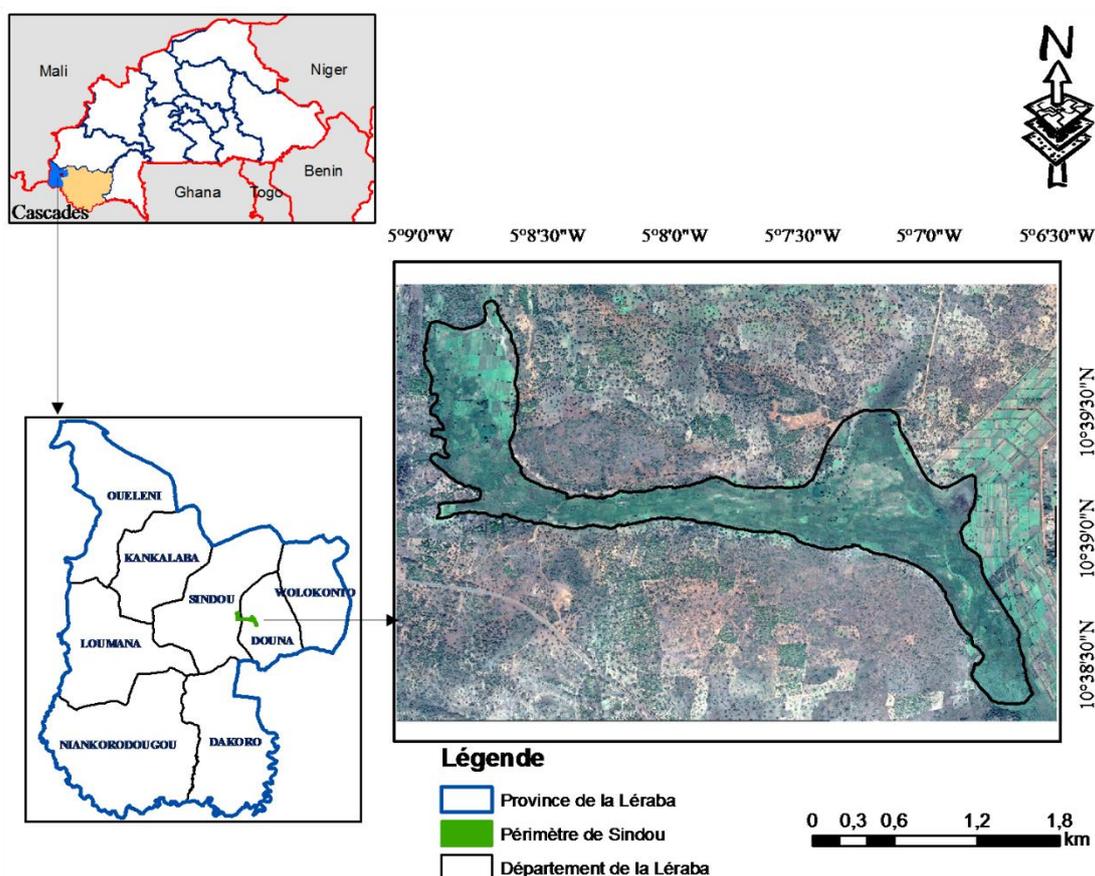


Figure 1 : Localisation du périmètre irrigué de Sindou

### I.2. Population

La population de la région des cascades, où se situe la zone d'étude, est composée en majorité de Turcas, Sénoufo, Gouins, Dioula et Peulhs nomades. Les principales activités auxquelles elle s'adonne sont l'agriculture, l'élevage, l'artisanat, le commerce, le personnel de services publics et privés (Lankoande et Pare, 2005).

### I.3. Climat

Le bas-fond de Sindou bénéficie d'un climat de type sud soudanien et enregistre une pluviométrie annuelle supérieure à 1100 mm (Compaoré, 2016; Fontès et Guinko, 1995; Lankoande et Pare, 2005). Les données pluviométriques du département de Sindou collectées sur la période allant de 1981 à 2010 ont permis de tracer la courbe représentant les hauteurs pluviométriques annuelles (Figure 2). Il ressort de l'analyse de cette courbe, qu'il y a une forte variabilité des hauteurs pluviométriques avec un écart maximal de 600 mm/an. Cette variabilité peut être imputée aux impacts du changement climatique de manière générale.

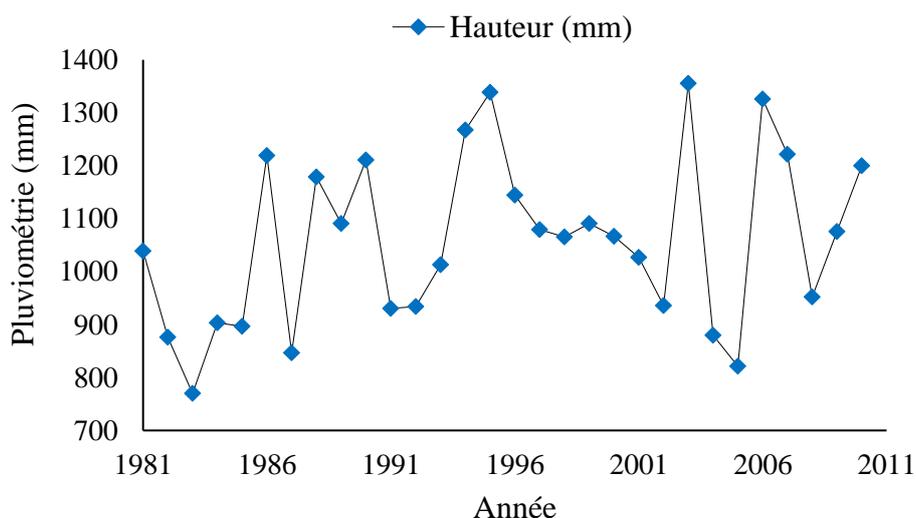


Figure 2 : Pluviométrie annuelle (mm) Sindou 1981 – 2010

Par ailleurs l'observation de la répartition mensuelle de la pluviométrie sur le département tel que présenté à la Figure 3, montre que la saison humide de la zone d'étude s'étale du mois d'avril au mois d'Octobre avec des précipitations mensuelles comprises entre 50 mm et 330.7 mm.

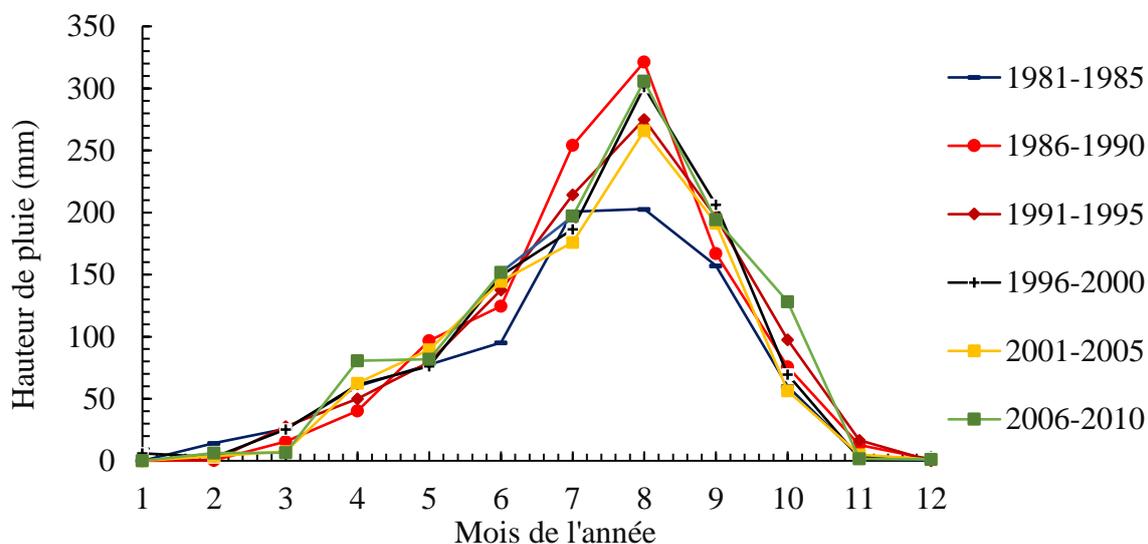


Figure 3 : Moyenne des hauteurs pluviométrique mensuelles sur chaque 5ans

La saison sèche quant à elle s'étale de novembre à mars (Compaoré, 2016; Fontès et Guinko, 1995). Cette conjecture climatique conditionne les dates de début de cultures sur le périmètre irrigué des pics de Sindou. Ainsi la campagne sèche, débute en Janvier, l'irrigation est assurée grâce aux émergences d'eaux souterraines, et les eaux de la nappe superficielle captée par les puisards agricoles.

#### I.4. Relief et hydrographie

Le périmètre irrigué des pics de Sindou est situé dans le bassin versant de la Léraba situé en rive droite du bassin de la Comoé. D'une superficie d'environ 4.505 km<sup>2</sup> ce bassin versant est bordé par un cours d'eau principal qui est la Léraba (Figure 4), dont les principaux affluents sont : La Léraba Occidentale et la Léraba Orientale (Compaoré, 2016). Ces affluents se réduisent en saison sèche en un chapelet de mares dont certaines sont pérennes (Compaoré, 2016). La pérennité de ces mares est assurée par les nombreuses sources d'eaux présentes dans le bassin versant (Compaoré, 2014). Les études d'identifications des sources menées dans les espaces de compétence des Agences de l'Eau du Mouhoun et des Cascades ont permis de dénombrer 251 sources d'eau. La répartition de ces sources selon la géologie a montré que la zone sédimentaire compte 196 sources d'eau contre 55 sources dans la zone cristalline.

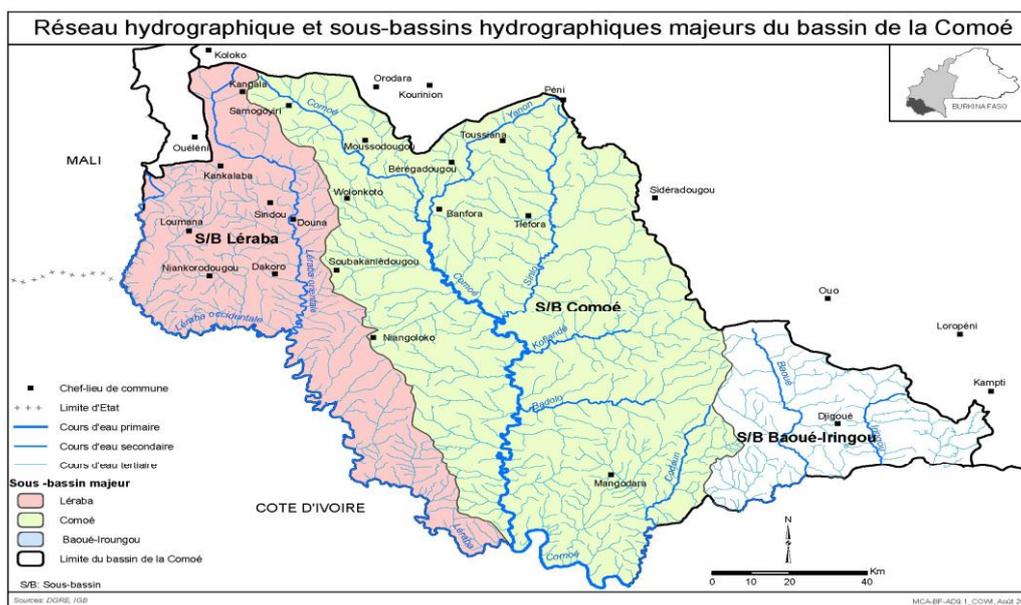


Figure 4 : Réseau hydrographique et sous bassin de la Comoé (Compaoré, 2016).

Par ailleurs cette étude a révélé qu'en saison sèche les sources à gros débits sont situées dans la zone sédimentaire avec des débits très variables allant de 0.01 m<sup>3</sup>/h à 5 m<sup>3</sup>/h dont les sources de Takaledougou Koko et Tourny ont montré des débits exceptionnels, respectivement de l'ordre de 14,84 m<sup>3</sup>/h et de 40,13 m<sup>3</sup>/h. Dans la zone cristalline, les sources ne possèdent que des débits modestes qui vont de 0.5 m<sup>3</sup>/h à 3 m<sup>3</sup>/h.

En ce qui concerne le relief de la zone d'étude, comme montré à la Figure 5, elle présente une morphologie extrêmement accidentée bordée dans sa partie Nord par des reliefs ruiniformes tels que les pics de Sindou, partie supérieure de la formation de Kawara-Sindou. Cette couverture sédimentaire est constituée d'un plateau, surplombée de pointements doléritiques et des reliefs tabulaires de cuirasse latéritiques (Ouédraogo et al., 2018).



Figure 5 : Partie Nord du périmètre irrigué des pics de Sindou.

### I.5. Végétation et sols

La zone d'étude est un bas-fond aménagé à vocation rizicole. La végétation rencontrée dans cette zone est de type savane arborée à néré et karité, on y rencontre aussi des hautes herbes qui rendent les déplacements sur le terrain difficiles d'août à Novembre masquant les affleurements géologiques (Ouédraogo et al., 2018).

En ce qui concerne les sols de la zone d'étude, les travaux de Barke Guide (2020) ont permis de réaliser une carte pédologique (Figure 6) montrant la nature des différents types de sols.

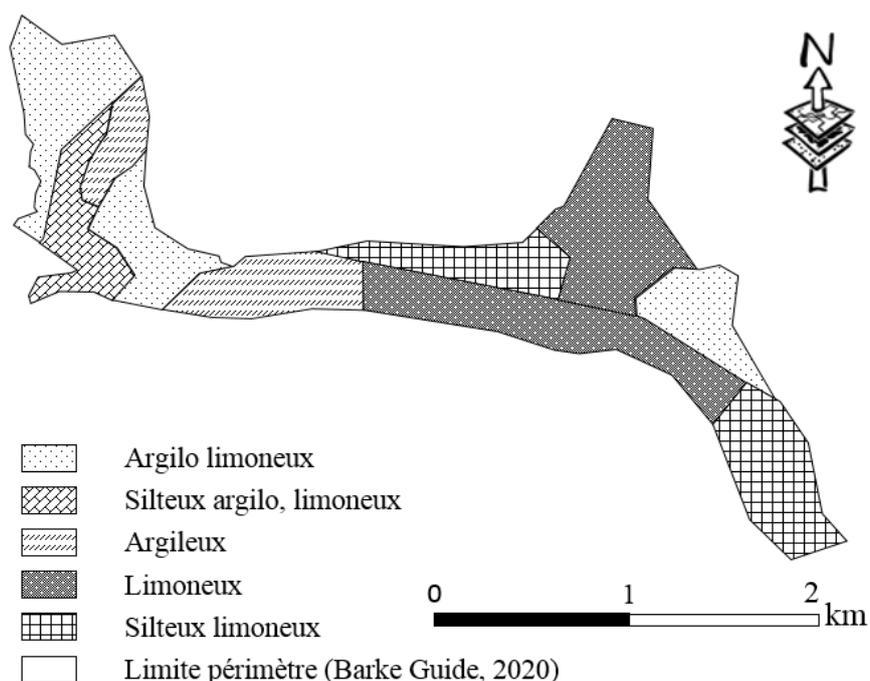


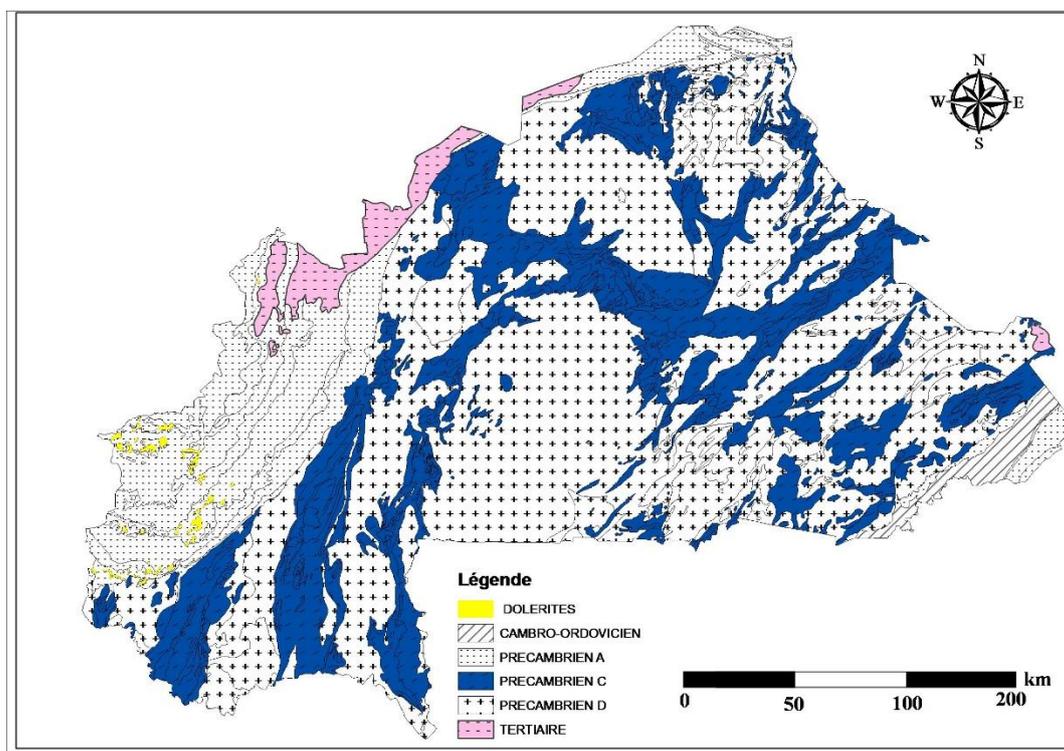
Figure 6 : Carte pédologique du bas-fond de Sindou Barke Guide (2020)

La Figure 6 montre que les sols du site expérimental d'étude sont à dominance argilo-limoneuse, et ce type de sol est très propice à l'agriculture, particulièrement pour la riziculture qui est la spéculation majeure du périmètre.

## I.6. Contexte géologique

### I.6.1. Contexte géologique régionale

La géologie du Burkina Faso présentée à la Figure 7 est composée de formations cristallines du précambrien C et D occupant sa partie centrale, de formations sédimentaires du précambrien A constitué par le bassin de Taoudéni aux frontières Nord et Nord-Ouest, et du précambrien A à Éocambrien constitué du bassin voltaïen aux frontières sud-est. À l'extrême nord-ouest se superposent aux formations du précambrien A, des dépôts continentaux tertiaires appelés plaines du Gondo. Les formations cristallines du précambrien C et D sont également recouvertes à l'Est par les dépôts des formations du tertiaire (Castaing et Le Métour, 2003).



*Figure 7 : Répartitions spatiales des unités géologiques du Burkina Faso (IGB, 2015)*

### I.6.2. Contexte géologique locale

Les notions et termes développés dans cette section sont basés sur les travaux géologiques de **Ouédraogo et al., (2018)** présentés dans la notice explicative de la carte géologique 1/200000 Feuille NC-30-XIII NIELLÉ.

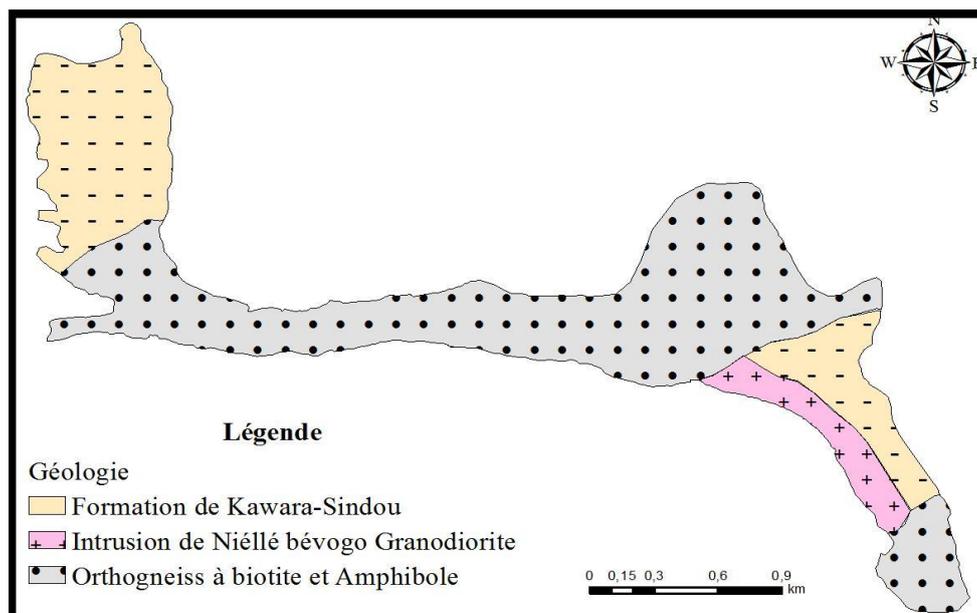


Figure 8 : Unités géologique de la zone d'étude (Ouédraogo et al., 2018)

D'après Ouédraogo et al., (2018), la géologie de la zone d'étude est constituée de formation sédimentaire, dans sa partie Nord, appartenant au groupe de la falaise du bassin sédimentaire de Taoudéni, et de formation de socle, dans sa partie Sud, constituée de complexe métamorphique et anatectique de Yandere-Soubakaniedougou (Figure 8).

### I.6.2.1. Groupe de la falaise du Bassin sédimentaire de Taoudéni

- **Géologie**

Le groupe de la falaise débute avec les siltites et les grès de la formation des Grès Inférieurs qui souligne la base de ce groupe (Tableau I). Cette première formation est surmontée par les grès grossiers et les conglomérats de la formation de Kawara-Sindou à laquelle succèdent les grès fins Glauconieux de la formation de Takaledougou. Le groupe de la falaise est surmonté par un assemblage gréseux, argilo silteux et carbonaté.

Tableau I: Nomenclature des assemblages litho stratigraphiques (Ouédraogo et al., 2018)

Groupe	Formation	Acronyme	Lithologie dominante
La falaise	Takaledougou	NPgfg	Grès fins Glauconieux
	Kawara-Sindou	Npggc	Grès grossier, conglomérat
	Grès inférieurs	Npgs	Grès, siltite

Dans la zone d'étude, seule la formation de Kawara-Sindou est observée. Cette formation d'épaisseur comprise entre 60 et 350 m repose en discordance majeure sur le socle birimien, et

constitue l'essentiel de la falaise qui surplombe le socle. Cette formation peut être subdivisée en deux membres : le membre de Kawara et celui de Sindou.



*Figure 9 : Formation de Kawara-Sindou, membre de Kawara (Ouédraogo et al., 2018) (a) Constitué de siltite, grès fin et niveaux conglomératiques, (b) mince niveau de conglomérat gréso-argileux au contact avec le socle granitique altéré Est.*

En ce qui concerne les membres de Kawara, ils constituent la base de la formation Kawara-Sindou. À l'extrême-ouest la succession lithologique correspond à une séquence positive constituée par des quartzites moyens à grossiers micro-conglomératiques (Figure 9 (a)), roses ou gris, à passées grossières à galets de quartz ou de quartzites millimétriques à centimétriques, évoluant vers le sommet en des grès ou des quartzites fins à moyens, rougeâtres, micacés, à litage horizontal ou à stratifications obliques tabulaires. À l'est dans le village de Kawara, la séquence est plutôt négative avec, au contact du socle, des grès fins rouges micacés contenant de rares galets de quartzite centimétriques à décimétriques isolés et des niveaux de galets imbriqués évoluant vers le sommet en des grès moyens à grossiers qui comportent d'épaisses lentilles conglomératiques à gros galets décimétriques arrondis de quartzite. Le contact avec le socle est marqué par un mince niveau conglomératique (80 cm) argilo gréseux, sans stratification visible, à galets centimétriques à décimétriques de quartz et de quartzite (Figure 9 (b)).



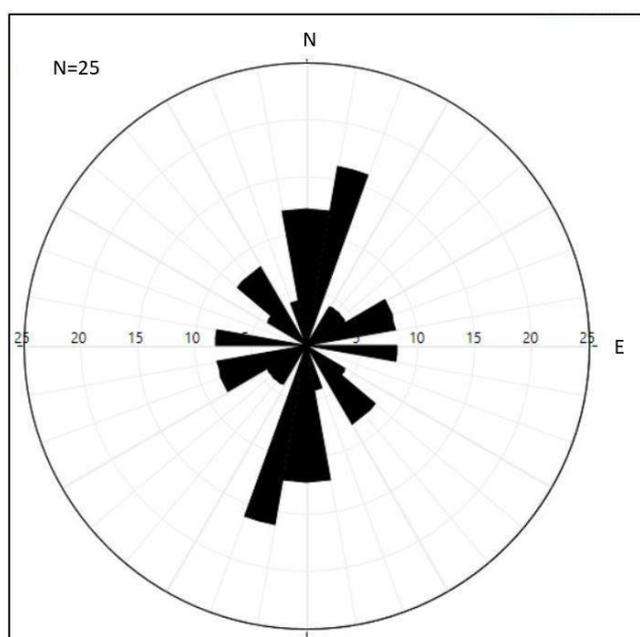
*Figure 10 : Formation de Kawara-Sindou, membre de Sindou (Ouédraogo et al., 2018)*

Les membres de Sindou constituent la partie supérieure de la formation de Kawara-Sindou (Figure 10). Ce faciès gréseux est affecté par une intense fracturation qui lui donne à l'érosion

un aspect ruiniforme ou en aiguilles caractéristiques dans la région de Sindou où cette fracturation est amplifiée par un système de grandes fractures sub méridiennes. Il repose en concordance sur le membre de Kawara par l'intermédiaire d'une coupure lithologique assez nette marquée par une surface plane. Le membre de Sindou est constitué de grès ou de quartzites fins à moyens, gris à roses, avec dans la partie inférieure de rares passées à gros galets décimétriques de quartzite, des rides de vagues et des stratifications obliques tabulaires à feuillets plats alternant souvent avec un litage horizontal. La partie supérieure de ce membre comporte de nombreuses stratifications obliques en gouttières dont les feuillets sont soulignés par des galets de quartz millimétriques à centimétriques, anguleux, quelquefois disposés selon un granoclassement vertical progressif.

- **Tectonique**

Dans la zone d'étude, les fractures constituent l'élément structural dominant. Elles sont généralement ouvertes, plus rarement cimentées par de la silice (veines) et dans ce dernier cas elles se présentent souvent en réseaux irréguliers anastomosés. La fracturation affecte préférentiellement les niveaux grossiers et est responsable de l'aspect localement ruiniforme du membre de Sindou de la formation de Kawara-Sindou. L'orientation des fractures est parfois très variable, mais une famille de fractures dominantes, se démarque particulièrement selon une orientation Nord-Nord-Est-Sud-Sud-Ouest (Figure 11).



*Figure 11 : Orientation des fractures locale (Compaoré, 2016; Ouédraogo et al., 2018)*

Par ailleurs, le levé aéromagnétique réalisé dans le cadre du programme SYSMIN indique la présence d'une faille de socle orientée Nord-Est-Sud-Ouest. Cette faille marque un

approfondissement du socle et du bassin sus-jacent vers le nord-ouest le long d'une ligne s'étirant entre les villages de Kôtoù Déni et de faon. Il est vraisemblable que son influence sur l'épaisseur des séries sédimentaires est limitée à la seule formation basale de Kawara-Sindou. De plus, la couverture sédimentaire dans la zone d'étude apparaît compartimentée par deux familles de linéaments d'importance régionale. Des linéaments orientés nord-sud ou Nord-Nord-Est-Sud-Sud-Ouest bordent notamment les lambeaux de roches sédimentaires à l'intérieur du socle. Une seconde famille de linéaments, orientée Est-Ouest à Est-Nord-Est-Ouest-Sud-Ouest, affecte le socle également et compartimente la couverture sédimentaire. Certains de ces linéaments peuvent être interprétés comme l'expression en surface de failles décrochantes généralement senestres, et une composante verticale est également envisageable.

### **I.6.2.2. Complexe métamorphique et anatectique**

Le complexe métamorphique et anatectique (CMA) de Yandere-Soubakaniedougou se compose d'une suite de gneiss possiblement granulitiques rubanés, surtout felsiques, mais aussi parfois mafiques avec une affinité tholéiitique. Tous sont recoupés par un cortège d'aplités et de dykes de pegmatite à tendance potassique. Dans la zone d'étude des affleurements gneissiques pointent aussi, de sorte que, comme Marcelin (1971), force est de constater qu'il s'agit d'un domaine assez vaste véritablement affecté d'un métamorphisme de haut faciès et qui devraient s'étendre sur une bonne partie du socle entre les ceintures volcano-sédimentaires de Loumana et de Banfora, entrecoupé d'îlots rémanents du protolithe et d'intrusifs plus tardifs vraisemblablement en partie endogène issu de l'anatexie des migmatites.

## **I.7. Contexte hydrogéologique**

### **I.7.1. Contexte hydrogéologique régionale**

L'hydrogéologie du Burkina Faso est caractérisée par deux grands ensembles d'aquifères qui sont les aquifères de socles et les aquifères sédimentaires (Lajaunie, 2017). Dans les aquifères de socles l'eau souterraine se retrouve au sein de trois strates, les altérations argilo-sableuses en surface, les arènes plus en profondeur, rocher altéré et fissuré qui reposent sur le socle sain. Quant aux aquifères sédimentaires elles concernent :

- la bordure sud-est du bassin de Taoudéni située dans la partie Nord-Ouest du Burkina-Faso. Elle se compose de neuf formations à dominante gréseuses empilées les unes sur les autres en couches affectées d'un léger pendage vers le Nord-ouest (2° à 3°) (Dakoure, 2003) ;

- l'aquifère sédimentaire au Nord représentant le prolongement vers l'Est de la base inférieure de la zone sédimentaire occidentale (Bordure sud-est du bassin de Taoudéni) ;
- enfin de l'aquifère sédimentaire Orientale à l'Est constitué de grès anciens précambriens de Gobnangou, de terrains cambro-ordoviciens de la Pendjari (Lajaunie, 2017).

### I.7.2. Contexte hydrogéologique locale

Les paramètres hydrodynamiques des différentes formations de la série sédimentaire de Taoudéni, extrait des travaux de Dakoure (2003), nous renseignent sur les valeurs de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement de la formation de Kawara-Sindou. En effet l'aquifère GKS a une transmissivité comprise entre  $2.3-10 \text{ (m}^2/\text{s)}.10^{-4}$  et un coefficient d'emmagasinement compris entre  $1-38,1.10^{-4}$ . Cette variabilité peut être due à l'hétérogénéité dans la composition des aquifères qui sont à dominance gréseuse (Kutangila, 2019). Des travaux plus récents entrepris dans le cas du programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest (VREO), ont permis d'établir théoriquement les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère Grès de Kawara-Sindou et du continental terminal (Tableau II) si une épaisseur saturée de 20m est considérée.

*Tableau II : Paramètres hydrodynamiques des aquifères présents sur le site d'étude*

Nomenclature harmonisée	Aquifère	Epaisseur forage (m)	T (m <sup>2</sup> /s).10 <sup>-4</sup>	S.10 <sup>-4</sup>
Infracambrien	GKS	20	2.7	0.135
CT	CT	20	10	0.5

Les valeurs de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement obtenues pour la formation de Kawara-Sindou et de la formation du continental terminal suggèrent que les aquifères de ces formations sont libres.

Enfin dans la zone d'étude, l'étude de recensement des émergences souterraines réalisée par l'Agence de l'eau des Cascades et du Mouhoun en 2016 a montré une distribution des paramètres chimiques variant de 5 à 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ne dépassant guère les 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dans la zone sédimentaire et plus élevées dans la zone de socle, et des valeurs en période d'étiage variant entre 4 et 12.33 pour le pH. Ces valeurs demeurent les mêmes en saison sèche comme en saison humide (Compaoré, 2016).

## II. Revue bibliographique sur la caractérisation des émergences d'eaux souterraines

### II.1. Généralités sur les émergences d'eaux souterraines

Les sources, émergences, exurgences, résurgences, représentent les mêmes phénomènes dans le dictionnaire d'hydrogéologie de Castany et Margat, (1977). Elles sont des zones diffuses ou localisées de la terre où les eaux souterraines sortent pour s'écouler en surface. Elles revêtent une importance grandissante suite aux menaces du changement climatique (Ligban et al., 2009) et constituent l'objet de l'étude présente. Il serait donc bien de passer en revue les critères d'identification, des émergences d'eaux souterraines, existantes ainsi que leurs conditions d'émergence.

#### II.1.1. Classifications des émergences d'eaux souterraines

Plusieurs auteurs ont énuméré des critères prenant en compte les caractéristiques (physique, chimique, écologique, hydrogéologique) des sources d'eau, sur la base desquelles pourraient se faire leur classification.

##### II.1.1.1. Caractéristiques hydrogéologiques

En tenant compte des caractéristiques hydrogéologiques, les types d'émergences rencontrées dans la littérature sont présentés dans le Tableau III.

*Tableau III : Classification des émergences d'eaux souterraines (1)*

Auteurs	Critères	Classification
Faillat et Drogue, 1993	Types de nappes responsable de l'écoulement	Émergences de nappes profondes (Favara et al., 1998; Pouchan, 1995) ;
Favara et al., 1998		Émergences de nappes superficielles ou exutoires de
Pouchan, 1995		nappes superficielles (Bourlier et al., 2005 ; Faillat et
Bourlier et al., 2005		Drogue, 1993).
Archambault, 1987	Types de nappes superficielles responsable de l'émergences	Nappe libre (sources de déversement, débordement ou
Bodelle et Margat, 1980		de trop plein, dépression ou d'émergence)
Castany et Margat, 1977		Nappe captive (artésiennes), aquifères karstique
		(résurgence formant des sources vaclusienne ou diaclasienne)

### II.1.1.2. Caractéristique physique, chimique et écologique

En tenant compte des caractéristiques physiques, chimiques, et écologiques les types d'émergences rencontrés dans la littérature sont présentés dans le Tableau IV :

*Tableau IV : Classification des émergences d'eaux souterraines (2)*

Auteurs	Critères	Classifications
	Force à l'origine de l'émergences de l'eau	Sources gravitaire, Sources artésiennes, Sources associées au volcanisme
Meinzer, 1924	Géomorphologie de l'orifice de l'émergence	(Modifié par Springer, 2009)
	Continuité ou non de l'écoulement et régime de variation du débit	Sources constantes, Sources pérennes, Sources saisonnières, Sources intermittentes, Sources temporaires ou accidentelles
Hynes, 1970 Springer et Stevens, 2009	Géomorphologie de l'orifice de l'émergence ou la sphère d'émergences des sources	Cave (Waltham et Fookes, 2003), Exposure (Waltham et Fookes, 2003), Fountain (Glennon et Pfaff, 2005), Geyser (Bryan, 1919), Gushet (Hynes, 1970), Hanging garden (Welsh, 1989), Helocrene (Hynes, 1970), Hillslope (Springer et al., 2008), Hypocrene (Springer et al., 2008), Limnocrene (Hynes, 1970), Mound form (Ponder et al., 1989), Rheocrene (Hynes, 1970)
Clarke, 1924 Alfaro et Wallace, 1994 ; Azcona et Lopez, 1969	Température des eaux de l'émergences	Sources thermales, sources hypothermes ( $T < 12.2 + T_{moyair}$ ), sources orthothermes ( $T = T_{moyair}$ ), hyperthermes ( $T > 12.2 + T_{moyair}$ ) (Alfaro et Wallace, 1994; Azcona et Lopez, 1969)
Cruz et França, 2006	Composition chimique des eaux (cations et anions majeurs et mineurs)	Sources minérales (type avec dominance des anions ou cations)

### II.1.2. Conditions d'émergences des eaux souterraines

Les conditions d'émergence des sources d'eau concernent les mécanismes géologiques et hydrogéologiques responsable de l'écoulement de l'eau en surface. Sur la base de ces mécanismes deux grands types d'émergences souterraines peuvent être distingués, les émergences de nappes profondes et les émergences de nappes superficielles.

Les émergences de nappes profondes sont liées à des remontées de nappes qui apparaissent par action de l'érosion entraînant l'affleurement des fractures, des flexures ou des failles à la surface du sol (Favara et al., 1998; Pouchan, 1995). Elles donnent naissance à des sources thermales (température supérieure à la température moyenne annuelle locale (Azcona et Lopez, 1969)), des sources minérales (possèdent à l'émergence des substances dissoutes correspondant à un résidu sec à 110 supérieurs à 1g/l (Canellas, 1995) et les sources thermo minérales souvent rencontrées en région volcanique (Cruz et França, 2006). Quant aux émergences de nappes superficielles, elles correspondent aux exutoires de ces nappes, soit du fait de formations imperméables sous-jacentes, soit du fait de la topographie (Bourlier et al., 2005 ; Faillat et Drogue, 1993). Les eaux issues de ces émergences sont caractérisées par une faible minéralisation (Faillat et Drogue, 1993) et se situent généralement dans les zones de socle cristallin et cristallophyllien à forte pente. Ces sources sont aussi présentes dans les zones de socle granitique où elles constituent, pour la plupart, des exutoires de nappes qui suivent généralement la topographie (Ligban et al., 2009).

### II.1.3. Quelques définitions des types d'émergences d'eaux souterraines

Dans cette partie, il est question de définir et d'expliquer les mécanismes d'écoulement des sources. Sur la base de la géomorphologie de l'orifice des sources (Figure 12) :

**Cave** : source émergeant dans les terrains karstiques et ne s'écoulant pas directement en surface, mais à l'intérieur de larges conduites (Waltham et Fookes, 2003, Springer et Stevens, 2009).

**Exposure** : source similaire aux sources de types cave, mais dont l'aquifère non confiné est près de la surface du terrain naturel (Waltham et Fookes, 2003; Springer et al., (2008)).

**Fountain** : sources froides, émergent sous l'effet de pression due au CO<sub>2</sub> ou du confinement de l'aquifère (Glennon et Pfaff, 2005; Springer et al., (2008)).

**Geyser** : source rare, chaude, et émergeant explosivement avec des éjections de vapeur d'eau (Bryan, 1919; Springer et al., (2008)).

**Gushet** : source émergente des falaises abritant un aquifère perché ou libre, ces types de sources hébergent plusieurs types d'écosystème (13) (Hynes, 1970; Springer et al., (2008)).

**Hanging garden** : source s'écoulant horizontalement le long d'un contact géologique ou le

long d'une paroi rocheuse d'un aquifère perché et non confiné (Welsh, 1989 ; Spence (2008)).

**Helocrene** : source émergente dans les zones humides à faible gradient soutenues par des aquifères profonds et non confinés (Hynes, 1970).

**Hillslope** : source émergente d'aquifères confinés ou non confinés sur un versant de pente égale à 30° ou 60° (Springer et al., 2008).

**Hypocrene** : source enterrée où l'écoulement n'atteint généralement pas la surface en raison d'un débit très faible et d'une forte évaporation ou transpiration (Springer et al., 2008).

**Limnocrene** : sources localisées en amont de zones marécageuses étendues et émergeant des aquifères confinés ou non confinés (Hynes, 1970).

**Mound form** : source émergente d'un monticule minéralisé, fréquemment dans des systèmes magmatiques ou des failles (Ponder et al., 1989).

**Rheocrene** : source émergente, dans un ou plusieurs canaux d'écoulement (Hynes, 1970).

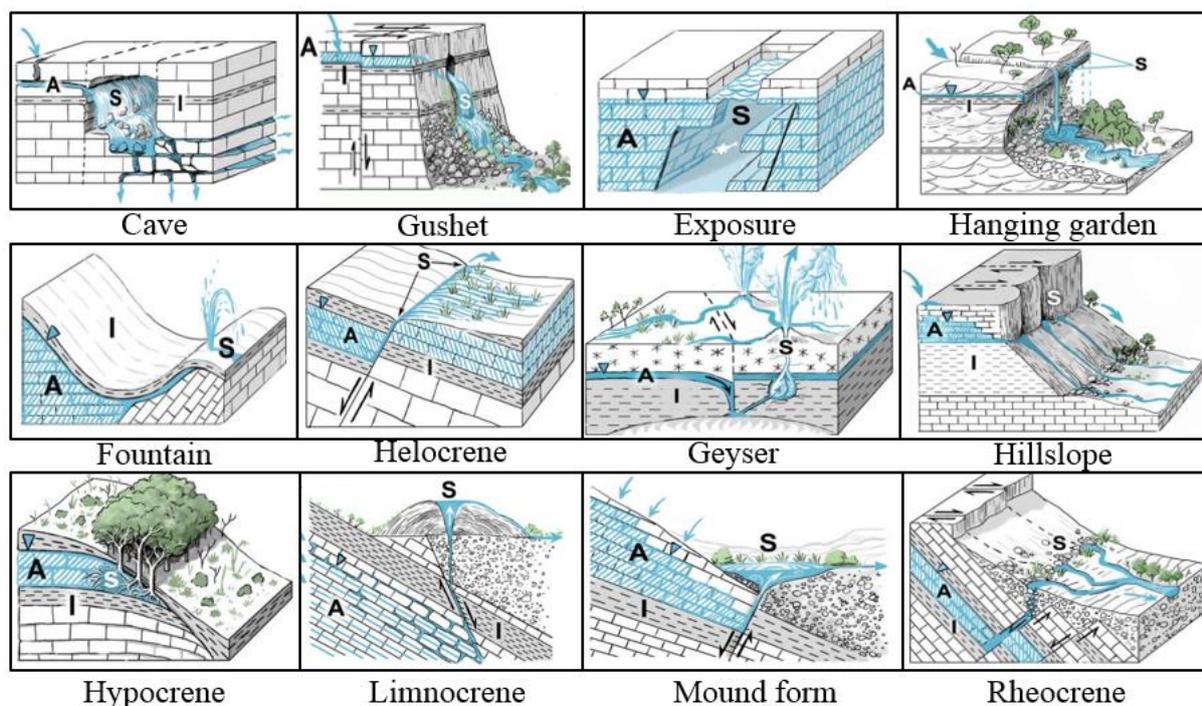


Figure 12 : Représentation des émergences souterraines (Springer et Stevens, 2009) (A) Aquifères, (S) source, (I) substratum imperméable, (∇) niveau statique de l'eau, (↕) fractures ou failles.

Par ailleurs nous avons en fonction du type de nappes superficielles responsables de l'émergence d'eaux souterraines (Figure 13) les sources dites :

**Source de déversement** : les sources de déversement sont des sources drainant le plus souvent des niveaux perchés, liées à l'affleurement du substratum de la nappe qui est libre. (Archambault, 1987).

**Source de débordement ou de trop-plein** : les sources de débordement apparaissent dans des zones où la nappe d'un aquifère captif devient libre par affleurement du toit. (Archambault, 1987).

**Source de dépression ou d'émergence** : les sources de dépression sont les sources typiques de zones au relief très peu accentué. Ces sources correspondent à l'affleurement de la zone saturée d'un aquifère à nappe libre, nappe alluviale ou nappe de vallée (Archambault, 1987).

**Source jaillissante ou artésienne** : les sources artésiennes jaillissent d'une nappe emprisonnée sous pression dans le sol. L'eau circule sous pression depuis l'aquifère jusqu'à la surface du sol, à travers les fissures du toit de la nappe. (Archambault, 1987).

**Résurgences** : les résurgences sont l'apparition à la surface d'une rivière souterraine provenant d'un aquifères karstique (Archambault, 1987). Si ces sources constituent l'exutoire d'un conduit karstique ascendant subvertical nous sommes en présence de résurgences vaclusiennes.

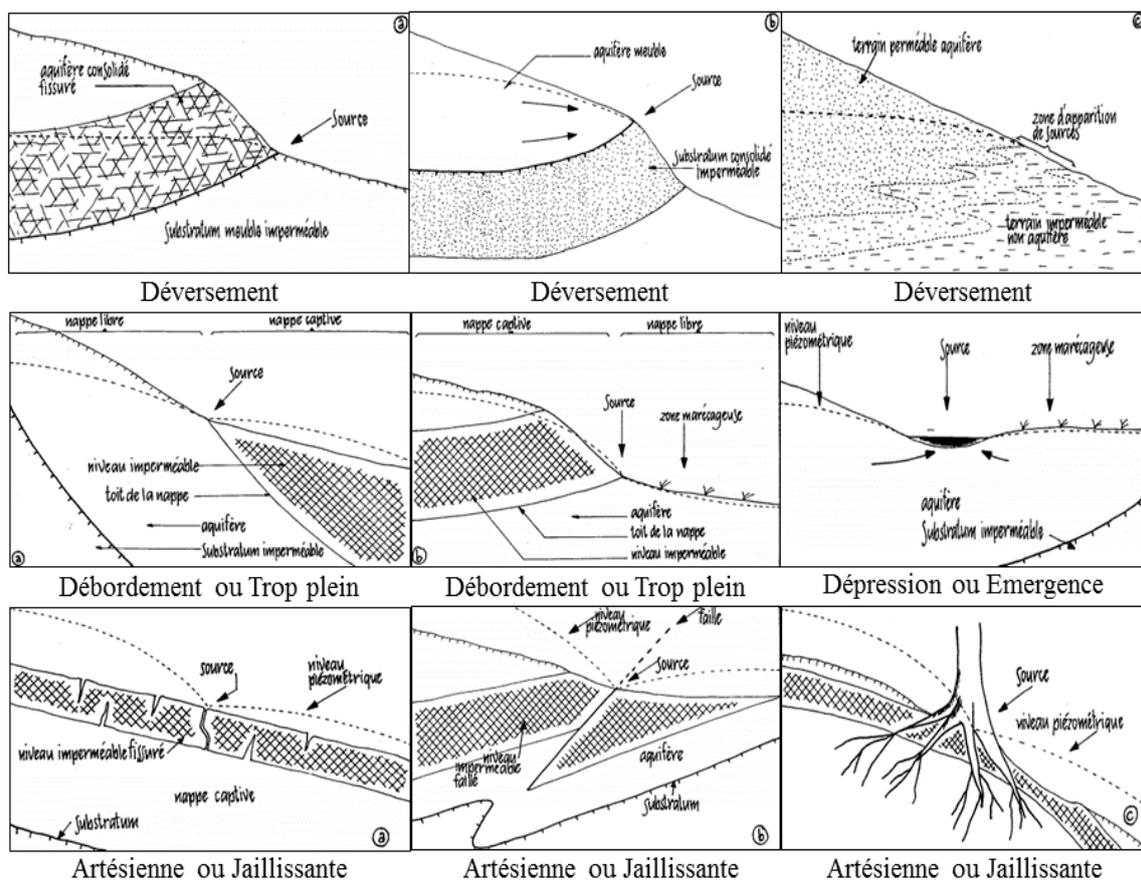


Figure 13 : Représentation des émergences souterraines (Archambault, 1987)

## II.2.Méthodes de caractérisation des sources d'eaux

### II.2.1. Détermination des conditions d'émergence des sources d'eaux

La détermination des conditions d'émergences et mécanismes d'écoulements des sources d'eaux passe par l'étude, hydrochimique des eaux de ces sources, de la géologie et de la tectonique de la zone abritant les sources d'eaux et, de la géomorphologie de l'environnement de l'émergence (Archambault, 1987; Springer et Stevens, 2009). La synthèse des données géologiques et géomorphologiques couplées aux techniques d'analyse structurale ont permis à (El Gasmî et al., 2013) de caractériser les émergences d'eaux souterraines du piémont de jbel Ayachi.

Premièrement, l'analyse structurale permet la caractérisation des accidents tectoniques, des failles, des fractures et la mise en évidence de leur rôle dans les écoulements souterrains ainsi que dans l'émergence des eaux souterraines. Elle peut être réalisée, d'une part à l'aide des techniques de traitement numérique d'image satellitaires, ayant pour finalité l'extraction des linéaments qui sont validés par d'autres méthodes telles que la prospection géophysique ou les essais de pompages (Kabre, 2012). L'extraction de ces linéaments peut se faire de façon manuelle à l'aide de techniques de rehaussement d'image (filtrage directionnel, composition de bandes) (Mostafa et al., 2005 cités par Javhar et al., 2019) ou de façon automatique (Eldosouky et al., 2017 cités par Javhar et al., 2019) à l'aide d'algorithme et logiciel (PCI GéoAnalyst, PCI Geomatica, Matlab) (Rahnama et al., 2014 cités par Javhar et al. 2019). D'autres part, l'analyse structurale peut être réalisée à l'aide des méthodes de prospections géophysique telles que les méthodes électromagnétiques qui peuvent être utilisée pour la caractérisation de la géométrie et des propriétés des discontinuités majeures (fractures) (Khaldaoui et al., 2013), pour la détection de bassins d'effondrement (Borne et Chevalier, 1989). Bosch et Müller (2005) ont démontré l'intérêt de l'utilisation des techniques VLF-LF pour la détection des fractures et des failles peu profondes particulièrement dans les réseaux karstiques.

De plus, l'effectivité de l'écoulement de l'émergence à la surface peut être mise en évidence grâce à la méthode de polarisation spontanée. Cette méthode est utilisée pour étudier les zones où l'on souhaite mettre en évidence des variations, d'origine électrochimique, du champ électrique dû à la présence, de métaux (Sato and Mooney, 1960), d'un gradient de température (Fripiat, 1971) mais aussi à la circulation de l'eau dans le sol (Zhou, 1999). L'existence de plusieurs sources responsables de la variation du potentiel électrique rend cette méthode très peu robuste.

Deuxièmement l'étude de la géomorphologie et de l'hydrogéologie permet de réaliser

des coupes topographiques mettant en évidence des zones de changement de pente brusque ou de dépression pouvant héberger des sources d'eau et d'apprécier la variation spatiale du niveau piézométrique. L'étude conjointe de la géomorphologie et de l'hydrogéologie permet de mettre en évidence les zones de drainage, les zones de décharges et de recharge (Gilli et al., 2008 cité par Kutangila, 2019).

Troisièmement, l'hydrochimie qui est d'un grand apport dans les études hydrogéologiques peut être utilisée dans la détermination des conditions d'émergences. Les ions majeurs et mineurs de même que les isotopes sont généralement utilisés pour identifier les caractéristiques chimiques et l'origine des eaux souterraines (Bouragba et al., 2011; Fakir et al., 2002), les phénomènes de mélanges ou d'échanges d'eau entre différents réservoirs (Han et al. 2010 ; Razack et Dazy 1990 ; Sauret, 2013). Les méthodes d'analyse hydrochimique classiques (diagramme de Piper (1944), diagramme de Berkloff , diagramme de Durov (1948), diagramme de Collin (1923), diagramme de Stiff (1951), diagramme de Gibbs (1970) et la classification de Back (1961)), les fréquences au non dépassements des conductivités, l'équilibre calco carbonique, les statistiques de rang, de forme ou multivariées (ACP, AFD, AFC) sont utilisées en vue de déterminer les différents faciès, leur origine, les mélanges éventuels et les âges relatifs des eaux des sources (Sauret, 2013 ; Singh et Kumar, 2015).

Dans le cadre de cette étude les méthodes utilisées pour l'explication des conditions d'émergences ont concerné l'analyse structurale, à l'aide des méthodes de prospection géophysique (prospection électromagnétique VLF) du fait de l'importante couverture sédimentaire présente dans la zone masquant les structures linéaires, l'étude du contexte géologique, hydrogéologique et géomorphologique de la zone d'étude et enfin l'hydrochimie des eaux de sources.

## **II.2.2. Etude qualitative des eaux des émergences souterraines**

Les études hydrochimique des eaux servent pour l'étude qualitative des eaux des émergences souterraines. En effet l'hydrochimie est utilisée pour la détermination des sources de pollution des eaux souterraines (Peng et Cheng, 2014), et les phénomènes d'intrusion saline (Najib et al., 2017). Elle est aussi utilisée pour l'évaluation de l'aptitude d'usage des eaux souterraines pour l'irrigation (Adjiri et al., 2020; Ligban et al., 2009; Singh et Kumar, 2015). Ainsi, le taux d'absorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (%Na), le résidu Sec (RS), la dureté de l'eau, le carbonate de sodium résiduel, l'indice de perméabilité de Donéen, l'indice de Kelley, la pression Osmotique ( $\Pi$ ) permettent d'apprécier la qualité des eaux souterraines, mais aussi des eaux de sources pour leurs emplois en irrigation (Adjiri et al., 2020;

Ligban et al., 2009; Singh et Kumar, 2015).

Dans le cadre de cette étude l'appréciation de l'aptitude des eaux pour l'irrigation s'est faite grâce aux méthodes d'analyse hydrochimique classique précédemment citée (SAR, %Na, RS,  $\Pi$ , diagramme de Riverside et Wilcox)

### II.2.3. Etude quantitative des émergences d'eaux souterraines

L'étude hydrologique ou quantitative des sources d'eau passe par l'établissement de corrélations entre les séries pluviométriques et les débits des sources mesurées sur des pas journaliers, mensuels ou annuels. (El Gasmî et al., 2013 ; Fiorillo et Doglioni, 2010). En absence de mesures antérieures de débits, cette étude quantitative se résume à la détermination du débit et l'évaluation du volume d'eau facilement mobilisable.

La mesure du débit d'une source, de même que son exploitation en tant que ressource, nécessite toujours un aménagement, si sommaire soit-il, du site de l'émergence. Cet aménagement est appelé captage, et vise à assurer au maximum et de manière permanente le libre écoulement de l'eau à partir de la formation réservoir. Le jaugeage du débit des sources se ramène donc à la mesure du débit d'un écoulement de surface (section naturelle ou canaux à surface libre) (Wojnarowski et al., 1994). Ainsi il est fait état dans la littérature de plusieurs méthodes de mesures de débit d'eau applicables à l'étude hydrométrique des sources. Les méthodes utilisées sont entre autres les débitmètres ultrasoniques Doppler (Birgand et al., 2005), la méthode chimique ou le traçage (Dumas, 1952), les dispositifs de mesure des débits dans les bassins versants agricoles « les déversoirs (rectangulaire avec ou sans contraction, triangulaire, trapézoïdal, circulaire), la mesure de débit par empotement, les techniques de jaugeage (moulinet, courantomètre) » (Belleville et al., 2017; Benoist et Birgand, 2002). Le choix et l'utilisation de ces méthodes de mesure du débit est fonction de l'environnement de la source et de la forme du captage.

Cette étude quantitative des émergences d'eaux souterraines, devrait s'étendre également à l'étude hydrodynamique de la nappe responsable de l'émergence par la détermination des paramètres hydrodynamiques. Pour ce faire plusieurs méthodes permettent de déterminer les paramètres hydrodynamiques des aquifères à savoir la transmissivité  $T$  et le coefficient d'emmagasinement  $S$ . Parmi les différentes méthodes existant pour déterminer ces paramètres, la plus utilisée est l'essai de pompage (Yonli, 2016). La seule difficulté que présente cette méthode est de savoir si elle demeure adaptée aux aquifères hétérogènes. Ainsi d'autres méthodes telles que la tomographie hydraulique, la granulométrie, ont été proposées par les hydrogéologues en vue d'améliorer la résolution spatiale des essais de pompages.

Dans le cadre de cette étude un accent particulier est porté sur les essais de pompage, les mesures de débits grâce aux déversoirs, au moulinet, flotteur, et aux mesures par empotement car elles constituent les méthodes mise en œuvre pour la quantification de la ressource en eau disponible.

## **DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIELS ET MÉTHODES**

### **III. Matériels**

#### **III.1. Présentation des outils et données utilisés**

##### **III.1.1. Appareils de mesures**

Au nombre des appareils utilisés dans le cadre de cette étude nous avons :

- un (1) GPS Garmin pour la délimitation spatiale et la prise de coordonnées ;
- une (1) boussole pour la prise des directions géographiques ;
- un (1) résistivimètre SYSCAL Junior/R1Plus pour la prospection électrique ;
- un (1) conductimètre WADI ABEM pour la prospection électromagnétique ;
- un (1) multimètre et deux (2) électrodes impolarisables pour la polarisation spontanée ;
- un (1) moulinet à hélice pour la mesure du débit ;
- deux (2) déversoirs (triangulaire et rectangulaire) pour la mesure du débit ;
- un (1) chronomètre pour la mesure du temps écoulé ;
- une (1) motopompe pour les essais de pompage ;
- une (1) vanne pour la régulation de débits ;
- deux (2) seaux de Jaugeages de 25l et 60l et des bouteilles de 1,5l ;

##### **III.1.2. Outils informatiques**

Comme outils informatiques utilisés dans le cadre de cette étude nous avons les logiciels :

- Google Earth 7.3.2 pour la délimitation de la zone d'étude ;
- ArcGIS 10.7 pour la réalisation des cartes thématiques ;
- ROCKWORKS 17 pour l'élaboration des rosaces directionnelles ;
- CROPWAT 8.0 et CLIMWAT 2.0 pour l'estimation des besoins en eau ;
- Envi 5.1/PCI-GEOMATICA pour le traitement des images satellitaires ;
- Excel pour la réalisation des différentes courbes et des diagrammes ;
- Word pour la rédaction du compte rendu des activités ;
- Ipi2Win, IRIS Instruments pour le traitement des données géophysiques ;
- Diagrammes pour le traitement de résultats d'analyse d'hydrochimie ;
- EQUIL pour le calcul des équilibres calco-carboniques ;
- XLSTAT pour la recherche de corrélations entre les paramètres chimiques.

### **III.1.3. Données utilisées**

Au nombre de données utilisées dans le cadre de l'étude nous avons :

- un modèle numérique de terrain (MNT) de type SRTM 1 Arc-Second Global 2014 de la scène 197\_053 de LANDSAT ;
- des images satellitaires des capteurs LANDSAT 7 ETM+ et 5 TM de la scène 197\_053 ;
- Une image satellitaire du capteur LANDSAT 8 de la scène 197\_053 ;
- les données piézométriques issues des campagnes de mesures des niveaux statiques en saison sèche et en saison pluvieuses des ouvrages présents dans le périmètre ;
- les données climatiques et météorologiques issues des stations situées aux environs du périmètre irrigué de Sindou ;
- les données agronomiques et pédologiques du périmètre irrigué de Sindou ;
- les données géophysiques issues de travaux de prospection géophysique ;
- les données géologiques détaillées de la zone d'étude, la notice explicative de la carte géologique 1/200000 de la feuille NC-30-XIII Niellé fournies par le BUMIGEB ;
- les données issues des analyses chimiques des eaux des ouvrages, des sources d'eaux, et de la pluie de la zone d'étude ;
- les informations générales collectées auprès des irrigants au moyen de fiches d'enquête de terrains.

## **IV. Méthodes**

### **IV.1. Etude diachronique de l'évolution des superficies cultivées en saison sèche**

L'étude diachronique de l'évolution des superficies cultivées en saison sèche au sein du bas-fond de Sindou a intéressé les campagnes sèches de 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 et 2020 ou les données étaient disponibles. Ainsi, une cartographie de la zone d'étude et des sources d'eau a été réalisée, s'en est suivi le choix et le traitement des images satellitaires couvrant la zone d'étude.

#### **IV.1.1. Cartographie de la zone d'étude et des sources d'eau**

La cartographie de la zone d'étude et des sources d'eau a eu pour but de déterminer les limites actuelles du bas-fond de Sindou et de repérer les zones d'émergences. Cette reconnaissance des contours de la zone d'étude s'est faite par levé à l'aide d'un GPS. Le trajet levé a ensuite été extrait et ajusté à l'aide du logiciel Google Earth. Par ailleurs, les coordonnées des sources d'eau, et les canaux d'irrigation ont été enregistrés à l'aide du GPS et importé sous Google Earth. Enfin une carte du bas-fond de Sindou a été réalisée par superposition du contour sur un fond d'image satellitaire obtenue par capture d'images de Google Earth 7.3.2, lesquelles images ont été géoréférencées sur le logiciel ArcGIS 10.7.

#### **IV.1.2. Evolution des superficies cultivées**

- **Choix des images satellitaires**

L'étude de l'évolution des superficies cultivées dans le bas-fond de Sindou a été réalisée avec des images satellitaires Landsat d'assez bonne résolution radiométrique, géométrique et spatiale de la zone d'étude appartenant à la scène 197\_053 (Tableau V). Ce choix est justifié par la disponibilité des images satellitaires Landsat couvrant toute la durée sur laquelle l'étude diachronique est réalisée.

L'observation de la Figure 3, renseigne sur la répartition uniforme des précipitations mensuelles, et permet d'écarter l'hypothèse selon laquelle l'évolution générale de la végétation pourrait être masquée par des conditions climatiques particulières précédant les prises de vues. Par conséquent, les images sélectionnées ont concerné les images ayant une couverture nuageuse inférieure à 10% et dont les dates de prises appartiennent à la saison sèche de la zone d'étude. Les dates ont été choisies de manière qu'elles coïncident avec la période de maturité de la majeure partie des spéculations réalisées sur le périmètre.

*Tableau V : Images satellitaires sélectionnées de la scène 197\_053*

Années	Bandes	Satellites	Dates	Conditions météorologiques
1995	B3-B4	Landsat 5 TM	17/05/1995	Couverture nuageuse inférieure à 20%
2000	B3-B4	Landsat 7	04/04/2000	Couverture nuageuse inférieure à 10%
2005	B3-B4	Landsat 7	18/04/2005	Couverture nuageuse inférieure à 10%
2010	B3-B4	Landsat 7	15/03/2010	Couverture nuageuse inférieure à 10%
2015	B3-B4	Landsat 7	29/03/2015	Couverture nuageuse inférieure à 10%
2020	B3-B4	Landsat 7	13/05/2020	Couverture nuageuse inférieure à 10%

- **Traitement des images**

L'exercice a consisté au traitement des images satellitaires sur le logiciel Envi 5.1. Dans un premier temps ce traitement a consisté en l'extraction de la région d'intérêt de l'étude (ROI : point supérieur gauche 263900.65E - 1180430.29N et point inférieur droit 273335.79E - 1174629.79N). Par suite pour mener l'analyse, le NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) a été choisi, car cet indice est relativement peu sensible aux conditions d'observation, l'erreur moyenne due aux effets atmosphériques étant de 15%. D'autres indices existent, mais présentent des erreurs moyennes élevées, 15% pour le STAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index), 17 à 20% pour le GEMI (Global Environment Monitoring Index) et même 26% pour le MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) (Bouiadjra et al., 2011). Le résultat de l'application du NDVI prend la forme d'une nouvelle image, la valeur de chaque pixel est comprise entre 0 (sol nu) et 1 (couvert végétal maximal). L'analyse de la palette de nuances s'étendant entre ces valeurs extrêmes (très peu fréquentes) permet d'apprécier la densité du couvert végétal et la quantité de biomasse verte (Bouiadjra et al., 2011).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{Eq.1}$$

NIR=Band B4, Red = Band B3.

- **Validation des superficies cultivées**

Cette dernière étape de l'étude diachronique a consisté à effectuer une sortie sur le terrain durant la période de prise de l'image satellitaire la plus récente (2020) afin d'établir une corrélation entre les valeurs du NDVI et les données vérités-terrain. Une fois les corrélations établies sur l'image satellitaire de la campagne sèche de 2020, elles ont été reconduites sur l'ensemble des autres images et permis d'avoir l'évolution réelle des superficies cultivées.

## **IV.2. Détermination des conditions d'émergences des sources d'eau**

### **IV.2.1. Etude géologique et tectonique**

Du fait de l'importante couverture sédimentaire (continental terminal) présente dans la zone d'étude l'analyse structurale, pour la mise en évidence des différentes failles et fractures représentant de potentiels couloirs d'écoulement des eaux souterraines ont été réalisées à l'aide de la prospection géophysique.

#### **IV.2.1.1. Analyse structurale par la prospection électromagnétique**

- **Principe**

Les méthodes électromagnétiques, notamment la prospection électromagnétique très basse fréquence (VLF) permet d'avoir une image en 2D du sous-sol. Elle est basée sur le principe général suivant (Mobante, 1991) : lorsqu'un corps de faible résistivité est traversé par un champ magnétique B, il s'y crée un courant induit qui génère à son tour un champ magnétique b dit secondaire et qui tend à s'opposer au champ primaire : c'est le principe de l'induction. Le champ induit a des caractéristiques dépendant de la structure du sous-sol traversé, ainsi la mesure de ces caractéristiques permet d'en déduire sur la zone prospectée la variation de la structure du sous-sol. Le champ magnétique B provient des émetteurs radio-militaires utilisés pour la transmission à grande distance et dont la fréquence se situe entre 12 et 30 kHz. Si f est la fréquence de l'onde sélectionnée pour la mesure f en Hertz, et  $\rho_a$  la résistivité en ohm-mètre :

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi f \mu_0} * \frac{E_x^2}{H_y} \quad \text{Eq.2}$$

Où  $\rho_a$  est la résistivité apparente (ohms.m),  $E_x$  le champ électrique (A/m),  $H_y$  le champ magnétique (V/m), f la fréquence de l'onde (Hz),  $\mu_0$  la perméabilité magnétique du vide (H/m)

Et la profondeur de pénétration P est donnée par la formule :

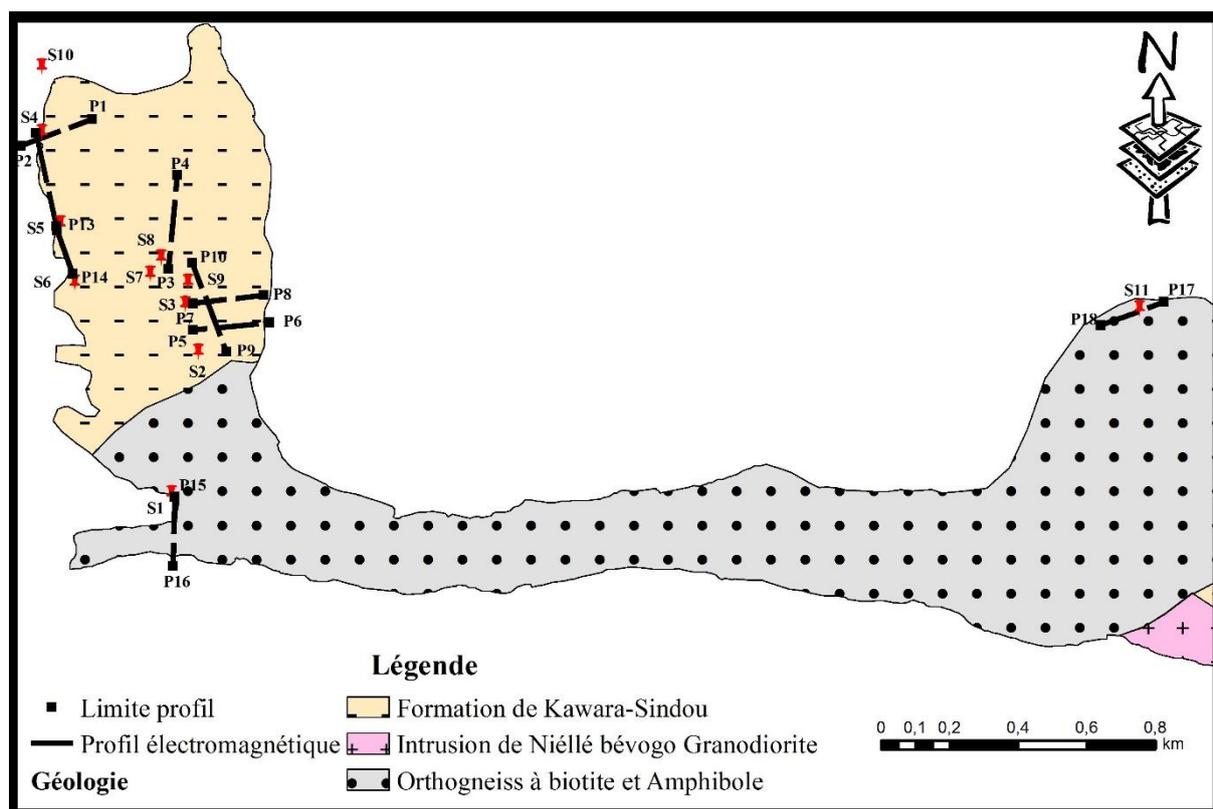
$$P = 503 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \quad \text{Eq.3}$$

Où  $\rho_a$  est la résistivité apparente (ohms.m), f la fréquence de l'onde (Hz).

- **Choix des directions**

Au total (09) neuf profils électromagnétiques (Figure 14) ont été réalisés dans le cadre de l'étude et ont permis de quadriller toutes les zones d'émergences d'eaux souterraines. En ce qui concerne le choix des directions de profils, elles ont été choisies dans le but de recouper les zones d'émergences d'eaux souterraines. A ces directions préférentielles, il s'est ajouté des profils électromagnétiques dans des directions orthogonales aux directions des fractures

majeures de la zone d'étude (Figure 11).



*Figure 14 : Direction des profils géophysique : Électromagnétique*

#### • Mise en œuvre de la prospection

Les longueurs des profils réalisés a été fonction de la distance entre les sources d'eau à recouper et varie entre 200m à 300m. Sur chaque direction choisie pour la réalisation du profil électromagnétique, avec l'appareil WADI-ABEM mesurant le ratio (en pourcentage) entre les composantes verticales (champ secondaire) et horizontale (champ primaire) du champ induit par le passage du champ primaire dans les matériaux du sous-sol, une recherche et une sélection de satellite de communication a été faite. Connaissant la direction de cet émetteur, les profils ont été réalisés avec un pas de mesure de 5m (permettant la détection d'anomalies de plus de 5m de diamètre) et une profondeur d'investigation de 100m fixe. La position exacte de certains points du profilage a été prise par rapport à un repère fixe. Enfin les données obtenues ont été extraites sur place afin de reprendre les profils présentant des erreurs.

#### • Traitement des données

Dans le cas de cette étude deux modes de représentations ont été utilisés. La représentation en section verticale croisée ou cross section peut être interprété comme une image 2D de la densité de courant sous le sol, où les zones présentant des ratios négatif (couleur bleu) représente la roche saine et les parties présentant des ratios positifs (couleur rose) représente des zones de

faible résistivité, ou zones fracturées. La représentation des données par un ensemble de graphes formé par la courbe de la partie réelle brute du ratio mesurée, correspondant à l'angle d'inclinaison ou de polarisation de l'ellipse, et la courbe de la partie imaginaire brute du ratio, représentant le rapport entre le plus petit axe et le plus grand axe de l'ellipse. Les courbes des parties réelles et imaginaires brutes ont une allure telle que le point d'inflexion est juste au-dessus de l'anomalie, cette disposition est plus exacte lorsque l'on applique un système de dérivation ou filtrage. Ainsi ces courbes dites filtrées présentent un pic positif (courbe réelle filtrée) et un minimum négatif (courbe imaginaire filtrée) au-dessus de l'anomalie (zone conductrice).

#### **IV.2.2. Etude du contexte géomorphologique et hydrogéologique**

L'étude du contexte géomorphologique et hydrogéologique a consisté en l'étude de la topographie de la zone d'étude et du comportement hydrodynamique de la nappe superficielle. L'étude du comportement hydrodynamique a été réalisée grâce à l'analyse de la piézométrie des aquifères. Cette analyse permettra d'apprécier dans le cas de cette étude les conditions d'écoulement des eaux souterraines (Gilli et al., 2008 cité par Kutangila, 2019). Cette analyse a été réalisée à partir des données de piézométrie collectées dans le site par mesure des niveaux statiques des ouvrages de captages (puisards agricoles) et des altitudes des sources. La piézométrie est représentée par la charge hydraulique définie par la formule suivante :

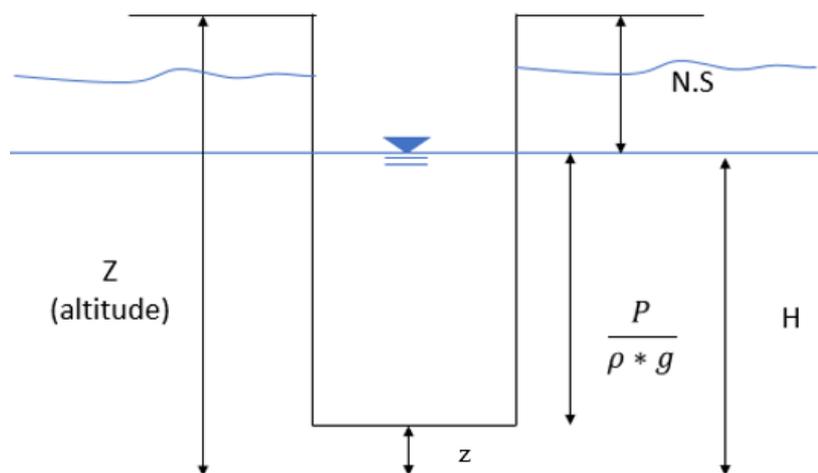
$$H = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \quad \text{Eq.4}$$

Où H(m) est la charge hydraulique, Z la cote du plan d'eau, P la pression,  $\rho$  la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur, la vitesse du fluide. Dans l'environnement souterrain, les vitesses d'écoulement sont très faibles, de ce fait l'énergie cinétique représentée par le terme  $\frac{V^2}{2g}$  peut être négligé (Kutangila, 2019).

La charge hydraulique est donc représentée par :

$$H = Z + \frac{P}{\rho g} \quad \text{Eq.5}$$

Cette charge se calcule par rapport à un repère qui est le plus souvent le niveau zéro des mers, ainsi la charge hydraulique se résume dans ce cas à la cote du plan d'eau dans l'ouvrage au niveau duquel la charge est déterminée (Kutangila, 2019).



*Figure 15: Mesure de la charge piézométrique*

La variation spatiale des écoulements souterrains est appréhendée à l'aide de la carte piézométrique. La carte piézométrique a été générée à l'aide de la méthode d'interpolation Kriging sous le logiciel Surfer.

Au moyen de la carte piézométrique réalisée il a été question de faire une étude de l'évolution spatiale de la piézométrie en relation avec la topographie de la zone d'étude. La topographie a été mise en évidence à l'aide des coupes topographiques qui ont été réalisées dans le sens de l'écoulement des eaux, et à proximité des sources pour mettre en corrélation la topographie et la surface piézométrique des seaux souterraines (Kutangila, 2019 ; Derouane, 2008)

### **IV.2.3. Etude de l'hydrochimie des eaux souterraines**

#### **IV.2.3.1. Travaux de terrains et de laboratoire**

L'étude hydrochimique a consisté au prélèvement des échantillons d'eau. En respectant les protocoles de prélèvements des eaux, à savoir le rinçage des bouteilles avec l'eau à prélever, l'absence d'air dans les bouteilles à l'issue du prélèvement, le conditionnement adéquat des bouteilles (réfrigérateur), douze (12) échantillons ont été prélevés dont neuf (09) provenant des sources d'eaux, un (01) de la pluie et deux (02) provenant des ouvrages de captages du périmètre. Le potentiel hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), la température (T) et le taux de matière dissous (TDS) ont été mesurés sur place avec un kit portatif (sonde multimètre).

Au laboratoire les proportions en éléments majeurs et mineurs présents dans les échantillons d'eau ont été analysées. Ainsi pour chaque échantillon, les paramètres physiques et chimiques des anions et cations majeurs et mineurs ont été déterminés dans deux laboratoires

: le laboratoire eau-sol-plante de l’Inera et le labo hydrochimique du Bumigeb. Au niveau des labo, la détermination du TAC et des proportions en éléments chimiques, s’est fait à l’aide de plusieurs méthodes : il s’est agi de (i) l’absorption atomique de flamme pour  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , (ii) la titration en retour pour l’ion  $\text{SO}_4^{2-}$ , (iii) la potentiométrie directe pour les ions  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , (iv) la détermination colorimétrique du phosphore en traces faite par la méthode « Heteropoly Blue », (vi) les ions  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , et le  $\text{CO}_2$  libre déterminés par calcul à partir des valeurs de pH et de TAC.

La qualité des différentes analyses physico-chimiques a été appréciées à travers l’estimation, pour chaque analyse, de l’erreur sur la balance ionique définie comme suit (Sauret, 2013) :

$$|e| = \frac{\sum r_{\text{anions}} - \sum r_{\text{cations}}}{\sum r_{\text{anions}} + \sum r_{\text{cations}}} \quad \text{Eq.6}$$

Avec r la concentration ionique en méq/l

Seuls les échantillons vérifiant cette condition  $|e| \leq 5\%$  sont pris en compte.

#### IV.2.3.2. Etude des faciès hydrochimique des eaux

Pour la détermination des faciès hydrochimique une approche très classique a été utilisée. Il s’agit de la représentation des échantillons prélevés dans le diagramme de Piper. Cette représentation des échantillons a permis de distinguer les principaux types d’eaux de la zone d’intérêt.

#### IV.2.3.3. Etude de l’origine des eaux et des mélanges éventuels

La détermination des origines des eaux et leurs mélanges éventuels (eaux des sources, eaux de la nappe superficielle, eaux de pluie) peuvent se faire par une étude des interactions entre ces eaux et les matériaux aquifères de la zone d’étude, une estimation des âges relatifs de ces eaux (Sauret, 2013) et aussi par l’étude de l’évolution des pressions partielles en  $\text{CO}_2$ , fournissant de précieuses informations sur le caractère « confiné ou ouvert » du réservoir (Oga et al., 2009 cité par (Sauret, 2013).

#### ● Processus de minéralisation des eaux

Cette approche a consisté à déterminer l’indice de saturation IS de certains minéraux carbonatés (dolomite, calcite, aragonite).

$$\text{IS} = \text{Log} \left( \frac{\text{PAI}}{\text{Ks}} \right) \quad \text{Eq.7}$$

Avec PAI l’activité ionique, Ks le produit de solubilité

- **Evolution des pressions partielles en CO<sub>2</sub>**

L'évolution des pressions partielles en CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) a été déterminée par la loi de Henry (1803) et s'écrit :

$$pCO_2 = 10^{-pH} \frac{[HCO_3^-]}{K_1 K_0} \text{ (Loi de Henry)} \quad \text{Eq.8}$$

Où [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] représente l'activité en mol/l en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sub>1</sub>K<sub>0</sub> les constantes d'équilibre de la mise en solution du CO<sub>2</sub> gaz, pH est le « pH terrains ». Les pressions partielles ont été calculé grâce au module PHREEQC implémenté dans le programme Diagrammes » (Parkhurst et al., 1999).

- **Âges relatifs des eaux**

L'âge relatif des eaux a été apprécié grâce à l'étude du système calco-carbonique basé sur l'exploitation du diagramme ISD/ISC et du diagramme Ph réel/pH équilibre. L'indice de saturation de la dolomie (ISD), l'indice de saturation du calcite (ISC) ont été déterminés grâce au module PHREEQC implémenté dans le programme Diagrammes (Parkhurst et al., 1999).

### IV.3. Etude de la qualité physico-chimique des eaux de sources

L'étude de la qualité physico-chimique des eaux de sources s'est faite dans un premier temps en comparant les proportions en ions majeurs et mineurs présents dans les eaux aux normes établies par l'OMS. Par suite l'appréciation de l'aptitude d'usage, des émergences souterraines du périmètre irrigué de Sindou, pour l'irrigation s'est faite à l'aide des paramètres suivants : le taux d'absorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (% Na), le Résidu Sec (RS) et la Pression Osmotique ( $\pi$ ). Ces paramètres ont été choisis du fait de leurs emplois récurrents dans l'appréciation de la qualité des eaux souterraines et de sources pour leurs utilisations en irrigation (Adjiri et al., 2020; Ligban et al., 2009; Singh et Kumar, 2015). Le calcul de ces paramètres s'est fait grâce aux équations (Eq.9), (Eq.10), (Eq.11) et (Eq.12) et les paramètres physiques et chimiques des anions et cations majeurs et mineurs déjà déterminés au laboratoire eau-sol-plante de l'Inera et le laboratoire hydrochimique du Bumigeb.

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}} \quad \text{Eq.9}$$

$$\text{RS} = 0.7 * \text{CE} \quad \text{Eq.10}$$

$$\Pi = 0.00036 * \text{CE} \quad \text{Eq.11}$$

$$\% \text{Na} = 100 * \frac{\text{Na} + \text{K}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}} \quad \text{Eq.12}$$

Les valeurs calculées ont été comparées aux valeurs recommandées pour un usage agricole. Par ailleurs, le diagramme de Wilcox (% Na en fonction de la conductivité) et celui de Richards (SAR en fonction de la conductivité) ont aussi été exploités dans le cadre de cette étude (Adjiri et al., 2020; Singh et Kumar, 2015).

#### **IV.4. Quantification de la ressource en eau et des besoins en eau d'irrigation**

##### **IV.4.1. Etude hydrométrique des sources**

###### **IV.4.1.1. Choix des points de mesure**

Dans le bas-fond de Sindou, les sources d'eaux ont déjà été aménagées et captées au moyen de canaux d'irrigation en terre, creusés manuellement. L'exercice a donc été de procéder au choix, au niveau des canaux d'irrigation, des sections de mesure relativement proche de la source à mesurer. Cependant du fait de l'état diffus de la majorité des sources, les sections de mesures ont été fixées aux endroits où la majeure partie de l'eau s'écoule à l'émergence afin d'avoir des valeurs relativement très proches de la valeur réelle du débit de la source.

###### **IV.4.1.2. Choix des méthodes de mesure**

Le choix de la méthode de mesure, est fonction de l'ordre de grandeur du débit de la source, le type de captage réalisé, la précision souhaitée de la mesure, et la faisabilité économique (Daum J.R. 1994). A cet effet, pour les sources d'eaux à gros débits captées par des canaux d'irrigation de grande dimension, les méthodes du jaugeage au moulinet et du déversoir calibré ont été utilisés, par contre celles ayant des débits relativement faibles et captées dans des canaux de petites dimensions, le choix s'est porté sur les méthodes du jaugeage capacitif et du jaugeage au flotteur. L'utilisation de deux méthodes de mesures du débit a eu pour but de confirmer certaine valeur spéciale obtenue.

- Dans le cas du déversoir calibré (Figure 16), il a été premièrement question de confectionner à l'aide de tôle rigide d'épaisseur  $e = 2 \text{ mm}$ , un déversoir mince ( $h \geq 2 * e$ , Ducat, O. (2014) ) de type rectangulaire (Longueur = 1m, Largeur = 1m, Largeur en crête = 20 cm, charge maximum 40 cm). Les mesures ont été réalisées au niveau des sections de drains, bien tracées, plus ou moins proches des sources. En plaçant le déversoir perpendiculairement au sens de l'écoulement de l'eau, la valeur du débit ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) peut être obtenue par utilisation de la formule de Francis (Eq.13) (Belleville et al., 2017; Benoist et Birgand, 2002).

$$Q = 1.83 * (b - 0.2h)h^{\frac{3}{2}} \text{ avec } c \geq 5\text{cm pour } b < 1\text{m} \quad \text{Eq.13}$$

Avec  $h$  est la charge d'eau (m),  $b$  la largeur en crête.

- La méthode du jaugeage à l'aide du moulinet mesure suivant les directions horizontales ( $x$ ) et verticales ( $y$ ), la composante normale de la vitesse d'eau  $V(x, y)$ , en une section donnée du canal. Cette composante normale est donnée par l'équation (Eq.14).

$$V(x, y) = a * n + b \quad \text{Eq.14}$$

Avec  $V$  la vitesse du courant en  $\text{m/s}$ ,  $a$  le pas de l'hélice en  $\text{m}$ ,  $n$  le nombre de tours d'hélice par

seconde,  $b$  la vitesse de frottement ou vitesse de démarrage.

Le dépouillement des mesures s'est fait à l'aide du logiciel Hydromet qui a permis d'obtenir directement les débits à l'aide de l'équation (Eq.15).

$$Q = \int_S V(x,y) dx dy \quad \text{Eq.15}$$

Avec  $S$  la section d'écoulement mouillée en  $x$  et  $y$  ( $m^2$ ) et  $Q$  le débit en  $m^3/s$

- La méthode de jaugeage capacitif, s'est faite en mesurant le temps que met le récipient, de volume connu, à se remplir d'eau. L'eau circulant dans le canal où s'est faite la mesure a été canalisée, pour circuler au travers d'un orifice situé près du récipient. Le débit a été déterminé à l'aide de l'équation (Eq.16).

$$Q_c = \frac{V}{T} \quad \text{Eq.16}$$

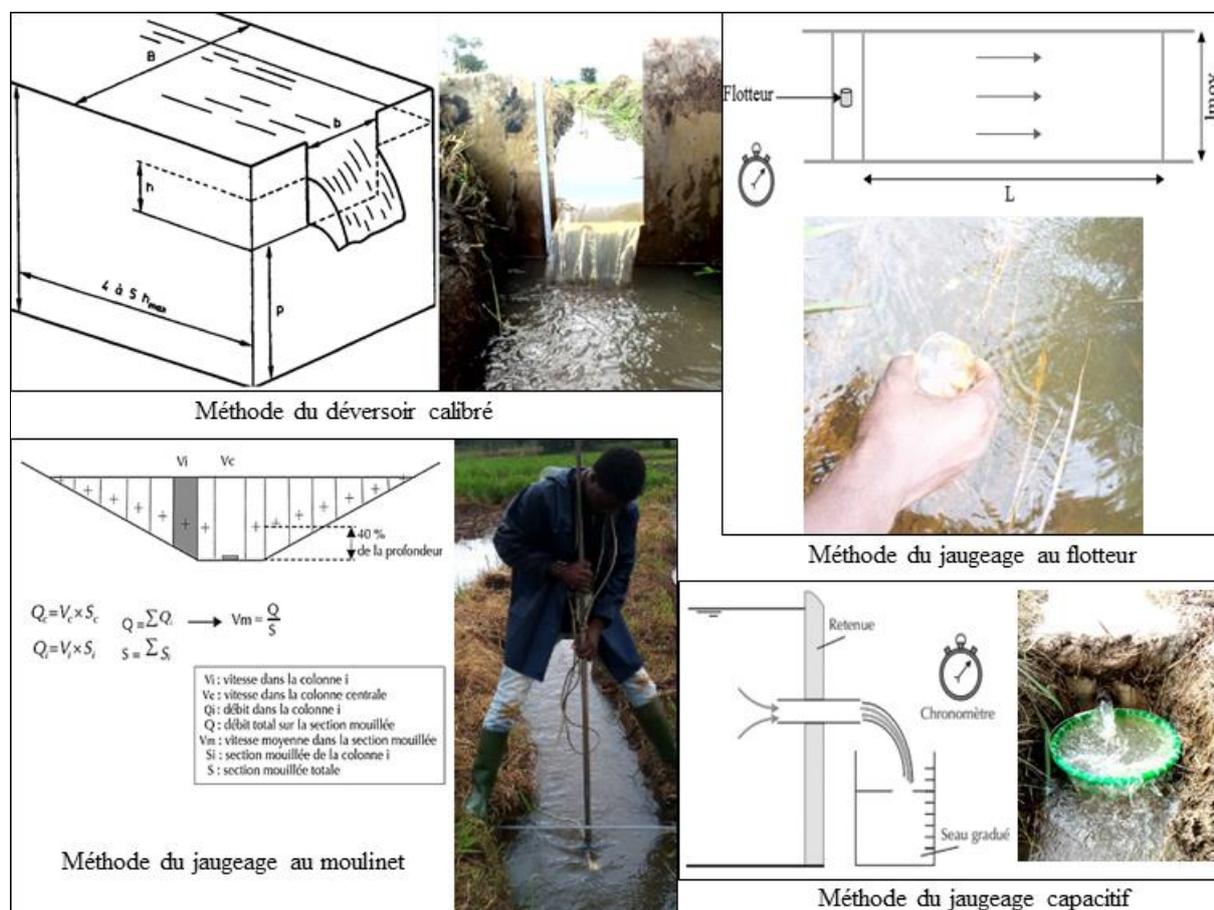


Figure 16 : Méthodes de mesure du débit

- La détermination du débit, à l'aide du jaugeage au flotteur, se fait grâce à la détermination des valeurs de vitesse d'écoulement d'eau en surface et de la section du canal. Les équations (Eq.17), (Eq.18), (Eq.19) permettant le calcul du débit sont présentées ci-dessous.

$$Q = S_{\text{écoulement}} * V_{\text{moy}} \quad \text{Eq.17}$$

$$V_{\text{moy}} = 0.8 * V_{\text{surf}} \quad \text{Eq.18}$$

$$S_{\text{écoulement}} = l_{\text{moy}} * h_{\text{moy}} \quad \text{Eq.19}$$

Avec  $l_{\text{moy}}$  la largeur moyenne du canal et  $h_{\text{moy}}$  la profondeur moyenne du canal

#### **IV.4.2. Etude hydrodynamique de la nappe**

Pour la détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe superficielle deux ouvrages de captages à grands diamètres (puits agricoles) ont été réalisés dans le périmètre.

##### **IV.4.2.1. Choix du site d'implantation des ouvrages de captage**

Le choix du site d'implantation des ouvrages s'est fait suivant plusieurs critères, qui sont entre autres : l'implantation des ouvrages dans une zone du site d'étude facilement accessible par les personnes, et le matériel, les potentiels zones favorables déterminées par la prospection électromagnétique. Des essais de puits par paliers de débits non enchaînés ont été faits sur ces deux ouvrages.

##### **IV.4.2.2. Détermination du débit de pompage longue durée**

Les débits de pompage ont été déterminés grâce aux essais de puits. Ces essais de puits consistent en des essais classiques par paliers de débits non enchaînés suivis d'une remontée de même durée. Des paliers de débits à débit constant sont réalisés pendant une courte durée (1h) durant lesquels, le temps (s), le rabattement (m) et le débit ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) sont mesurés. Chaque palier de débit est suivi d'un arrêt de pompage d'une durée au moins égale à 1h, permettant la montée du niveau d'eau et la mesure du rabattement résiduel. L'interprétation de ces données permet de déterminer les caractéristiques de l'ouvrage et du débit à utiliser lors de l'essai de pompage longue durée.

##### **IV.4.2.3. Réalisation de l'essai de pompages et interprétation**

Il a été question de réaliser des essais de pompage longue durée, durant lesquels le débit est maintenu aussi constant que possible. Des mesures de débit en début d'essai, à l'aide d'un chronomètre et d'un seau de 80l, sont opérées fréquemment afin de permettre d'effectuer les ajustements nécessaires puis le débit est mesuré à une fréquence plus espacée dans la suite de l'essai. Pour évaluer les rabattements, les niveaux dynamiques sont périodiquement mesurés dans l'ouvrage pompé. Le traitement des résultats des essais de pompages s'est fait à l'aide de la méthode d'interprétation, des essais de pompage pour les ouvrages à grands diamètre de Boulton et Streltsova (1975), prenant en compte l'effet de stockage dans le cas d'un aquifère libre partiellement capté. Ainsi Boulton et Streltsova (1976) ont développé une fonction

décrivant le premier segment du rabattement. Cette fonction s'écrit :

$$s = \frac{Q}{4\pi K_h D} W\left(\mu_A, S_A, \beta, \frac{r}{r_{ew}}, \frac{b_1}{D}, \frac{d}{D}, \frac{b_2}{D}\right) \quad \text{Eq.20}$$

Où

$$\mu_A = \frac{r^2 S_A}{4K_h D t} \quad \text{Eq.21}$$

Avec  $S_A$  le coefficient d'incompressibilité de l'aquifère supposé égal à  $10^{-3}$ .

$$\beta = \left(\frac{r}{D}\right)^2 * \frac{K_v}{K_h} \quad \text{Eq.22}$$

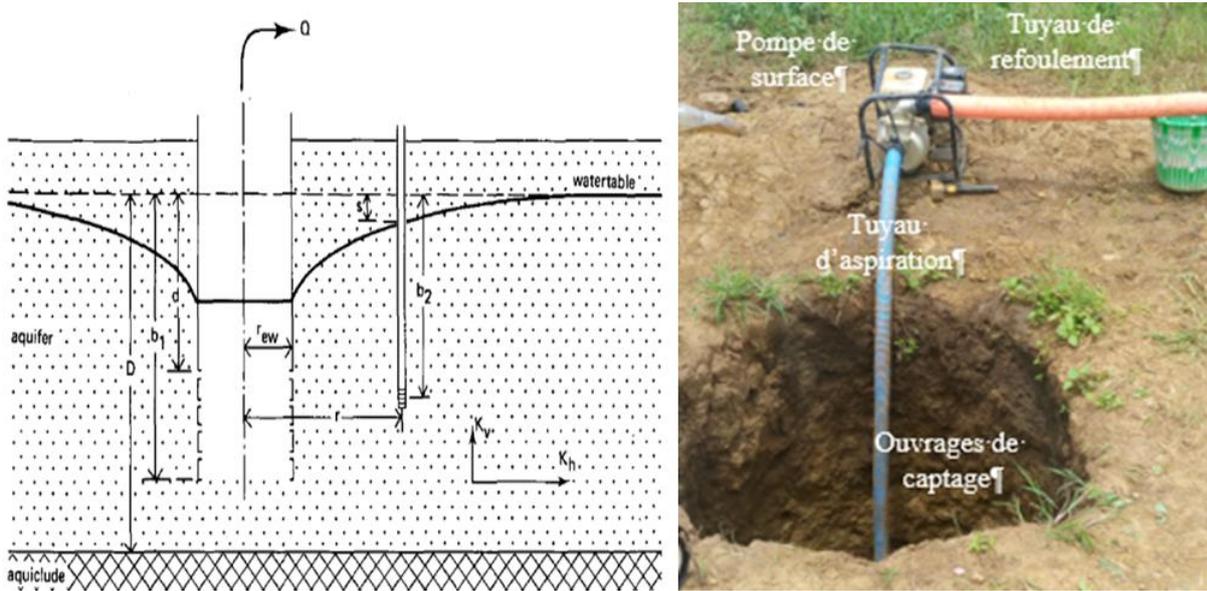


Figure 17 : Essai de pompage dans un ouvrage à grand diamètre (Kruseman and De Ridder, 1994).

Pour un rabattement plus long, la solution de l'équation de Dagan (1967) modifié par Boulton et Streltsova (1975) permet de calculer  $K_h$  et le coefficient d'emmagasinement spécifique ( $S_y$ ).

$$s = \frac{Q}{4\pi K_h D \left(\frac{b_1}{D}\right)} W\left(\mu_B, \beta, \frac{b_1}{D}, \frac{b_2}{D}\right) \quad \text{Eq.23}$$

$$\mu_B = \frac{r^2 S_y}{4K_h D t} \quad \text{Eq.24}$$

Les valeurs de la fonction  $W\left(\mu_A, S_A, \beta, \frac{r}{r_{ew}}, \frac{b_1}{D}, \frac{d}{D}, \frac{b_2}{D}\right)$ ,  $W\left(\mu_B, \beta, \frac{b_1}{D}, \frac{b_2}{D}\right)$  sont fournies par des abaques conçus par Boulton et Streltsova (1975) appelés respectivement courbe type A et courbe type B (Sauret, 2013).

#### IV.4.3. Evaluation du volume d'eau disponible

L'estimation du volume d'eau disponible ou facilement mobilisable au niveau des sources s'est faite à l'aide de l'équation (Eq.25).

$$\text{Volume d'eau} = \sum Q_{\text{source}} * \text{Durée de la campagne sèche} \quad \text{Eq.25}$$

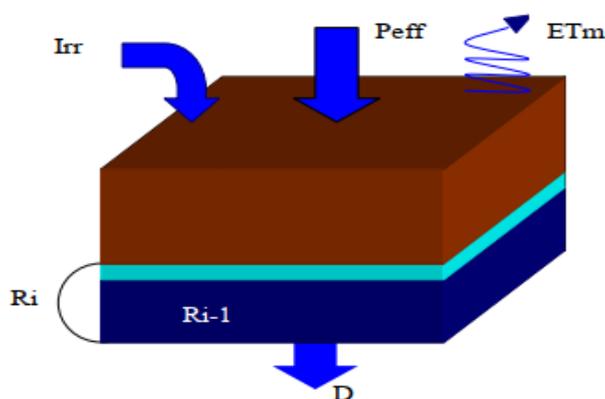
Le débit d'écoulement de l'eau au niveau de la nappe superficielle a été déterminé à l'aide de l'équation de darcy (Eq.26). L'estimation du gradient hydraulique s'est faite à l'aide de la carte piézométrique du site d'étude établie à l'aide de campagne de mesure sur les puisards réalisés. Par ailleurs l'épaisseur saturée a été déterminé à l'aide des résultats des sondages électriques.

$$Q = K * S * \frac{\Delta H}{\Delta l} \quad \text{Eq.26}$$

#### IV.4.4. Etude des besoins en eau agricole

L'estimation des besoins en eau agricole a été faite à l'aide du logiciel CROPWAT 8.0. Pour ce faire la connaissance des divers paramètres concernant aussi bien les spéculations pratiquées sur le périmètre, les données climatiques ou pédologiques de la région ont été nécessaire. Le logiciel CropWat fonctionne sur la base de plusieurs variables. Ces variables s'articulent autour du bilan hydrique qui s'écrit de la façon générale suivante :

$$R_i = R_{i-1} + P_{\text{eff}} + I_{\text{rr}} - D - \text{ETM} \quad \text{Eq.27}$$



*Figure 18 : Bilan hydrique au niveau de la parcelle*

L'évaluation des besoins en agriculture durant toute la contre saison peut être déterminée sur la base de la formule du bilan hydrique utilisée par le logiciel CropWat.

$$I_{\text{rr}} = \sum (R_{\text{initial}} + \text{ETM} - P_{\text{eff}}) \quad \text{Eq.28}$$

Où  $R_{\text{initial}}$  représente la réserve en eau initial du sol, ETM l'évapotranspiration maximale,  $P_{\text{eff}}$  la pluie efficace,  $I_{\text{rr}}$  l'irrigation requise, D le drainage. Les différentes étapes méthodologiques suivies pour la quantification des besoins agricoles sont présentées dans les lignes qui suivent.

#### **IV.4.4.1. Cartographie de l'occupation du bas-fond de Sindou**

La carte d'occupation du bas-fond s'est faite par cartographie physique des différentes spéculations pratiquées et a eu pour but de déterminer les superficies occupées par chaque spéculation. De ce fait, il a été question de lever à l'aide d'un GPS les contours des différentes spéculations, puis d'extraire et d'importer ces contours sur le logiciel Google Earth. Par suite sous ArcGIS, les contours ont été transformés en polygone afin de déterminer les superficies des différentes spéculations.

#### **IV.4.4.2. Evaluation des paramètres climatiques**

Les paramètres climatiques ont été évalués en partant des données climatiques disponibles sur le logiciel ClimWat. De ce fait, les données climatiques utilisées sont celles de la station de Bobo, laquelle station est la plus proche du site d'étude et contient l'ensemble des paramètres climatiques nécessaires à l'estimation de l'ETO.

##### **• Evaluation de l'ETO**

Parmi les méthodes d'évaluation de l'ETO, celle de PENMAN-MONTEITH (FAO-PM) a été recommandée par la FAO comme méthode standard (R.G. Allen et al., 1998 ; B. Bak et al, 2011 ; P. MARTI et al., 2015). De plus les travaux de Ndiaye et al., (2017) portant sur l'évaluation de vingt méthodes d'estimation de l'évapotranspiration journalière de référence au Burkina Faso ont permis de démontrer que les meilleures estimations de l'ETO sont obtenues avec les méthodes combinatoires, et tout particulièrement avec celle de PENMAN, qui se révèle la meilleure à toutes les stations météorologiques du pays. Ainsi la formule de l'ETO de PENMAN-MONTEITH est celle utilisée pour le calcul de l'évapotranspiration de référence.

$$ET_0 = \frac{[0.408\Delta * (R_n - G)] + [\gamma(900/(T + 273)) * u_2(es - ea)]}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Eq.29}$$

Où  $ET_0$  est l'évapotranspiration de référence (en mm/jour),  $R_n$  le rayonnement global (en  $MJm^2/JOUR$ ),  $G$  le flux de chaleur du sol (en  $MJ/m^2/jour$ ),  $T$  la température moyenne journalière de l'air à une hauteur de 2m (en °C),  $u_2$  la vitesse du vent à une hauteur de 2m (en m/s),  $es$  la pression de vapeur saturante (en kPa),  $ea$  la pression de vapeur à la température  $T$  (en kPa),  $\Delta$  la pente de la courbe de pression de vapeur saturante (en kPa/ °C),  $\gamma$  la constante psychrométrique (en kPa/°C) et 900 une constante pour un pas de temps journalier.

##### **• Evaluation de la pluie efficace**

Le calcul de la pluie efficace qui représente la fraction des précipitations qui contribuent à la satisfaction des besoins en eau des cultures (calculée en retirant à la précipitation totale les

pertes par ruissellement ou par percolation profonde (Ammar Boudjellal et al, 2006)) s'est fait à l'aide de la formule du USDA-SCS :

$$P_{eff} = \frac{P_{tot} * (1,25 - 0,2 * P_{tot})}{125} \quad \text{Eq.30}$$

$$P_{eff} = 125 + 0.1 * P_{tot} \text{ si } P_{tot} \geq 250\text{mm} \quad \text{Eq.31}$$

Où  $P_{eff}$  représente la précipitation efficace (mm) et  $P_{tot}$  la précipitation totale (mm)

#### IV.4.4.3. Evaluation des paramètres cultureux

Le logiciel CROPWAT contient un fichier reprenant les caractéristiques culturelles d'un grand nombre de cultures. Ces données concernant le coefficient cultural,  $K_c$  ont été utilisées pour calculer l'évapotranspiration réelle de la culture, le tarissement admissible représentant le niveau critique de l'humidité du sol à partir duquel le stress dû au manque d'eau se fait sentir.

- **Evaluation de l'évapotranspiration maximale**

L'équation (Eq.) a été utilisée pour le calcul de l'évapotranspiration maximale (ETM) :

$$ETM = k_c * ETO \quad \text{Eq.32}$$

Où  $k_c$  représente le coefficient cultural,  $ETo$  l'évapotranspiration potentielle (mm).

- **Evaluation de l'irrigation requise**

L'irrigation requise correspond à la différence entre l'évapotranspiration réelle et les précipitations efficaces. Elle a été calculée grâce à l'équation (Eq.33) :

$$Irr_{req} = ETM - P_{eff} \quad \text{Eq.33}$$

Où  $Irr_{req}$  représente l'irrigation requise (mm),  $ETm$  l'évapotranspiration maximale (mm),  $P_{eff}$  la précipitation efficace (mm).

#### IV.4.4.4. Evaluation de l'aptitude pédologique du sol à l'irrigation

L'évaluation des paramètres pédologiques a pour but d'évaluer la capacité du stockage du sol et de quantifier la percolation. Le type de sol de la zone d'étude caractérisé par Barke Guide (2020) est de type Argilo-limoneux. Ce type de sol a été considéré dans le logiciel CropWat comme un sol « MEDIUM (loam) ».

- **Evaluation de la réserve utile (RU)**

La réserve utile est déterminée par l'équation (Eq.34)

$$RU = 100 * (\theta_{FC} - \theta_{WP}) * z \quad \text{Eq.34}$$

Où  $\theta_{FC}$  représente l'eau contenue au maximum dans le champ ( $m^3/m^3$ ),  $\theta_{WP}$  l'eau contenue au point de flétrissement ( $m^3/m^3$ ) et  $z$  la profondeur des racines (m).

- **Evaluation de la réserve facilement utilisable (RAM)**

La réserve facilement utilisable est déterminée par l'équation (Eq.35)

$$RFU = RU * p \quad \text{Eq.35}$$

Où p le tarissement admissible.

## **TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS, INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSIONS**

## V. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### V.1. Etude diachronique de l'évolution des superficies cultivées

#### V.1.1. Extension actuelle de la zone d'étude

A l'issue de la cartographie de la zone d'étude, présentée à la Figure 19, il en ressort que la superficie actuelle du bas-fond de Sindou est de 256,3 ha, et elle abrite au total douze (12) émergences d'eaux souterraines. La majeure partie des sources inventoriées se situent dans la partie supérieure du site d'étude. Quant à la source n°12, elle coïncide avec l'exutoire du périmètre formant ainsi une « marre exutoire ».

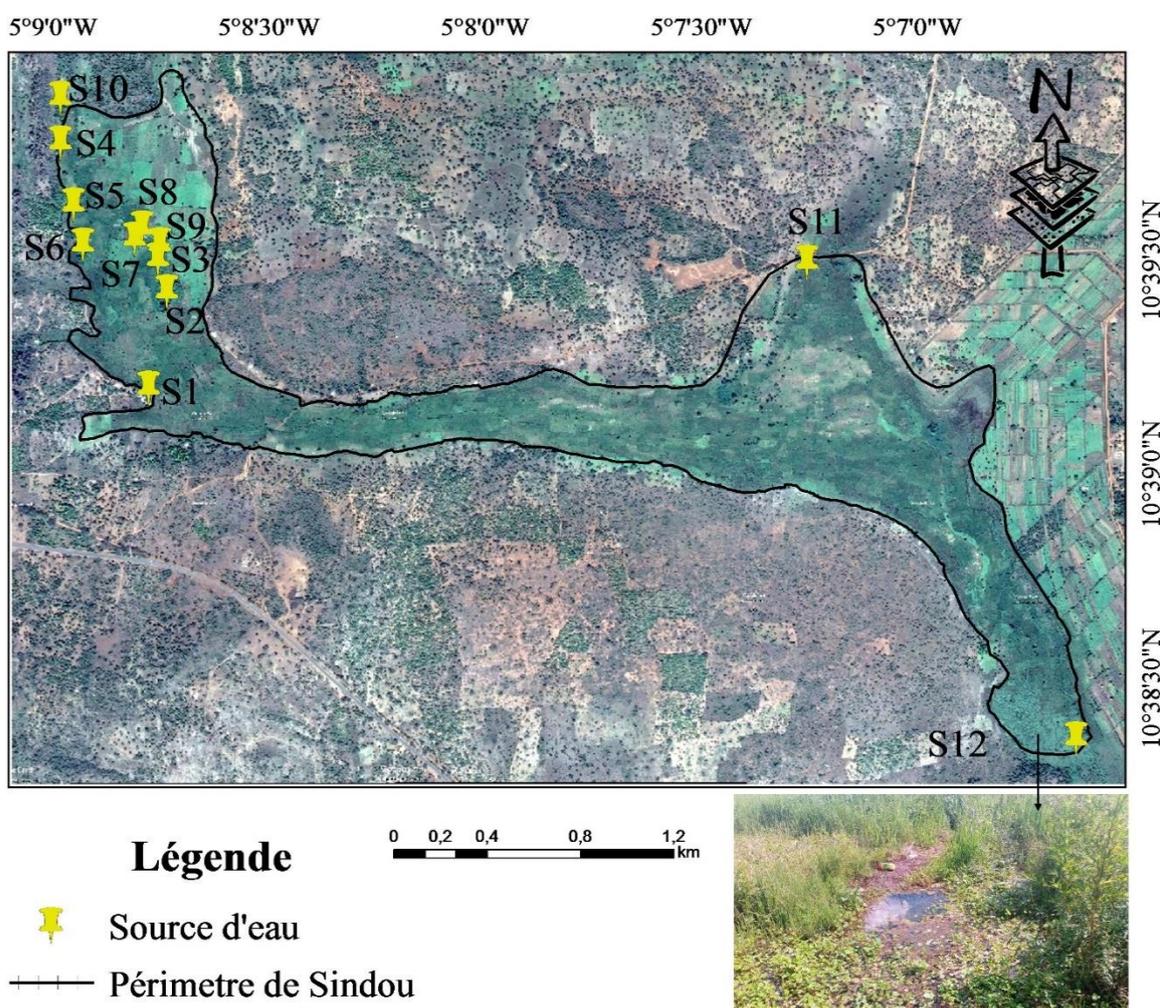
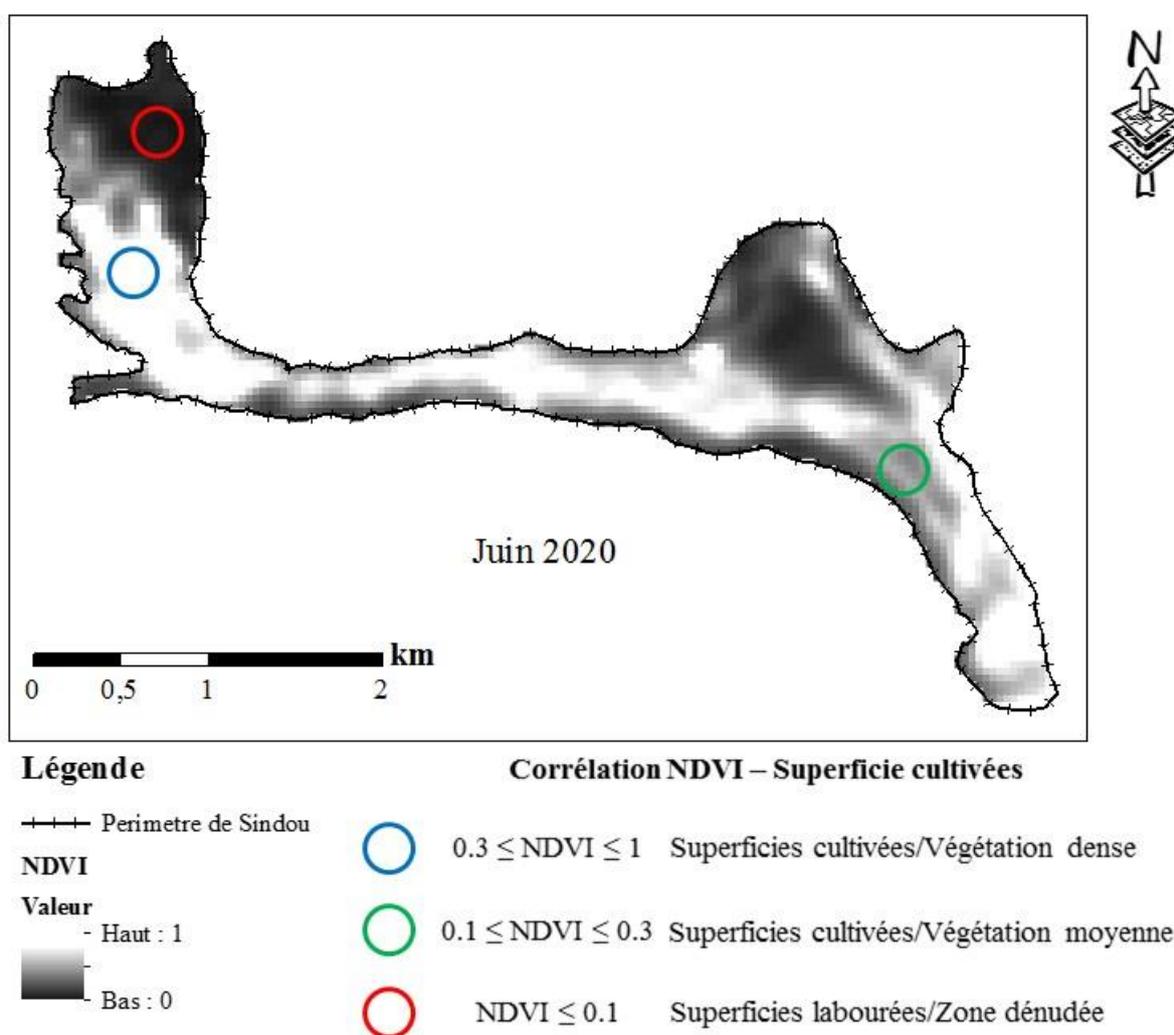


Figure 19 : Carte de la zone d'étude

Les coordonnées et l'altitude des différentes sources identifiées sont présentées en Annexe I. Il est important de remarquer que ces sources d'eau constituent la principale ressource en eau du site d'étude.

### V.1.2. Evolution des superficies cultivées

La Figure 20 présente les trois unités d'occupations de terres identifiées sur les différentes images grâce à l'application de l'indice de végétation normalisée aux différentes images satellitaires (Annexe II). Il en ressort que les indices de végétation normalisée inférieure à 0,1 correspondent aux superficies labourées ou zones dénudées, ceux comprises entre 0,1 et 0,3 concernent les superficies cultivées avec une végétation moyenne, et enfin ceux situés entre 0,3 et 1 représentent les superficies cultivées avec végétation dense. La différenciation des ces trois entités aux moyens de couleur a permis d'obtenir l'évolution des superficies cultivées comme présentée à la Figure 21.



*Figure 20 : Corrélations NDVI et Superficies cultivées*

De l'analyse de la Figure 21 il ressort qu'en saison sèche, le périmètre objet de l'étude est effectivement exploité pour la pratique de l'agriculture irriguée. Cette remarque est faite sur la base de la présence de superficies cultivées ou végétations matérialisées par des couleurs

vertes. Par ailleurs l'on observe une régression de la densité de la végétation (activité chlorophyllienne) dans les parties hautes du périmètre, et une progression de celle-ci dans les zones plus basses notamment vers l'exutoire du périmètre. De plus, l'évolution des superficies cultivées de 1995 à 2020 est marquée par une tendance qui est globalement décroissante.

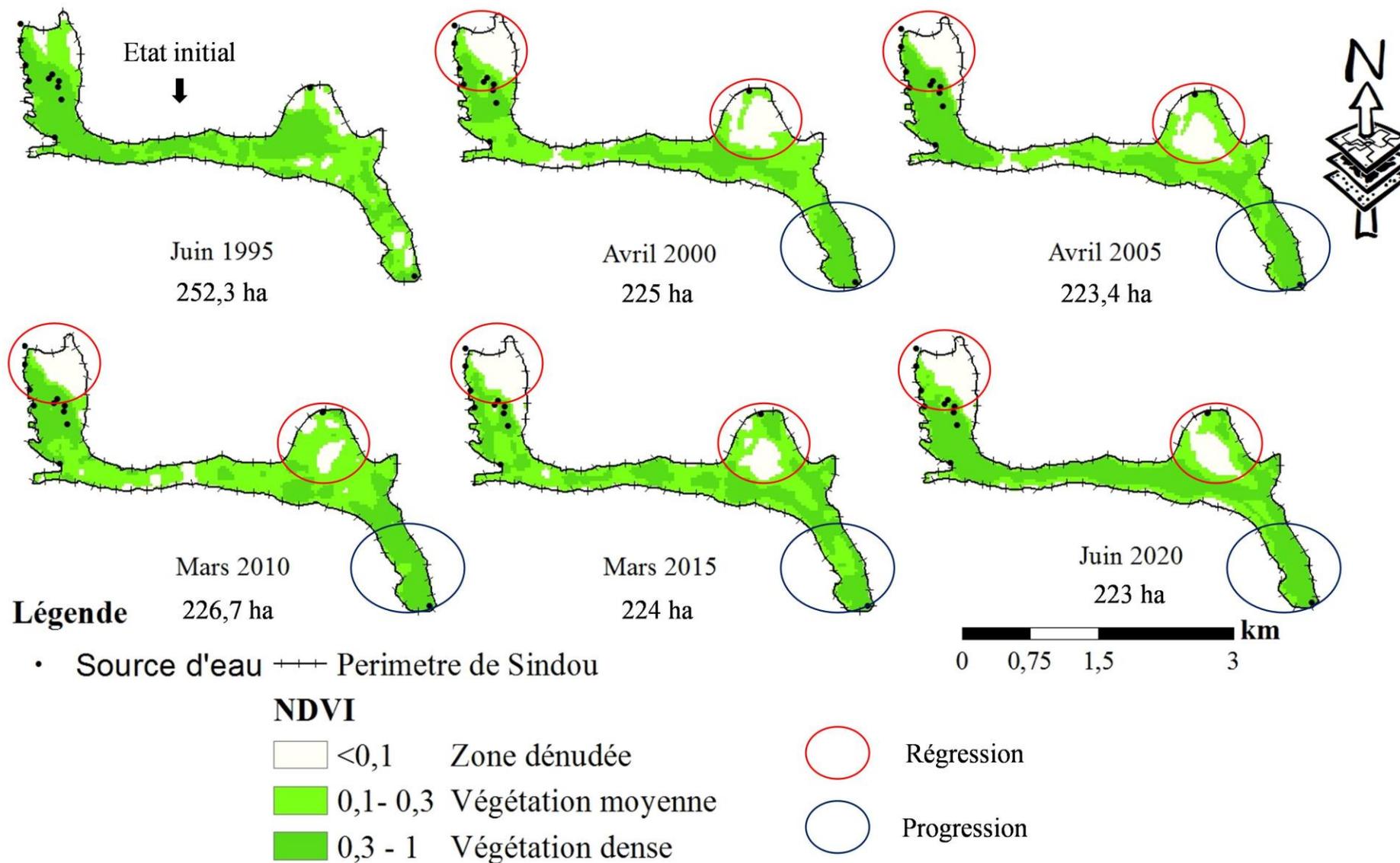


Figure 21 : Etat d'avancement des superficies cultivées

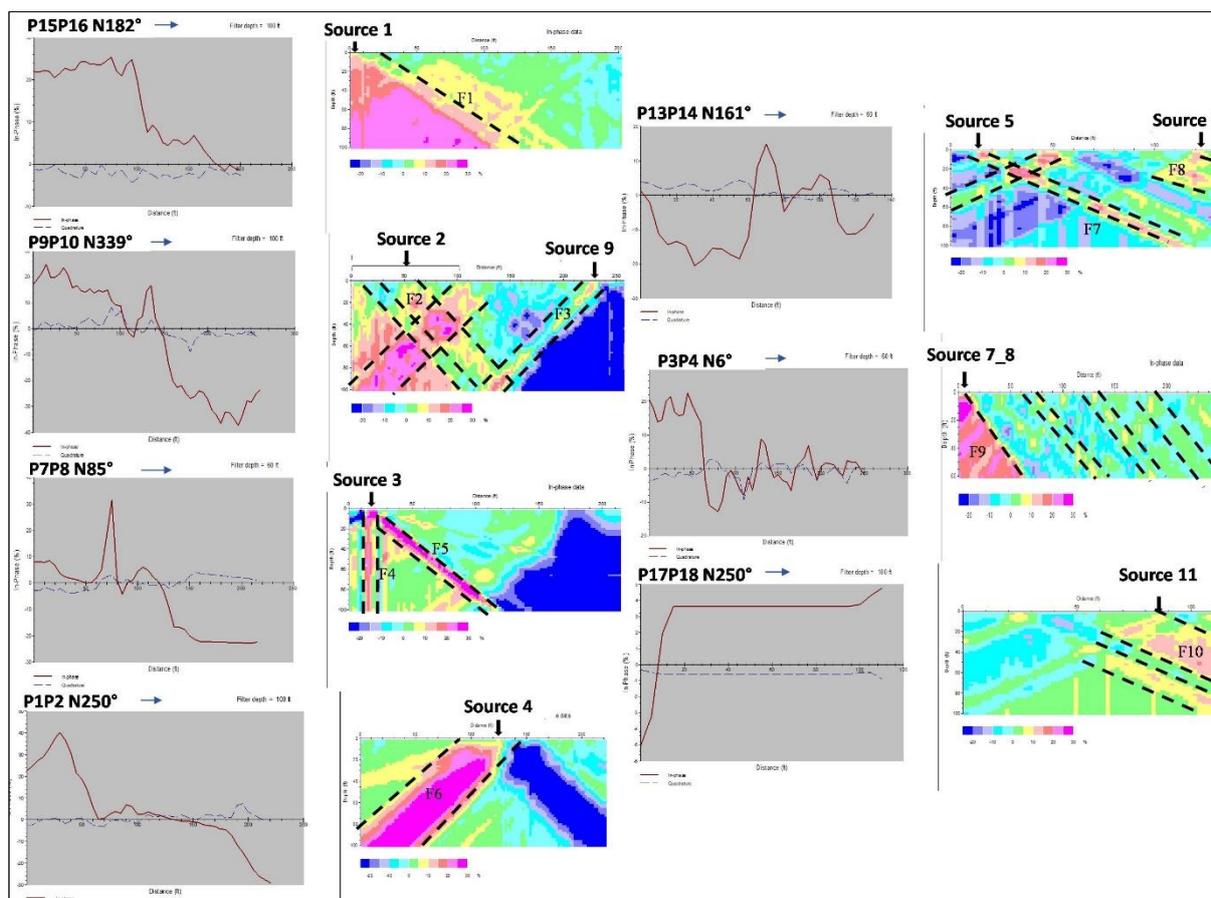
### **V.1.3. Discussion**

La délimitation du site d'étude effectuée a donnée comme précisé plus haut une superficie de 256,3 ha. Cette cartographie s'accorde avec celle proposée par Barke Guide (2020) qui évalue la superficie du périmètre à 260 ha. Par ailleurs l'inventaire des sources réalisées a permis d'identifier 12 sources d'émergences souterraines, contre 4 sources identifiées par identifiées par Barke Guide (2020). Les sources supplémentaires inventoriées dans cette étude demeurent importantes car elle représente des sources pérennes mais à très faible débit d'écoulement comme nous le verrons dans la partie quantification de la ressource en eau. En ce qui concerne la régression globale des superficies emblavés dans le périmètre les causes peuvent être imputable soit à la diminution de la ressource en eau, soit à une migration des agriculteurs vers les basses zones bien desservies par les sources d'eaux ou soit au développement économique de la zone d'étude occasionnant un désintéressement vis-à-vis de l'agriculture. Cependant il est important de souligner que les sources d'eau de la zone d'étude constituent la principale ressource en eau sur laquelle se base l'agriculture motrice de l'économie rurale de la province de Sindou. Il sera donc objet de caractériser ces émergences d'eaux souterraines afin de mobiliser les informations permettant d'assurer leurs pérennités et leurs bonnes gestions.

## V.2. Conditions d'émergences des sources d'eau souterraines

### V.2.1. Contexte géologique et tectonique

Les résultats présentés à la Figure 22 proviennent des travaux de géophysique réalisés avec la méthode de prospection électromagnétique basse fréquence. De l'analyse de la Figure 22 il en ressort que la géologie du site d'étude est caractérisée par plusieurs zones de faiblesse ou fractures ou failles. Ces fractures ou failles sont représentées dans le pseudo section ou cross section par une coloration comprise entre le jaune et le rose, et dans le graphe des courbes filtrées par la courbe réelle (in phase) qui se place au-dessus de l'axe des abscisses.



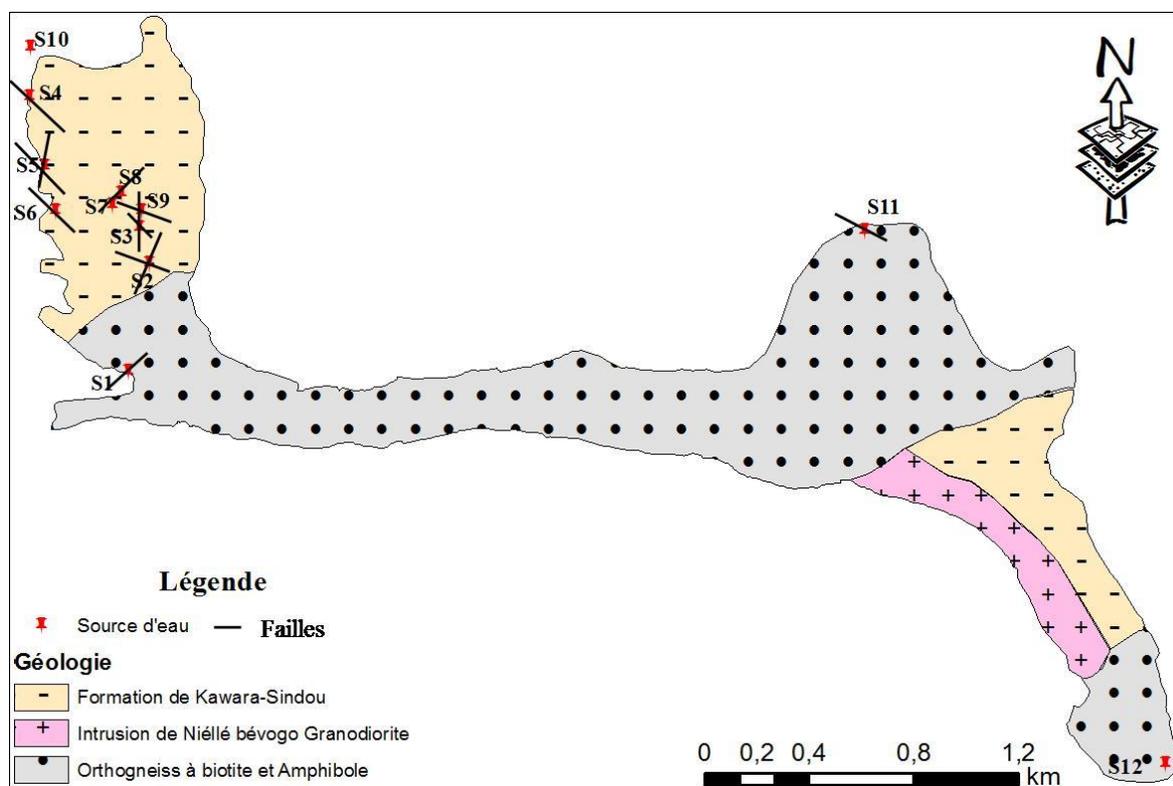
*Figure 22 : Courbe filtrée de la partie réelle/imaginaire et cross section des profils*

Au total 10 directions majeures de fracture ont été mises en évidence au moyen des profils électromagnétiques réalisés. Ces directions de fractures ont été récapitulées dans le Tableau VI. L'analyse des directions de profils montre qu'au niveau des sources 4, 5 et 6 les fractures dominantes sont de directions NO-SE. Cette direction constitue l'une des directions des fractures majeures affectant les grès de Kawara Sindou et responsable de l'aspect ruiniforme de ces derniers. L'étude géomorphologique qui suivra permettra de mettre en évidence l'influence de ces grès dans l'apparition des sources.

*Tableau VI : Failles ou fractures présentes dans la zone d'étude*

Sources	Profil	Direction	Failles	Directions
Source 1	P15-P16	N-S	F1	NE-SO
Source 2 et 9	P9P10	NNO-SSE	F2 F3	NNE-SSO ONO-ESE
Source 3	P7P8	E-O	F4 F5	N-S NO-SE
Source 4	P1P2	OSO-ENE	F6	NO-SE
Source 5 et 6	P13P14	NNO-SSE	F7 F8	NO-SE N1/4NE-S1/4SO
Source 7 et 8	P3P4	N-S	F9	NE-SO
Source 11	P17P18	OSO-ENE	F10	ONO-ENE

La transposition conceptuelle des failles sur la carte géologique de la zone d'étude permet de remarquer que la zone du site d'étude abritant les sources 2, 3, 9, 8, 7 est affectée par d'importantes failles (Figure 23). Cette zone de fractures intervient à proximité de la séparation entre la zone sédimentaire formée des grès de Kawara-Sindou et la zone de socle formée d'orthogneiss à biotite et Amphibole.



*Figure 23 : Unités géologique et tectonique du bas-fond de Sindou*

### V.2.2. Contexte géomorphologique et hydrogéologique

La Figure 24 présente la carte piézométrique du bas-fond de Sindou. Cette carte piézométrique représente les niveaux de basses eaux de la nappe superficielles. L'allure de la carte indique un écoulement qui se fait globalement du Nord-ouest vers le Sud-est. De plus, l'analyse de la Figure 24 montre que la source n°12 coïncide avec l'exutoire de la nappe superficielle.

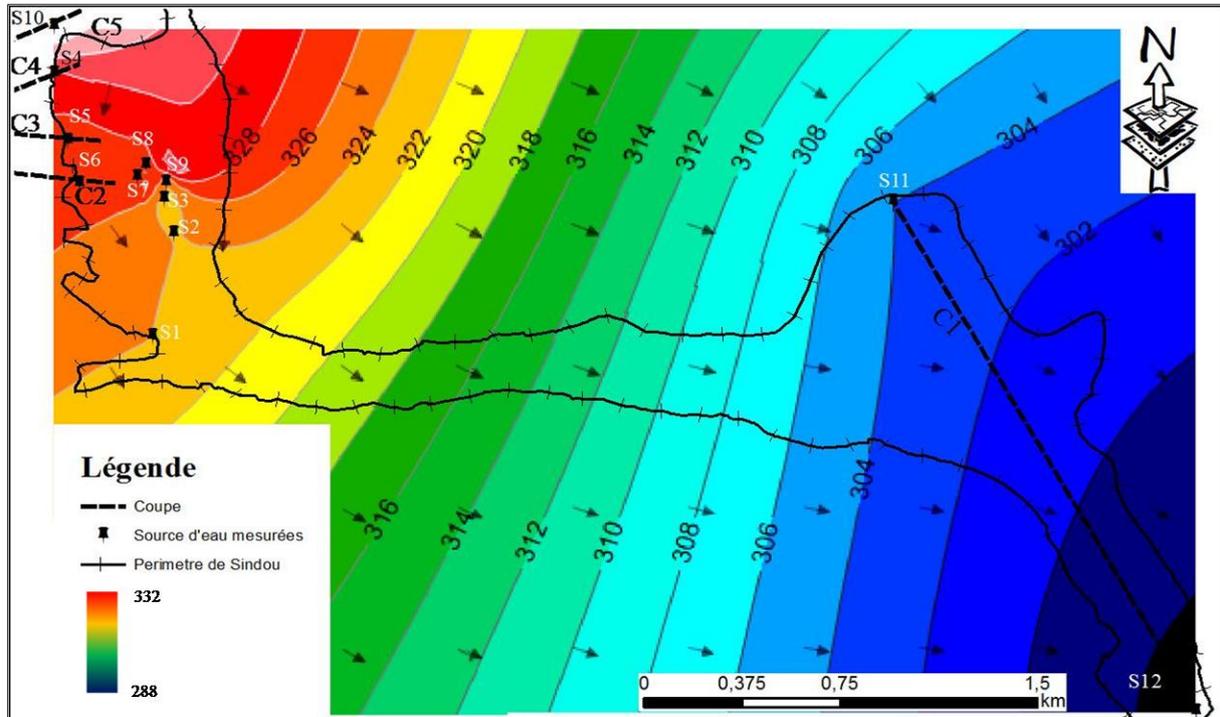


Figure 24 : Carte piézométrique du site d'étude

La coupe C1 (Figure 25) tracée suivant le sens des écoulements des eaux de la nappe superficielles, permet de visualiser le comportement hydrodynamique de la nappe de la source S11 à la source S12.

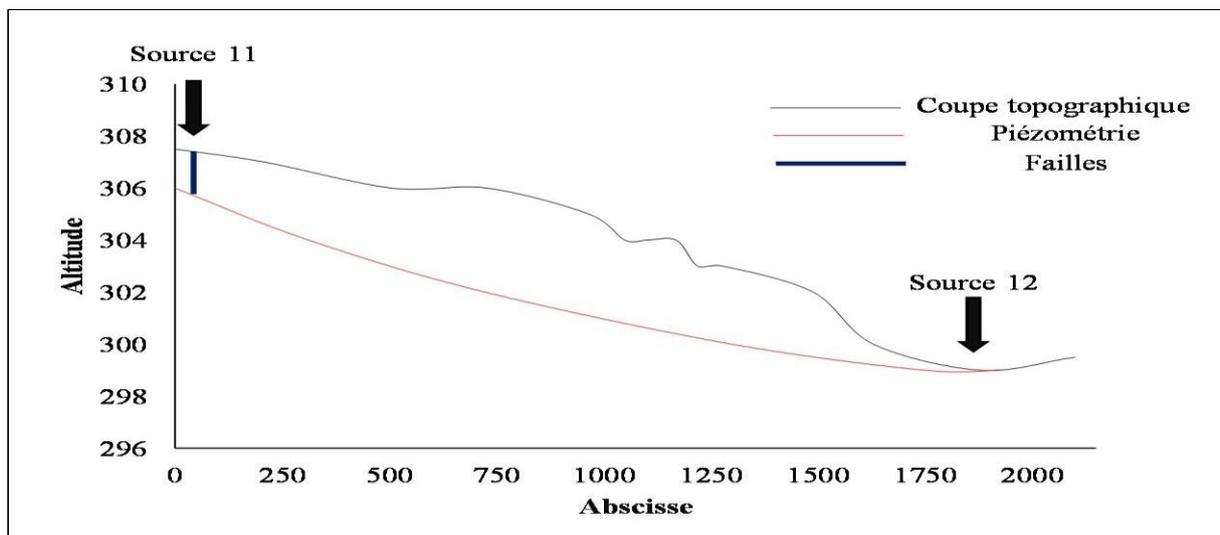


Figure 25 : Coupe topographie et évolution spatiale de la piézométrie S11-S12

On retient de l'analyse de la Figure 25 que le niveau piézométrique de la nappe superficielle suit approximativement la topographie jusqu'à leur rencontre au niveau de la source 12. Cette disposition de la topographie et de la piézométrie est responsable de l'apparition de la source 12.

Les coupes C2 (S6), C3 (S5), C4 (S4), C5 (S10) réalisées sur le logiciel Google Earth dont les directions sont marquées sur la Figure 25 sont présentées à la Figure 26. Ces coupes mettent en évidence la variation de la topographie en amont des différentes sources, et la fracturation schématisée des grès de Kawara-Sindou. Ce constat est conforme aux observations réalisées sur le terrain permettant de dire que les sources S10, S4, S5, S6 sont situées au pied des formations montagneuses.

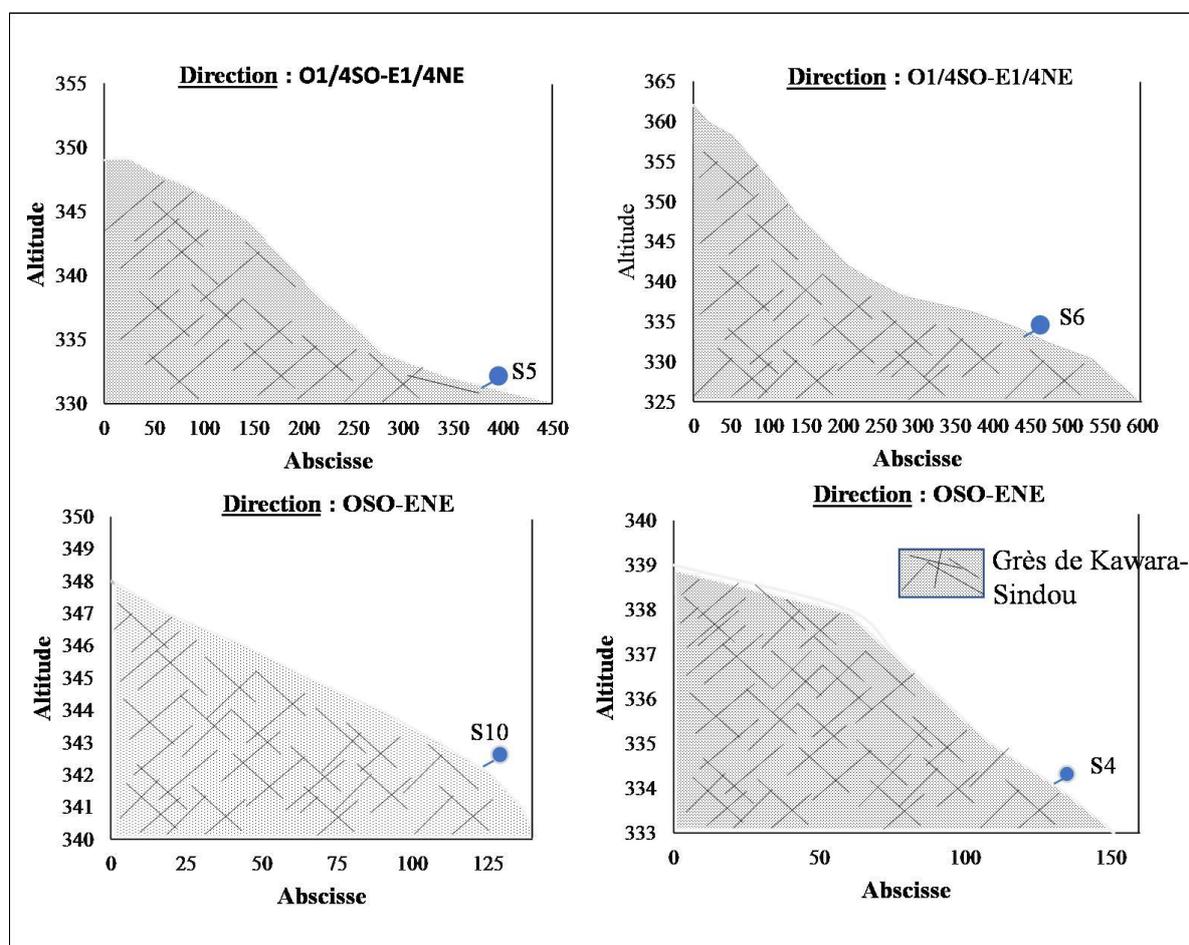


Figure 26 : Coupe topographique

### V.2.3. Contexte hydrochimique

#### V.2.3.1. Caractéristique physique des eaux

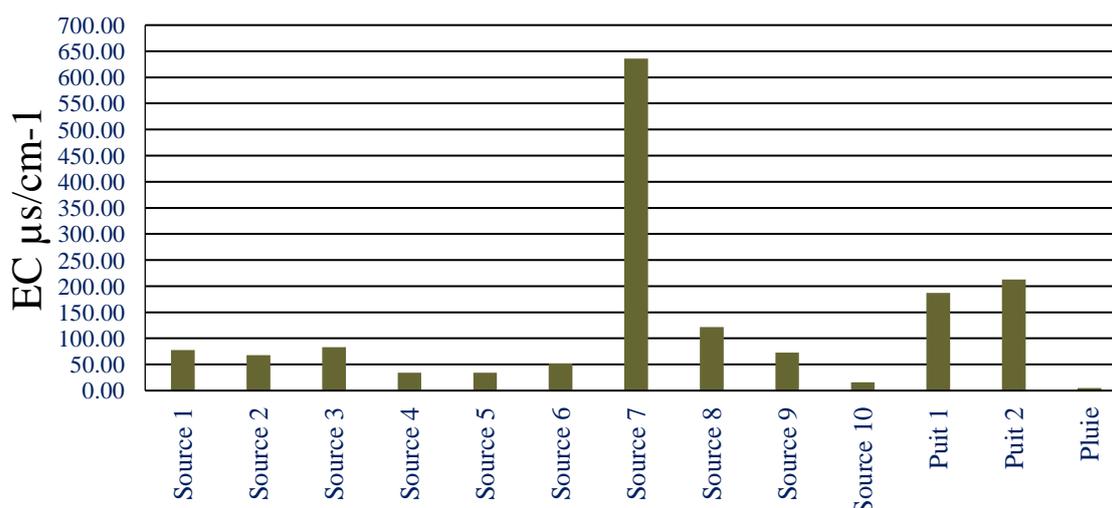
Le Tableau VII présente les résultats des analyses physiques effectuées sur les eaux de source, des puits, et de la pluie. Le calcul de la balance ionique a montré des valeurs en dehors de l'intervalle de tolérance  $\pm 5\%$  pour la plupart des échantillons, mais du fait de la faible

minéralisation observée au niveau des eaux prélevées, toutes les eaux ont été intégrées. Il en ressort de l'analyse du Tableau VII : que les températures enregistrées, avec les moyennes de 25,76°C, 25,8°C, 24,8°C respectivement dans les sources, les puits et la pluie, sont sensiblement similaires. En ce qui concerne le pH, les eaux prélevées sont dans l'ensemble acide à neutre, cependant la source 10 présente une acidité plus marquée avec une valeur de pH = 5,8 (Annexe III).

*Tableau VII : Paramètre physique des eaux de sources, pluie et puits*

Eaux		pH	T (en °C)	CE (µS/cm)	TDS (ppm)
Sources	Min	5,8	24,5	15,86	9,58
	Moy	6,61	25,76	119,56	72,21
	Max	7,15	26,8	636,00	384,14
	σ	0,405	0,80	183,95	111,11
Puits	Min	6,81	25,70	187,00	112,95
	Moy	7,04	25,80	200,00	120,80
	Max	7,26	25,90	213,00	128,65
	σ	0,32	0,14	18,38	11,10
Pluie	Val	7,21	24,8	4,93	3,0
	VG (OMS)	6.5 - 9.5	< 25	< 1400	< 242

Les valeurs de conductivité électrique présentées à la Figure 27, on remarque que la conductivité de la source n°7 est élevée.



*Figure 27 : Conductivité électrique des eaux analysées*

Les investigations faites lors des travaux de terrains ont permis de remarquer des sources de pollutions d'origine anthropique (l'utilisation d'herbicides à proximité des sources). Ces

pollutions pourraient être à l'origine de la valeur élevée de la conductivité au niveau de la source 7. En ce qui concerne les eaux des sources n°4, n°5, n°6, n°10 elles apparaissent très faiblement minéralisées avec des conductivités électriques inférieures à 50  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Cette très faible minéralisation s'observe aussi au niveau de l'eau issue de la pluie 4,73  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Les eaux de ces sources pourraient provenir donc des eaux de la pluie. Par ailleurs les eaux des sources n°1, n°2, n°3, n°8, n°9 présentent aussi une faible minéralisation avec des conductivités électriques inférieures à 200  $\mu\text{s}/\text{cm}$  (Peloton et Zysman, (1993) cité par Sauret, 2013)). Enfin les eaux de puits analysés présentent aussi de faible valeur de conductivité électrique, mais supérieurs à celle des eaux de sources. Cela peut être dû au mélange de ces eaux avec les matériaux sédimentaire (argiles etc.) formant la nappe superficielle

### V.2.3.2. Analyse des faciès hydrochimique

Le Tableau VIII et Tableau IX présentent respectivement les résultats des analyses des cations et anions majeurs présents dans les eaux prélevées.

*Tableau VIII : Concentration des cations majeurs présents dans les eaux prélevées*

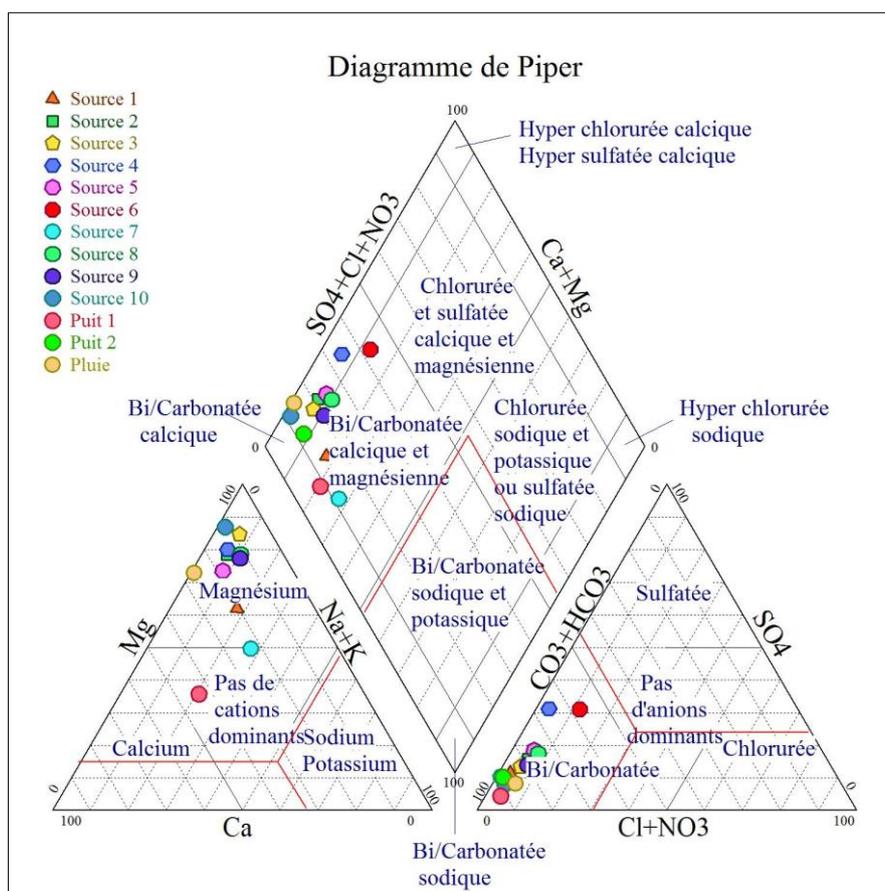
Eaux		Na <sup>+</sup> (mg/l)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)
Sources	Min	0,70	4,01	9,12	0,20
	Moy	4,53	7,41	19,82	4,23
	Max	32,00	27,05	35,26	8,50
	$\sigma$	9,67	7,01	8,741	2,31
	Min	3,90	11,02	5,47	0,50
Puits	Moy	4,80	12,53	13,68	1,30
	Max	5,70	14,03	21,89	2,10
	$\sigma$	1,27	2,13	11,61	1,13
	Pluie	Pluie	0,1	4,01	6,69
	VG (OMS)	<200	<100	<50	<12

De l'analyse des Tableau VIII et Tableau IX il ressort que dans les différents types d'eaux prélevées le cation dominant demeure le magnésium (Mg<sup>2+</sup>), suivi du calcium (Ca<sup>2+</sup>) et l'anion dominant demeure l'ion bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), suivi des sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2+</sup>). L'ensemble des concentrations des différents anions et cations satisfait aux normes de l'OMS hormis les ions bicarbonatés qui présentent une concentration largement au-dessus de 200mg/l.

*Tableau IX : Concentration des anions majeurs et mineurs dans les eaux prélevées*

Eaux		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Sources	Min	0,22	0,00	8,74	2,50	2,61	71,98	0,00
	Moy	0,72	0,04	21,14	3,84	4,95	139,93	0,00
	Max	1,12	0,20	45,49	8,98	13,03	492,88	0,00
	Ecart	0,33	0,07	12,09	2,02	3,05	125,89	0,00
Puits	Min	0,45	0,04	7,18	3,49	4,17	187,88	0,00
	Moy	0,56	0,10	17,58	3,99	4,43	246,44	0,00
	Max	0,67	0,15	27,99	4,49	4,69	305,00	0,00
	Ecart	0,16	0,08	14,71	0,71	0,37	82,82	0,00
Pluie_sindou		1,34	0,01	6,73	2,99	19,81	90,28	0,00
VG (OMS)		<50	<50	<250	<200		<200	

Le report de ces résultats sur le diagramme triangulaire de Piper (Figure 28), met en évidence les différents faciès des eaux et permet d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification.



*Figure 28 : Classification des eaux à partir du diagramme de Piper*

Ce diagramme classe les eaux en quatre (4) faciès type :

- Faciès Bicarbonaté alcalino-terreux,
- Faciès Chloruré et/ou sulfaté alcalino-terreux,
- Faciès Chloruré et/ou sulfaté alcalin,
- Faciès Bicarbonaté alcalin.

De l'analyse de la Figure 28 il en ressort que les eaux prélevées sont toutes des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes, caractéristique de la prédominance des ions bicarbonates sur les ions sulfates et les chlorures. Ainsi il paraît assez évident qu'il existe une forte interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines dans la zone d'étude.

### V.2.3.3. Origine et mélanges éventuels des eaux

#### • Processus de minéralisation des eaux

Du fait de l'imprécision dans le calcul de l'indice de saturation, résultant des erreurs systématiques sur les analyses chimiques, il a été considéré dans le cadre de cette étude que la saturation est obtenue lorsque  $-1 < IS < 1$  (Daoud, 1992 cités par (Kouanda, 2019)). La Figure 29 présente les indices de saturation des eaux aux minéraux carbonatés (dolomite, calcite et aragonite).

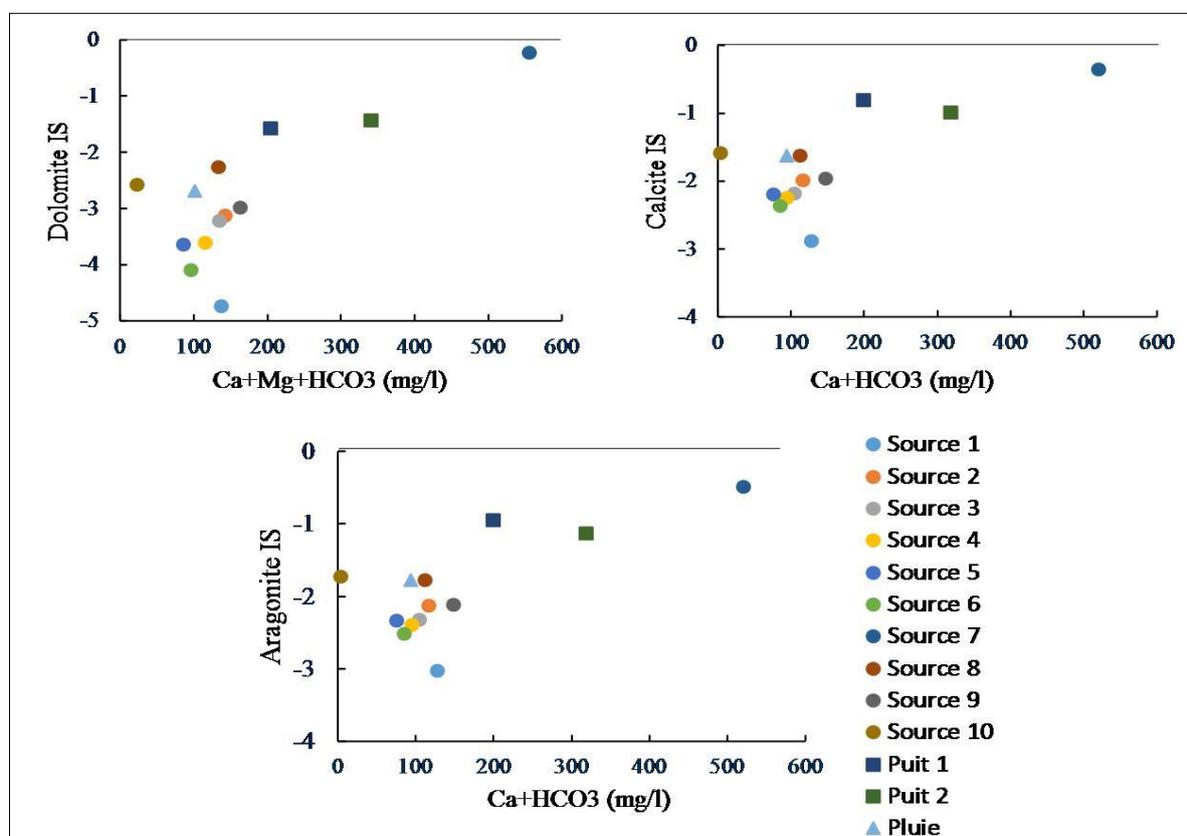


Figure 29 : Relation IS du Dolomite vs.  $Ca+Mg+HCO_3$ , IS de Aragonite vs.  $Ca+HCO_3$ , IS du Calcite vs.  $Ca+HCO_3$

La source n°7 se situe dans le domaine des eaux saturées par les minéraux carbonatés. Cette source atypique pourrait tenir son comportement des pollutions d'origine anthropique remarquées lors des investigations sur le terrain susmentionné dans la partie des analyses des paramètres physiques des eaux. Enfin les eaux des puits présentent aussi une sous saturation vis-à-vis des matériaux carbonatés, ce constat est justifié car ces puits captent la nappe superficielle majoritairement rechargée par les eaux de pluies.

### • Evolution des pressions partielles en CO<sub>2</sub>

La pression partielle de gaz carbonique en équilibre dans l'atmosphère est de  $10^{-3.5}$  atm (Sauret, 2013). La Figure 30 présente les valeurs de pCO<sub>2</sub> en fonction du pH. L'observation de ces valeurs de pCO<sub>2</sub> obtenus pour l'ensemble des eaux prélevées montre qu'elles sont supérieures à  $10^{-3.5}$  atm. Ce constat suppose que les différentes eaux prélevées au niveau des sources et des puits proviennent d'un milieu ouvert à un apport du CO<sub>2</sub> gazeux du sol.

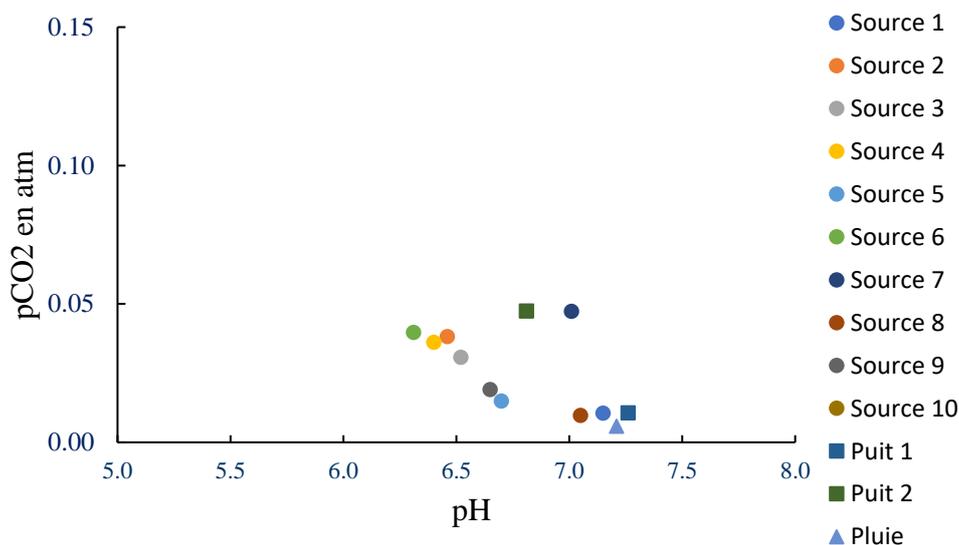
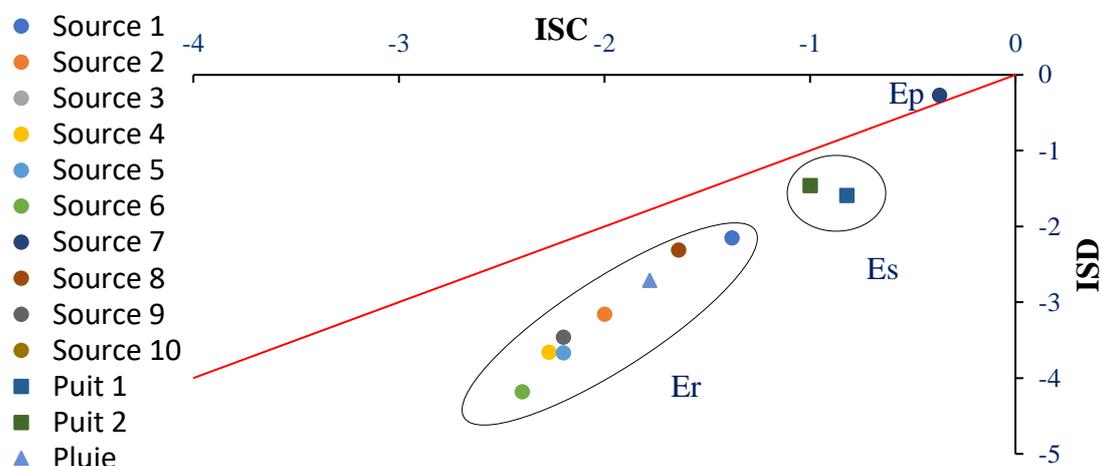


Figure 30 : pCO<sub>2</sub> vs. pH

### • Âges relatifs des eaux

L'âge relatif des eaux a été apprécié grâce à l'étude du système calco-carbonique basé sur l'exploitation du diagramme ISD/ISC. La Figure 31 présente le diagramme ISD/ISC, il en ressort de l'analyse de ce diagramme que trois groupes d'eaux sont contenus dans les différentes eaux prélevées. Le premier groupe concerne les eaux de la nappe superficielle (Puits), qui sont des eaux sub actuelles avec un temps de séjour moyen, et une vitesse de circulation des eaux moyennes. Ces eaux sont stockées dans les formations sédimentaires constituant la nappe superficielle du site d'étude. Le second groupe concerne les eaux actuelles, formées par 90% des eaux de sources et de pluie, avec des temps de séjour court et une vitesse de circulation des

eaux rapide. L'appartenance des eaux de pluie à ce groupe confirme le caractère très récent de ces eaux. Enfin le dernier groupe concerne les eaux particulières formées par les eaux de la source n°7, qui comme présentés plus haut tient son comportement particulier des facteurs anthropiques.



*Figure 31 : Diagramme ISD/ISC des eaux prélevées : Ep = Eau particulière, Es = Eaux sub actuelles, temps de séjour moyen, vitesse de circulation des eaux moyennes, Etr = Eau récente.*

#### V.2.4. Discussion

##### • Contexte géologique et tectonique

Les travaux antérieurs présentés dans la description de la tectonique de la zone d'étude ont montré que l'orientation des fractures est parfois très variable avec des familles de fractures dominantes d'orientation NNE-SSO (Ouédraogo et al., 2018) et des failles affectant le socle d'orientation NE-SO mise en évidence dans le programme Sysmin. Par ailleurs des familles de linéaments de direction N-S ou NNE-SSO ou E-O ou ENE-OSO ont aussi été mises en évidence dans la zone d'étude. Ces linéaments affectent le socle et compartimentent la couverture sédimentaire. La comparaison des différentes directions issues des travaux antérieurs aux directions des fractures obtenues dans le cadre de cette étude permet de confirmer les fractures mises en évidence grâce à la prospection électromagnétique. L'observation des grès de Kawara-Sindou de part et d'autre du complexe métamorphique et anatectique formé de orthogneiss à biotite et Amphibole montre qu'ils sont antérieurs à la formation cristalline du CMA. Il s'en suit que les nombreuses fractures observées au niveau des sources n°1 n°2, n°3, n°8, n°9, n°7, n°11 proviendrait de l'intrusion du complexe métamorphiques et anatectique formé de orthogneiss à biotite et Amphibole. Cette intrusion s'accompagnerait de phénomènes de fracturation et conduirait à l'émergences de ces eaux pour donner naissance à la zone d'émergence constituée des sources n°1, n°2, n°3, n°7, n°8, n°9 et n°11. L'analyse des

directions d'écoulements des eaux souterraines devrait permettre de corroborer cette explication.

- **Contexte géomorphologique**

L'allure de la carte piézométrique actualisée du bassin de Taoudéni présentée dans les travaux de Kutangila (2019) indique un écoulement des eaux souterraines qui se fait globalement du Sud-ouest vers le Nord-est. Cependant on note aussi des directions d'écoulements secondaires dont l'écoulement des eaux souterraines en direction du socle cristallin au sud-ouest du bassin de Taoudéni, laquelle zone constitue le site objet de cette étude. Ainsi les sources n°1, n°2, n°3, n°8, n°9, n°7, n°11 proviendrait des eaux souterraines de l'aquifères de Kawara-Sindou et du socle fracturé par le complexe métamorphique anatectique ce qui favoriserait leur écoulement en surface.

Par ailleurs, la géologie de la zone d'étude révèle que les grès de Kawara-Sindou repose directement sur le socle birimien, avec des affleurements du contact des formations gréseuses de Kawara-Sindou et le socle. Les coupes topographiques réalisées à proximité des sources n°10, n°4, n°5, n°6 montrent un changement de pente brusque juste avant l'emplacement des sources. Ces formations du socle constitueraient des frontières naturelles et provoqueraient un émergence et écoulement des eaux au niveau des grès fracturés en surface. Cette disposition justifie la présence des sources 4, 5, 6, 10 dans le site d'étude.

Enfin la coupe topographique et la variation spatiale de la piézométrie représentée à la Figure 25 montre que la source n°12 proviendrait de la rencontre entre le niveau piézométrique de la nappe superficielle et le terrain naturel.

- **Contexte hydrochimique**

Les investigations hydrochimique réalisées dans le cadre de cette étude ont permis d'apprécier plusieurs caractéristiques des eaux de sources et de la nappe superficielle du site d'étude. Les études antérieures réalisées par l'AEC et l'AEM en 2016, sur les paramètres physico-chimiques des eaux de sources ont montré que la majorité de ces eaux ont une valeur de conductivité électrique de 5 à 50 $\mu$ S/cm avec des exceptions ayant des valeurs supérieures à 200  $\mu$ S/cm. D'après Compaoré (2016) ces exceptions observées tiennent leurs origines des pollutions anthropiques.

Ces résultats obtenus s'accordent aux valeurs de conductivité électriques déterminées dans le cadre de cette étude. En effet l'ensemble des eaux de sources présentent des conductivités électriques inférieures à 125 $\mu$ S/cm, hormis la source 7 qui présentent une conductivité de 636  $\mu$ S/cm. Par ailleurs l'étude réalisée par Kouanda, 2019 a montré que les sources situées dans la

partie ICT du Burkina Faso présentent des eaux acides ou neutres (moyenne = 6,5) et les eaux de surface (réservoirs d'eau et rivières) sont globalement neutres avec une moyenne = 7,0). Les eaux analysées dans le cadre de cette étude étant situées dans la partie ICT du Burkina Faso ; ce constat est le même, avec des valeurs de pH globalement acide à neutre (5,8 à 7,26). En ce qui concerne la température, les valeurs obtenues pour l'ensemble des eaux analysées se situent dans la plage de température atmosphérique de la zone d'étude (22,43°C à 34,44°C).

Le faciès hydrochimique des eaux analysées dans le cas de cette étude a donné un faciès de type bicarbonatée calcique et magnésienne pour l'ensemble de ces eaux. Ce résultat s'accorde avec la conclusion tirée par Kouanda, (2019), sur le fait que dans la partie de l'ICT du Burkina Faso, notamment dans les GKS, en termes de faciès hydrochimique, les eaux, de forages, des sources, des rivières et des réservoirs de surface présentent globalement le même type d'eau : eaux bicarbonatés calciques et magnésiennes.

L'étude du processus de minéralisation aux moyens de l'évaluation des indices de saturation des eaux par les minéraux carbonatés a montré que l'ensemble des eaux analysées présentent une sous saturation vis-à-vis de ces minéraux et que 90% des eaux de sources seraient des eaux récentes conformément au diagramme ISD=ISC réalisé. La considération de ces résultats suggère que les eaux de sources analysées ne sont pas restées longtemps en contact avec les matériaux rocheux carbonatés constituant les aquifères de la zone d'étude, ou que ces derniers sont très peu minéralisés.

Toutes les deux propositions d'explication sont recevables car les pressions partielles en CO<sub>2</sub> pour l'ensemble des eaux analysées ont donné des valeurs supérieures à la pression partielle en CO<sub>2</sub> contenue dans l'atmosphère 10<sup>-35</sup> atm ce qui suppose que les eaux ont bénéficié d'apport en CO<sub>2</sub> du sol. Par ailleurs l'analyse des eaux de forages issus de l'aquifère de Kawara-Sindou a montré que ces eaux présentent une faible minéralisation, de plus l'analyse du pourcentage en ions majeurs des grès de Kawara-Sindou a montré des proportions relativement faible (Gombert, 1998). Ainsi les eaux des sources du bas-fond de Sindou proviennent de l'aquifère de Kawara-Sindou hormis la source n°12 qui constitue l'exutoire de la nappe superficielle.

### V.3. Qualité physico-chimique des eaux de sources

#### V.3.1. Paramètres physico-chimiques

Les valeurs des paramètres d'appréciation de l'aptitude des eaux de sources et de la nappe pour l'irrigation sont présentées au Tableau X. Le RS et la pression osmotique permettent d'isoler deux classes : la classe des eaux à faible salinité  $\pi$  (atm)  $\leq 0,09$  et  $RS \leq 175 \mu\text{s/cm}$  regroupant toutes les sources et les puits sauf la source n°7, et la classe des eaux à salinité moyenne  $0,09 \leq \pi$  (atm)  $\leq 0,27$  et  $175 \mu\text{s/cm} \leq RS \leq 525 \mu\text{s/cm}$  représentant la source n°7.

*Tableau X : Valeurs des paramètres SAR, %Na, Résidu Sec (RS) et Pression Osmotique ( $\pi$ )*

Sources d'eaux	SAR (még/L)	Teneur Na <sup>+</sup> %	Résidu sec (RS) (mg/L)	$\pi$ (atm)
S1	0,47	30,02	54,39	0,03
S2	0,24	18,43	47,67	0,02
S3	0,17	16,64	58,38	0,03
S4	0,07	20,13	24,01	0,01
S5	0,19	21,54	23,80	0,01
S6	0,36	30,81	36,40	0,02
S7	0,15	6,33	445,20	0,23
S8	0,33	37,41	85,12	0,04
S9	0,23	15,77	50,82	0,03
S10	0,07	14,64	11,10	0,01
Puit 1	0,28	32,44	130,90	0,07
Puit 2	0,12	15,19	149,10	0,08

Le report des valeurs des teneurs en sodium en pourcentage et du SAR en fonction de celles de la conductivité électrique (respectivement diagramme de Wilcox et de Riverside) permet de mieux apprécier la qualité des eaux de sources (Figure 32) (Adjiri et al., 2020). Le diagramme de Wilcox classe l'ensemble des eaux prélevées (eaux de sources, eaux de puits, eaux de pluie) dans la catégorie des eaux excellentes pour l'irrigation. Le diagramme de Riverside, permet d'identifier deux catégories d'eaux d'irrigation : La première catégorie concerne la classe C1 S1 ( $0 < C1 > 250 \mu\text{S/cm}$  et  $0 < S1 > 14$ ) de qualité excellente, comprenant 11 points, hormis les eaux de pluies, soit 85 % des eaux échantillonnées, la deuxième catégorie correspond à la classe C2 S1 ( $250 < C2 > 750 \mu\text{S/cm}$  et  $0 < S1 > 14$ ) de qualité acceptable, comprenant 1 points d'eaux soit 15 % de points d'eaux échantillonnés. Les différents paramètres observés et les diagrammes analyses permettent de dire que les eaux de la nappe et les eaux de sources peuvent être utilisées à des fins agricoles.

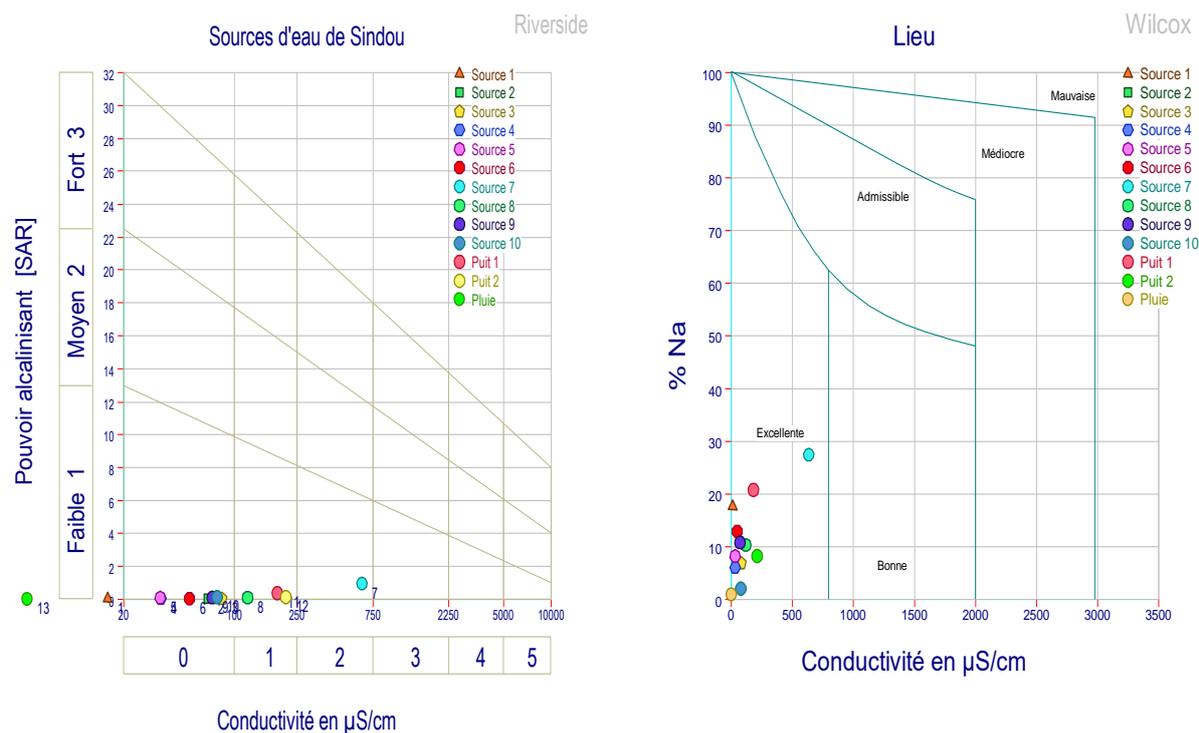


Figure 32 : Classification des eaux dans le diagramme de Wilcox et Richards

### V.3.2. Métaux lourds

Le Tableau XI présentant les concentrations en métaux lourds montre que l'ensemble des eaux analysées ne présentent aucun risque conformément aux normes et valeurs guide de l'OMS. Cependant la proportion en ion  $Fe^{2+}$  dépasse les valeurs guide proposé par l'OMS. Cette proportion élevée d'ions  $Fe^{2+}$  proviendrait de l'infiltration des eaux des parcelles rizicoles inondées ayant des sols acides.

Tableau XI : Concentrations en métaux lourds

Eaux		$Fe^{2+}$	Cu	Mn	Pb	Zn	Ni	Cr	Cd	Al
Sources	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	Moy	0,43	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
	Max	4,08	0,01	0,02	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ecart	1,28	0,00	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Puit	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	Moy	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	Max	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ecart	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Pluie Sindou		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VG (OMS)		<0.3	<0.3	<0.5	<0.01	<3	<0,001	<0,05	<0.05	<0,2

#### V.4. Quantification de la ressource en eau et des besoins en eau d'irrigation

La Figure 33 présente, les points de mesures du débit des sources d'eaux du périmètre et les directions de profils électromagnétique réalisés pour le choix de l'emplacement des ouvrages de captage. Les résultats des profils électromagnétiques réalisés sont présentés en Annexe VII.

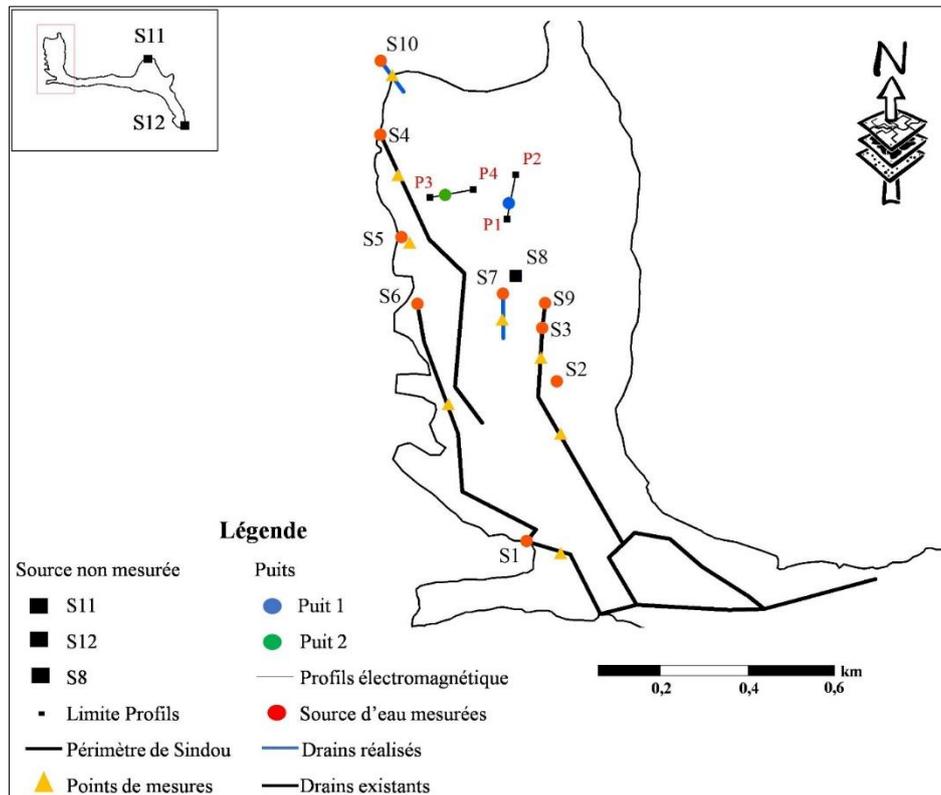


Figure 33: Emplacement des points de mesures de débit des sources

Sur les douze (12) sources d'eaux présentes dans le périmètre de Sindou, neuf (9) sources ont pu être mesurées, les sources non mesurées sont soit trop diffuses, ou sont incluses dans des marres dont elles sont à l'origine.

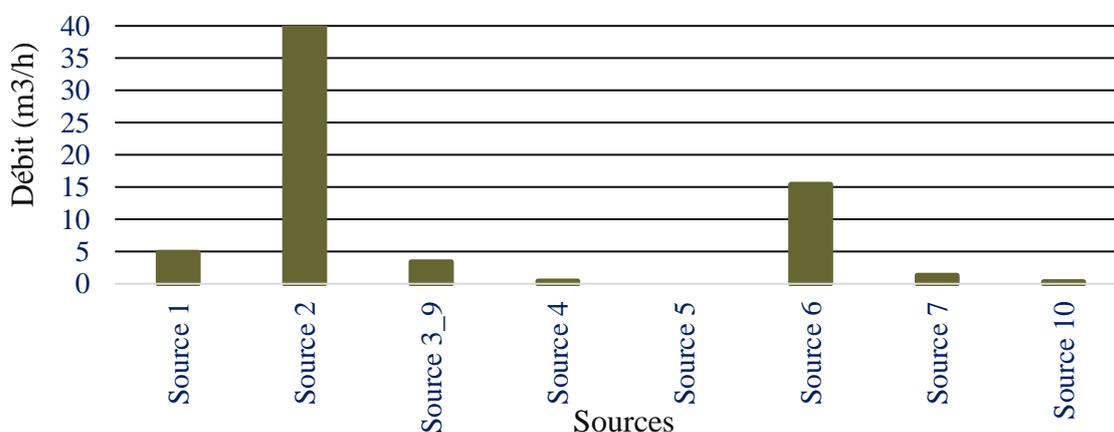
##### V.4.1. Débits des sources d'eaux du site d'étude

Les méthodes employées et les valeurs des différents paramètres mesurées pour la détermination des débits des sources d'eau sont présentées dans le Tableau XII et une représentation graphique des valeurs des débits mesurées pour chaque source est faite à la figure 33. Les différentes méthodes utilisées pour la détermination des débits des sources ont montré des valeurs de débits très élevés de 39,9 m<sup>3</sup>/h et 15,4 m<sup>3</sup>/h respectivement pour les sources 6 et source 2. Les valeurs obtenues pour l'ensemble des autres sources mesurées sont inférieures à 5m<sup>3</sup>/h. Par conséquent, dans le site d'étude, les sources d'eau constituent à elle seule une ressource en eau pouvant fournir un débit égal à 65,55m<sup>3</sup>/h.

*Tableau XII : Valeurs de débit des sources d'eaux mesurées*

Sources mesurées	Méthodes	Paramètre mesures	Débits (m <sup>3</sup> /h)	Débits moy (m <sup>3</sup> /h)
Source 1	Jaugeage capacitif	Volume récipient 20L	4,86	4,86
		Temps moy 14,8s		
Source 2	Déversoir calibré	Largeur en crête 0,2m	37.5	39.9
		Charge d'eau 0,1m		
Source 3 et 9	Jaugeage au moulinet	Vitesse	42,3	3.39
		Jaugeage capacitif	Volume récipient 20L	
		Temps moy 24,5s		
	Jaugeage au flotteur	Temps moy 135s		
Source 3 et 9	Jaugeage au flotteur	Longueur 2m	3,84	
		Largeur moy 0,3m		
		Hauteur moy 0,3m		
Source 4	Jaugeage capacitif	Volume récipient 20L	0.4	0.4
		Temps moy 196s		
Source 5	--	--	0	0
Source 6	Jaugeage au moulinet	Vitesse	16,8	15.4
		Déversoir calibré	Largeur en crête 0,2	
Source 6	Déversoir calibré	Charge d'eau 0,05	14	
		Jaugeage capacitif	Volume récipient 20L	1,31
Source 7	Jaugeage capacitif	Temps moy 55 s		
Source 10	Jaugeage capacitif	Volume récipient 20L	0.29	0.29
		Temps moy 250s		

Sur la base des débits quantifiés, le volume d'eau facilement mobilisable dans le bas-fond de Sindou durant la campagne de contre saison, s'étalant de janvier à juin (150 jours) est donc égale à 235980 m<sup>3</sup>.

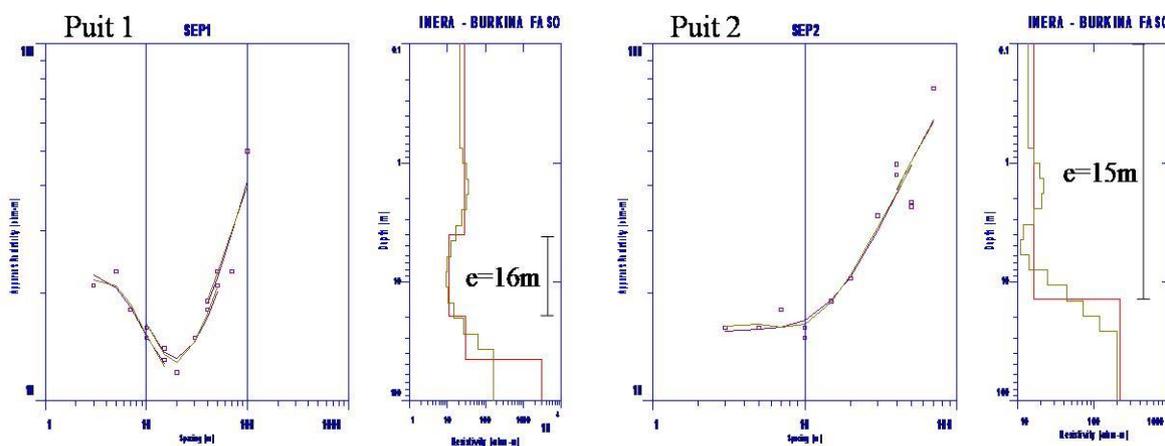


*Figure 34 : Valeurs de débits des sources mesurées*

## V.4.2. Etude hydrodynamique de la nappe

### V.4.2.1. Géométrie de la nappe

La Figure 35 montre les résultats des sondages électriques réalisés sur les puits du site d'étude pour la détermination de l'épaisseur saturée de la nappe superficielle.



*Figure 35 : Sondage électrique réalisé sur les puits 1 et 2*

Il en ressort des résultats de sondage électrique réalisé au niveau du premier ouvrage de captage (Puit 1) que quatre (04) différents types de couches constituent le sous-sol. La première couche est constituée de latérite d'une épaisseur d'environ 3 m, la deuxième formée de sable argileux d'épaisseur 16 m, la troisième couche est constituée de roche fracturée d'épaisseur d'environ 30 m et enfin la roche saine. Cette disposition des formations dans les premiers 4 m s'est faite ressentir dans l'ouvrage de captage par des arrivées d'eaux par le bas, donnant des courbes de pompage et de remontée rectiligne. L'épaisseur saturée de la nappe superficielle captée est de  $e=16m$ .

En ce qui concerne le deuxième ouvrage de captage deux types de couches ont été identifiés suite au sondage électrique. La première couche d'épaisseur 15 m constituée des sables argileux représente la nappe superficielle. Cela est d'autant plus vrai que le niveau statique de cet ouvrage de captage était à  $-0,1$  m par rapport au TN. Par la suite, la deuxième couche constitue la roche saine. On en déduit ainsi que l'épaisseur de la nappe superficielle saturée est d'environ 16m.

### V.4.2.2. Essais de puits

Les résultats des essais de puits sont présentés à la Figure 36. Cette Figure 36 montre l'évolution du rabattement en fonction du temps dans les différents ouvrages pompés. L'allure de ces courbes illustre distinctement les rabattements induits aux différents paliers de débits.

Les résultats obtenus sont donc interprétables.

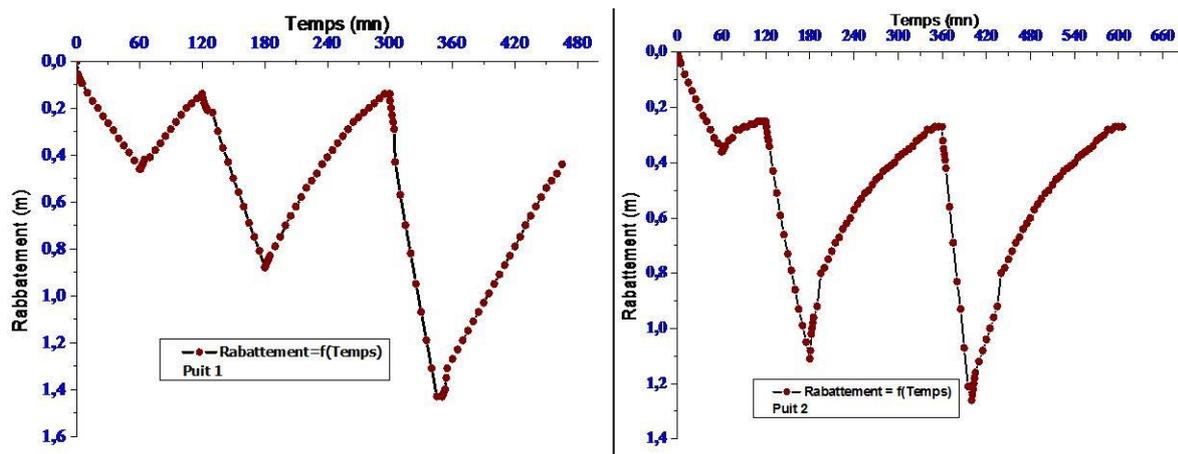


Figure 36 : Résultats des essais de puits par paliers de débits non enchaînés

Le report des débits de pompage et des rabattements induits sur chaque palier a permis de tracer de la courbe caractéristique des ouvrages. L'exploitation de ces courbes caractéristiques ont permis de déterminer le débit auquel les essais de nappe de longue durée seront réalisés. Ainsi le Tableau XIII présente les caractéristiques des essais de pompage de longue durée réalisés sur les deux ouvrages de captage. Il en ressort que le Puits 1 et Puits 2 seront respectivement pompés à un débit de  $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $0,87 \text{ m}^3/\text{h}$ . Du fait de l'absence de piézomètre d'observation les mesures du niveau dynamique ont été faites directement dans l'ouvrage pompé.

Tableau XIII : Caractéristique des essais de pompage

Ouvrage	Dimension (D*H)	Piézomètre	Q ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Durée pompage	Durée remontée
Puit 1	1,5*2,8	Néant	0,8	6h	3h
Puit 2	1,5*2	Néant	0,87	6h	3h25 mn

#### V.4.2.3. Paramètres hydrodynamiques de la nappe superficielle

Les résultats des essais de nappe longue durée obtenus ont été présentés en Annexe X. L'interprétation de ces résultats faite à l'aide de la méthode d'interprétation de Streltsova et Boulton des essais de nappe de longue durée ont permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques de la nappe superficielle.

Les différentes étapes de la méthode d'interprétation de Streltsova et Boulton (Annexe VIII) ont permis de sélectionner des points pivots (Tableau XIV) servant au calcul des

paramètres hydrodynamiques.

*Tableau XIV : Données sur les points pivots utilisés avec la méthode de Boulton Streltsova.*

Ouvrages	Point pivot	$\sqrt{\beta}$	$\frac{1}{u_A}$	$\frac{1}{u_B}$	$W(u_A)$	$W(u_B)$	s	t (j)
Puit 1	A1	0,5	$2,12 \cdot 10^3$	15	1	0,25	0,18	$7 \cdot 10^{-3}$
	B1							$5 \cdot 10^{-2}$
Puit 2	A2	0,5	$8 \cdot 10^2$	12	0,5	0,22	0,41	$5,2 \cdot 10^{-2}$
	B2							$5 \cdot 10^{-2}$

Le Tableau XV présente les caractéristiques hydrauliques de la nappe superficielle du site d'étude calculées avec la méthode Boulton Streltsova. Il en ressort que la nappe d'eau caractérisée présente une transmissivité moyenne de  $2,4 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$  et un coefficient d'emmagasinement moyen de  $S_A = 1 \cdot 10^{-3}$  et  $S_B = 7,4 \cdot 10^{-2}$ .

*Tableau XV : Paramètres hydrodynamique de la nappe*

Ouvrages	Point pivot	kD ( $\text{m}^2/\text{j}$ )	D (m)	K (m/j)	$S_A$ (Valeur fixée)	$S_B$
Puit 1	A1	8,5	16	0,53	$1 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$
	B1	6,13		0,4		
Puit 2	A2	2	15	0,13	$1 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$
	B3	3,9		0,26		

#### V.4.2.4. Débit d'écoulement de la nappe superficielle

La Figure 37 présente la carte piézométrique du bas-fond de Sindou représentant les niveaux les courbes d'égale niveau statique de la nappe superficielle.

Cette figure montre une ligne de courant perpendiculaire aux courbes équipotentiels 332 m en H1 et 228 m en H2. Ces deux emplacements (H1-H2) sélectionnés sont séparés d'une distance de 1,5 cm sur la carte et de 395 m sur le terrain. Le débit d'écoulement spécifique de la nappe superficielle a été déterminé à l'aide de l'équation de darcy (Eq.26). Cette estimation du débit spécifique a donné une valeur de  $2,2 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$  et donc un volume théorique de  $45619200 \text{m}^3$  pour une épaisseur  $e=16 \text{m}$  et une longueur  $L=100 \text{m}$ .

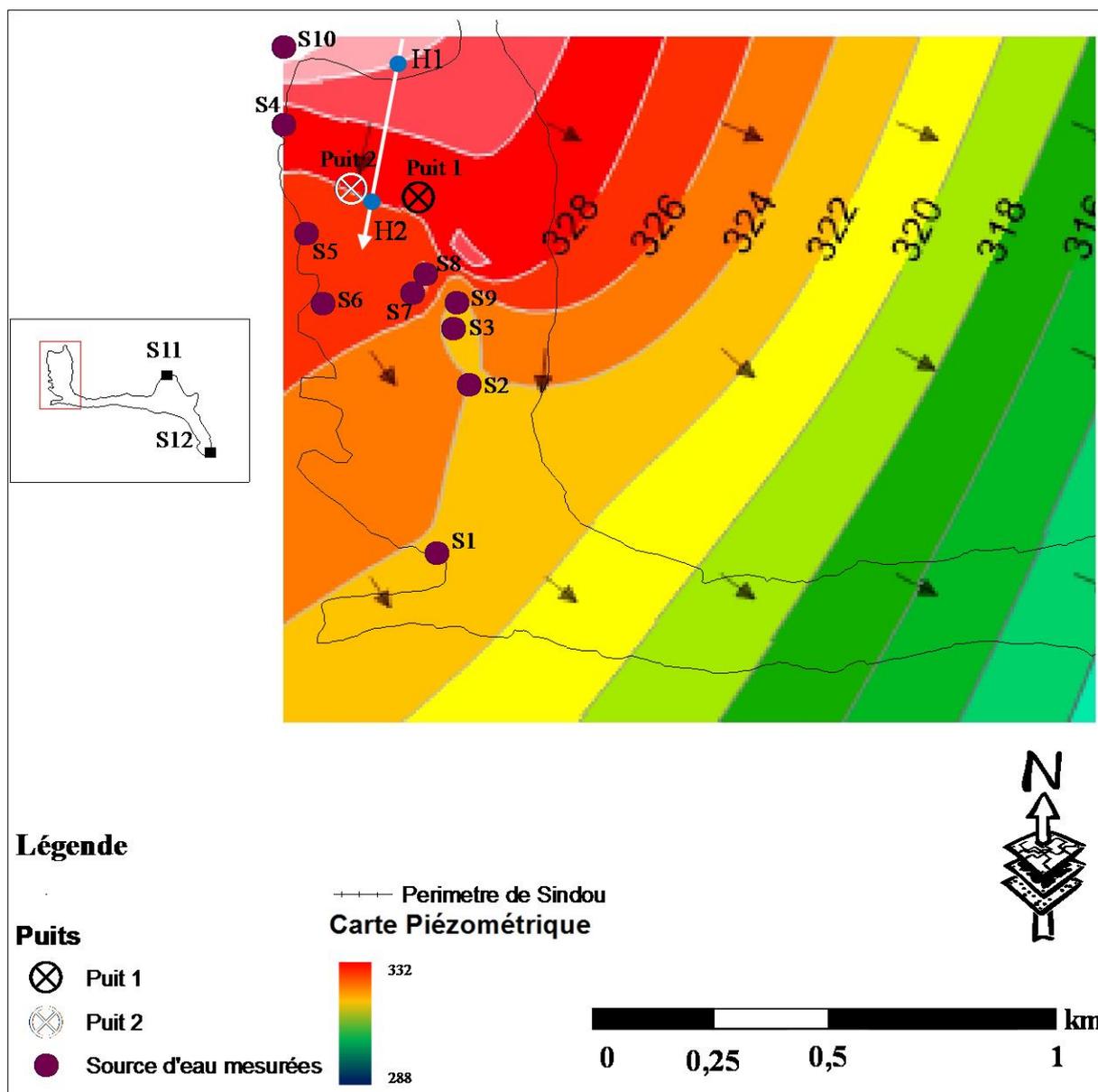


Figure 37 : Carte piézométrique du bas-fond de Sindou

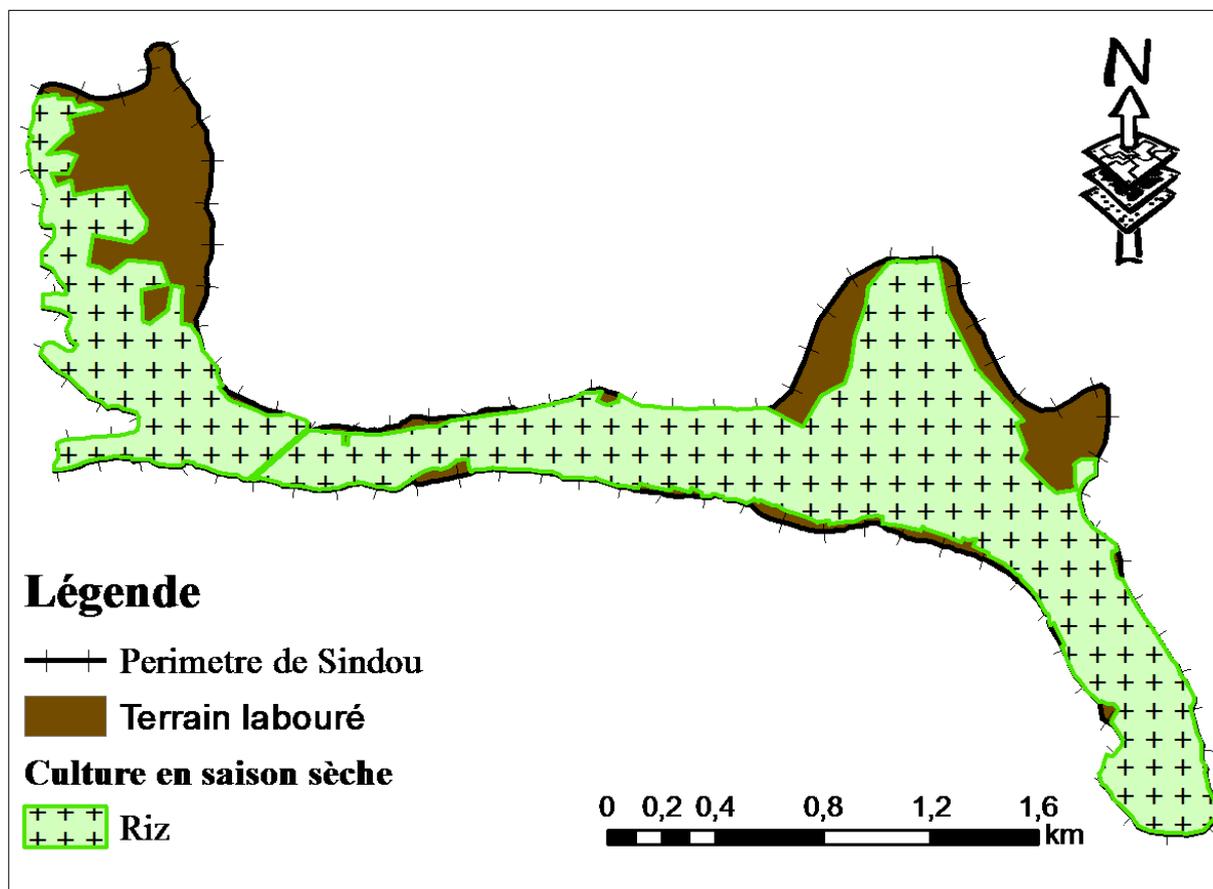
#### V.4.3. Etude des besoins en eau agricole

##### V.4.3.1. Cartographie des spéculations

Les investigations réalisées sur le terrain ont permis d'identifier et de cartographier les différentes spéculations (riz, gombo, banane, tomate, maïs, patate douce, concombre, choux, arachide, tarot) pratiquées dans le bas fond de Sindou. A l'issue de cette cartographie il a été remarqué que la spéculation dominante est le riz occupant la quasi-totalité du périmètre. Ce constat correspond bien à la vocation première du bas-fond de Sindou lors de son aménagement par l'Opération-Riz-Comoé (ORC) en 1985. De ce fait l'estimation des besoins en eau agricole a donc concerné la spéculation dominante qu'est le riz.

La Figure 38 présente la carte d'occupation du sol avec une distinction entre les

superficiés exploitées pour la riziculture et les superficiés dénommées terrain labouré, regroupant les entités telles que les autres spéculations pratiquées sur le périmètre et les terrains nus. Il en ressort de l'analyse de cette cartographie que la culture du riz occupe une superficie de 202 ha lorsque tout l'espace réservé à ce propos est utilisé.



*Figure 38 : Cartographie des spéculations en saison sèche*

#### **V.4.4. Quantification des besoins en eau d'irrigation**

Le calcul des besoins en eau d'irrigation comme spécifié plus haut a concerné la culture du riz. Les enquêtes réalisées auprès des agriculteurs ont permis de déterminer la date de début de la réalisation des pépinières (mi-janvier) et la durée de la campagne qui est de 5 mois soit 150 jours. Les différents paramètres (paramètre climatiques, culturelles, du sol) déterminés pour le calcul des besoins en eau d'irrigation sont présentés en Annexe (XI, XII, XIII, XIX). L'utilisation de ces paramètres ont permis l'estimation du besoin en eau d'irrigation par mois, présenté dans le Tableau XVI. Il en ressort de l'analyse du Tableau XVI que le besoin de pointe en eau d'irrigation s'observe en février du fait des travaux de préparation de la rizière nécessitant l'humectation du sol.

*Tableau XVI : Besoins en eau d'irrigation (mm/mois)*

Mois	Besoins en eau d'irrigation		Volume d'eau (m <sup>3</sup> )
	mm	m <sup>3</sup> /ha	
Janvier	105,7	1057	204001
Février	438,8	4388	846884
Mars	268,7	2687	518591
Avril	228,6	2286	441198
Mai	158,5	1585	305905
Juin	38,7	387	74691
Totale	1239	12390	2391270

Par ailleurs, les besoins en eau d'irrigation durant toute la saison culturale se ramènent à 2391270 m<sup>3</sup> pour une superficie de 202 ha de riz et une efficacité théorique de 70 %.

#### **V.4.5. Discussion**

Les études hydrométriques menées sur les sources d'eau du bas-fond de Sindou ont permis de quantifier le débit de 9 sources d'eau sur 12 sources identifiées. Ces sources quantifiées ne figurent pas dans l'inventaire antérieur des sources réalisées par l'AEC et l'AEM en 2016. Cependant l'analyse statistique des débits des sources d'eaux mesurées durant cet inventaire a montré que les sources à gros débits se retrouvent dans la zone sédimentaire avec des valeurs de débits compris entre 0,01m<sup>3</sup>/h et 5m<sup>3</sup>/h mais avec des exceptions pouvant aller jusqu'à 40,13m<sup>3</sup>/h (Compaoré, 2016). Dans le cas de cette étude les valeurs de débit des sources 1, 3 et 9, 4, 7, 10, situées dans la partie sédimentaire du bas-fond de Sindou, se situent dans l'ordre de grandeur mentionné plus haut. Des exceptions ont été observées au niveau des sources 6 et 2 qui ont montré des débits respectifs de 39,9 m<sup>3</sup>/h et 15,4 m<sup>3</sup>/h. Par ailleurs la nappe superficielle caractérisée au moyen des essais de pompage longue durée concerne les formations du continental terminal constitué de formation argilo sableuse qui repose sur l'infra cambrien c'est-à-dire la formation de Kawara-Sindou (GKS) (Kutangila, 2019). La synthèse des paramètres hydrodynamiques des aquifères du bassin de Taoudéni réalisé par Kutangila (2019) montre que les formations du continental terminal ont une transmissivité moyenne de  $T = 4,35 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ . La valeur de la transmissivité dans le cadre de l'étude est  $T = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$  présente le même ordre de grandeur que celle déterminé de manière globale par les études antérieures. De plus la valeur du coefficient d'emmagasinement obtenue  $S = 7,4 \cdot 10^{-2}$  corrobore le caractère libre de la nappe caractérisée comme observée lors des essais de pompages. Les résultats de débit obtenus au niveau des sources et de la nappe superficielle ont permis d'estimer la ressource en eau disponible pour la campagne de contre saison à 235 980 m<sup>3</sup> pour les sources

d'eau, et à 28 512 m<sup>3</sup> par mètre carré de surface saturée de la nappe superficielle. A côté de cette ressource en eau disponible, les besoins en eau d'irrigation pour le riz de contre saison s'élèvent à 2 391 270 m<sup>3</sup> pour une superficie emblavée de 202 ha. Cette estimation des besoins en eau étant faite sur la base des paramètres climatiques de la station de bobo, il est possible que la variabilité spatiale des conditions climatiques ait occasionné une surestimation des besoins ou une sous-estimation. De ce fait l'observation des besoins en eau d'irrigation calculée par Barke Guide (2020) a montré un besoin brut d'irrigation de 1 807 363 pour une efficacité de 48%. La différence observée entre les besoins en eau d'irrigation est estimée par Barke Guide (2020) et celle déterminée dans cette étude peut tenir son origine d'une part de la différence entre l'efficacité d'irrigation utilisée mais aussi des superficies agricoles considérées. De plus cette différence pourrait être due à la non considération des besoins en eau d'irrigation pour les pépinières et la préparation du sol dans l'estimation effectuée par Barke Guide (2020).

Enfin un déficit de 2 155 290 m<sup>3</sup> est donc observé si seules les sources d'eau devraient servir à l'irrigation. De ce fait l'exploitation de la nappe superficielle pourrait servir de complément à l'irrigation, car elle constitue un volume mobilisable théorique de 45 619 200 m<sup>3</sup> pour une superficie saturée de 16 m. Enfin sur la base de la ressource en eau constituée par les sources d'eau, une superficie de 19 ha de riz pourrait être correctement irriguée.

## V.5. Synthèse des discussions

La synthèse des différents résultats et informations déduites des discussions sont présentés dans le Tableau XVII

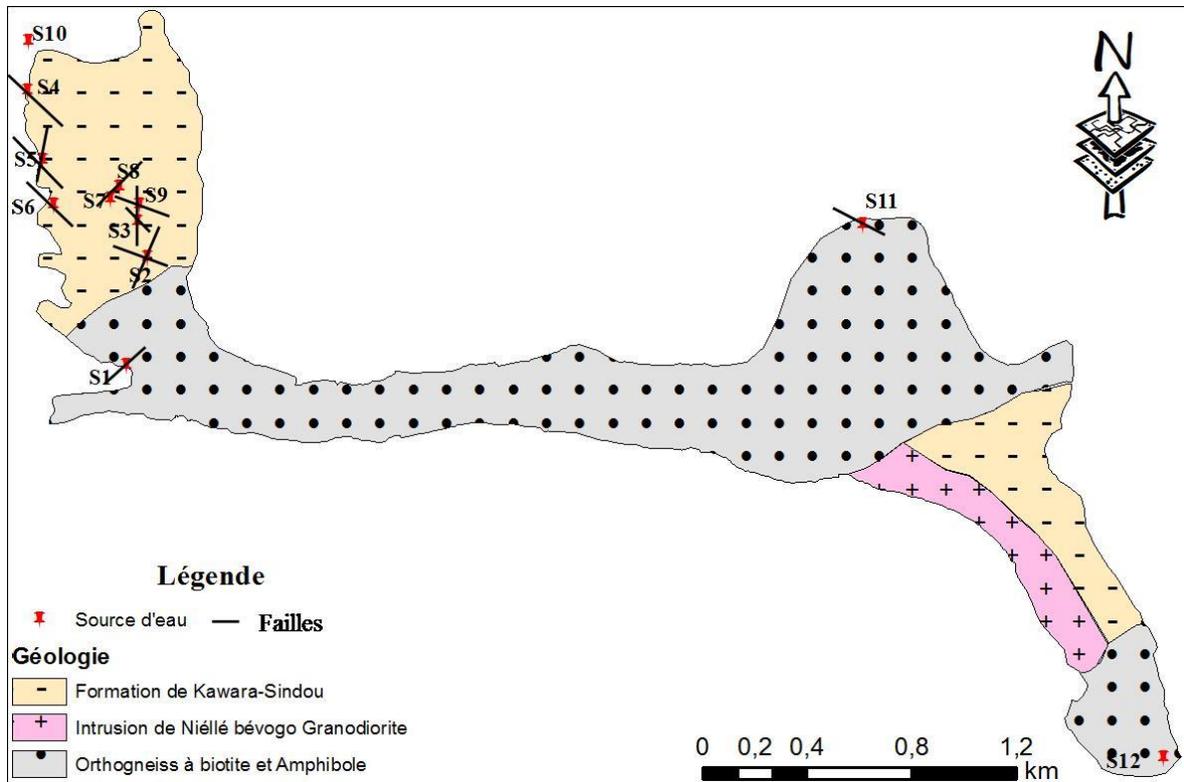


Figure 39 : Carte de la zone d'étude

*Tableau XVII : Synthèses des différents résultats*

Sources	Origine et typologies des sources					Quantification des sources	Facès hydrochimique des eaux	Aptitude à l'irrigation
	Types de sources	Géologie	Prospection électromagnétique (VLF)	Etude Piézométrique et Topographique	Equilibre calco carbonique et âges relatifs	Débits (m3/h)	Piper	Diagramme de Riverside, Wilcox et Pression osmotique
S10	Déversement ou Hillslope	Sédimentaire (Grès de Kawara Sindou)	-	Relief accidenté	Eau récentes (Pluie)	0,29	Bicarbonatées calciques et magnésiennes	Eau bonne pour l'irrigation
S4						0,4		
S5						0		
S6						15,4		
S1	Débordement ou Mound form	Sédimentaire (Grès de Kawara Sindou – Cristalline)	Couloirs de drainage (fracture d'émergence)	-	Eaux récentes (Aquifères des grès de Kawara Sindou)	4,86	Bicarbonatées calciques et magnésiennes	
S2						39,9		
S3 + S9						3,37		
S7						1,31		
S8						nd		
S11						nd		
S12	Dépression	Sédimentaire (Grès de Kawara-Sindou)	-	Rencontre entre le niveau piézo et la côte TN.	Eaux récentes (Nappe superficielles)	nd	Bicarbonatées calciques et magnésiennes	

## **QUATRIÈME PARTIE : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

## VI. CONCLUSION

Ce travail a porté sur les émergences d'eaux souterraines du bas-fond de Sindou situé dans le bassin de la Comoé. Il a consisté d'une part à réaliser une analyse diachronique de l'évolution des superficies agricoles du bas-fond de Sindou sur l'espace temporel allant de 1995 à 2020 avec des pas de temps quinquennaux, et d'autre part à la caractérisation de ces émergences d'eaux souterraines. Ce travail a été réalisé dans le but de mobiliser les informations susceptibles de permettre un aménagement des sources et une gestion durable de ces sources.

Pour ce qui est de l'étude diachronique, la cartographie du périmètre réalisé a permis de déterminer la superficie actuelle s'estimant à 256,3 ha, la campagne d'identification des sources a permis de dénombrer 12 sources d'eaux présentes dans le périmètre. L'étude diachronique proprement dite révèle une tendance globale allant dans le sens de la diminution des superficies agricoles en saison sèche, ce qui représente un signal alarmant et justifie en partie l'étude visant la caractérisation de ces émergences d'eau souterraines.

La caractérisation des émergences d'eaux souterraines s'est faite par, l'explication des conditions d'émergences, l'appréciation de la qualité physico-chimique des sources et l'appréciation de l'adéquation entre la ressource en eau disponible, constituée par les sources et la nappe superficielle, et les besoins en eau agricole.

Les diverses investigations réalisées pour l'explication des conditions d'émergence ont permis de montrer que dans le périmètre de Sindou, trois types de sources d'eau sont présents. Il s'agit des sources de déversement ou Hillslope constitué par les sources n°4, n°5, n°6, n°10, alignées sur le côté ouest du périmètre, les sources de débordement ou Mound form constitué par les sources n°1, n°2, n°3, n°7, n°8, n°9, n°11, les sources de dépression constituée par la source n°12. En ce qui concerne la qualité physico-chimique des eaux des sources et leurs aptitudes d'usage pour l'irrigation, les différents paramètres déterminés et les diagrammes de Wilcox et Riverside réalisés démontrent que ces eaux présentent d'excellente aptitude pour l'irrigation. Enfin la quantification des besoins en eau d'irrigation et de la ressource en eau disponible témoigne que les sources d'eau présentes dans le périmètre irrigué de Sindou ne peuvent à elles seule irriguer l'ensemble des superficies agricoles réservés à la culture du riz, un recours à la nappe superficielle s'avère donc nécessaire. Cependant les sources à elle seule pourraient permettre l'irrigation totale de 19 ha en saison sèche.

## VII. RECOMMANDATIONS

Les recommandations formulées dans cette section vont à l'endroit des acteurs en charge de la gestion des sources d'eaux du site d'étude pour une gestion durable des sources d'eaux. Ces recommandations concernent :

- Aménagement des sources pour en faire de points de captages seins tout en tenant compte des écosystèmes environnants
- L'installation d'appareils de mesure de débit à pas de temps de réguliers pour suivre les fluctuations des débits en fonction des séries pluviométriques ;
- L'aménagement des sources par la délimitation de périmètre de protection ;
- Faire un inventaire en période d'étiage afin de confirmer ou d'infirmer la pérennité des sources ;
- Le curage régulier des sources pour prévenir l'ensablement et le tarissement ;
- Revoir les idées

## **CINQUIÈME PARTIE : BIBLIOGRAPHIE ET ANNEXE**

## BIBLIOGRAPHIE

Adjiri, Oi Adjiri, Tchimou Vincent Assoma, Gbombélé Soro, Natchia Aka, Issa Bengaly, et Nagnin Soro. 2020. « Évaluation des aptitudes d'usages des eaux de sources naturelles dans l'agriculture à partir de techniques hydrochimiques: cas de celles des départements de Daloa et Zoukougbeu, Côte d'Ivoire ». *Afrique Science* 16(1):204-17.

Alfaro, C., et M. Wallace. 1994. « Origin and classification of springs and historical review with current applications ». *Environmental Geology* 24(2):112-24.

Archambault J. 1987. *Le captage des sources*.

Azcona, DE, et Juan Manuel Lopez. 1969. « Mineral and thermal waters of Spain (Spanish) ».

Barke Guide. 2020. *Evaluation de la disponibilité de la ressource en eau souterraine pour un aménagement hydroagricole: Cas du périmètre irrigué du pic de Sindou au Burkina Faso*.

Belleville, Arnaud, Gilles Pierrefeu, Jérôme Le Coz, Frédérique Larrarte, Pierre Marchand, Mélanie Pinatton, Bénédicte Augéard, Pierre-Marie Bechon, David Besson, Pascal Chisne, et others. 2017. « Hydrométrie et normalisation ». *La Houille Blanche* (6):57-66.

Benoist, Jean-Claude, et François Birgand. 2002. « Les dispositifs de mesure des débits dans les bassins versants agricoles ».

Birgand, François, Jean-Claude Benoist, Emilie Novince, Nicolas Gilliet, Patricia Saint Cast, et Eric Le Saos. 2005. « Mesure des débits à l'aide de débitmètres ultrasoniques Doppler. Cas des petits cours d'eau ruraux ».

Borne, Viviane, et Michel Chevalier. 1989. « Détection de fractures et de bassins d'effondrement par méthode électromagnétique ». *Annales de la Société géologique de Belgique*.

Bosch, FP, et I. Müller. 2005. « Improved karst exploration by VLF-EM-gradient survey: comparison with other geophysical methods ». *Near Surface Geophysics* 3(4):299-310.

Bouiadjra, Salah Eddine Bachir, Wael El Zerey, et Khéloufi Benabdeli. 2011. « Étude diachronique des changements du couvert végétal dans un écosystème montagneux par télédétection spatiale: cas des monts du Tessala (Algérie occidentale) ». *Physio-Géo*.

Géographie physique et environnement (Volume 5):211-25.

Bouragba, Latifa, Mudry J. Jacques, Lhoussaine Bouchaou, Youssef Hsissou, et Tarik Tagma. 2011. « Characterization of groundwater in the Souss upstream basin: hydrochemical and environmental isotopes approaches ». *African Journal of Environmental Science and Technology* 5(4):307-15.

Bourlier, Pierre-Yves, Patrick Lachassagne, Jean-François Desprats, et Emmanuel Gille. 2005. « Nouveaux éléments sur la structure et le fonctionnement hydrogéologique du plateau basaltique de l'Aubrac (Massif central, France). Première évaluation des potentialités en eau souterraine ». *Comptes Rendus Geoscience* 337(7):663-73. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.01.014>.

Bryan, Kirk. 1919. « Classification of springs ». *The Journal of Geology* 27(7):522-61.

Canellas, J. 1995. « Au sujet de la définition et de la réglementation des eaux minérales naturelles ». *La Houille Blanche* (2-3):32-36.

Castaing, Christian, et Joël Le Métour. 2003. Carte géologique et minière du Burkina Faso à 1:1,000,000. Bureau de recherches géologiques et minières.

Castany, Gilbert, et Jean Margat. 1977. Dictionnaire français d'hydrogéologie. BRGM.

Clarke, FW. 1924. « Mineral wells and springs ». *The data of geochemistry*. US Geological Survey, Reston, VA 181-217.

Compaoré,. 2014. Rapport de l'étude d'identification, de localisation et de caractérisation physique des sources d'eau dans les espaces de compétences des agences de l'eau du Mouhoun et des Cascades II.

Compaoré,. 2016. Rapport de l'étude d'identification, de localisation et de caractérisation physique des sources d'eau dans les espaces de compétences des agences de l'eau du Mouhoun et des Cascades I.

Cruz, J. Virgílio, et Zilda França. 2006. « Hydrogeochemistry of thermal and mineral water springs of the Azores archipelago (Portugal) ». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 151(4):382-98.

Daum J.R. 1994. « Méthodologie du jaugeage des sources. »

Dakouré, D. 2003. Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure Sud-Est du Bassin de Taoudéni (Burkina Faso-Mali)-Essai de modélisation (Thèse de Doctorat). Université Paris VI-Pierre et Marie Curie, Paris, France.

Dakoure, Denis. 2003. « Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso-Mali): essai de modélisation ». PhD Thesis, Paris 6.

Dumas, Henry. 1952. « La méthode chimique pour la mesure du débit des cours d'eau ». La Houille Blanche (5):690-701.

El Gasmi, EL H., B. El Manssouri, A. Meridekh, Mohamed Tammal, et Y. Alwathaf. 2013. « Caractérisation des émergences du piémont de jbel Ayachi: contrôle structural et impact du changement climatique ». Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie 9(1):43-53.

Faillat, JP, et Cl Drogue. 1993. « Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique ». Hydrological sciences journal 38(3):215-29.

Fakir, Y., M. El Mernissi, T. Kreuser, et B. Berjami. 2002. « Natural tracer approach to characterize groundwater in the coastal Sahel of Oualidia (Morocco) ». Environmental Geology 43(1-2):197-202.

Favara, R., F. Grassa, S. Inguaggiato, et others. 1998. « Geochemical and hydrogeological characterization of thermal springs in Western Sicily, Italy ». Journal of volcanology and geothermal research 84(1-2):125-41.

Fiorillo, Francesco, et Angelo Doglioni. 2010. « The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, southern Italy) ». Hydrogeology Journal 18(8):1881-95.

Fontès, Jaques, et S. Guinko. 1995. Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso.

Frenken, K. 2005. Rapport sur l'eau : l'irrigation en Afrique en chiffres, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. FAO Division de la mise en valeur des terres et des eaux, Rome.

Fripiat J. 1971. Chimie-physique des phénomènes de surface: Applications aux oxydes et aux silicates. Masson, Paris, 259 p. Pararnis 1986.

Gilli, E.,. 2008. Hydrogéologie. Objets, méthodes, applications (2è édition).

Glennon, J. Alan, et Rhonda M. Pfaff. 2005. « The operation and geography of carbondioxide-driven, cold-water geysers ». GOSA Trans 9:184-92.

Han, DM, X. Liang, MG Jin, MJ Currell, XF Song, et CM Liu. 2010. « Evaluation of groundwater hydrochemical characteristics and mixing behavior in the Daying and Qicun geothermal systems, Xinzhou Basin ». Journal of Volcanology and Geothermal Research 189(1-2):92-104.

Hynes, Hugh Bernard Noel, et HBN Hynes. 1970. The ecology of running waters. Vol. 555. Liverpool University Press Liverpool.

Javhar, Aminov, Xi Chen, Anming Bao, Aminov Jamshed, Mamadjanov Yunus, Aminov Jovid, et Tuerhanjiang Latipa. 2019. « Comparison of multi-resolution optical Landsat-8, Sentinel-2 and radar Sentinel-1 data for automatic lineament extraction: A case study of Alichur area, SE Pamir ». Remote Sensing 11(7):778.

KABRE P. W. 2012. Caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé Cas De la province du Kourwéogo.

Khaldaoui, F., M. Djeddi, Y. Djediat, et A. Ydri. 2013. « Identification des fractures et de l'anisotropie directionnelle par méthodes électromagnétiques basses fréquences en milieu pseudo-karstique ».

Kutangila, Malundama Succès. 2019. Caractérisation hydrogéologique des aquifères du bassin sédimentaire de Taoudéni (bordure sud-est, Burkina Faso). Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Lajaunie, Marie-Laure. 2017. Annexe 1: Diagnostic sur les Eaux Souterraines. The World Bank.

Lankoande, Oumarou Lankoande Oumarou, et Souleymane PARE Souleymane PARE. 2005. « Monographie de la province de la leraba ».

Ligban, Raymond, Lanciné Droh Gone, Bamory Kamagate, Mahaman Bachir Saley, et Jean Biemi. 2009. « Processus hydrogéochimiques et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa (Centre ouest de la Côte d'Ivoire) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 3(1).

Marcelin, J. 1971. « Notice explicative de la carte géologique au 1/200000 Gaoua-Batié ». Édition, BRGM, Orléans.

Meinzer, Oscar E. 1924. « Origin of the thermal springs of Nevada, Utah, and southern Idaho ». *The Journal of Geology* 32(4):295-303.

Mogbante, Dam Nanfan. 1991. « Mise en fonctionnement d'un matériel de géophysique VLF. Etude comparative de ses performances ».

Najib, Saliha, Ahmed Fadili, Khalid Mehdi, Joëlle Riss, et Abdelhadi Makan. 2017. « Contribution of hydrochemical and geoelectrical approaches to investigate salinization process and seawater intrusion in the coastal aquifers of Chaouia, Morocco ». *Journal of contaminant hydrology* 198:24-36.

Ouédraogo C. et al., 2018. Notice explicative de la carte géologique 1/200000 Feuille NC-30-XIII NIELLE.

Parkhurst, David L., CAJ Appelo, et others. 1999. « User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations ». *Water-resources investigations report* 99(4259):312.

Peng, Longchao, et Longyi Cheng. 2014. « Identification of Water Filling Source by Hydrochemical Characteristics at Liuqiao No. 1 Coal Mine ».

Ponder, WF, Robert Hershler, et BJ Jenkins. 1989. « An endemic radiation of hydrobiid snails from artesian springs in northern South Australia: their taxonomy, physiology, distribution and anatomy ». *Malacologia*.

Pouchan, P. 1995. « Mineral water springs. » *Houille blanche*. Grenoble (2):46-50.

Razack, M., et J. Dazy. 1990. « Hydrochemical characterization of groundwater mixing in sedimentary and metamorphic reservoirs with combined use of Piper's principle and factor analysis ». *Journal of Hydrology* 114(3-4):371-93.

Sato M., and Mooney H.M., 1960. The electrochemical mechanism of sulfide selfpotentials. *Geophysics* 25, 226-249.

Sauret, E. S. G. 2008. Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou (Mémoire de DEA). Université de Liège (ULG), Liège, Belgique.

Singh, AK, et SR Kumar. 2015. « Quality assessment of groundwater for drinking and irrigation use in semi-urban area of Tripura, India ».

Springer, Abraham E., et Lawrence E. Stevens. 2009. « Spheres of discharge of springs ». *Hydrogeology Journal* 17(1):83.

Stevens, LE, et VJ Meretsky. 2008. « Springs ecosystem ecology and conservation ». *Aridland Springs of North America: Ecology and Conservation* 3-10.

Waltham, AC, et PG Fookes. 2003. « Engineering classification of karst ground conditions ». *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 36(2):101-18.

Welsh, Stanley L. 1989. « On the distribution of Utah's hanging gardens ». *The Great Basin Naturalist* 1-30.

Wojnarowski, Robert J., Constantine A. Neugebauer, Wolfgang Daum, Bernard Gorowitz, Eric J. Wildi, Michael Gdula, Stanton E. Weaver Jr, et Anthony A. Immorlica Jr. 1994. Wafer level integration and testing. Google Patents.

Yonli, Fabien. 2016. « Caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'un aquifères de socle fracture : Couplage essais de pompage-Resonance Magnétique des Protons (RMP) ».

Zhou W. 1999. Investigation of ground water flow in karst areas using component separation natural potential measurements. *Environmental Geology* 37, 19-25.

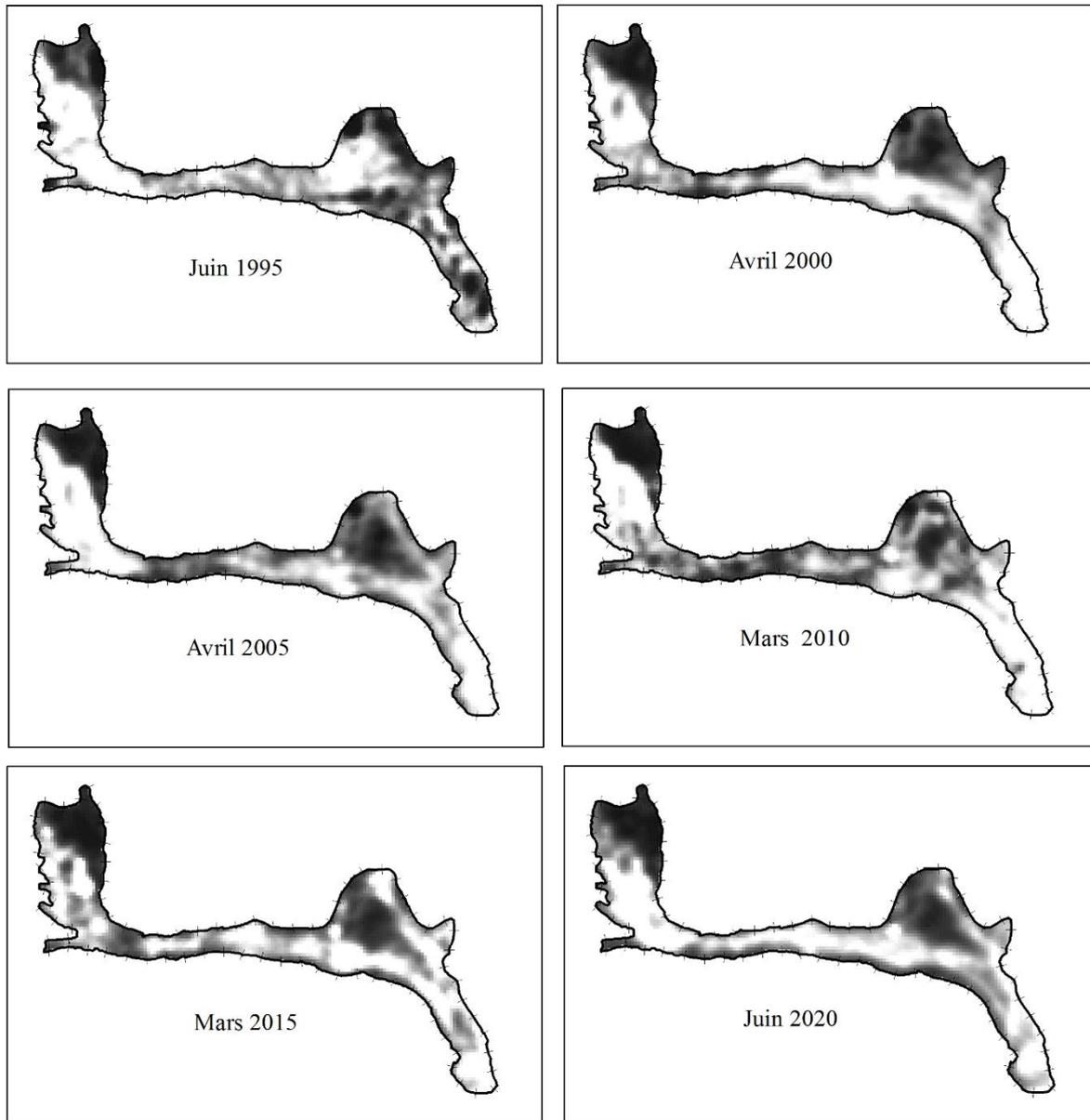
## ANNEXE

### ANNEXE I : Coordonnées des sources d'eaux identifiées

CODE	Longitude N	Latitude E	Altitude
S1	1178463	265208	324
S2	1178877	265288	324
S3	1179016	265252	323
S4	1179520	264844	329
S5	1179253	264896	327
S6	1179080	264935	327
S7	1179105	265152	325
S8	1179151	265185	325
S9	1179080	265260	323
S10	1179710	264846	336
S11	1178984	267991	304
S12	1176926	269112	297

Les coordonnées sont projetées en WGS 1984 UTM ZONE 30N.

**ANNEXE II : Evolution des superficies cultivées 1995 - 2020**



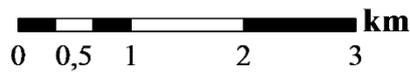
**Légende**

—+—+ Perimetre de Sindou

**NDVI**

**Valeur**

- Haut : 1  
- Bas : 0



**ANNEXE III : Paramètres physique des eaux prélevées**

Eaux	pH	T (en °C)	CE (en $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	TDS (ppm)	
Sources	S1	7,15	24,5	77,70	46,9
	S2	6,46	26,7	68,1	41,1
	S3	6,52	26,2	83,4	50,4
	S4	6,4	25	34,3	20,7
	S5	6,7	25,9	34	20,5
	S6	6,31	24,7	52	31,4
	S7	7,01	25,9	636	384,1
	S8	7,05	26,8	121,6	73,4
	S9	6,65	25,6	72,6	43,9
	S10	5,8	26,3	15,9	9,6
	Min	5,8	24,5	15,86	9,58
	Moy	7,15	25,76	119,56	72,21
	Mox	6,61	26,8	636,00	384,14
	$\sigma$	0,405	0,80	183,95	111,11
Puits	Puit 1	7,26	25,7	187	112,9
	Puit 2	6,81	25,9	213	128,7
	Min	6,81	25,70	187	112,95
	Moy	7,04	25,80	200	120,8
	Mox	7,26	25,90	213	128,65
	$\sigma$	0,32	0,14	18,38	11,1
Pluie	Pluie_sindou	7,21	24,8	4,93	3,0
	VG (OMS)	6.5 - 9.5	< 25	< 1400	< 242

**ANNEXE IV : Analyses chimiques des Cations (mg/L)**

Eaux	Na <sup>+</sup> (mg/l)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	
Sources	S1	2,00	5,01	9,12	4,90
	S2	1,50	8,02	25,54	4,50
	S3	1,70	5,01	30,40	5,00
	S4	0,90	6,01	20,67	3,50
	S5	1,40	4,01	9,73	1,10
	S6	1,00	6,01	11,55	5,50
	S7	32,00	27,05	35,26	8,50
	S8	2,40	5,01	21,28	4,90
	S9	1,70	4,01	15,81	4,20
	S10	0,70	4,01	18,85	0,20
	Min	0,70	4,01	9,12	0,20
	Moy	4,53	7,41	19,82	4,23
	Max	32,00	27,05	35,26	8,50
	Ecart	9,67	7,01	8,741	2,31
Puits	Puit 1	5,70	11,02	5,47	0,50
	Puit 2	3,90	14,03	21,89	2,10
	Min	3,90	11,02	5,47	0,50
	Moy	4,80	12,53	13,68	1,30
	Max	5,70	14,03	21,89	2,10
	Ecart	1,27	2,13	11,61	1,13
Pluie	Pluie Sindou	0,10	4,01	6,69	0,10
VG (OMS)	<200	<100	<50	<12	

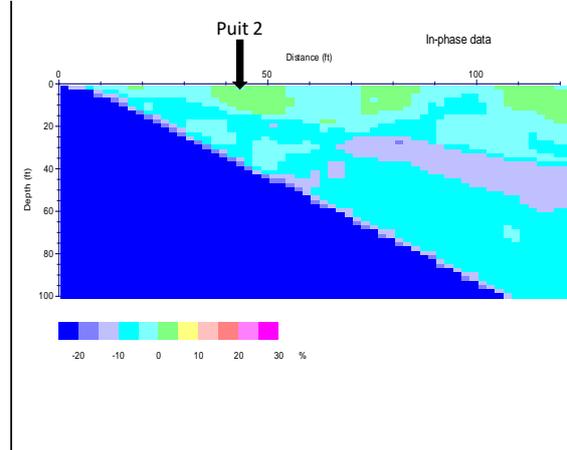
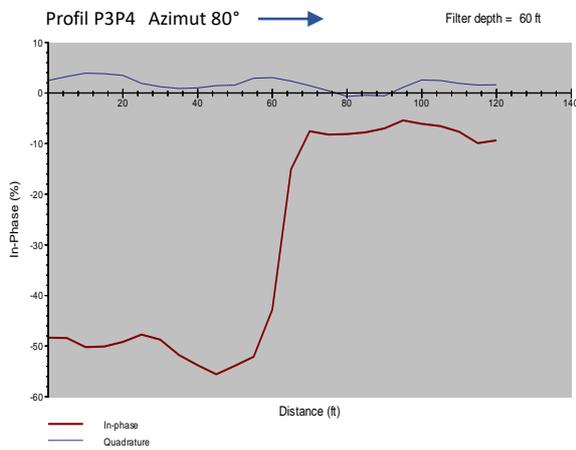
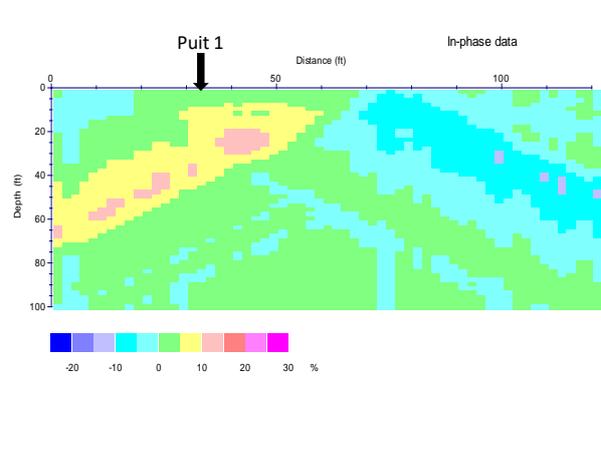
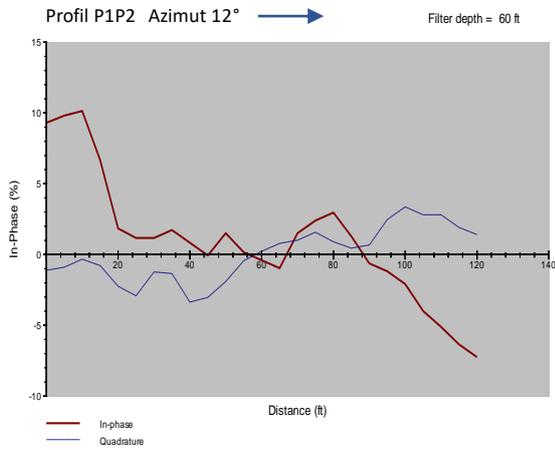
**ANNEXE V : Analyses chimiques des Anions (mg/L)**

Eaux	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
S1	1,12	0,02	15,17	2,50	3,65	143,96	0,00
S2	0,90	0,00	17,16	3,99	5,21	108,58	0,00
S3	0,67	0,00	13,05	2,99	5,74	100,04	0,00
S4	0,22	0,12	33,34	2,50	5,21	89,06	0,00
S5	0,45	0,01	13,82	2,99	2,61	71,98	0,00
S6	0,90	0,03	33,58	8,98	4,69	79,30	0,00
S7	0,90	0,05	45,49	2,99	3,65	492,88	0,00
S8	1,12	0,20	19,59	5,49	13,03	107,36	0,00
S9	0,67	0,00	11,48	3,49	2,61	82,96	0,00
S10	0,22	0,01	8,74	2,50	3,13	123,22	0,00
Min	0,22	0,00	8,74	2,50	2,61	71,98	0,00
Moy	0,72	0,04	21,14	3,84	4,95	139,93	0,00
Max	1,12	0,20	45,49	8,98	13,03	492,88	0,00
Ecart	0,33	0,07	12,09	2,02	3,05	125,89	0,00
Puit 1	0,67	0,15	7,18	4,49	4,69	187,88	0,00
Puit 2	0,45	0,04	27,99	3,49	4,17	305,00	0,00
Min	0,45	0,04	7,18	3,49	4,17	187,88	0,00
Moy	0,56	0,10	17,58	3,99	4,43	246,44	0,00
Max	0,67	0,15	27,99	4,49	4,69	305,00	0,00
Ecart	0,16	0,08	14,71	0,71	0,37	82,82	0,00
Pluie_sindou	1,34	0,01	6,73	2,99	19,81	90,28	0,00
VG (OMS)	50		250	200		200	

**ANNEXE VI : Analyses chimiques des métaux lourds (mg/L)**

Eaux	Fe <sup>2+</sup>	Cu	Mn	Pb	Zn	Ni	Cr	Cd	Al
S1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
S2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
S3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
S4	0,12	0,01	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
S5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
S6	4,08	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
S7	0,00	0,01	0,02	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
S8	0,02	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
S9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
S10	0,08	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Moy	0,43	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
Max	4,08	0,01	0,02	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
Ecart	1,28	0,00	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Puit 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Puit 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Moy	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Max	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Ecart	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Eau de pluie									
Pluie Sindou	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VG (OMS)	0.3	0.3	0.5	0.01				0.05	

## ANNEXE VII : Profils électromagnétiques pour l'emplacement des ouvrages de captage



## ANNEXE VIII : Méthode de Boulton et Streltsova (1975)

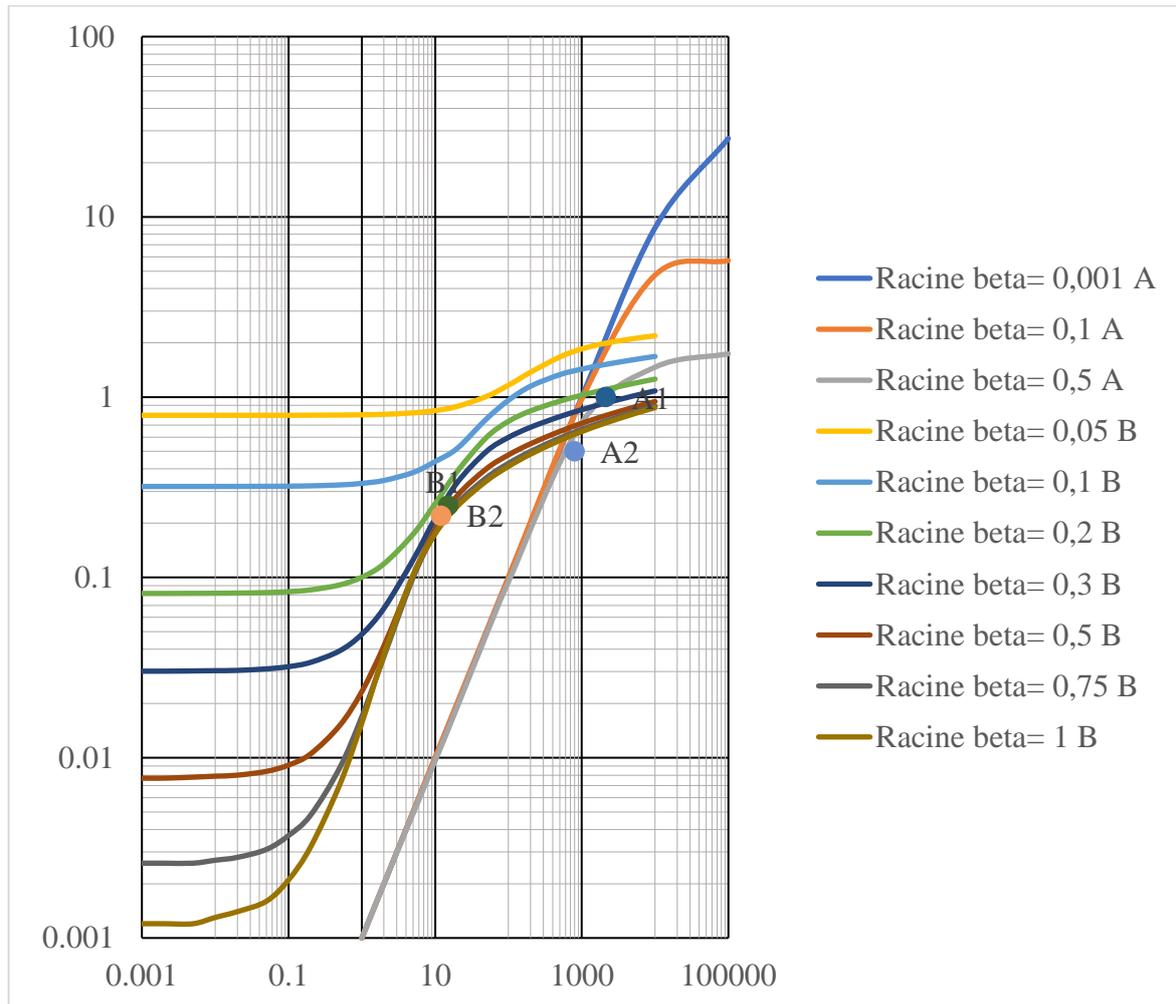
La méthode d'interprétation de Boulton et Streltsova extraite de Kruseman, 1994 est utilisée suivant les conditions suivantes :

- L'aquifère pompé est libre ;
- L'aquifère pompé est homogène, anisotrope avec une épaisseur constante sur tout l'espace influencé par l'essai de pompage ;
- L'ouvrage de captage (puit) ne traverse pas l'entièreté de l'aquifère ;
- Le puit est d'un grand diamètre, ce qui impose la considération de l'effet de stockage ;
- L'écoulement vers le puit est dans un état variable.

### Procédure de détermination

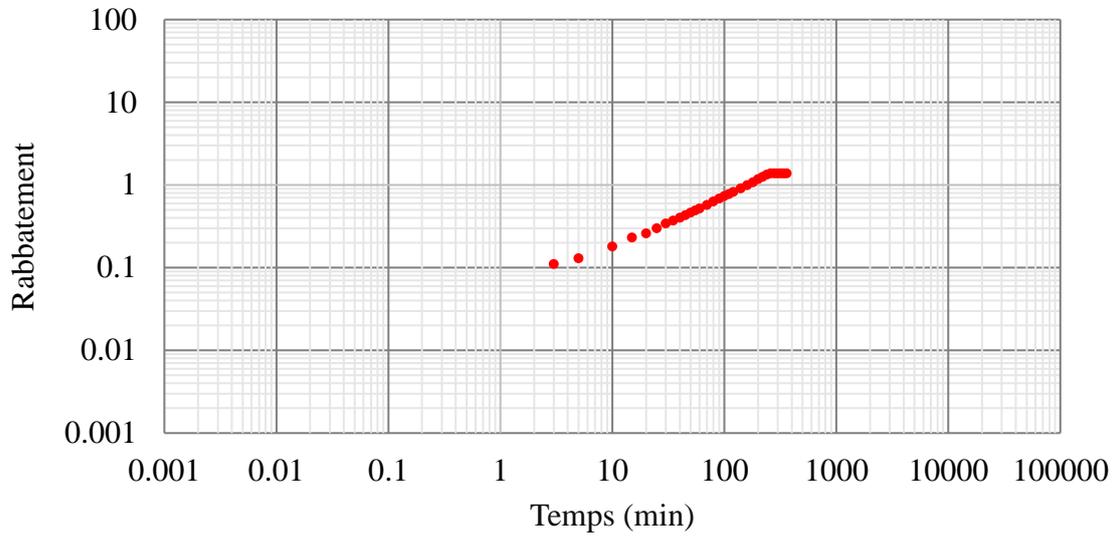
- Dessiner les courbes de type A ( $W\left(\mu_A, S_A, \beta, \frac{r}{r_{ew}}, \frac{b_1}{D}, \frac{d}{D}, \frac{b_2}{D}\right)$ ) versus  $1/\mu_A$  et courbe de type B ( $W\left(\mu_B, \beta, \frac{b_1}{D}, \frac{b_2}{D}\right)$ ) versus  $1/\mu_B$ . (Annexe IX) ;
- Dessiner les essais de pompages de longue durée, le rabattement en fonction du temps  $s=f(t)$  pour un seul piézomètre situé à un rayon  $r$  du puit sur du papier bi logarithmique de même module que les Courbe de type A et B ;
- Superposer la première partie de la courbe bi-logarithmiques du rabattement ( $s$ ) en fonction du temps ( $t$ ) sur la courbe de type A en cherchant la meilleure coïncidence possible. En un point arbitraire A dans la zone de chevauchement des deux feuilles de papier graphique, les valeurs  $s$ ,  $t$ ,  $1/\mu_A$ , et  $W\left(\mu_A, S_A, \beta, \frac{r}{r_{ew}}, \frac{b_1}{D}, \frac{d}{D}, \frac{b_2}{D}\right)$  ont été prise, ainsi que la valeur de  $\sqrt{\beta}$ . L'insertion de ces valeurs dans les équations (Eq.20) et (Eq.21) permet à l'aide de la valeur connue de  $Q$  de déterminer  $k_h D$  ;
- Par ailleurs superposer la dernière partie de la courbe d'essai à la courbe de type B ayant la même valeur de  $\sqrt{\beta}$  que la courbe type A ;
- Un « fit point » B est choisi permettant de déterminer  $s$ ,  $t$ ,  $1/\mu_B$ ,  $W\left(\mu_B, \beta, \frac{b_1}{D}, \frac{b_2}{D}\right)$  et de calculer les paramètres  $k_h D$ ,  $S_y$  à partir des équations (Eq.23) et (Eq.24) connaissant  $Q$ ,  $r$  et  $\frac{b_1}{D}$  ;
- Connaissant l'épaisseur de la nappe saturée de l'aquifère  $D$ , procéder au calcul de  $k_{h+}$  ;
- Substituer les valeurs numériques de  $k_{h+}$ ,  $\sqrt{\beta}$ ,  $D$  and  $r$  dans l'équation (Eq.22) et calculer  $k_v$  ;

**ANNEXE IX : Famille de courbes de types de Boulton et Streltsova**

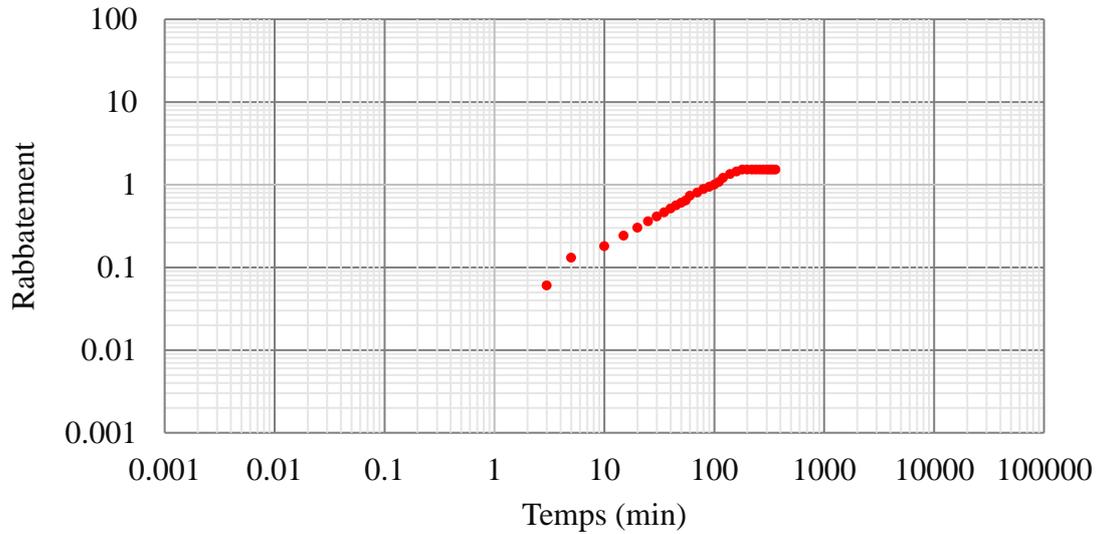


**ANNEXE X : Courbe d'essai de nappe longue durée**

Essais de nappe : Puit1



Essais de nappe : Puit 2



## ANNEXE XI : Paramètres climatiques (CropWat)

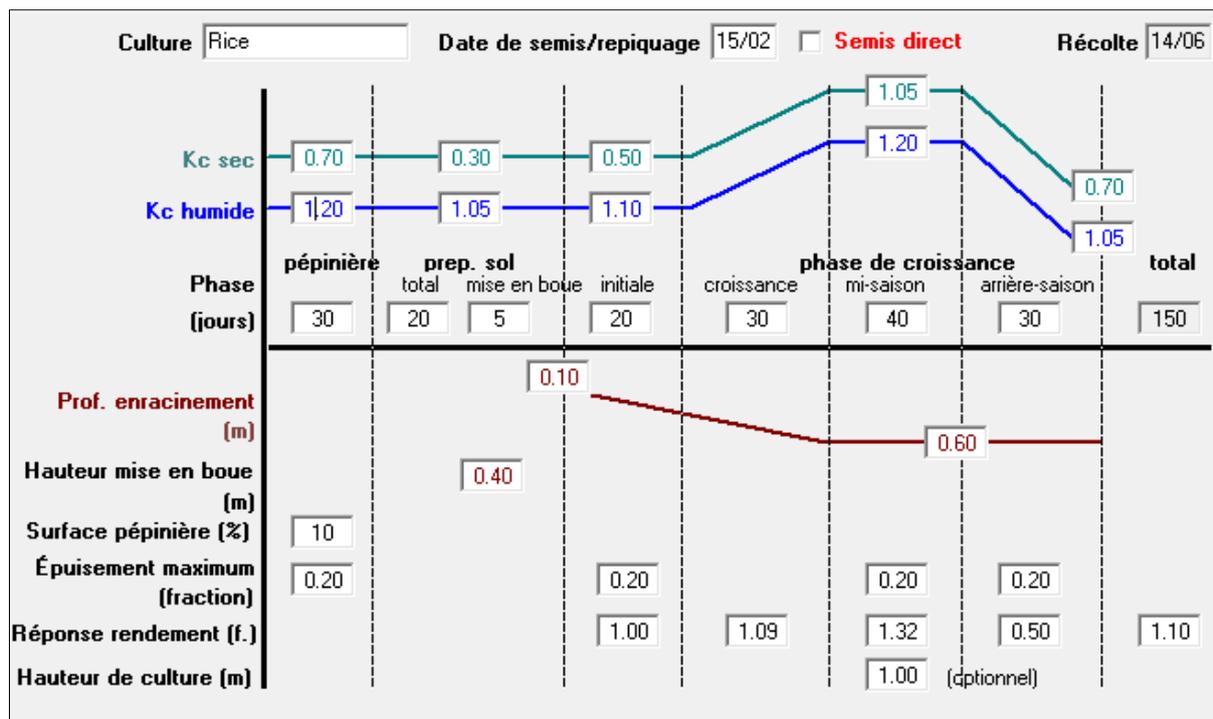
<b>Pays</b>	Location 3	<b>Station</b>	BOBO-DIOULASSO		
<b>Altitude</b>	460 m.	<b>Latitude</b>	11.16 °N	<b>Longitude</b>	4.31 °O

Month	Temp Min	Temp Max	Humidity	Wind	Sun	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/jour	heures	MJ/m <sup>2</sup> /jour	mm/jour
<b>January</b>	18.4	32.4	18	277	8.1	19.1	7.26
<b>February</b>	21.2	34.5	20	277	7.9	20.1	7.81
<b>March</b>	23.6	36.0	26	277	7.6	20.8	8.11
<b>April</b>	24.3	35.5	47	311	6.3	19.2	7.25
<b>May</b>	23.5	34.0	60	328	7.0	20.0	6.44
<b>June</b>	21.8	31.4	71	311	6.8	19.4	5.25
<b>July</b>	21.1	29.7	78	277	5.9	18.1	4.38
<b>August</b>	20.8	29.0	83	242	4.5	16.2	3.69
<b>September</b>	20.7	29.5	80	207	5.7	17.9	3.98
<b>October</b>	21.4	33.0	67	216	7.3	19.5	5.03
<b>November</b>	20.3	33.9	44	199	7.9	18.9	5.69
<b>December</b>	18.5	32.5	25	233	7.8	18.2	6.36
<b>Average</b>	<b>21.3</b>	<b>32.6</b>	<b>52</b>	<b>263</b>	<b>6.9</b>	<b>18.9</b>	<b>5.94</b>

	<b>Rain</b>	<b>Eff rain</b>
	mm	mm
<b>January</b>	1.0	1.0
<b>February</b>	4.0	4.0
<b>March</b>	17.0	16.5
<b>April</b>	40.0	37.4
<b>May</b>	94.0	79.9
<b>June</b>	125.0	100.0
<b>July</b>	205.0	137.8
<b>August</b>	289.0	153.9
<b>September</b>	187.0	131.0
<b>October</b>	57.0	51.8
<b>November</b>	6.0	5.9
<b>December</b>	1.0	1.0
<b>Total</b>	<b>1026.0</b>	<b>720.3</b>

## ANNEXE XII: Paramètres culturales (CropWat)



### ANNEXE XIII : Paramètres du sol (CropWat)

<b>Nom du sol</b>		<input type="text" value="Medium (loam)"/>
Données générales sur le sol		
<b>Eau disponible totale (CC - PF)</b>	<input type="text" value="290.0"/>	<b>mm/mètre</b>
<b>Taux d'infiltration maximum de l'eau de pluie</b>	<input type="text" value="40"/>	<b>mm/jour</b>
<b>Profondeur maximum d'enracinement</b>	<input type="text" value="900"/>	<b>centimètres</b>
<b>Épuisement de la teneur en eau initiale (en % TAM)</b>	<input type="text" value="0"/>	<b>%</b>
<b>Eau disponible initiale</b>	<input type="text" value="290.0"/>	<b>mm/mètre</b>
Données complémentaires sur le sol pour les calculs du riz		
<b>Ressuyage (SAT - CC)</b>	<input type="text" value="12"/>	<b>%</b>
<b>Épuisement maximum pour détérioration de la semelle</b>	<input type="text" value="0.40"/>	<b>fraction</b>
<b>Taux de Percolation Maximum après mise en boue</b>	<input type="text" value="3.4"/>	<b>mm/jour</b>
<b>Disponibilité en eau à la plantation</b>	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="mm HE"/>
<b>Hauteur d'eau maximum</b>	<input type="text" value="150"/>	<b>mm</b>

**ANNEXE XIX : Besoins en eau par stade (CropWat)**

Mois	Décade	Stage	Kc	ETc	ETc	Pluie eff.	Bes. Irr.
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Jan	2	Pépi	1.20	0.87	4.4	0.1	4.2
Jan	3	Pépi/Pré	1.13	4.73	52.0	0.6	101.5
Fév	1	Pépi/Pré	1.06	8.12	81.2	0.7	226.5
Fév	2	Init	1.09	8.48	84.8	0.9	145.2
Fév	3	Init	1.10	8.70	69.6	2.5	67.1
Mar	1	Crois	1.10	8.92	89.2	3.9	85.3
Mar	2	Crois	1.14	9.35	93.5	5.2	88.4
Mar	3	Crois	1.18	9.33	102.6	7.6	95.0
Avr	1	Mi-sais	1.22	9.19	91.9	9.5	82.4
Avr	2	Mi-sais	1.22	8.87	88.7	11.5	77.3
Avr	3	Mi-sais	1.22	8.55	85.5	16.5	68.9
Mai	1	Mi-sais	1.22	8.22	82.2	22.6	59.6
Mai	2	Arr-sais	1.22	7.84	78.4	27.6	50.8
Mai	3	Arr-sais	1.17	7.06	77.7	29.5	48.1
Jui	1	Arr-sais	1.11	6.29	62.9	30.6	32.3
Jui	2	Arr-sais	1.08	5.66	22.6	13.0	6.4
					<b>1167.2</b>	<b>182.3</b>	<b>1239.0</b>



