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

GOLO M. Anne-Marie

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Géo-hydrologie

Analyse comparative des variations barométriques et piézométriques en zone de socle au Bénin : Implication pour le calcul de la recharge

MAITRE DE MEMOIRE :

Dr Valerie KOTCHONI

MAITRE DE STAGE :

Dr Jean-Michel VOUILLAMOZ

Chargé de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

PROMOTION : 2020- 2021

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

GOLO M. Anne-Marie

Pour l'obtention du diplôme de

OPTION : Géo-hydrologie

Analyse comparative des variations barométriques et piézométriques en zone de socle au Bénin : Implication pour le calcul de la recharge

Présenté par :

GOLO M. Anne-Marie

Mention : **Excellent**

JURY :

Président : Prof. Abdoukarim ALASSANE

Membre : Dr Valerie KOTCHONI

PROMOTION : 2020- 2021

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à mon Dieu et à mes parents.

REMERCIEMENTS

Merci à DIEU tout-puissant, mon créateur, mon protecteur, mon appuie.

Un grand merci à tous ceux qui ont rendu ce travail possible ! Du côté administratif, mais aussi dans la vie de tous les jours. Merci à tous pour vos encouragements, votre bonne humeur, votre patience, vos sourires, vos critiques, etc… Plus précisément j'adresse mes sincères gratitudes à :

- Mon maitre de mémoire Dr Valerie KOTCHONI, pour son encadrement, sa disponibilité, sa patience, ses explications et ses multiples efforts pour l'aboutissement de ce travail malgré ses diverses occupations ;
- Mon maitre de stage Dr Jean-Michel VOUILLAMOZ, chargé de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), pour ses soutiens et ses apports scientifiques enrichissants malgré la distance ;
- Professeur Daouda MAMA, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE), pour nous avoir permis l'insertion à l'INE
- Professeur Abdoukarim ALASSANE, notre Chef de Département. Merci infiniment à vous pour la bonne organisation des activités académiques et pour vos sages conseils ;
- Tous les responsables de l'Institut National de l'Eau (INE) et plus précisément du département Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau pour tous les efforts fournis pour rendre notre formation meilleure ;
- Samuel TOTTIN pour son aide précieuse surtout dans le domaine de la cartographie ;
- Toute ma famille pour le soutien, les encouragements qu'elle n'a jamais cessé de m' apporter.

RESUME

Le Bénin est constitué de près de 80% de socle cristallin, et est constitué ainsi des aquifères de socle qui représentent la plus grande source d'approvisionnement en eau (pour les besoins en eau domestique et pour l'agriculture) de ses populations. Ces aquifères de socle, présentent deux niveaux en connexion hydraulique, la zone altérée et la zone fissurée altérée sous-jacente. Des piézomètres sont implantés dans ces aquifères et munis d'enregistreurs automatiques, ils permettent de collecter les pressions qui sont ensuite converties en niveaux d'eau. Ces données de niveaux d'eau sont utilisées pour mieux suivre la ressource, et notamment son renouvellement (la recharge). Cependant des études antérieures, ont montré que ces niveaux d'eau peuvent être soumis à plusieurs influences autres que la recharge, telles que la marée terrestre, la marée océanique, la pression atmosphérique, etc…. ce qui ne rend pas leurs analyses rigoureuses si ces différentes influences ne sont pas prises en compte. Cette étude est centrée sur l'évaluation de l'influence de la pression atmosphérique sur les variations de niveaux piézométriques en zone de socle au Bénin, en vue d'estimer son impact sur le calcul de la recharge. Trois sites ont été retenues dans le cadre de notre étude, il s'agit du site FD19 (Potokou) pour les données de pression atmosphérique, et des sites Ara (Nalohou) et F68 (Adjandjanhoun), pour les données de niveaux piézométriques. Sur chacun des sites Ara et F68 est mis en place deux piézomètres à des profondeurs différentes (p2 profonds dans la zone fissurée altérée, p3 superficiel dans la zone altérée). Toutes nos données sont au pas de temps horaire et s'étendent sur la période de 2013 – 2018. L'approche méthodologique adoptée pour notre étude a consisté à i) analyser et comparer les différentes chroniques (pluviométriques, barométriques, piézométriques) pour mettre en évidence l'influence des variations barométriques sur les variations piézométriques ; ii) évaluer cette influence en déterminant et en comparant l'efficience barométrique dans la zone altérée et dans la zone fissurée altérée; iii) procéder à la correction des niveaux piézométriques de cette influence avant d'estimer son impact sur la recharge dans notre zone d'étude.

Les résultats montrent que la pression atmosphérique et les niveaux piézométriques varient inversement. L'influence des variations de pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques est évaluée grâce au calcul de l'efficience barométrique BE qui est plus important dans les niveaux superficiels (piézomètres p3) que dans les niveaux profonds (piézomètres p2) : BE prend en effet les valeurs de 28%, 43%, 86% et 90% respectivement sur nos 4 piézomètres Ara_p2, Ara_p3, F68_p2, F68_p3. La correction de l'influence des variations de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques a engendré une différence dans les variations des chroniques piézométriques et l'impact de cette influence sur le calcul de recharge annuelle a été estimé à -1.07 % ; -0.97 % ; -0.09 % et -0.14 %, respectivement pour les 4 piézomètres Ara_p2, Ara_p3, F68_p2 et F68_p3 utilisés pour cette étude. Nous concluons donc que la non-prise en compte de l'influence des variations barométriques sur la piézométrie dans le calcul de la recharge n'affecte que très peu la quantification de la recharge à l'échelle annuelle (erreur maximale de 1%). Par contre, cette erreur pourrait être plus importante si le calcul de la recharge est réalisé au pas journalier.

Mots clés : aquifère de socle ; niveau piézométrique ; variation de la pression atmosphérique ; efficience barométrique ; recharge.

ABSTRACT

Benin is made up of nearly 80% of crystalline bedrock, and is thus made up of bedrock aquifers which represent the largest source of water supply (for domestic water needs and for agriculture) of its populations. These basement aquifers have two levels in hydraulic connection, the altered zone and the underlying fissured altered zone. Piezometers are installed in these aquifers and equipped with automatic recorders, they collect the pressures which are then converted into water levels. These water level data are used to better monitor the resource, and in particular its renewal (recharge). However, previous studies have shown that these water levels can be subject to several influences other than recharge, such as land tide, ocean tide, atmospheric pressure, etc., which does not make their analyzes rigorous if these different influences are not taken into account. This study is centered on the evaluation of the influence of atmospheric pressure on the variations of piezometric levels in the bedrock zone in Benin, in order to estimate its impact on the calculation of the recharge. Three sites were selected as part of our study, these are the FD19 site (Potokou II) for the atmospheric pressure data, and the Ara (Nalohou) and F68 (Adjandjanhoun) sites for the piezometric level data. On each of the Ara and F68 sites, two piezometers are set up at different depths (p2, deep and capturing the fissured altered zone, p3 superficial and capturing the altered zone). All our data are in hourly time steps and extend over the period from 2013 – 2018. The methodological approach adopted for our study consisted in i) analyzing and comparing the different chronicles (rainfall, barometric, piezometric) to highlight the influence of barometric variations on piezometric variations ; ii) assess this influence by determining and comparing the barometric efficiency in the weathered zone and in the fissured-weathered zone ; iii) correct the piezometric levels of this influence before estimating its impact on recharge in our study area.

The results show that the atmospheric pressure and the piezometric levels vary inversely. The influence of atmospheric pressure variations on the piezometric levels is assessed by calculating the barometric efficiency BE, which is greater in the superficial piezometers (p3) than in the deep piezometers (p2): BE takes the values of 28%, 43%, 86% and 90% respectively on our 4 piezometers Ara_p2, Ara_p3, F68_p2, F68_p3. The correction of the influence of atmospheric pressure variations on the piezometric levels generated a difference in the piezometric chronicles variations and the impact of this influence on the annual recharge calculation was estimated at -1.07%; -0.97%; -0.09% and -0.14%, respectively for the 4 piezometers Ara-p2, Ara_p3, F68_p2 and F68_p3 used for this study. We therefore conclude that the failure to take into account the influence of barometric variations on the piezometry in the calculation of the recharge affects only very little the quantification of the recharge on an annual scale (maximum error of 1%). On the other hand, this error could be greater if the calculation of the recharge is carried out on a daily basis.

Keywords: bedrock aquifer ; piezometric level; atmospheric pressure variation; barometric efficiency ; recharge.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES i

REMERCIEMENTS ii

RESUME iii

ABSTRACT iv

TABLE DES MATIERES v

LISTE DES FIGURES vii

LISTE DES TABLEAUX ix

SIGLES ET ABREVIATIONS x

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE 3

I. **DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE** 4

I.1. Situation géographique de la zone d'étude 4

I.2. Climat, végétation et type de sol 4

I.3. Hydrographie 5

I.4. Contexte géologique et hydrogéologique 6

I.5. Présentation des sites d'études 9

CHAPITRE II : APPROCHE METHODOLOGIQUE 13

II. APPROCHE METHODOLOGIQUE 14

II.1. Clarification des concepts 14

II.2. Approche méthodologique relative à l'objectif spécifique n°1 16

II.2.1. Analyse des données en domaine temporel 17

II.2.1.1. Analyse critique des données 17

II.2.1.2. Mise en évidence de l'influence 17

II.3. Approche méthodologique relative à l'objectif spécifique n°2 18

II.3.1. Méthode de calcul de BE en domaine temporel 18

II.3.1.1. La méthode de la moyenne 18

II.3.1.2. La méthode de la médiane 18

II.3.1.3. La méthode de la régression linéaire 19

II.3.1.4. La méthode de Clark 19

II.3.1.5. La méthode de Rahi 19

II.4. Approche méthodologique relative à l'objectif spécifique n°3 20

II.4.1. Méthode BE 20

II.4.2. Estimation de l'impact de la pression atmosphérique sur la recharge 21

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS 25

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS 26

III.1. Résultats d'analyse des données en domaine temporel 26

III.1.1. Résultats d'analyse critique des données 26

III.1.2. L'influence des variations barométriques sur les variations piézométriques 34

III.2. Résultats d'évaluation de l'influence des variations barométriques sur les variations piézométriques sur les sites Ara et F68. 35

III.2.1. Pour le site Ara 35

III.2.2. Pour le site F68 36

III.3. Correction des niveaux piézométriques de l'influence des variations barométriques et estimation de l'impact de cette influence sur la recharge 37

III.3.1. Correction des niveaux piézométriques de l'influence des variations barométriques. 37

III.3.2. Résultats d'estimation de l'impact de l'influence de la pression atmosphérique sur la recharge. 42

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 44

REFERENCES 45

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte administrative de la zone d'étude 4
Figure 2 : Chronique pluviométrique sur notre zone d'étude illustrant la saison pluvieuse (en rectangle de couleur verte) et la saison sèche (en rectangle de couleur rouge). 5
Figure 3 : Carte hydrographique de la zone d'étude. 6
Figure 4 : Contexte géologique de la zone d'étude (modifié d'après projet GRIBA in Lawson, 2016) ... 7
Figure 5 : Modèle conceptuel des aquifères de socle en milieu tropical à altération épaisse (Alle et al. 2018) 9
Figure 6 : Carte de localisation des sites de notre zone d'étude, les carrées rouges représentent les sites utilisés (projet GRIBA in Lawson 2016) 10
Figure 7 : Disposition des piézomètres sur nos sites d'étude (modifié d'après Lawson2016) 11
Figure 8 : Esquisse de la disposition des enregistreurs de pression dans un piézomètre 14
Figure 9 : Comportement de la pression atmosphérique dans l'aquifère et dans le piézomètre 16
Figure 10 : Exemple de barologger (a) et de levelogger (b) 24
Figure 11 : Chroniques barométriques des sites FD19 et F117 26
Figure 12 : Evolution de la pression atmosphérique du site FD19, en fonction de celle du site F117 sur la période de 2013 - 2021 27
Figure 13 : Chronique de pression atmosphérique du site FD19 28
Figure 14 : Chroniques piézométriques du site F68, F68_p2 (en couleur marron) et F68_p3 (en couleur rose) 29
Figure 15 : Chroniques piézométrique du site Ara, Ara_p2 (en couleur verte) et Ara_p3 (en couleur orange) 30
Figure 16 : Chroniques pluviométriques des sites Ara (en couleur bleu) et F68 (en couleur verte) 31
Figure 17 : Chroniques barométrique, pluviométrique et piézométriques du site F68 sur la période de 2013 - 2018 : (a) chronique pluviométrique du site F68 en couleur bleu ; (b) chronique barométrique du site FD19 en couleur noire ; (c) chroniques piézométriques de F68_p2 en couleur marron et de F68_p3 en couleur rose. 31
Figure 18 : Chroniques pluviométrique, barométrique et piézométriques du site Ara sur la période de 2013 - 2018 : (a) chronique pluviométrique du site Ara en couleur bleu ; (b) chronique barométrique du site FD19 en couleur noire ; (c) chroniques piézométriques de Ara_p2 en couleur verte et de Ara_p3 en couleur orange 32
Figure 19 : Chroniques pluviométrique, barométrique et piézométriques du site F68 sur la période de novembre 2017 – février 2018 : (a) chronique pluviométrique du site F68 en couleur bleu ; (b) chronique barométrique du site FD19 en couleur noire ; (c) chroniques piézométriques de F68_p2 en couleur marron et de F68_p3 en couleur rose. 33
Figure 20 : Chroniques pluviométrique, barométrique et piézométriques du site Ara sur la période de novembre 2016 – mars 2017 : (a) chronique pluviométrique du site Ara en couleur bleu ; (b) chronique barométrique du site FD19 en couleur noire ; (c) chroniques piézométriques de Ara_p2 en couleur verte et de Ara_p3 en couleur orange 34
Figure 21 : Chroniques barométrique du site FD19 (en couleur noire) et piézométriques du site Ara_p2 (en couleur verte) sur la période de décembre 2016 35

Figure 22 . Chroniques piézométriques brutes (en couleur verte) et corrigées (en couleur rose) et du site Ara-p2 ; **(a)** sur la période de donnée propice (novembre 2016-mars 2017) et **(b)** sur toute la période d'étude (2013-2018) 38
Figure 23 : Chroniques piézométriques brute (en couleur orange) corrigée (en couleur bleue et du site Ara-p3 ; **(a)** sur la période de donnée propice (novembre 2016-mars 2017) et **(b)** sur toute la période d'étude (2013-2018)..... 39
Figure 24 : Chroniques piézométriques et brute (en couleur marron) et corrigée (en couleur verte) du site F68-p2 ; **(a)** sur la période de donnée propice (novembre 2017-février 2018) et **(b)** sur toute la période d'étude (2013-2018) 40
Figure 25 : Chroniques piézométriques brute (en couleur rose) et corrigée (en couleur bleue-nuit) et du site F68-p3 ; **(a)** sur la période de donnée propice (novembre 2017-février 2018) et **(b)** sur toute la période d'étude (2013-2018) 41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Types de données exploités sur chacun des sites de notre étude 12
Tableau II : Matériel utilisé et leurs rôles 23
Tableau III : Statistiques de base des données barométriques du site FD19 28
Tableau IV : Statistiques de bases des données de niveaux piézométriques des sites Ara et F68. 30
Tableau V : Synthèse des résultats du calcul des BE pour le site Ara. 35
Tableau VI : Synthèse des résultats du calcul des BE pour le site F68..... 36
Tableau VII : Synthèse des résultats des variations moyennes annuelles des niveaux piézométriques, des erreurs sur la recharge et de l'impact de l'influence de la pression atmosphérique sur la recharge pour les sites Ara et F68. 43

SIGLES ET ABREVIATIONS

BE	Efficience Barométrique
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
DGEau	Direction Générale de l'Eau
GPS	Global Positioning System
GRIBA	Groundwater Resources In Basement rocks of Africa
IGN	Institut Géographique National
INE	Institut National de l'Eau
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ZA	Zone Altérée
ZFA	Zone Fissurée Altérée

INTRODUCTION

Les eaux souterraines constituent l'une des plus grandes ressources en eaux utilisées pour les besoins en eau des êtres humains (eau potable, eau pour l'irrigation, eau pour l'industrie etc….) partout dans le monde. Pour capter l'eau souterraine de façon pérenne, les ouvrages doivent être implantés dans des aquifères présentant à la fois une transmissivité suffisante pour autoriser les débits d'exploitation souhaités, mais également un stockage et une recharge suffisants pour garantir la pérennité des débits (Lawson, 2016). Pour un bon suivi et une meilleure gestion de cette précieuse ressource, il est nécessaire de réaliser des piézomètres dans les aquifères pour y mesurer les variations de niveau d'eau, soit directement à l'aide d'une sonde piézométrique, soit indirectement à l'aide d'enregistreur automatique de la pression totale. Cette pression totale est ensuite convertie en niveau d'eau qui peut représenter le niveau statique ou le niveau piézométrique en tenant compte de la référence de mesure (respectivement, le niveau du sol ou l'altitude du piézomètre). Ces niveaux d'eaux servent ensuite à différentes analyses telles que le calcul de la recharge. Or, les niveaux d'eaux issus des données des enregistreurs automatiques usuels qui mesurent la pression totale qui s'exerce sur le capteur, peuvent être soumis à des influences telles que la marée terrestre. Compte tenu du biais que peuvent engendrer ces influences dans les données, notre étude se propose d'évaluer l'influence des variations de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques afin de voir l'implication de cette influence sur la recharge.

L'hypothèse principale qui découle de ce sujet est formulée comme suit : la non correction de l'influence des variations de pression atmosphérique sur les variations piézométriques entraine une erreur dans le calcul de la recharge des eaux souterraines en zone de socle au Bénin. Elle est subdivisée en trois hypothèses spécifiques comme suit :

- Les variations de pression atmosphérique influencent les variations du niveau de l'eau dans l'aquifère.
- L'influence des variations de pression atmosphérique est plus importante dans les niveaux superficiels que dans les niveaux profonds.
- L'influence des variations de pression atmosphérique a un impact sur le calcul de la recharge.

Dans le but de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses, nous avons fixé comme objectif général, de rechercher et de corriger l'influence des variations de pression atmosphérique sur les variations piézométriques. Plus spécifiquement il s'agira de :

- ✓ Mettre en évidence l'influence des variations de pression atmosphérique sur les variations piézométriques en zone de socle au Bénin.
- ✓ Evaluer l'influence des variations de pression atmosphérique sur les variations piézométriques à différentes profondeurs en zone de socle au Bénin.

- ✓ Corriger les niveaux piézométriques de l'influence des variations barométriques et estimer l'impact de cette influence sur la recharge en zone de socle au Bénin.

Ce travail comporte trois chapitres précédés d'une introduction et suivis d'une conclusion qui fait la synthèse des principaux résultats de l'étude. Le premier chapitre est consacré à la description de la zone d'étude, le deuxième chapitre décrit l'approche méthodologique utilisée. Enfin, le troisième chapitre présente les différents résultats obtenus suivis de leurs interprétations et des discussions.

CHAPITRE I : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

I. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Situation géographique de la zone d'étude

Le Bénin, pays de l'Afrique de l'Ouest est situé dans la zone tropicale entre l'équateur et le tropique du Cancer entre les parallèles 6°30' et 12°30' de latitude nord et les méridiens 1° et 3°40' de longitude est. Notre zone d'étude est comprise entre les longitudes 1°00' et 4°00' est et les latitudes 9°00' et 11°5.3' nord. Elle part du centre au nord du Bénin et prend en compte les départements du Borgou, de la Donga et de l'Atacora plus précisément les localités des communes de Djougou, N'dali et Nikki. La figure 1 montre la carte administrative de notre zone d'étude.

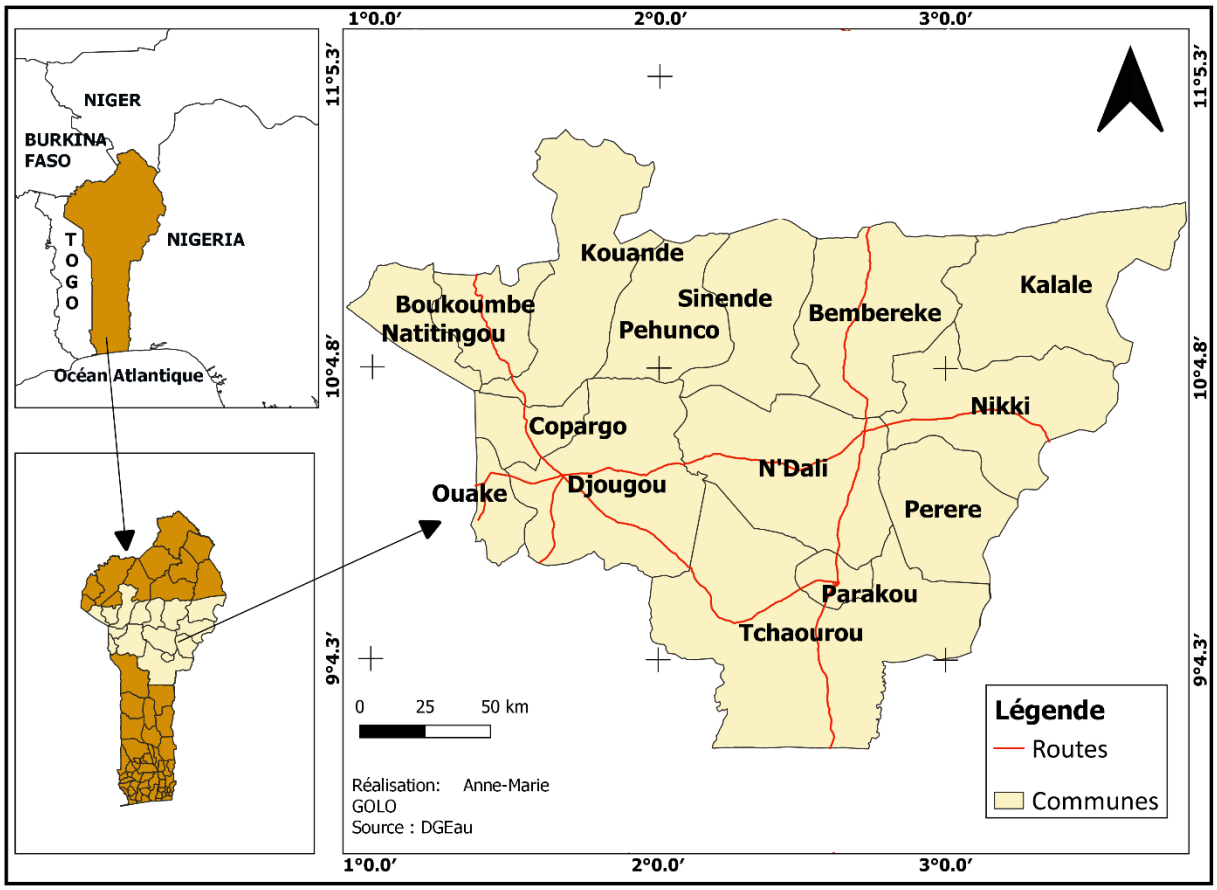


Figure 1 : Carte administrative de la zone d'étude

I.2. Climat, végétation et type de sol

Le Bénin est caractérisé par deux types de climat à savoir : le climat équatorial (au sud) et le climat tropical (du centre au nord). Notre zone d'étude s'étendant du centre au nord est donc caractérisée par un climat tropical, avec l'alternance d'une saison sèche (novembre à mars) et d'une saison pluvieuse (avril à octobre) comme illustrée sur la figure 2. La pluie moyenne annuelle est de 1 091 mm au cours de la période 1980 - 2009 (Achidi et al., 2012 in Kotchoni, 2019), également sur la période de 2013-2018, cette pluie

moyenne annuelle est de 1150 mm (site Ara). Les températures annuelles moyennes sont comprises entre 26.5 et 37 °C et varient en fonction de la latitude (Boukari, 2007 in Kotchoni, 2019). Les plus fortes valeurs de l'année sont enregistrées entre janvier et avril. La période la plus froide se retrouve entre les mois de novembre décembre tandis que la période la plus chaude se situe entre les mois de février et de mars.

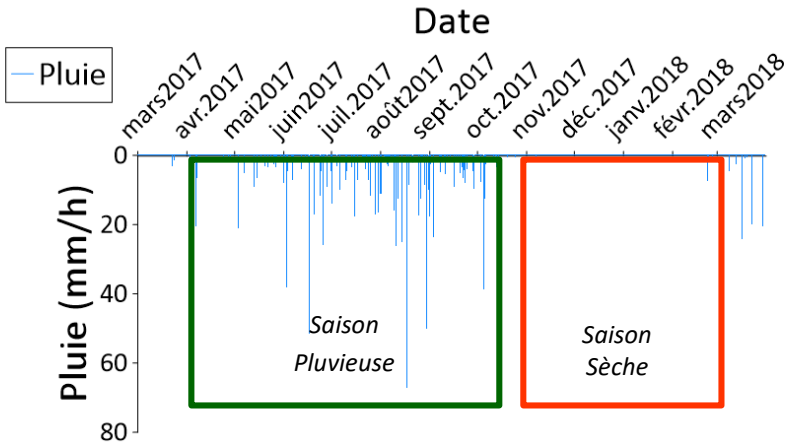


Figure 2 : Chronique pluviométrique sur notre zone d'étude illustrant la saison pluvieuse (en rectangle de couleur verte) et la saison sèche (en rectangle de couleur rouge).

La végétation dans notre zone d'étude 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 in Kotchoni, 2019). Elle 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 (Kotchoni, 2019). En zone de socle le développement des sols résulte de l'altération des roches sous-jacentes. Ainsi on y retrouve une variété de sols généralement représentée en trois grands ensembles : (les cuirasses éparpillées à la surface du sol ; les sols quartzeux situés le long des collines et les sols ferrugineux tropicaux.

I.3. Hydrographie

Sur le plan hydrographique, le Bénin est délimité par de grands ensembles de bassins de la sous-région Ouest-africaine. On a entre autre autres : le bassin du Niger, le bassin de la Volta, le grand ensemble côtier composé du bassin du Mono et Couffo, et le bassin de l'Ouémé. Notre zone d'étude est principalement drainée par l'Ouémé (figure 3), qui suit une direction d'écoulement du Nord-Ouest vers le Sud-Est et par les cours d'eaux comme l'Okpara etc.

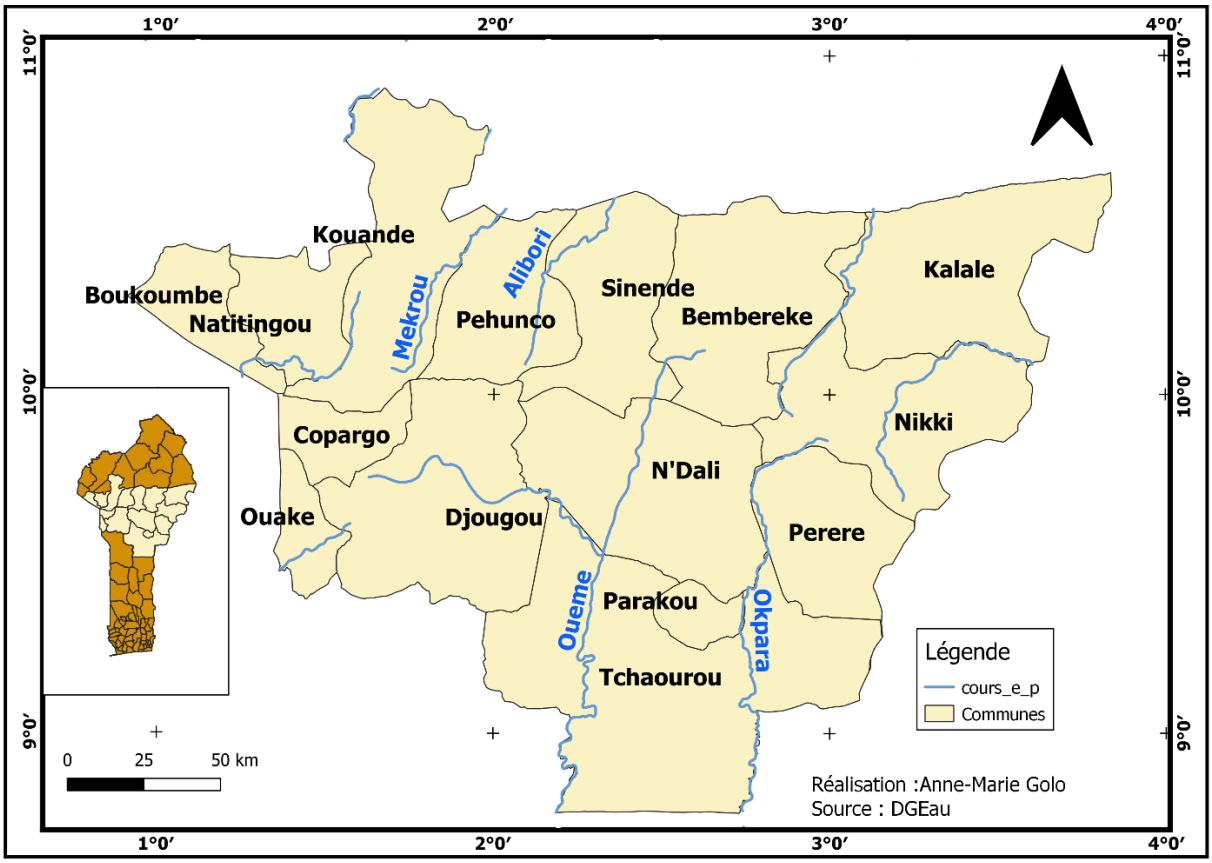


Figure 3 : Carte hydrographique de la zone d'étude.

I.4. Contexte géologique et hydrogéologique

Le Bénin est constitué d'environ 20% de bassins sédimentaires (le bassin de la volta, le bassin de Kandi et le bassin sédimentaire côtier) et de 80 % de socle cristallin communément appelée « Zone de socle ». Notre zone d'étude fait partie de cette zone de socle et est constituée essentiellement de roches métamorphiques qui se sont formées lors de l'orogenèse panafricaine (610-570 Ma) puis ils ont été altérées et érodées plus tard (Boukari, 2007 in Lawson, 2016). La zone d'étude regroupe un ensemble plus ou moins diversifié de gneiss migmatitique et de migmatite (faciès dominants), de paragneiss et d'orthogneiss acides et basiques, ainsi que des granitoïdes (Kotchoni, 2019). Cet ensemble diversifié de roche a été synthétisé en diverses untités géologiques dont les plus représentées sont présentées sur la figure 4.

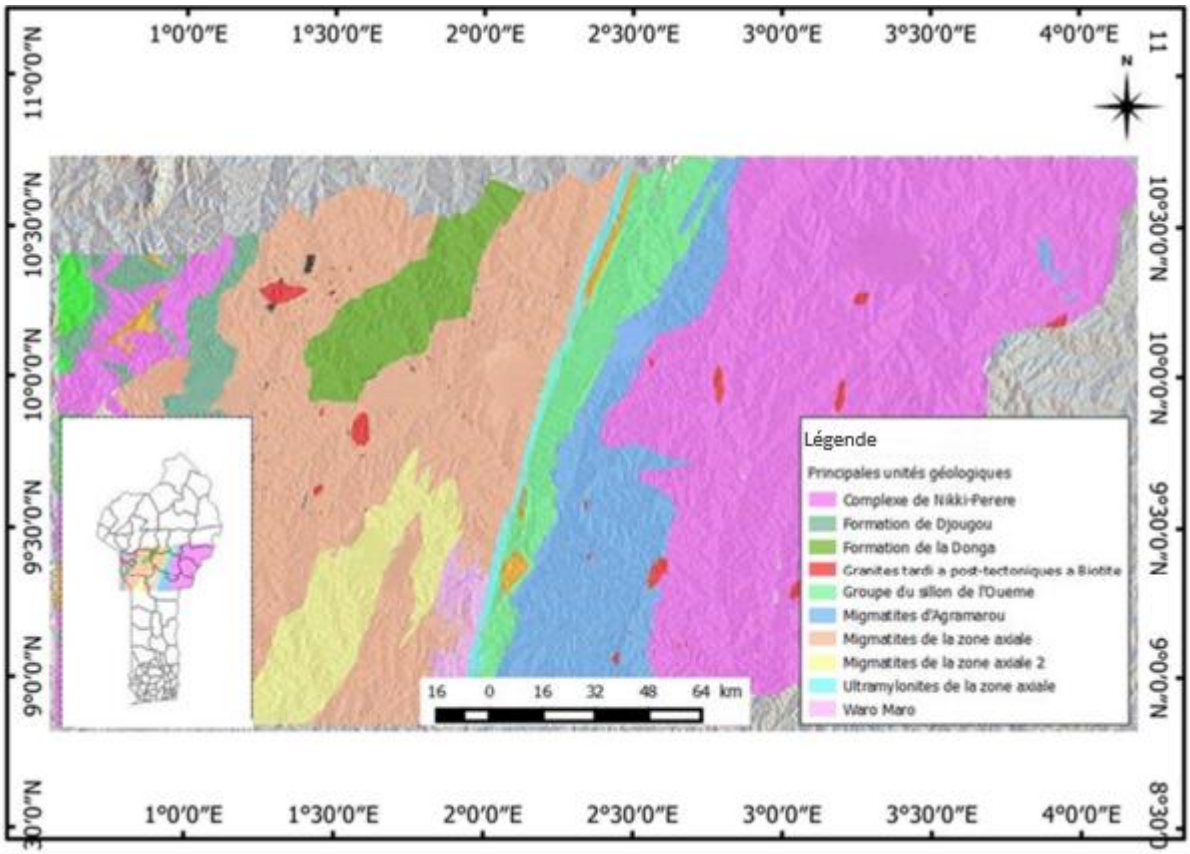


Figure 4 : Contexte géologique de la zone d'étude (modifié d'après projet GRIBA in Lawson, 2016)

Elle montre de manière simplifiée les unités géologiques caractéristiques de la zone, où certains faciès proches ont été regroupés. De façon détaillée, ces différentes unités géologiques, se répartissent comme il suit (Kotchoni, 2019 in BRGM, 1984) :

- le complexe migmatitique de Nikki-Péréré, comprenant des migmatites à biotite et septa gneissiques.
- la formation de Djougou, caractérisée par des gneiss et micaschistes à biotite et muscovite ;
- la formation de la Donga, constituée de gneiss fins, de leptynites et micashistes à biotite et muscovite ;
- le groupe du sillon de l'Ouémé, constitué d'une importante zone d'ultramylonites, d'une série migmatitique, de formations micashistiques, de gneiss fins à biotite et muscovite et de quartzites ;
- les migmatites d'Agramarou, composées de migmatites et de gneiss migmatitiques ;
- les migmatites de la zone axiale, composées de migmatites et de séquences migmatitiques diversisifiées ;
- les ultramylonites de la zone axiale, caractérisées par des faciès ultramylonitiques qui se développent au détriment des migmatites ;

on y retrouve également des unités géologiques comme :

- la formation de Tchamba Aledjo Koura, constituée de gneiss fins à biotite, à amphibole et biotite et à deux micas ;
- la formation de la Binah, composée des gneiss à un ou deux micas jaunâtres à rosâtres, de gneiss à deux micas, à pyroxène, à amphibole et à grenat, d'amphibolites quartzofeldspathiques, à grain fin et à structure schisteuse, de quartzites à muscovite ;
- les orthogneiss comme les orthogneiss basiques du massif Kabyé, les orthogneiss de Kara
- les migmatites de Koumdé, sont caractérisées par des migmatites.

Les aquifères de socles issus de l'altération et de la transformation de ces roches métamorphiques (gneiss, migmatite, schiste, mylonite, etc…) sont exploités par des puits et forages pour l'approvisionnement en eau des zones rurales et urbaines.

Le modèle conceptuel des aquifères de socle distingue deux niveaux en connexion hydraulique (Lachassagne et al., 2011 in Totin, 2020)**.** Depuis la surface vers la profondeur, on distingue la zone Altérée (ZA), la zone Fissurée Altérée (ZFA) (représentée aujourd'hui par deux zones distinctes : la Zone fracturée Stratiforme et la Zone Fracturée sub-verticale (Alle et al., 2018 in Totin, 2020) et la roche saine.

La zone altérée (ZA) représente le niveau superficiel de l'aquifère. Elle a généralement une épaisseur comprise entre 11 et 25 m (Vouillamoz et al., 2015 in Totin, 2020)**.** Le coefficient de perméabilité de cette zone altérée est généralement faible, mais ses propriétés d'emmagasinement sont importantes et lui permettent de jouer le rôle de réservoir en contrôlant la réserve en eau des aquifères de socle.

La zone fissurée altérée (ZFA), représente le niveau profond de l'aquifère. Elle est située à la base de la zone altérée, et a une épaisseur comprise entre 21 et 41 m sur notre zone d'étude (Vouillamoz et al., 2015 in Kotchoni, 2019). Ses propriétés d'emmagasinement sont assez faibles mais, ses coefficients de perméabilités sont assez élevés et lui permettent de jouer ainsi un rôle transmissif.

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, 2019).

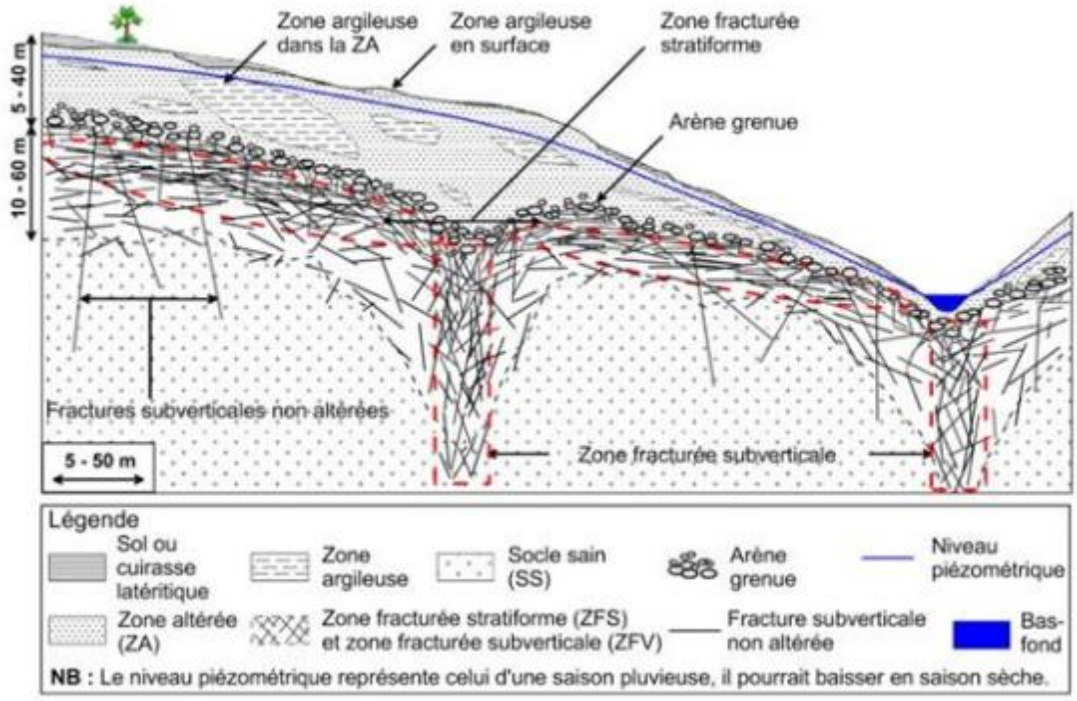


Figure 5 : Modèle conceptuel des aquifères de socle en milieu tropical à altération épaisse (Alle et al. 2018)

I.5. Présentation des sites d'études

Notre zone d'étude se situe dans la fenêtre du projet GRIBA (figure 6). Au cours de ce projet, six sites ont été mis en place chacun dans une unité géologique différente**.** Ces différents sites sont donc répartis dans les différentes localités des communes de Djougou, de N'dali et de Nikki. On a entre autres les sites de :

- Ara dans la localité de Nalohou
- FD17 dans la localité de Témé
- FD19 dans la localité de Potokou
- FD30 dans la localité de Sonoumon
- F68 dans la localité de Adjandjanhoun
- F117 dans la localité de Ganrou

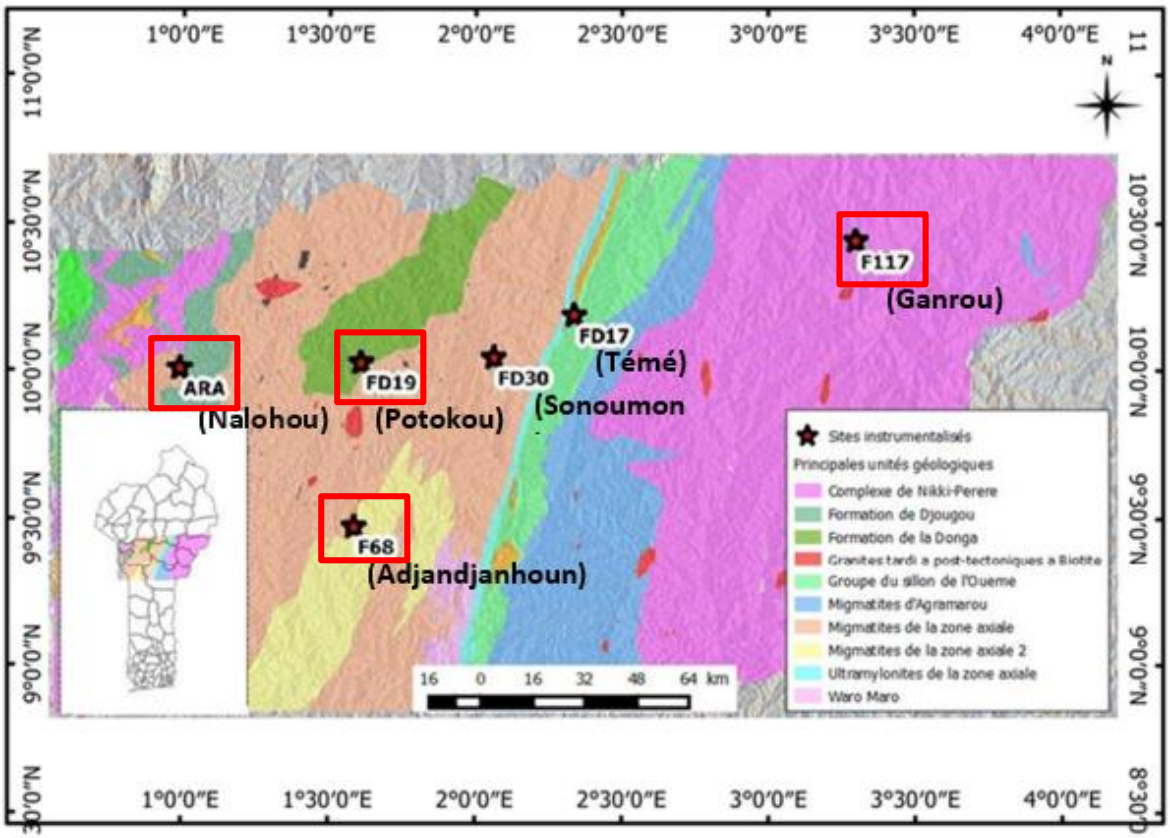


Figure 6 : Carte de localisation des sites de notre zone d'étude, les carrées rouges représentent les sites utilisés (projet GRIBA in Lawson 2016)

Sur chacun de ces six sites, trois piézomètres ont été réalisés de sorte que deux de ces piézomètres captent uniquement la zone profonde (les piézomètres p1 et p2) et l'un d'entre eux capte uniquement la zone superficielle (les piézomètres p3) de l'aquifère. (Kotchoni, 2019). Les piézomètres p1 et p2 captent ainsi la zone altérée fissurée (ZFA) et sont distants d'environ 20 m. Quant aux piézomètres p3, ils captent la zone altérée (ZA), et se situent en moyenne à une distance équivalente des piézomètres p1 et p2 comme schématisé sur la figure 7 ci-dessous.

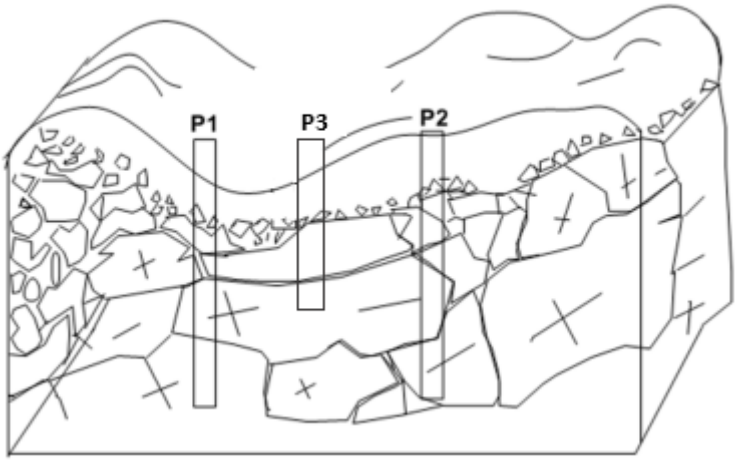


Figure 7 : Disposition des piézomètres sur nos sites d'étude (modifié d'après Lawson2016)

Chacun de ces piézomètres sont équipés d'enregistreurs automatiques pour la mesure du niveau statique au pas de temps horaire et certains d'entre eux sont équipés de pluviomètre pour la mesure de hauteur de pluie. Mais uniquement deux d'entre eux sont munis de barrologger pour la mesure de pression atmosphérique.

Étant donné que notre étude concerne l'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques, il est primordial que nos données de niveaux piézométriques ne soient pas soumises à d'autres influences. À cet effet les travaux effectués par le projet GRIBA ont montré que certains piézomètres de notre zone d'étude ne sont pas influencés par le pompage manuel (Lawson, 2016). Parmi ceux-ci nous avons travaillé avec les données des sites Ara et F68 pour les données de niveaux piézométriques et de hauteur de pluie et avec les données des sites FD19 et F117 pour les données de pression atmosphérique (car ce sont ces deux sites qui sont équipés de barrologger). Afin d'évaluer cette influence à différentes profondeurs, nous avons réalisé nos travaux avec les données de deux piézomètres implantés à différentes profondeurs, soient les piézomètres p3 (piézomètres peu profonds) et les piézomètres p2 (piézomètres profonds). Les données des piézomètres p2 ont été utilisées dans notre étude car les données des piézomètres p1 ne sont pas assez complètes sur notre période d'étude). Toutes nos données sont relevées à un pas de temps régulier d'une heure (1 h) et notre étude s'est effectuée sur les données de notre période d'étude, de 2013-2018 (tableau I).

Tableau I : Types de données exploités sur chacun des sites de notre étude

Sites	Communes	Localités	Coordonnées		Type de donnée exploitée	Pas de temps de mesure	Période d'étude
			x	Y			
Ara	Djougou	Nalohou	346382	1077246	-Données de niveaux piézométriques - Données de hauteur de pluie	1H	2013-2018
F68	Djougou	Adjandjanhoun	387765	1039699			
FD19	Djougou	Potokou	389656	1078694	-Donnée de pression atmosphérique		
F117	Nikki	Ganrou	507616	1107749			

CHAPITRE II : APPROCHE METHODOLOGIQUE

II. APPROCHE METHODOLOGIQUE

Avant de décrire et de présenter les approches méthodologiques propres à chacun de nos objectifs spécifiques, nous avons d'abord clarifié certains concepts et mécanismes pour faciliter la compréhension de notre sujet.

II.1. Clarification des concepts

- **Pression atmosphérique (pa) :** est contrôlée par le poids de la colonne d'air au-dessus de la surface du sol.
- **Niveau statique (NS)** : est la profondeur du niveau de l'eau par rapport au sol.
- **Niveau piézométrique (NP)** : est le niveau de l'eau rapporté à une altitude.

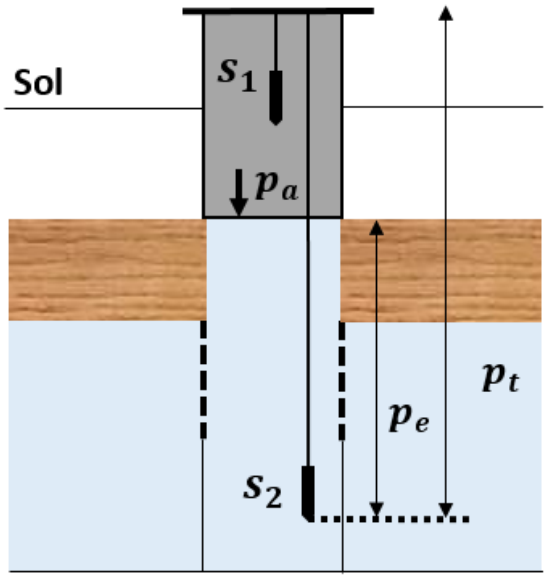


Figure 8 : Esquisse de la disposition des enregistreurs de pression dans un piézomètre

La figure 8 présente l'esquisse de la disposition des enregistreurs de pression dans un piézomètre. L'enregistreur de pression atmosphérique (pa), S_1 (appelé un barologger), est toujours installé hors eau dans la partie superficielle du piézomètre, c'est-à-dire suspendu à un fil et introduit dans l'ouvrage à une profondeur nettement inférieure à celle où se trouve l'eau. L'enregistreur S_2 (appelé un levelogger), est toujours plongé dans l'eau à une profondeur qui lui permet d'être toujours immergé malgré les variations de niveau d'eau, cet enregistreur mesure la pression totale au-dessus de lui p_t constituée de la pression de l'air pa et la pression de l'eau p_e, ainsi on a :

$$p_t = p_e + pa \qquad \textbf{(1)}$$

Pour déterminer les niveaux statiques NS qui ne sont pas influencés par les variations de pression atmosphérique, il faut retrancher de la pression totale (p_t) mesurée par les capteurs la variation de la pression atmosphérique Δpa à chaque pas de temps t (équation

2). La variation de pression atmosphérique est calculée comme la différence à la moyenne (équation 3). Enfin, pour déterminer les niveaux piézométriques NP on calcule la différence entre l'altitude Z et les niveaux statiques (équation 4).

$$NS_t = p_t - \Delta pa \quad \textbf{(2)}$$

Avec

NS_t : Niveau statique au temps t

p_t : Pression totale au temps t

$$\Delta pa = pa_{moy} - pa_t \quad \textbf{(3)}$$

Δpa : variation de la pression atmosphérique par rapport à la moyenne

pa_t : Pression atmosphérique à un temps t

pa_{moy} : Pression atmosphérique moyenne sur la période d'étude (ici 2013-2018)

$$NP = Z - NS \quad \textbf{(4)}$$

NP : Niveau piézométrique

Z : Altitude

La figure 9 présente l'influence des variations de la pression atmosphérique dans le piézomètre et dans l'aquifère. Lorsque la pression atmosphérique varie Δpa, elle impacte différemment le piézomètre et l'aquifère. Par exemple, une augmentation de la pression atmosphérique (Δpa > 0) dans l'aquifère est absorbée en partie par les roches grâce à leur propriété d'élasticité (Δpa_1) et par l'eau (Δpa_2) qui est contenue dans cet aquifère, alors que dans le piézomètre cette même augmentation de la pression atmosphérique est absorbée uniquement par la colonne d'eau contenue dans le piézomètre. De chaque côté des crépines du piézomètre, cette augmentation de pression Δpa engendre ainsi des variations de pression différentes : elle est diminuée dans l'aquifère car absorbée en partie par les roches, mais elle n'a pas changé à l'intérieur du piézomètre. Un déséquilibre de pression est ainsi créé, ce qui engendre une circulation de l'eau de l'intérieur du piézomètre vers l'aquifère, et donc une diminution de la hauteur de la colonne d'eau et ainsi donc une diminution du niveau piézométrique. On en déduit qu'une augmentation de la pression atmosphérique entraine une diminution du niveau piézométrique ou une augmentation du niveau statique, et inversement une diminution de la pression atmosphérique entraine une augmentation du niveau piézométrique ou une diminution du niveau statique.

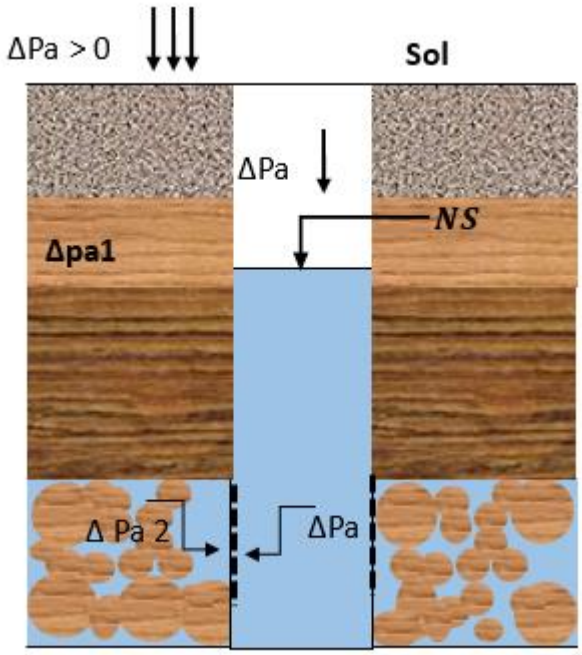


Figure 9 : Comportement de la pression atmosphérique dans l'aquifère et dans le piézomètre

Avant de procéder aux analyses de nos données nous avons d'abord procédé :

- **A la conversion des données de pression atmosphérique en mètre par colonne d'eau (mH2O)**

Les données de pression atmosphérique recueillis sur les sites F117 et FD19 étaient soit en kpa (Kilo Pascal) soit en mbar (Minibar). Pour faire une comparaison de ces données à celle des niveaux piézométriques nous avons appliqué les conversions suivantes :

1 mH2O = 0.10197443 kpa

1 mH2O = 0.010197443 mbar.

II.2. Approche méthodologique relative à l'objectif spécifique n°1

Pour mettre en évidence l'influence des variations barométriques sur les variations piézométriques, deux types d'approches sont souvent utilisées : l'analyse en domaine temporel et l'analyse en domaine fréquentiel (Spane, 2002) ;(Grillot et al., 1995) ;(Collet and Drogue, 1987). L'analyse en domaine temporel consiste à analyser les variations des données en fonction du temps (appelées chroniques temporelles), alors que l'analyse en domaine fréquentiel consiste à transformer au préalable les chroniques temporelles dans le domaine fréquentiel par la transformation de Fourier. Dans le cadre de notre travail, nous n'avons utilisé que l'analyse en domaine temporel pour atteindre nos objectifs.

II.2.1. Analyse des données en domaine temporel

Nous avons effectué l'analyse en domaine temporelle des données de pression atmosphérique, des niveaux piézométriques et de hauteurs de pluies collectées sur les trois (3) sites utilisés sur la période de 2013-2018. Ainsi, nous avons procédé à :

- l'analyse critique des données
- la détermination de la période de données propices pour la mise en évidence de la relation pa/NS
- la mise en évidence de l'influence des variations barométriques sur les variations piézométriques

II.2.1.1. *Analyse critique des données*

Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé les piézomètres Ara_p2, Ara_p3, F68_p2, F68_p3 pour les données de niveaux piézométriques et les données de hauteurs de pluie, et les sites F117 et FD19 pour les données de la pression atmosphérique. Étant donné que notre étude est une analyse comparative, toutes nos données doivent être comprises dans la même période de temps, qui est ici la période de 2013-2018 (notre période d'étude). Toutes ces données sont enregistrées au pas de temps horaire. Après la présentation de nos différentes données nous avons effectué l'analyse critique de ces données, et calculé leurs statistiques de base.

II.2.1.2. *Mise en évidence de l'influence*

Pour mettre en évidence l'influence des variations de pression atmosphérique sur les variations piézométriques, il est nécessaire que les données de niveaux piézométriques ne soient pas influencées par d'autres facteurs (Grillot et al., 1995) et qu'elles soient aussi exemptes de trou (données manquantes). Ceci nous pousse à déterminer la période propice pouvant nous permettre d'atteindre notre objectif. Cette période propice dans notre cas, est la période au cours de laquelle les données ne sont pas influencées par la recharge. Ainsi donc, pour déterminer cette période propice, nous avons travaillé avec les données de saison sèche. Parmi ces périodes de saisons sèches de la période de 2013-2018, nous avons sélectionné pour chacun des sites Ara et F68 une période au cours de laquelle toutes les données sont complètes (exemptes de données manquantes).

Finalement nous avons mis en évidence l'influence en procédant à l'analyse combinée des chroniques de pression atmosphérique et des chroniques des niveaux piézométriques sur les périodes de données propices sélectionnées pour chacun des sites Ara et F68. Afin de mieux montrer cette influence nous avons procédé à un zoom sur une période plus courte (un mois) de la période de données propices du site Ara.

II.3. Approche méthodologique relative à l'objectif spécifique n°2

L'influence des variations barométriques sur les variations piézométriques est quantifiée par l'efficience barométrique BE. Pour calculer BE, plusieurs approches ont été développées et utilisées, on peut citer : les méthodes de calcul du BE en domaine fréquentiel développé par (Turnadge et al., 2019) ;(Acworth et al., 2016) ;(Acworth and Brain, 2008) et les méthodes de calcul du BE en domaine temporel développées par (Turnadge et al., 2019) ;(Rahi, 2010) ;(Gonthier, 2007) ;(Robinson and Bell, 1971) ;(Clark, 1967) ;(Jacob, 1940) Nous avons utilisé pour l'atteinte de cet objectif les méthodes de calcul du BE en domaine temporel.

II.3.1. Méthode de calcul de BE en domaine temporel

Selon Jacob en 1940, l'efficience barométrique BE est le rapport entre la variation de niveau piézométrique et la variation de la pression atmosphérique (BE=ΔNP/Δpa). Au fil des années, plusieurs approches de calcul du BE ont été proposées.

II.3.1.1. La méthode de la moyenne

La méthode de la moyenne consiste à calculer la moyenne des rapports des variations des niveaux piézométriques (ΔNP) aux variations de la pression atmosphérique (Δpa) à chaque pas de temps sur la période propice (Turnadge et al., 2019).

$$BE_{MOY} = moyenne\ (\Delta NP/\Delta pa) \quad \textbf{(5)}$$

Avec

BE_{MOY} : BE obtenue méthode de la moyenne

Elle est la méthode la plus simple et la plus facile utilisée pour le calcul du BE. Cependant elle est assez sensible aux valeurs extrêmes, et donne parfois des valeurs influencées. C'est ce qui a poussé à l'utilisation d'autres approches pour calculer BE.

II.3.1.2. La méthode de la médiane

La méthode de la médiane consiste à calculer la médiane des rapports des variations des niveaux piézométriques (ΔNP) aux variations de la pression atmosphérique (Δpa) (Turnadge et al., 2019).

$$BE_{MED} = médianne\ (\Delta NP/\Delta pa) \quad \textbf{(6)}$$

Avec

BE_{MED} : BE obtenue avec la méthode de la médiane

Cette méthode est aussi simple à utiliser, elle permet de minimiser l'impact des valeurs extrêmes ; cependant elle ne tient pas compte des tendances qui peuvent exister dans les chroniques temporelles.

II.3.1.3. La méthode de la régression linéaire

La méthode de la régression linéaire est également souvent appliquée. Ici le BE représente la pente de la droite de régression entre les variations de pression atmosphérique (Δpa) et celles des niveaux piézométriques (ΔNP) (Turnadge et al., 2019) ;(Spane, 2002)**.**

$$BE_{RL} = pente\ (\Delta NP; \Delta pa) \quad \textbf{(7)}$$

Avec

BE_{RL} : BE obtenue avec la méthode de la régression linéaire

Tout comme l'approche par la médiane, cette méthode est simple mais elle aussi ne tient pas compte des tendances dans les chroniques. C'est le problème résolu par la méthode de Clark.

II.3.1.4. La méthode de Clark

Clark en 1967 a proposé cette méthode de calcul de BE, qui tient compte des tendances dans les chroniques temporelles. Elle est basée sur le calcul de sommes cumulées des variations de pression atmosphérique (Δpa) et celles de niveau piézométrique (ΔNP) (Turnadge et al., 2019) ;(Spane, 2002) ;(Clark, 1967)

$$BE_{CL} = \frac{|\Sigma_{cum}\Delta NP|}{|\Sigma_{cum}\Delta pa|} \quad \textbf{(8)}$$

Avec

BE_{CL} : BE obtenue avec la méthode de Clark

Avec les conditions suivantes :

- ✓ $|\Sigma_{cum}\Delta pa|$ **si** $\Delta pa \neq 0$
- ✓ $|\Sigma_{cum}\Delta NP|$ **un test de signe est fait :**
  - **Si** ΔNP**et** Δpa **ont mêmes signes alors** $|\Delta NP|$ **est ajouté à** $|\Sigma_{cum}\Delta NP|$
  - **Si** ΔNP **et** Δpa **ont différents signes alors** $|\Delta NP|$ **est soustrait de** $|\Sigma_{cum}\Delta NP|$

II.3.1.5. La méthode de Rahi

Cette méthode, présente une alternative à la méthode de Clark, elle a été développée par Rahi en 2010 (Turnadge et al., 2019) ;(Rahi, 2010) et est exprimé suivant l'équation 9 :

$$BE_{RH} = \frac{|\Sigma_{cum}\Delta NP|}{|\Sigma_{cum}\Delta pa|} \quad \textbf{(9)}$$

BE_{RH} : BE obtenue avec la méthode de Rahi

Avec les conditions suivantes :

- ✓ $|\Delta NP| < |\Delta pa|$
- ✓ **Si ΔNP et Δpa ont même signe**

Nous avons appliqué, les 4 premières méthodes (méthode de la moyenne, la médiane, la régression linéaire et de Clark) pour le calcul du BE dans notre étude (car la méthode de Rahi s'apparente à la méthode de Clark) et comme ce calcul s'effectue sur des périodes de données piézométriques non perturbées par les précipitations (Grillot et al., 1995), ces calculs ont été effectuée sur les périodes de données propices déterminées pour la mise en évidence de l'influence (section *II.2.1.2*). Ensuite nous avons procédé à la comparaison des différentes valeurs obtenues par rapport aux différentes méthodes de calcul et aux différentes profondeurs (différents piézomètres P2 et P3).

II.4. Approche méthodologique relative à l'objectif spécifique n°3

Pour corriger les niveaux piézométriques de l'influence des variations barométriques, il existe plusieurs méthodes de correction utilisées dans les études antérieures. Nous avons la méthode BE (Spane, 2002) ; (Clark, 1967) , la méthode de régression multiple (Rasmussen and Crawford, 1997) la méthode de correction basée sur la fréquence, (Acworth et al., 2016) ;(Spane, 2002), la méthode numérique avec le logiciel BETCO (Toll and Rasmussen, 2007), les méthodes analytiques (Spane, 2002). La méthode BE est celle qui est utilisée dans notre étude compte tenu de la courte durée de notre étude. Pour estimer l'impact de cette influence sur la recharge nous avons utilisé la méthode de calcul d'erreur. Ces méthodes ont été détaillées dans les paragraphes suivants.

II.4.1. Méthode BE

La méthode BE, consiste à corriger les niveaux piézométriques des variations barométriques à l'aide du BE (Spane, 2002). Cette méthode se traduit par l'équation 10 :

$$NP_{Cor} = NP_{brut} - (BE_{(moy)} * P_A) \quad \textbf{(10)}$$

Avec

NP_{corr} : Niveau piézométrique corrigé

NP_{brut} : Niveau piézométrique brut

$$BE_{(moy)} = [moyenne(BE_{MED};\ BE_{rl};\ BE_{CL})] \quad \textbf{(11)}$$

$BE_{(moy)}$: Représente ici la moyenne des trois valeurs de BE obtenues avec les méthodes de la médiane, de la régression linéaire et de Clark étant donné que les valeurs obtenues avec la méthode de la moyenne sont influencées par les valeurs extrêmes.

BE_{MED} : BE obtenue avec la méthode de la médiane

BE_{RL} : BE obtenue avec la méthode de la régression linéaire

BE_{CL} : BE obtenue avec la méthode de Clark

P_A : Différence entre les pressions pa_t et pa_{moy}

$$P_A = pa_t - pa_{moy} \quad \textbf{(12)}$$

pa_{moy} : Pression atmosphérique moyenne sur la période de 2013 - 2018

pa_t : Pression atmosphérique mesurée à un temps t

Cette formule (équation 10) a été utilisée pour la correction des niveaux piézométriques dans notre étude. En effet, nous l'avons d'abord appliquée pour corriger les niveaux piézométriques des 2 sites (Ara et F68) sur leurs différentes périodes propices respectives déterminées, avant d'étendre cette correction sur toute la période d'étude (2013 - 2018), après cela nous avons procédé à l'estimation de l'impact de l'influence de la pression atmosphérique sur la recharge.

II.4.2. Estimation de l'impact de la pression atmosphérique sur la recharge

L'impact de l'influence de la pression atmosphérique sur la recharge (I_r) s'estime par rapport à l'erreur engendrée (E_r) par cette influence sur la recharge, selon l'équation 13 :

$$I_r = (E_r \,/R_{brut}) * 100\% \quad \textbf{(13)}$$

Avec

$$E_r \; = \; R_{corr} - \; R_{brut} \quad \textbf{(14)}$$

E_r : Erreur engendrée par l'influence de la pression atmosphérique sur le calcul de la recharge

R_{corr}: Recharge obtenue avec les niveaux piézométriques corrigés

R_{brut}: Recharge obtenue avec les niveaux piézométriques bruts

En effet, la recharge R est un paramètre clé renseignant sur la durabilité de la ressource en eau souterraine. Son calcul nécessite l'utilisation des niveaux piézométriques, ainsi lorsque ces niveaux piézométriques sont influencés par la pression atmosphérique cette influence se propage sur les résultats de la recharge. La recharge R à un temps t donnée en utilisant la méthode de fluctuation des niveaux de nappes (Kotchoni, 2019) est donnée par l'équation 15 ci-après :

$$R_t = \Delta NP_{ans} * S_y \quad \textbf{(15)}$$

Avec

R_t : Recharge à un temps t

$\Delta NP_{(ans)}$: Variation moyenne annuelle de la période d'étude du niveau piézométrique

S_y : Porosité de drainage

La porosité de drainage utilisée a été obtenue à partir de la méthode géophysique de résonance magnétique des protons (RMP) mis en œuvre pour l'acquisition des données dans le cadre du projet GRIBA sur les différents sites d'étude.

Ainsi pour estimer l'impact de l'influence de la pression atmosphérique sur la recharge, nous avons donc déterminé, dans un premier temps les différentes variations moyennes des niveaux piézométriques bruts et corrigés à l'échelle annuelle, qui ont servi à la détermination des recharges R_{brut} et R_{corr} à l'aide de l'équation 15. Ces recharges ont été utilisées pour évaluer l'erreur engendrée par l'influence de la pression atmosphérique sur la recharge avant de permettre d'estimer l'impact de cette influence sur la recharge (équation 14)**.**

L'ensemble des données utilisées, leurs traitements et le matériel utilisé se résume dans le tableau II ci-dessous.

Tableau II : Matériel utilisé et leurs rôles

Matériel utilisé	Rôle du matériel
• Sonde piézométrique	Mesure manuelle du niveau statique dans un piézomètre
• Levelogger (Enregistreurs automatiques)	Mesure de pression totale dans un piézomètre
• Barologger (Enregistreurs automatiques)	Mesure de pression atmosphérique dans un piézomètre
• Rainlogger (Enregistreurs automatiques)	Mesure de hauteur de pluie
• Ordinateur portatif (matériel informatique)	Utilisation des différents logiciels (Excel, Word, Grapher et QGis)
• Logiciel Excel	Traitement et mise en forme des données utilisées
• Logiciel Word	Rédaction du manuscrit
• Logiciel Grapher	Réalisation des graphes
• Logiciel QGis	Réalisation des cartes
• GPS	Localisation des sites
• Carte Topographique	Représentation du relief



Figure 10 : Exemple de barologger (a) et de levelogger (b)

Le Barrologger (figure 10-a) est un enregistreur qui permet de mesurer la pression atmosphérique dans un piézomètre. Tandis que le levelogger (figure 10-b) permet la mesure de la pression totale qu'on convertit en niveaux piézométriques ou niveaux statiques.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Résultats d'analyse des données en domaine temporel

III.1.1. Résultats d'analyse critique des données

Les données utilisées dans notre étude sont de 3 types :

- Les données de pression atmosphérique
- Les données de pression totale desquelles nous avons déterminé les niveaux piézométriques
- Les données de hauteurs de pluies

La figure 11 présente les chroniques des données de pression atmosphérique des sites FD19 (en couleur noir) et F117 (en couleur violet). Ces deux sites sont distants de 122 km et les données sont enregistrées au pas de temps horaire sur la période de 2013-2021.

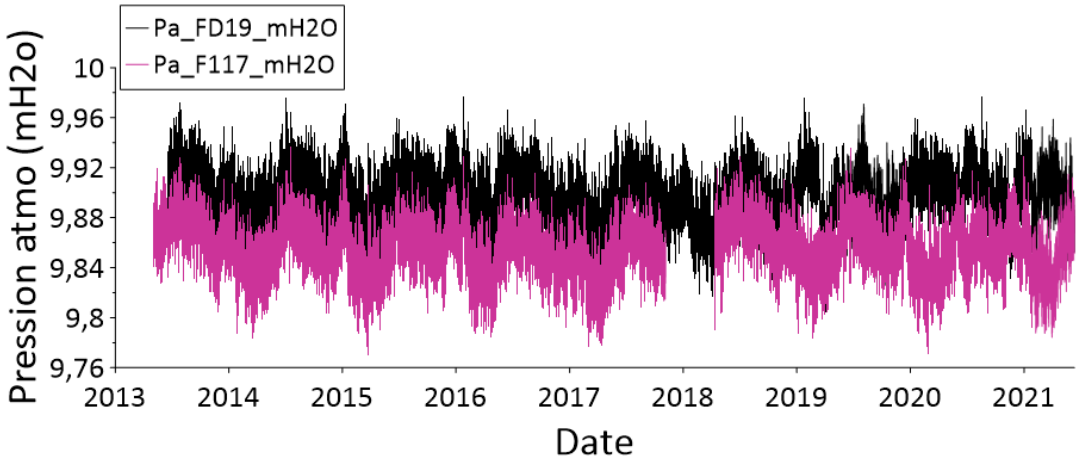


Figure 11 : Chroniques barométriques des sites FD19 et F117

On constate que sur la période de 2013-2021 la pression atmosphérique varie en moyenne de 0,14 mh2O par an sur les deux sites. Les deux chroniques varient presque de la même manière de 2013 jusqu' en 2019, et elles varient inversement de 2019 en 2021. Pour mieux comprendre cette variation inverse, nous avons représenté l'évolution de la pression atmosphérique du site FD19 en fonction de celle du site F117, d'abord sur la période de 2013-2019 qui est représentée en couleur verte et ensuite sur la période de 2019-2021 qui est représentée en couleur orange (figure 12).

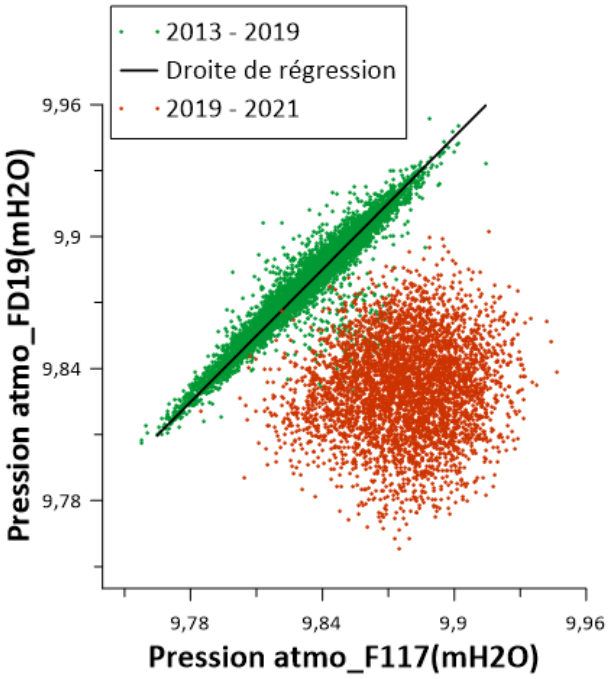


Figure 12 : Evolution de la pression atmosphérique du site FD19, en fonction de celle du site F117 sur la période de 2013 - 2021

On remarque sur la figure 12 que, les données sont bien réparties autour de la droite de régression sur la période de 2013 - 2019, mais elles sont totalement dispersées sur la période de 2019 – 2021. Ceci semble être dû à un dysfonctionnement de l'enregistreur du site F117 dont la chronique semble se déphaser à partir de 2019. De plus on constate que la chronique de la pression atmosphérique du site F117 contient des données manquantes. Au vu de ces incohérences dans les données de pression atmosphérique du site F117 et pour une meilleure analyse des données nous avons travaillé avec la chronique de la pression atmosphérique du site FD19 dans la suite de notre étude. La figure 13 nous présente la chronique atmosphérique du site FD19 sur la période de 2013-2018 sur laquelle les analyses ont été effectuées.

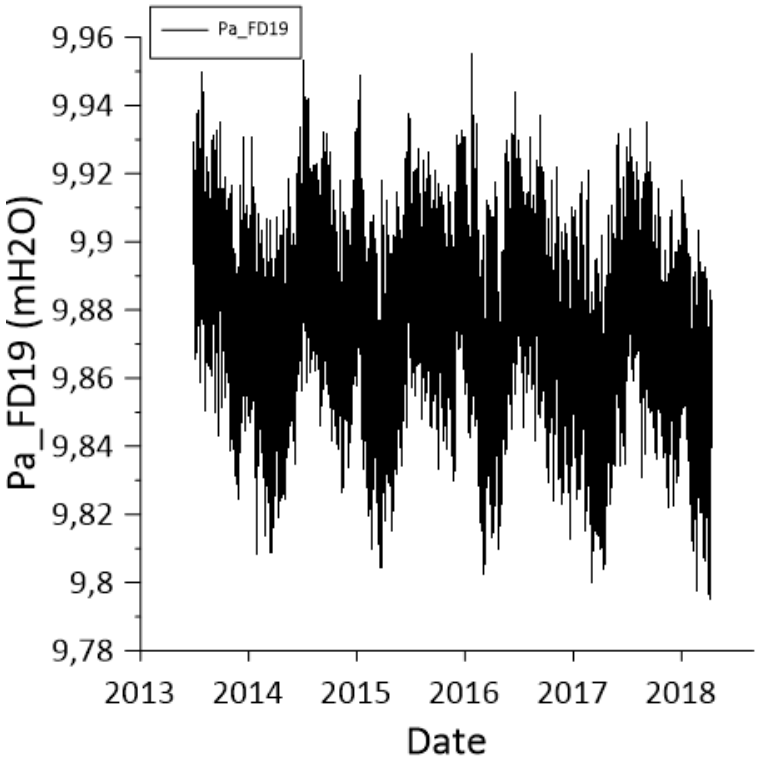


Figure 13 : Chronique de pression atmosphérique du site FD19

Sur le site FD19, la pression atmosphérique moyenne est de 9.87 mH2O, elle varie en moyenne de 0.04 mH2O par jour et de 0.14 mH2O par an sur la période de 2013- 2021 et pareillement sur la période 2013-2018. Cette pression atmosphérique est utilisée pour transformer les pressions totales (mesurées par les levelogger dans les piézomètres) en niveaux piézométriques, lesquels sont utilisés pour la détermination de la recharge.

Tableau III : Statistiques de base des données barométriques du site FD19

Sites	Période de données	Moyenne de la pression atmosphérique (mH2O)	Variation moyenne journalière (mH2O)	Variation moyenne annuelle (mH2O)
FD19	2013-2018	9.87	0.04	0.14

- **Les données de niveaux piézométriques (sites Ara et F68)**

L'évolution du niveau piézométrique des piézomètres F68_p2 et F68_p3 sur la période de 2013 – 2018 est présentée sur la figure 14.

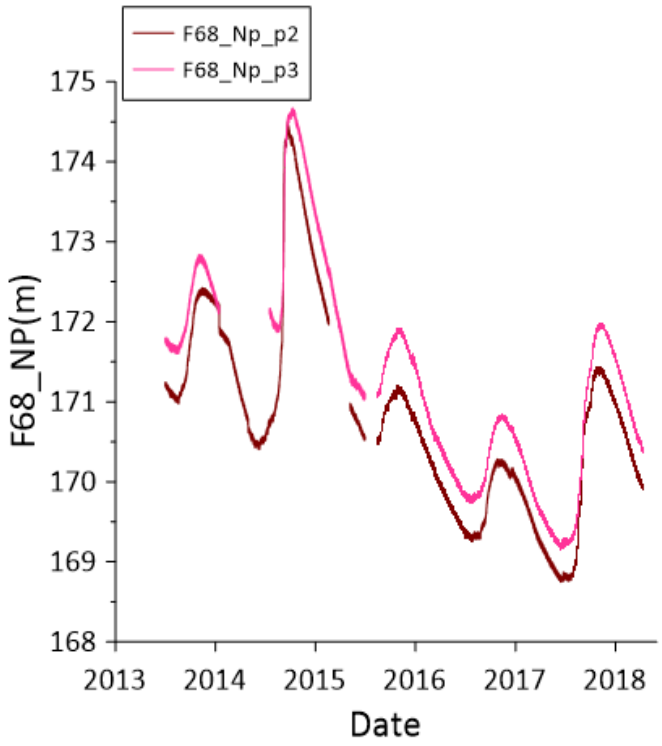


Figure 14 : Chroniques piézométriques du site F68, F68_p2 (en couleur marron) et F68_p3 (en couleur rose)

On constate que ses deux chroniques ont presque la même allure, la variation moyenne journalière du niveau piézométrique sur la période considérée est de 0.07m sur F68_p2 et de 0.06m sur F68_p3. Annuellement cette variation moyenne est de 2.20 m sur F68_p2 et de 2.03 m sur F68_p3 (tableau IV). Ainsi sur le site F68, la variation du niveau piézométrique est moins importante sur F68_p3 (niveau superficiel) que sur F68_p2 (niveau profond).

Sur le site Ara, (figure 15), on constate que les deux chroniques ont la même allure, la variation moyenne journalière du niveau piézométrique sur la période considérée est de 0.03 m sur les deux piézomètres, et annuellement cette variation moyenne est de 1.15 m sur Ara_p2 et de 1.22 m sur Ara_p3 (tableau IV). Ainsi sur le site Ara, la variation moyenne annuelle du niveau piézométrique est plus importante sur Ara_p3 (niveau superficiel) que sur Ara_p2 (niveau profond)

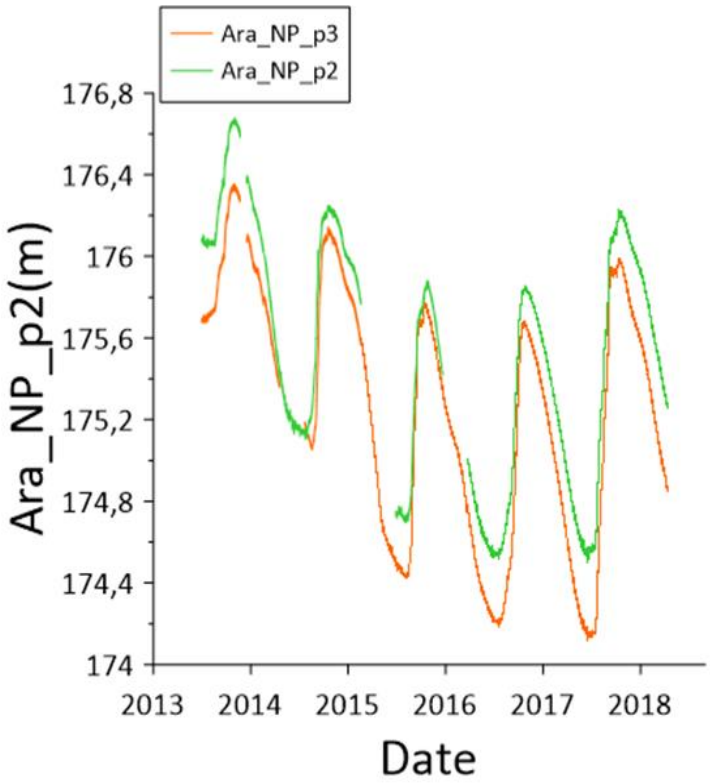


Figure 15 : Chroniques piézométrique du site Ara, Ara_p2 (en couleur verte) et Ara_p3 (en couleur orange)

Tableau IV : Statistiques de bases des données de niveaux piézométriques des sites Ara et F68.

Piézomètres	Période de données	Moyenne	Variation moyenne journalière (m)	Variation moyenne annuelle (m)
Ara_p2	2013 -2018	175.5	0.03	1.15
Ara_p3		175.25	0.03	1.22
F68_p2	2013 -2018	170.61	0.07	2.20
F68_p3		171.93	0.06	2.03

- **Les données de hauteurs de pluie (sites Ara et F68)**

La figure 16 présente, les chroniques pluviométriques des sites Ara et F68 sur la période de 2013-2018. Après analyse de ces chroniques nous remarquons que les 2 sites sont caractérisés par deux grandes saisons, une saison sèche de novembre en mars et une saison pluvieuse d'avril en octobre. La détermination de ces périodes sèches permet d'aboutir à la sélection des périodes de données propices à la mise en évidence de l'influence des variations barométriques sur les variations piézométriques (figures 19 et 20).

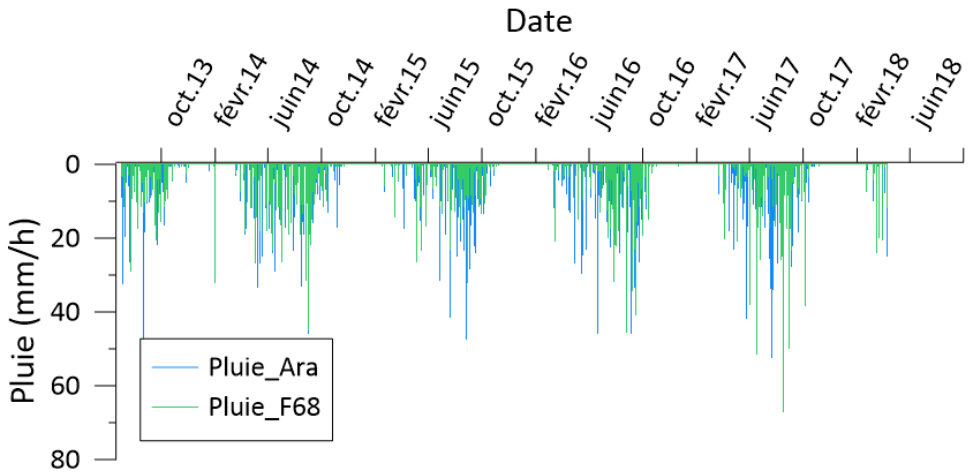


Figure 16 : Chroniques pluviométriques des sites Ara (en couleur bleu) et F68 (en couleur verte)

Les figures 17 et 18 présentent respectivement les différentes chroniques (barométrique du site FD19, pluviométriques et piézométriques), des sites F68 et Ara sur la période de 2013 – 2018.

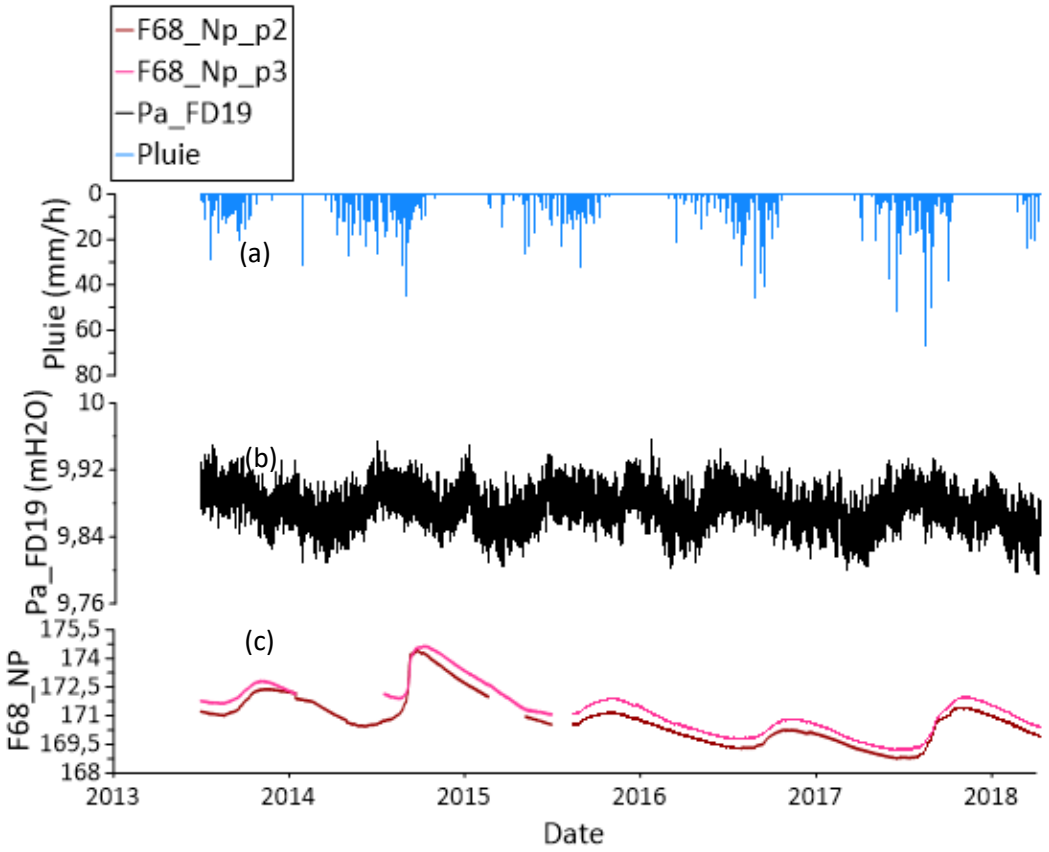


Figure 17 : Chroniques barométrique, pluviométrique et piézométriques du site F68 sur la période de 2013 - 2018 : (a) chronique pluviométrique du site F68 en couleur

bleu ; (b) chronique barométrique du site FD19 en couleur noire ; (c) chroniques piézométriques de F68_p2 en couleur marron et de F68_p3 en couleur rose.

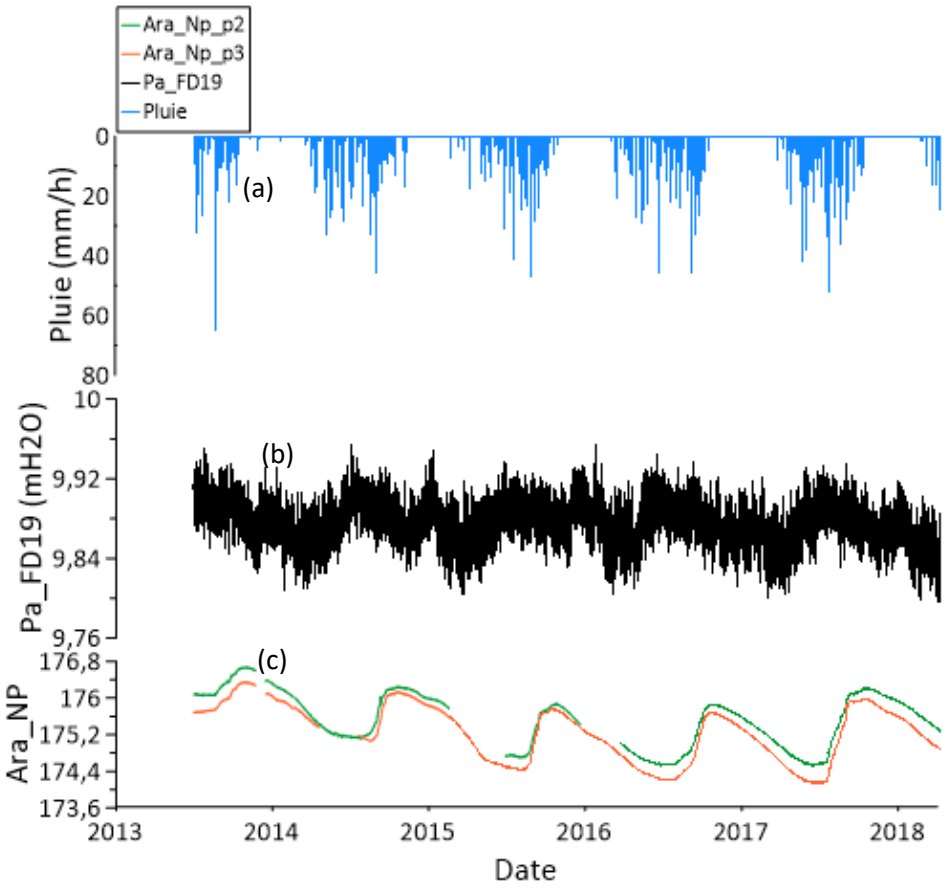


Figure 18 : Chroniques pluviométrique, barométrique et piézométriques du site Ara sur la période de 2013 - 2018 : (a) chronique pluviométrique du site Ara en couleur bleu ; (b) chronique barométrique du site FD19 en couleur noire ; (c) chroniques piézométriques de Ara_p2 en couleur verte et de Ara_p3 en couleur orange

À partir de l'analyse combinée de ces chroniques les périodes de données telles que : novembre 2017 – février 2018 et de novembre 2016 – mars 2017 ont été sélectionnées respectivement pour les sites F68 et Ara comme période de données de saison sèche et de données complètes (figures 19 et 20) donc elles représentent leurs périodes de données propices respectives.

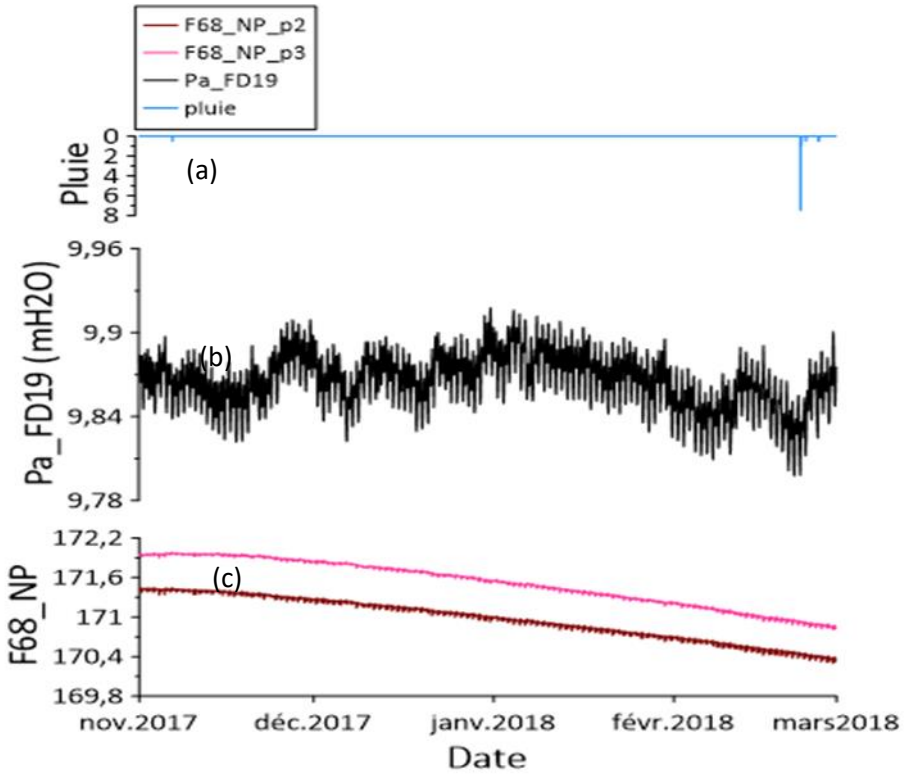


Figure 19 : Chroniques pluviométrique, barométrique et piézométriques du site F68 sur la période de novembre 2017 – février 2018 : (a) chronique pluviométrique du site F68 en couleur bleu ; (b) chronique barométrique du site FD19 en couleur noire ; (c) chroniques piézométriques de F68_p2 en couleur marron et de F68_p3 en couleur rose.

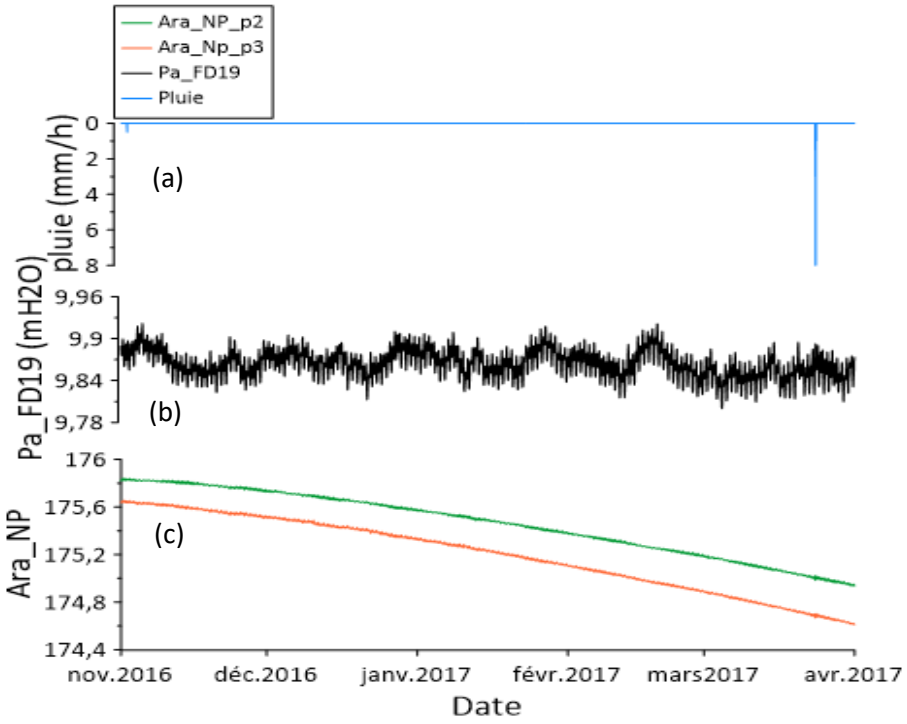


Figure 20 : Chroniques pluviométrique, barométrique et piézométriques du site Ara sur la période de novembre 2016 – mars 2017 : (a) chronique pluviométrique du site Ara en couleur bleu ; (b) chronique barométrique du site FD19 en couleur noire ; (c) chroniques piézométriques de Ara_p2 en couleur verte et de Ara_p3 en couleur orange

III.1.2. L'influence des variations barométriques sur les variations piézométriques

La mise en évidence de l'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques est illustrée par la figure 21 ci-après.

Les chroniques piézométriques comme barométriques présentent une variation sinusoïdale. On constate que lorsque la pression atmosphérique monte le niveau piézométrique diminue et lorsque la pression diminue le niveau piézométrique monte (ce qui est cohérent avec la théorie énoncée dans la session II.1). Ainsi donc les variations de pression atmosphérique influencent les variations du niveau de l'eau dans l'aquifère, ce qui confirme notre première hypothèse spécifique. Nous pouvons alors déduire que la variation de la pression atmosphérique influence celle du niveau de l'eau souterraine. Cette influence peut être quantifiée par l'Efficience Barométrique notée BE.

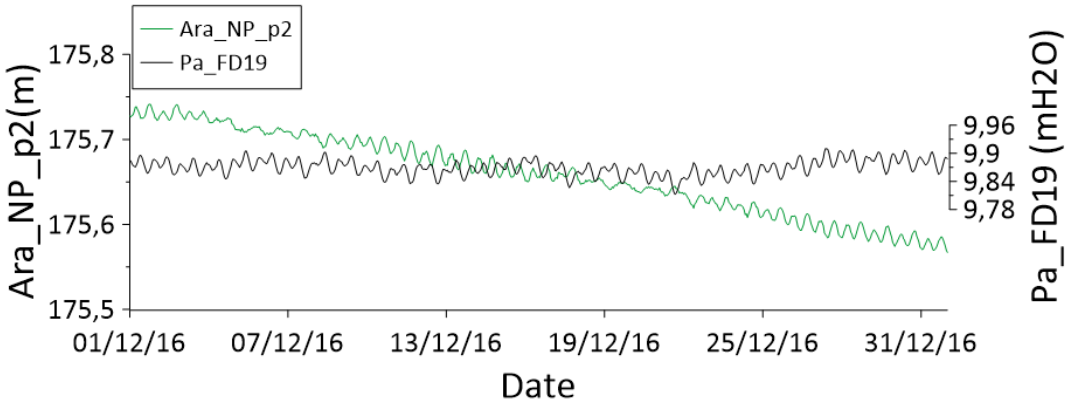


Figure 21 : Chroniques barométrique du site FD19 (en couleur noire) et piézométriques du site Ara_p2 (en couleur verte) sur la période de décembre 2016

III.2. Résultats d'évaluation de l'influence des variations barométriques sur les variations piézométriques sur les sites Ara et F68.

L'évaluation de l'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques des sites Ara et F68, estimée par les 4 méthodes de calcul du BE se présente comme suit :

III.2.1. Pour le site Ara

Sur le site Ara l'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques a été estimée par les 4 méthodes de calcul du BE avec les données de la période de novembre 2016 – mars 2017, les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau V.

On constate que pour Ara_p2 et Ara_p3, les valeurs obtenues avec la méthode de la moyenne sont assez éloignées de celles obtenues avec les trois autres méthodes (médiane, régression linéaire, Clark), qui sont assez proches l'une de l'autre. On constate aussi que les valeurs absolues des valeurs obtenues pour Ara_p3 sont plus élevées que celles obtenues pour Ara_p2. On en déduit que sur le site Ara l'influence de la pression atmosphérique est plus importante dans les niveaux superficiels que dans les niveaux profonds.

Tableau V : Synthèse des résultats du calcul des BE pour le site Ara.

BE	Ara_p2	Ara_p3
BE_{MOY}	0.27	-0.78
BE_{MED}	-0.27	-0.45
BE_{RL}	-0.28	-0.42

BE_{CL}	-0.29	-0.42

III.2.2. Pour le site F68

Sur le site F68 l'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques a été estimée par les 4 méthodes de calcul du BE avec les données de la période de novembre 2017 – février 2018, les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau IV.

On constate que pour F68_p2 et F68_p3, les valeurs obtenues avec la méthode de la moyenne sont assez éloignées de celles obtenues avec les trois autres méthodes (médiane, régression linéaire, Clark), qui sont assez proches l'une de l'autre. On constate également que les valeurs absolues des valeurs obtenues pour F68_p3 sont plus élevées que celles obtenues pour le site F68_p2. On en déduit que sur le site F68 l'influence de la pression atmosphérique est plus importante dans les niveaux superficiels que dans les niveaux profonds.

Tableau VI : Synthèse des résultats du calcul des BE pour le site F68

BE	F68_p2	F68_p3
BE_{MOY}	0.69	-0.42
BE_{MED}	-0.87	-0.92
BE_{RL}	-0.85	-0.91
BE_{CL}	-0.85	-0.87

Des différents résultats de calcul de BE (voir tableau V et tableau VI) obtenues pour les deux sites Ara et F68, il en résulte que les valeurs obtenues avec la méthode de la moyenne sont toutes éloignées de celles obtenues avec les trois autres méthodes (médiane, régression linéaire, Clark). On en déduit donc que la méthode de la moyenne n'est pas une méthode satisfaisante de calcul du BE comme énoncée en théorie dans la section II.3.1.1. Sur chacun de ces deux sites les valeurs absolues des valeurs de BE obtenues sur les piézomètres p3 (Ara_p3 et F68_p3) sont toutes supérieures à celles obtenues sur les piézomètre p2 (Ara_p2 et F68_p2), étant donné que les p3 captent les altérites (niveau superficiel) et que les p2 la zone altérée fissurée (niveau profond), on en déduit que l'influence de la pression atmosphérique est plus importante dans les altérites que dans la zone fissurée altérée de notre zone d'étude. Notons que cela confirme notre deuxième hypothèse spécifique.

III.3. Correction des niveaux piézométriques de l'influence des variations barométriques et estimation de l'impact de cette influence sur la recharge

III.3.1. Correction des niveaux piézométriques de l'influence des variations barométriques

Les figures 22 ; 23 ; 24 et 25 présentent respectivement pour les sites (Ara_p2 ; Ara_p3 ; F68_p2 et F68_p3) les chroniques des niveaux piézométriques bruts et des niveaux piézométriques corrigés sur les périodes de données propices d'une part et sur toute la période d'étude d'autre part.

On constate pour les piézomètres Ara_p2 ; Ara_p3 ; F68_p2 et F68_p3, sur leur période propice, (figure 22-a, figure 23-a, figure 24-a et figure 25-a), que les chroniques piézométriques brutes et piézométriques corrigées ne sont pas confondues et présentent des variations différentes ; les variations des chroniques corrigées sont faibles par rapport à celles des chroniques brutes. L'extension de la correction sur toute la période d'étude fait ressortir les mêmes observations (variations des chroniques corrigées faibles par rapport à celles des chroniques brutes pour l'ensemble des sites (figure 22-b, figure 23-b, figure 24-b et figure25-b). On remarque également que malgré la correction des niveaux piézométriques de l'influence de la pression atmosphérique, les chroniques piézométriques corrigées ne sont pas totalement lisses, elles contiennent encore d'autres variations. On en déduit que sur la période de donnée propice et même sur l'ensemble de la période d'étude des piézomètres Ara_p2 ; Ara_p3 ; F68_p2 et F68_p3, les niveaux piézométriques seraient soumis à d'autres influences autres que celle de la pression atmosphérique (probablement les marées terrestres).

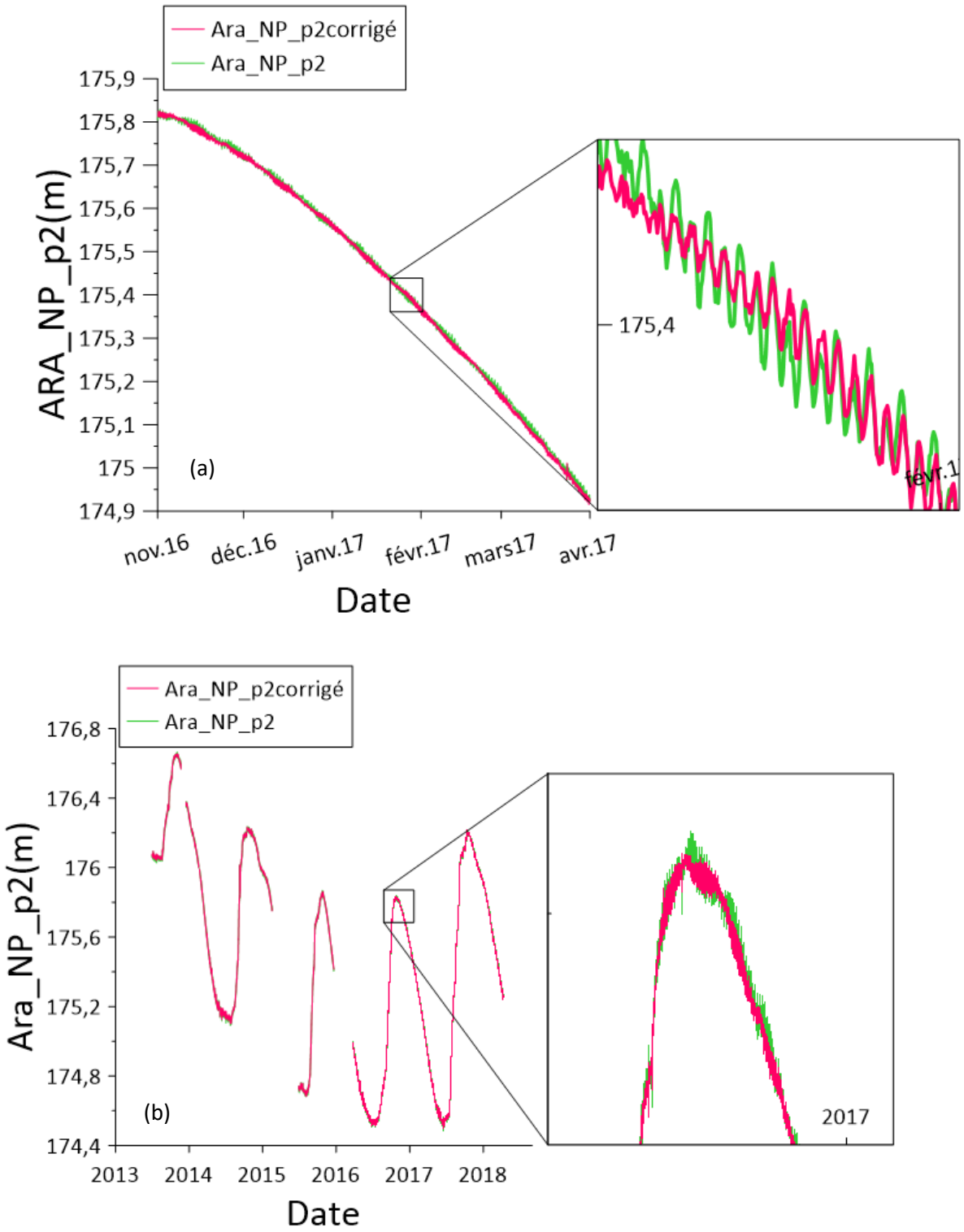


Figure 22 . Chroniques piézométriques brutes (en couleur verte) et corrigées (en couleur rose) et du site Ara-p2 ; **(a)** sur la période de donnée propice (novembre 2016-mars 2017) et **(b)** sur toute la période d'étude (2013-2018)

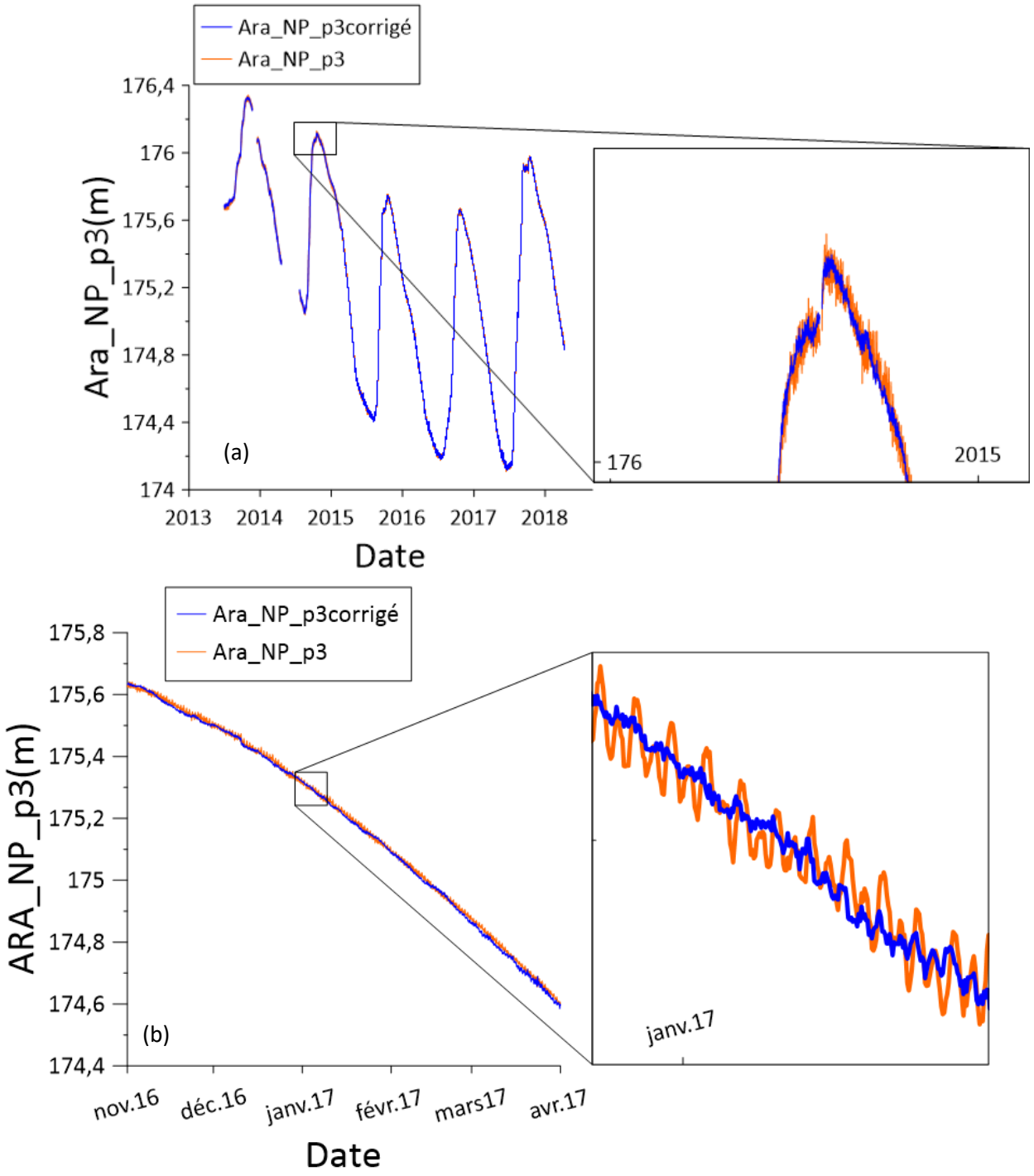


Figure 23 : Chroniques piézométriques brute (en couleur orange) corrigée (en couleur bleue et du site Ara-p3 ; **(a)** sur la période de donnée propice (novembre 2016-mars 2017) et **(b)** sur toute la période d'étude (2013-2018)

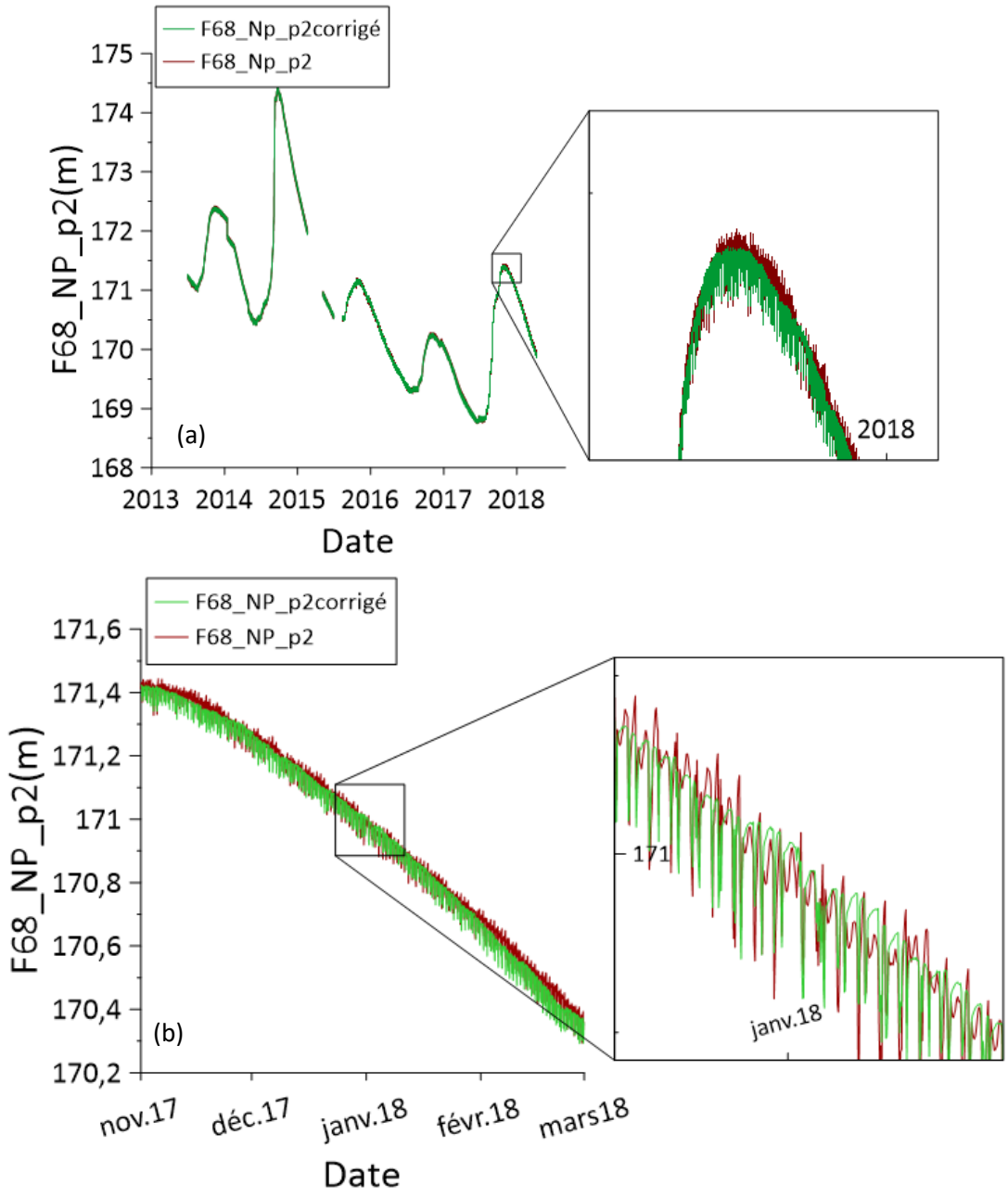


Figure 24 : Chroniques piézométriques et brute (en couleur marron) et corrigée (en couleur verte) du site F68-p2 ; **(a)** sur la période de donnée propice (novembre 2017-février 2018) et **(b)** sur toute la période d'étude (2013-2018)

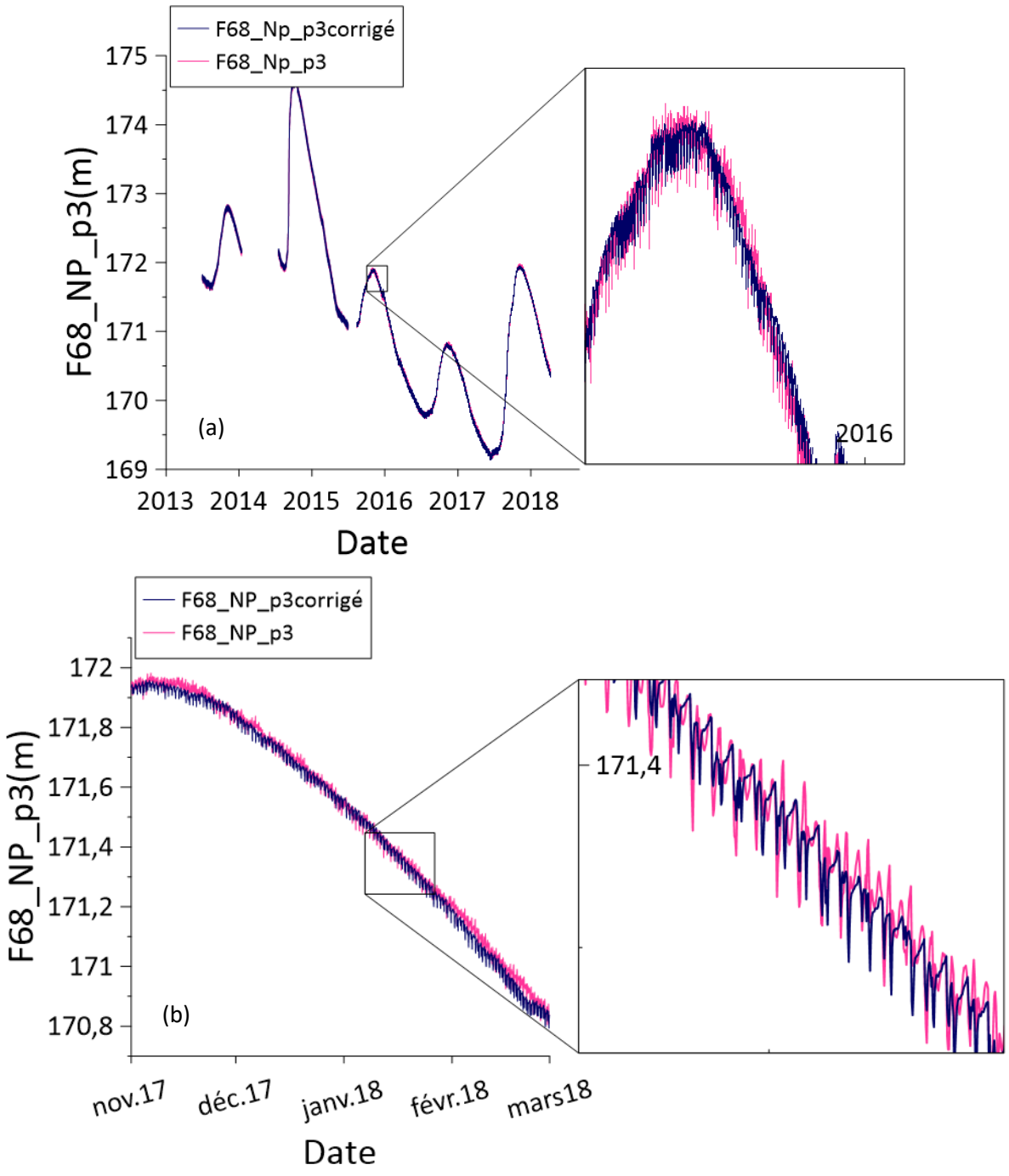


Figure 25 : Chroniques piézométriques brute (en couleur rose) et corrigée (en couleur bleue-nuit) et du site F68-p3 ; **(a)** sur la période de donnée propice (novembre 2017-février 2018) et **(b)** sur toute la période d'étude (2013-2018)

III.3.2. Résultats d'estimation de l'impact de l'influence de la pression atmosphérique sur la recharge.

Le tableau VII montre toutes les informations concernant les variations des niveaux piézométriques corrigés et bruts des sites Ara et F68, les valeurs de recharge calculées et l'impact (exprimée en pourcentage) de l'influence de la pression atmosphérique sur ces valeurs de recharge.

De ce tableau on remarque que sur les sites Ara et F68, les variations moyennes annuelles des niveaux piézométriques bruts $\Delta NP_{brut(ans)}$ sont supérieures à celle des niveaux piézométriques corrigés $\Delta NP_{corr(ans)}$, cette différence représente l'erreur induite par les variations de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques et est comprise entre -1.24 cm et -1.22 cm pour le site Ara et entre -0.30 cm et -0.20 cm pour le site F68. Ces erreurs impactent le calcul de recharge de l'ordre de -1.07%, -0.97%, - 0.09% et -0.14% respectivement sur les piézomètres Ara_p2; Ara_p3 ; F68_p2 et F68_p3 à l'échelle annuelle. Notons que ces erreurs sont négatives et impactent faiblement la recharge à l'échelle annuelle en sous-estimant cette dernière. Toutefois cet impact serait très certainement plus grand dans le calcul de la recharge à l'échelle journalière.

Tableau VII : Synthèse des résultats des variations moyennes annuelles des niveaux piézométriques, des erreurs sur la recharge et de l'impact de l'influence de la pression atmosphérique sur la recharge pour les sites Ara et F68.

Sites	$\Delta NP_{brut(ans)}$ (m)	$\Delta NP_{corr(ans)}$ (m)	Erreur dans ΔNP (cm)	R_{brut} (m)	R_{corr} (m)	E_r (m)	I_r (%)
Ara_p2	1.1535	1.1411	-1.24	0.0749	0.0741	-0.0008	-1.07%
Ara_p3	1.2213	1.2094	-1.22	0.0793	0.0786	-0.0007	-0.97%
F68_p2	2.2059	2.2039	-0.20	0.0992	0.0991	-0.00001	-0.09%
F68_p3	2.0354	2.0324	-0.30	0.0915	0.0914	-0.0001	-0.14%

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le présent travail intitulé ‘’**Analyse comparative des variations barométriques et piézométriques en zones de socle au Bénin : Implication pour le calcul de la recharge** ‘’ a pour but d’estimer l’impact de l’influence de la pression atmosphérique sur le calcul de recharge en zone socle au Bénin. Les données de pression atmosphérique du site FD19, de piézométrie et de pluviométrie des piézomètres de différentes profondeurs Ara_p2, F68_p2, (niveaux profonds) et Ara_p3 et F68_p3 (niveaux superficiels) ont été utilisées au cours cette étude. Ces données nous ont permis en premier lieu de mettre en évidence l’influence de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques en traitant et en analysant les différentes chroniques (barométrique, piézométrique, pluviométrique). En deuxième lieu elles nous ont permis d’évaluer à l’aide de quatre (4) différentes méthodes de calcul du BE (la méthode de la moyenne, la méthode de la médiane, la méthode Clark et la méthode de la régression linéaire) cette influence et de comparer les valeurs obtenues en tenant compte des différentes méthodes de calcul et des différentes profondeurs. Et en dernier lieu, elles nous ont permis de corriger les niveaux piézométriques de l’influence de la pression atmosphérique à l’aide de la méthode de correction de BE (Efficience barométrique), avant de finalement estimer l’impact de cette influence sur le calcul de la recharge. La mise en évidence de l’influence de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques montre que les niveaux piézométriques et la pression atmosphérique varient inversement. Les valeurs de BE qui ont permis de quantifier cette influence sur les 4 piézomètres Ara_p2, Ara_p3, F68_p2 et F68_p3 utilisés sont respectivement 28%, 43%, 86% et 90%, cette influence est plus importante dans les niveaux superficiels que dans les niveaux profonds. Toutefois, cette influence impacte très faiblement le calcul de la recharge à l’échelle annuelle de -1.07 % ; -0.97 %; -0.09 % et -0.14 % en zone de socle au Bénin.

Comme perspectives, nous suggérons :

- Poursuivre l’estimation de l’impact de l’influence de la pression atmosphérique sur le calcul de recharge à l’échelle journalière.
- Etendre l’étude dans toute la zone de socle et dans la zone sédimentaire.
- Effectuer l’étude sur le plan national et régional si possible.
- Poursuivre l’analyse des données de l’étude dans le domaine fréquentiel.
- Effectuer une analyse comparative des méthodes de correction des niveaux piézométriques.

REFERENCES

Achidi, J.-B., Bourguet, L., Elsaesser, R., Legier, A., Paulvé, E., Tribouillard, N., 2012.

Acworth, R.I., Brain, T., 2008. Calculation of barometric efficiency in shallow piezometers using water levels, atmospheric and earth tide data. Hydrogeol. J. 16, 1469–1481.

Acworth, R.I., Halloran, G.C., Rau, M.O., Cuthbert, Bernardi, T.L., 2016. An objective frequency domain method for quantifying confined aquifer compressible storage using Earth and atmospheric tides. Geophys. Res. Lett. 43, 11,671-11,678.

Boukari, M., 2007. Hydrogéologie de la république du Bénin. Afr. Geosci. Rev. 14, 303–328.

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). Université de Dakar Faculté des Sciences, Sénégal.

BRGM, 1984. Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000 Feuille DJOUGOU-PARAKOU-NIKKI 1ere édition 1984. 39p.

Clark, W.E., 1967. Computing the barometric efficiency of a well. J. Hydraul. Div. 93–98.

Collet, D., Drogue, C., 1987. Effet barométrique sur les niveaux piézométriques des forages de Chassole. Géologie Fr. 103–108.

Gonthier, G.J., 2007. A graphical method for estimation of barometric efficiency from continuous data—Concepts and application to a site in the piedmont,. Air Force Plant 6.

Grillot, J.C., Le clezio, M., Bodoyan, A., 1995. Filtrages piézométriques préliminaires à l'analyse du comportement des eaux souterraines lors des crises sismiques: exemple dans le petit Caucase. J.- Sci. Hydrol. 40, 647–662.

INSAE, 2016., 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.

Jacob, C.E., 1940. On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Trans. Am. Geophisycal Union 21, 574–586.

Kotchoni, V.D.O., 2019. Recharge des aquifères de socle du Bénin : Identification des processus, quantification et analyse de l'évolution temporelle International Chair in Mathematical Physics and Applications (Thèse). Université d'abomey-calavi, 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 145–161.

Lawson, A.J.B., 2016. Analyse de la variation des niveaux statiques et de la pression barométrique en zone de socle au Bénin : cas de Djougou, N'dali et Nikki (Mémoire). Université d'Abomey-Calavi, Bénin.

Rahi, K.A., 2010. Estimating the hydraulic parameters of the Arbuckle-Simpson aquifer by analysis of naturally-induced stresses. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.

Rasmussen, T.C., Crawford, L.A., 1997. Identifying and Removing Barometric Pressure Effects in Confined and Unconfined Aquifers. Ground Water 35, 502–511. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00111.x

Robinson, E.S., Bell, R.T., 1971. Tides in confined wellaquifer systems. J. Geophys. Res. 76, 1857–1869.

Spane, F.A., 2002. Considering barometric pressure in groundwater flow investigations. WATER Resour. Res. 38.

Toll, N.J., Rasmussen, T.C., 2007. Removal of Barometric Pressure Effects and Earth Tides from Observed Water Levels. Ground Water 45, 101–105. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00254.x

Totin, S.M., 2020. Etude de la production d'eau des AEV des aquifères de socle du Bénin (Mémoire). Université d'Abomey-Calavi, Bénin.

Turnadge, C., Crosbie, R.S., Barron, O., Rau, G.C., 2019. Comparing Methods of Barometric Efficiency Characterization for Specific Storage Estimation. Groundwater 57, 844–859.

Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Yalo, N., Descloitres, M., 2015. Groundwater in hard rocks of Benin: Regional storage and buffer capacity in the face of change. J Hydrol 520, 379–386.

-