UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

SINGBO Oluwa-Fèmi Conceptia Christ-Reine

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : GEOHYDROLOGIE

==========

ANALYSE COMPARATIVE DES SIGNAUX PIEZOMETRIQUES DANS LA ZONE DE SOCLE AU BENIN

Maître de mémoire

Dr KOTCHONI Valerie

Hydrogéologue LHA-UAC-INE

Maître de stage

Dr VOUILLAMOZ Jean-Michel

Hydrogéologue- Géophysicien

Chargé de recherche à IRD

(IGE Grenoble France)

PROMOTION : 2019-2020

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à Dieu pour sa grâce, sa bonté, son amour et son assistance durant toute mon existence et plus précisément pour ce modeste travail. Egalement à ma très chère mère HOUNHOUI Eliane et mon très cher père SINGBO G. Ambroise pour les multiples sacrifices consentis depuis ma naissance, pour l'éducation qu'ils m'ont donnée et pour les actions qu'ils ont menées au quotidien depuis mes premiers pas à l'école.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères gratitudes à toutes personnes, qui, de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Ainsi, j'exprime ma reconnaissance particulière :

- À mon maître de mémoire, Dr KOTCHONI Valerie, Hydrogéologue, pour sa disponibilité et ses précieux conseils malgré ses nombreuses occupations. Son attachement au travail bien fait a contribué à sa réussite. Que Dieu vous bénisse davantage.

- À mon maître de stage Dr VOUILLAMOZ Jean-Michel, Hydrogéologue-Géophysicien , chargé de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), pour sa disponibilité et ses apports scientifiques enrichissants malgré la distance. Soyez en remercié Monsieur !

- Au Professeur MAMA Daouda, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE), pour nous avoir permis d'entrée dans son établissement ;

- À mes aînés de la formation Hydrologie, spécialement à ABALLO Christian et DOSSOU Raoul pour tout l'aide que vous m'avez apporté, que le Seigneur vous bénisse.

- À tout le personnel administratif et technique du Laboratoire d'Hydrologie appliquée pour toute votre gentillesse et considération, je vous adresse toute ma gratitude ;

- À toute l'équipe AGIRES pour nous avoir permis de travailler avec eux et pour tous les apports scientifiques enrichissants malgré leurs multiples occupations ;

- À la DG Eau de nous avoir permis d'obtenir les données pour la réalisation de nos travaux.

Je m'en voudrais de ne pas témoigner ma profonde gratitude à l'endroit de ma famille, mes amis qui m'ont également soutenu lors de ces trois dernières années :

- À mes camarades pour l'ambiance, l'entraide et l'amour dont vous avez fait preuve que Dieu bénisse nos efforts et qu'il nous unisse davantage. Un merci spécial à TOTTIN Samuel pour sa présence, son ouverture d'esprit et pour tous les apports à ce document. Dieu sera toujours notre guide.

Nous n'allons pas finir nos remerciements sans témoigner notre profonde gratitude envers le jury chargé d'apprécier notre travail pour l'amélioration de sa qualité.

RESUME

Le Bénin est constitué de près de 80% de socle cristallin qui couvre une superficie de 87000 Km^2. Dans cette zone de socle, les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau potable des populations mais son accès est difficile. Dans le but de mieux comprendre la dynamique annuelle des eaux souterraines dans les roches de socle du Bénin, notre étude se propose de faire l'analyse comparative des signaux piézométriques afin de voir si cette dynamique est similaire d'un site à un autre, et d'identifier les paramètres susceptibles d'expliquer le comportement observé dans les chroniques. Pour ce faire, grâces aux données de niveau statique collectées, la chronique des différents sites a été réalisée après avoir contrôlé la qualité des données collectées. Pour le contrôle de la qualité des données, nous avons mené trois (03) démarches différentes. Dans un premier temps, les écarts entre les différents types de données obtenues (enregistreurs, lecteurs et contrôleurs) ont été déterminés, ensuite les données aberrantes qui sont contenues dans les chroniques ont été recherchées puis enfin ces données aberrantes ont été filtrées. L'écart moyen entre les données des enregistreurs et celles des lecteurs est de 7,74 cm, et celui entre les données des enregistreurs et celles des contrôleurs est de 6,4 cm. Les variations des niveaux statiques observées dans les chroniques nous ont permis de regrouper les chroniques en 3 catégories en nous basant sur leurs comportements : profondeur moyenne des NS et amplitude moyenne des variations annuelles. Cette classification visuelle des chroniques a été confirmée par le calcul des amplitudes de variations annuelles sur chaque site, et par l'analyse des décalages temporels des variations de NS entre les sites. Il ressort de ces analyses qu'il y a une bonne similitude entre les sites d'une même catégorie (sauf pour le site de Bantè), et que les différences de dynamique observées sont probablement liées à la porosité de drainage et à la recharge, même si aucune relation simple n'a pu être mise en évidence entre ces paramètres et la dynamique des chroniques. Finalement, nous pensons que la correction visuelle des données qui est aujourd'hui effectuée par la DG-Eau pourrait être améliorée, et que le réseau d'observation piézométrique national pourrait être optimisé sur la base d'une analyse par similitude.

Mots clés : Eau souterraine**,** signaux piézométriques, recharge, aquifère de socle, Bénin.

ABSTRACT

Benin is made up of nearly 80% of crystalline basement which covers an area of 87000 km^2. In this base area, groundwater is the main source of drinking water for the populations, but it access is difficult. In order to better understand the annual dynamics of groundwater in the basement rocks of Benin, our study aims to make the comparative analysis of the piezometric signals in order to see if this dynamic is similar from one site to another, and identify the parameters likely to explain the behavior observed in the chronicles. To do this, relies on the static level data collected, the chronicle of the various sites was carried out after checking the quality of the data collected. Concerning the quality control of the data, we carried out three (03) different approaches. First, the differences between the different types of data obtained (recorders, readers and controllers) were determined, then the outliers that are contained in the chronicles were searched and finally these outliers were filtered. The average difference between the data of the loggers and those of the readers is 7.74 cm, and that between the data of the loggers and those of the controllers is 6.4 cm. The variations of the static levels observed in the chronicles have allowed us to be grouped the chronicles into 3 categories based on their dynamics: average depth of NS and average amplitude of annual variations. This visual classification of the chronicles was confirmed by the calculation of the annual amplitudes of variation at each site, and by the analysis of the time lags of the variations of NS between the sites. It emerges from these analyzes that there is a good similarity between the sites of the same category (except for the Bantè site), and that the differences in dynamics observed are probably related to the specific yield and the recharge, even if no simple relationship could be demonstrated between these parameters and the dynamics of the chronicles. Finally, we believe that the visual correction of the data which is carried out today by the DG-Eau could be improved, and that the national piezometric observation network could be optimized on the basis of a similarity analysis.

Keywords: Groundwater, piezometric signals, recharge, basement rock aquifer, Benin.

LISTE DES SIGLES ET ACCRONIMES

AGIRES : Action pour une Gestion Intégré des Ressources en Eau Souterraine

DG Eau : Direction Générale de l'Eau

DIEPA : Décennie International de l'Eau Potable et de l'Assainissement

ETP : Evapo Transpiration Potentielle

INE : Institut National de l'Eau

NE : Nord-Est

NN : Nord-Nord

NO : Nord-Ouest

NS : Niveau Statique

N-S : Nord-Sud

ODD : Objectifs du Développement Durable

PGNR : Projet de Gestion des Ressources Naturelles

PU : Pluie Utile

RGPH4 : Quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitation

SIGES : Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines

ZA : Zone Altérée

ZFA : Zone Fissurée Altérée.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation de la zone de Socle au Bénin 4
Figure 2: Carte de positionnement des piézomètres..... 5
Figure 3: Carte géomorphologique de la zone des collines 6
Figure 4: Répartition de l'humidité relative moyenne mensuelle sur les sites de Natitingou et Parakou entre 1979 et 2018 (donnée de Météo Bénin) 7
Figure 5: Répartition des pluies mensuelles moyennes dans le sud de la zone de socle entre 1980 et 2010 (modifié d'après la carte hydrogéologique du Bénin, Achidi *et al*., 2012) 7
Figure 6: Carte géologique de la zone de Socle au Bénin..... 10
Figure 7: Modèle conceptuel hydrogéologique de la zone de socle en milieu tropical : exemple du Bénin (inspiré de Dewandel et al, 2011 ; Lachassagne et al, 2017, 2014, 2011; in Allé, 2019)..... 11
Figure 8: Exemple de diagramme en boîte..... 15
Figure 9: Chronique des niveaux statiques pour l'ensemble des sites et pour tous les types de données..... 19
Figure 10: Comparaison des écarts entre données enregistreurs et opérateurs (lecteurs/contrôleurs) ; (a)Lecteurs ; (b) Contrôleurs ; (c)Lecteurs et Contrôleurs confondus 20
Figure 12: Chronique de dérivé, Savè enregistreur..... 22
Figure 13: Variation des fréquences de NS sur le site de Savè (données enregistreurs) 22
Figure 14: Variation de NS non filtré et filtré sur le site de Savè (données enregistreurs)..... 23
Figure 15: Chroniques des NS filtrés sur le site de Savè (données enregistreurs)..... 23
Figure 16 : Chronique des niveaux statiques filtrés pour l'ensemble des sites et pour les données enregistreurs 25
Figure 17: Chronique de catégorisation de NS des sites enregistreur..... 27
Figure 18: Chronique de catégorisation des amplitudes (catégorie 1) 28
Figure 19: Chronique de catégorisation des amplitudes (catégorie 2) 28
Figure 20: Chronique de catégorisation des amplitudes (catégorie 3) 29
Figure 21: Décalage de temps dans les chroniques, catégorie 1 29
Figure 22: Décalage de temps dans les chroniques, catégorie 2 30
Figure 23: Décalage de temps dans les chroniques, catégorie 3 30
Figure 24: Décalage de temps de tous les sites 31
Figure 25: Profondeur moyenne de NS par catégorie de site, catégorie 1 32
Figure 26: Profondeur moyenne de NS par catégorie de site, catégorie 2 33
Figure 27: Profondeur moyenne de NS par catégorie de site, catégorie 3 33
Figure 28: Profondeur moyenne de NS de tous les sites..... 34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Synthèse des données obtenues 14
Tableau 2: Récapitulatif des données statistiques des écarts (cm) 20
Tableau 3: Récapitulatif des erreurs enregistrées pour les types de données analysées (enregistreur et lecteurs). 24
Tableau 4: Récapitulatif des données aberrantes enregistrées ainsi que leurs pourcentages (données enregistreurs) 25
Tableau 5: Récapitulatif des amplitudes moyennes et de NS moyens annuels 26

TABLES DES MATIERES

DEDICACE ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

LISTE DES SIGLES ET ACCRONIMES vi

LISTE DES FIGURES vii

LISTE DES TABLEAUX viii

TABLES DES MATIERES ix

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : CADRE GENERAL DE L'ETUDE 4

I-1. Présentation de la zone d'étude 4

I-2. Géomorphologie 5

I-3. Climat 6

I-4. Sol et végétation 8

I-5. Population et activités socio-culturelles 8

I-6. Géologie 9

I-7. Hydrogéologie 10

CHAPITRE II : APPROCHE METHODOLOGIQUE 13

II-1. La recherche documentaire 13

II-2. Les données et leurs validations 13

II-2-1. Collecte de données 13

II-2-2. Calcul des écarts entre niveaux statiques enregistreurs et manuels 13

II-2-3. Recherche de données aberrantes 15

II-2-4. Filtrage des niveaux statiques 16

II-3. Analyse des signaux piézométriques 16

II-3-1. Analyse par similitude 17

II-3-2. Analyse des amplitudes annuelles 17
II-3-3. Analyse des déphasages entre les chroniques 17
II-4. Identification des paramètres susceptibles d'expliquer le comportement observé dans les chroniques 17
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION 19
III-1. Validation des données 19
III-1-1. Calcul des écarts entre niveaux statiques enregistreurs et manuels 19
III-1-2. Recherche de données aberrantes 21
III-1-3. Filtrage des niveaux statiques 23
III-2. Résultats d'analyse piézométrique 26
III-2-1. Classification des chroniques par similitude 26
III-2-2. Amplitude annuelle des chroniques 27
III-2-3. Déphasage des chroniques 29
III-3. Paramètres susceptibles d'expliquer le comportement observé sur les chroniques 32
CONCLUSION ET SUGGESTIONS 35
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 36
ANNEXES 40
Annexe 1 : Classes et fréquences des NS sur le site de Savè (données Enregistreurs) 40
Annexe 2 : Méthode de détermination du niveau statique (NS) par interpolation 45
Annexe 3 : Chronique de NS enregistreurs 46
Annexe 4 : Chroniques de dérivé des NS 47
Annexe 5: Variation des fréquences de NS enregistreur 48
Annexe 6: Variation de NS reportés et filtrés 50
Annexe 7: Chroniques de NS filtré enregistreur 51

INTRODUCTION GENERALE

Les eaux souterraines constituent le deuxième réservoir mondial d'eau douce après celui des glaciers et des calottes polaires (N'go *et al*., 2004). Les eaux souterraines sont beaucoup moins vulnérables aux pollutions de surface que les eaux de surface. Les conditions d'accès sont variables selon la nature des roches qui constituent le sous-sol (Soro *et al*., 2007).

Au Bénin, les eaux souterraines constituent en général la principale source d'alimentation en eau potable de la population rurale, et celle située en zone de socle en particulier. En effet, le territoire béninois est constitué de près de 80 % de socle (Le Barbé *et al*., 1993) et pour améliorer l'accès à l'eau potable, l'Etat béninois a entrepris, depuis le début des années 1970, des programmes pour doter chaque village et hameau de points d'eau potable. C'est ainsi que plusieurs localités ont bénéficié de puits modernes et de forages (Gnanhoui, 2008). En s'inscrivant dans les recommandations des objectifs du développement durable (ODD) notamment l'ODD6: «Garantir l'accès de tous à des sources d'eau potable et à l'assainissement» ; on se rend compte que les eaux souterraines seront encore plus sollicitées De ce fait, il devient nécessaire voir indispensable d'avoir des connaissances approfondies sur les eaux souterraines, principale source d'approvisionnement en eau potable des populations du Centre et du Nord Bénin, localisé en zone de socle secteur de notre zone d'étude. Déterminer l'équilibre entre les entrées et les sorties d'eau dans les aquifères est donc crucial pour établir un mode de gestion rationnelle et durable de cette ressource. Ce type de gestion passe par le suivi de la ressource et la compréhension du fonctionnement de l'aquifère dans cette zone qui est caractérisée par des aquifères discontinus. Le suivi des eaux souterraines passe par l'installation des ouvrages de suivis (piézomètres) dans lesquelles des mesures de niveau d'eau au pas de temps régulier (manuelle ou enregistreur) sont prises. Les différents enregistrements renseignent sur l'évolution de la ressource au cours du temps et permettent d'avoir une meilleure compréhension du système aquifère sur chaque site d'où l'intérêt de notre sujet intitulé **«Analyse comparative des signaux piézométriques dans la zone de socle au Bénin »** dont l'objectif général est de contribuer à la connaissance des eaux souterraines en zone de socle en vue d'une gestion durable de cette dernière.

De façon spécifique, il s'agira de :

- collecter et valider des données piézométriques dans le socle du Bénin.
- analyser les signaux piézométriques dans la zone d'étude en vue d'une classification

- identifier les paramètres susceptibles d'expliquer le comportement observé sur les chroniques piézométriques

Les hypothèses émises en rapport aux objectifs précités sont les suivantes :

- la préalable analyse des signaux piézométriques permet la validation des données
- les signaux piézométriques ne sont pas similaires sur l'ensemble de la zone de socle
- les paramètres susceptibles de justifier le comportement des chroniques sont la recharge et la porosité de drainage.

Après l'introduction et quelques définitions, ce mémoire est subdivisé en trois chapitres dont le premier est consacré à la présentation du cadre de l'étude ; le second chapitre traite de l'approche méthodologique adoptée et le troisième chapitre présente les résultats obtenus, leurs interprétations et discussion.

Quelques définitions :

- **Piézomètre** : C'est un forage non exploité qui permet de suivre l'évolution du niveau de l'eau souterraine en un point donné de la nappe (SIGES Seine-Normandie, 2020).

- **Chronique piézométrique** : graphique résultant des données piézométriques représentant l'évolution des niveaux de l'eau souterraine au cours du temps et permettant de visualiser le comportement de l'eau souterraine (hausse, baisse, stabilisation) (SIGES Nord-Pas de Calais, 2020).

CHAPITRE 1 : CADRE GENERAL DE L'ETUDE

CHAPITRE I : CADRE GENERAL DE L'ETUDE

I-1. Présentation de la zone d'étude

La présente étude est réalisée au Bénin, pays situé en Afrique de l'Ouest. Sa superficie est constituée d'environ 20% de bassins sédimentaires (le bassin de la volta, le bassin de Kandi et le bassin sédimentaire côtier) et 80 % de socle cristallin qui représente une surface d'environ 87.000 km^2 (figure 1). Cette superficie de socle cristallin est appelée communément « zone de socle ». Cette dernière, objet de notre étude, est située à une latitude comprise entre environ 7°N et 12,4°N et à une longitude comprise entre environ 1°E et 4°E. Elle a un relief peu accidenté qui part de la commune de Djidja au sud du pays (dans le département du Zou) dont l'altitude moyenne est de 300 m, pour monter jusqu'au Mont Atacora qui culmine à 658 m au Nord-Ouest (NO) du pays dans la commune de Natitingou (département de l'Atacora), (Alle, 2019). La zone de socle est limitée au Nord par la commune de Karimama, à l'Est par le Nigéria, à l'Ouest par le Togo et au Sud par la commune de Klouékanmé. Le territoire béninois comprend 12 départements, subdivisés en soixante-dix-sept (77) communes dont vingt-quatre (24) pour la zone de socle dans son entièreté ; dans chaque commune est situé un point de piézomètre (figure 2). Dans le cadre de cette étude, (09) communes de la zone de socle sont concernées : à savoir : les communes de Savalou, Savè, Bassila, Bantè, Glazoué, Setto, Ouessè, Dassa et Bétérou. Les autres communes n'ont pas été prises en compte parce que nous n'avons pas eu les données à temps.

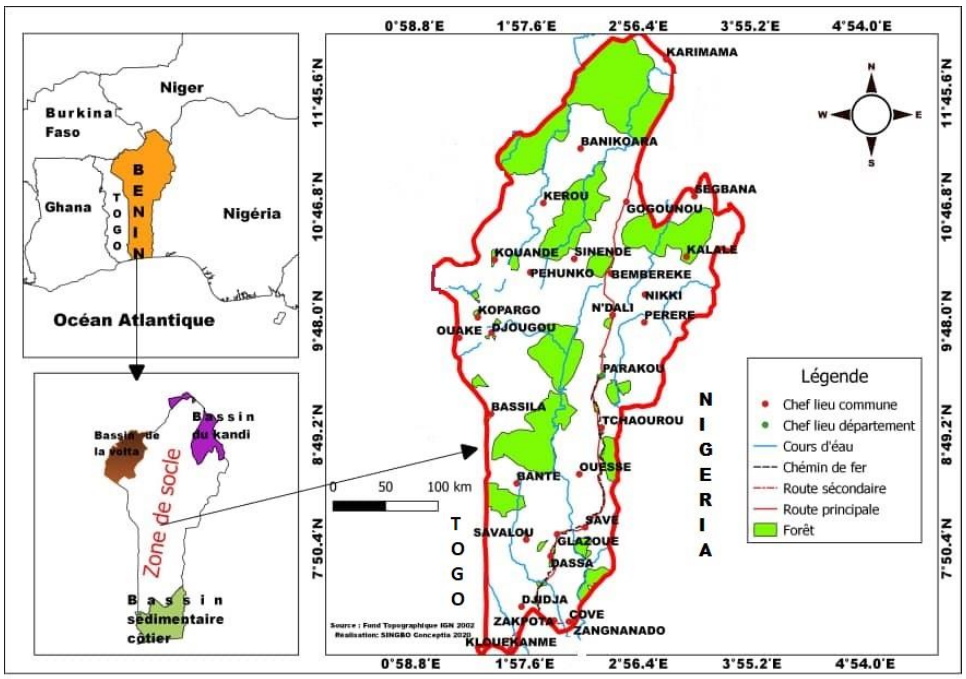


Figure 1: Carte de localisation de la zone de Socle au Bénin

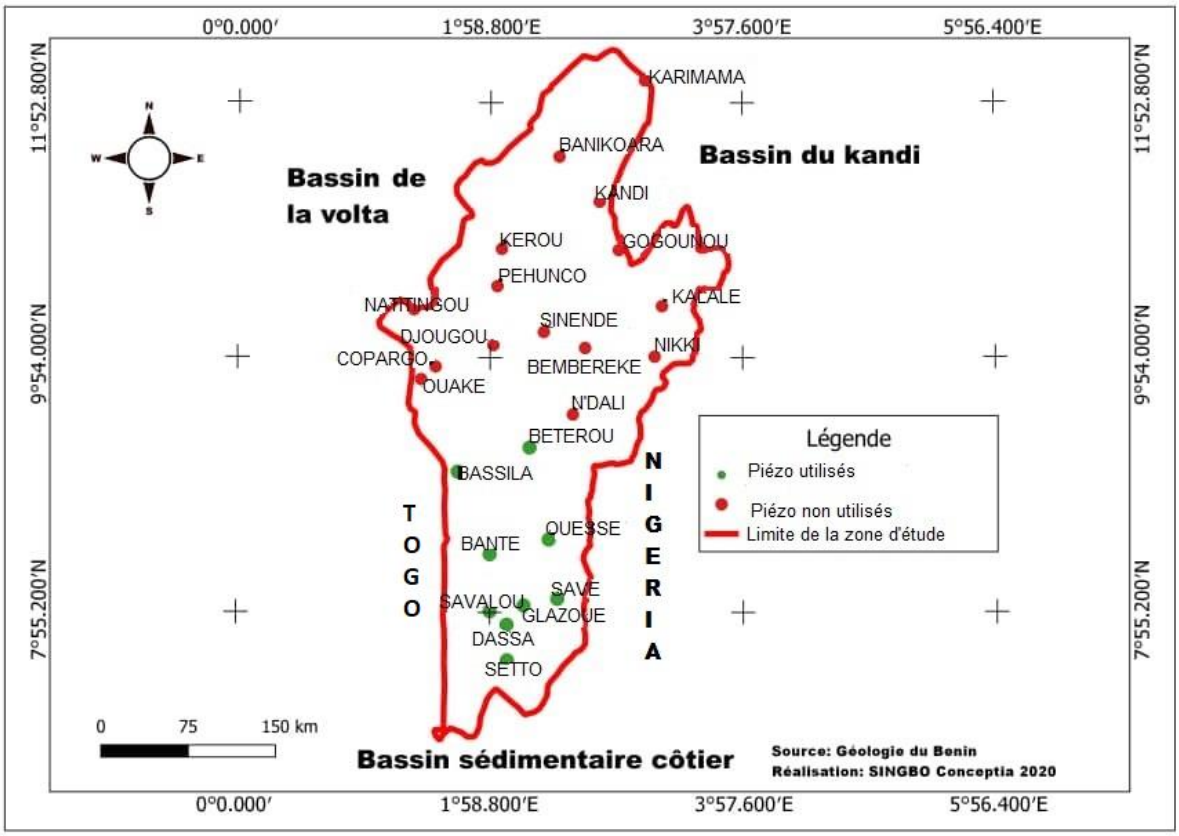


Figure 2: Carte de positionnement des piézomètres

I-2. Géomorphologie

L'action conjuguée de la tectonique, de l'altération et de l'érosion différentielle engendre naturellement des paysages variés qui se traduisent essentiellement dans notre zone d'étude par une vaste pénéplaine cristalline tapissée d'un manteau d'altérites d'épaisseur relativement faible (5 à 20 m en moyenne) (Adjomayi, 2015). Cette surface s'élève progressivement pour atteindre 600 m à la latitude de Natitingou. L'altitude moyenne est de 450 m ; sur cette pénéplaine s'observe une série de collines isolées où la roche affleure. La plupart de ces alignements de collines sont orientés sensiblement Nord-Sud. Ce sont les collines de Bembèrèkè, de Sinendé et de Natitingou. La zone est principalement drainée par l'Ouémé qui suit une direction d'écoulement du Nord-Ouest vers le Sud-Est. Situées à la tête du Bassin, ses pentes locales peuvent être très élevées et restent ensuite toujours relativement fortes (1 à 2 km/km). Dans son parcours amont où il porte le nom Affon et draine 4 320 km^2, l'Ouémé s'oriente d'abord vers le nord sur environ 30 km, puis descend vers le Sud-Est sur 100 km, jusqu'à la confluence avec l'Alpouro (Kotchoni 2019). La latitude d'Ina représente la ligne de partage des eaux où la partie sud est drainée vers les bassins du fleuve Ouémé tandis que les eaux de la partie nord de cette ligne sont drainées vers le fleuve Niger (Adjomayi, 2015).

La partie sud de notre zone d'étude est recouverte en majorité de végétation, et on observe une élévation de montage vers le Nord des collines. Au Sud, on observe une dépression et une l'altitude basse qui augmente de 100m vers le Nord ; ce qui engendre une topographie forte (figure 3).

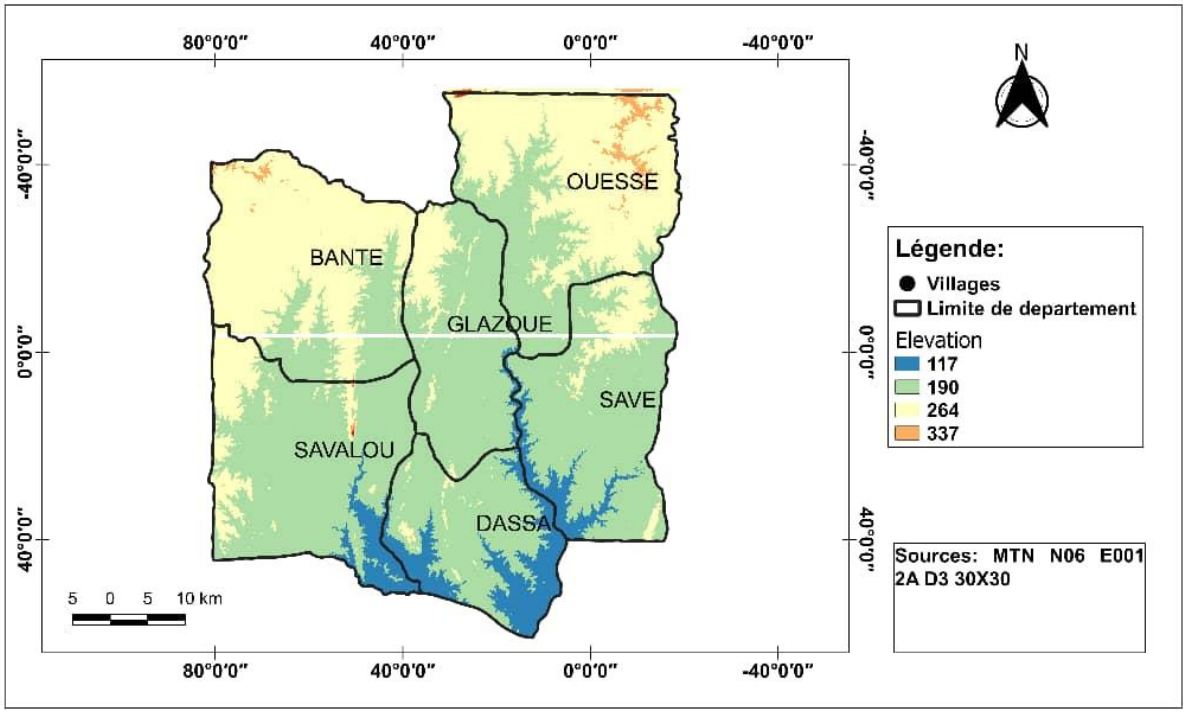


Figure 3: Carte géomorphologique de la zone des collines

I-3. Climat

Le climat est de type soudanien au Nord de la zone de socle avec deux saisons bien marquées: une saison sèche de novembre à mars et une saison pluvieuse d'avril à octobre.

La saison pluvieuse est accompagnée d'une augmentation puis d'une décroissance régulière des précipitations autour du pic du mois d'Août. La pluie moyenne annuelle est de 1 091 mm au cours de la période 1980 à 2009 (Achidi *et al.*, 2012).

L'humidité relative est très élevée durant la saison pluvieuse (80% en moyenne entre juillet et septembre). Ce taux chute pendant la saison sèche (surtout entre février et mars) pour se situer à environ 35% (figure 4). Les températures annuelles moyennes sont comprises entre 26,5 et 37°C et varient en fonction de la latitude (Boukari, 2007 in Kotchoni 2019). La température moyenne sur deux sites météorologiques (Parakou et Natitingou) de 1979 à 2008 est de 33,4 °C. Les plus fortes valeurs de l'année sont enregistrées entre janvier et avril. Les faibles

températures sont souvent observées pendant la nuit en période d'harmattan (décembre à janvier). La période la plus chaude se situe entre les mois de février et mars.

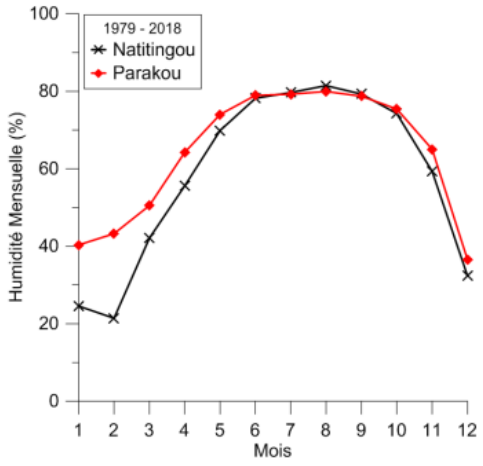


Figure 4: Répartition de l'humidité relative moyenne mensuelle sur les sites de Natitingou et Parakou entre 1979 et 2018 (donnée de Météo Bénin)

Au Sud de la zone de socle, le climat est qualifié de soudano-guinéen avec une pluviométrie comprise entre 1 100 mm et 1 200 mm. Les pluies s'étalent dans le Sud du Bénin entre les mois de mars et d'octobre avec deux maxima à cheval sur les mois de juin-juillet et de septembre-octobre. La répartition des pluies mensuelles moyennes dans la partie sud de la zone de socle, de 1980 à 2009, est représentée sur la figure 5. La température minimale décadaire se situe durant les deux premières décades du mois d'août ; elle est de 29°C. La température maximale se situe dans la troisième décade de février. Le maxima de température décadaire est de 34,4°C à Savè (Achidi *et al.*, 2012).

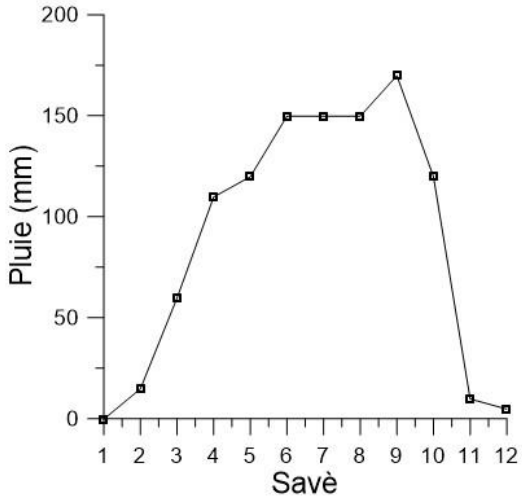


Figure 5: Répartition des pluies mensuelles moyennes dans le sud de la zone de socle entre 1980 et 2010 (modifié d'après la carte hydrogéologique du Bénin, Achidi *et al.*, 2012)

I-4. Sol et végétation

Sur le socle cristallin, les sols se développent majoritairement à partir des altérations des roches sous-jacentes. Le manteau pédologique résulte en général de l'action combinée de plusieurs facteurs tels que le climat, les formations végétales, les roches mères, l'altération, l'histoire géomorphologique et des actions anthropiques. C'est un facteur important pour l'hydrologie d'un bassin, dans la mesure où il contrôle ou régule directement, à travers le processus d'infiltration, la composante du cycle hydrologique qui est responsable de la recharge en eau souterraine. Au centre du Bénin et plus précisément dans la zone d'étude, ce manteau résulte du socle cristallin et des dépôts alluviaux (Faure, 1977 ; Faure et Volkoff, 1998 in Adjomayi, 2015). La zone d'étude présente une variété de sols regroupant trois grands ensembles que sont les sols minéraux bruts et peu évolués représentés par des cuirasses éparpillées dans le secteur, les sols sur quartzites du socle situé le long des collines et les sols ferrugineux tropicaux. Ces ensembles sont constitués de deux principaux types de sol : les sols ferralitiques et les sols ferrugineux régionaux (Faure, 1977 in Adjomayi, 2015). On rencontre également des sols noirs et hydromorphes dans les vallées des fleuves, des bas-fonds et des rivières qui traversent la zone. On a une disponibilité des terres avec cependant une forte tendance à la réduction dans les localités où l'on a la présence de collines.

La végétation dans cette zone est principalement caractérisée par une savane arbustive et arborée avec présence de forêts classées, ainsi que des forêts galeries le long des principales rivières (INSAE, 2016). Les essences les plus répandues de nos jours sont le karité, le néré, le caïlcédrat et quelques Baobabs. Mais cette savane présente des discontinuités dues au défrichage des paysans au profit des champs pour leur culture de rente. L'Etat a contribué à la valorisation et à la sauvegarde du patrimoine forestier par des plantations de teck et d'anacardier. Par ailleurs, des actions pilotes d'aménagement forestier, avec la participation des populations riveraines ont été menées dans le cadre du Projet de Gestion des Ressources Naturelles (PGRN). La végétation joue un rôle important dans le cycle de l'eau, comme moteur des échanges d'eau du sol avec l'atmosphère. Elle impacte ainsi la disponibilité de l'eau dans le sol et, par conséquent, l'ensemble des processus hydrologiques qui en dépendent. Aussi, lorsque la végétation est dense et s'étend sur une grande superficie (les forêts par exemple), elle régule l'évacuation des eaux pluviales et réduit donc les risques d'inondation (Adjomayi, 2015).

I-5. Population et activités socio-culturelles

Selon les résultats du quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH4) réalisé en 2013, la population des communes concernées par notre zone d'étude

s'élève à 986.146 habitants, soit 130 091 pour Bassila, 112 122 pour Dassa, 107 181 pour Bantè, 124 231 pour Glazoué, 142 017 pour Ouessè, 144 549 pour Savalou, 15 236 pour Bétérou (Tchaourou) 87 177 pour Savè et 123 542 pour Setto (Djidja) . La répartition par sexe de cette population est proche de la tendance observée au niveau national. On enregistre 50,09% pour le sexe féminin contre 49,91% pour le sexe masculin. La densité moyenne de la population est de 171 habitants par km². Cette densité varie selon les communes. Elle est faible à Bassila, Bétérou (Tchaourou), Savè, Ouessè, Savalou et Dassa soit respectivement 23, 31, 39, 44, 54 et 66 habitants par km² et relativement forte pour les communes de Glazoué et Setto (Djidja) soit 92 et 943 habitants par km^2 respectivement. La population de ces localités est caractérisée par une véritable diversité ethnique. Elle se compose des Tchabè, Ditamaris, Peulhs, Lokpas, yoruba etc (Guidibi, 2006).

I-6. Géologie

Les roches de socle du Bénin sont constituées de roches métamorphiques et magmatiques. Elles font partie de la ceinture des Dahoméyides. La ceinture des Dahoméyides appartient à la large ceinture Pan-Africaine/Brésilienne qui s'étend de l'Afrique du Nord au Nord-Est du Brésil (Caby *et al*., 1991 in Alle, 2019). La disposition quasi Nord-Sud de la ceinture des Dahoméyides, s'impose aux différentes roches métamorphiques. De par leur mise en place et leur histoire géologique, les formations géologiques jouent un rôle essentiel dans la formation des aquifères (Aboubakar, 2012 in Kotchoni, 2019). La zone d'étude présente une grande variété de formations géologiques tant à l'échelle régionale que locale. Elle regroupe un ensemble plus ou moins diversifié de granite syntectonique calco-alcalins), de gneiss à biotite du groupe de Kandi, de gneiss à muscovites du groupe de Djougou, d'orthogneiss à biotite du groupe de Kouandé, de grès, de schistes et d'argile.

La géologie est dominée par les formations migmatito-gneissiques et granitiques d'âge précambrien. Une série volcano-sédimentaire de faible étendue est présente dans la partie méridionale de la zone. Les aquifères sont constitués de deux réservoirs superposés en contact hydraulique permanent : un réservoir supérieur de la frange altérée, jouant un rôle capacitif et un réservoir sous-jacent dans la zone fissurée et fracturée ayant une fonction surtout drainante. Les différentes unités de la zone sont synthétisées sur la carte de la figure 6.

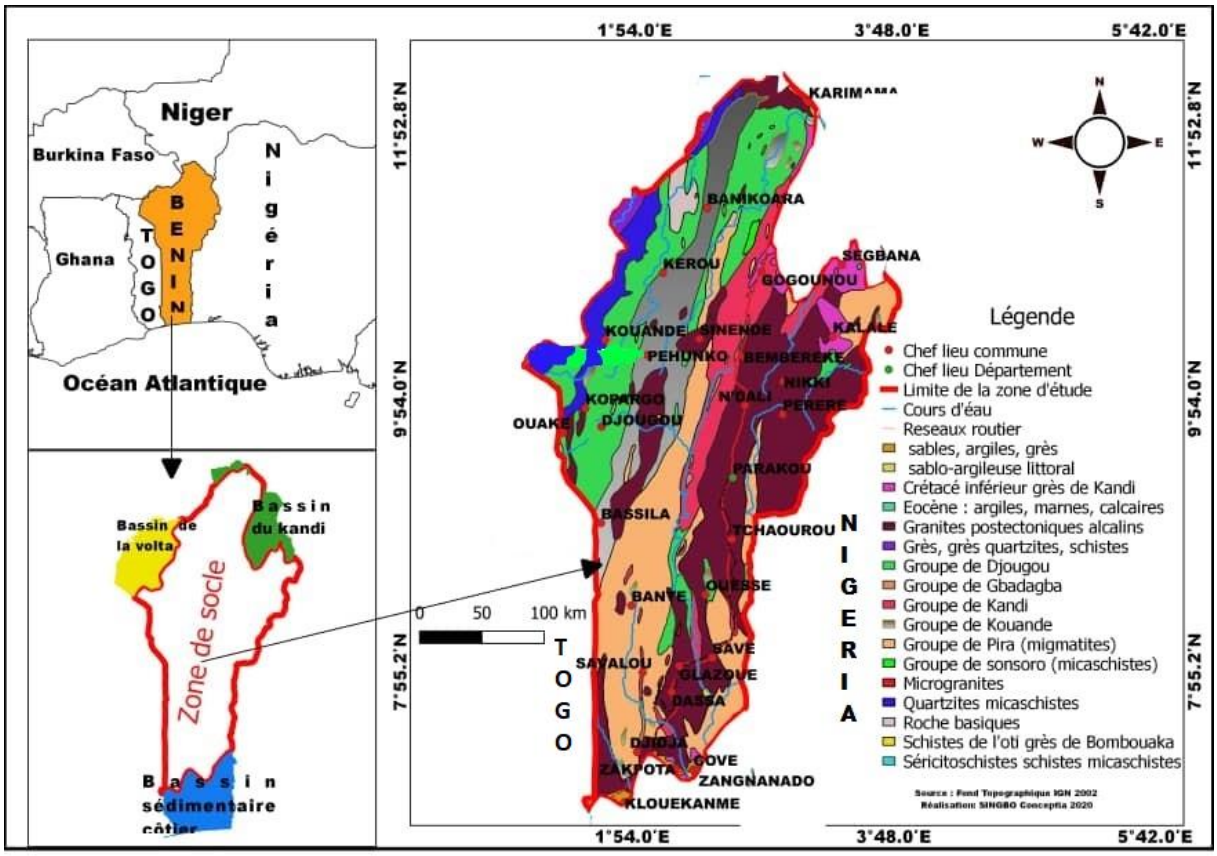


Figure 6: Carte géologique de la zone de Socle au Bénin

I-7. Hydrogéologie

Le modèle conceptuel des aquifères de socle distingue deux niveaux en connexion hydraulique (Lachassagne et al, 2011 in Kotchoni 2019). Depuis la surface vers la profondeur, on distingue la zone altérée (ZA), la zone fissurée altérée (ZFA) (encore appelée aujourd'hui par certains auteurs la zone fracturée stratiforme (Alle et al, 2018 ; in Kotchoni 2019) et la roche saine (figure 7).

La ZA représente la couche d'altérites constituée de roches altérées non consolidées et meubles avec une épaisseur moyenne de 5 à 40 m, voire plus (argile et sable avec de la cuirasse latéritique par endroits en surface) (Alle 2019). Le coefficient de perméabilité de cette zone altérée est généralement faible, mais ses propriétés d'emmagasinement contrôlent la réserve en eau des aquifères de socle.

La ZFA se caractérise par une forte densité de fractures sub-horizontales attribuée aux phénomènes d'altération (Wyns et al, 2004; in Kotchoni 2019). La densité et la connectivité des fractures sont généralement fortes au sommet et décroissent en profondeur. Cette zone fissurée

altérée possède des coefficients de perméabilité généralement plus élevés que ceux de la ZA, mais ses propriétés d'emmagasinement, quoique non négligeables, sont généralement plus faibles. La roche saine peut parfois présenter des fractures résultant de l'histoire tectonique de la région. Ces fractures se referment progressivement avec la profondeur (Boukari, 1983; in Kotchoni , 2019otchoni, 2019). Elle est « hydrogéologiquement » stérile et inintéressant (sauf rarement lorsque des discontinuités profondes traversées par certains forages peuvent s'avérer productrices) (Alle, 2019).Dans la roche non altérée, l'eau ne peut circuler et être emmagasinée que dans les fissures, dont le coefficient d'emmagasinement est faible, et ne dépasse habituellement pas quelques « pour mille » (Achidi,2012).

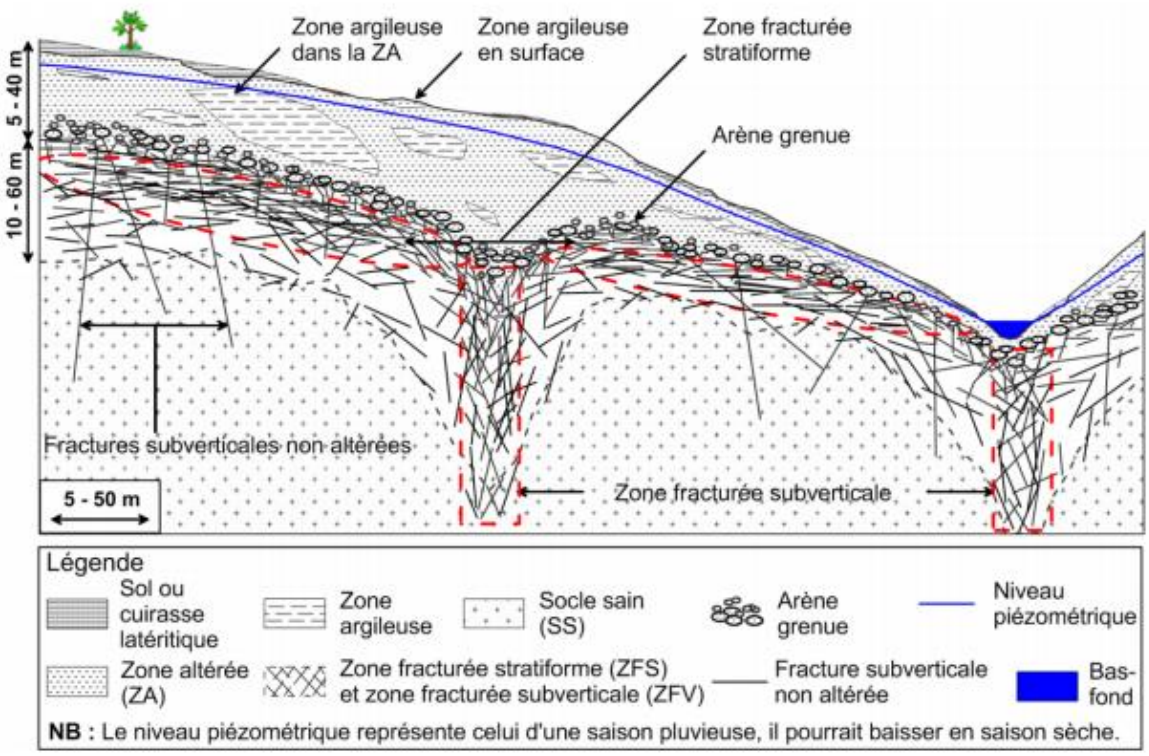


Figure 7: Modèle conceptuel hydrogéologique de la zone de socle en milieu tropical : exemple du Bénin (inspiré de Dewandel et al, 2011 ; Lachassagne et al, 2017, 2014, 2011; in Allé, 2019)

CHAPITRE 2 : APPROCHE METHODOLOGIQUE

CHAPITRE II : APPROCHE METHODOLOGIQUE

L'approche méthodologique a consisté à faire la recherche documentaire, la collecte des données de niveaux statiques, traiter les données obtenues puis effectuer des analyses comparatives.

II-1. La recherche documentaire

La recherche documentaire a consisté à collecter les informations ayant rapport avec notre travail à partir des références bibliographiques orientées vers les thèses, les mémoires, les articles scientifiques, les rapports et autres documents. Elle a permis de mieux cerner le thème et de définir une orientation des travaux de terrain.

II-2. Les données et leurs validations

II-2-1. Collecte de données

Les données utilisées pour effectuer ce travail sont celles du niveau statique (NS) relevé au niveau des piézomètres installés dans la zone d'étude. Ces données ont été prises à la Direction Générale de l'Eau (DG Eau) à Cotonou. Ce sont les données issues des enregistreurs (enr) automatiques installées dans les piézomètres sur la période de 2008 à 2016 à des pas de temps variables; les données prises par les lecteurs (lect) à un pas de temps variable sur la période de 2003 à 2015, et les données prises par les contrôleurs (cont) à un pas de temps variable couvrant aussi la période de 2009 à 2015 ; ces deux dernières mesures ont été prises de façon manuelle à l'aide de sonde piézométrique. Le tableau1 fait la synthèse des différents types de données obtenues pour chaque site ainsi que les périodes d'enregistrement.

Un pré-traitement des données issues des enregistreurs automatiques est réalisé par les agents en service à la DG Eau. Lors de ce traitement, les mesures manuelles prises par les lecteurs et contrôleurs servent à corriger les mesures prises par les enregistreurs automatiques et, à juger de la qualité de l'enregistreur à prendre de bonne mesure. Pour estimer la qualité des données ainsi corrigées, nous avons calculé l'écart compris entre les différentes mesures prises à la même date.

II-2-2. Calcul des écarts entre niveaux statiques enregistreurs et manuels

Pour effectuer ce calcul, lorsque les heures de mesure et d'enregistrement ne sont pas identiques, nous avons interpolé linéairement les niveaux (Annexe 2) qui n'ont pas été enregistrés automatiquement.

Les écarts obtenus entre les données des enregistreurs et celles des différents opérateurs (contrôleurs et lecteurs) sur chacun des sites sont représentés sous forme de diagramme en

boîtes avec les paramètres statistiques y afférents (figure 10). Le diagramme se construit à partir de cinq paramètres statistiques (tableau 2). Il s'agit du minimum (Min), du premier et troisième quartile, de la médiane (le deuxième quartile) et du maximum (Max) de la variable étudiée (figure 8), (Adjomayi, 2015).

Tableau 1: Synthèse des données obtenues

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Synthèse	Pas de temps
Glazoué															enr, lect, cont	10h/2mois/5mois
Ouessè															enr, lect, cont	12h/2mois/6mois
Savalou															enr, lect, cont	11h/3mois/6mois
Bassila															enr, lect, cont	13h/4mois/3mois
Bantè															enr, lect, cont	30min/2mois/5mois
Bétérou															enr, lect, cont	4h/5mois/3mois
Savè															enr, lect, cont	8h/3mois/5mois
Setto															enr, lect, cont	2h/2mois/4mois
Dassa															enr, lect, cont	10h/2mois/4mois

Dans un premier temps, nous avons procédé à la validation des données piézométriques ; étape primordiale et indispensable pour une quelconque analyse. La validation des données a consisté à rechercher, ou à détecter les données aberrantes ou redondantes ; c'est-à-dire des données fausses ou n'apportant aucune information supplémentaire à la chronique en fonction de l'échelle de l'étude (pas de temps journalier, annuel, mensuel).

Une fois les données redondantes détectées, on filtre ensuite les données pour les retirer. La validation des données permet d'avoir à disposition des données de bonne qualité pour une analyse rigoureuse. Dans le cadre de notre travail, nous avons opté pour une méthode statistique numérique (méthode développée par Matakara en 2015) afin d'automatiser la démarche et de la rendre reproductible d'une série piézométrique à une autre.

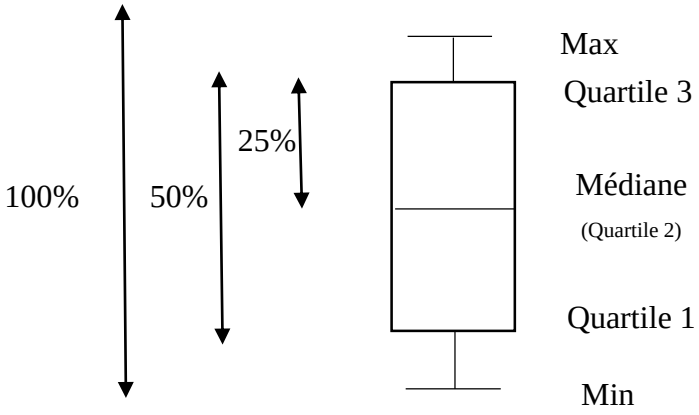


Figure 8: Exemple de diagramme en boîte

II-2-3. Recherche de données aberrantes

La recherche des données aberrantes/redondantes se résume en deux (02) étapes à savoir : le calcul des pentes et la réalisation de l'histogramme des pentes. Ce travail a été fait sur les données des enregistreurs.

II-2-3-1. Calcul des pentes ou de la dérivée

A partir des chroniques de NS (les dates en abscisse et les NS en ordonnée, figures 11), on calcul et on trace la courbe des pentes de NS (les dates en abscisse et les dérivés des NS en ordonnée, figure 12).

La courbe des pentes correspond à la dérivée des NS en fonction du temps, calculée suivant l'équation 1 ci-après :

$$\boldsymbol{Pente\ t = \frac{NS(t) - NS(t-1)}{Date\ (t) - Date\ (t-1)}} \qquad \textbf{(1)}$$

Ns_t : Niveau statique au temps t correspondant à la **date t**

$Ns_{(t-1)}$: Niveau statique au temps t-1 (précèdent) correspondant à la **date (t-1)**

A partir de la courbe des pentes de NS (figure 12), on détermine les données aberrantes/redondantes qui correspondent probablement à des valeurs de NS extra-ordinaires.

Pour déterminer si la valeur de la pente (dérivée) est critique, on réalise l'histogramme des pentes.

II-2-3-2. Réalisation de l'histogramme des pentes (graphique des fréquences)

Par définition, l'histogramme est un diagramme composé de rectangles contigus dont les aires sont proportionnelles aux effectifs (ou aux fréquences) et dont les bases sont déterminées par les intervalles de classes. La fréquence d'une valeur c'est le quotient obtenu en divisant l'effectif de cette valeur par l'effectif total. Ce quotient est inférieur ou égal à 1 et est souvent exprimé en pourcentage (Etienne, *et al*., 2010 cité par Matakara en 2015).

Pour ce qui nous concerne, la détermination de l'intervalle de classe dans nos séries de pente a été déterminée en tenant compte d'une estimation de l'incertitude de mesure du niveau statique. Ainsi, comme proposé par Matakara, une incertitude de 1 cm, et donc une largeur de classe de 1 cm, a été retenue pour chaque classe (tableau en annexe 1). L'histogramme de fréquence de pente des NS (exprimées en effectif) est construit pour le site de Savè illustrée sur la figure 13 à partir des données du tableau en annexe 1. Cet histogramme nous a permis de déterminer l'intervalle de classe des données retenues. Les classes de valeurs isolées et surtout de faible fréquence sont celles qui seront filtrées.

II-2-4. Filtrage des niveaux statiques

Les données aberrantes qui sont dans la série sont très probablement des erreurs de mesures que nous pouvons filtrer numériquement. Dans la partie précédente, nous avons vu que les classes de valeurs isolées et surtout de faible fréquence sur les histogrammes, sont celles qu'il faut filtrer. Le logiciel Excel à travers sa fonction « Filtrer » permet de réaliser des filtres automatiques. Une fois les données aberrantes filtrées, on trace la chronique des NS avec les données de bonnes qualités.

La figure 14 illustre la superposition de variation de NS reporté et filtré. Cette superposition aide à bien visualiser toutes les données aberrantes filtrées. Ainsi on obtient le graphe des NS filtré (figure 15). L'ensemble du traitement des données a été réalisé avec le tableur Excel. Les différents graphiques ont été réalisés avec le logiciel Grapher.

II-3. Analyse des signaux piézométriques

L'analyse des signaux piézométriques dans la zone de socle, repose sur les données de NS filtré. Cette analyse se résume en trois (03) grandes étapes à savoir ; l'analyse par similitude ou analyse visuelle, l'analyse des amplitudes et l'analyse des déphasages entre les chroniques.

II-3-1. Analyse par similitude

Elle consiste à catégoriser les sites suivant la variation des NS et suivant la profondeur des NS. Lorsque les montées et les descentes des chroniques des sites sont presque identiques et qu'elles ont des niveaux statiques presque égaux, nous regroupons ces sites dans une même catégorie. Cette analyse est conduite par une analyse visuelle.

II-3-2. Analyse des amplitudes annuelles

L'amplitude est la différence entre les valeurs extrêmes d'une grandeur. Elle est la mesure scalaire d'un nombre positif caractérisant l'ampleur des variations d'une grandeur. Dans le but de confirmer la catégorisation des chroniques par l'analyse visuelle, nous avons calculé et analysé les amplitudes des chroniques regroupées. Le calcul se fait à partir des paramètres statistiques (maximum et minimum) de la variable étudiée ; une fois la valeur obtenue nous avons considéré le premier point comme référence et nous le soustrayons de tous les autres points ; ce qui nous a permis d'obtenir les chroniques des amplitudes en considérant les différentes catégories de sites. Les différents résultats sont présentés dans la section III-2-2.

II-3-3. Analyse des déphasages entre les chroniques

Le déphasage dans les chroniques est la différence temporelle que l'on observe entre les différentes chroniques d'une même catégorie. Le déphasage nous permet de connaitre le décalage de temps entre les montées et les descentes dans les chroniques. Pour ce faire, nous avons calculé la dérivée des NS car; lorsque la dérivée change de signe, elle indique un changement dans la chronique (soit une montée ou une descente). Les résultats différents issus de ces analyses sont présentés dans la section III-2-3.

II-4. Identification des paramètres susceptibles d'expliquer le comportement observé dans les chroniques

L'identification des paramètres a consisté à se référer à des grandeurs qui pourraient contrôler la dynamique de l'aquifère. Il s'agit de la profondeur du NS et de la porosité de drainage (liée aux formations qui constituent l'aquifère). Pour ce faire, nous avons calculé la profondeur des NS moyens par années, pour ensuite les analyser en fonction des amplitudes annuelles par catégorie de sites. La courbe des amplitudes obtenue nous permettra de discriminer s'il s'agit d'une influence de la recharge (la pluie) ou une influence de la porosité de drainage (Sy). Ici, le travail a été fait sur les données des enregistreurs et celles des lecteurs.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III-1. Validation des données

L'ensemble des données collectées a permis de réaliser les chroniques piézométriques pour tous les types de données à disposition (enr, cont, lect). Ces chroniques sont présentées sur la figure 9.

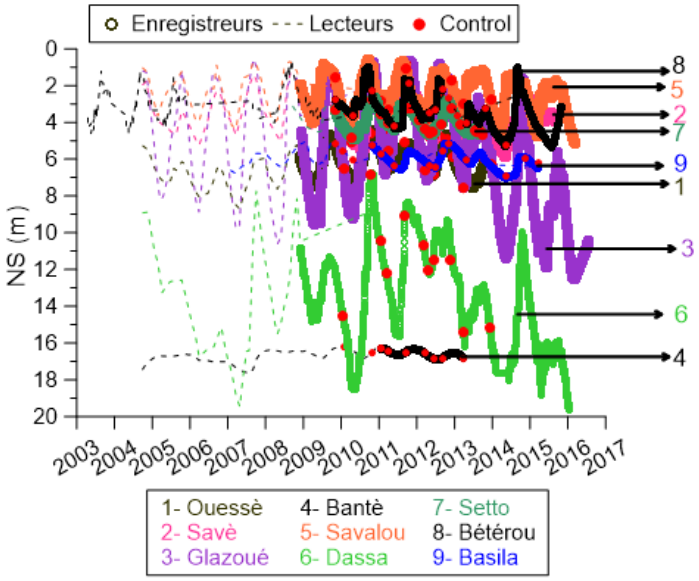


Figure 9: Chronique des niveaux statiques pour l'ensemble des sites et pour tous les types de données.

Il ressort de ce graphe que les données lecteurs commencent quelques années avant les données des enregistreurs, alors que celles des contrôleurs coïncidents avec quelques données enregistreurs (les contrôleurs vont déchargés les données enregistreurs et prennent aussi des mesures manuelles pour d'éventuels contrôles). En d'autres termes, les données des enregistreurs font généralement suite aux données des lecteurs et les ont remplacées. Les données contrôles servent de points de contrôle des mesures prises par les enregistreurs.

On note des variations de niveau statique sur l'ensemble des chroniques avec des amplitudes de variation différentes d'un site à un autre. La comparaison des données lecteurs et des contrôleurs par rapport aux données enregistreurs est présentée sur le diagramme en boîte (figure 10).

III-1-1. Calcul des écarts entre niveaux statiques enregistreurs et manuels

La figure 10 présente les diagrammes des écarts obtenus entre enregistreurs et opérateurs (lecteurs/ contrôleurs).

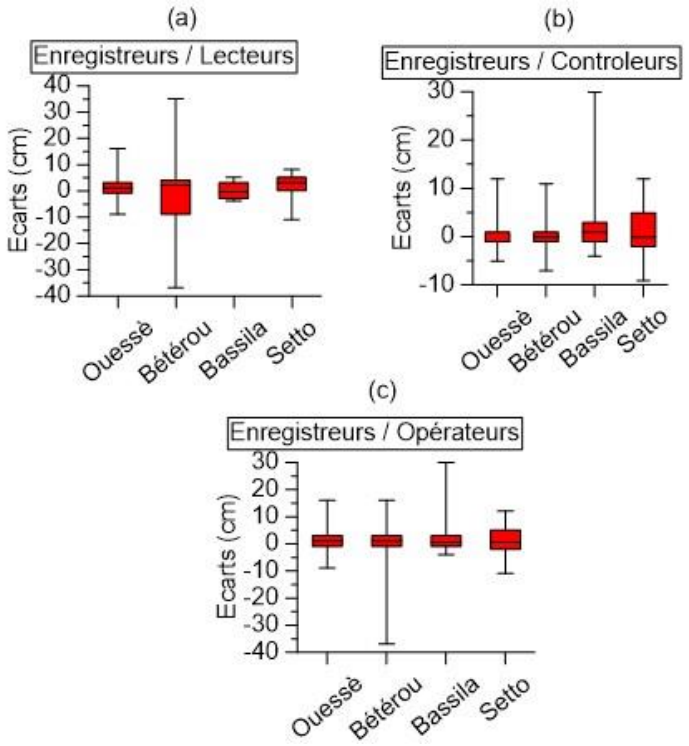


Figure 10: Comparaison des écarts entre données enregistreurs et opérateurs (lecteurs/contrôleurs) ; (a)Lecteurs ; (b) Contrôleurs ; (c)Lecteurs et Contrôleurs confondus

De cette figure, il ressort que 80% des différences entre les données des enregistreurs et celles des contrôleurs varient de -4 cm à +10,2 cm, contre -7 cm à +6,6 cm pour les lecteurs. De même, l'écart type des différences pour les données lecteurs est presque égal de celui des données des contrôleurs (Tableau 2). Ainsi, nous déduisons que les différences entre les contrôleurs et les lecteurs ne sont pas significatives

Tableau 2: Récapitulatif des données statistiques des écarts (cm)

Percentile	**Tous les sites**	**Lecteurs**	**Contrôleurs**
	Nombres de valeurs	55	45
	Max	16	30
	Min	-37	-9
	Moyenne	0,47	1,51
	Ecartype	7,94	6,4
0,1	**Centile 10% (q1)**	-7	-4
0,9	**Centile 90% (q3)**	6,6	10,2
0,5	**Médiane (q2)**	2	0
	q3-q1	13,6	14,2

De plus, l'écart entre les mesures corrigées issues des enregistreurs et les mesures manuelles des contrôleurs est du même ordre de grandeur que l'incertitude d'une mesure manuelle prise sans précaution (+/- 4 cm) d'après les tableaux antérieurs (Matakara, 2015). Les données enregistreurs corrigées de façon visuelle par les agents de la DG Eau sont donc corrigées à +/- 7cm (-4 à +10,2cm) qui correspond à l'incertitude liée à une mauvaise mesure manuelle.

III-1-2. Recherche de données aberrantes

La recherche de données aberrantes a été faite pour l'ensemble des sites. Nous ne présentons les résultats que pour un seul site. La figure 11 ci-dessous présente la chronique piézométrique pour le site de Savè ; pour les données enregistreurs (les dates en abscisse et les niveaux statiques en ordonnée). On remarque des points qui semblent se décaler de l'allure normale de la chronique. Ce décalage ressort mieux sur le graphique montrant la variation des niveaux statiques en fonction du temps (figure 12) ; issu du calcul des pentes. Sur ce graphique, on peut déjà soupçonner les données aberrantes qui correspondent probablement à des données de NS également aberrantes (critique). C'est par exemple celles qui présentent une pente rare et forte. (Elles sont encadrées en rouge sur la figure). Pour déterminer si la valeur de la pente (dérivée) est critique, on réalise l'histogramme des pentes.

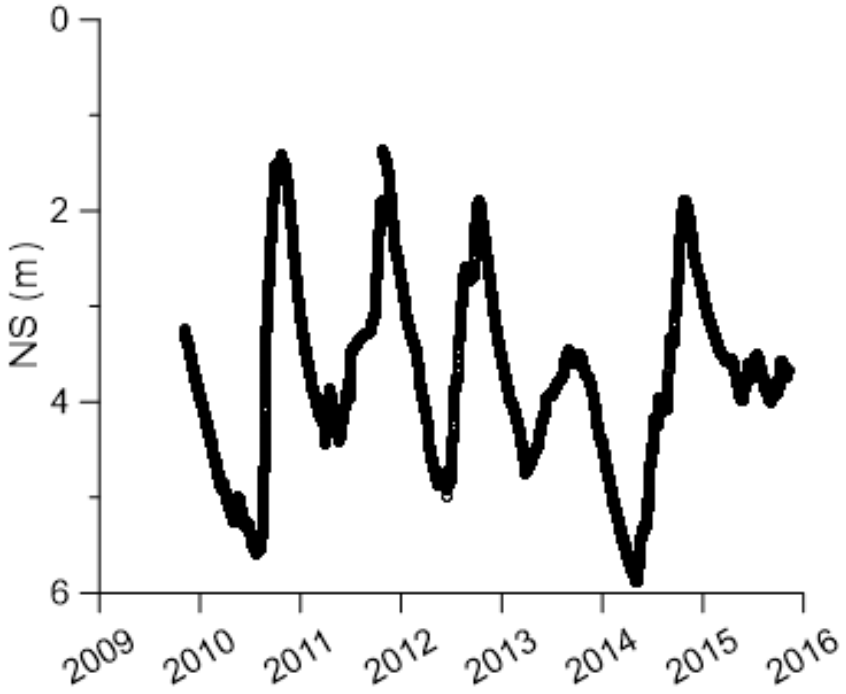


Figure 11: Chronique de NS Savè enregistreur

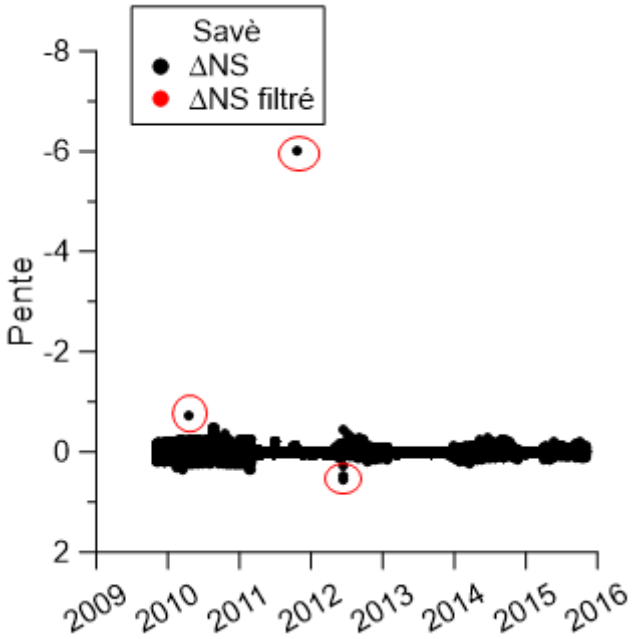


Figure 11: Chronique de dérivé, Savè enregistreur

L'histogramme des fréquences des pentes des NS (exprimées en effectif) est construit sur la figure 13 ; la variation du niveau statique retenue est compris entre l'intervalle de classes [-0,2 ; 0,2] (les bâtonnées bleus sur les histogrammes). Ensuite, les classes isolées (assez rares) et surtout de faible fréquence sont considérées contenir des données aberrantes (bâtonnées rouges). Ces classes de données aberrantes vont par la suite être filtrées.

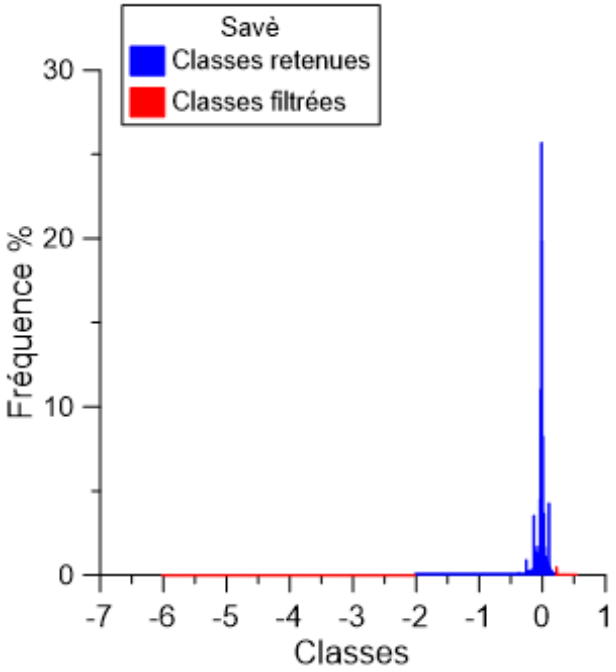


Figure 12: Variation des fréquences de NS sur le site de Savè (données enregistreurs)

III-1-3. Filtrage des niveaux statiques

Les points qui demeurent dans la série et qui ressortent sur l'histogramme comme des classes de valeurs de faible fréquence sont très probablement des données aberrantes ou des données redondantes que nous avons filtrées numériquement (figure 13). La superposition des chroniques filtrées sur celles non filtrés aide à bien visualiser toutes les données aberrantes filtrées. Comme présentée pour le site de Savè, la figure 14 montre que 298 points ont été filtrés sur la série des données enregistreurs.

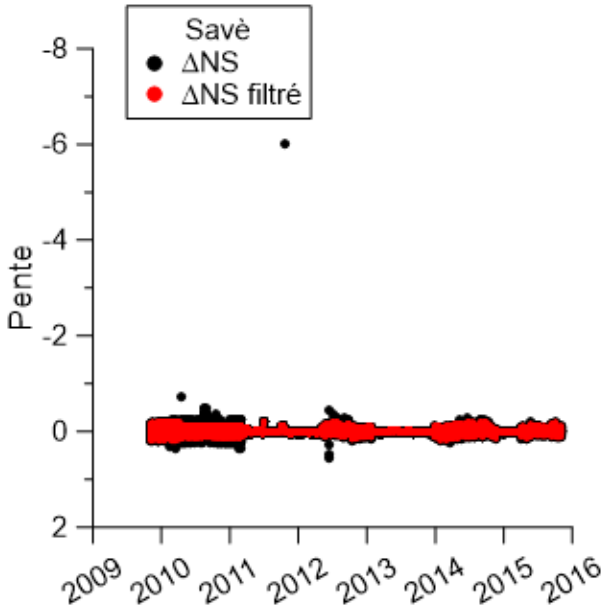


Figure 13: Variation de NS non filtré et filtré sur le site de Savè (données enregistreurs)

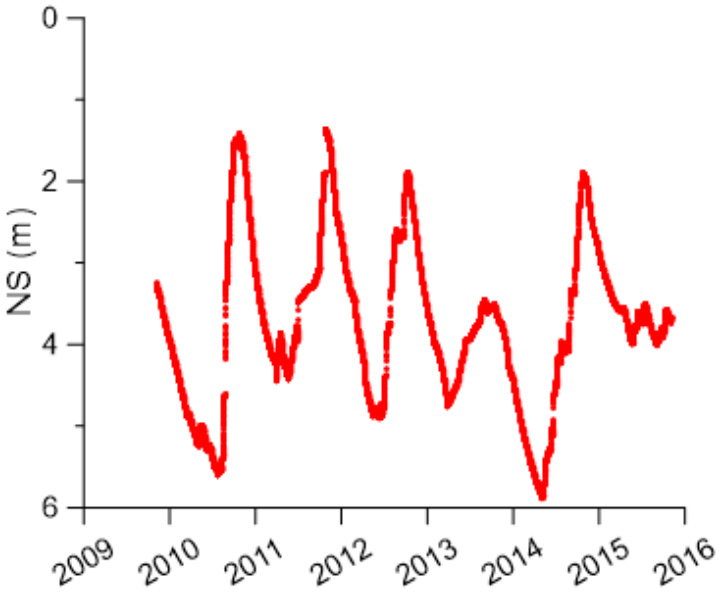


Figure 14: Chroniques des NS filtrés sur le site de Savè (données enregistreurs)

Les résultats de la validation des données sur les données enregistreurs ; sur l'ensemble des sites sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3: Récapitulatif des erreurs enregistrées pour les types de données analysées (enregistreur et lecteurs).

Analyse générale du control de la qualité des données	
Types de données	Enregistreurs
Période de suivi	2008-2016
Nombre de piézomètre Suivis	9
Pas de temps moyen de mesure	8h
Nombre de valeur analysée	190540
Nombre de données aberrantes détectées	12071
Pourcentage de données aberrantes détectées	6,34%

Ce tableau montre que 6,34% de données aberrantes ont été détectées sur les données enregistreurs sur l'ensemble des 09 sites couvrant la période de 2008 à 2016, par la méthode numérique. L'intérêt du filtrage des données aberrantes/redondantes au sein de nos chroniques piézométriques est de repérer les enregistreurs automatiques dysfonctionnels, ou des pas de temps d'enregistrement mal adaptés à la dynamique des chroniques comme le site de Setto où le pourcentage est élevé (22%) (Tableau 4).

Finalement, notre travail indique que les données reçues de la DG Eau sont d'une qualité correspondante à une mesure manuelle grossière. La méthode numérique proposée par Matakara en (2015) et appliquée dans le cadre de notre travail vient en complément à la méthode visuelle mise en application par les services de la DG Eau car elle permet de mettre en lumière certaines données aberrantes/redondantes dissimilées dans les données. Elle est beaucoup plus rapide à mettre en œuvre d'une correction visuelle, elle est reproductible d'un site à l'autre et donne donc des résultats que l'on peut comparer entre eux. L'ensemble des chroniques filtrées est présenté sur la figure 16 ci-dessous.

Tableau 4: Récapitulatif des données aberrantes enregistrées ainsi que leurs pourcentages (données enregistreurs)

Sites	Nombre total de valeurs analysées	Nombre total de données aberrantes détectées	Pourcentage de données aberrantes détectées (%)	Nombre total de valeurs vraies
Bantè	38202	16	0,041	39186
Dassa	13498	29	0,21	13469
Ouessè	6725	17	0,25	6708
Savalou	18099	191	1,05	17908
Bassila	5366	64	1,19	5302
Setto	36901	8391	22,74	28510
Bétérou	55282	4065	7,35	51217
Savè	16467	298	1,81	16169

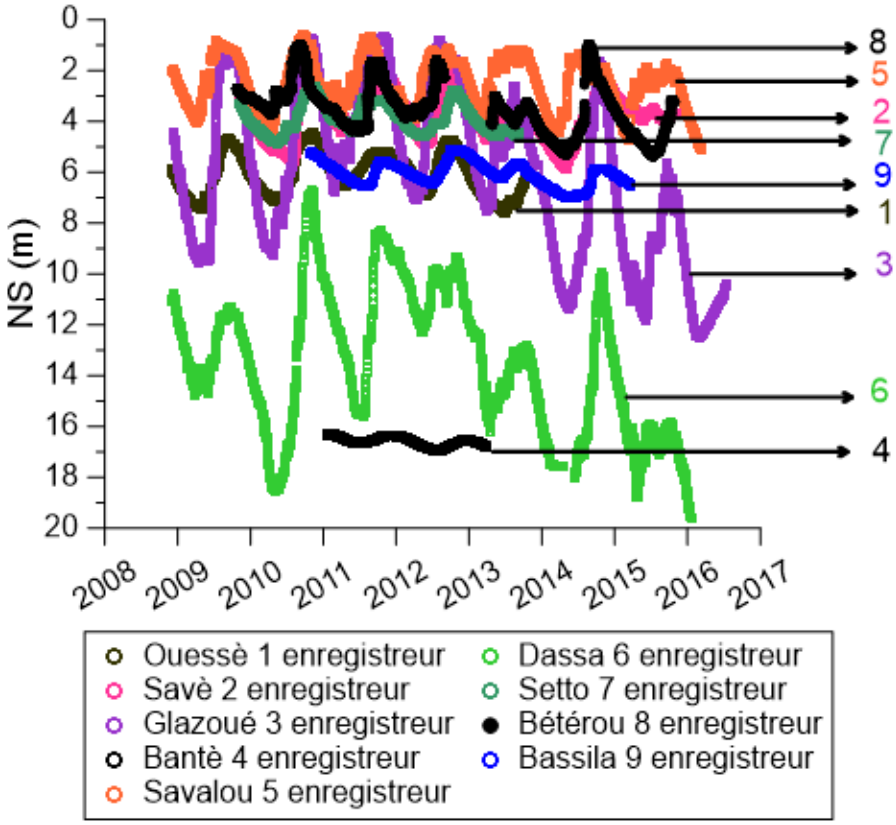


Figure 15 : Chronique des niveaux statiques filtrés pour l'ensemble des sites et pour les données enregistreurs

Ainsi, ces différents résultats valident notre 1ère hypothèse qui stipule que le préalable analyse des signaux piézométriques permet de valider les données.

III-2. Résultats d'analyse piézométrique

III-2-1. Classification des chroniques par similitude

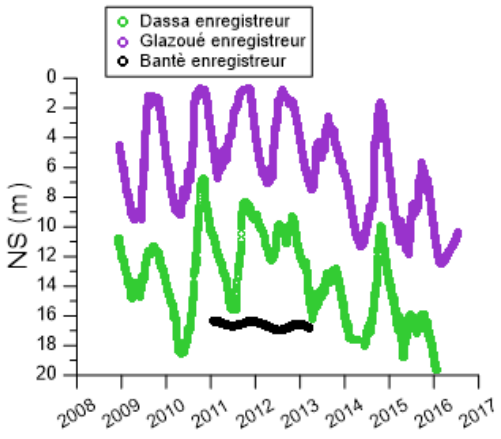
La classification des chroniques repose sur les chroniques ayant de bonnes qualités de données. L'observation visuelle de l'ensemble des chroniques (figure16) a permis de regrouper les chroniques en fonction de leur comportement. Cette observation visuelle a été appuyée par le calcul des NS moyens et des amplitudes annuelles moyennes (tableau 5).

Tableau 5: Récapitulatif des amplitudes moyennes et de NS moyens annuels

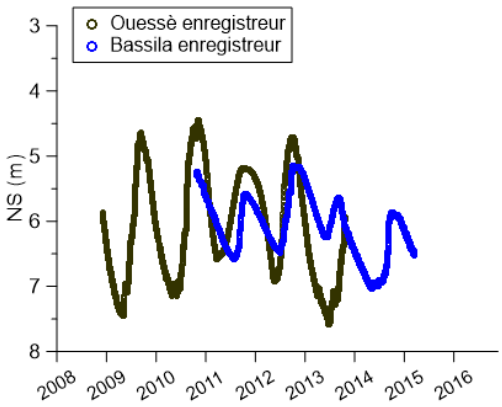
Sites	NS moyens (m)	Amplitudes annuelles moyennes(m)	Catégorie de sites
Dassa	13,67	4,14	**Catégorie 1**
Glazoué	6,22	4,6	
Bantè	16,62	0,05	
Ouessè	6,05	1,36	**Catégorie 2**
Bassila	6,03	0,53	
Setto	3,94	0,65	**Catégorie 3**
Savè	3,74	1,73	
Savalou	2,51	2,06	
Bétérou	3,45	1,89	

Ainsi pour l'ensemble des 09 sites d'étude, nous avons 03 catégories de classification des chroniques. La figure 17 montre les différentes catégories de chronique. Une première classification de chronique regroupant 03 sites (Dassa, Glazoué et Bantè) avec des NS variant entre 1 et 20 m (Catégorie 1). Une seconde classification regroupant 02 sites (Bassila et Ouessè) pour des NS compris entre 4 et 9 m (Catégorie 2). Une troisième classification regroupant 4 sites (Savè, Setto, Savalou et Bétérou) avec des NS compris entre 1 et 6 m (Catégorie 3). Il est a noté que pour la 1ère catégorie, le site de Bantè semble ne pas avoir le même comportement que les autres sites mais se retrouve dans les mêmes gammes de NS moyen (voir tableau 6).

Catégorie 1 : Dassa, Glazoué et Bantè



Catégorie 2 : Ouessè, Bassila



Catégorie 3 : Bétérou, Savè, Setto et Savalou

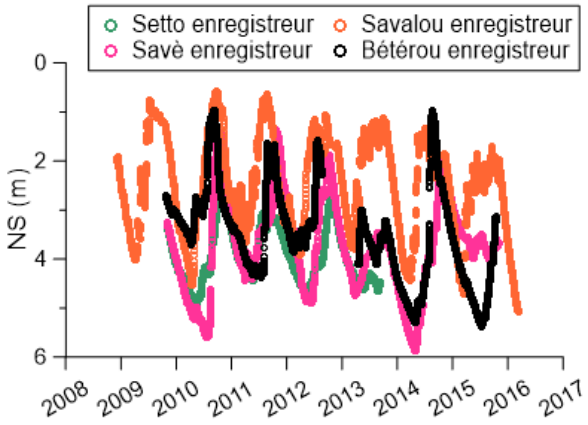


Figure 16: Chronique de catégorisation de NS des sites enregistreur

Sur ces différents graphes de la figure 17, on constate que les chroniques ont presque les mêmes amplitudes et mêmes niveaux statiques moyens par catégorie de sites à l'exception du site de Bantè qui se comporte un peu différemment. Donc, dans l'ensemble, il y a une bonne similitude entre les différents sites par catégorie.

III-2-2. Amplitude annuelle des chroniques

La classification visuelle présentée dans la section précédente a été renforcée par le calcul des amplitudes annuelles par catégorie de site. Les figures 18, 19, et 20 montrent des variations de l'amplitude pour les différentes classifications avec des NS approximativement égaux. L'observation de différence pourrait être expliquée par deux paramètres différents à savoir : une différence de pluie qui engendrerait des recharges différentes d'un site à l'autre, ou des porosités de drainage (Sy) différents d'un site à l'autre. L'allure que présentent les courbes d'amplitude permettra d'affecter le paramètre qui justifie les différences observées.

✓ Catégorie 1 : Dassa, Glazoué et Bantè

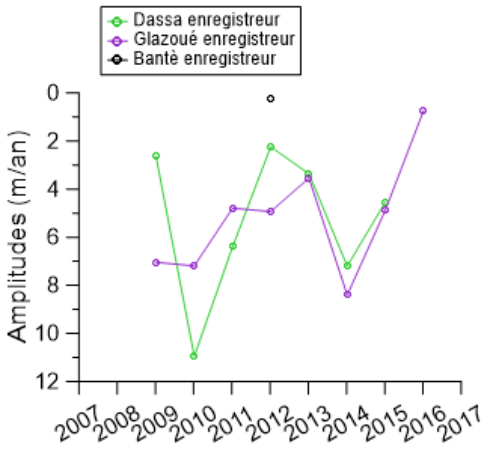


Figure 17: Chronique de catégorisation des amplitudes (catégorie 1)

Sur ce graphe, on constate que l'amplitude annuelle est forte à Dassa/Glazoué et faible à Bantè. La différence maximale d'amplitude obtenue entre Dassa/Glazoué et Bantè est forte (environ 6 m) et du même ordre de grandeur pour les 3 années d'observation : elle est probablement liée à la porosité de drainage qui ne pourrait ne pas être la même sur les sites de Bantè et Dassa/Glazoué. La faible variation d'amplitude entre les sites de Dassa et Glazoué pourrait être expliquée par la différence de pluie qui engendrerait des recharges différentes sur ces sites.

✓ Catégorie 2 : Ouessè, Bassila

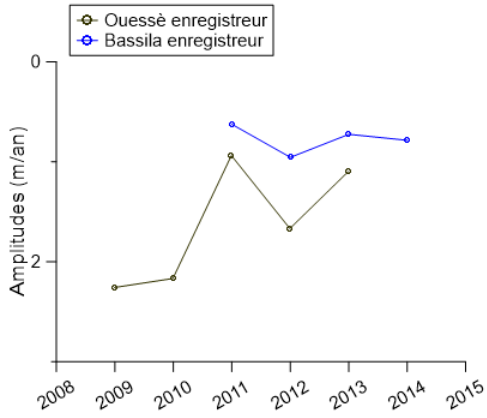


Figure 18: Chronique de catégorisation des amplitudes (catégorie 2)

Pour la 2ème catégorie de site, on constate que l'amplitude annuelle est toujours plus forte à Ouessè qu'à Bassila ; la différence d'amplitude est de 1 à 2 m et pourrait être expliquée par une différence de porosité de drainage qui reste bien évidement constante d'une année à l'autre. Les variations d'amplitude d'une année à l'autre pour un même site sont-elles attribuées à des différences de recharge.

✓ Catégorie 3 : Bétérou, Savè, Setto et Savalou

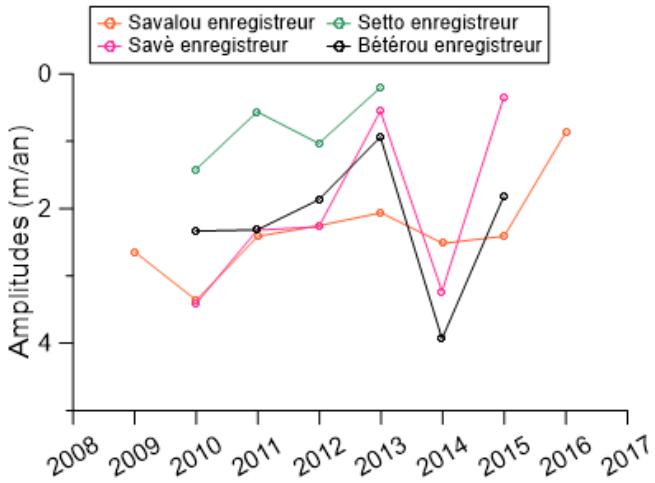


Figure 19: Chronique de catégorisation des amplitudes (catégorie 3)

Sur ce graphe, on constate que sur les quatre sites l'amplitude est variable d'une année à l'autre ; elle est forte à Bétérou, moyenne à Savè et Savalou et faible à Setto. La différence d'amplitude est d'environ 1 m entre les différents sites. Cette différence d'amplitude observée est du même ordre de grandeur que la différence inter-annuelle pour un même site et pourrait donc s'expliquer par une différence de recharge d'un site à l'autre.

III-2-3. Déphasage des chroniques

Les figures 21, 22 et 23 montrent les déphasages entre les sites ; qui n'est rien d'autre que le décalage de temps obtenu entre la montée et la descente des chroniques.

Catégorie 1 : Dassa, Glazoué et Bantè

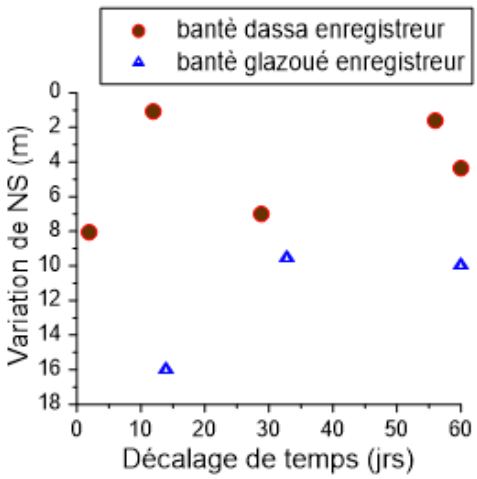


Figure 20: Décalage de temps dans les chroniques, catégorie 1

La figure 21 ci-dessus présente le décalage de temps dans les chroniques pour la catégorie de site 1. De cette figure on constate que lorsque le NS est faible le décalage de temps est généralement petit. On déduit que plus le NS est faible, plus on est en phase dans les chroniques tandis que plus le NS est élevé plus le déphasage dans les chroniques est grand.

Catégorie 2 : Ouessè, Bassila

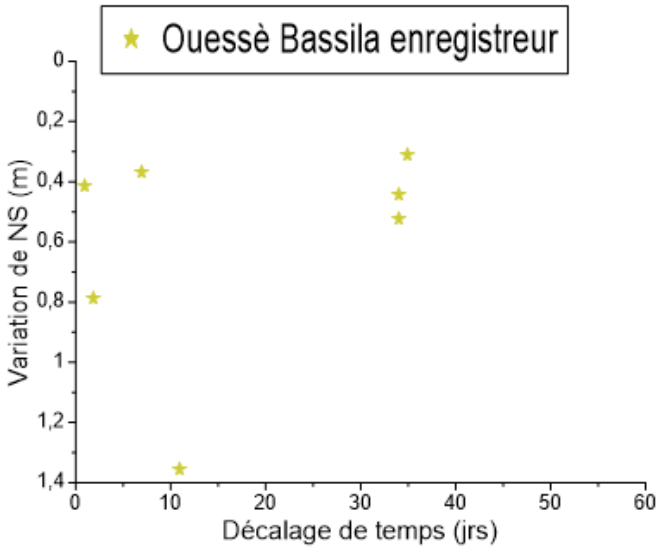


Figure 21: Décalage de temps dans les chroniques, catégorie 2

Catégorie 3 : Bétérou, Savè, Setto et Savalou

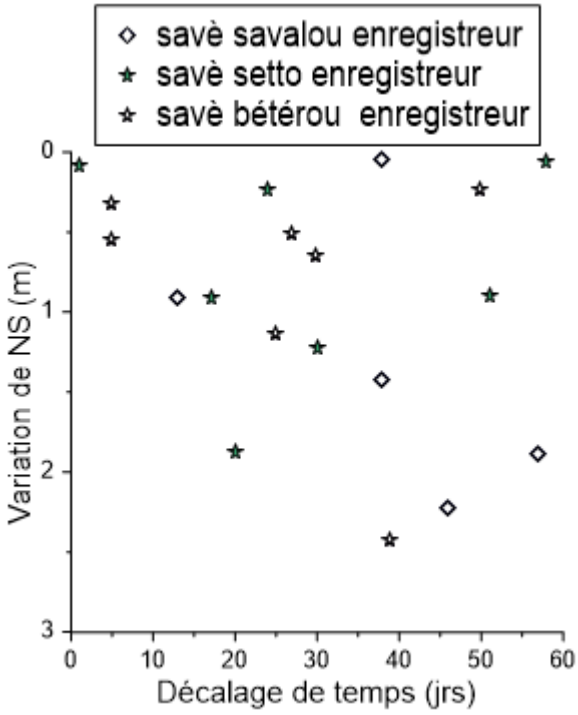


Figure 22: Décalage de temps dans les chroniques, catégorie 3

Les figures 22 et 23 ci-dessus présentent le décalage de temps dans les catégories de site 2 et 3. De ces figures, on constate qu'il n'y a pas de relation entre la variation du NS et le décalage de temps obtenu.

La figure 24 ci-dessous présente le décalage de temps sur l'ensemble des sites. De cette figure on constate que lorsque le NS est faible (moins de 2m), il n'y a pas de relation entre la profondeur des NS et le décalage de temps. Par contre, pour les NS plus profonds, on remarque que le décalage de temps semble positivement contrôlé par la profondeur.

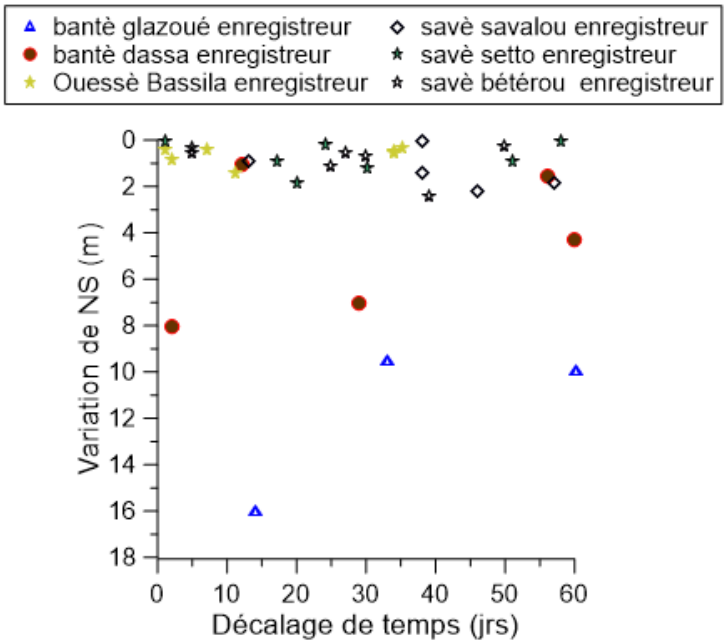


Figure 23: Décalage de temps de tous les sites

En somme, l'analyse par similitude nous a permis de voir les ressemblances entre les différentes chroniques que nous avons obtenues. La similitude s'est révélé entre les sites de Bassila Ouessè ; Dassa, Glazoué, Bantè et entre les sites de Savè, Setto, Savalou, Bétérou.

L'analyse sur les amplitudes a révélé que les amplitudes sont variables d'un site à un autre ; ceci pourrait s'expliquer suite à la différence de recharge et à la porosité de drainage par site.

L'analyse des déphasages nous a permis de voir le décalage de temps qui existe entre les montées et les descentes dans nos différentes catégories de chronique. Le déphasage a été observé sur les sites; il a été exprimé en fonction de la profondeur des niveaux statiques. De ces analyses, la relation entre la profondeur des NS et le décalage de temps n'est pas très claire. L'ensemble de ces analyses vient valider notre 2ème hypothèse qui montre que les signaux piézométriques ne sont pas similaires sur l'ensemble de la zone d'étude.

III-3. Paramètres susceptibles d'expliquer le comportement observé sur les chroniques

- ✓ Catégorie 1 : Dassa, Glazoué et Bantè

La figure 25 ci-dessous présente la variation de la profondeur moyenne de NS pour la catégorie de site 1. De cette figure, on constate que lorsque la profondeur du NS est petite l'amplitude annuelle est généralement élevée et lorsqu'elle est grande l'amplitude est généralement plus faible.

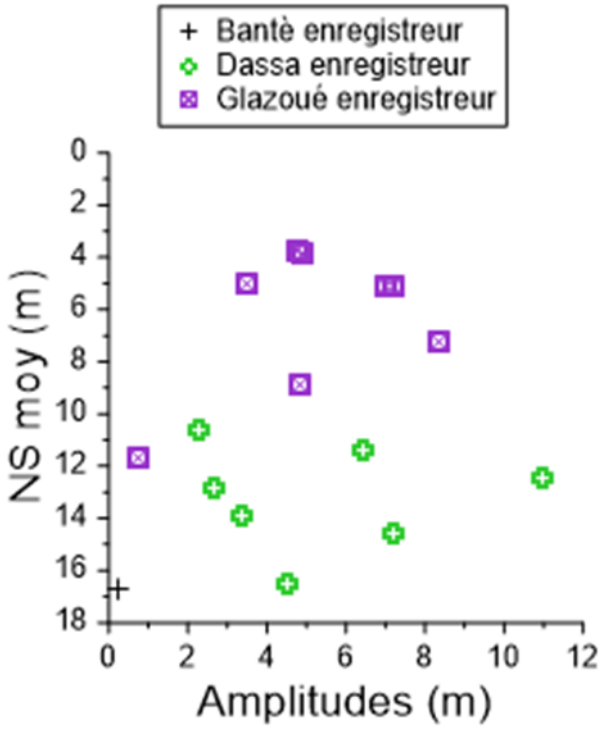


Figure 24: Profondeur moyenne de NS par catégorie de site, catégorie 1

- ✓ Catégorie 2 : Ouessè et Bassila

La figure 26 présente la variation de la profondeur moyenne de NS pour la catégorie de site 2. De cette figure, on constate que sur les deux sites Bassila et Ouessè lorsque la profondeur du NS est faible l'amplitude aussi est faible et lorsque la profondeur du NS est grande on a une forte amplitude.

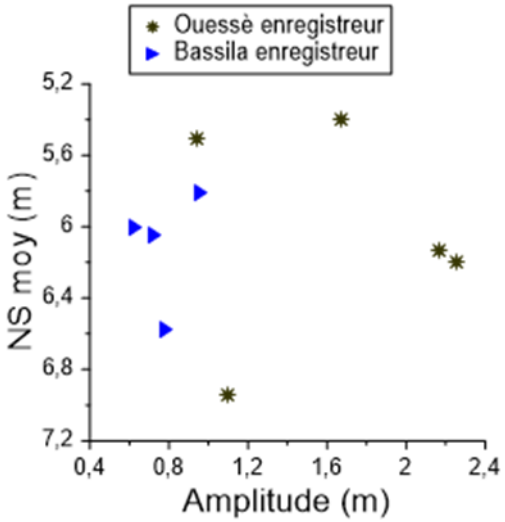


Figure 25: Profondeur moyenne de NS par catégorie de site, catégorie 2

✓ Catégorie 3 : Savè, Savalou, Setto et Bétérou

La figure 27 présente la variation de la profondeur moyenne de NS sur la catégorie de site 3. De cette figure, on constate que lorsque la profondeur moyenne de NS est grande l'amplitude annuelle est faible et lorsque la profondeur est petite l'amplitude est forte.

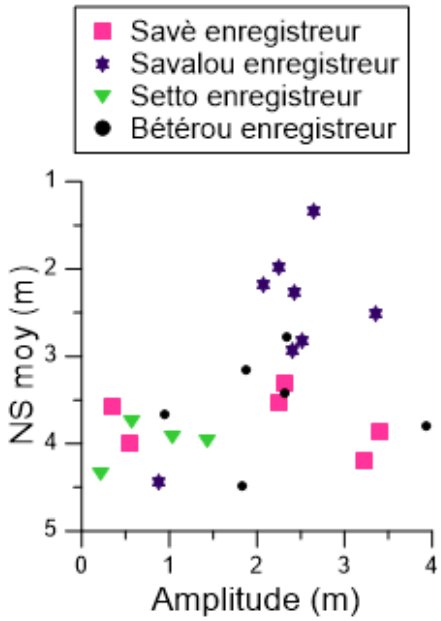


Figure 26: Profondeur moyenne de NS par catégorie de site, catégorie 3

La figure 28 présente la profondeur moyenne de NS de tous les sites en fonction des amplitudes annuelles. Malgré une forte dispersion, on constate que lorsque la profondeur moyenne de NS est élevée l'amplitude annuelle est toujours faible, alors que lorsque la profondeur moyenne du NS est faible l'amplitude peut être forte. Ceci nous semble cohérent car les travaux antérieurs

réalisés dans la zone de socle ont montré que la porosité de drainage diminue avec la profondeur. Ces observations sont aussi cohérentes avec le modèle conceptuel des aquifères de socle.

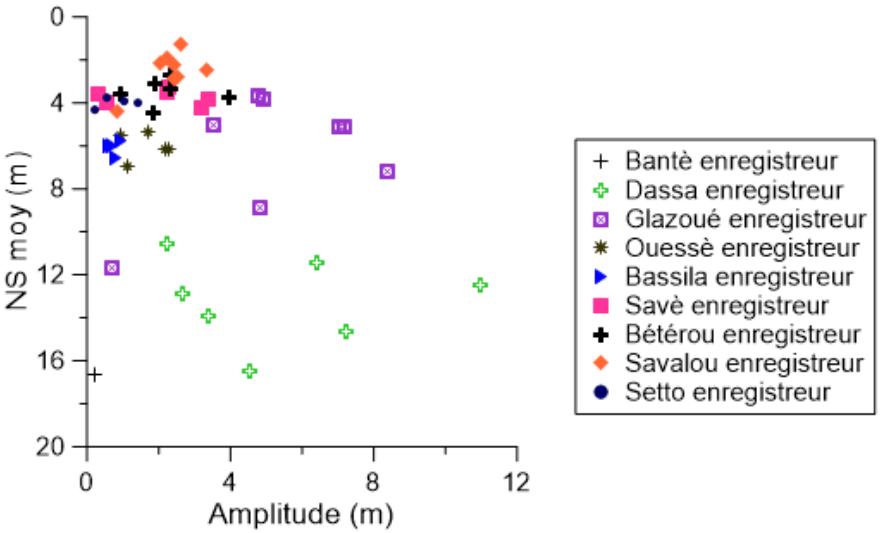


Figure 27: Profondeur moyenne de NS de tous les sites

L'identification des paramètres a permis de comprendre que le lien entre la variation de la profondeur de NS et l'amplitude annuelle est complexe. Les paramètres de contrôle qui ont été détectés sont la recharge et la porosité de drainage, mais aucun ne peut expliquer les observations à lui seul.

CONCLUSION ET SUGGESTIONS

Tout travail scientifique exige au préalable des données de bonne qualité. Ainsi, avant d'entrer dans le cadre de notre sujet, nous nous sommes consacrés à vérifier l'ensemble des données que nous avons à disposition dans l'optique de repérer et de filtrer les données aberrantes/redondantes contenues dans les chroniques piézométriques. La méthode numérique utilisée au cours de cette étude s'est révélée efficace et rapide pour la détection des données aberrantes et leur filtrage. Au terme de cette analyse, sur le total de 190540 données enregistreurs analysées, 12071 soit 6,34% ont été détectées comme données aberrantes sur la période de 2008 à 2016. Dans l'optique de vérifier l'efficacité de la méthode de correction visuelle utilisée à la DG-Eau, nous avons calculé les écarts entre les données des enregistreurs et celles des différents opérateurs (lecteurs et contrôleurs). Nous avons trouvés que 80% des différences entre les données des enregistreurs et celles des contrôleurs varient de -4 cm à 10,2 cm, contre -7 cm à 6,6 cm pour les lecteurs. Ces différences sont celles d'une mauvaise mesure manuelle et indique que la méthode de correction visuelle pourrait être améliorée.

Notre étude a porté également sur l'analyse piézométrique (analyse par similitudes, analyse des amplitudes et analyse des déphasages) et l'identification des paramètres susceptibles d'expliquer le comportement observé sur les chroniques. Nous avons trouvé que les chroniques pouvaient être catégorisées en 3 groupes, et que dans chacun des groupes la recharge et la porosité de drainage sont des paramètres qui influencent la dynamique des NS d'un site à un autre. Par contre, nous n'avons pas trouvé de relation simple entre ces paramètres et les dynamiques des NS pour l'ensemble des groupes.

Au terme de notre étude, nous recommandons aux agents de la DG Eau :

- l'organisation d'une formation pour les opérateurs (lecteur et contrôleur) afin de rappeler les principes de bonnes pratiques de mesure manuelle des niveaux statiques
- l'utilisation de la méthode numérique pour la détection et le filtrage des données aberrantes puisqu'elle permet de faire ressortir les données aberrantes qui demeurent encore dans les données malgré l'analyse visuelle faite préalablement.

Au vue des trois catégories de piézomètres identifiés pour cette étude, nous suggérons que le réseau piézométrique soit optimisé sur la base de ces catégories de piézomètres sur l'ensemble de la zone de socle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aboubakar, M., 2012. Caractérisation d'un système aquifère volcanique par approche couplée hydrogéochimique et modélisation numérique. Exemple de l'aquifère des basaltes de Dalha, sud-ouest de la République de Djibouti (thesis). Poitiers. 239p.
- Achidi J.B., Bourguet L., Elsaesser R., Legier A., Paulvé E. et Tribouillard N., 2012. Notice explicative de la carte hydrogéologique du Bénin : carte de l'ensemble du territoire à l'échelle 1/500 000. Rapport d'étude, DGEau, Cotonou, Bénin, 83p.
- Adjomayi, P.A. 2015. Etude de la recharge des aquifères dans la haute vallée de l'Ouémé au Bénin. Rapport de Master de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin 90p. UAC, Bénin.
- Alle, I C, 2019. Évaluation de l'implantation géophysique des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical (Bénin, Afrique de l'Ouest): apport de la tomographie de résistivité électrique pour la caracterisation de la cible hydrogeologique. Thèse de Doctorat de l'université d'Abomey-Calavi, Bénin 243p.
- Berding, F. Et Van Diepen C.A., 1982. Notice explicative des cartes d'aptitude culturale de la R. P. Du Bénin. Etude n° 251 CENAP/Cotonou, https://www.memoireonline.com/04/12/5650/m_Problematique-de-la-matrise-de-leau-agricole-dans-la-basse-vallee-de-lOueme--S-Ava26.html.
- Boukari, M., 1983. Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle de l'Afrique intertropicale : l'hydrogéologie de la région de Dassa-Zoumè (Benin). Thèse de doctorat de L'Uiniversité de Dakar Faculté des Sciences, Sénégal. 173p.
- Caby, R., Sial, A.N., Arthaud, M., Vauchez, A., 1991. Crustal Evolution and the Brasiliano Orogeny in Northeast Brazil, in: Dallmeyer, D.R.D., Lecorche, D.J.P. (Eds.), The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlatives, IGCP-Project 233. Springer Berlin Heidelberg, pp. 373–397.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Zaidi, F.K., Chandra, S., 2011. A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: Example of a quartz reef in granitic terrain in South India. J. Hydrol. 405, 474–487. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.050.
- Etienne, B., *et al*. 2010 – Introduction à la statistique descriptive, 2ème Ed. France 35p.
- Faure P., 1977. Carte pédologique de reconnaissance à l'échelle 1/200.000è, feuille de Djougou, ORSTOM, Paris (France) 58p.

- Faure P. and Volkoof B., 1998. Some factors affecting regional differentiation of the soils in the Republic of Benin (West Africa) 38p.
- Gnanhoui, 2008. Facteurs explicatifs du tarissement des points d'eau en milieu de socle cristallin dans le département des collines au Benin. URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n20p206.
- Guidibi M., 2006. Monographie des communes de Djidja 44p, Tchaourou 45p, Bassila 52p, Savalou 82p, Ouessè 47p, Savè 31p, Bantè 58p, Glazoué 31p, Dassa 36p.Houndagba, C.J., 1984 : Analyse des paysages d'Abomey- Zagnanado en R.P. du Bénin. Thèse 3e cycle Université Louis Pasteur Strasbourg. 286p.
- Igue, A.M., Saidou, A., Adjanohoun, A., Ezui, G., Attiogbe, P., Kpagbin, G., Gotoechan-Hodonou, H., Youl, S., Pare, T., Balogoun, I., 2013. Evaluation de la fertilité des sols au sud et centre du Bénin. Bull Rech Agron Bénin Spéc. Numéro Fertil. Maïs 12–23.
- INSAE, 2016. Cahier des villages et quartiers de ville du département de l'Atacora (RGPH-4, 2013). Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE), Bénin. Rapport, 38p.
- Kotchoni, D. O. V, 2019. Recharge des aquifère du socle du Bénin : Identification des processus, quantification et analyse de l'évolution temporelle. Thèse de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin 128p. UAC, Bénin.
- Lachassagne, P., Wyns, R., Dewandel, B., 2011. The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes: Weathering and permeability of Hard Rock Aquifers. Terra Nova 23, 145–161. https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x
- Le Barbe, L., ALE, G., Millet, B., Texier, H., Borel, Y., Gualde, R., 1993. Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Collection Monographies Hydrologiques N° 11. ORSTOM, Paris.543pMatakara Giscard, 2015. Variations piézométriques dans le champ de captage de Godomey et ses environs, période 1991-2015 ; Rapport de Master de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin 55p. UAC, Bénin.
- N'go Y.A., Gone D.L., Savané I. *et al*. 2004. Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : caractérisation hydroclimatique et physique. http://www.afriquescience.info/document.php?id=166. ISSN 1813-548X.
- Soro ; Ahoussi, K.E.; Saley, M.B.; Lasm, T. & Biemi J. (2007). Caractérisation spatio-temporelle des précipitations dans le «V» Baoulé (Centre de la Côte d'Ivoire) au cours

de la période 1966- European Scientific Journal July 2017 edition Vol.13, No.20 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 743 218 2000. Journal Africain de Communication Scientifique et Technologique, 2: 89-108.

ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1 : Classes et fréquences des NS sur le site de Savè (données Enregistreurs)

Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence
-6,01	0	-4,36	0	-2,71	0	-1,06	0
-6	0	-4,35	0	-2,7	0	-1,05	0
-5,99	0	-4,34	0	-2,69	0	-1,04	0
-5,98	0	-4,33	0	-2,68	0	-1,03	0
-5,97	0	-4,32	0	-2,67	0	-1,02	0
-5,96	0	-4,31	0	-2,66	0	-1,01	0
-5,95	0	-4,3	0	-2,65	0	-1	0
-5,94	0	-4,29	0	-2,64	0	-0,99	0
-5,93	0	-4,28	0	-2,63	0	-0,98	0
-5,92	0	-4,27	0	-2,62	0	-0,97	0
-5,91	0	-4,26	0	-2,61	0	-0,96	0
-5,9	0	-4,25	0	-2,6	0	-0,95	0
-5,89	0	-4,24	0	-2,59	0	-0,94	0
-5,88	0	-4,23	0	-2,58	0	-0,93	0
-5,87	0	-4,22	0	-2,57	0	-0,92	0
-5,86	0	-4,21	0	-2,56	0	-0,91	0
-5,85	0	-4,2	0	-2,55	0	-0,9	0
-5,84	0	-4,19	0	-2,54	0	-0,89	0
-5,83	0	-4,18	0	-2,53	0	-0,88	0
-5,82	0	-4,17	0	-2,52	0	-0,87	0
-5,81	0	-4,16	0	-2,51	0	-0,86	0
-5,8	0	-4,15	0	-2,5	0	-0,85	0
-5,79	0	-4,14	0	-2,49	0	-0,84	0
-5,78	0	-4,13	0	-2,48	0	-0,83	0
-5,77	0	-4,12	0	-2,47	0	-0,82	0
-5,76	0	-4,11	0	-2,46	0	-0,81	0
-5,75	0	-4,1	0	-2,45	0	-0,8	0
-5,74	0	-4,09	0	-2,44	0	-0,79	0

Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence
-5,73	0	-4,08	0	-2,43	0	-0,78	0
-5,72	0	-4,07	0	-2,42	0	-0,77	0
-5,71	0	-4,06	0	-2,41	0	-0,76	0
-5,7	0	-4,05	0	-2,4	0	-0,75	0
-5,69	0	-4,04	0	-2,39	0	-0,74	0
-5,68	0	-4,03	0	-2,38	0	-0,73	0
-5,67	0	-4,02	0	-2,37	0	-0,72	0
-5,66	0	-4,01	0	-2,36	0	-0,71	0
-5,65	0	-4	0	-2,35	0	-0,7	0
-5,64	0	-3,99	0	-2,34	0	-0,69	0
-5,63	0	-3,98	0	-2,33	0	-0,68	0
-5,62	0	-3,97	0	-2,32	0	-0,67	0
-5,61	0	-3,96	0	-2,31	0	-0,66	0
-5,6	0	-3,95	0	-2,3	0	-0,65	0
-5,59	0	-3,94	0	-2,29	0	-0,64	0
-5,58	0	-3,93	0	-2,28	0	-0,63	0
-5,57	0	-3,92	0	-2,27	0	-0,62	0
-5,56	0	-3,91	0	-2,26	0	-0,61	0
-5,55	0	-3,9	0	-2,25	0	-0,6	0
-5,54	0	-3,89	0	-2,24	0	-0,59	0
-5,53	0	-3,88	0	-2,23	0	-0,58	0
-5,52	0	-3,87	0	-2,22	0	-0,57	0
-5,51	0	-3,86	0	-2,21	0	-0,56	0
-5,5	0	-3,85	0	-2,2	0	-0,55	0
-5,49	0	-3,84	0	-2,19	0	-0,54	0
-5,48	0	-3,83	0	-2,18	0	-0,53	0
-5,47	0	-3,82	0	-2,17	0	-0,52	0
-5,46	0	-3,81	0	-2,16	0	-0,51	0
-5,45	0	-3,8	0	-2,15	0	-0,5	0
-5,44	0	-3,79	0	-2,14	0	-0,49	0
-5,43	0	-3,78	0	-2,13	0	-0,48	0
-5,42	0	-3,77	0	-2,12	0	-0,47	0

Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence
-5,41	0	-3,76	0	-2,11	0	-0,46	0
-5,4	0	-3,75	0	-2,1	0	-0,45	0
-5,39	0	-3,74	0	-2,09	0	-0,44	0
-5,38	0	-3,73	0	-2,08	0	-0,43	0
-5,37	0	-3,72	0	-2,07	0	-0,42	0
-5,36	0	-3,71	0	-2,06	0	-0,41	0
-5,35	0	-3,7	0	-2,05	0	-0,4	0
-5,34	0	-3,69	0	-2,04	0	-0,39	0
-5,33	0	-3,68	0	-2,03	0	-0,38	0
-5,32	0	-3,67	0	-2,02	0	-0,37	0
-5,31	0	-3,66	0	-2,01	0	-0,36	0
-5,3	0	-3,65	0	-2	0	-0,35	0
-5,29	0	-3,64	0	-1,99	0	-0,34	0
-5,28	0	-3,63	0	-1,98	0	-0,33	0
-5,27	0	-3,62	0	-1,97	0	-0,32	0
-5,26	0	-3,61	0	-1,96	0	-0,31	0
-5,25	0	-3,6	0	-1,95	0	-0,3	0
-5,24	0	-3,59	0	-1,94	0	-0,29	0
-5,23	0	-3,58	0	-1,93	0	-0,28	0
-5,22	0	-3,57	0	-1,92	0	-0,27	0
-5,21	0	-3,56	0	-1,91	0	-0,26	0
-5,2	0	-3,55	0	-1,9	0	-0,25	0
-5,19	0	-3,54	0	-1,89	0	-0,24	1
-5,18	0	-3,53	0	-1,88	0	-0,23	0
-5,17	0	-3,52	0	-1,87	0	-0,22	0
-5,16	0	-3,51	0	-1,86	0	-0,21	0
-5,15	0	-3,5	0	-1,85	0	-0,2	0
-5,14	0	-3,49	0	-1,84	0	-0,19	0
-5,13	0	-3,48	0	-1,83	0	-0,18	0
-5,12	0	-3,47	0	-1,82	0	-0,17	0
-5,11	0	-3,46	0	-1,81	0	-0,16	0
-5,1	0	-3,45	0	-1,8	0	-0,15	0

Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence
-5,09	0	-3,44	0	-1,79	0	-0,14	0
-5,08	0	-3,43	0	-1,78	0	-0,13	0
-5,07	0	-3,42	0	-1,77	0	-0,12	3
-5,06	0	-3,41	0	-1,76	0	-0,11	1
-5,05	0	-3,4	0	-1,75	0	-0,1	1
-5,04	0	-3,39	0	-1,74	0	-0,09	0
-5,03	0	-3,38	0	-1,73	0	-0,08	1
-5,02	0	-3,37	0	-1,72	0	-0,07	2
-5,01	0	-3,36	0	-1,71	0	-0,06	1
-5	0	-3,35	0	-1,7	0	-0,05	1
-4,99	0	-3,34	0	-1,69	0	-0,04	1
-4,98	0	-3,33	0	-1,68	0	-0,03	0
-4,97	0	-3,32	0	-1,67	0	-0,02	4
-4,96	0	-3,31	0	-1,66	0	-0,01	11
-4,95	0	-3,3	0	-1,65	0	0	26
-4,94	0	-3,29	0	-1,64	0	0,01	20
-4,93	0	-3,28	0	-1,63	0	0,02	8
-4,92	0	-3,27	0	-1,62	0	0,03	1
-4,91	0	-3,26	0	-1,61	0	0,04	4
-4,9	0	-3,25	0	-1,6	0	0,05	2
-4,89	0	-3,24	0	-1,59	0	0,06	1
-4,88	0	-3,23	0	-1,58	0	0,07	1
-4,87	0	-3,22	0	-1,57	0	0,08	1
-4,86	0	-3,21	0	-1,56	0	0,09	0
-4,85	0	-3,2	0	-1,55	0	0,1	1
-4,84	0	-3,19	0	-1,54	0	0,11	1
-4,83	0	-3,18	0	-1,53	0	0,12	4
-4,82	0	-3,17	0	-1,52	0	0,13	0
-4,81	0	-3,16	0	-1,51	0	0,14	0
-4,8	0	-3,15	0	-1,5	0	0,15	0
-4,79	0	-3,14	0	-1,49	0	0,16	0
-4,78	0	-3,13	0	-1,48	0	0,17	0

Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence
-4,77	0	-3,12	0	-1,47	0	0,18	0
-4,76	0	-3,11	0	-1,46	0	0,19	0
-4,75	0	-3,1	0	-1,45	0	0,2	0
-4,74	0	-3,09	0	-1,44	0	0,21	0
-4,73	0	-3,08	0	-1,43	0	0,22	0
-4,72	0	-3,07	0	-1,42	0	0,23	0
-4,71	0	-3,06	0	-1,41	0	0,24	0
-4,7	0	-3,05	0	-1,4	0	0,25	0
-4,69	0	-3,04	0	-1,39	0	0,26	0
-4,68	0	-3,03	0	-1,38	0	0,27	0
-4,67	0	-3,02	0	-1,37	0	0,28	0
-4,66	0	-3,01	0	-1,36	0	0,29	0
-4,65	0	-3	0	-1,35	0	0,3	0
-4,64	0	-2,99	0	-1,34	0	0,31	0
-4,63	0	-2,98	0	-1,33	0	0,32	0
-4,62	0	-2,97	0	-1,32	0	0,33	0
-4,61	0	-2,96	0	-1,31	0	0,34	0
-4,6	0	-2,95	0	-1,3	0	0,35	0
-4,59	0	-2,94	0	-1,29	0	0,36	0
-4,58	0	-2,93	0	-1,28	0	0,37	0
-4,57	0	-2,92	0	-1,27	0	0,38	0
-4,56	0	-2,91	0	-1,26	0	0,39	0
-4,55	0	-2,9	0	-1,25	0	0,4	0
-4,54	0	-2,89	0	-1,24	0	0,41	0
-4,53	0	-2,88	0	-1,23	0	0,42	0
-4,52	0	-2,87	0	-1,22	0	0,43	0
-4,51	0	-2,86	0	-1,21	0	0,44	0
-4,5	0	-2,85	0	-1,2	0	0,45	0
-4,49	0	-2,84	0	-1,19	0	0,46	0
-4,48	0	-2,83	0	-1,18	0	0,47	0
-4,47	0	-2,82	0	-1,17	0	0,48	0
-4,46	0	-2,81	0	-1,16	0	0,49	0

Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence	Matrice	Fréquence
-4,45	0	-2,8	0	-1,15	0	0,5	0
-4,44	0	-2,79	0	-1,14	0	0,51	0
-4,43	0	-2,78	0	-1,13	0	0,52	0
-4,42	0	-2,77	0	-1,12	0	0,53	0
-4,41	0	-2,76	0	-1,11	0	0,54	0
-4,4	0	-2,75	0	-1,1	0	0,55	0
-4,39	0	-2,74	0	-1,09	0	0,56	0
-4,38	0	-2,73	0	-1,08	0		
-4,37	0	-2,72	0	-1,07	0		

<u>Annexe 2</u> : Méthode de détermination du niveau statique (NS) par interpolation

Considérons une valeur de niveau statique obtenue manuellement lors d'une mesure contrôle faite au cours d'une tournée de collecte, soit NS_R en un temps (t_R) donné. Si les valeurs de (2) et (1) ne correspondent à aucune des valeurs enregistrées, il faut alors déterminer, par interpolation, la valeur du niveau statique qu'aurait enregistré l'appareil au temps (R).

A cet effet, on considère les deux valeurs immédiatement situées de part et d'autre de la valeur de niveau statique (R) à déterminer notamment :

NS_1 = Niveau statique mesuré au temps 1

NS_2 = Niveau statique mesuré au temps 2

NS_R = Niveau statique mesuré au temps R

$$\mathbf{NS_R = NS_1 + (t_R - t_1) * \frac{NS2 - NS1}{t2 - t1}} \quad \mathbf{(2)}$$

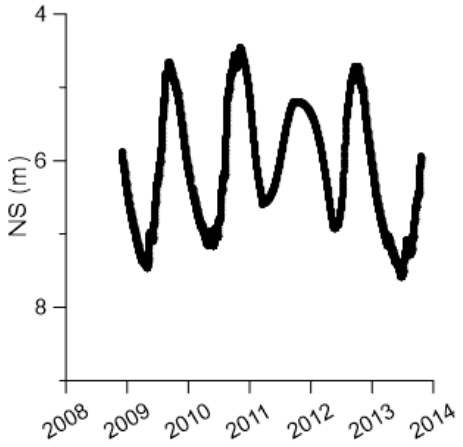
Calcul des écarts ou barre d'erreur

L'écart (E) entre la valeur du niveau statique déterminée par interpolation (NS) et celle du niveau statique mesuré à l'aide de sonde piézométrique (lecteur et contrôleur) lors de la collecte des données (NS_m) à la même date et à la même heure est ensuite calculé par l'équation suivante

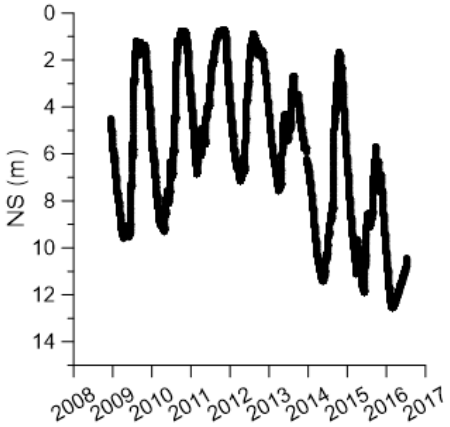
Ecart (E): E = NS (calculé par interpolation) – NS_m (manuelle) **(3)**

Annexe 3 : Chronique de NS enregistreurs

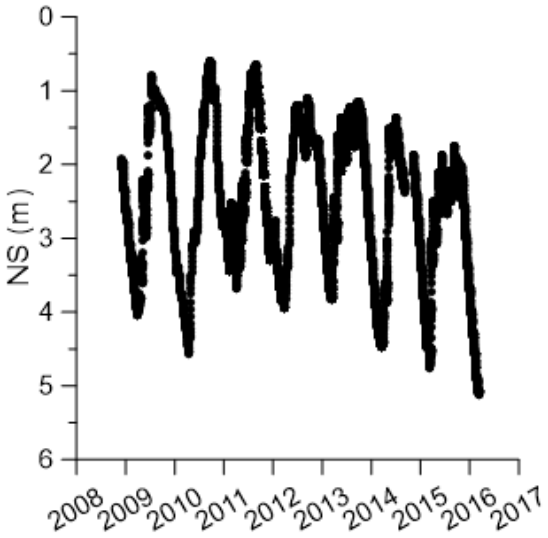
OUESSE



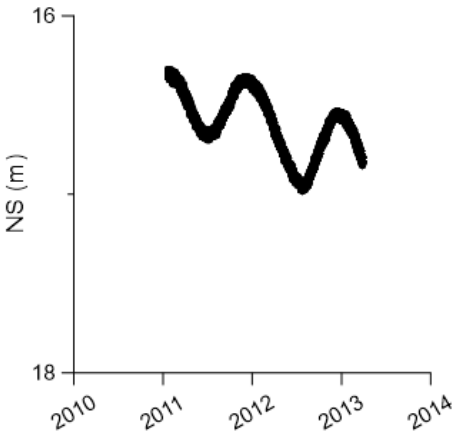
DASSA



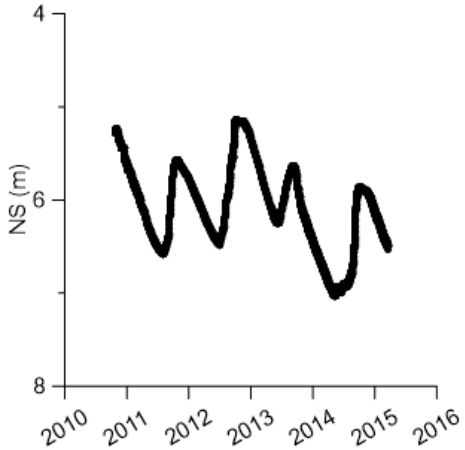
SAVALOU



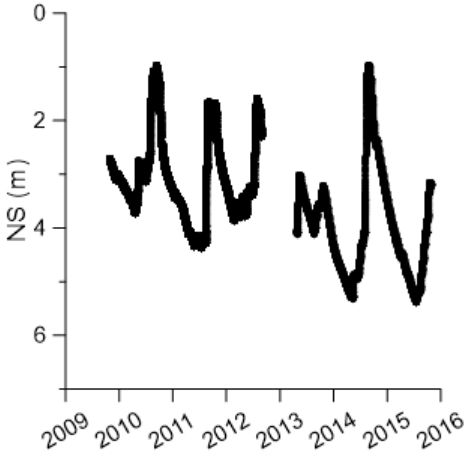
BANTE



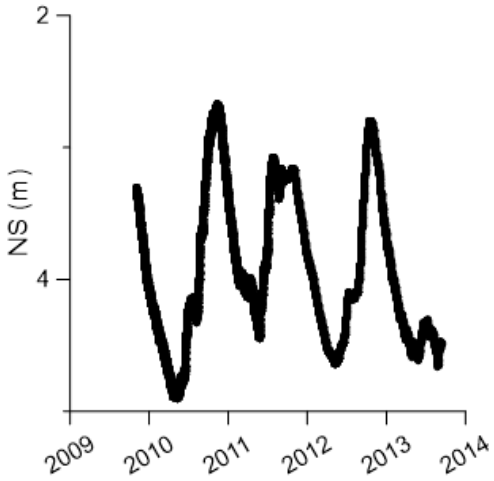
BASSILA



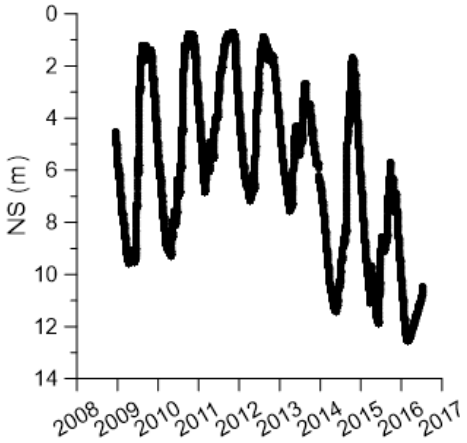
BETEROU



SETTO

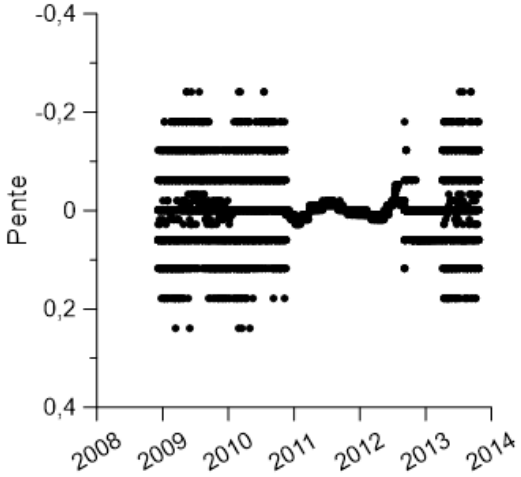


GLAZOUE

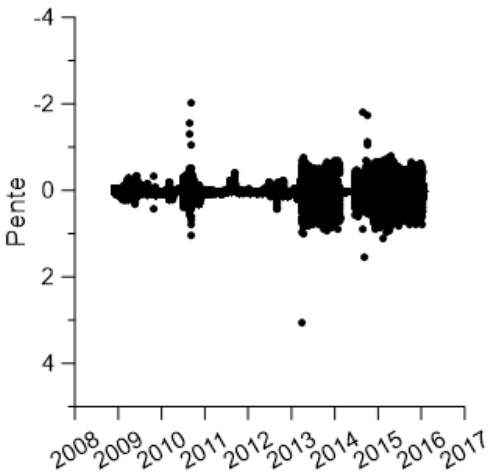


Annexe 4 : Chroniques de dérivé des NS

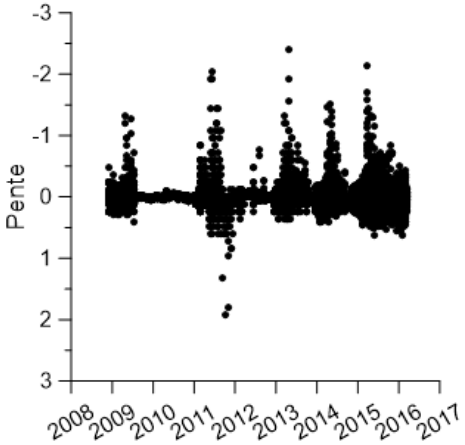
OUESSE



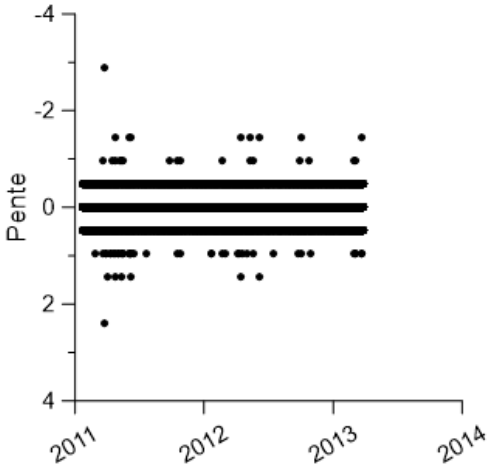
DASSA



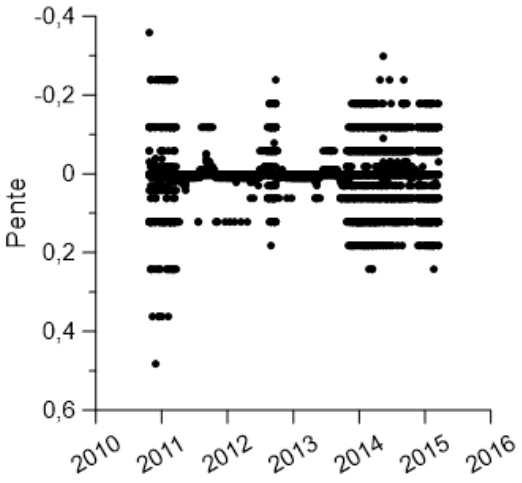
SAVALOU



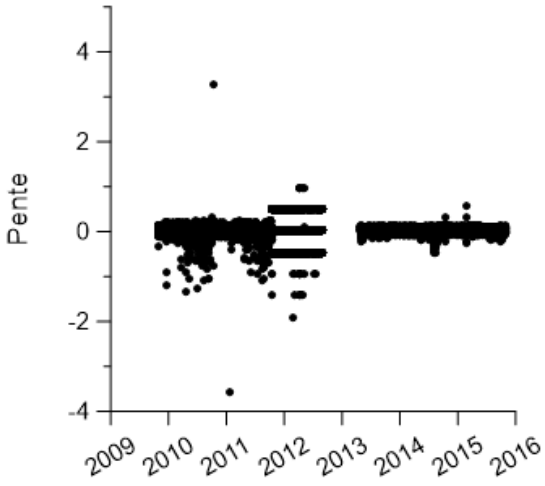
BANTE



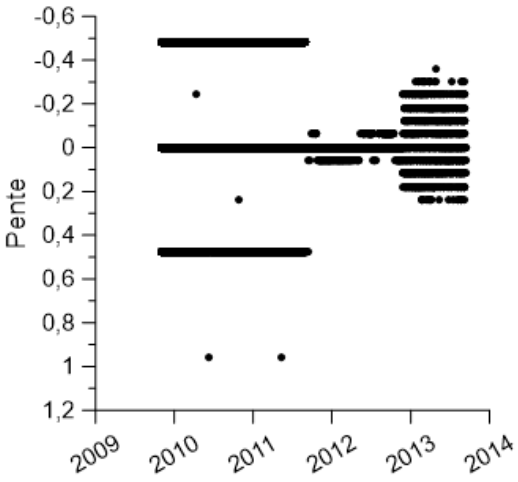
BASSILA



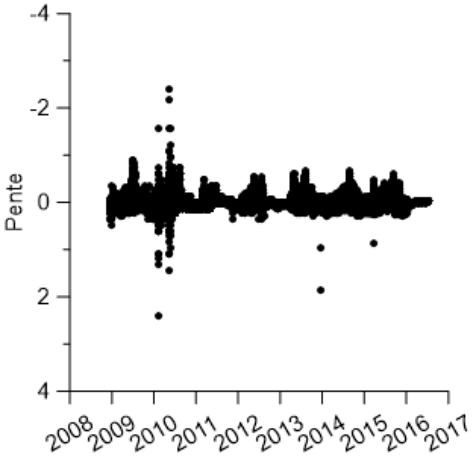
BETEROU



SETTO

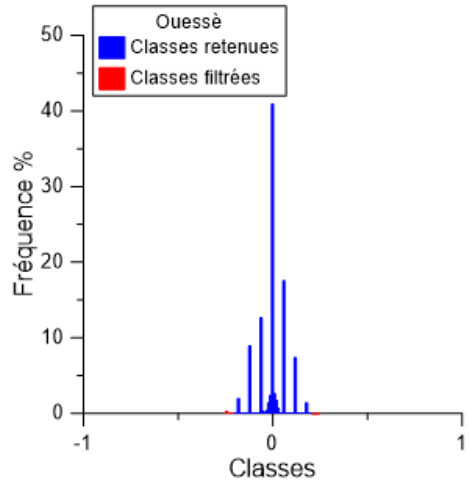


GLAZOUE

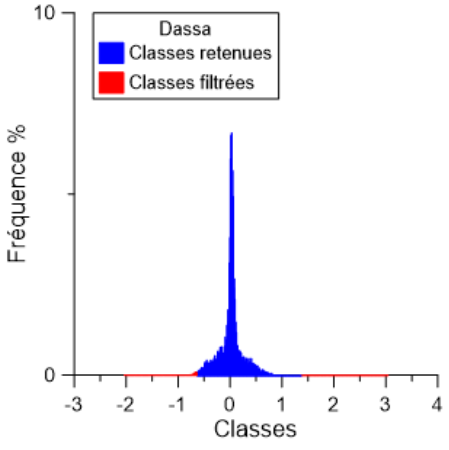


Annexe 5: Variation des fréquences de NS enregistreur

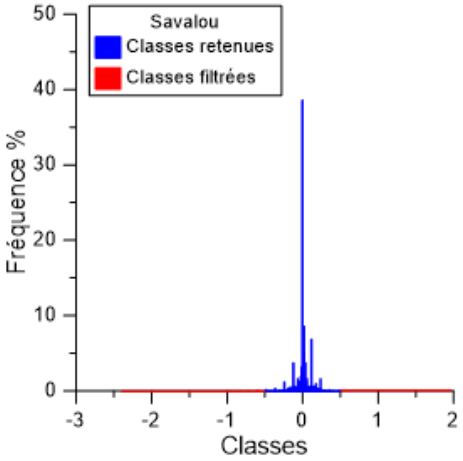
OUESSE



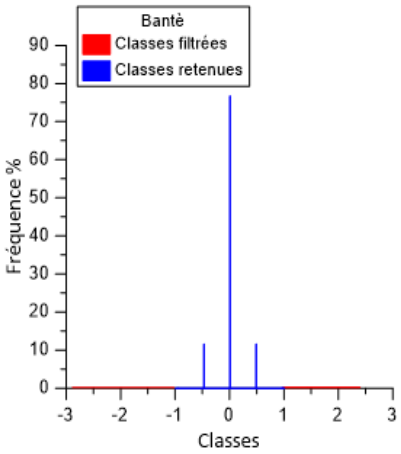
DASSA



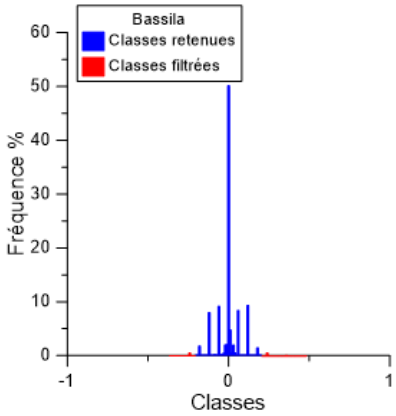
SAVALOU



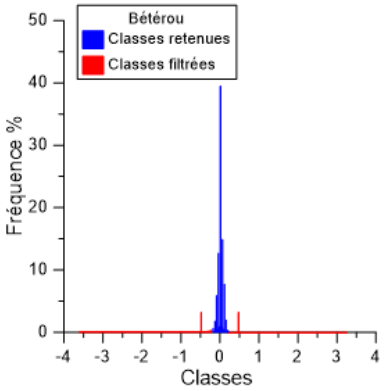
BANTE



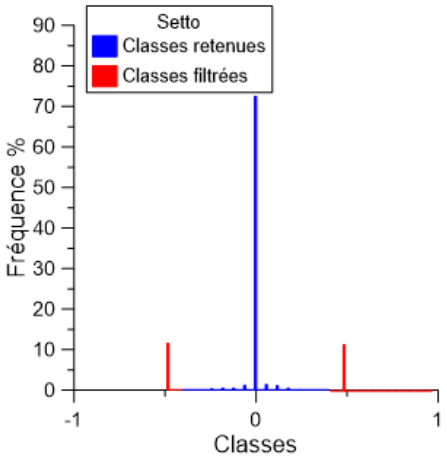
BASSILA



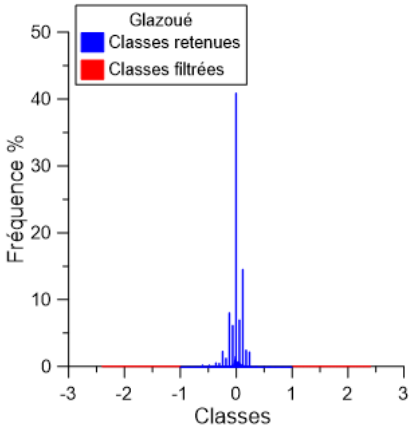
BETEROU



SETTO

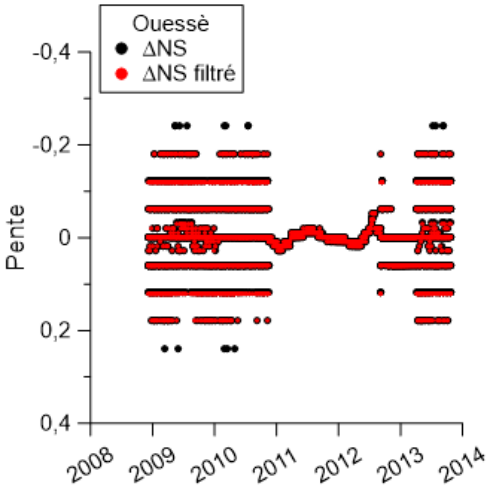


GLAZOUE

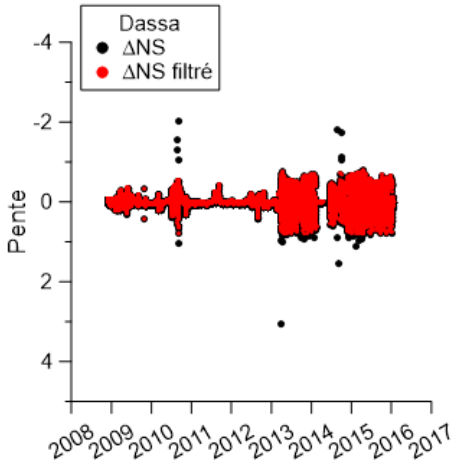


Annexe 6: Variation de NS reportés et filtrés

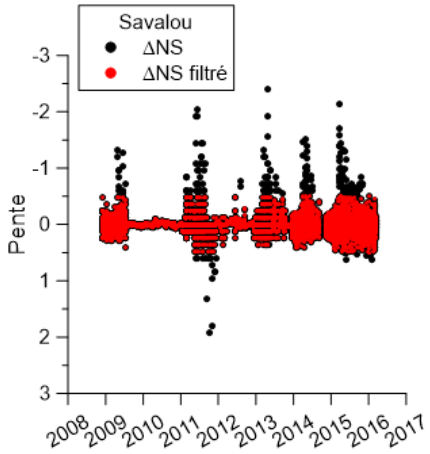
OUESSE



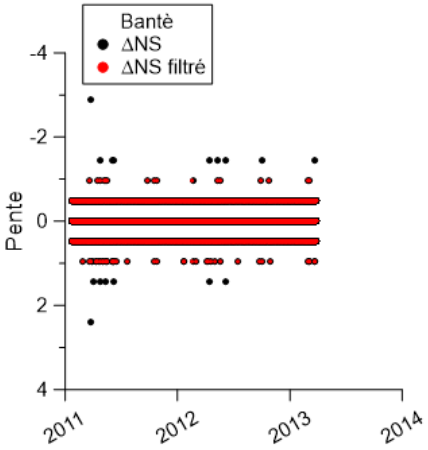
DASSA



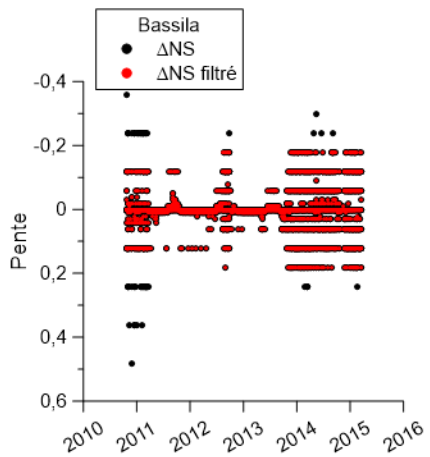
SAVALOU



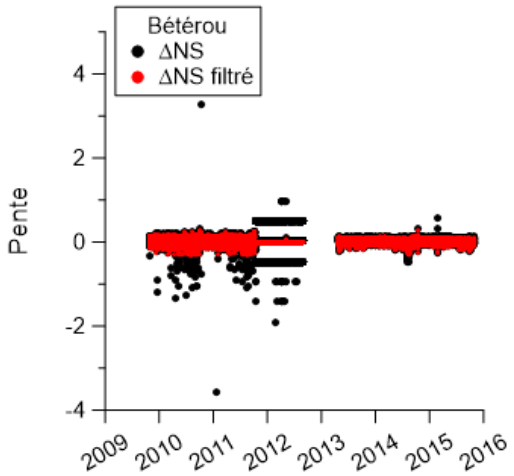
BANTE



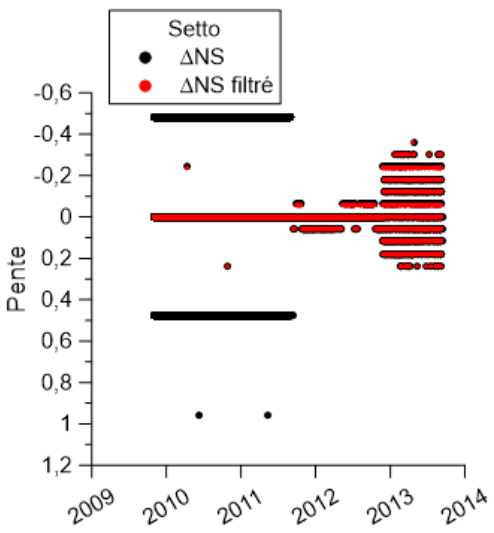
BASSILA



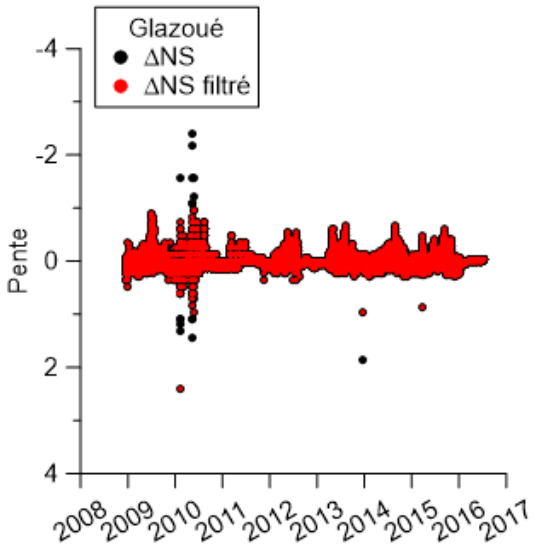
BETEROU



SETTO

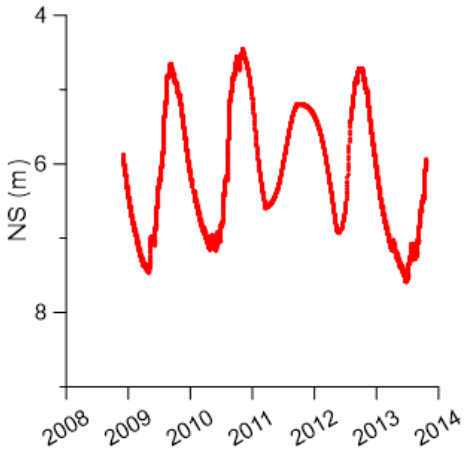


GLAZOUE

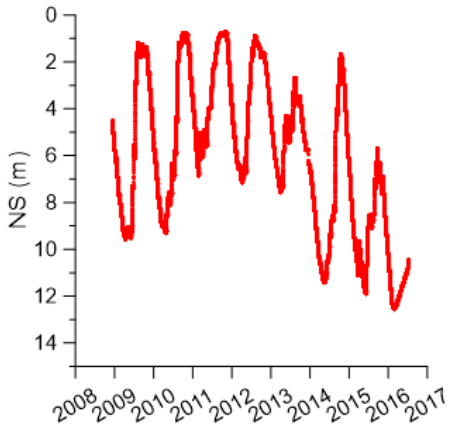


Annexe 7: Chroniques de NS filtré enregistreur

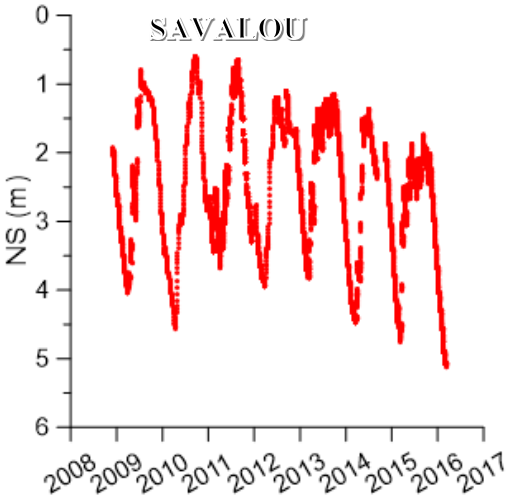
OUESSE



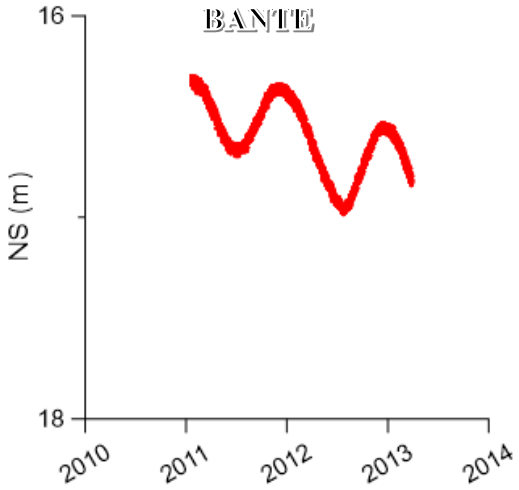
DASSA



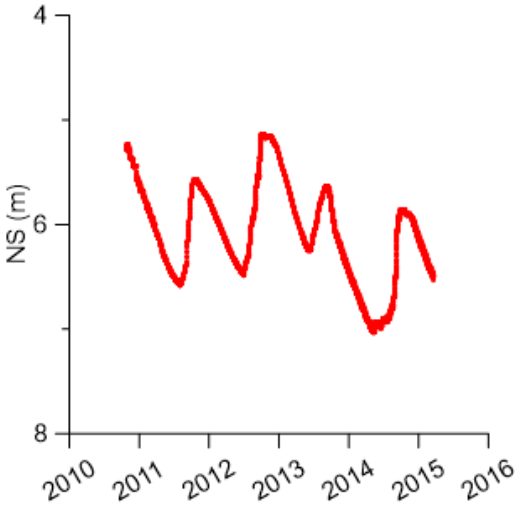
SAVALOU



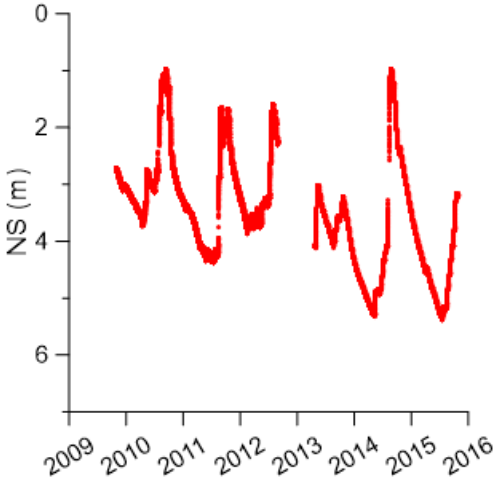
BANTE



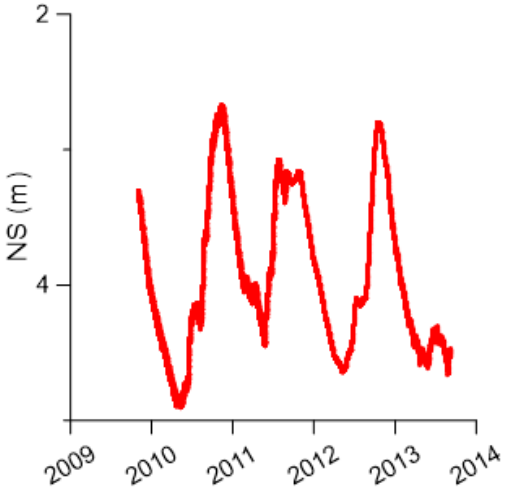
BASSILA



BETEROU



SETTO



GLAZOUE

