



CARACTERISATION DE L'HYDRODYNAMISME DE LA PLAINE ALLUVIALE DE KARFIGUELA.

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES
OPTION : EAUX SOUTERRAINES

Présenté et soutenu publiquement le 25 juin 2014 par
Noël BETAN

Travaux dirigés par : Dr. Mahamadou KOÏTA

Enseignant-chercheur à la Fondation 2iE
Centre Commun de Recherche Eau et Climat (CCREC)

Ing. Yembi Nestor Fiacre COMPAORE

Assistant Technique du Projet PADI-BF101

Jury d'évaluation du stage :

Président : Mahamadou KOÏTA

Membres et correcteurs : Yembi Nestor Fiacre COMPAORE
Marie Justine TIROGO
Dimitri SORO

Promotion [2012/2013]

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à l'Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger (APEFE) et à Wallonie-Bruxelles International (WBI) qui ont fourni les financements nécessaires pour la réalisation de cette étude.

A Mr Yembi Nestor Fiacre COMPAORE, Ingénieur en Génie rural et assistant technique du projet PADI-BF 101 qui m'a accueilli comme stagiaire puis m'a guidé comme maître de stage.

Au Dr. Mahamadou KOÏTA, notre tuteur pédagogique qui nous a guidé tout au long du stage.

Mes vifs remerciements vont aussi :

A tout le personnel du Projet PADI-BF 101 qui m'ont accompagné tout au long de la collecte des données (Ahmed KAM, Aboubacar Sidiki DJIRE, Alfred BADO).

Aux co-stagiaires (ZERBO Inoussa, LAOUALI AMANI Haladou et MANDENG NYOBE Armel Baudouin) avec qui j'ai passé de bons moments durant ce stage.

A la famille KODJIM pour son soutien et son accompagnement, à madame ZERBO Née BELEMSIGRI Delphine pour son accueil chaleureux et ses encouragements et à mes deux familles, qui malgré la distance, n'ont pas cessé de me soutenir.

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail, Je leur dis merci

RESUME

La présente étude vise la détermination des propriétés hydrodynamiques et des directions et sens d'écoulements de l'aquifère de la plaine alluviale de Karfiguéla.

La méthode d'essai de choc hydraulique dite « slug test » a été choisie pour la détermination de la conductivité hydraulique, soutenue par les deux méthodes d'analyse : celle de Hvorslev et celle de Bouwer et Rice. Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues ont été comparées et par la suite, celles obtenues par la méthode de Bouwer et Rice ont été considérées pour les interprétations. On peut donc remarquer que les valeurs de conductivité moyennes des sites sont comprises entre $6, 25 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ et $3,81 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. La valeur maximale obtenue est de $4,31 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ et la valeur minimale est de $9, 74 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$. L'analyse de la nature des échantillons de matériaux extraits des micropiézomètres montrent une concordance avec les valeurs obtenues.

Pour déterminer les directions et les sens d'écoulement de la plaine, les relevés du niveau statique ont été effectués le 06 mars 2013 et le 16 Avril 2013. Les niveaux statiques ont permis grâce aux altitudes déterminées avec les levés au GPS Différentiel (DGPS) de calculer les niveaux piézométriques. La surface piézométrique qui en découle montre un écoulement général qui se fait du Nord au Centre et du Sud au Centre. En dressant les cartes piézométriques, on s'aperçoit que la nappe alimente la rivière dans tous les sites. Il apparait des limites à flux nul et des limites à potentiel le long de la plaine.

Mots clés :

-
- 1-plaine alluviale
 - 2- conductivité Hydraulique
 - 3-Directions d'écoulements
 - 4-Niveaux piézométriques
 - 5-Karfiguéla

ABSTRACT

The aim of this study is the determination of the hydrodynamic properties and flow directions of the aquifer of the alluvial plain of Karfiguéla.

The slug test was chosen to determine the hydraulic conductivity. We have used two methods of analysis: the Hvorslev method and the Bouwer and Rice one. The values of hydraulic conductivity obtained were compared and those obtained by the Bouwer and Rice method was considered for interpretations. Thus we can notice that conductivity average values are between $6, 25.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ and $3, 81.10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. The maximal value obtained is $4, 31.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ and the minimal value is $9,74.10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$. The analysis of the nature of the material samples extracted from micropiezometers shows an agreement with the values obtained.

To determine the flow directions of the plain, the surveys of the static level were done on March 06 2013 and on April 16 2013. The static levels allowed with the altitudes determined with the DGPS surveys to calculate the piezometrical levels. The piezometrical surface results from this shows general flow direction which is done from North to the center and also from South to the Center. By drawing up the piezometrical map, one realizes that the groundwater feeds the river in all the sites while impermeable boundaries and potential constant head boundaries appear along the plain..

Key words:

-
- 1-alluvial plain
 - 2-Hydraulic conductivity
 - 3- flow directions
 - 4-piezometrical levels
 - 5-Karfiguéla

LISTE DES ABREVIATIONS

FAO: Food and agriculture Organization

GIRE: Gestion Intégrée des Ressources en Eau

SNSA : Stratégie Nationale de Sécurité Alimentaire

CSLP : Cadre Stratégique de Lutte contre la Pauvreté

PADI- BF 101: Projet d'Appui à la Gestion Durable des Eaux Souterraines pour l'Agriculture Irriguée

DGPS: Differential Global Positioning System

Ma: Million d'Années

SDR: Stratégie de Développement Rural

TN: Terrain Naturel

IGB : Institut Géographique du Burkina Faso

DRAHRH/CAS : Direction Régionale de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Cascades

DRAH/CAS : Direction Régionale de l'Agriculture et de l'Hydraulique des Cascades

VREO : Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest

UTM : Universal Transverse Mercator

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	II
RESUME	III
ABSTRACT.....	IV
LISTE DES ABREVIATIONS.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES FIGURES.....	4
INTRODUCTION	5
I : GENERALITES	8
I.1 Présentation du site d'étude.....	8
I.1.1 Situation géographique	8
I.1.2 Climat.....	9
I.1.3 Hydrographie	10
I.1.4 Géologie.....	11
I.2 Contexte socioéconomique.....	12
I.3 Contexte hydrogéologique	13
I.4 Puissance de la plaine.....	13
II : MATERIELS ET METHODES	15
II.1 Matériel	15
II.2 Méthodologie d'acquisition des données	17
II.2.1 Détermination des paramètres hydrodynamiques	17
II.2.2 Directions et sens d'écoulement	24
II.2.3 Puissance de la plaine	28
II.2.4 Levés topographiques	29
III RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	31
III.1 Paramètres hydrodynamiques.....	31

III.2	Directions et sens des écoulements.....	34
III.2.1	Niveaux piézométriques.....	34
III.2.2	Cartes piézométriques	36
IV	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	44
	BIBLIOGRAPHIE.....	46
V	ANNEXES.....	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Coordonnées des bornes géodésiques servant de référence. Source : IGB Burkina.....	30
Tableau 2 Conductivités moyennes par site.....	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique de la plaine alluviale de Karfiguéla.....	8
Figure 2 : Variation des pluies annuelles pour la zone de Banfora. Source: DRAHRH/CAS.....	9
Figure 3 : Pluies mensuelles de 2012 source: DRAHRH/CAS	10
Figure 4: Réseau hydrographique de la plaine alluviale de Karfiguéla	11
Figure 5 : Formations géologique de la plaine alluviale de Karfiguéla. sources:VREO, 2006.....	12
Figure 6 : Carte des épaisseurs de la plaine	14
Figure 7 : Aperçu du DGPS	16
Figure 8 : Répartition des micropiédomètres sur la plaine.....	17
Figure 9 : Méthodes de détermination de la conductivité hydraulique (Oosterbaan, R. J. et Nijland, H. J. (1986)).	18
Figure 10: Bailer pour le prélèvement rapide de l'eau.....	19
Figure 11 : Paramètres géométriques pour la méthode de Hvorslev	21
Figure 12 : Paramètres géométriques pour la méthode Bouwer et Rice.....	23
Figure 13 : Courbes reliant les coefficients A, B, C à L/rw. Source : Bouwer et Rice, 1976.....	24
Figure 14 : sonde piézométrique.....	26
Figure 15 : Sondes mini diver et baro diver.....	27
Figure 16 : Paramètres géométriques de calcul du niveau piézométrique avec la sonde Diver	27
Figure 17 : Principe de fonctionnement du DGPS.....	29
Figure 18 : Champs de conductivité et de perméabilité (Freeze et Cherry, 1979)	32
Figure 19 : Valeurs indicatives de la conductivité à saturation selon Mermoud, 2006	32
Figure 20 : Coupes stratigraphiques des piézomètres PZRD3, PZRD13, PZRDX2 et PZRDX3	33
Figure 21 : Carte représentant la piézométrie de la plaine à la date du 06 mars 2013.....	35
Figure 22 : Carte représentant la piézométrie de la plaine à la date du 16 Avril 2013.....	35
Figure 23: Carte piézométrique du 06 mars 2013 site de Siniena	37
Figure 24: Carte piézométrique du 16 Avril 2013 site de Siniena.....	38
Figure 25 : Carte piézométrique du 06 mars 2013 site de Tengrela	39
Figure 26 : Carte piézométrique du 16 Avril 2013 site de Tengrela.....	40
Figure 27 : Carte piézométrique du 16 Avril 2013 site de Karfiguéla.....	41
Figure 28 : Carte piézométrique du 06 mars 2013 site de Karfiguéla	42
Figure 29 : carte piézométrique du 06 mars 2013 site de Diarabakoko.....	43
Figure 30 : carte piézométrique du 16 Avril 2013 site de Diarabakoko	43

INTRODUCTION

L'agriculture irriguée représente une alternative incontournable pour augmenter les productions agricoles. Depuis les années 60, la situation mondiale de l'alimentation s'est régulièrement améliorée, une performance rendue possible par les effets conjugués de divers facteurs dont les variétés de semences à rendement élevé, l'irrigation, la nutrition des végétaux et la lutte contre les ravageurs (FAO, 2004). L'agriculture irriguée intervient là où les autres techniques comme les productions de l'agriculture pluviale et les importations montrent leurs faiblesses. Le changement climatique rend l'agriculture pluviale de plus en plus vulnérable car, dépendante des précipitations.

Selon Zella et Smadhi (2007), La productivité d'un hectare irrigué est trois fois plus élevée que celle d'un hectare en pluvial. L'irrigation représente donc un outil clé pour pallier aux besoins de sécurisation alimentaire sans cesse croissants dans les pays en développement.

Au Burkina Faso, depuis une quarantaine d'années, la pluviosité a régulièrement baissé, avec des périodes de sécheresse accrue, spécialement dans les années 80. De plus, les précipitations sont souvent inégalement réparties, d'une année à l'autre et au cours d'une même saison de pluie (GIRE Burkina, 2001). L'irrigation est par conséquent un outil de gestion efficace contre les risques climatiques qui pèsent sur la production agricole.

La Stratégie Nationale de Sécurité Alimentaire (SNSA), en cohérence avec le Cadre Stratégique de Lutte contre la Pauvreté (CSLP) ont fixé pour objectif de faire jouer à l'irrigation un rôle significatif dans les productions agricoles. Notamment dans l'accroissement et la sécurisation de la production agricole ; l'augmentation de la valeur ajoutée, l'amélioration de l'emploi et des revenus en milieu rural ainsi que la préservation des ressources naturelles et du capital productif. Ceci dans le but de construire à l'horizon 2015 les conditions d'une sécurité alimentaire durable et de contribuer structurellement à réduire les inégalités sociales et la pauvreté,

L'irrigation lance un bon message d'optimisme dans l'amélioration de la productivité agricole, cependant elle reste une grande consommatrice d'eau : selon FAO, au début du XXI^e siècle, l'agriculture utilise en moyenne 70% de tous les prélèvements d'eau effectués mondialement dans les rivières, lacs et nappes des aquifères. Il est prévu que les prélèvements d'eau pour l'irrigation augmenteront de 14% d'ici 2030 (FAO, 2004). Cette consommation excessive d'eau qui entraîne une forte pression sur les ressources en eau est donc prédestinée à augmenter. Si cette situation se maintient, l'on craint une pénurie d'eau dans l'avenir.

La principale préoccupation reste la gestion de la ressource, le pari étant d'identifier les ressources disponibles et exploitables, de prévoir l'effet de l'exploitation sur la ressource pour aboutir à une exploitation durable. L'utilisation des potentialités naturelles dites « renouvelables » est une pratique irréprochable dans cette situation. Les ressources en eau renouvelable sont constituées d'eau de surface (barrages) ou des eaux souterraines contenue dans les nappes superficielles et parfois profondes. La réalimentation dans ces cas se fait de manière périodique et est apportée par les précipitations ou les débits fluviaux.

C'est dans cette optique que le projet PADI-BF 101, dans ses activités s'est donné pour but d'étudier l'aquifère de la plaine alluviale de Karfiguéla. Elle pourrait représenter une potentielle source d'eau souterraine pouvant être utilisée comme ressource en eau alternative pour les producteurs qui y sont installés. La plaine peut représenter une importante capacité d'alimentation des périmètres irrigués mais une gestion durable et dans le respect de l'environnement s'impose. Cela doit se traduire par un prélèvement qui ne doit pas être au-delà de ce que l'aquifère peut offrir ainsi que l'assurance de la protection de la ressource. La prise en compte des besoins des autres secteurs liés à l'utilisation de cette eau ainsi que la survie à long terme des écosystèmes est également primordiale. Il convient dans ce cas de déterminer l'origine et la dynamique des écoulements souterrains.

D'où les études hydrogéologiques qui permettront de prévoir l'impact quantitatif et qualitatif de l'exploitation de l'aquifère. Cette étude concernera plus explicitement la caractérisation hydrodynamique de la plaine alluviale. Ce qui sous-entend la détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, de la piézométrie et des directions d'écoulement de l'eau et son renouvellement périodique.

Pour l'atteinte de ces objectifs, nous allons utiliser les ouvrages mis en place par le projet à savoir un réseau de quarante-neuf (49) micropiézo mètres. Les principales activités visent la détermination des paramètres hydrodynamiques qui se fera par des essais de choc hydraulique in situ dits essais « slug-test ». La détermination des niveaux piézométriques à l'aide des sondes piézométriques et des sondes diver permettront de déterminer la piézométrie de la plaine et d'en déduire les directions d'écoulement.

La rédaction de ce présent document est centrée autour des points suivants :

- Une première partie traitant les généralités pour situer le site d'étude ainsi que ses aspects physiques (climat, géologie...) et socioéconomiques ;
- La méthodologie ainsi que le matériel utilisé pour l'atteinte des objectifs fera l'objet de la deuxième partie (II);

- Les résultats obtenus après les traitements et analyses sur les paramètres hydrodynamiques et les directions d'écoulement seront présentés puis interprétés dans la troisième partie(III).
- Nous allons enfin conclure puis proposer les recommandations et perspectives dans la quatrième partie (IV).

I : GENERALITES

I.1 Présentation du site d'étude

I.1.1 Situation géographique

La plaine alluviale de Karfiguéla est située dans la région des cascades, province de la Comoé, commune de Banfora avec un débordement de la partie Nord dans la commune de Bérégadougou (Figure 1)

La plaine se situe entre les longitudes 298 000 m et 314 000 m et les latitudes 1 156 000 m 1 189 000 m en coordonnées UTM, Elle couvre une superficie de 46 km² et s'étend sur 28 km de long. (Compaoré N.F, 2012).

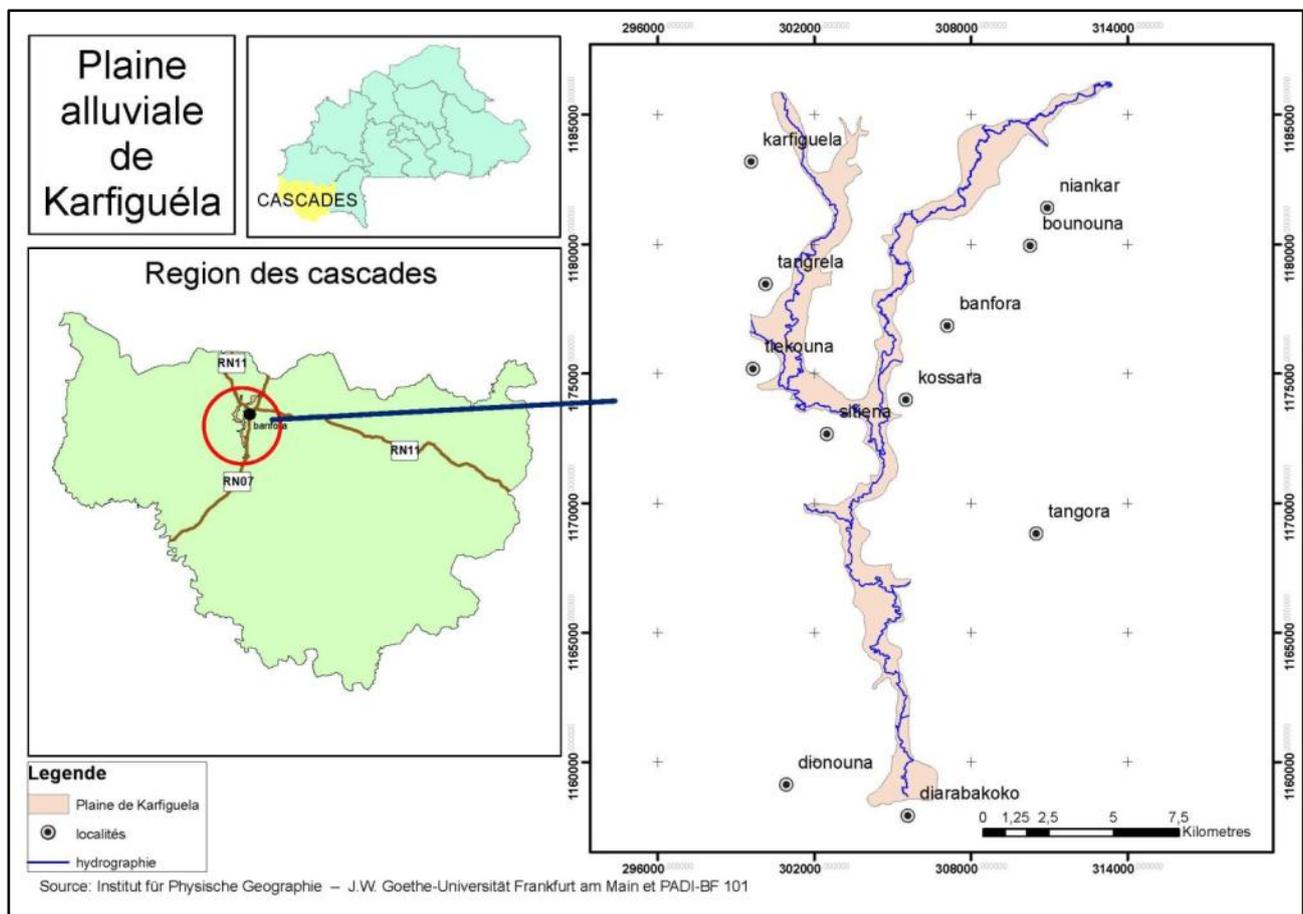


Figure 1 : Situation géographique de la plaine alluviale de Karfiguéla

I.1.2 Climat

La région des Cascades connaît un climat de type sud-soudanien marqué par deux grandes saisons : une saison humide d'avril à octobre et une saison sèche de Novembre à mars (Fontès et Guinko ,1995)

L'étude de la pluviosité des dix (10) dernières années (de 2002 à 2012) de Banfora fournis avec les données en Annexe II nous montre une variation en dents de scie (Figure 2)

L'année 2012 présente une hauteur de pluie de 1145,2 mm qui est supérieure à la moyenne sur les dix années (1068,4 mm)

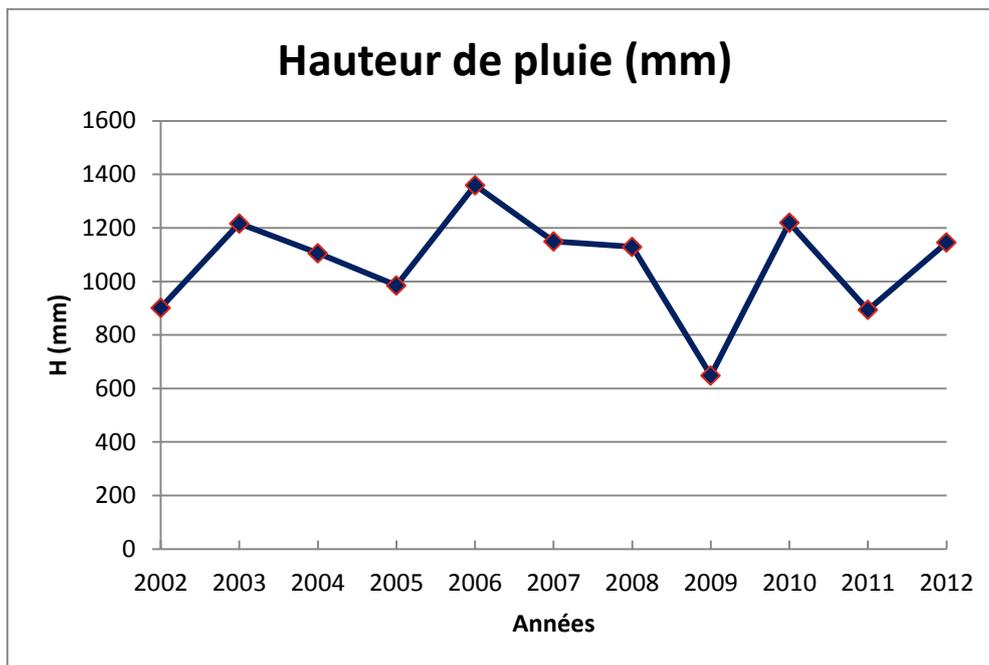


Figure 2 : Variation des pluies annuelles pour la zone de Banfora. Source: DRAHRH/CAS

Pendant l'année 2012, le mois le plus pluvieux était le mois de Juillet avec 256,90 mm d'eau tombée (Figure 3)

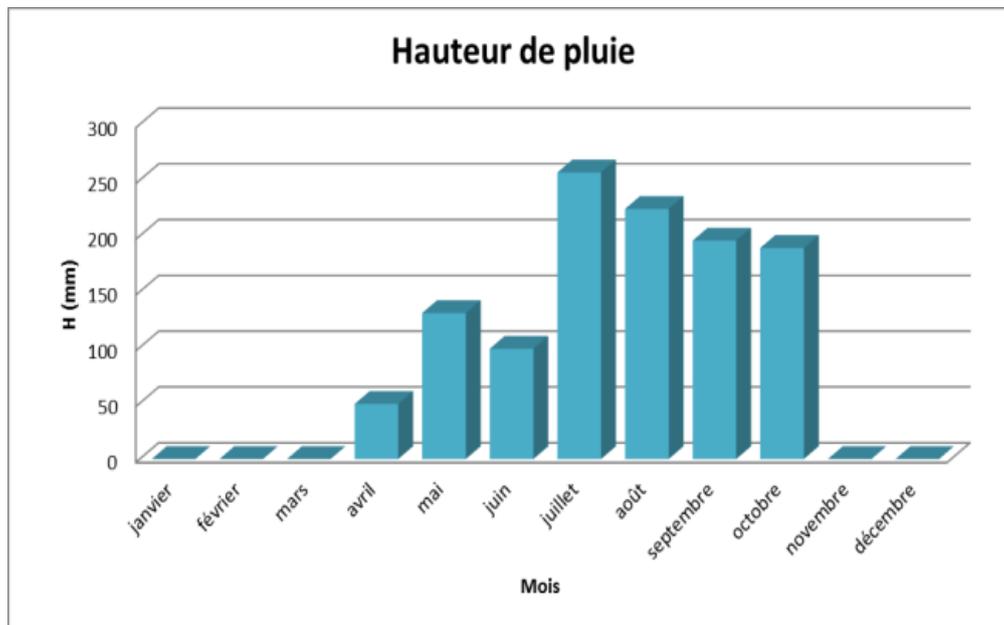


Figure 3 : Pluies mensuelles de 2012 source: DRAHRH/CAS

Les températures moyennes annuelles sont comprises entre 17°C et 36°C, soit une amplitude thermique de 19° C (GIRE, 2001).

La région jouit d'une bonne pluviométrie et compte ainsi, parmi les zones les mieux arrosées du Burkina Faso. Cette importante pluviosité conjuguée à la géomorphologie de la plaine alluviale devrait faire bénéficier à l'aquifère une importante réalimentation chaque année.

I.1.3 Hydrographie

La région des cascades est située dans le bassin versant de la Comoé et dispose de deux fleuves qui coulent de façon permanente.

- Le fleuve Comoé :

La Comoé est un cours d'eau pérenne qui prend sa source dans la partie septentrionale de la province de la Comoé. Ses principaux affluents sont le Lakoba et le Pa. La plaine alluviale de Karfiguéla constitue le lit (zone inondable) de la Comoé sur une longueur de 27 kilomètres à vol d'oiseau (Compaoré N.F, 2012), voir Figure 4.

- Le fleuve Léraba,

Elle est constituée de deux branches essentielles que sont la Léraba orientale et la Léraba occidentale.

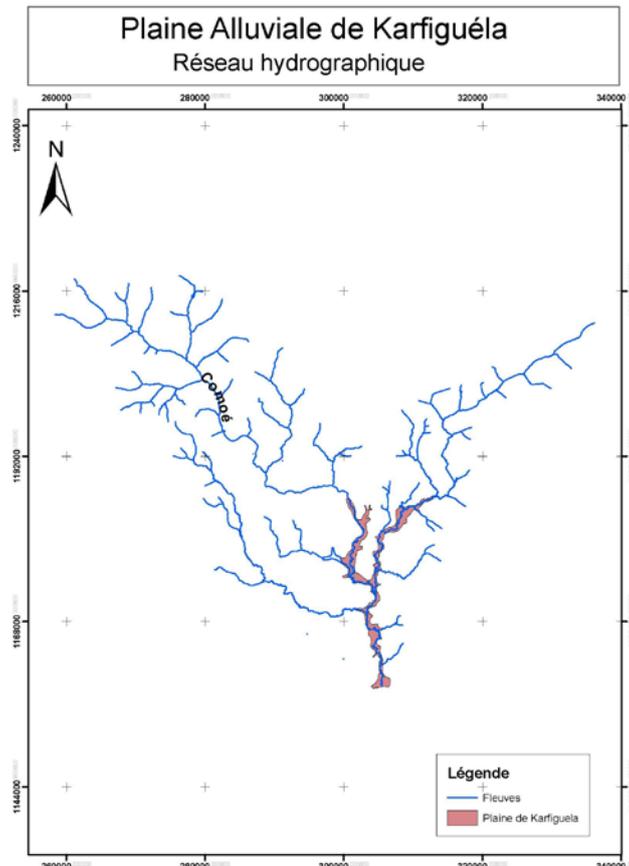


Figure 4: Réseau hydrographique de la plaine alluviale de Karfiguéla

I.1.4 Géologie

I.1.4.1 Formations profondes

La plaine de Karfiguéla, est composée des formations géologiques suivantes (Figure 5) :

- Un ensemble formé de schistes et de volcano-sédiments. globalement, il s'agit de pélites, de schistes gréseux, de schistes lustrés gris-noir, de schistes tuffacés ainsi que de rares horizons quartzitiques. (Ouédraogo, 2006) ;
- La Formation des grès inférieurs d'une épaisseur variant de 50 à 300 mètres. On y voit la succession suivante de la base au sommet : grès rouges fins arkosiques, grès quartzites fins, grès roses à débit schisteux (Hugot , 2002) ;
- Un ensemble tonalitique constitué de granodiorite, de tonalite et diorite à quartz. Cet ensemble se serait mis en place depuis 2210 Ma jusqu'à 2100 Ma de manière quasi continue (Ouédraogo, 2006) ;
- La formation des Grès de Kawara-Sindou (GKS) formé par des sables grossiers conglomératiques. D'une épaisseur variant de 60 à 350 mètres. Elle repose en discordance sur les Grès Inférieur.

- Les granodiorites sont des roches grenues, mésocrates à minéraux relativement riches en ferromagnésiens et feldspaths (Hugot, 2002)

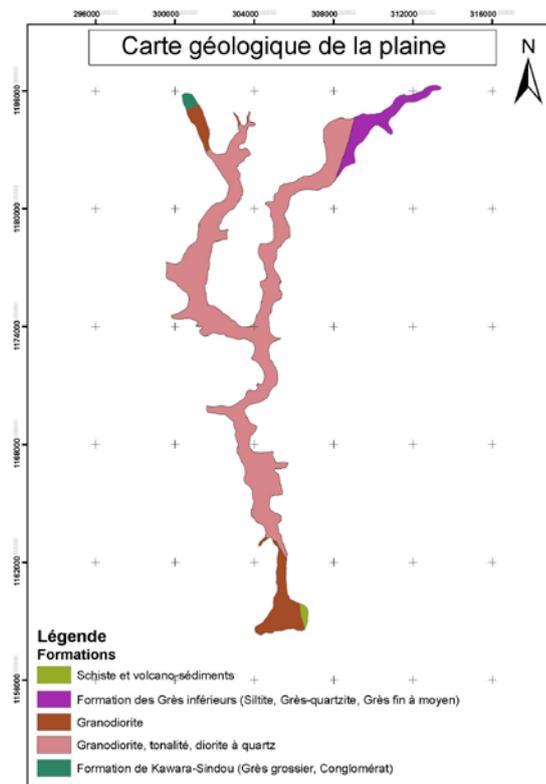


Figure 5 : Formations géologique de la plaine alluviale de Karfiguéla. sources:VREO, 2006

1.1.4.2 Les alluvions

La plaine alluviale est une plaine formée par les alluvions (sédiments généralement anciens, incluant divers débris et matériaux) déposées lors de crues du cours d'eau. Des logs stratigraphiques des micropiézo-mètres on peut constater des successions de couches pour la plupart de sables fin à très fin, d'argile et de limons avec des couches mixtes (sable argileux, argile limoneux...). Les essais géophysiques effectuées ont permis de déterminer l'épaisseur moyenne des alluvions qui est de 30m.

1.2 Contexte socioéconomique

L'agriculture irriguée est l'activité principalement développée sur la plaine de Karfiguéla. Les champs côtoient pratiquement les berges en fragilisant la pérennité du cours d'eau par l'ensablement. Les paysans qui y sont installés pratiquent la culture maraichère composée de légumes (choux, concombre, piment etc.) et de céréales (maïs). Le système d'irrigation utilisé est gravitaire avec des pompes installées directement sur le cours d'eau.

En période d'hivernage, la plaine est inondée et l'agriculture pluviale est pratiquée dans les zones non inondées.

En période sèche les superficies non emblavées de la plaine offrent un pâturage exploité par les éleveurs nomades et sédentaires. Les espèces élevées sont les bovins, les ovins les caprins.

I.3 Contexte hydrogéologique

La région des cascades est définie par deux entités hydrogéologiques:

- Zones sédimentaires

La zone sédimentaire est constituée d'une épaisse série de roches qui contient plusieurs niveaux aquifères. Il s'agit d'un bassin sédimentaire essentiellement gréseux d'âge très ancien.

Certains niveaux aquifères fournissent des débits très importants de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres cubes par heure (GIRE, 2001)

- Zone de socle

La zone de socle cristallin est à dominance granitique avec des schistes, des roches vertes et des dolérites. Les débits exploitables sont modestes.

Les ressources en eau sont soit dans la zone altérée et plus ou moins ameublées pour les roches granitiques (arènes) soit dans la roche fracturée. (GIRE, 2001).

I.4 Puissance de la plaine

L'épaisseur de la plaine alluviale a été déterminée par des essais géophysiques sur les différents sites. Les résultats d'interprétation donnent une variation de l'épaisseur tout le long de la plaine (Figure 6) Ainsi, les épaisseurs varient entre 30m (site de Tengrela et Diarabakoko) à 22m (site de Siniena).

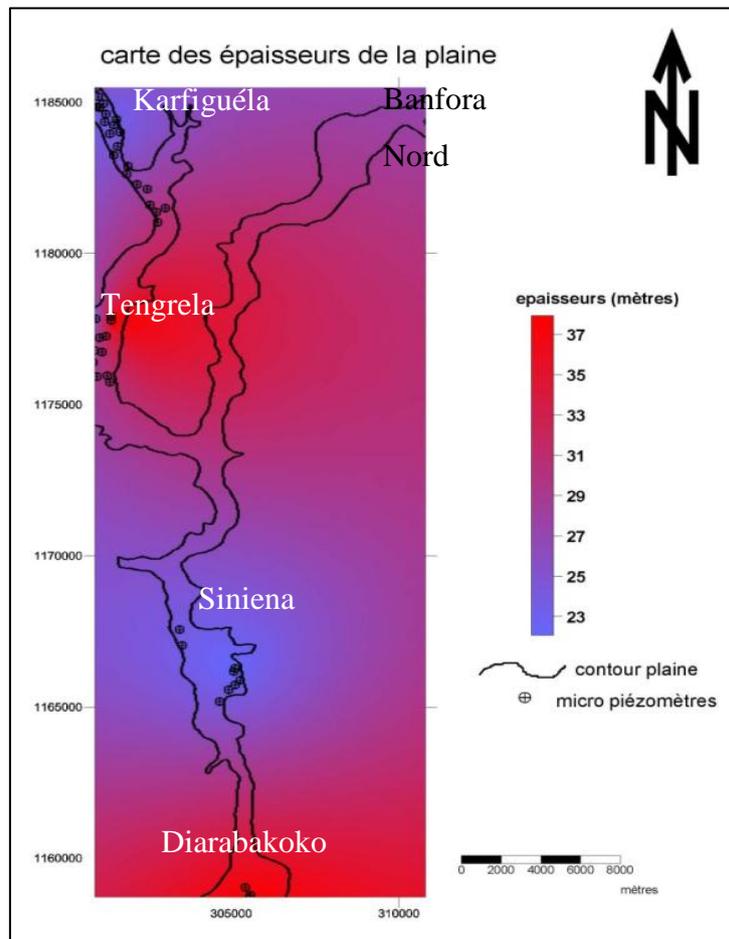


Figure 6 : Carte des épaisseurs de la plaine

On peut remarquer une distribution des épaisseurs qui est relativement faible dans la zone de Karfiguéla mais augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de la zone de Tengrela. Plus au Sud, on remarque la même variation avec des épaisseurs relativement élevées à Siniena qui diminuent en allant vers Diarabakoko. La zone de Banfora Nord quant à elle est formée d'une épaisseur relativement moyenne.

II : MATERIELS ET METHODES

La réalisation des activités de ce travail a nécessité du matériel approprié et une méthodologie stricte dans les différents domaines (paramètres hydrodynamiques, piézométries). Nous allons présenter dans cette partie le matériel ainsi que les méthodes utilisés.

II.1 Matériel

Pour la collecte des données ainsi que la réalisation des essais, un ensemble de matériels a été utilisé lors du travail. Il s'agit de :

- **La sonde piézométrique :**

Elle permet de mesurer manuellement le niveau piézométrique des ouvrages.

- **La sonde mini diver® :**

Sonde à capteur de pression qui permet de faire une mesure continue du niveau piézométrique. Elle est indispensable pour les mesures lors des essais slug-test.

- **La sonde baro diver**

Elle permet de mesurer la pression atmosphérique qui, compensée avec les données obtenues à partir de la sonde mini diver permet d'obtenir le niveau piézométrique

- **Le bailer**

C'est un instrument qui est formé d'un tube de diamètre inférieur à celui du piézomètre et muni d'un clapet fixé au bout. Il permet de prélever de l'eau dans le piézomètre lors de l'essai slug test

- **Le « differential global positioning system : DGPS »** ou le système de positionnement global différentiel. Il sert à déterminer les coordonnées géographiques et les altitudes des ouvrages avec une précision de l'ordre du centimètre. Le DGPS que nous avons utilisé est de marque LEICA geosystems® Cs10 (Figure 7)

- **le matériel informatique.**

Pour la réalisation de nos différentes cartes, nous avons utilisé les logiciels de cartographie suivants: **Surfer 9** pour l'établissement des différentes cartes basées sur la représentation de données spatiales **ArcGIS 9.3** a permis d'élaborer les différentes cartes de représentation thématiques



Figure 7 : Aperçu du DGPS

II.2 Méthodologie d'acquisition des données

Les études à effectuer vont se faire grâce aux ouvrages installés sur la plaine. Il s'agit d'un réseau de quarante-neuf (49) micropiézomètres qui sont repartis par groupements indépendants (Figure 8)

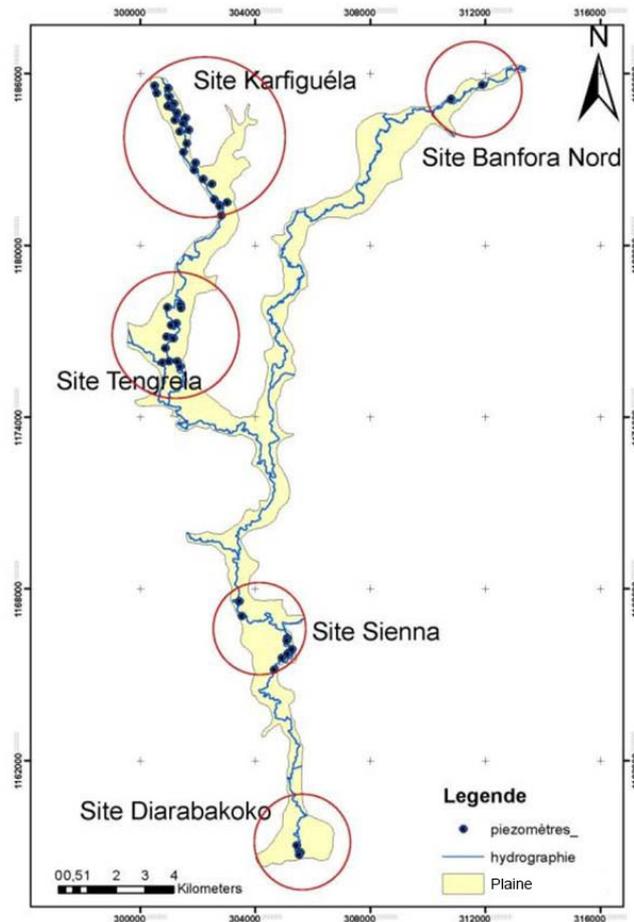


Figure 8 : Répartition des micropiézomètres sur la plaine

Pour faciliter les représentations, nous avons séparé les micropiézomètres en cinq groupes déterminés par les localités (Banfora Nord, Diarabakoko, Karfiguéla, Sienna et Tengrela).

Les micropiezomètres sont des ouvrages réalisés à la tarière. Ils ont de faibles profondeurs variant de 3 à 8 m avec une moyenne de 7 m. ils sont équipés des tubes de 90 mm de diamètres. Les détails de l'équipement sont montés en Annexe V.

II.2.1 Détermination des paramètres hydrodynamiques

La détermination des paramètres hydrodynamiques est une étape cruciale dans la caractérisation de l'aquifère.

Il existe plusieurs méthodes de détermination des paramètres hydrodynamiques qui sont les essais par pompage ou essais de nappe, les essais de perméabilité in-situ, les essais de perméabilité au

laboratoire et enfin les méthodes de corrélation basés sur la texture du sol et la distribution des grains. La Figure 9 donne le récapitulatif des méthodes de détermination de la conductivité hydraulique existantes.

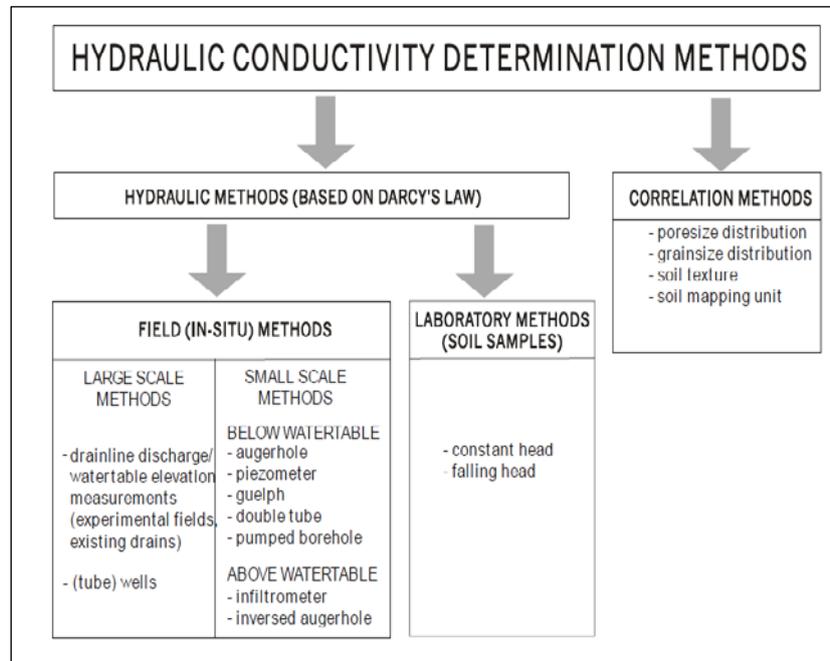


Figure 9 : Méthodes de détermination de la conductivité hydraulique (Oosterbaan, R. J. et Nijland, H. J. (1986)).

L'essai par pompage (essai de nappe) permet de déterminer les paramètres hydrodynamiques sur une zone étendue et met aussi en évidence les conditions d'alimentation de la nappe. Il est considéré comme le plus représentatif pour déterminer la conductivité hydraulique (Michael D et al. 1990, Cassan, 2005). Cette méthode nécessite cependant des grands moyens matériels et des ouvrages appropriés.

Pour cette étude, les essais de choc hydraulique in-situ sont choisis car si ils conviennent aux ouvrages sur place (micropiezomètres) dont les profondeurs sont limitées à sept (7) mètres, ces essais sont en outre moins coûteux, simples à mettre en œuvre et sont généralement de courte durée. La méthode de corrélation basée sur l'étude de la texture du sol viendra s'ajouter aux essais slug test pour appuyer les interprétations quant aux valeurs obtenues.

II.2.1.1 Essais de choc hydraulique in situ « slug-test »

L'essai choc hydraulique «slug tests» est un type particulier d'essai de nappe. L'essai slug test développé par Bouwer et Rice (1976) permet de mesurer la conductivité hydraulique (K) d'un aquifère à l'aide d'un seul ouvrage.

L'essai consiste sur le terrain à prélever ou ajouter rapidement une quantité d'eau dans le micropiezomètre et à mesurer à intervalle de temps le niveau d'eau lors de la remontée ou de la descente jusqu'à une stabilisation complète. Si on procède à un ajout, on doit éviter d'utiliser de l'eau extérieure mais on peut pomper au préalable la quantité d'eau requise pour l'essai et la stocker pendant que le niveau d'eau se rétablit dans le micropiezomètre (Chapuis, 1999). Dans notre cas, on a procédé à un essai à niveau remontant, avec un échantillonneur : le bailer (Figure 10) pour le prélèvement rapide de l'eau.



Figure 10: Bailer pour le prélèvement rapide de l'eau

Lors d'un essai, la vitesse de remontée de l'eau peut être très rapide au point où il peut être difficile d'avoir une série de lectures en fonction du temps. Il est nécessaire dans ce cas d'utiliser un capteur de pression avec un système d'enregistrement (Chapuis et Wendling 1991). Le capteur utilisé dans notre cas est la sonde diver, programmée pour une lecture toutes les 0.5 secondes

Les propriétés hydrauliques déterminées par des essais slug-test sont représentatives seulement du matériel à proximité immédiate du puits (Strickland et Korleski, 2006 ; Yeh et Chen, 2007).

Il existe diverses méthodes d'interprétation des essais slug test, la plupart s'opérant dans le cas de nappes captives. Deux des méthodes nous paraissent les mieux adaptés pour cette étude : Celle développée par HVORSLEV (1951) et la méthode de BOUWER et RICE (1976). Ces méthodes prennent en compte une pénétration partielle de l'aquifère et s'appliquent aussi bien en nappe libre qu'en nappe captive. Les données complémentaires nécessaires pour les interprétations comme la

puissance de la plaine alluviale, la texture des matériaux ainsi que la lithologie ont été fournies par des études géophysiques sur la zone (voir I.4 : Puissance de la plaine)

➤ Méthode de HVORSLEV :

Cette méthode ne fournit que la valeur locale K d'un aquifère ou d'un aquitard : elle suppose que l'emmagasinement a une influence négligeable (Chapuis, 1999).

Les hypothèses d'application de cette méthode sont les suivantes:

- L'aquifère est isotrope, homogène et d'extension illimitée,
- L'écoulement est laminaire.

Elle stipule que le débit dans le sol est égal au débit dans le tuyau du piézomètre selon l'équation de bilan suivant :

$$Q_{sol} = Q_{tuyau} \text{ (Chapuis, 1999)}$$

$$Q_{sol} = cKH \text{ (Loi de DARDCY)}$$

Où c est le coefficient de forme de la zone d'injection, K est la conductivité hydraulique, et H est la différence de charge hydraulique appliquée.

Le débit dans le tuyau est calculé à partir de la vitesse de remontée de l'eau :

$$Q_{tuyau} = S_{inj}(dH/dt)$$

Où S_{inj} est la section intérieure du tubage, dH/dt correspond à la vitesse de remontée de l'eau dans le puits.

La relation permet d'écrire :

$$S_{inj}(dH/dt) = cKH.$$

En séparant les variables on a :

$$dH/H = (cK/S_{inj})dt$$

En intégrant cette équation :

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H} = (cK/S_{inj}) \int_{t_1}^{t_2} dt$$

D'où

$$\ln(H_2/H_1) = (cK/S_{inj})(t_2 - t_1)$$

Où H_2 et H_1 sont les charges hydrauliques aux temps t_2 et t_1

Si $d = 2r$ est le diamètre intérieur du tube, alors

$$S_{inj} = \frac{\pi d^2}{4} = \pi r^2$$

En reportant les données expérimentales de l'essai (H et t) sur un graphique semi-log de $\ln H/H_0$ Versus t , on doit obtenir en théorie une droite dont la pente vaut $p = cK/S_{inj}$, on peut alors calculer K :

$$K = pS_{inj}/c$$

Le coefficient de forme c est déterminé avec la formule dans les cas d'un essai Lefranc (Lefranc 1936, 1937) :

$$c = 2\pi L / \ln (2L/D) \text{ quand } L/D \geq 4 ;$$

$$c = 2\pi D \sqrt{(L/D + 1/4)} \text{ quand } 1 \leq L/D \leq 8$$

Où

L est la longueur du massif filtrant et D son diamètre (Figure 11)

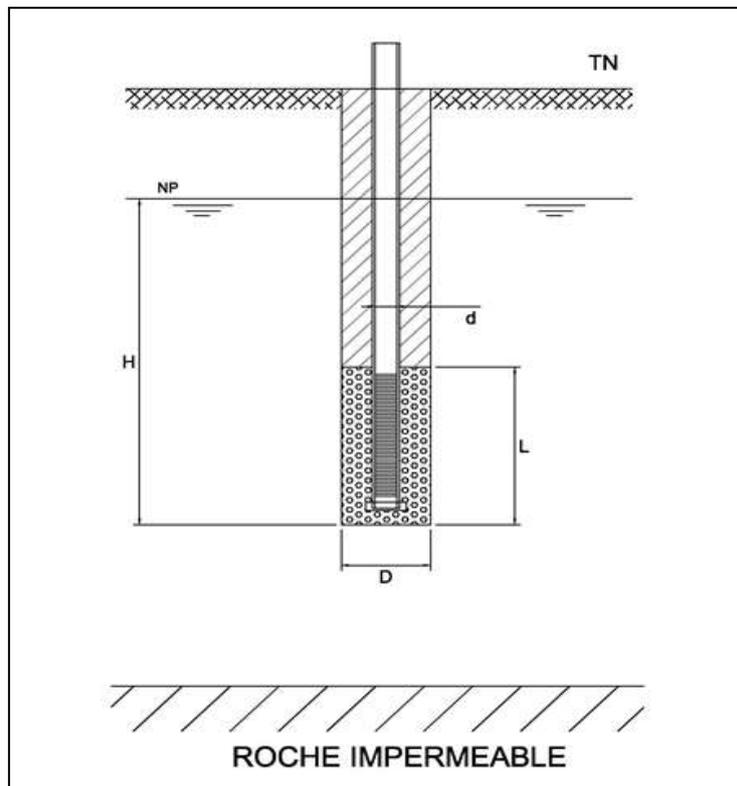


Figure 11 : Paramètres géométriques pour la méthode de Hvorslev

➤ Méthode de BOUWER et RICE

La méthode de Bouwer et Rice est une généralisation de la méthode de Hvorslev dans le cas d'un puits pénétrant partiellement un aquifère à nappe libre. Elle permet de déterminer les mêmes paramètres que la méthode de Hvorslev

Cette méthode est basée sur l'équation de THIEM :

$$Q = 2\pi KL \frac{H}{\ln(R_e/r_w)}$$

Où

Q : Le débit dans le piézomètre,

K : La perméabilité,

L : La longueur de la crépine,

H : La charge instantanée dans le piézomètre, le repère étant la charge initiale H_0 au temps $t = t_0$

R_e : Le rayon d'influence de l'essai,

r_w : Le rayon de l'ensemble crépine + massif filtrant.

Les hypothèses d'application de cette loi sont :

- L'aquifère est homogène, isotrope et de puissance constante sur la surface influencée par l'essai,
- La nappe a une extension latérale illimitée,
- L'écoulement vers le puits est à un état d'équilibre,
- L'abaissement de la nappe au voisinage du piézomètre est négligeable,
- Le débit d'origine capillaire est négligeable,
- Les pertes de charges sont négligeables,
- Le puits a un diamètre fini.

D'une part, la vitesse de remonté dH/dt dans le tubage après un prélèvement brusque de l'eau est relié au débit Q par l'équation :

$$dH/dt = Q/\pi r_c^2$$

Où r_c est le rayon intérieur du tubage.

NB : Le terme πr_c^2 représente la section du tubage.

En combinant les deux équations, on obtient :

$$\frac{dH}{H} = \frac{2KL}{r_c^2 \ln(R_e/r_w)} dt$$

Après intégration :

$$\ln(H_2/H_1) = [2KL/r_c^2 \ln(R_e/r_w)](t_2 - t_1)$$

Il s'agit de la même équation que celle de Hvorslev mais avec une pente $p = 2KL/r_c^2 \ln(R_e/r_w)$.

En reportant les données sur le même graphique semi-log de $\ln H/H_0$ versus t on doit obtenir une droite dont la pente permet de calculer K :

$$K = p \frac{r_c^2 \ln(R_e/r_w)}{2L}$$

La principale inconnue dans cette équation est R_e : Le rayon d'influence de l'essai. La solution donnée par Bouwer et Rice permet d'estimer la valeur de $\ln(R_e/r_w)$ selon deux cas :

- Si le piézomètre pénètre partiellement l'aquifère, il est incomplet :

$$\ln \frac{R_e}{r_w} = \left[\frac{1.1}{\ln(H/r_w)} + \frac{A + B \ln[(D - H)/r_w]}{L/r_w} \right]^{-1}$$

Où

D : La puissance ou l'épaisseur de l'aquifère,

H : La différence entre le niveau piézométrique (niveau statique) de la nappe et le fond du piézomètre. Les paramètres géométriques sont illustrés dans la figure ci-dessous

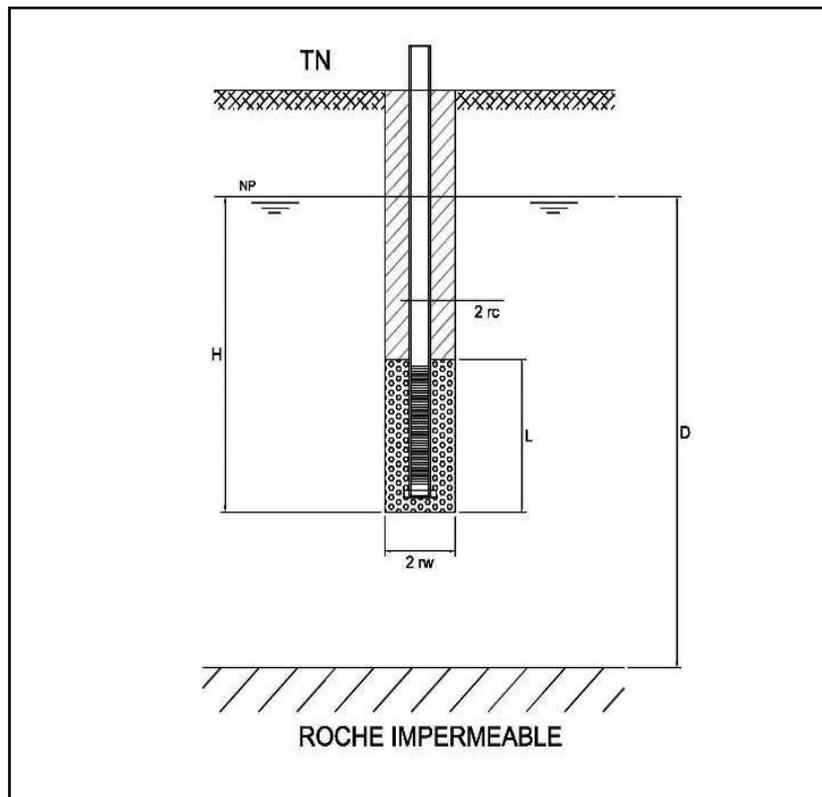


Figure 12 : Paramètres géométriques pour la méthode Bouwer et Rice

A et B sont des coefficients sans dimension qui sont fonction de L/r_w

- Si le piézomètre pénètre entièrement l'aquifère, il est complet, c'est à dire $H = D$ l'équation devient:

$$\ln \frac{R_e}{r_w} = \left[\frac{1.1}{\ln(H/r_w)} + \frac{C}{L/r_w} \right]^{-1}$$

Les coefficients A, B et C sont des fonctions de L/r_w , l'éclatement de la lanterne ou zone d'injection, fournies par la figure ci-dessous

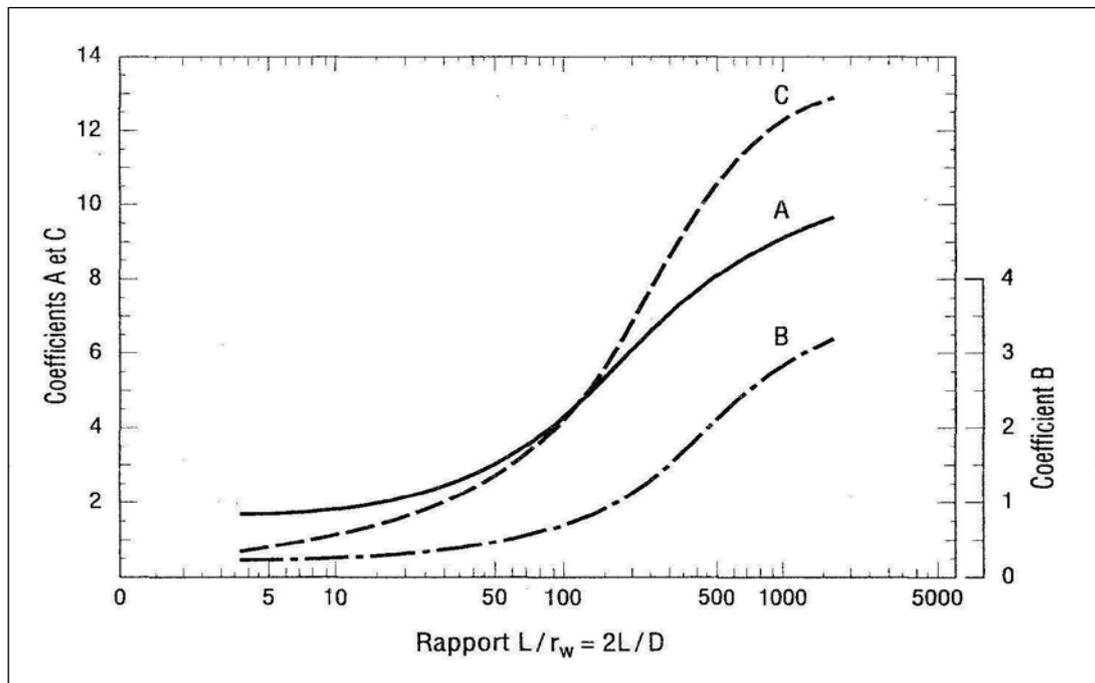


Figure 13 : Courbes reliant les coefficients A, B, C à L/r_w . Source : Bouwer et Rice, 1976

Avec les conductivités obtenues, on peut calculer les transmissivités. La transmissivité d'un aquifère est le produit de la conductivité hydraulique (K) du matériau aquifère par son épaisseur (h) :

$$T (m^2/s) = K (m/s) \cdot h (m)$$

II.2.2 Directions et sens d'écoulement

Tout comme la détermination des paramètres hydrodynamiques, la détermination des directions et des sens d'écoulements ont une importance capitale dans la caractérisation de l'aquifère.

Les directions et sens d'écoulements font partie des interprétations de données spatiales. Ces interprétations permettent de mettre en évidence la situation des écoulements ainsi que des informations plus importantes à savoir les zones de recharge préférentielles, les zones de transition et les exutoires. Les données reportées sur une carte permettront de représenter la carte piézométrique de la plaine à un instant donné.

L'acquisition des données se base essentiellement sur le relevé des niveaux d'eau des micropiédomètres installés sur la plaine.

II.2.2.1 Mesures piézométriques

La mesure du niveau des eaux souterraines est d'une importance fondamentale dans toutes les interprétations : elle constitue une opération de base.

Le niveau piézométrique représente en un point donné et par rapport à un repère donné la charge hydraulique de ce point. En pratique, elle représente en nappe libre le niveau de la surface libre de l'eau.

La détermination du niveau piézométrique consiste à la mesure d'un niveau d'eau pour les nappes libres dans les aquifères à forte ou moyenne perméabilité (Cassan, 2005). Elle a été faite lors des tournées piézométriques de façon manuelle et automatique. Pour les relevés manuels, la tournée doit se faire dans une période aussi courte possible vu que le niveau piézométrique est en perpétuel fluctuation.

De façon manuelle, on a utilisé la sonde piézométrique (Figure 14) dont le capteur est sensible à la conductivité de l'eau. Lorsque la sonde atteint le niveau de l'interface air/eau, un contact électrique est établi entre deux tiges métalliques, déclenchant un signal sonore et lumineux. Le paramètre mesuré est la profondeur du niveau d'eau par rapport au bout du tubage en surface.

Le niveau piézométrique par rapport au niveau de repère des altitudes est donné par :

$$NP = Z_{TN} - P_{mesuré} + H_d$$

Où

NP : Niveau piézométrique en mètre

Z_{TN} : Altitude du terrain naturel à l'emplacement de l'ouvrage

$P_{mesuré}$: Profondeur d'eau mesurée avec la sonde

H_d : Hauteur de débordement du tubage hors du sol.

NB : les micropiézo mètres ne comportent pas de margelle.

Les coordonnées géographiques des ouvrages ainsi que leurs altitudes ont été fournis par des campagnes de levé au DGPS (voir II.2.4 Levés topographiques)

Nous avons fait deux tournées piézométriques qui ont duré deux jours sur les quarante-neuf (49) micropiézo mètres : une première au mois de mars et une deuxième en avril.

Pour les mesures en continue, un capteur de pression (sonde diver®) Figure 13 est plongé dans le piézomètre pour la mesure du niveau d'eau en continu sur une période étendue. Dix micropiézo mètres ont été équipés des sondes diver réglées à des intervalles de temps de mesure de

30 minutes. L'avantage des capteurs diver est qu'ils permettent de suivre les fluctuations de la nappe de façon continue



Figure 14 : sonde piézométrique

Fonctionnement des sondes Diver :

La sonde diver (Figure 15) est munie d'un capteur de pression qui mesure la pression correspondant à la colonne d'eau au-dessus de la sonde augmentée de la pression atmosphérique. Le niveau d'eau est obtenu en soustrayant la pression atmosphérique à cette valeur. La pression atmosphérique est fournie par la sonde baro-diver (Figure 15) placée sur le même site.

Les micropiézomètres munis de sondes mini diver sont au nombre de dix (10), installés dans les piézomètres à l'aide de ficelles. Une sonde baro-diver est installée dans un des micropiézomètres et effectue les mesures de pression atmosphérique.

NB : le transfert des données des sondes diver de même que la programmation se fait à l'aide d'un ordinateur muni du logiciel Diver-Office.



Figure 15 : Sondes mini diver et baro diver

Le niveau de référence choisis pour le niveau piézométrique est le niveau d'origine des altitudes. La conversion des données en altitudes nécessite de connaitre l'altitude du piézomètre. La mesure du niveau d'eau par rapport à un niveau de référence verticale se fait par les calculs suivants :

$$NE = TP - LC + CE$$

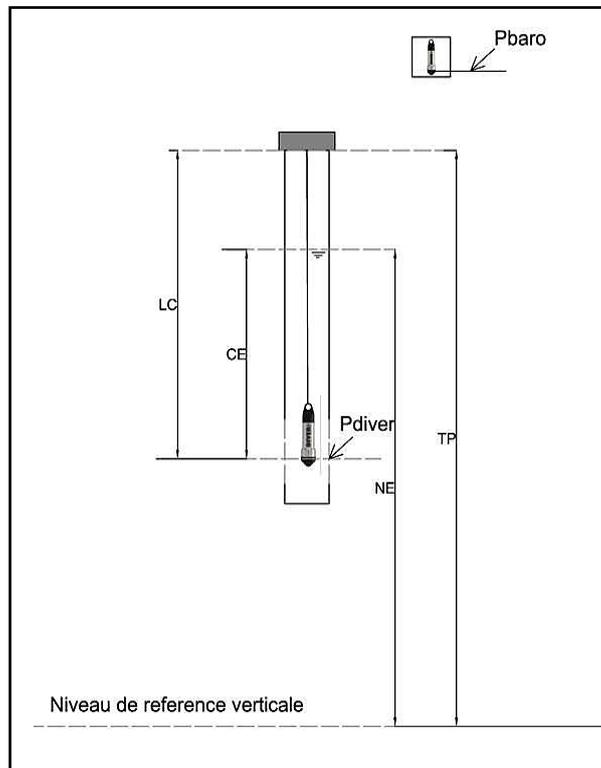


Figure 16 : Paramètres géométriques de calcul du niveau piézométrique avec la sonde Diver

Dans la figure ci-dessus:

NE représente le niveau d'eau par rapport au niveau de référence verticale,

TP représente la tête de puits, en pratique l'altitude du terrain naturel du puits,

LC est la longueur du câble auquel est suspendu le Diver,

Le Baro-Diver mesure la pression atmosphérique (P_{baro}) et le Diver mesure la pression exercée par la colonne d'eau (CE) et la pression atmosphérique (P_{diver}).

La colonne d'eau (CE) au-dessus du diver est exprimé par :

$$CE = 9806,65 \frac{P_{diver} - P_{baro}}{\rho g}$$

Où p est la pression en cm CE, g est l'accélération dû à la gravité ($9,81\text{m/s}^2$) et ρ la masse volumique de l'eau (1000kg/m^3). En remplaçant CE par sa valeur nous obtenons :

$$NE = TP - LC + 9806,65 \frac{P_{diver} - P_{baro}}{\rho g}$$

II.2.2 Réalisation de la carte piézométrique

Le tracé de la carte piézométrique s'est fait de façon manuelle avec la méthode des triangles d'interpolation. Les piézomètres ont été reportés sur une carte avec leurs valeurs de niveau statique puis les courbes d'égalité piézométrie (isopièzes) sont tracées suivant une équidistance donnée.

Les données de l'hydrographie notamment l'altitude des plans d'eau ont été fournies par le service hydrologique de la Direction Régionale de l'Eau et des Aménagements Hydrauliques des Hauts-Bassins.

II.2.3 Puissance de la plaine

La différence de hauteur qui existe entre le niveau piézométrique de la nappe et le niveau du mur de la nappe constitue la puissance de l'aquifère. Elle représente l'épaisseur saturée et constitue le milieu dans lequel se font les écoulements souterrains.

La puissance de la plaine alluviale peut varier par endroits, sa valeur peut être déterminée par un forage traversant toute l'épaisseur de la plaine jusqu'à la roche mère ou par des mesures géophysiques.

Dans cette étude, la puissance a été déterminée par des mesures géophysiques réalisées sur quelques sites à proximité des micropiézo-mètres.

II.2.4 Levés topographiques

La détermination des coordonnées géographiques (latitudes et longitudes et altitudes) des ouvrages sont indispensables pour les interprétations aboutissant à des représentations spatiales.

L'acquisition des données géographiques requiert de la précision mais doit aussi répondre à certaines normes de représentation impliquant les projections et les systèmes de coordonnées. Le nivellement topographique est le moyen qui permet d'obtenir une meilleure altimétrie des points mais sur une grande surface, cette méthode nécessite beaucoup de temps et une bonne accessibilité du terrain. Nous avons donc eu recours au DGPS ou encore GPS différentiel.

II.2.4.1 Fonctionnement du DGPS

Le DGPS est une amélioration du GPS. Le principe est basé sur le fait qu'en des points voisins, les effets des erreurs de mesure, comme d'ailleurs les effets des erreurs ajoutées volontairement, sont très semblables : il suffit donc d'observer en un point connu les fluctuations des mesures, et de les transmettre à un récepteur observant les mêmes satellites, pour permettre à celui-ci de corriger une grande partie des erreurs de mesure, qu'elles soient liées au satellite (horloge), aux conditions de propagation (effets troposphériques...).

On a utilisé un système de deux stations dont le principe est résumé dans la Figure 17 : une station de base et une station mobile. La station de base (voir Annexe I) installée sur un point de référence dont les coordonnées sont connues reçoit les coordonnées issues des satellites et les compare avec les coordonnées réelles de la station de base. La différence entre ceux-ci constitue l'erreur commise. La station de base détermine les corrections et les transmet en temps réel par une connexion radio à la station mobile (voir Annexe I) et on obtient alors des coordonnées corrigées.

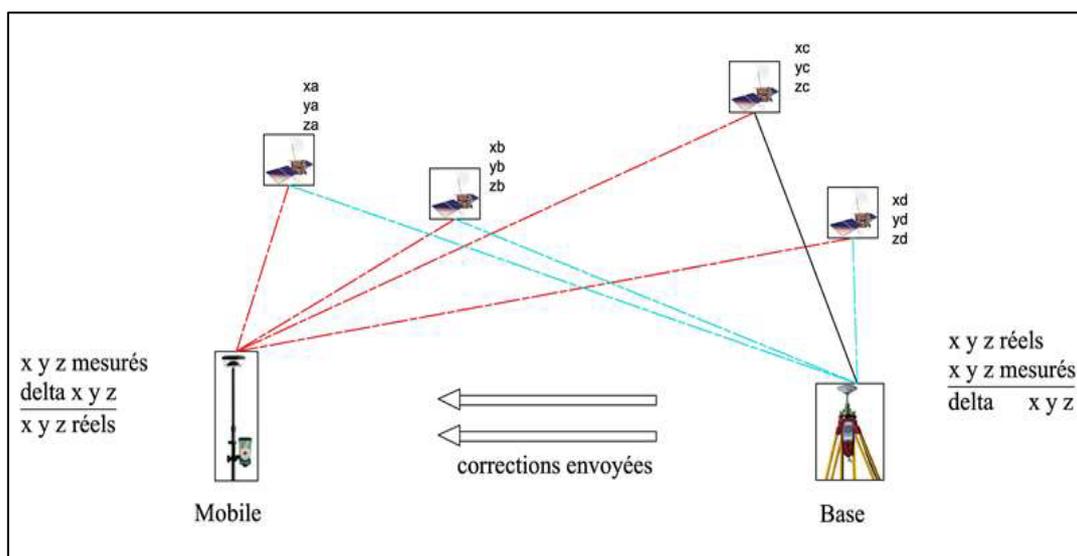


Figure 17 : Principe de fonctionnement du DGPS

La précision du DGPS dépend de la disponibilité des satellites et de la distance entre les deux récepteurs. En gardant une distance maximale de 10 kilomètres, on a relevé les coordonnées des ouvrages à partir de deux bornes géodésiques placées à Banfora dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous. La mesure dure le temps nécessaire pour avoir une précision inférieure à 2 cm.

Tableau 1 Coordonnées des bornes géodésiques servant de référence. Source : IGB Burkina

Numéro Borne	Coordonnées UTM Adindan point 58 (CLARKE 1880)		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
BC 08011	307 372,47	1 176 284,81	306,67
37	310 284,035	1 179 217, 016	314,050

III RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 Paramètres hydrodynamiques

Les essais slug-test effectués ont permis d'obtenir des courbes de remontée en fonction du temps. La stabilité est atteinte au bout de quelques secondes (3 secondes pour le micropiézomètre PZRG12) à plusieurs heures (environ 14 heures pour le micropiézomètre PZRG1). Les courbes obtenues (voir Annexe IV) représentent la charge hydraulique en cm CE au-dessus de la sonde diver en fonction du temps en secondes.

Les données géométriques des micropiézomètres (Annexe V) sont les mêmes pour certains : le diamètre commun des tubes est de 90 mm, celui du massif filtrant est de 100 mm. La profondeur des ouvrages et la longueur du massif filtrant quant à elles varient selon les ouvrages.

Tous les micropiézomètres ont été considérés comme pénétrant partiellement l'aquifère à nappe libre.

Les méthodes d'interprétation de Hvorslev et de Bouwer et Rice ont permis de déterminer les conductivités hydrauliques des différents ouvrages. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous par site de groupement des micropiézomètres (site de Banfora Nord, Diarabakoko, Karfiguéla, Siniena et Tengrela).

Les conductivités hydrauliques obtenues avec les deux méthodes sont pour la plupart dans l'ordre de 10^{-4} à 10^{-7} m.s⁻¹.

La plus forte conductivité hydraulique obtenue est celle du micropiézomètre PZRG2 qui est de $1,84.10^{-3}$ m.s⁻¹ avec la méthode de Hvorslev et de $4,31.10^{-4}$ m.s⁻¹ avec la méthode de Bouwer et Rice. La conductivité la plus faible est obtenue avec le micropiézomètre PZRG1, elle est de $3,96.10^{-8}$ m.s⁻¹ avec la méthode de Hvorslev et de $9,74.10^{-9}$ m.s⁻¹ avec la méthode de Bouwer et Rice.

De manière comparative, les résultats obtenus par les deux méthodes sont compris pour la plupart dans le même ordre de grandeur, cependant on peut observer dans quelques cas des différences conséquentes comme le cas du micropiézomètre PZRG2 ($1,84.10^{-3}$ m.s⁻¹ avec la méthode de Hvorslev et $4,31.10^{-4}$ m.s⁻¹ avec la méthode de Bouwer et Rice) avec une différence de $1,41.10^{-3}$ m.s⁻¹. L'on peut constater en outre que la méthode de Bouwer et Rice donne des valeurs relativement plus faibles.

Dans le choix des conductivités à considérer, nous optons pour celles obtenues avec la méthode de Bouwer et Rice. Selon les études (Michael D. et al. 1990, Chapuis R. P. 1999, Campbell M D. et Starrett M. S., 1990), elle est reconnue comme la méthode donnant des valeurs les plus conformes.

Elle prend en compte l'épaisseur de l'aquifère et est spécifique aux cas des pénétrations partielles de l'aquifère, ce qui correspond à notre cas d'étude.

En se basant sur les études (Freeze et Cherry, 1979) on remarque que les conductivités obtenues correspondent pour la plupart aux sables fins (10^{-5} à 10^{-4} m.s⁻¹) et aux sables limoneux (10^{-6} à 10^{-9} m.s⁻¹). (Figure 18)

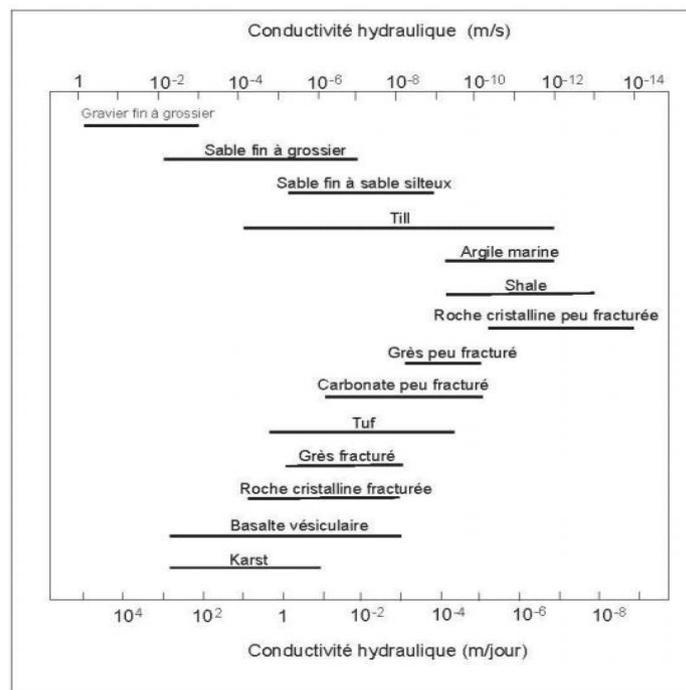


Figure 18 : Champs de conductivité et de perméabilité (Freeze et Cherry, 1979)

De plus Mermoud, A. (2006) établit (Figure 19) que les conductivités hydrauliques à saturation variant de 10^{-6} à 10^{-7} m.s⁻¹ correspondent aux sols argileux et ceux entre 10^{-4} à 10^{-6} m.s⁻¹ obtenues pour la plupart des ouvrages correspondent à des sables moyens à limoneux.

Nature du sol	K_s en m · s ⁻¹	K_s en m · j ⁻¹
Sols argileux de surface	10^{-7} à 10^{-6}	0.01 à 0.1
Sols limoneux de surface	10^{-6} à 10^{-5}	0.1 à 1
Sable fin	10^{-5} à $5 \cdot 10^{-5}$	1 à 5
Sable moyen	$5 \cdot 10^{-5}$ à $2.5 \cdot 10^{-4}$	5 à 20
Sable grossier	$2.5 \cdot 10^{-4}$ à 10^{-3}	20 à 100
Gravier	$> 10^{-3}$	> 100

Figure 19 : Valeurs indicatives de la conductivité à saturation selon Mermoud, 2006

Des logs stratigraphiques des micropiézomètres (Figure 20), On peut constater dans des successions de couches pour la plupart de sables fin à très fin, d'argile et de limons avec des couches mixtes (sable argileux, argile limoneux...). De ce constat, on peut souligner une concordance entre les valeurs de conductivité hydraulique obtenues et les matériaux en place. On peut donc affirmer que les valeurs obtenues avec les essais slug-test semblent fiables. Néanmoins, les propriétés hydrauliques déterminées par des essais slug-test sont représentatives seulement du milieu à proximité immédiate du puits (Ted Strickland et Chris Korleski, 2006) ou (Hund-Der Yeh et Yen-Ju Chen, 2007).

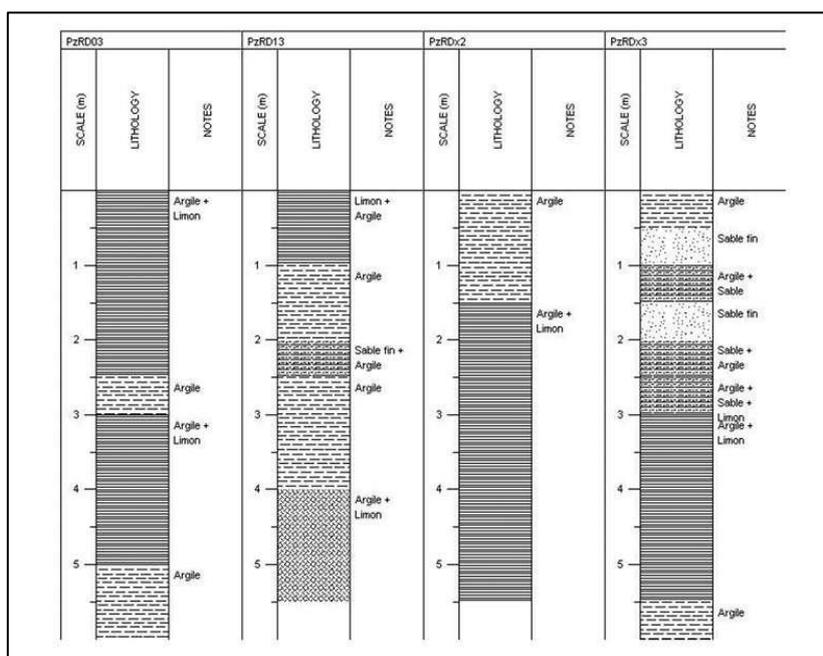


Figure 20 : Coupes stratigraphiques des piézomètres PZRD3, PZRD13, PZRDx2 et PZRDx3

En ce qui concerne les distributions spatiales de conductivité hydraulique, les moyennes de distribution par site (tableau ci-dessous) nous indiquent que la zone de Karfiguéla possède la plus forte conductivité hydraulique, soit $6,25.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. La zone qui possède la plus faible conductivité est celle de Diarabokoko avec une moyenne de $3,81.10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$.

Tableau 2 Conductivités moyennes par site

Lieux	Conductivité moyenne (m.s^{-1})
Karfiguéla	$6,92146.10^{-5}$
Diarabokoko	$3,80815.10^{-6}$
Tengrela	$2,1931.10^{-5}$
Banfora Nord	$2,3642.10^{-5}$
Siniena	$8,95914.10^{-6}$

La répartition des conductivités ci-dessus nous montre une variation qui est décroissante en suivant le sens d'écoulement du fleuve. Ainsi, les conductivités maximales se trouvent dans la zone de Karfiguéla et de Banfora Nord. Elles diminuent uniformément vers Tengrela et Siniena tandis que la zone de Diarabakoko possède la conductivité la plus faible.

Les logs des micropiézo mètres permettent de remarquer que la couche aquifère comporte une couche superficielle composée le plus souvent d'argile et de limons qui représente une bonne barrière de protection de la nappe des eaux superficielles. Les horizons de captage sont eux constitués de couches mixtes constituées de sable fin, d'argiles et limons et parfois très peu de graviers : c'est l'horizon intermédiaire, captée par la quasi-totalité des micropiézo mètres. La proportion des matériaux argileux et limoneux qui forment cet horizon est en relation directe avec la valeur de la conductivité, étant donné que l'argile est peu conductrice. On peut alors déduire que le taux de limons et d'argile présents dans les horizons captés sont croissants en suivant le sens de l'eau, ou que l'épaisseur de la couche superficielle augmente.

En somme, les valeurs de conductivité nous permettent de souligner que les horizons captés, formés pour la plupart de sables à sables fins, d'argiles et de limons apparaissent de moins en moins conducteurs en suivant le sens d'écoulement de l'eau dans la plaine. Cela serait dû à leur proportion élevée ou non d'argiles et de limons.

Il est à recommander de faire des investigations afin de caractériser les couches de la plaine qui se trouvent en dessous de celles captées par les micropiézo mètres.

III.2 Directions et sens des écoulements

III.2.1 Niveaux piézométriques

Les niveaux statiques mesurés ont été ensuite convertis en niveaux piézométriques et sont présentés dans le tableau ci-dessous. Le niveau de référence choisi est le niveau d'origine des altitudes.

Dans toute la plaine, la profondeur de la nappe (variant entre 1 et 3m) reste relativement faible par rapport au terrain naturel. Le niveau statique du micropiézo mètre PZRD6 n'a pas pu être relevé à cause du tarissement de l'eau.

Une représentation dans l'espace du niveau piézométrique de la nappe aux deux dates : Figure 21 et Figure 22 montre une piézométrie élevée à l'extrême Nord de la plaine et qui diminue au fur et à

mesure vers le Sud tandis que la partie centrale Sud se comporte comme une zone de dépression piézométrique.

De cela, on peut déduire le sens général des écoulements : ils se font du Nord (dans la zone de Karfiguéla et Banfora Nord) vers le Centre (Siniena) et du Sud (Diarabakoko) vers le même Centre (Siniena). La zone centrale représente la zone de convergence de la plaine tandis que la zone située à l'extrême Nord caractérise sa zone de recharge.

Il est à noter que l'écoulement ne se fait pas en suivant exactement le sens d'écoulement du fleuve comme on pourrait le penser.

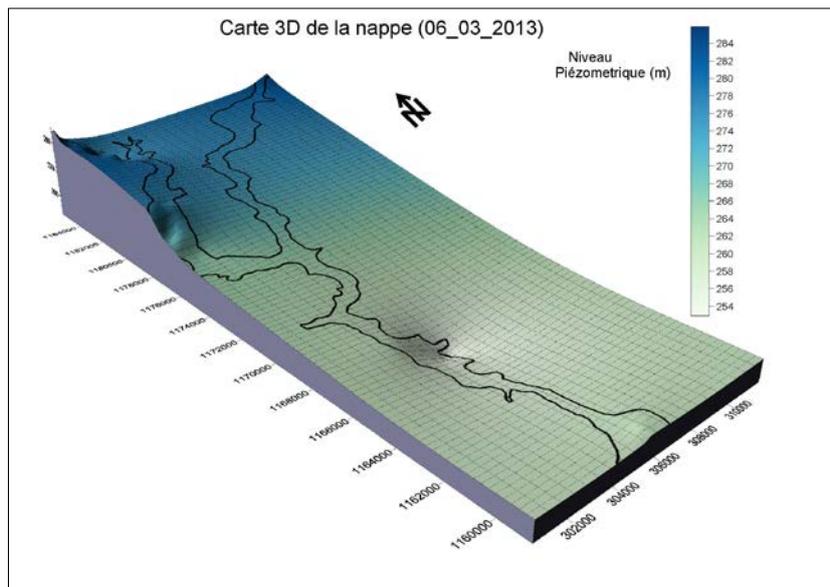


Figure 21 : Carte représentant la piézométrie de la plaine à la date du 06 mars 2013

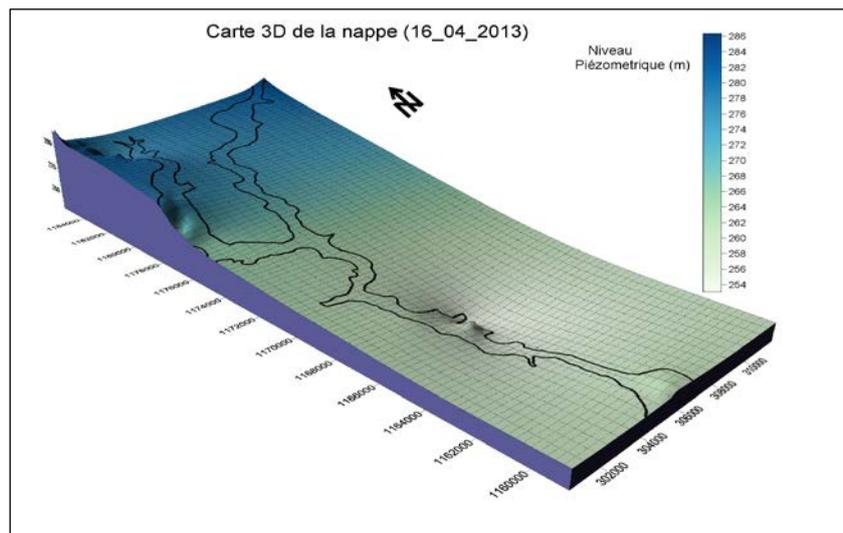


Figure 22 : Carte représentant la piézométrie de la plaine à la date du 16 Avril 2013

III.2.2 Cartes piézométriques

Pour l'établissement de la carte piézométrique, les sites ont été isolés. Les cartes obtenues concernent les deux dates de relevés.

Le tracé à la main des courbes isopièzes et des directions d'écoulements avec la méthode des triangles ont permis d'aboutir aux cartes piézométriques suivantes :

- Pour le site de Banfora-Nord,

Le nombre de micropiézo mètres (deux) ne permet pas de faire sortir une bonne information.

- Pour le site de Siniena,

Pour la date du 06 mars 2013, il y a un drainage de la nappe par la rivière du côté Nord. Plus au Sud, on peut apercevoir une zone de divergence de l'écoulement qui s'y fait vers la rivière de façon perpendiculaire, avec des courbes isopièzes presque parallèles au cours d'eau. Preuve que la limite Ouest de la plaine est une limite à potentiel. Cela représente des échanges (alimentation) entre la nappe et le milieu extérieur

Pour la date du 16 avril 2013, On remarque le même drainage au Nord mais plus au Sud, on remarque un resserrement des courbes isopièzes entraînant une forte augmentation du gradient hydraulique. Les courbes isopièzes deviennent pratiquement parallèles au fleuve : il y'a une forte alimentation du fleuve.

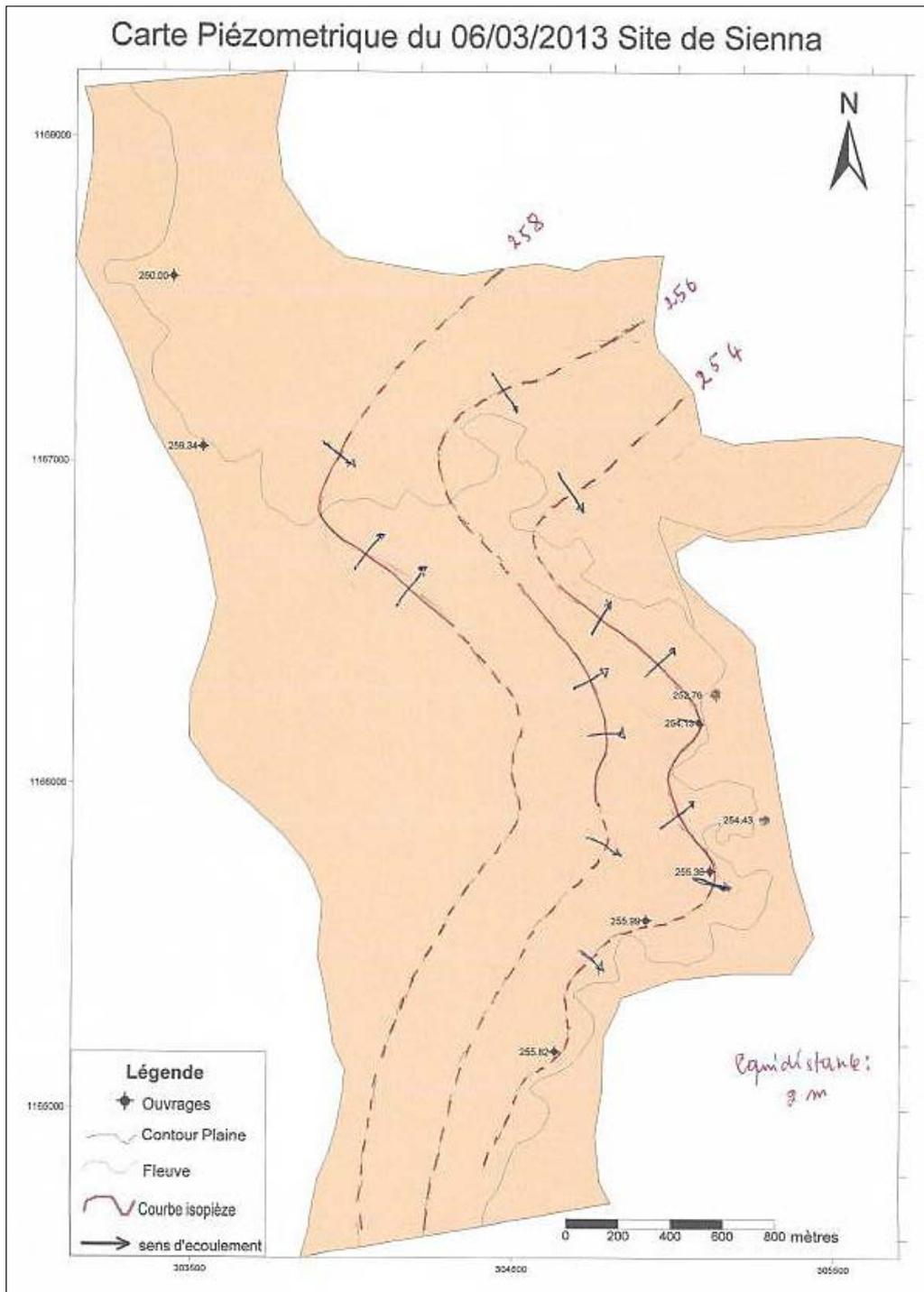


Figure 23: Carte piézométrique du 06 mars 2013 site de Sienna

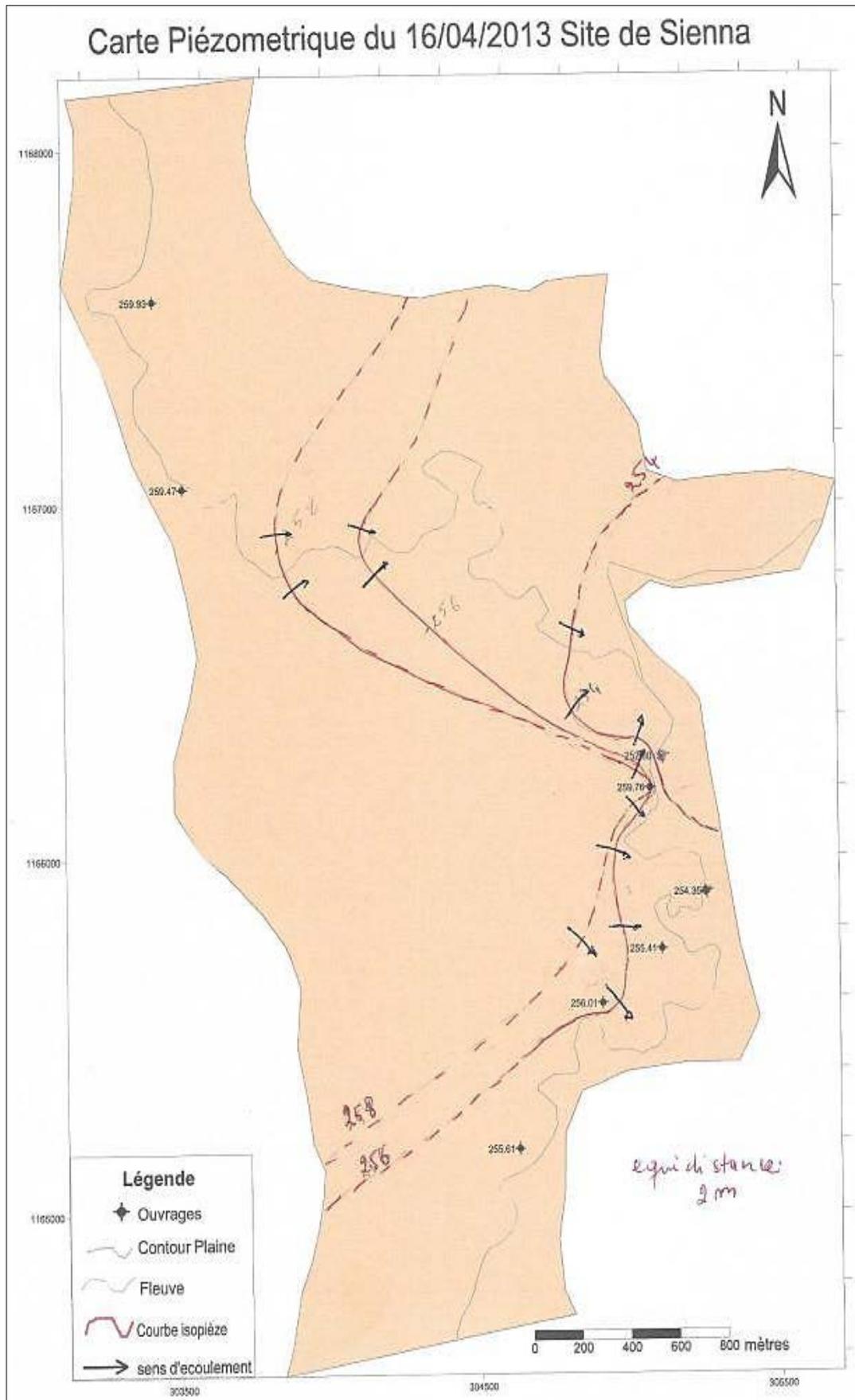


Figure 24: Carte piézométrique du 16 Avril 2013 site de Siniena

➤ Pour le site de Tengrela

La rivière est alimentée par la nappe et l'écoulement est uniformes dans le même sens que la rivière avec un gradient hydraulique moyen de $5,13.10^{-3}m/m$. les limites latérales se comportent comme des limites à flux nul.

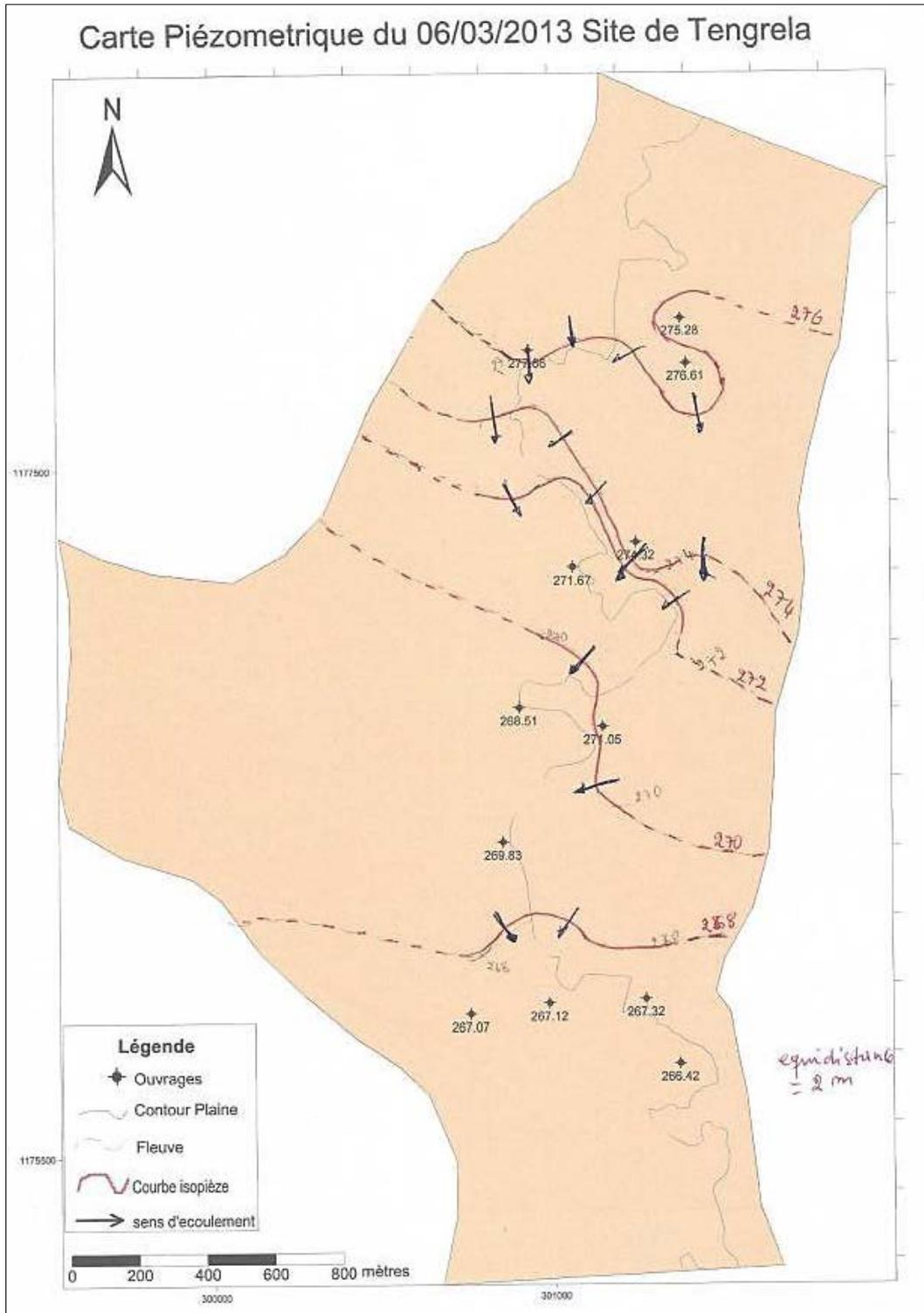


Figure 25 : Carte piézométrique du 06 mars 2013 site de Tengrela

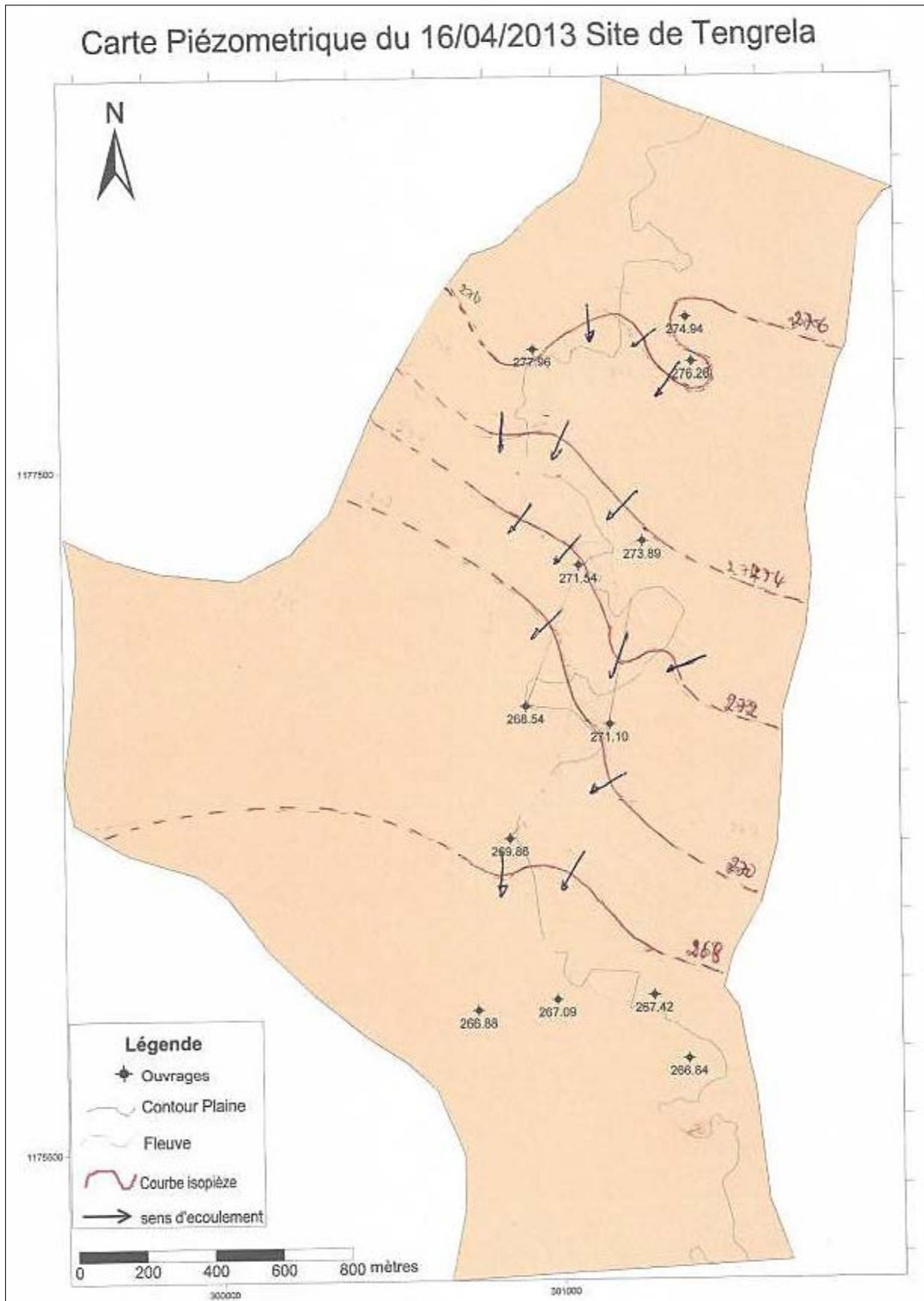


Figure 26 : Carte piézométrique du 16 Avril 2013 site de Tengrela

➤ Pour le site de Karfiguéla

La zone d'extrême Nord apparaît clairement comme une zone de convergence de l'écoulement vers l'axe de la rivière avec un gradient moyen de $2,33 \cdot 10^{-3}$ m/m. La limite Ouest ainsi que celle du Centre-Est se comportent comme des limites à potentiel. La nappe est alimentée du côté ouest par le milieu extérieur. De plus, la décroissance des courbes isopièzes montre une alimentation de la nappe dans le même sens que le fleuve du côté Nord.

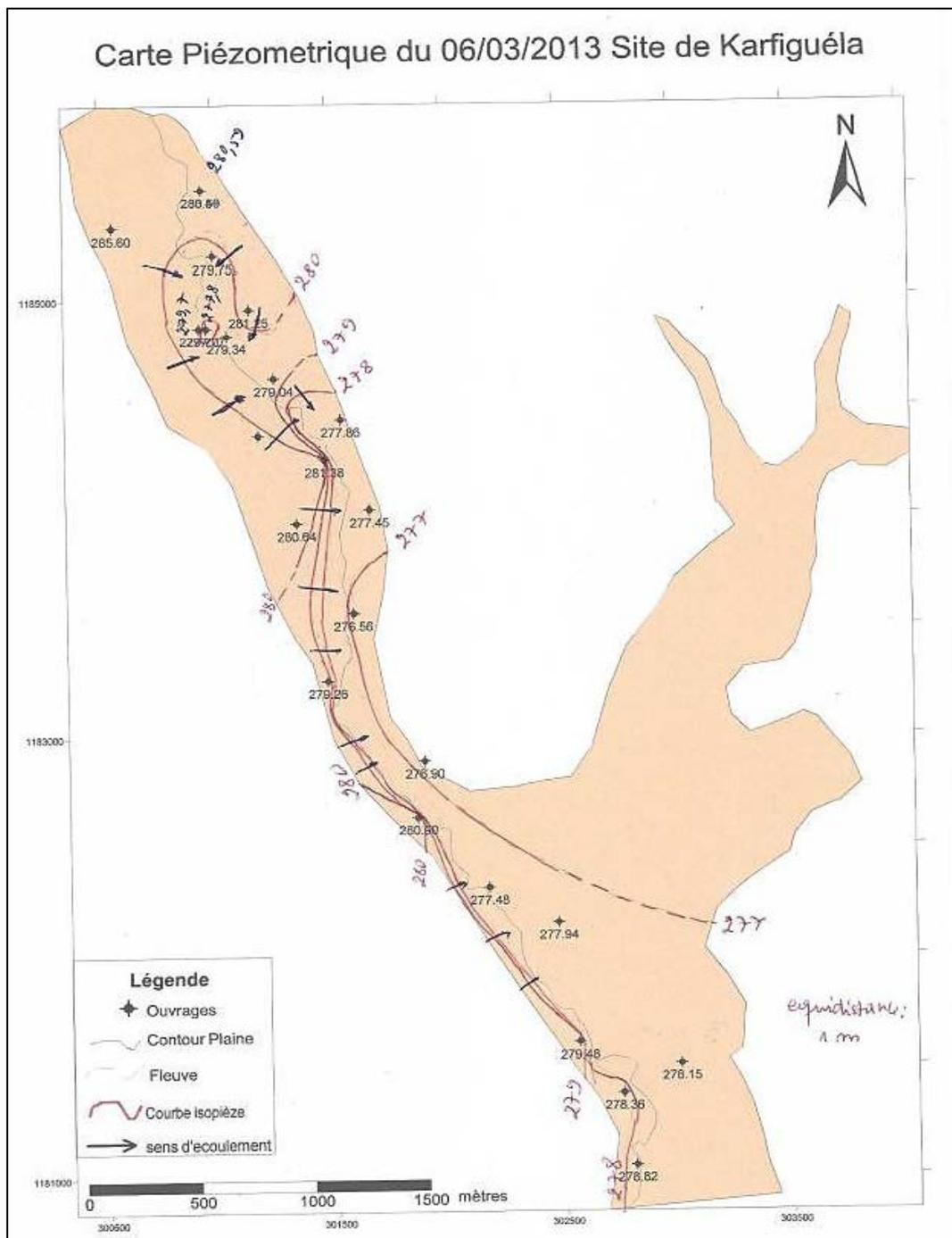


Figure 27 : Carte piézométrique du 16 Avril 2013 site de Karfiguéla

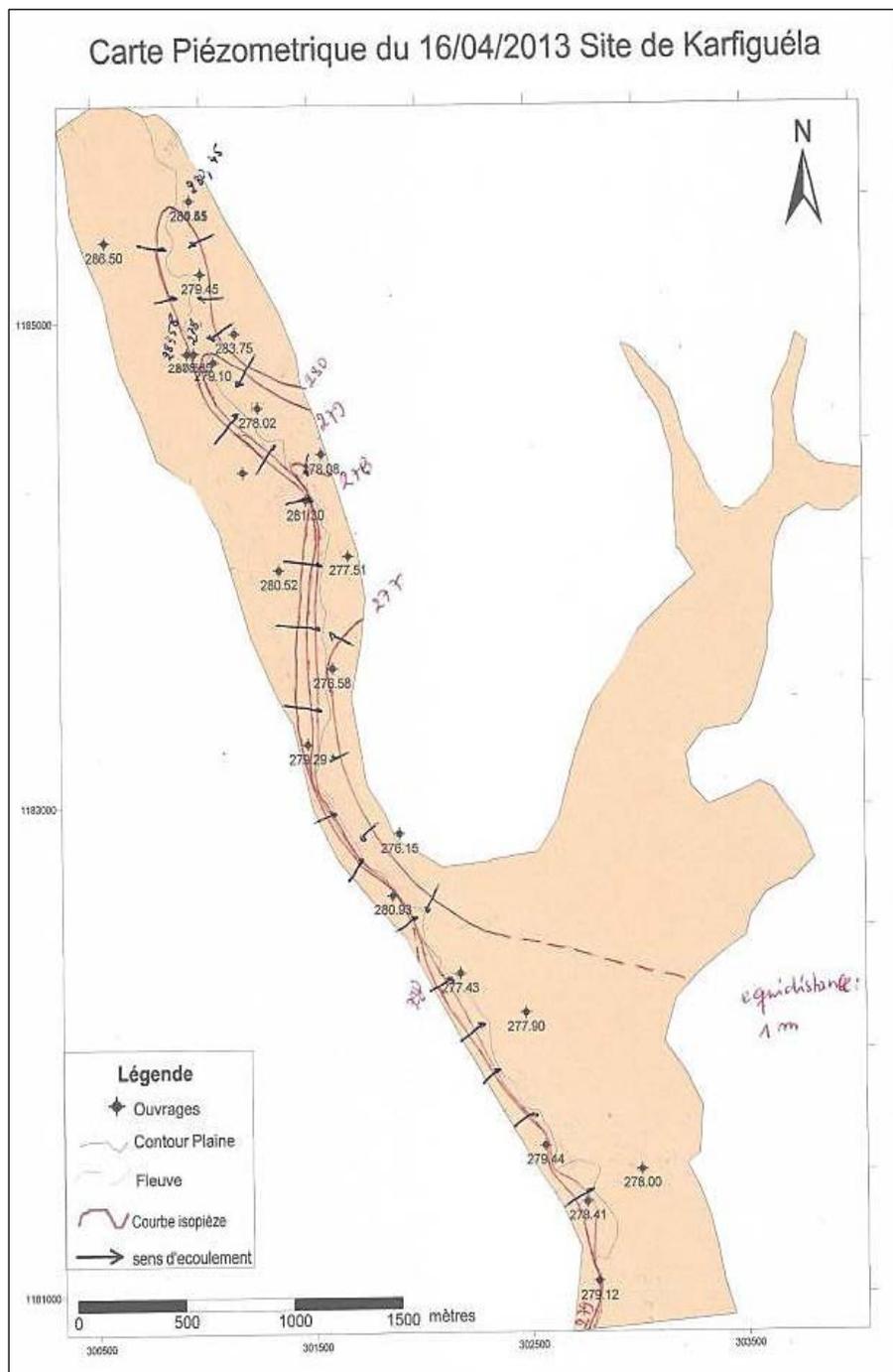


Figure 28 : Carte piézométrique du 06 mars 2013 site de Karfiguéla

➤ Pour le site de Diarabakoko,

L'information obtenue est réduite, néanmoins on remarque que la rivière est alimentée par la nappe en rive Droite.

De manière générale, les écoulements se font de la nappe vers la rivière en suivant le sens d'écoulement de l'eau. La zone de Kaarfiguéla et de Siniena représentent des zones d'échanges

avec le milieu extérieur. Les recharges importantes de la nappe se font à Karfiguéla et Banfora Nord.

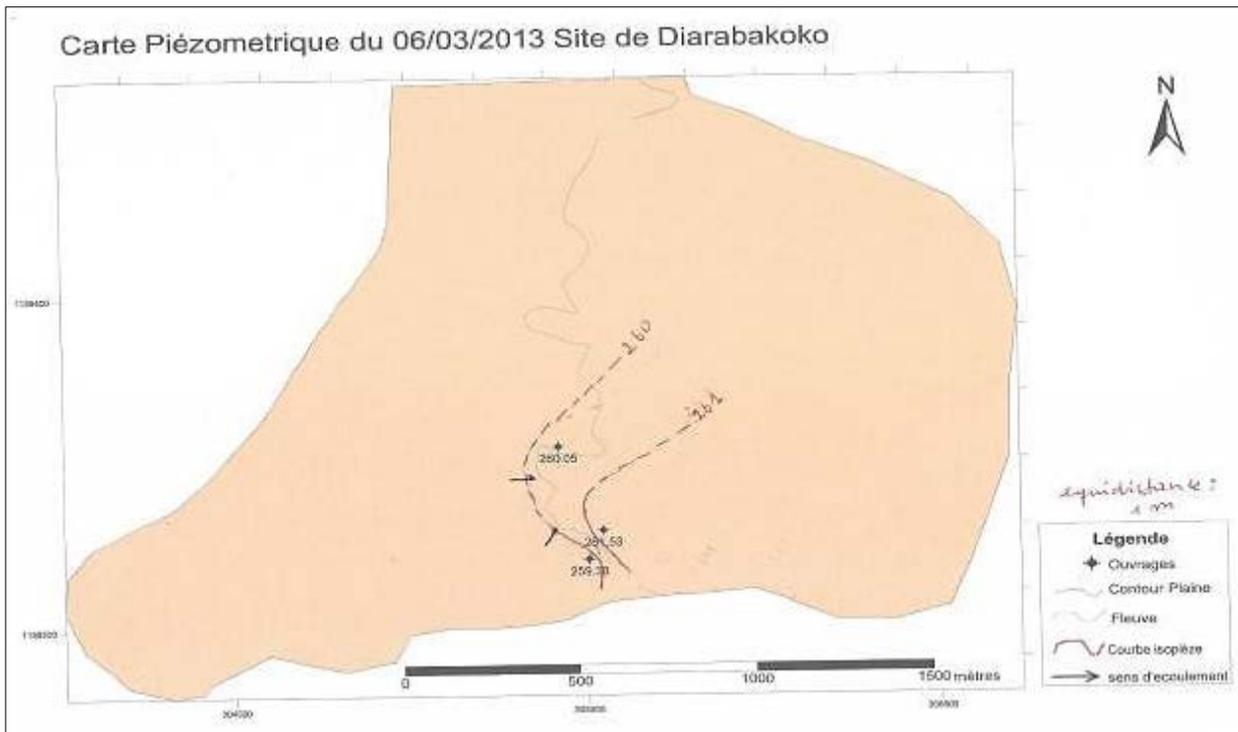


Figure 29 : carte piézométrique du 06 mars 2013 site de Diarabakoko

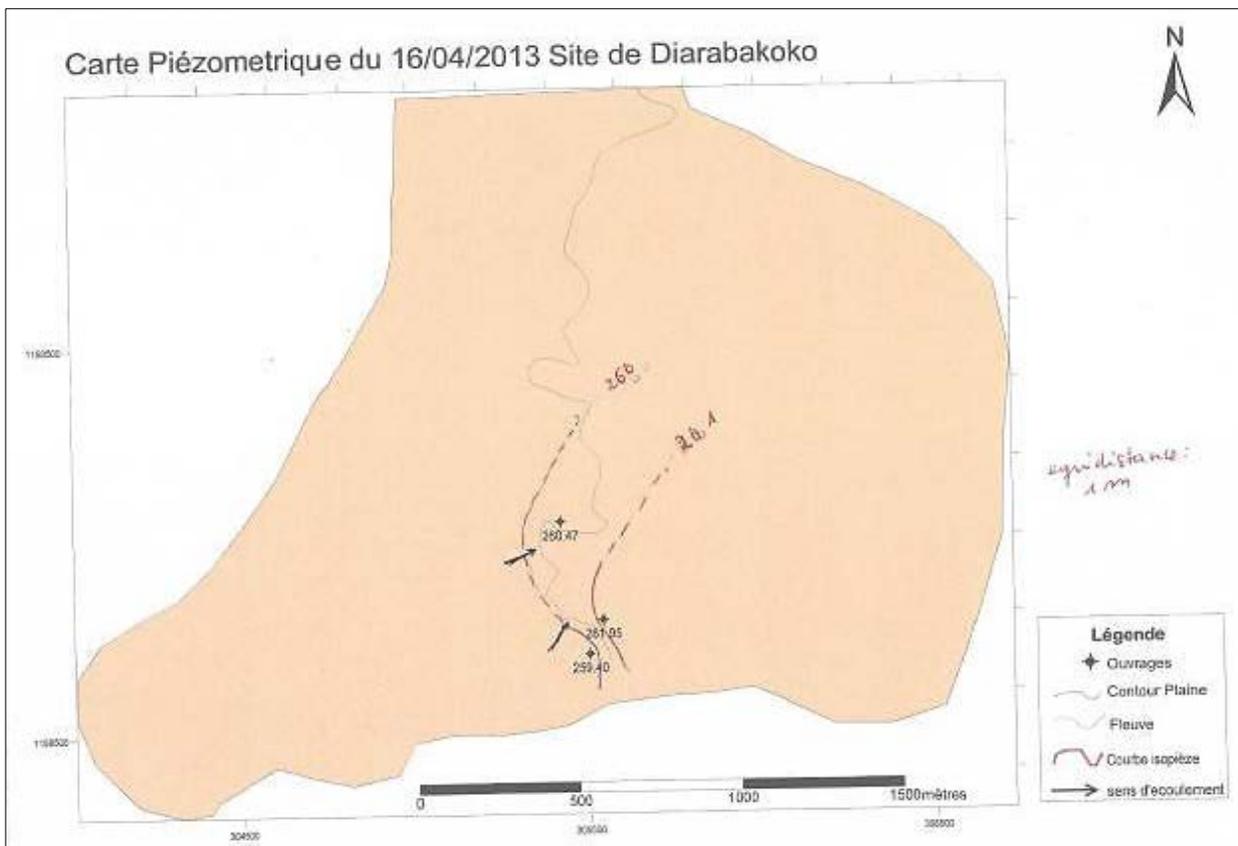


Figure 30 : carte piézométrique du 16 Avril 2013 site de Diarabakoko

IV CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a eu pour objectifs la détermination des paramètres hydrodynamiques et des directions d'écoulement de la nappe de la plaine alluviale de Karfiguéla.

Plusieurs méthodes ont été énumérées et la méthode slug test a été choisie pour la détermination des paramètres hydrodynamiques. Les interprétations de ces essais nous ont permis de déterminer les conductivités hydrauliques pour tous les micropiézomètres ayant fait l'objet des essais.

Les conductivités obtenues représentent les horizons captées par les micropiézomètres. En considérant la puissance de la plaine, les micropiézomètres devraient être plus profonds pour mettre en exergue les propriétés de la plaine dans toute son épaisseur.

Les valeurs obtenues par les essais slug test représentent seulement le matériau à proximité immédiate du puits, elles sont donc des valeurs locales et ne peuvent pas refléter exactement les propriétés de l'aquifère qui s'étend sur une grande dimension. De plus, les interprétations ne donnent pas l'emménagement qui est une propriété fondamentale de l'aquifère.

Pour compléter cette étude, les essais de pompage sont nécessaires afin d'enrichir les informations sur les propriétés de la nappe.

Pour déterminer les directions et les sens d'écoulement de la plaine, les relevés du niveau statique ont été effectués sur deux périodes : le 06 mars 2013 et le 16 Avril 2013. Les niveaux statiques ont permis grâce aux altitudes déterminées avec les levés au DGPS de calculer les niveaux piézométriques. La surface piézométrique qui en découle montre un écoulement général qui se fait du Nord au Centre et du Sud au Centre. La zone centrale représente une zone de drainage de la nappe. Des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer les conditions de la couche drainante et surtout la destination des écoulements. De manière localisée, la nappe alimente la rivière dans tous les sites, ce qui est conforme aux échanges nappe-rivière pendant cette période de l'année.

Les objectifs de cette étude pour sont atteints mais il est à préconiser de passer par des méthodes plus complètes et des ouvrages plus robustes afin de déterminer les informations quant à la productivité de l'aquifère sur toute son épaisseur.

Les données obtenues ouvrent cependant d'autres perspectives d'étude de la plaine alluviale : Elles peuvent servir de données base pour des travaux de modélisation de l'aquifère et d'études de la vulnérabilité de la nappe ou de transfert des polluants.

Nous préconisons, pour la continuité de cette étude d'envisager la même étude en période des hautes eaux afin de déterminer les conditions d'écoulements en cette période. En guise de perspectives, nous proposons de faire l'étude de la relation nappe-rivière en prenant en compte les niveaux d'eau mesurées directement aux endroits des sites des micros piézomètres.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

- BAUDEMONT C. (2011)**, Estimation de la conductivité hydraulique des aquifères à plusieurs échelles : exemples d'aquifères granulaires de la région du Saguenay-Lac-St-Jean, Québec, Projet de fin d'études, Université du Québec à Chicoutimi, Québec.
- Bouwer H. and Rice R. C. (1976)**, A Slug Test for Determining Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers With Completely or Partially Penetrating Wells, *Water Resources Research*, 12(3), 423-428.
- Bouwer, H. (1989)**, the Bouwer and Rice Slug Test - An Update, *Ground Water*, v. 27, no 3, 304-309.
- Campbell M D., Starrett M. S., (1990)**, slug tests and hydraulic conductivity
- CASSAN M. (2005)**. Les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols, nouvelle édition, Presses des Ponts et Chaussées.
- Castany G. (1962)**. Méthodes d'études et de recherches des nappes aquifères, *Publida*, 55-67.
- Chapuis R. P. (1999)**, Guide des essais pompage et leurs interprétations, *Publications du Québec*, Ministère de l'environnement, & Québec (Province). Service des pesticides et des eaux souterraines, Québec (Province).
- Compaoré N. F (2012)**, Caractérisation hydrogéologique des plaines alluviales dans la région des cascades, Juillet
- Cooper Jr, H. H., Bredehoeft, J. D. et Papadopoulos, I. S. (1967)**, Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research*, 3(1), 263-269.
- FAO. (2004)**, L'eau, l'agriculture et l'alimentation : Une contribution au Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau, 16-26.
- Fontes J. et Guinko S (1995)**, carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso : Notice explicative, Toulouse: Ministère de la Coopération Française 66, 1.
- GIRE Burkina. (2001)**. État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion.
- Holmes R.R., Jr. Terrio P.J., Harris M.A. et Mills P.C. (2001)**, Introduction to Field Methods for Hydrologic and Environmental Studies, *U.S. Geological Survey Open-File Report* 01-50
- HUGOT G. (2002)**, à la recherche du Gondwana perdu : aux origines du monde.

- Hvorslev M. J. (1951)**, time lag and soil permeability in ground-water observations: Bulletin no. 36, *Waterways experiment station corps of engineers, U. S. army*, Vicksburg, Mississippi, 1-50.
- Lefranc E. (1937)**, La théorie des poches absorbantes et son application à la détermination du coefficient de perméabilité en place et au calcul du débit des nappes d'eau. *Le Génie Civil*, CXI(20): 409-4 13
- Lefranc. E. (1936)**, Procédé de mesure de la perméabilité des sols dans les nappes aquifères et application au calcul du débit des puits. *Le Génie Civil*, CIX(15): 306-308.
- Mermoud, A. (2006)**, Dynamique de l'eau du sol : Cours de Physique du sol. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Oosterbaan R. J., et Nijland H. J. (1986)**, Chapter 12: Determining the Saturated Hydraulic Conductivity.
- OUEDRAOGO C. (2006)**, Synthèse géologique de la région Ouest du Burkina Faso, Octobre.
- Papadopulos S. S., Bredehoeft J. D., et Cooper H. H. (1973)**, On the analysis of 'slug test' data. *Water Resources Research*, 9(4), 1087-1089.
- Strickland T. et Korleski C. (2006)**, Pumping and Slug Tests CHAPTER 4: Technical Guidance Manual for Ground Water Investigations, Ohio Environmental Protection Agency, Division of Drinking and Ground Waters, Columbus, Ohio.
- Yeh H. D et Chen Y. J. (2007)**, Determination of skin and aquifer parameters for a slug test with wellbore-skin effect *Journal of Hydrology*, 342(3), 283-294.
- Zella L. et Smadhi D. (2007)**. Evolution de l'irrigation, *Larhyss Journal*, 6, 65-80.

Sites internet

- GPS différentiel.** (2013) Dans *Wikipédia*. Consulté le 26 mai 2013. Tiré de http://fr.wikipedia.org/wiki/GPS_différentiel
- How to calculate Hydraulic conductivity By Chris Garrick, eHow Contributor.** Consulté le 18 avril 2013. Tiré de http://www.ehow.com/print/how_7927177_calculate-hydraulic-conduct
- Plaine alluviale.** (2013) Dans *Wikipédia*. Consulté le 13 mars 2013. Tiré de http://fr.wikipedia.org/wiki/Plaine_alluviale

V ANNEXES

Annexe I: Stations du DGPS

Annexe II: Conductivités Hydrauliques obtenues

Annexe III: Niveaux piézométriques obtenus

Annexe V: Courbes de remontée des micropiédomètres

Annexe VI: Coupe technique des micropiédomètres

Annexe VI: Données pluviométriques de la station de Banfora. Source : DRAHRH/CAS

Annexe I Stations du DGPS

Mobile



Base



Annexe II Conductivités Hydrauliques obtenues

Lieux	Micro piézomètres	pente graphique (p)	coefficient de forme (c)	coefficient t A	coefficient B	K (m.s ⁻¹)	
						Méthode de Hvorslev	Méthode de Bouwer et Rice
Karfiguéla	PZRG12	0,4255	5,3565	3,40	0,60	5,05E-04	1,27E-04
	PZRG11	0,5405	3,6650	2,70	0,45	9,38E-04	2,29E-04
	PRG10	0,2410	2,8749	2,10	0,30	5,33E-04	1,33E-04
	PZRG7	0,6250	6,3919	3,80	0,70	6,22E-04	1,58E-04
	PZRG6	0,3077	5,1988	3,30	0,60	3,77E-04	9,53E-05
	PZRG2	0,8333	2,8749	2,25	0,38	1,84E-03	4,31E-04
	PZRG5	0,1031	3,8592	2,70	0,45	1,70E-04	1,37E-05
	PZRG4	0,1020	5,4126	3,50	0,60	1,20E-04	3,04E-05
	PZRG13	0,0990	5,0856	3,25	0,65	1,24E-04	3,06E-05
	PZRG9	0,1053	3,0354	2,20	0,30	2,21E-04	5,63E-05
	PZRG3	0,0106	2,8101	2,30	0,38	2,41E-05	5,51E-06
	PZRD4	0,1333	5,9888	3,70	0,65	1,42E-04	3,60E-05
	PZRD3	0,0017	5,8899	3,55	0,65	1,88E-06	4,78E-07
	PZRD2	0,0031	4,8116	3,10	0,52	4,11E-06	1,05E-06
	PZRD8	0,0119	5,9998	3,70	0,60	1,26E-05	3,21E-06
	PZRD9	0,0885	4,4174	3,00	0,50	1,27E-04	3,22E-05
	PZRD10	0,0025	5,3901	3,45	0,55	2,95E-06	7,55E-07
	PZRD11	0,0667	5,8899	3,60	0,63	7,20E-05	1,83E-05
	PZRD12	0,0556	5,3565	3,45	0,55	6,60E-05	1,68E-05
PZRG1	0,0001	4,1107	2,80	0,40	2,04E-07	5,26E-08	
PZRD13	0,1176	5,4909	3,50	0,60	1,36E-04	3,44E-05	
Diarabako ko	PZRGX5	0,0370	4,5690	3,10	0,50	1,29E-05	1,06E-05
	PZRGX4	0,5000	5,7741	3,60	0,63	2,45E-06	6,14E-07
	PZRD7	0,0008	4,9261	3,30	0,60	9,75E-07	2,39E-07
Tengrela	PZRG A	0,0000	3,8230	2,70	0,45	3,96E-08	9,74E-09
	PZRG B	0,0667	4,7079	3,10	0,50	9,01E-05	2,27E-05
	PZRG D	0,1111	2,6530	2,10	0,30	2,66E-04	6,24E-05
	PZRG E	0,0667	5,6689	3,30	0,60	7,48E-05	1,90E-05
	PZRG F	0,0328	3,9914	2,75	0,45	5,23E-05	1,30E-05
	PZRDA	0,0741	2,4400	2,10	0,30	1,93E-04	4,31E-05
	PZRDB	0,0392	5,1536	3,40	0,60	4,84E-05	1,22E-05
	PZRDC	0,0562	6,1856	3,60	0,60	5,78E-05	1,50E-05
	PZRDD	0,0357	2,6332	2,10	0,38	8,63E-05	1,93E-05
	PZRDE	0,0035	3,0927	2,40	0,38	7,22E-06	1,74E-06
	PZRDF	0,0980	3,9674	2,90	0,90	1,57E-04	3,32E-05
PZR DG	0,0571	4,3118	2,95	0,45	8,43E-05	2,16E-05	
Banfora Nord	PZRD X2	0,0408	6,8005	4,10	0,65	3,82E-05	9,80E-06
	PZRD X1	0,1333	5,8348	3,40	0,60	1,45E-04	3,75E-05
Siniena	PZRG X3	0,0001	6,2454	3,80	0,65	1,50E-07	3,84E-08

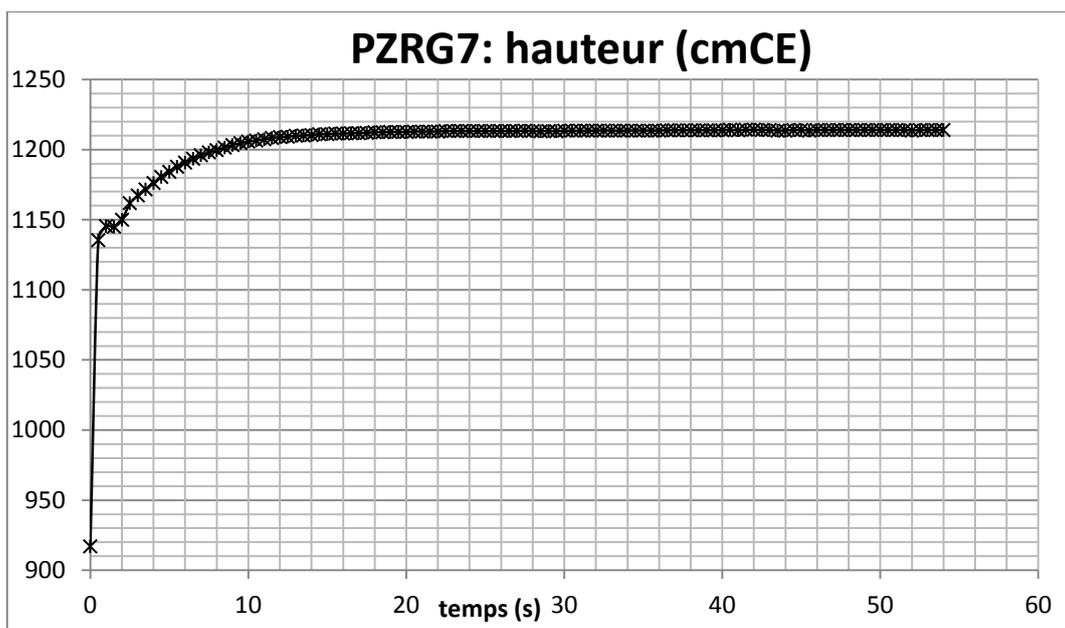
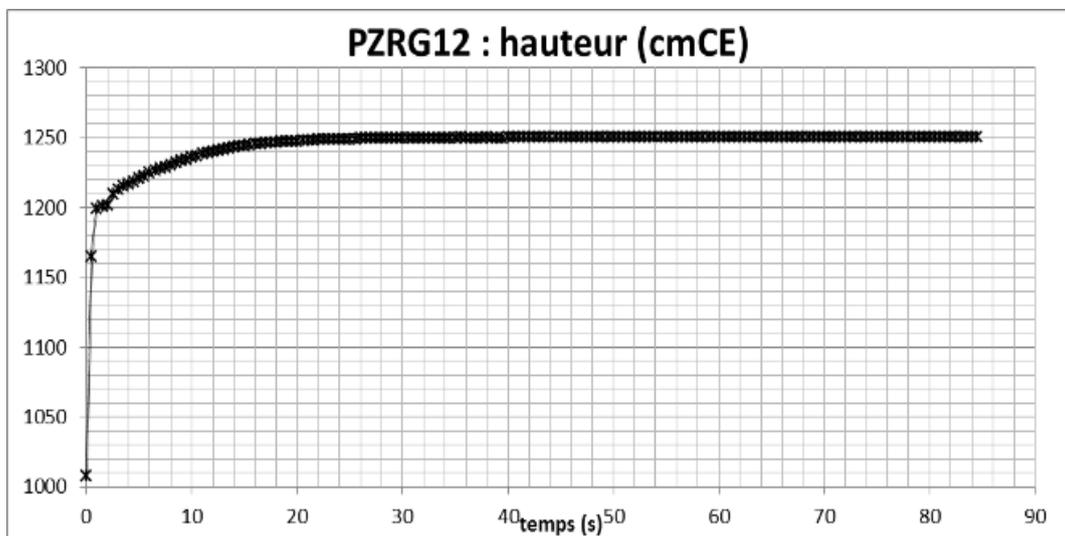
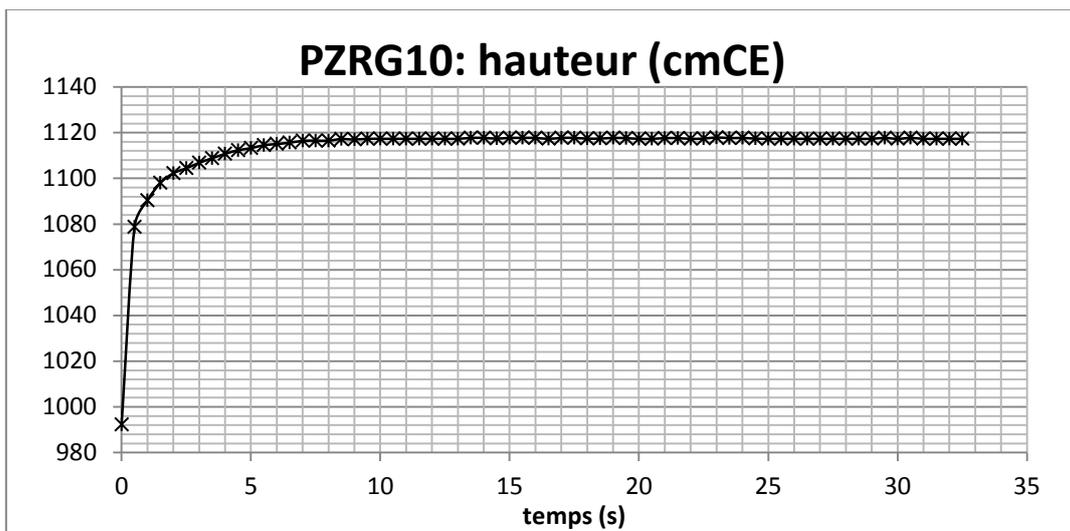
PZRGX2	0,0532	4,7310	3,10	0,50	7,15E-05	1,84E-05
PZRDX8	0,0003	5,5800	3,10	0,60	3,54E-07	9,20E-08
PZRDX4	0,0253	6,1201	3,60	0,60	2,63E-05	6,83E-06
PZRDX5	0,0444	4,3940	2,95	0,45	6,43E-05	1,66E-05
PZRDX6	0,0247	5,5355	3,10	0,60	2,84E-05	7,37E-06
PZRDX3	0,0565	5,1875	4,10	0,65	6,93E-05	1,67E-05
PZRGX1	0,0204	5,6356	4,10	0,65	2,30E-05	5,67E-06

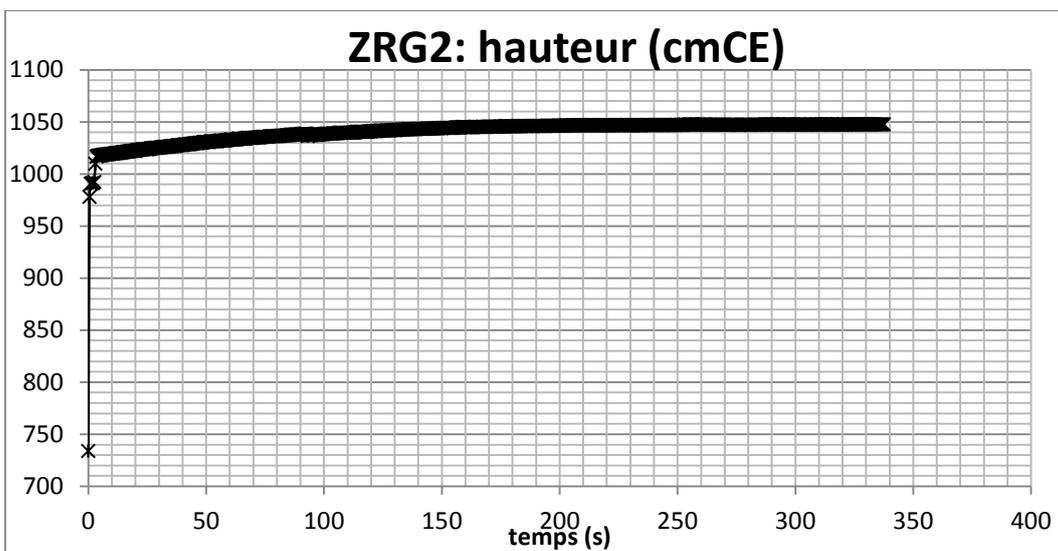
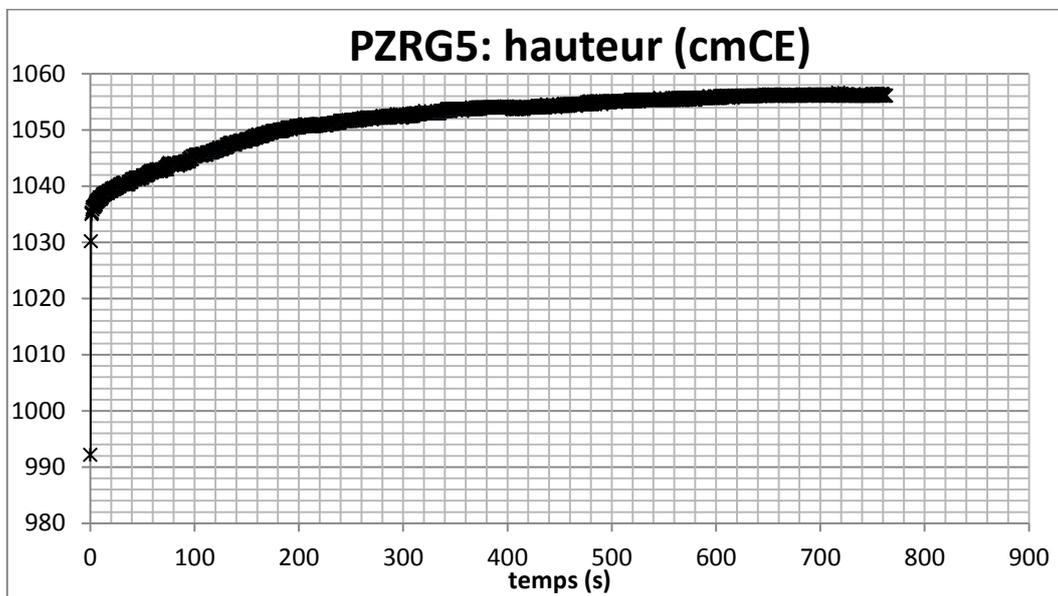
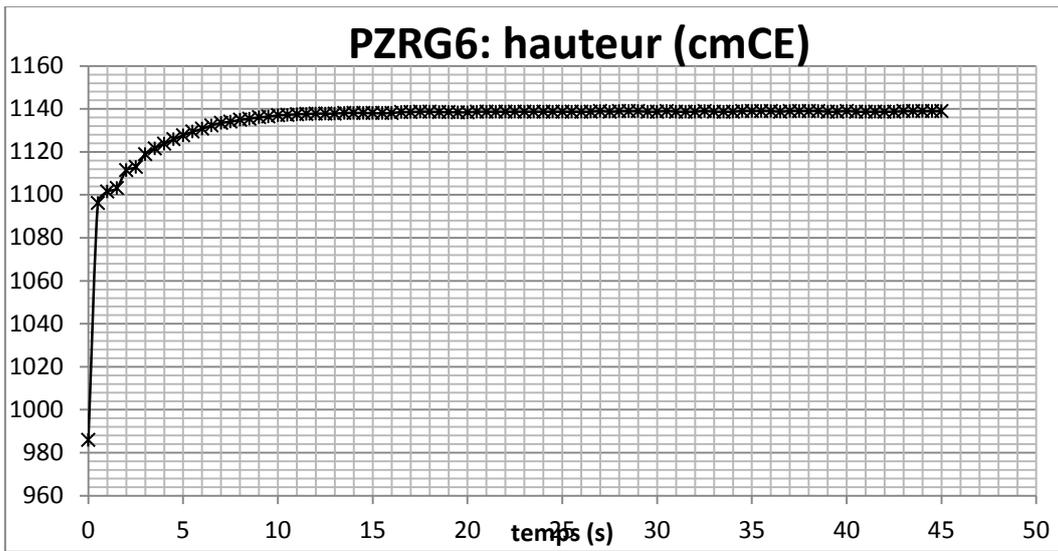
Annexe III Niveaux piézométriques obtenus

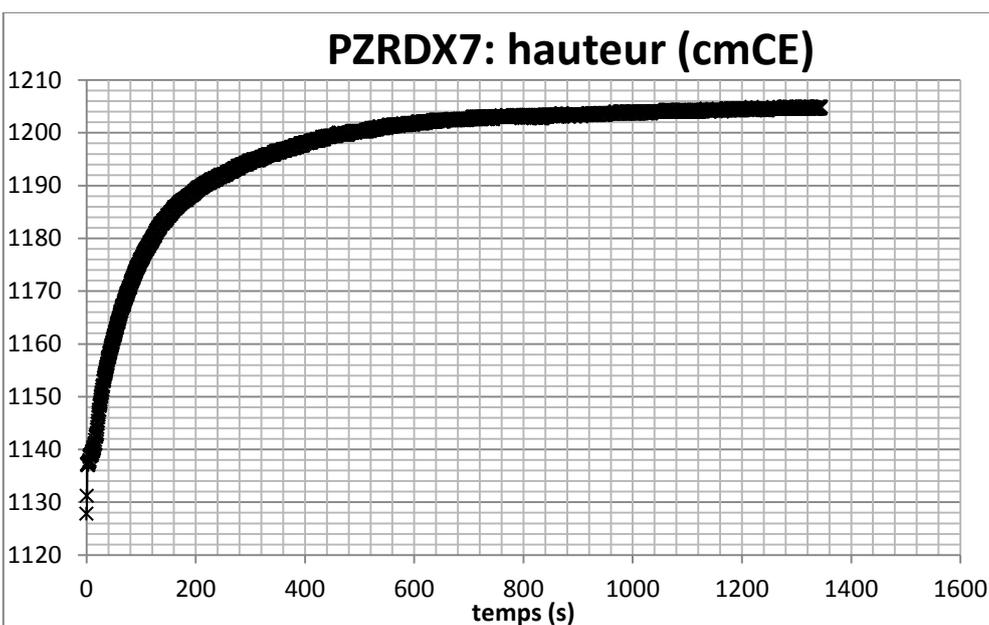
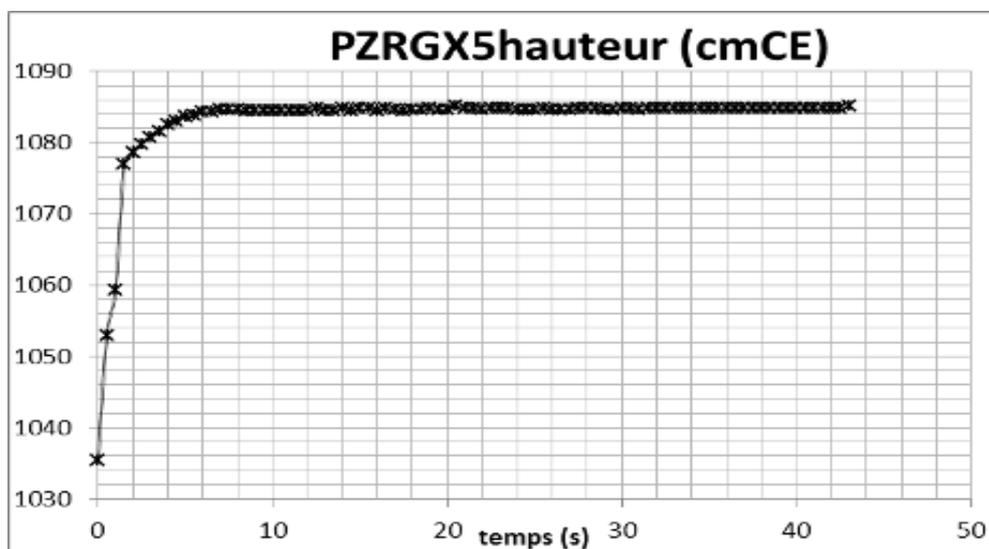
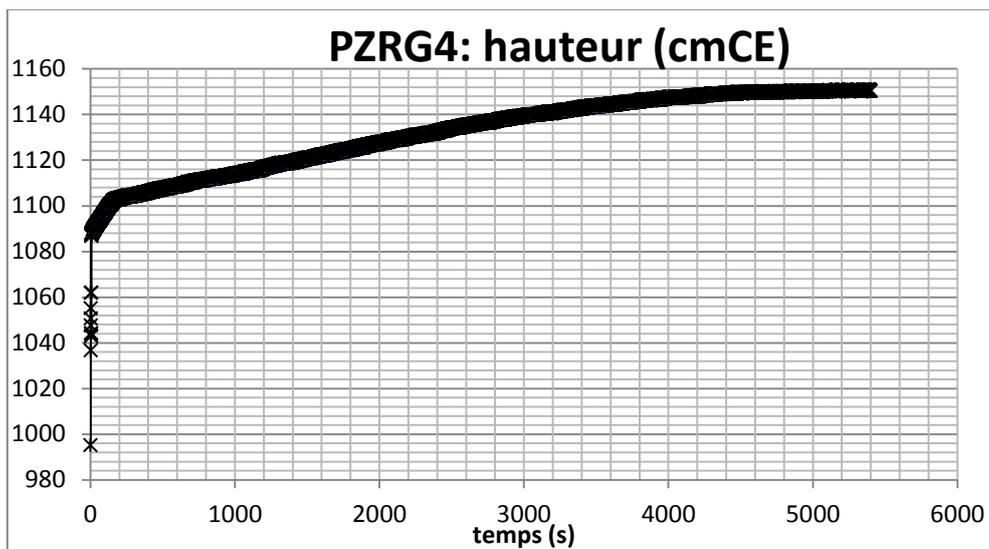
Lieux	Micro piézomètres	X (m)	Y (m)	Altitude TN (m)	Niveaux Piézométriques (m) 06/03/2013	Niveaux Piézométriques (m) 16/04/2014
Karfiguéla	PZRG12	302478,10	1182149,81	278,85	277,94	277,90
	PZRG11	302176,81	1182310,07	279,95	277,48	277,43
	PRG10	301901,21	1182887,48	278,84	276,90	276,15
	PZRG7	301676,70	1184033,36	279,08	277,45	277,51
	PZRG6	301554,52	1184446,11	280,43	277,86	278,08
	PZRG2	301003,41	1185187,91	282,33	279,75	279,45
	PZRG5	301264,48	1184637,33	281,77	279,04	278,02
	PZRG4	301060,89	1184833,60	280,54	279,34	279,10
	PZRG13	303008,68	1181507,06	279,87	278,15	278,00
	PZRG9	301599,07	1183565,52	278,50	276,56	276,58
	PZRG3	301159,31	1184953,71	283,80	281,25	283,75
	PZRD4	300940,83	1184869,28	281,56	279,70	280,58
	PZRD3	300971,96	1184869,81	281,56	277,77	278,65
	PZRD2	300561,16	1185317,57	286,80	285,60	286,50
	PZRD8	301356,71	1183973,50	282,60	280,64	280,52
	PZRD9	301482,98	1183255,66	281,59	279,26	279,29
	PZRD10	301868,19	1182633,58	282,06	280,90	280,93
	PZRD11	302562,46	1181607,03	280,50	279,48	279,44
	PZRD12	302753,97	1181375,11	279,87	278,36	278,41
	Diarabakoko	PZRG1	300954,94	1185488,55	283,56	280,59
PZRD1		300954,94	1185488,55	283,56	283,46	284,51
PZRD6		301193,18	1184373,64	285,58		
Tengrela	PZRD7	301481,84	1184260,73	284,24	281,38	281,30
	PZRD13	302804,64	1181048,13	280,48	278,82	279,12
	PZRGX5	305424,76	1159044,16	262,68	260,05	260,47
	PZRGX4	305547,24	1158791,29	262,80	261,53	261,95
	PZRDX7	305507,37	1158703,64	260,65	259,38	259,40
	PZRG A	301386,18	1177938,66	277,61	275,28	274,94
	PZRG B	301402,23	1177803,78	278,08	276,61	276,27
	PZRG D	301252,47	1177283,39	275,92	274,32	273,89
	PZRG E	301149,34	1176748,02	273,15	271,05	271,10
	PZRG F	301271,37	1175955,00	269,35	267,32	267,42
	PZRDA	301370,38	1175767,91	268,72	266,42	266,84
	PZRDB	300987,15	1175942,92	268,73	267,12	267,09
PZRDC	300755,47	1175913,06	268,25	267,07	266,88	
PZRDD	300853,90	1176413,91	272,01	269,83	269,86	
PZRDE	300904,47	1176803,15	270,76	268,51	268,54	
PZRDF	301064,67	1177212,34	273,81	271,67	271,54	

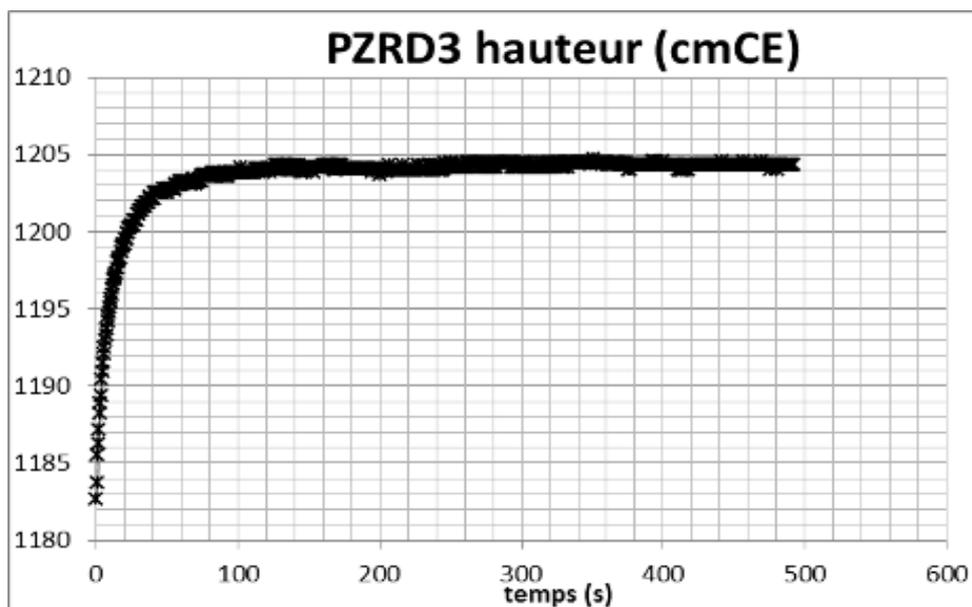
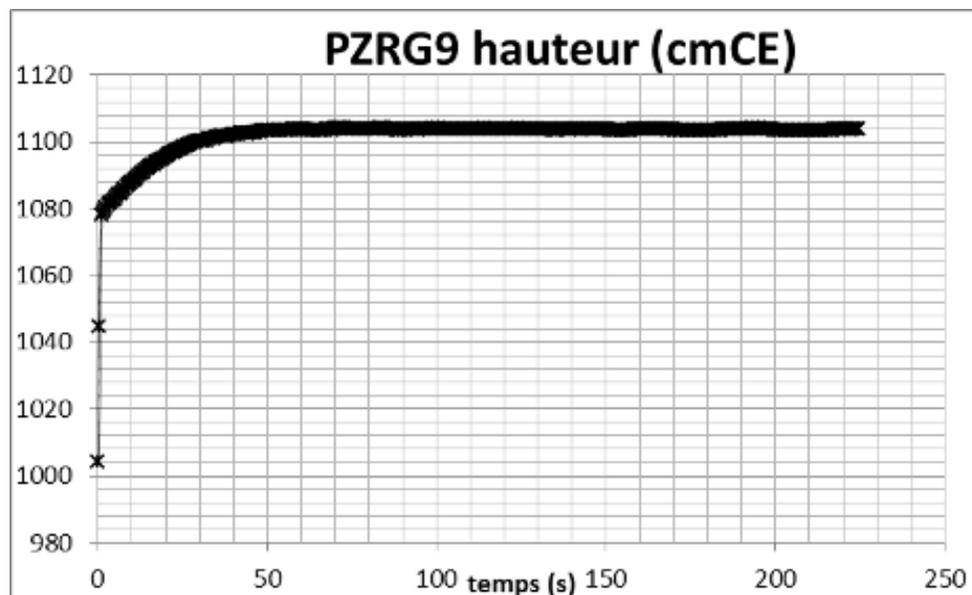
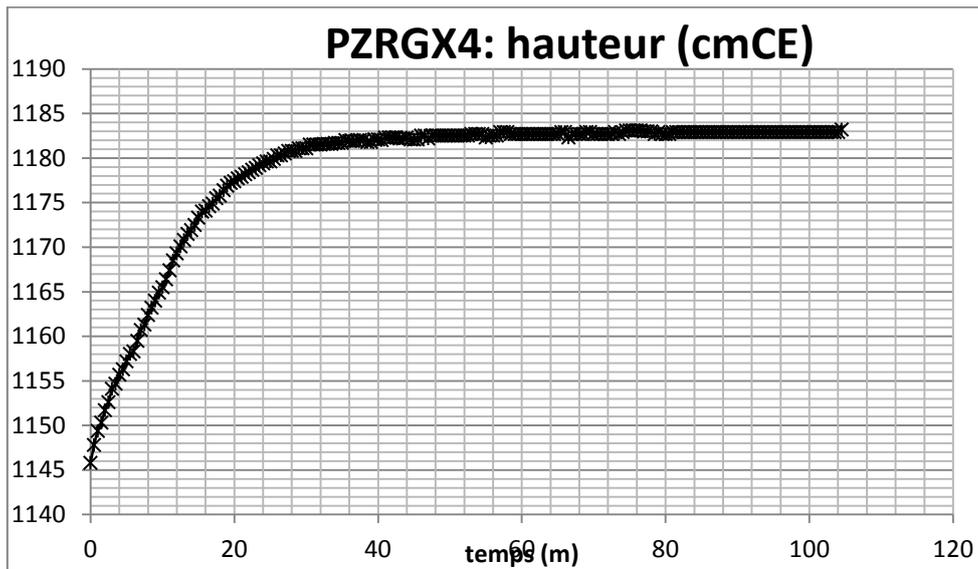
	PZRDG	300938,05	1177842,12	280,20	277,86	277,96
Banfora Nord	PZRDX2	311882,72	1185604,99	282,42	285,89	286,10
	PZRDX1	310797,25	1185119,68	286,39	281,10	281,31
Siniena	PZRGX3	305260,34	1165897,50	257,76	254,43	254,35
	PZRGX2	305100,85	1166283,55	255,45	252,76	252,80
	PZRDX8	305076,23	1166195,75	256,10	254,13	259,76
	PZRDX4	305111,61	1165738,42	256,90	255,37	255,42
	PZRDX5	304912,98	1165585,35	258,04	255,99	256,01
	PZRDX6	304632,45	1165178,60	257,68	255,82	255,61
	PZRDX3	303526,59	1167046,31	261,72	259,34	259,47
	PZRGX1	303432,71	1167569,67	261,85	260,00	259,93

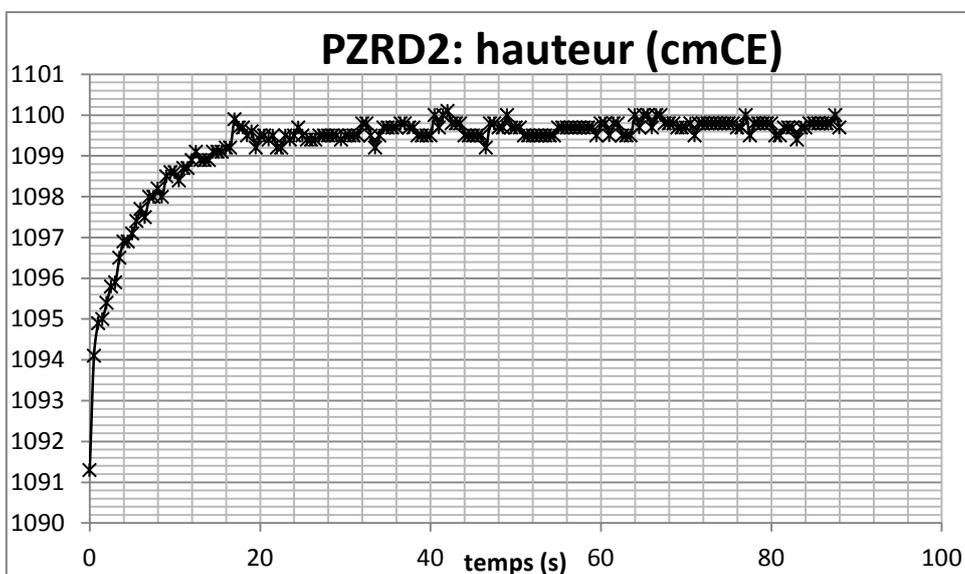
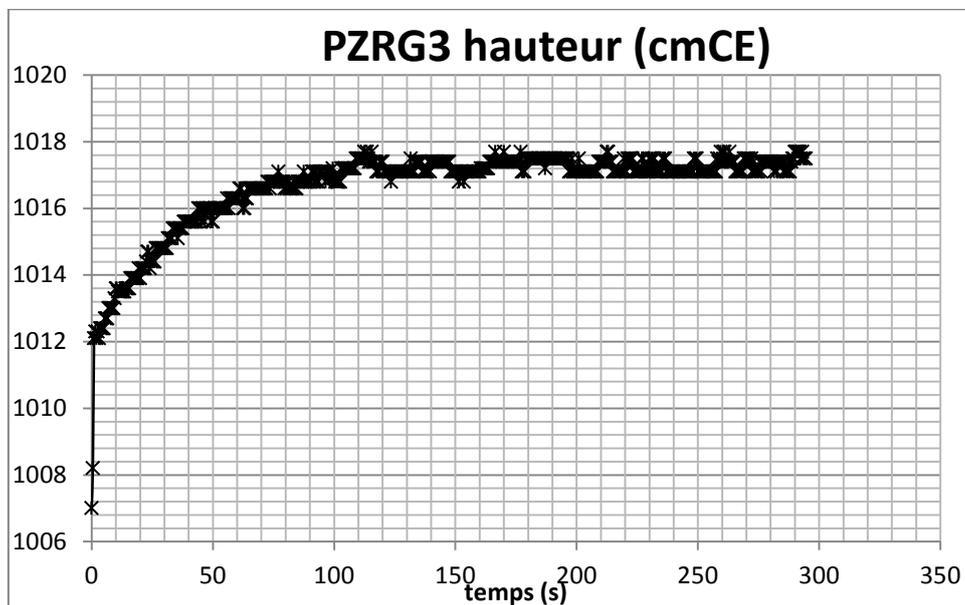
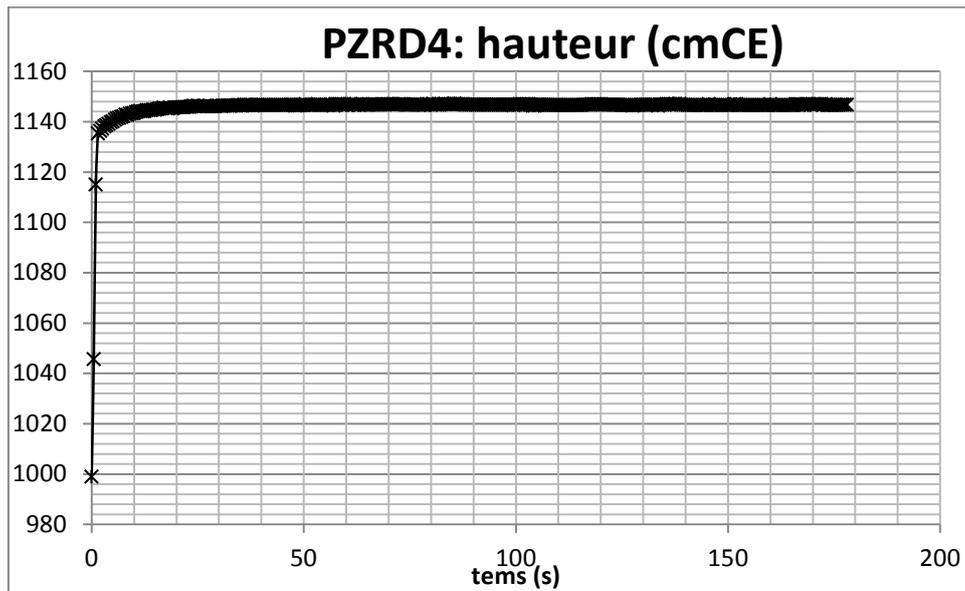
Annexe IV Courbes de remontée des micropiézomètres

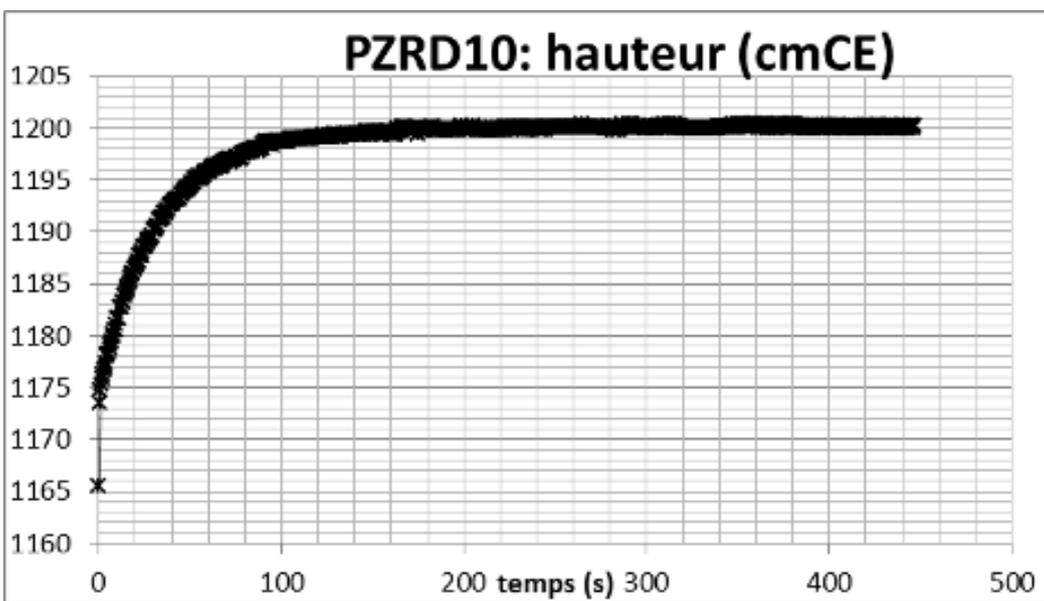
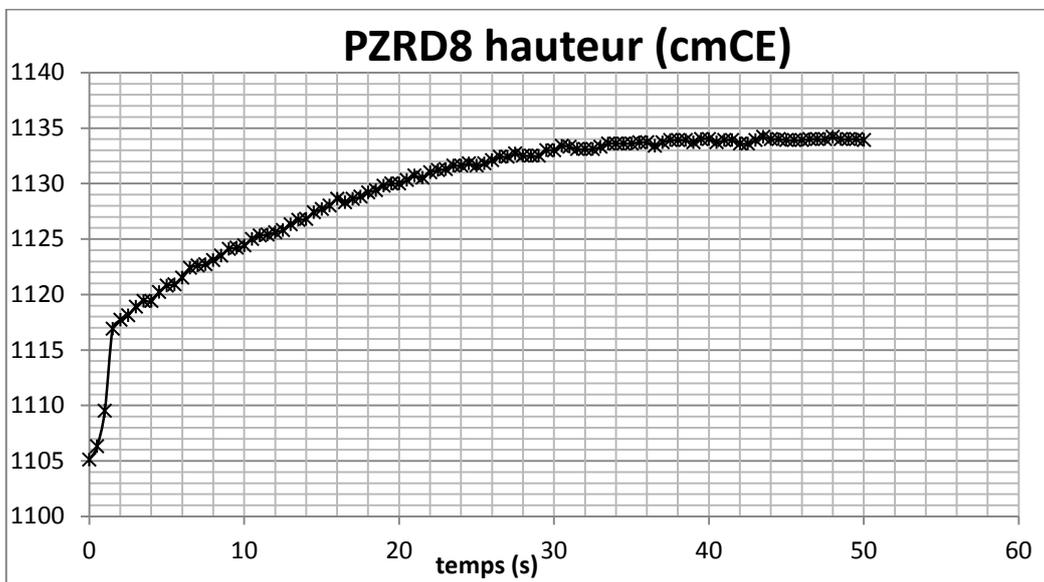
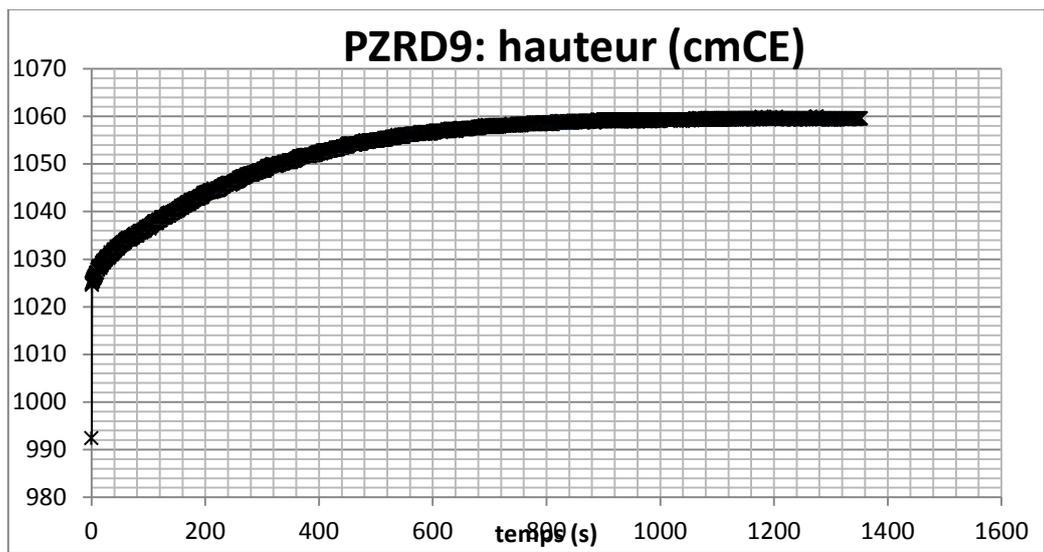


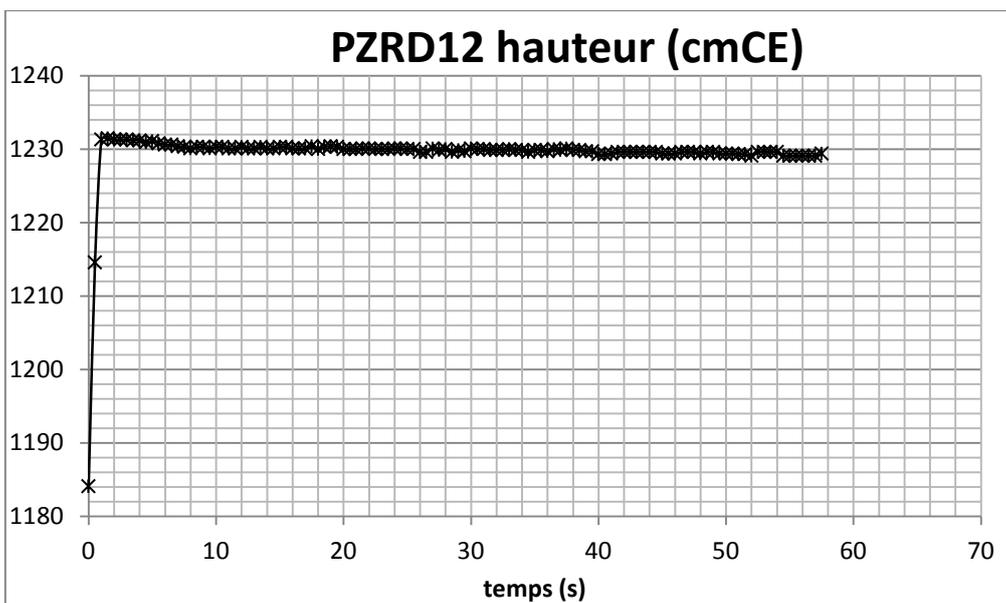
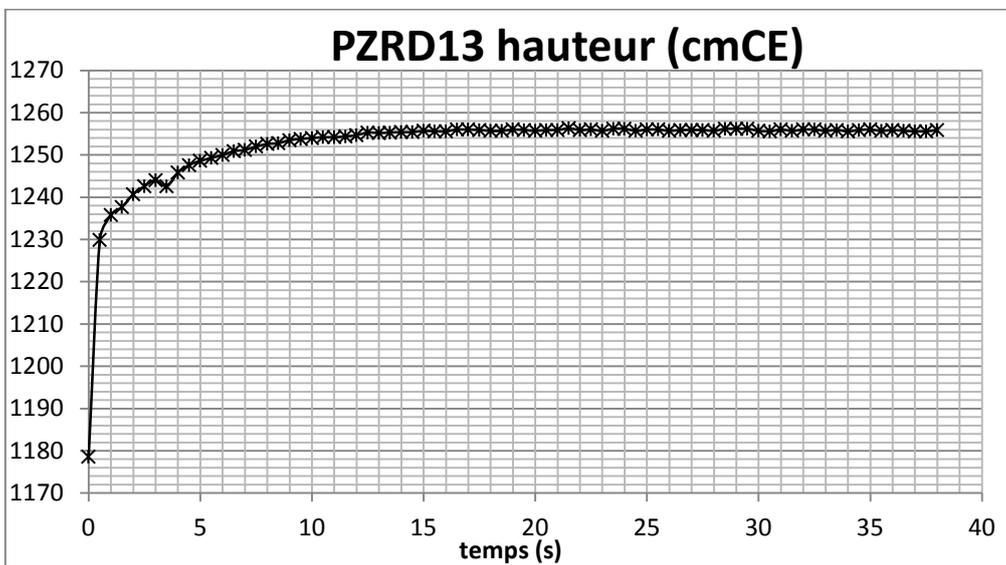
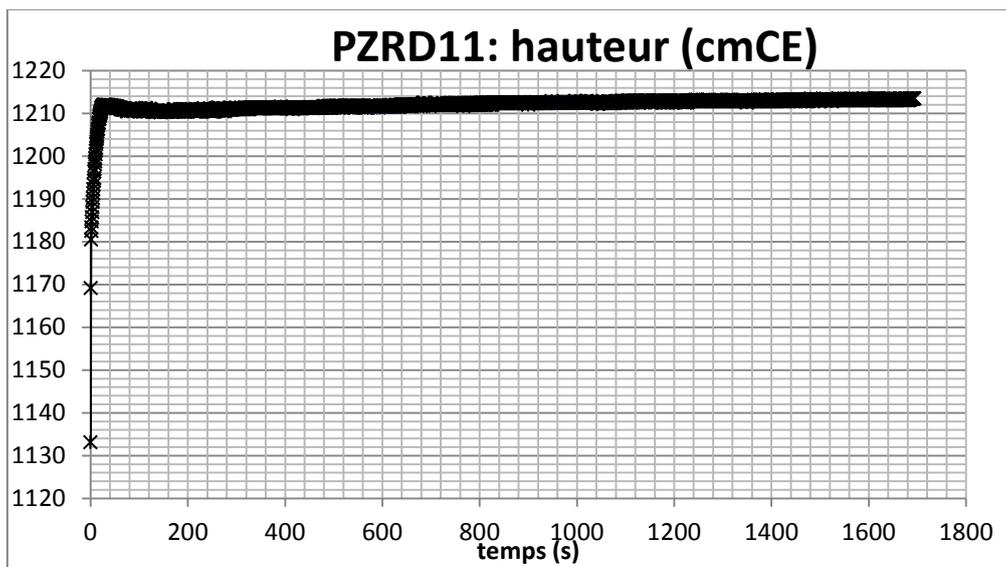


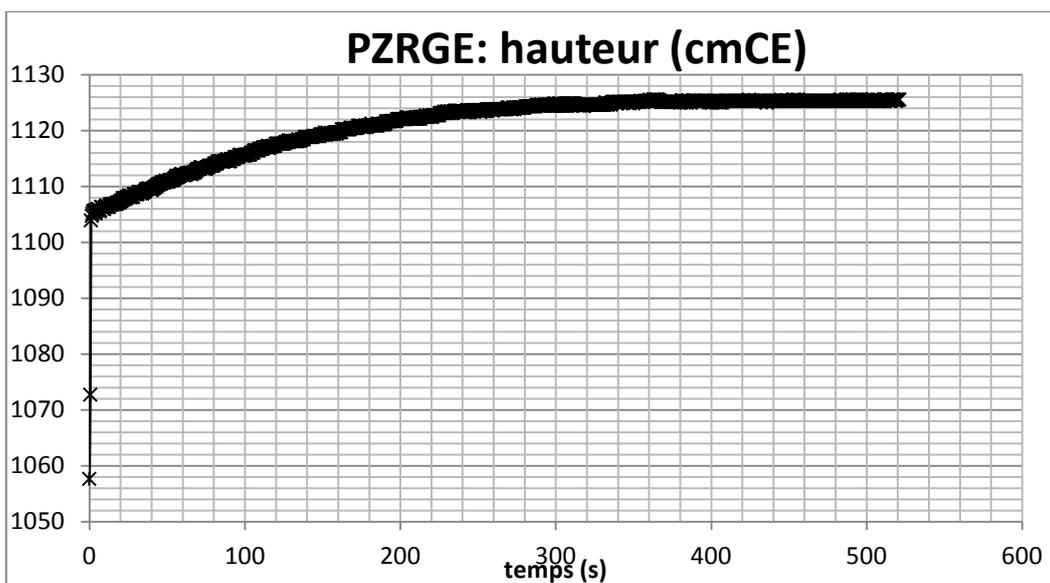
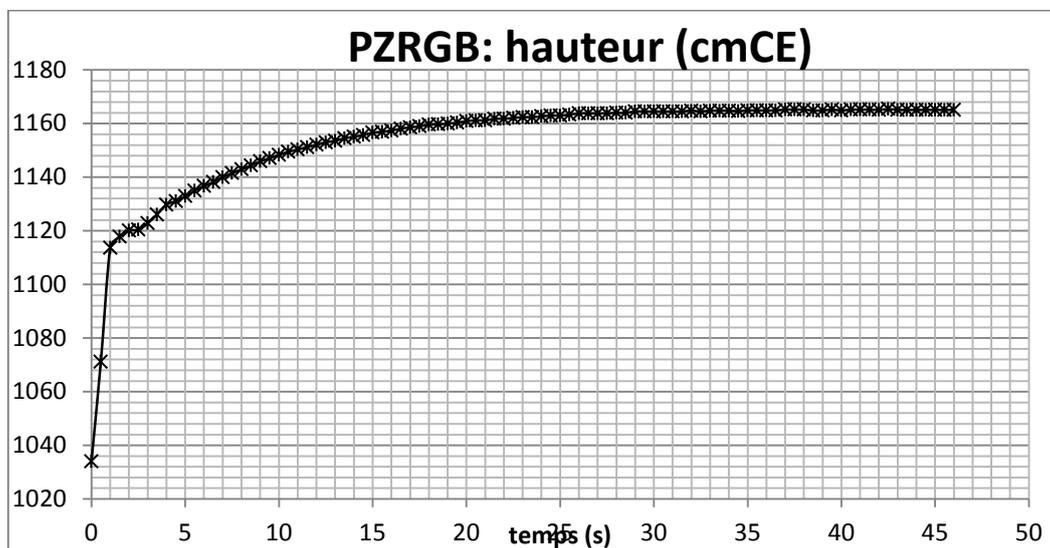
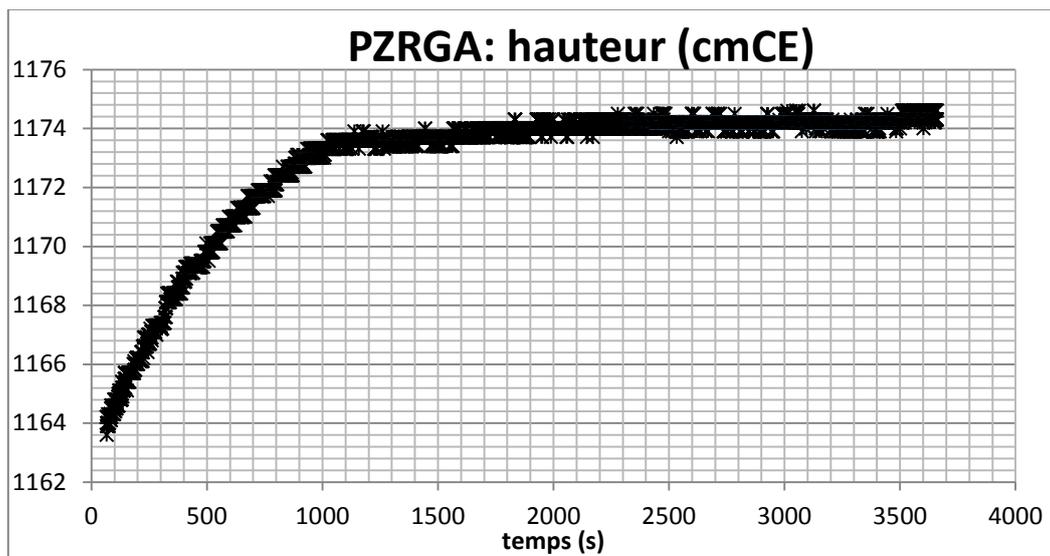


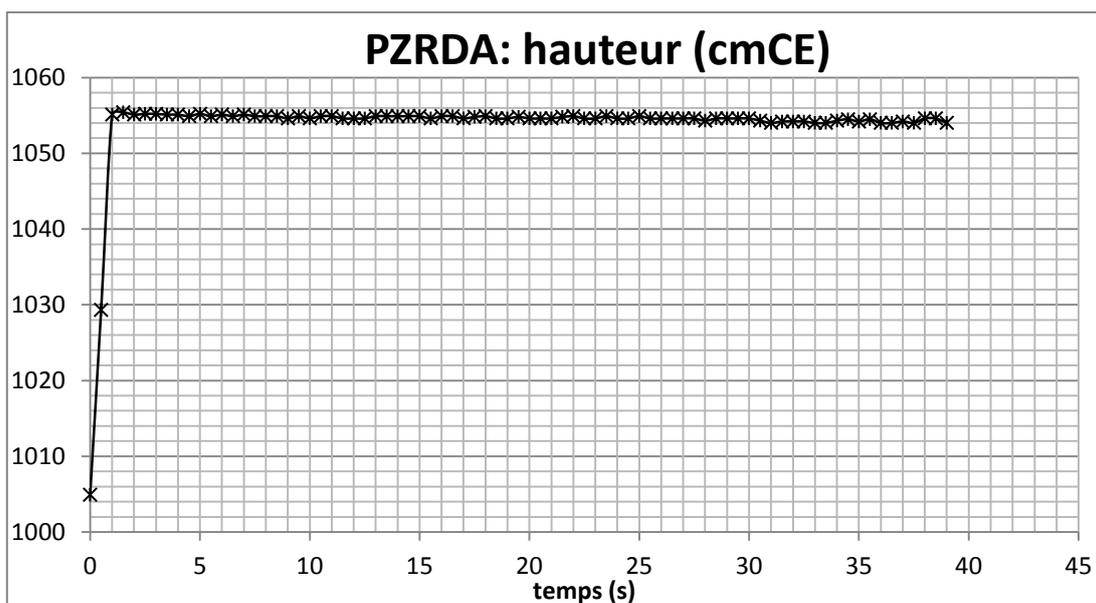
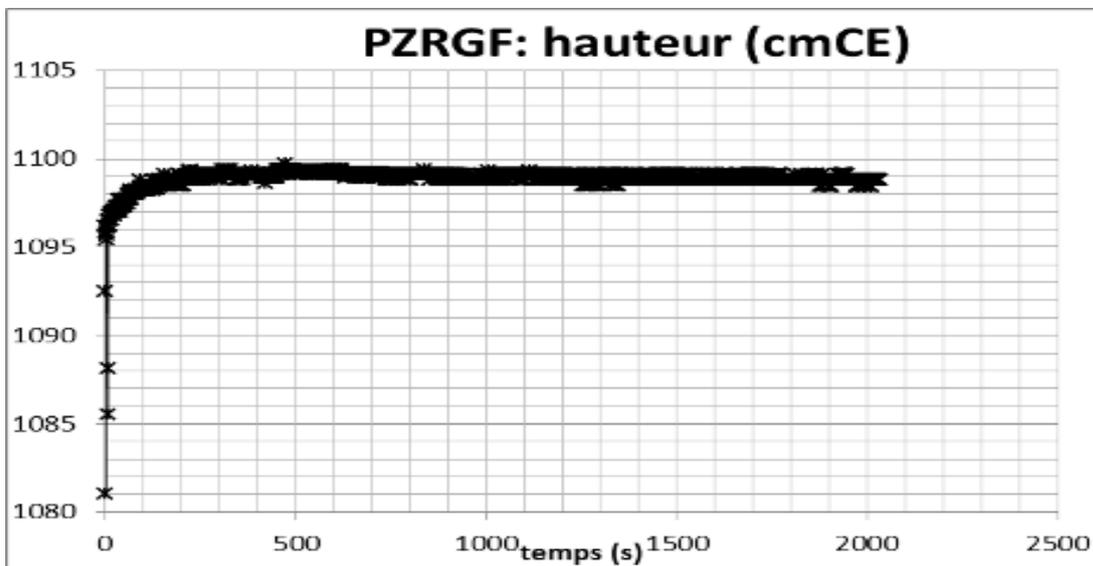
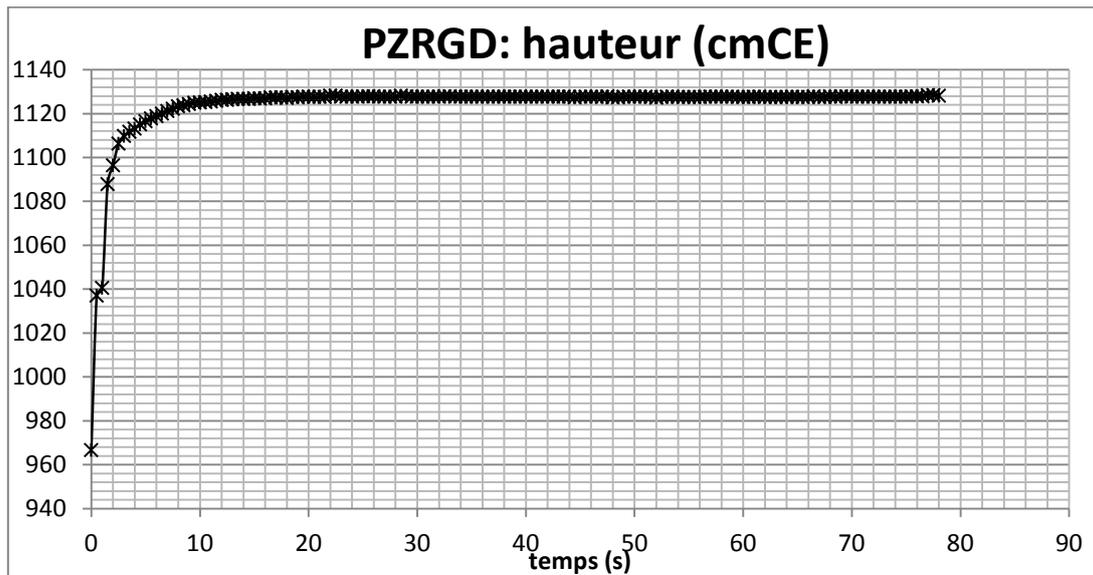


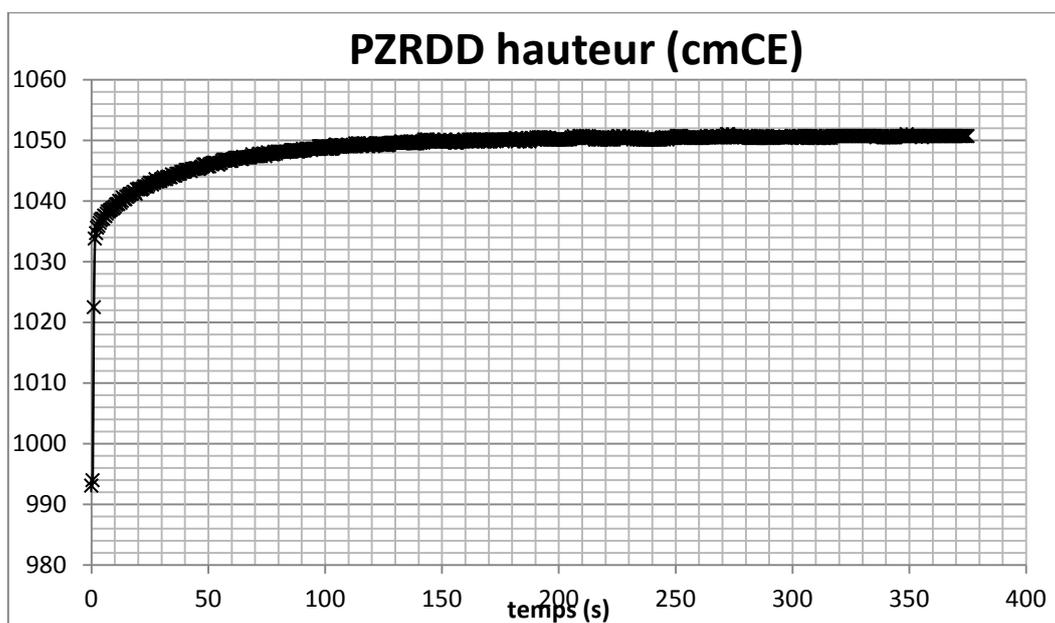
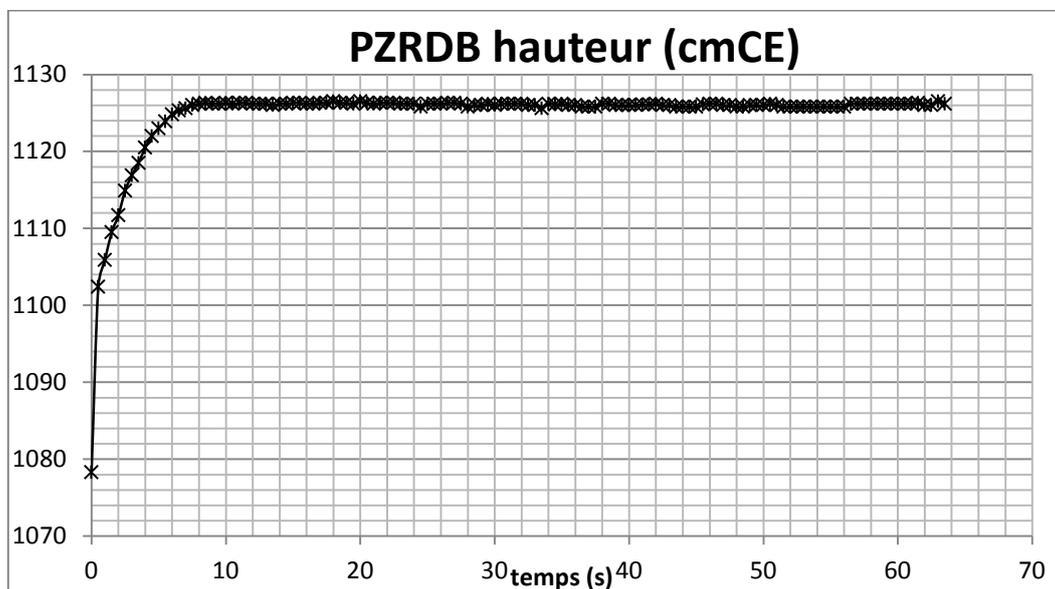
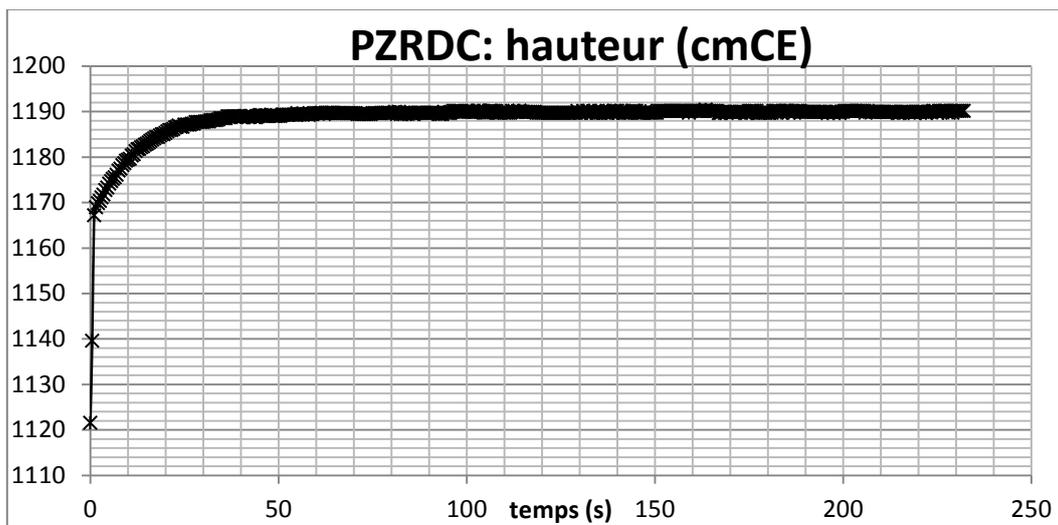


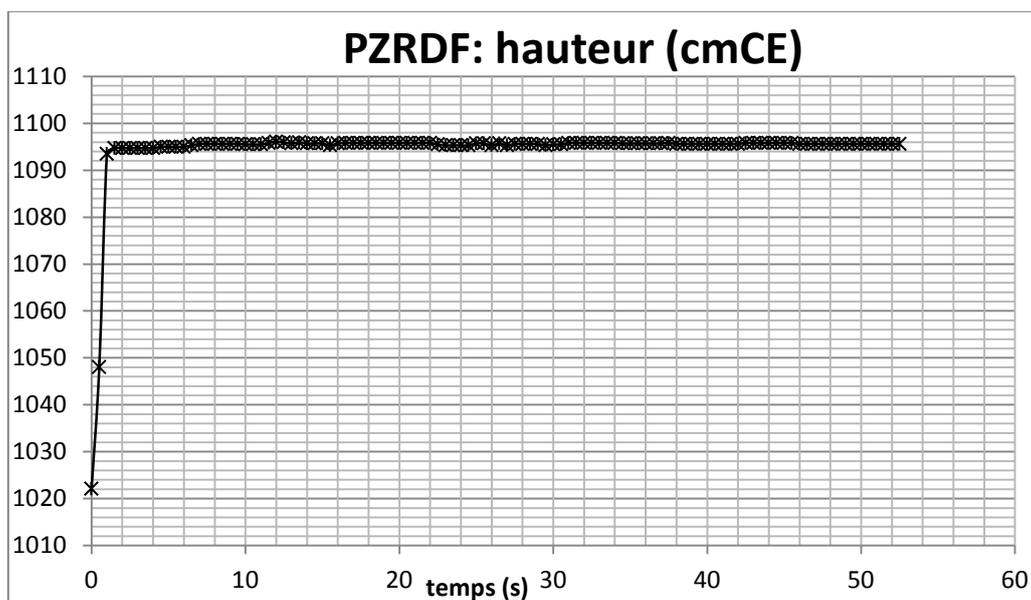
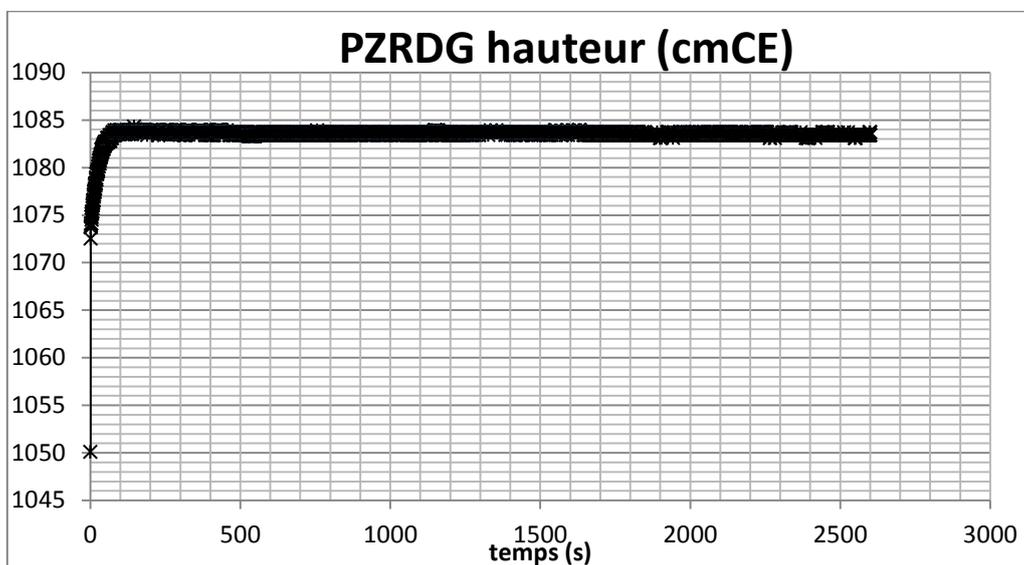
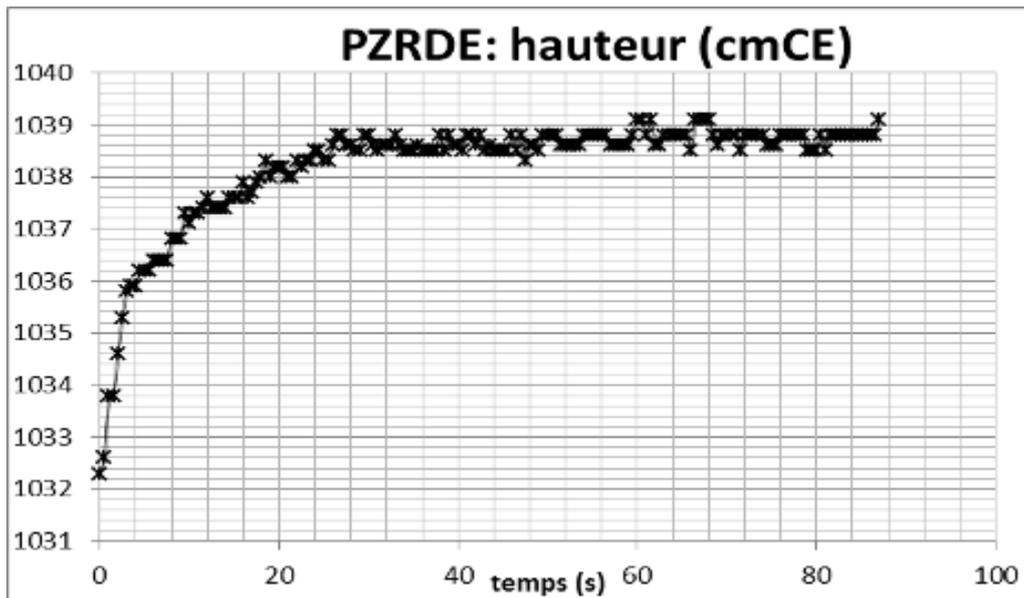


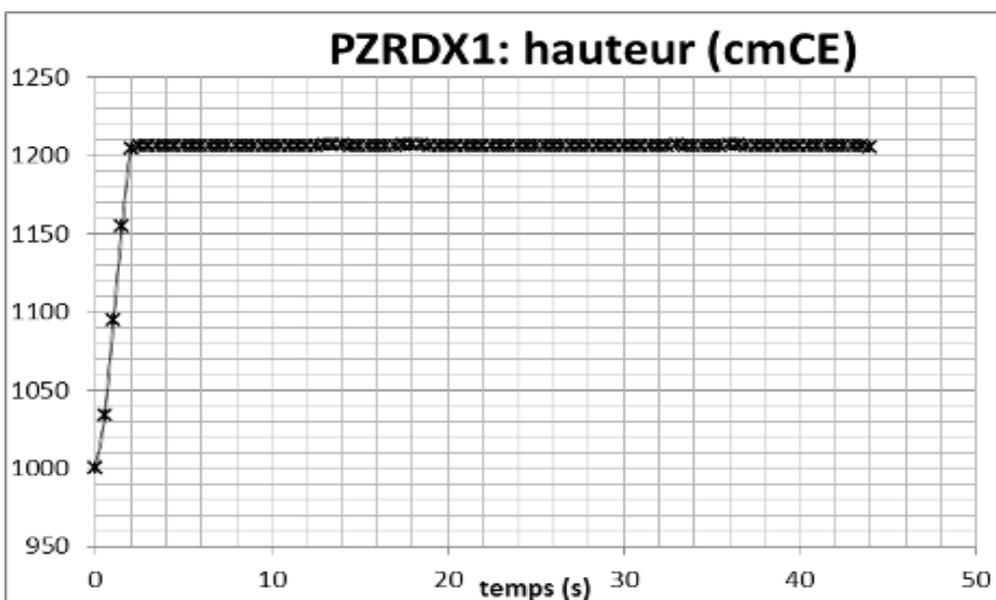
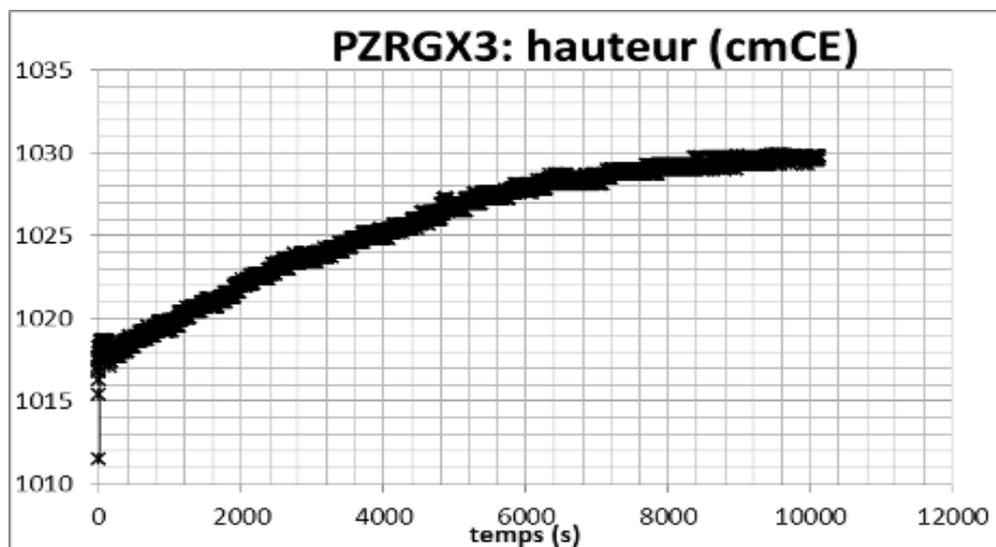
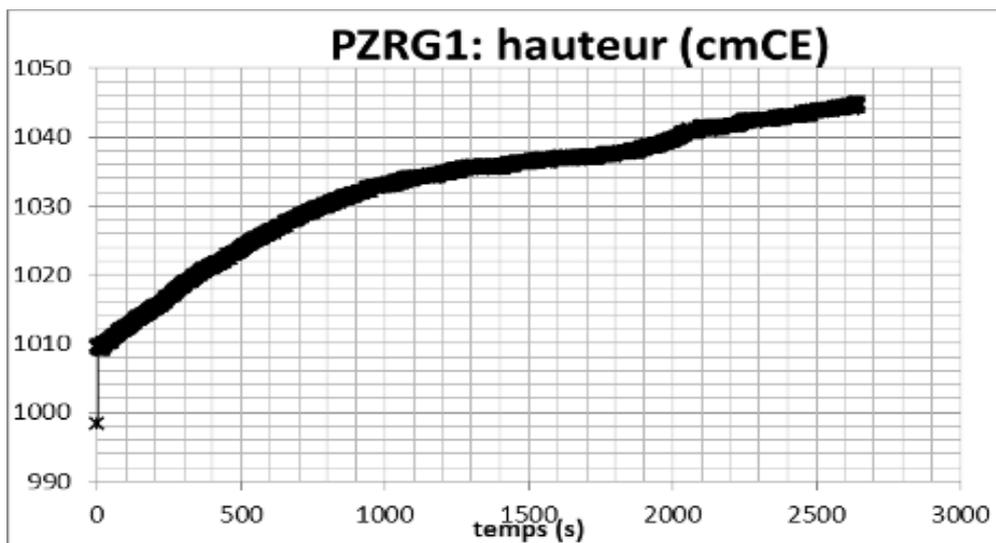


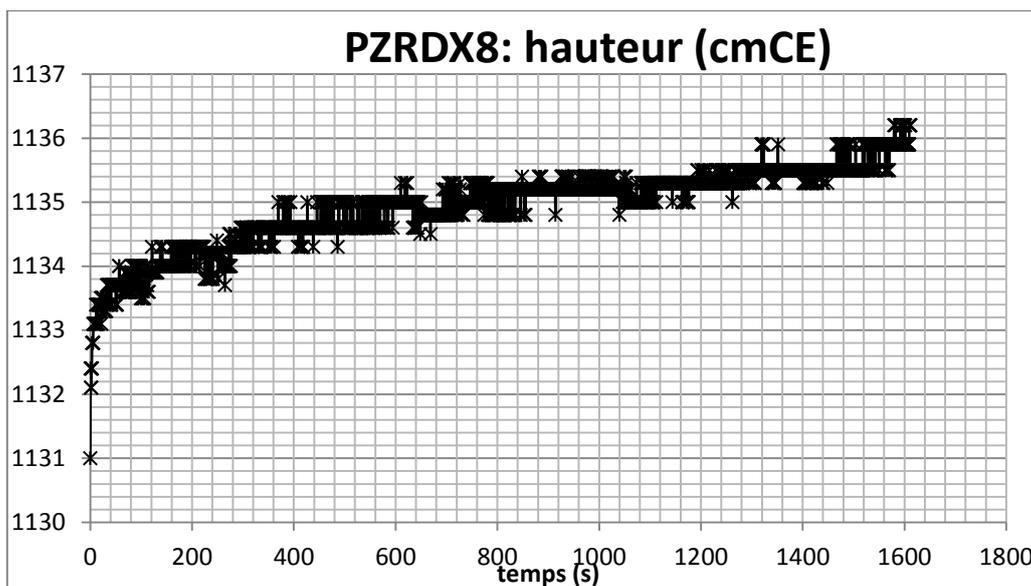
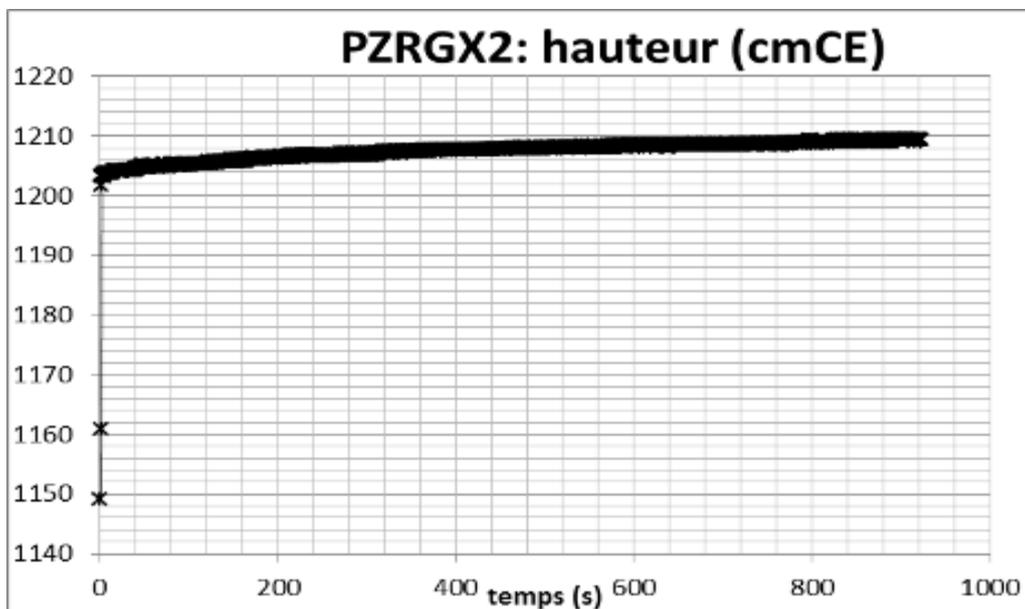
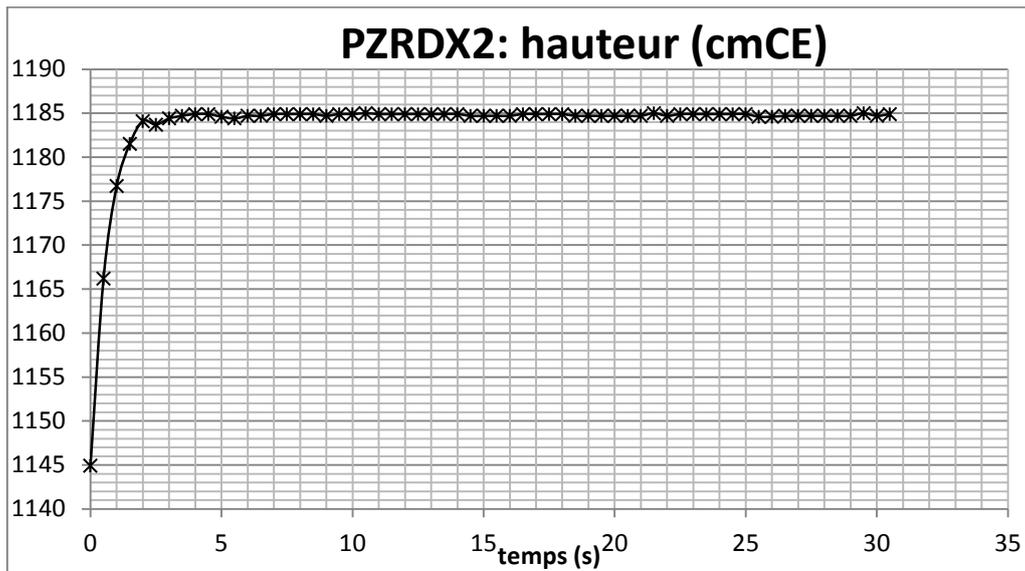


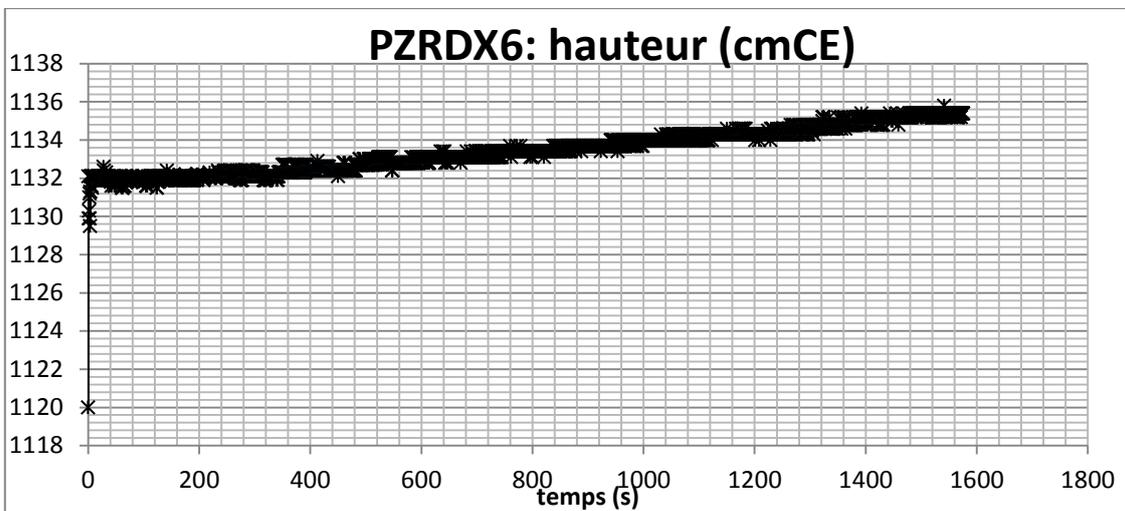
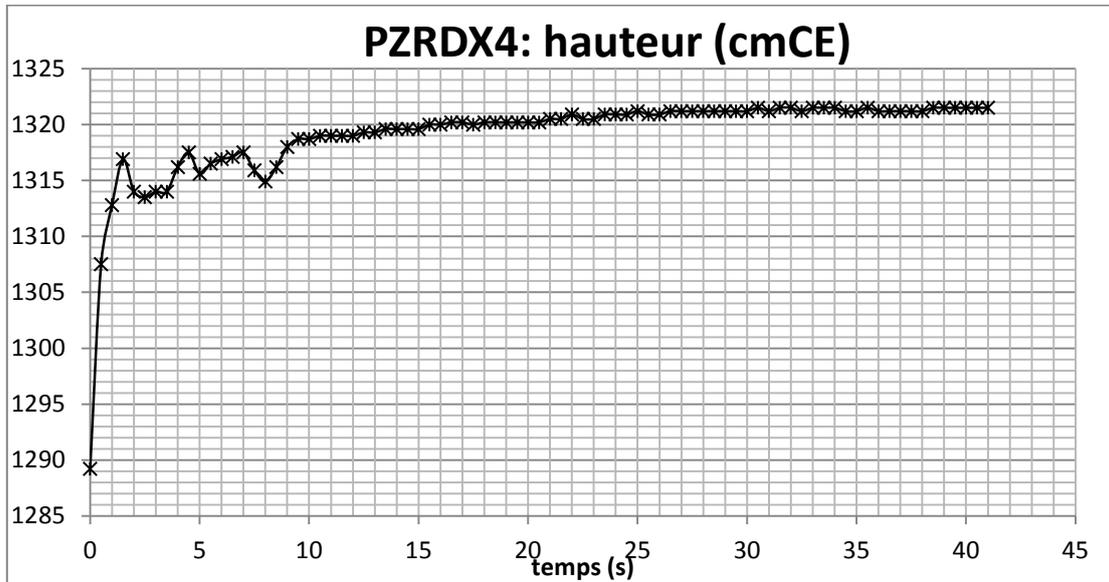
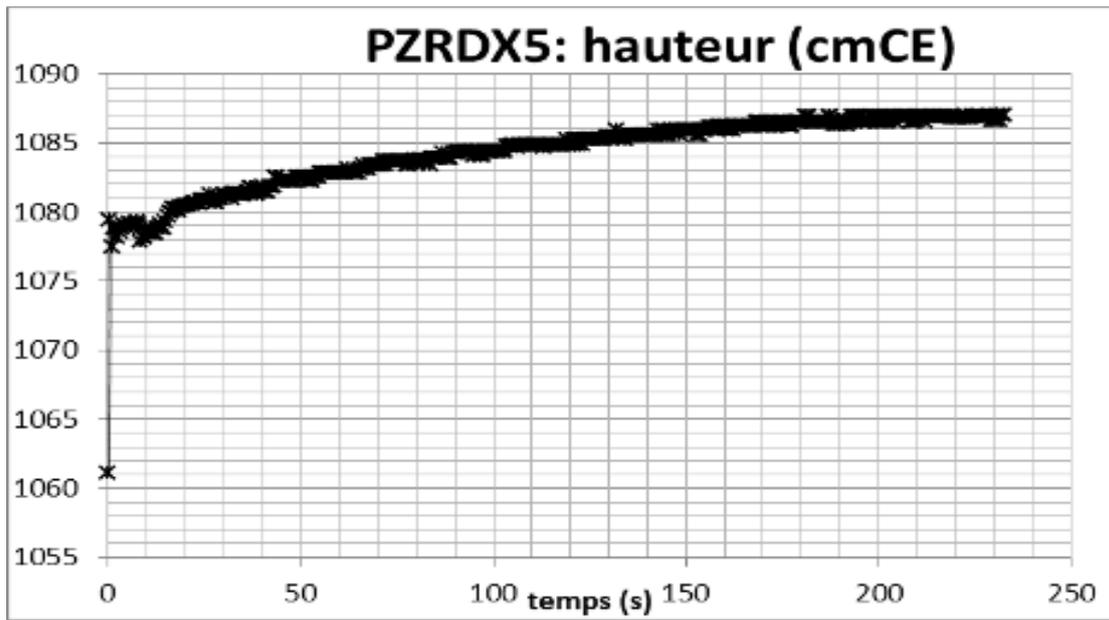


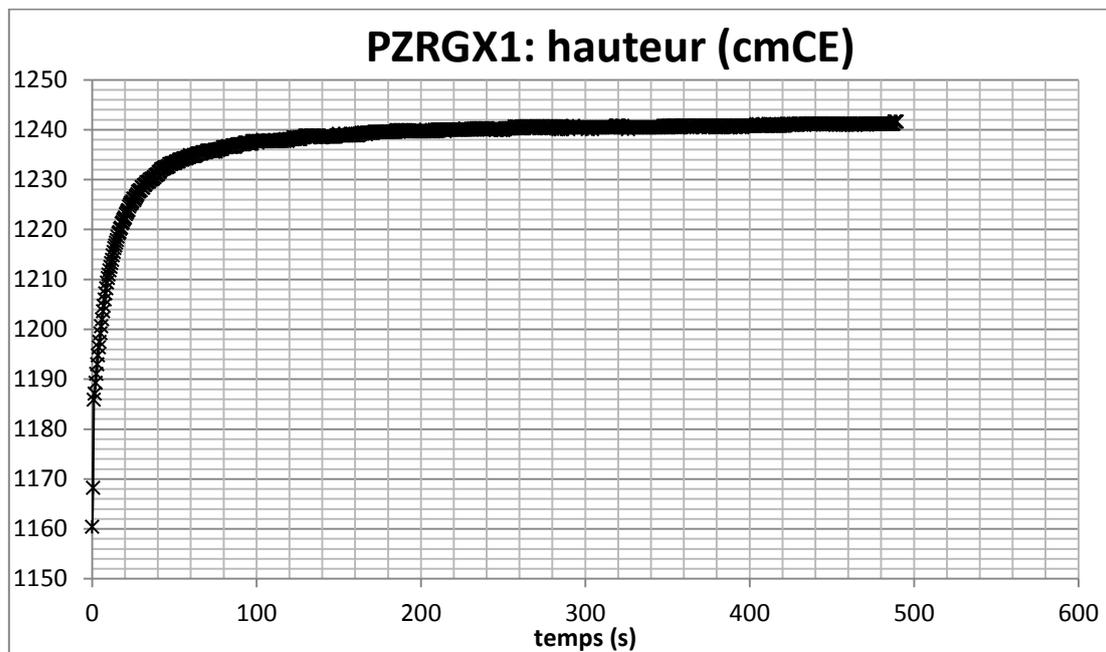
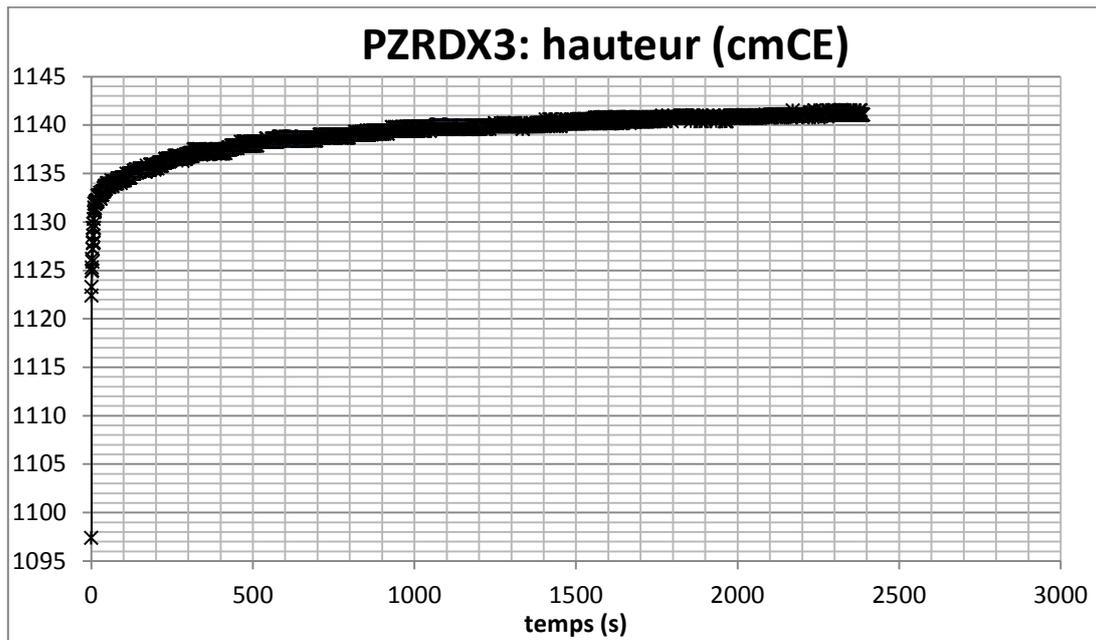




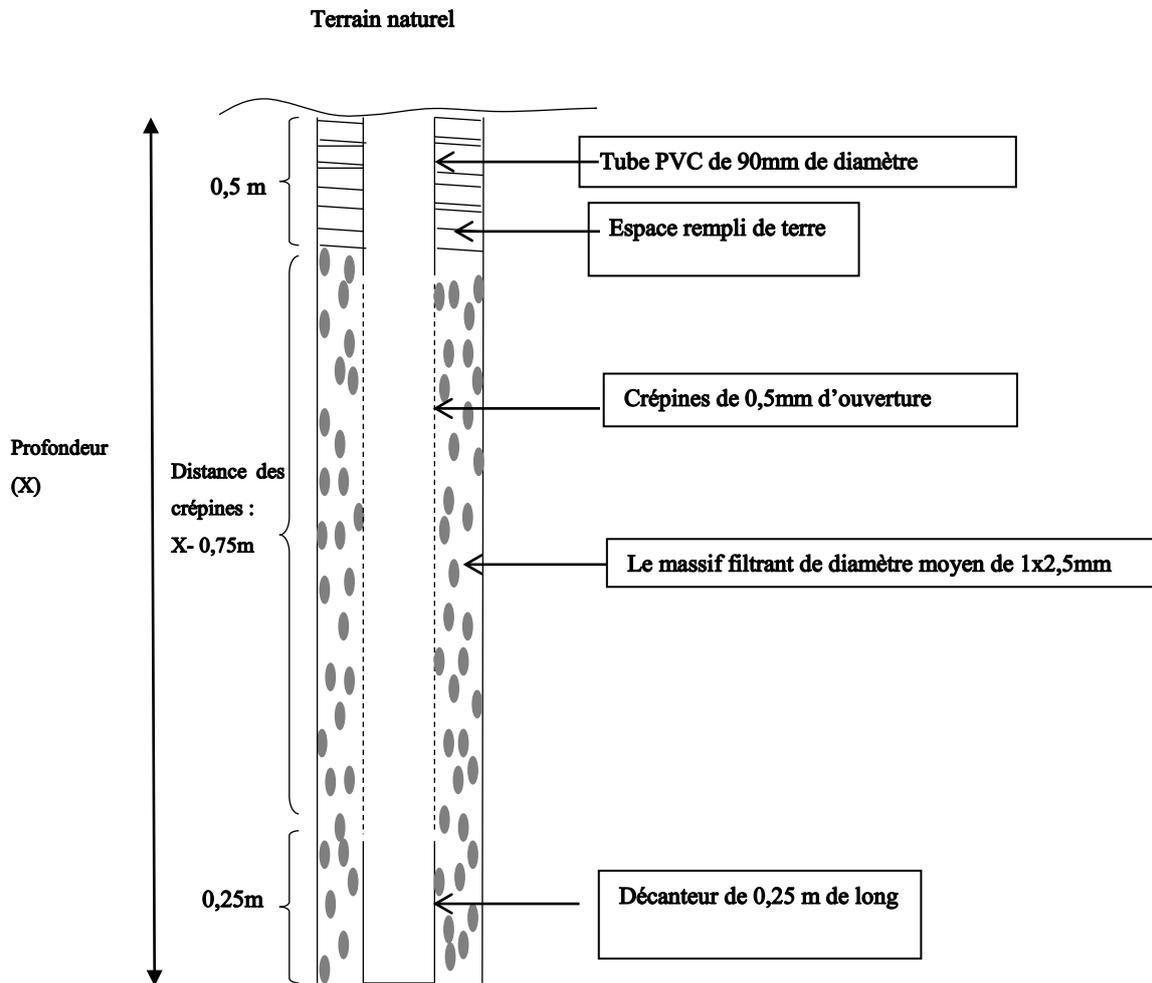








Annexe V Coupe technique des micropiézomètres



Annexe VI Données pluviométriques de la station de Banfora. Source : DRAHRH/CAS

Pluviométrie mensuelle et annuelle du poste de Banfora à partir de 1996																
Année	Avril		Mai		Juin		Juillet		Août		Septembre		Octobre		Cumul annuel du 1er Avril au 31 Octobre	
	H	J	H	J	H	J	H	J	H	J	H	J	H	J	H	J
1996	41	5	111,5	6	136	8	176	9	123,5	8	212,7	14	41	6	841,7	56
1997	85,3	11	110,5	8	189,5	11	128,4	9	209,6	16	172,9	14	77,9	10	974,1	79
1998	64,3	4	53,8	4	91,7	8	157,7	14	236,4	16	255	18	40,5	4	899,2	68
1999	85,4	6	79,2	5	134,8	10	239,35	15	324,1	20	183,4	17	93,3	10	1 139,6	83
2000	31,3	4	84,4	7	220,6	11	152,8	12	349	18	207,1	15	40,7	5	1 085,9	72
2001	27,1	3	59,7	6	116,3	10	194,4	15	203,7	16	180,1	11	48,4	3	829,7	64
2002	30,9	3	91,9	6	121,2	8	166	11	323,2	16	101,7	13	66,1	7	901,0	64
2003	18,6	5	31,4	6	251,6	13	259,4	9	489,2	19	142,8	17	23,2	4	1 216,2	73
2004	70,1	4	131,8	7	100,4	6	252,2	13	344,6	15	166,9	17	39,2	4	1 105,2	66
2005	33,4	6	91,4	5	134,1	9	189,1	14	216,5	14	248,4	13	71,9	8	984,8	69
2006	40,7	7	112,2	9	157,3	12	286,9	15	349,3	18	284,5	16	128,6	9	1 359,7	86
2007	170,9	8	65,8	6	65,4	5	128,8	13	567,4	19	122,3	12	28,9	2	1 149,5	65
2008	10,7	3	94,1	6	135,1	12	305,2	15	302,7	16	163,3	10	118,2	8	1 129,3	70
2009	6,2	2	39,6	5	93,5	8	130,5	13	169,1	18	140,6	18	68,7	7	648,2	71
2010	116,8	7	165,9	9	128,7	8	128,8	10	270	16	328,8	20	80,5	6	1 219,5	76
2011	115,5	5	84,8	7	122,3	9	207,3	14	176,6	18	116,9	11	70	11	893,4	75
2012	49,3	3	130,9	11	98,9	7	256,9	17	224,2	12	195,8	15	189,2	11	1 146,2	76