



**HAL**  
open science

# Analyse piézométrique et modélisation des signaux hydrologiques et gravimétriques dans les aquifères du socle en région soudano-sahélienne : cas de Ouagadougou

Ali Houmadi Mouhouyoudine

► **To cite this version:**

Ali Houmadi Mouhouyoudine. Analyse piézométrique et modélisation des signaux hydrologiques et gravimétriques dans les aquifères du socle en région soudano-sahélienne : cas de Ouagadougou. Hydrologie. Université Montpellier, 2015. Français. NNT : 2015MONT254 . tel-02169684

**HAL Id: tel-02169684**

**<https://theses.hal.science/tel-02169684>**

Submitted on 1 Jul 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE

Pour obtenir le grade de  
Docteur

Délivré par l'UNIVERSITE MONTPELLIER

Préparée au sein de l'école doctorale **Systèmes Intégrés en  
Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosciences,  
Environnement (SIBAGHE)** et de l'unité de recherche  
**Hydrosciences Montpellier**

**Spécialité : Eaux Continentales & Sociétés**

Présentée par **Mouhouyoudine Ali Houmadi**

**Analyse piézométrique et modélisation des  
signaux hydrologiques et gravimétriques dans les  
aquifères du socle en région soudano - sahélienne :  
cas de Ouagadougou**

Soutenue le 16 juin 2015 devant le jury composé de :

Mr Yves TRAVI,	Professeur émérite, Université d'Avignon	Rapporteur
Mr Moutaz RAZACK	Professeur, Université de Poitiers	Rapporteur
Mr Christian LEDUC	Directeur de recherches Laboratoire G.EAU/IRD	Examineur
Mme Catherine BARON	Professeure Université Sciences PoToulouse	Examineur
Mr Pierre GENTHON	Directeur de recherches Hydrosciences /IRD	Directeur
Mme Suzanne YAMEOGO	Maitre assistante Université de Ouagadougou	Co-encadrante
Mr Said Ali THAOUBANE	Professeur Université des Comores	Invité
Mr Jean-Christophe MARECHAL	BRGM Montpellier	Invité



## Résumé

Depuis les années 70, le niveau de l'eau dans les aquifères du sous-sol de la ville de Ouagadougou a subi des fluctuations considérables. Dans cette thèse, nous avons : 1) mis en place un réseau piézométrique local autour du piézomètre CIEH de l'Université de Ouagadougou, 2) observé les fluctuations du niveau piézométrique au cours d'une année hydrologique, 3) modélisé ce niveau en utilisant un modèle en boîte 1D, 4) mesuré la variabilité des principaux éléments chimiques dans notre réseau piézométrique entre la fin de la saison sèche et la fin de la saison des pluies., 5) évalué la capacité de mesures gravimétriques à mesurer les fluctuations du niveau d'eau lors d'un pompage d'essai de 7 jours.

Le modèle en boîte 1D choisi est dérivé du modèle de GARDENIA du BRGM. Il comporte trois réservoirs; le réservoir superficiel décrit les premiers centimètres du sol où l'évapotranspiration intervient, le second joue le rôle d'un tampon vers le troisième réservoir qui représente l'aquifère. La modélisation de l'ensemble du réseau piézométrique au cours d'une année hydrologique permet de comparer les bilans hydrologiques en différents points du réseau. Les résultats obtenus correspondent à un quartier ancien, à une zone récemment urbanisée et à une zone naturelle. Une tentative de modéliser l'ensemble des niveaux piézométriques depuis 1978 au CIEH avec le même jeu de paramètres s'est avérée infructueuse ce qui est interprété comme le reflet du changement des états de surface à partir des années 90. Comme les paramètres hydrologiques varient en fonction du climat et de l'utilisation des terres près du CIEH, la méthode habituelle utilisant les premières années de l'enregistrement pour l'étalonnage du modèle et les années suivantes pour l'évaluation de la validité du modèle ne peut pas être appliquée.

Un test de pompage de 7 jours dans un aquifère de socle théorique a été modélisé en utilisant MODFLOW/PMWIN et une grille de maille variant entre 0,2 m près du puits et 2 km près de la frontière du domaine. Ce modèle a été validé par des solutions analytiques et numériques publiées dans la littérature et il est combiné avec un modèle gravimétrique fonctionnant sur la même grille. Les résultats de gravité ont été à nouveau validés par comparaison avec des résultats déjà publiés. Trois cas tests ont été étudiés 1) pompage dans la couche de latérite, 2) pompage dans le milieu fissuré horizontalement sous les latérites, 3) pompage dans une fracture au sein de laquelle le milieu fissuré est épaissi. Les propriétés hydrauliques de la latérite sont supposées connues, alors que la conductivité hydraulique du milieu fissuré est inconnue. Pour le cas de la fracture, il est démontré que les données de gravité seules ne sont pas aujourd'hui en mesure de contraindre la conductivité de la couche fissurée. Cependant, la combinaison de données gravimétriques et de nivellement pourraient permettre de contraindre ce paramètre avec une incertitude raisonnable.

L'analyse de nos mesures chimiques montre qu'elles ne peuvent être utilisées que pour des conclusions qualitatives, reposant sur un ensemble d'ions. Cependant, en se concentrant sur les nitrates, il se confirme que des teneurs trois fois supérieures aux normes de l'OMS sont observées dans les puits de Zogona (zone d'habitat traditionnel ancien) alors que les deux puits situés dans la zone naturelle Bangr Weogo montrent des teneurs nettement en dessous des normes de potabilité. L'examen de l'ensemble des éléments chimiques majeurs permet : 1) d'observer l'évolution concomitante de tous les éléments au cours de la saison des pluies sur les zones urbaines et de maraichage, 2) de distinguer au moins 2 grands mécanismes de pollution : par lessivage des sols puis infiltration ou par mise en connexion de la nappe avec les latrines lors de sa remontée en saison des pluies. Il est suggéré que des résultats intéressants peuvent être obtenus à Ouagadougou par la surveillance à long terme de quelques piézomètres à la fois pour leur niveau et pour la qualité de l'eau.

## Abstract

Since the 70s the water level in basement aquifers of the city of Ouagadougou underwent large level fluctuations. In this PhD thesis 1) we set up a local piezometric network around the so called CIEH piezometer in the University of Ouagadougou, 2) observe the fluctuations of the water level in this piezometric network during one hydrologic year, 3) model, using a 1D simplified box model the water level in the piezometric network, 4) assess the capability of gravimetric measurement to measure water level fluctuations during a 7 days aquifer test, 5) measure the variability of major chemical species in our piezometric network between the end of the dry season and the end of the rain season.

The 1D box model is derived from the GARDENIA model of BRGM. It involves three compartments, the first one describes the first few centimeters of soil, from which evapotranspiration is supposed to take place; the second one buffers the input of water to the third one which is the aquifer. Modeling the whole piezometric network during one hydrological year allows to compute a rainfall budget. The results correspond to the land occupation of each well, old suburb; natural area, and recently urbanized area. An attempt to model the whole piezometric record, lasting since 1978 at CIEH was unsuccessful and this is interpreted as an effect of land use change, combined to the need of different coefficients for a dry year and a very wet year. As the hydrological parameters are drifting as a function of climate and of land use changes near the CIEH well, the usual method using the first years of the record for calibration of the model and the following years for its assessment cannot therefore be applied.

The theoretical 7 days aquifer test experiment was modeled using MODFLOW/PMWIN and a variable spacing grid with a mesh size of 0.2 m near the pumped borehole increasing progressively to nearly 2 km at the border of the modeling box. This model is calibrated along analytic and numerical solutions published in the literature and is combined with a gravimetric model operating on the same grid. The gravity results were once again validated against published literature. Three cases of aquifer test were considered : 1) pumping in the laterite layer, 2) pumping in the horizontally fissured medium below the laterites, 3) pumping in a fracture where the fissured medium is deepening. The hydraulic properties of laterite were supposed to be known, while the hydraulic conductivity of the fissured medium was unknown. For the case of the fracture, it is shown that with present day accuracy gravity data are not able alone to constrain the unknown conductivity of the fissured layer. However leveling data on the subsidence of laterites during pumping when combined with gravity data allow recovering this parameter with a reasonable accuracy.

The uncertainties on our chemical analyses only allow to interpret them for qualitative conclusions. As a whole the Zogona wells present nitrates concentrations which prohibit using them for drinking water, while the two wells in the natural BangrWeogo area are below WHO standards. Comparing major ion concentrations measured during the dry and the rainy season allow to define two plausible mechanisms of aquifer pollution: (i) infiltration with rain of minerals from the soil surface (ii) rise of the water level above latrines during the rainy season. It is suggested in conclusion to monitor on a long term basis a limited number of piezometers in Ouagadougou for both water level and water composition.

## *Dédicaces*

*A mon père (Paix à son âme) à ma mère, à mes femmes, mes enfants ainsi que mes sœurs et frères pour leurs soutiens.*

## Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre de ramener les enseignants de l'Université des Comores, créée en 2003, à un niveau élevé. Il a été financé par une bourse de mérite de la Banque Islamique de Développement et réalisé dans son intégralité à l'Université de Montpellier 2, Ecole doctorale SIBAGHE, laboratoire Hydrosiences sis à la Maison des Sciences de l'Eau à Montpellier.

Je remercie Dieu le tout Puissant pour la santé, la résistance et le courage qu'il m'a donné durant ces trois ans sur le territoire français.

Ce travail est le fruit d'une contribution de plusieurs personnes envers qui j'aimerais exprimer ma reconnaissance et ma gratitude. Je dois reconnaître que la rédaction de cette partie n'est pas aisée, car vouloir citer des noms, c'est accepter d'en oublier. Je voudrais donc m'excuser d'avance auprès de ceux ou celles que j'aurai oubliés.

Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur Pierre GENTHON, mon Directeur de thèse à Montpellier qui a facilité mon arrivée avant son départ en mission. Si ce travail de thèse a pu avoir un aboutissement, c'est grâce à Monsieur GENTHON de par sa disponibilité et son engagement durant le déroulement de la thèse. Il a suivi et guidé toutes les étapes de ce travail. Sa porte m'a toujours été ouverte malgré son emploi du temps très chargé. L'expérience et la rigueur de Monsieur GENTHON m'ont été d'un apport capital. Il m'a permis de comprendre de nombreux concepts dans le domaine de la modélisation hydrodynamique. Monsieur GENTHON, je pense m'arrêter là, car une page complète ne suffira pas pour vous remercier. Je vous remercie sincèrement du fond du cœur et je me souviendrai toujours de votre rigueur à travers ces termes : « pas clair, mais c'est du n'importe quoi, soyez précis, ça c'est bien, qu'est ce que cela apporte Ali Houmadi comme information » etc. Que la fin de cette thèse soit le renforcement d'une collaboration entre vous et mon université d'origine.

Mes sincères remerciements à Dr Suzanne Yameogo pour sa générosité, l'hospitalité, l'accueil chaleureux à Ouagadougou, la surveillance de ne pas manger quoi que ce soit sur le terrain et surtout l'encadrement qu'elle a fait à cette thèse.

Ces remerciements vont aussi à l'Université des Comores, en particulier le Doyen de la FST Dr Said Ali Thaoubane pour son soutien bien affiché à l'UDC ainsi tous mes collègues du département STE et la FST. Je remercie infiniment aussi la Banque Islamique de Développement (BID) pour le financement de cette thèse du début à la fin sans interruption.

Je remercie toutes les équipes du laboratoire HydroSciences de Montpellier enseignants et chercheurs pour leurs soutiens ainsi que le personnel administratif pour m'avoir accueilli et intégré pendant que mon directeur de thèse était en mission à mon arrivée en France et je cite en particulier Mr Roger Saraiva qui m'a toujours considéré parmi ses frères.

Mes remerciements vont également à l'école doctorale SIBAGHE pour leur aide financière, la Direction de la Météorologie Nationale de Burkina Faso, le réseau BADOPLU et la base de données SIEREM, le projet AMMA et l'IRD pour la fourniture de données climatologiques, les membres de la représentation de l'IRD au Burkina Faso pour leur support logistique, l'équipe du laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon ainsi que H. Bancé et B. Moussa pour leur aide sur le terrain.

Les membres du comité de thèse tiennent également une place importante dans le pilotage de cette thèse. Ils ont su me canaliser de manière très pertinente. Merci à Christian Leduc, Jean-Christophe Marechal et une mention spéciale au Professeur émérite Yves TRAVI pour leurs conseils mais également leurs disponibilités et leurs encouragements qui se sont avérés bien utiles en périodes de doutes. Je poursuis en remerciant les membres du jury pour leur intérêt porté à mes travaux de thèse et pour le temps consacré à l'évaluation de ces travaux.

Enfin, je remercie mon oncle Dr Velo Marcelle qui m'a porté garant, Mr Jean Pierre Vaillant et Ben Ahmed Said Mohamed Allaoui pour la livraison de mon premier hébergement en France, Mme Soifia Abou Bacar, Mme Siti Ali Toibibou, Mr Ahmadi Saendou, Mr Ismaila Abdou Madi (Solodo), Mr Salim Hamza, Mr Musbahou Mohamed zakaria, Mr Ihioine Ahmed Said, Mr Attoumane Issiaka et toute la communauté comorienne de France.

Mais je ne saurais clore cette page de remerciements sans une mention spéciale à celles qui, à chaque étape de ma thèse, ont su trouver les mots justes pour me (re) motiver, me pousser à avancer : merci à vous Mme Soidifati Said Ali Attoumane et Mme Abdou Baraka.

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>2</b>
<b>1-Contexte général et problématique de l'étude .....</b>	<b>2</b>
<b>2-Matériels et méthode.....</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre 1 : Contexte environnemental de la zone d'étude.....</b>	<b>11</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>12</b>
<b>2 Cadre géographique.....</b>	<b>12</b>
2.1 Relief et hydrographie.....	13
<b>3- Les barrages.....</b>	<b>14</b>
<b>4 Les canaux d'assainissement.....</b>	<b>15</b>
4.1 Le canal central.....	16
4.2 Le canal de l'Université.....	16
<b>5 Le Parc Bangr Weogo et les zones de maraichage .....</b>	<b>17</b>
<b>6 Le milieu urbain.....</b>	<b>19</b>
6.1 Le quartier Zogona .....	19
6.2 L'université de Ouagadougou.....	20
<b>7 Les sols.....</b>	<b>21</b>
<b>8 Environnement des puits et des forages .....</b>	<b>21</b>
8.1 Les forages de l'université.....	21
8.2 Le piézomètre du CIEH .....	24
8.3 Les puits de Zogona .....	27
8.4 Les puits de la zone de maraichage.....	31
<b>9 Conclusion.....</b>	<b>34</b>
<b>Chapitre 2: Géologie et hydrogéologie de Ouagadougou .....</b>	<b>35</b>
<b>1 Cadre géologique.....</b>	<b>36</b>
1.1 Aperçu général .....	36
1.2 Le socle cristallin du Burkina .....	38
1.3 Altération des formations cristallines .....	39
1.4 Les formations sédimentaires .....	40
<b>2 Cadre hydrogéologique.....</b>	<b>40</b>
2.1 Les réservoirs d'eau souterraine au Burkina Faso.....	42
2.2 Le réservoir des altérites de Ouagadougou .....	43
<b>3 Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères du socle granitique au Burkina Faso .....</b>	<b>44</b>
3.1 Caractéristiques hydrodynamiques des altérites.....	45

3.1.1 Le coefficient d’emmagasinement .....	45
3.1.2 La perméabilité des altérites .....	45
3.1.3 La transmissivité .....	46
3.2 Le réservoir des fissures et des failles sous-jacentes .....	48
3.2.1. Composition des couches.....	48
3.2.2 Caractéristiques hydrodynamiques.....	48
<b>4 La recharge des nappes.....</b>	<b>49</b>
<b>5 Conclusion.....</b>	<b>50</b>
<b>Chapitre 3 : Analyse des données climatiques et piézométriques.....</b>	<b>51</b>
<b>1 Introduction .....</b>	<b>52</b>
<b>2 Caractéristiques climatiques .....</b>	<b>52</b>
2.1 Cadre général du climat au Burkina Faso .....	52
2.2 Les précipitations à Ouagadougou .....	54
2.2.1 Les précipitations annuelles .....	54
2.2.2 Les précipitations mensuelles .....	57
2.2.3 Modèle linéaire .....	61
2.2.4 Modèle saisonnier .....	63
2.3 La température, l’évapotranspiration potentielle et l’humidité relative.....	66
2.4 La mousson et l’harmattan.....	67
<b>3 Analyse piézométrique .....</b>	<b>67</b>
3.1 Le piézomètre du CIEH .....	68
3.2 Les mesures piézométriques .....	68
3.3 Les cartes piézométriques.....	71
3.4 Corrélation des données pluviométriques et piézométriques.....	75
3.5 Corrélation température – précipitation - niveau piézométrique du CIEH.....	77
<b>4 Conclusion.....</b>	<b>78</b>
<b>Chapitre 4 : Modélisation pluie-niveau piézométrique à Ouagadougou.....</b>	<b>79</b>
<b>1 Introduction .....</b>	<b>80</b>
<b>2 Les données disponibles .....</b>	<b>80</b>
2.1 Données piézométriques.....	80
2.2 Données pluviométriques .....	80
2.3 Evapotranspiration potentielle.....	80
2.4 Le coefficient d’emmagasinement .....	81
<b>3 La modélisation .....</b>	<b>81</b>

3. 1 Principe du modèle.....	81
3. 2 Calage du modèle .....	83
3. 3 Résultats de la modélisation .....	84
3. 3. 1 Simulation des niveaux pour l'année hydrologique 2013 - 2014.....	84
3. 3. 2 Simulation de la chronique piézométrique du piézomètre du CIEH entre 1978 et 2014 ..	91
3. 3. 3 Sensibilité des paramètres .....	93
3. 3. 4 Discussion .....	95
<b>4 Conclusion.....</b>	<b>96</b>
<b>Chapitre 5 : Qualité de l'eau souterraine de quelques puits à Ouagadougou .....</b>	<b>98</b>
<b>1 Introduction .....</b>	<b>99</b>
<b>2. Les données.....</b>	<b>100</b>
2.1 Les paramètres in situ .....	100
2.2 Caractéristiques chimiques des eaux .....	101
<b>3. Variation des concentrations (en particulier nitrates et chlorures) au cours de la saison des pluies dans les puits du jardin et les puits de Zogona : origine des pollutions .....</b>	<b>107</b>
3.1 Variation des teneurs en nitrate dans les puits du jardin et les puits de Zogona.....	107
3.2 Variation des chlorures au cours de la saison des pluies dans les puits de la zone de maraichage et les puits de Zogona .....	108
<b>4. La pollution des eaux souterraines par les nitrates à Ouagadougou.....</b>	<b>112</b>
<b>5 Conclusion.....</b>	<b>114</b>
<b>Chapitre 6 : Modélisation des écoulements souterrains : Gravimétrie et pompage en zone du socle .....</b>	<b>115</b>
<b>1-Introduction.....</b>	<b>116</b>
<b>2-Monitoring gravimétrique d'un pompage en aquifère de socle. ....</b>	<b>117</b>
<b>3- Modélisation des écoulements souterrains : Gravimétrie et pompage en zone du socle .....</b>	<b>118</b>
3.1 Choix du code .....	119
3.2 Choix du maillage .....	119
3.3-Les paramètres.....	122
3.4 Les conditions aux limites.....	123
3.5 Calcul de l'anomalie gravimétrique.....	124
3.5.1 Validation du modèle .....	125
3.5.2 Comparaison des rabattements et du signal gravimétrique simulés avec les résultats de Damiatia et Lee (2006) .....	126
<b>4. Simulation des rabattements et du signal gravimétrique .....</b>	<b>129</b>
4.1 Simulation et données du modèle .....	129

4.2 Résultats du modèle .....	129
4.2.1 Pompage dans les altérites (Cas 1).....	129
4.2.2 Pompage dans la couche fissurée à la base des altérites (Cas 2).....	131
4.2.3 Pompage dans une faille (Cas 3).....	133
4.3 Variation du rabattement en fonction des conductivités hydrauliques .....	138
4.4 Variations du rabattement, de la subsidence et du signal gravimétrique avec le module d'Young .....	139
4.4.1 Variation du rabattement en fonction du rapport ( $K_2/K_3$ ) et du module d'Young .....	139
4.4.2 Variation du signal gravimétrique en fonction du rapport ( $K_2/K_3$ ) et du module d'Young .....	140
4.4.3 Variation de la subsidence en fonction du rapport ( $K_2/K_3$ ) et du module d'Young .....	141
<b>5 Conclusion.....</b>	<b>142</b>
<b>Conclusion Générale et perspectives.....</b>	<b>144</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>149</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>162</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>166</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>167</b>
<b>Annexe 1 : Les mesures piézométriques .....</b>	<b>168</b>
1 les mesures des niveaux statiques du piézomètre du CIEH (1978 – 2014).....	169
2 Les puits de zogona .....	176
3 Les forages de l'Université .....	176
4 Les puits des zones de maraichage et du parc Bangr weogo .....	177
<b>Annexe 2 : les précipitations .....</b>	<b>178</b>
<b>Annexe 3 Evapotranspiration potentielle mensuelle de Ouagadougou 1961 – 1990.....</b>	<b>181</b>
<b>Annexe 4 Température mensuelle 1978 – 2012 de Ouagadougou .....</b>	<b>183</b>
<b>Annexe 5 Humidité relative moyenne mensuelle de Ouagadougou 1961 1978 .....</b>	<b>185</b>
<b>Annexe 6 Les analyses Chimiques .....</b>	<b>186</b>

**Analyse piézométrique et modélisation des signaux  
hydrologiques et gravimétriques dans les aquifères  
du socle en région soudano - sahélienne: cas de  
Ouagadougou**

## **Introduction générale**

### **1-Contexte général et problématique de l'étude**

Fournir à tous une eau de qualité en quantité suffisante est un des objectifs du millénaire (ONU 2000), ce qui constitue un challenge pour l'Afrique sub-saharienne. Ceci est encore plus vrai pour les villes Africaines pour les raisons suivantes :

**l'Afrique s'urbanise rapidement** : La population urbaine de l'Afrique est passée de 33 millions en 1950 à 197 millions en 1990, puis 455 millions en 2014 et elle devrait atteindre 1,4 milliards en 2050. Celle du Burkina Faso est passée de 1,6 millions en 1990 à 5 millions en 2014 et devrait atteindre 21,3 millions en 2050 (DESA 2008, 2014). Depuis la fin des années 50, l'Afrique et en particulier l'Afrique de l'Ouest est caractérisée par une croissance urbaine très forte en raison d'un taux élevé d'accroissement de la population (2,7% en moyenne entre 1950 et 2000), et d'une multiplication par 4,2 du taux d'urbanisation. Elle demeure l'une des régions les moins urbanisées et elle est l'une de celle où la croissance urbaine est la plus rapide au monde selon la base de données d'AFRICAPOLIS et le rapport ONU-habitat (2014). Marguerat (1992) a souligné qu'au cours de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, l'Afrique noire aura connu une mutation d'une extraordinaire ampleur : le passage d'une société essentiellement rurale à une société majoritairement urbaine.

Dans les pays du sud, l'urbanisation rapide induit des changements majeurs environnementaux, démographiques, sociaux, culturels et sanitaires. Les taux de croissance des villes africaines restent très importants, de l'ordre de 4 à 5% l'an : la moitié de la population ouest africaine pourrait vivre en milieu urbain d'ici 2020 (Fournet *et al.* 2008). D'après Antoine (1997) la population urbaine au Burkina Faso était de 1,6 millions en 1990 et elle passera à 12,2 millions en 2020 avec un taux d'urbanisation de 17,9 % et 63,4% respectivement et un taux de croissance annuel de la population urbaine de 7% entre 1990 et 2020. Le recensement général de la population et de l'habitat de 2006 montre que la population urbaine au Burkina Faso est passée de 15,4% de la population totale en 1996 à 22,7% en 2006 avec un taux d'urbanisation jugé faible par rapport aux pays voisins (Fournet *et al.* 2008, Ouattara *et al.* 2009);

**la demande d'eau est en hausse** : cette hausse tient à l'accroissement de la demande de la population urbaine, mais aussi aux activités économiques et agricoles (Jacobsen *et al.* 2012);

**les changements climatiques induisent des changements cruciaux pour la ressource en eau:** les changements climatiques peuvent affecter différents secteurs. Dans le domaine de la ressource en eau, différents scénarios ont permis d'établir l'évolution du volume annuel d'eau écoulée aux horizons futurs sur la base des projections climatiques issues des modèles couplés de circulation générale. La plupart des scénarios prévoient une diminution des précipitations qui varie de 0,5 à 40% avec une moyenne de 15% pour l'horizon 2025. Beaucoup de ces scénarios font état d'une baisse accentuée des écoulements et de la recharge des nappes souterraines (Niasse *et al* 2004, Döll 2009, Dennis *et al* 2012), d'autres cependant prévoient une augmentation des précipitations dans la région du sahel (Maynard *et al.* 2002, Haarsma *et al.* 2005, Kamga *et al* 2005, Druyan 2010, Morton *et al.* 2014). De manière plus générale, il est très difficile de mettre en évidence des tendances communes pour tous les bassins, chacun ayant une réponse particulière aux variations des précipitations (Rescan 2005).

De nombreuses études ont montré l'impact des changements climatiques sur les hydrosystèmes en Afrique (Mahé *et al* 2003, 2005 et 2009, Lienou *et al.* 2008, Paturel *et al.* 2010, Goulden *et al.* 2009, Amoussou *et al.* 2012). En revanche, quoique le Sahel et la majeure partie de l'Afrique occidentale aient été touchés par la sécheresse au cours des 40 dernières années, des coefficients d'écoulement conduisant à des pics de crue (Mahé *et al.* 2009) ont été observés dans les régions sahéliennes, un phénomène qualifié de paradoxal (Descroix *et al.* 2013).

La projection faite au Burkina Faso indique une situation contrastée dans les différents bassins versants. En 2025, il est projeté une diminution du volume d'eau annuel écoulé de 45 % sur la Comoé et de 54 % sur le Mouhoun par rapport à la normale de 1961-1990. Par contre, dans les bassins du Nakambé (où se trouve notre zone d'étude) et du Niger il est prévu une augmentation des écoulements de 36 % et de 47% respectivement par rapport à cette même normale de 1961 - 1990. En 2050, les volumes d'eau connaîtront une nette diminution par rapport à la normale 1961-1990 sur l'ensemble des bassins du Burkina Faso. Il est prévu en particulier une baisse de 68,9% pour la Comoé, de 73% pour le Mouhoun, de 29 % pour le Nakanbé et de 41 % pour le Niger (Sedogo 2007);

**la qualité des eaux se dégrade:** Si les facteurs climatiques peuvent avoir des impacts négatifs sur la ressource en eau dans un contexte donné et pendant un temps donné pour une région ou une zone donnée, l'action de l'homme a un effet important dans la dégradation de cette ressource. En raison de l'urbanisation et de la motorisation accélérée, de l'insuffisance ou du

disfonctionnement des réseaux de drainage, le traitement des eaux de ruissellement constitue un défi environnemental majeur dans les pays en développement. Dans la plupart des villes de ces pays, les eaux pluviales sont mélangées aux eaux domestiques, aux lixiviats de décharge, voire avec des huiles usagées ou des effluents hospitaliers (Fifi *et al.* 2010).

Au cours de ces dernières années une pollution des eaux souterraines a été signalée en Afrique de l'Ouest. Des teneurs excessives en nitrates dans les aquifères superficiels ou profonds ont été signalées (Groen *et al.* 1988, Faillat 1990, Travi *et al.* 1997, Yameogo *et al.* 2009 Takem *et al.* 2010). Une carte de distribution de nitrates a été réalisée sur l'ensemble du Burkina Faso et en particulier sur Ouagadougou. Cette pollution est la conséquence de la croissance démographique et d'un assainissement inadapté.

Les villes africaines souffrent d'une pénurie d'eau (Mérino, 2008) qui devrait s'amplifier au cours des prochaines décennies à cause de leur croissance. D'après le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2007), d'ici 2020, 75 à 250 millions de personnes devraient souffrir d'un stress hydrique accentué par les changements climatiques en Afrique.

Il est donc fondamental de connaître la ressource souterraine potentielle de la capitale du Burkina Faso ainsi que son renouvellement à travers une modélisation et une analyse de la variation des niveaux piézométriques. La modélisation numérique constitue un moyen pour comprendre le fonctionnement actuel d'un système aquifère et prédire son comportement futur dans le but de fournir des réponses aux personnes en charge de la gestion de l'eau (Bonnet 1982). Cette modélisation de la variabilité des niveaux piézométriques peut en effet permettre d'accéder à des paramètres fondamentaux des aquifères. C'est pour cela que nous développons cette approche sur un mini réseau piézométrique centré autour du piézomètre dit du CIEH pour lequel des enregistrements continus sont disponibles depuis le début de la sécheresse des années 80.

Les eaux souterraines peuvent participer à l'alimentation en eau des villes (Lerner *et al.* 1999, Margat, 2008, Foster *et al.* 2010). Or ces eaux sont sujettes à une pollution anthropique (Traviet *et al.* 1997, Boubacar 2010) et sont aussi sensibles aux changements climatiques (Holman, 2006, Jyrkama *et al.* 2007).

L'Afrique a subi durant les années 80 et 90 une sécheresse qui est considérée comme une des plus significatives à l'échelle mondiale (Hulme *et al.* 2001, Ardoin *et al.* 2003). Depuis la

décennie 70, l'ensemble des pays tropicaux du sud du Sahara a connu des sécheresses chroniques dont les plus catastrophiques ont été celles de 1972-1974 et 1983- 1984(Albergel *et al.* 1985). Ces sécheresses ont présenté des impacts dramatiques sur les eaux souterraines dans plusieurs pays sahéliens (Ardoin 2004, Mahé *et al.* 2009, Kouassi *et al.* 2013). Depuis ces années sèches, plusieurs études ont porté sur les ressources en eau souterraines des aquifères de socle. Ces études ont porté sur la productivité, l'exploitation, la disponibilité, la qualité, la pluviométrie (Sommen *et al.* 1988, Derman 1990, CIEH et BRGM 1992, Nakolendousse *et al.* 2003, Kouassi *et al.* 2012, Courtois *et al.* 2010) ainsi que sur la modélisation de la recharge par la pluie (Thiéry 1988, Milville 1990, 1991, Etrillard 1994, Bazie *et al.* 1995, Leduc *et al.* 1997, Servat *et al.* 1999, Filippi *et al.* 2009, Koïta 2010, Hector, 2010, Genthon *et al.* 2015). La réaction des aquifères à cette sécheresse peut être utilisée pour anticiper leur évolution au cours des futurs changements climatiques.

L'alimentation en eau potable de la ville de Ouagadougou se fait essentiellement à partir des eaux de surface provenant du barrage de Ziga situé à 50km à l'Est de la ville. Or ce barrage du fait de son comblement par la sédimentation (Remin *et al.* 2003) ainsi que des besoins dus à l'augmentation de la population va se trouver incapable de fournir une quantité d'eau suffisante au cours de la prochaine décennie. Il est donc capital de connaître la ressource souterraine dans cette ville ainsi que leur renouvellement.

Ouagadougou présente la particularité d'être située sur des roches de socle, à l'intérieur desquelles la ressource en eau est faible et localisée (Savadogo *et al.* 1997); toutefois, des études en Afrique de l'Ouest ont montré que l'exploitation des eaux souterraines pouvait être significativement améliorée en captant directement le niveau fissuré à une profondeur comprise entre 50 et 70 m (Berger *et al.* 1980, Assouma 1988, N'Go *et al.* 2005, Courtois *et al.* 2011). D'autres auteurs soutiennent la possibilité d'obtenir des débits productifs réels à de grandes profondeurs (Faillat 1986). A Ouagadougou Yameogo (2008) montre que 102 forages (soit 52%) ont un débit supérieur à 10m<sup>3</sup>/h parmi lesquels 30% dépassent 15m<sup>3</sup>/h. Les forages ayant un débit supérieur à 35 m<sup>3</sup>/h ont été implantés sur des fractures ou des nœuds de fractures d'envergure régionale d'orientation Nord Est -Sud Ouest, Nord Ouest – Sud Est et Nord -Sud.

Les aquifères de socle ont fait aussi l'objet de recherches dans différentes régions du monde. La structure de ces aquifères est maintenant bien connue (Chilton *et al.* 1995, Taylor *et al.* 2000, Maréchal *et al.* 2003, Wyns *et al.* 2004, Dewandel *et al.* 2006, Lachassagne *et al.* 2009,

Dewandel *et al.* 2011, Koïta *et al.* 2011, Foster 2012). Ils sont constitués d'une couche d'altérite semi perméable surmontant le socle fissuré (Faillat *et al.* 1993). La base de la couche altérée constitue donc un niveau de bonne perméabilité mais de faible porosité (Compaoré *et al.* 1997, Maréchal *et al.* 2003).

Si toutes ces études ont permis de comprendre la géométrie des aquifères de socle, des imprécisions existent quant à l'acquisition des facteurs hydrodynamiques de tels systèmes aquifères (Yaméogo 2008).

Dans les conclusions de sa thèse Yaméogo (2008) suggère d'acquérir des données complémentaires pour évaluer la vulnérabilité des aquifères et de réaliser des cartes piézométriques de la nappe des altérites afin de circonscrire les zones sensibles à la pollution. Ces données seraient utilisées pour des modélisations.

L'objectif principal de cette thèse est de comprendre comment les aquifères de socle réagissent aux variations de climat à une échelle annuelle à pluri - décennale avec l'aide d'un modèle physique. Analyser le signal gravimétrique de ce type d'aquifère lors d'un pompage et effectuer le suivi de la pollution constituent des objectifs spécifiques.

La qualité des eaux souterraines a fait l'objet de plusieurs campagnes et d'investigation afin de faire face aux problèmes urgents d'alimentation en eau potable à Ouagadougou. Nous nous intéressons plus particulièrement aux nitrates qui constituent des indicateurs de pollution des eaux souterraines et pour lesquels des teneurs élevées ont été observées à Ouagadougou. Cette pollution s'observe en général dans la nappe des altérites que captent des milliers de puits traditionnels et modernes mais d'après Travi *et al.* (1997) elle a tendance à s'étendre dans les aquifères du socle fracturé, là où le recouvrement latéritique est peu épais ou discontinu. Ces fortes teneurs ont indéniablement pour origine les excréments et les ordures ménagères et sont en relation avec le mode d'habitat.

Les rabattements des aquifères libres au cours d'essais de pompage ont fait l'objet d'analyses poussés depuis longtemps (Neuman 1972 et 1975). Les effets de ces essais sur le champ de gravité ont été modélisés plus récemment (Damiata et Lee 2006, Blainey *et al.* 2007, Gehman *et al.* 2009, Woodworth 2011, González-Quirós *et al.* 2014). A notre connaissance, de telles analyses et simulations n'ont pas été effectuées dans notre zone d'étude et font partie des objectifs spécifiques à atteindre. En particulier, un des objectifs de cette thèse est de montrer quelles

contraintes peuvent apporter les mesures gravimétriques au cours d'un pompage en aquifère du socle.

Les objectifs de cette étude ont conduit à des synthèses bibliographiques ainsi qu'à des résultats et analyses présentés au sein des six chapitres qui constituent le présent manuscrit.

Le premier chapitre décrit les sites de la zone d'étude ainsi que tous les puits et forages utilisés dans leur contexte géographique et environnemental.

Le deuxième chapitre se consacre à une synthèse bibliographique du cadre géologique et hydrogéologique de l'étude.

L'analyse des données climatique est piézométriques à Ouagadougou constitue le troisième chapitre.

Le chapitre quatre présente le modèle hydrologique pluie - niveau piézométrique utilisé pour l'estimation du bilan hydrologique sur notre zone d'étude.

Les chapitres cinq et six s'intéressent aux analyses chimiques et la modélisation des effets gravimétriques d'un pompage d'essai en aquifère de socle.

## **2-Matériels et méthode**

Les données utilisées dans cette étude ont été obtenues au moyen de recherches bibliographiques, de mesures de terrain et d'analyses de laboratoire.

La recherche bibliographique a eu lieu dans les bibliothèques de la MSE à Montpellier, de l'université d'Avignon, de la fondation 2iE et du laboratoire d'hydrogéologie à Ouagadougou. Pour accéder aux revues en ligne, nous avons utilisé le « bureau du chercheur » de l'IRD qui fournit l'accès à plusieurs bases de données et revues en ligne. Ce moteur nous a donné accès aux thèses, mémoires, rapports et publications en lien avec notre sujet de recherche.

Pour les travaux de terrain, une mesure piézométrique a été effectuée au moins tous les mois sur chacun des puits et forages de notre réseau durant l'année hydrologique 2013 - 2014. Pendant cette période deux campagnes de prélèvement ont été réalisées et les échantillons ont été confiés pour analyse des majeurs au laboratoire AINA situé à Ouagadougou.

Les données climatiques sont de bonne qualité à Ouagadougou. Nous disposons des données pluviométriques journalières de l'aéroport de Ouagadougou de 1953 à 2010. Elles ont été complétées pour la période 2011-2014 par celles mesurées à l'IRD situé à 1km au nord de l'aéroport. La base des données du système d'information SIEREM du laboratoire HSM de Montpellier (Boyer *et al.* 2006) nous a fourni les données suivantes : les températures journalières de 1940 à 1997, les températures mensuelles de janvier 1941 à juillet 2013, l'évapotranspiration potentielle journalière de 1961 à 1990 ainsi que l'humidité relative mensuelle de 1961 à 1978. Toutes ces données proviennent de l'aéroport de Ouagadougou.

Le piézomètre de l'Ex Comité Inter Africain d'Études Hydrauliques(CIEH) fournit la chronique piézométrique la plus longue mesurée en Afrique de l'Ouest, pour laquelle les mesures s'étendent de mars 1978 à août 2014. Ces données ont été complétées pour l'année hydrologique 2013-2014 par un ensemble de mesures piézométriques réalisées autour de l'université de Ouagadougou sur 29 puits et 3 forages. Ces puits sont répartis sur quatre sites dont deux en milieu urbain (Université de Ouagadougou et quartier Zogona), un troisième site regroupant les zones de maraichage, le quatrième se situant à l'intérieur de la zone naturelle du parc Bangr Weogo.

Pour une représentation précise des niveaux piézométriques, il était indispensable de disposer d'un modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude. Nous avons testé trois types de données pour construire ce MNT: les données topographiques de Google Earth, les données du satellite ASTER et les données provenant de la discrétisation des courbes de niveau de la carte IGN 1/100 000 la ville de Ouagadougou publiée en 1984. Après comparaison de toutes ces données, ni les données de Google Earth, ni celles d'Aster ne permettaient de construire un modèle numérique de terrain à résolution verticale submétrique sur notre site. En effet, les courbes d'élévation des données de Google Earth sont beaucoup trop lissées et celles du satellite ASTER présentent beaucoup trop de bruit. Le MNT utilisé a donc été construit à partir d'une discrétisation des courbes de niveau de la carte topographique au 1/100 000. Deux cartes piézométriques ont été élaborées à partir du MNT et des données piézométriques obtenues en saison sèche (Avril 2014), ainsi qu'en période de niveau maximum des eaux souterraines (Octobre 2014).

Pour la qualité des eaux à Ouagadougou, nous avons effectué des prélèvements sur deux sites représentatifs: le quartier de Zogona d'occupation traditionnelle et ancienne ainsi que les zones de maraichage. Deux campagnes d'analyses chimiques de l'eau des puits ont été

effectuées sur huit puits en fin de la saison sèche et en hivernage. Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des conditions standards compte tenu des difficultés du terrain et de l'inexpérience de l'opérateur. Les échantillons ont été apportés dans la journée au laboratoire d'analyse le plus réputé de Ouagadougou, en demandant à ce que les analyses soient effectuées dans les plus brefs délais. Cependant, des anomalies dans la distribution des cations ainsi que dans les balances ioniques nous ont incité à considérer ces analyses avec prudence et à nous limiter à une approche qualitative.

Les données chimiques de ces eaux ont été traitées par le logiciel Diagramme du LHA puis interprétées.

L'approche méthodologique utilisée dans cette étude consiste dans un premier temps à faire une étude bibliographique, à analyser les données climatiques et piézométriques par des diagrammes de corrélations et dans un deuxième temps à intégrer ces données dans un modèle numérique 1D semi conceptuel permettant de quantifier les flux intervenant dans le bilan en eau de l'aquifère. D'autres données, comme les conductivités hydrauliques, sont utilisées dans la simulation des réponses gravitationnelles et la subsidence lors d'un pompage dans les aquifères du socle.

Les modèles hydrologiques globaux pluie-niveau sont utilisés classiquement dans un bassin versant pour estimer la recharge naturelle d'un aquifère par les pluies. De nombreux modèles ont été publiés, par exemple les modèles distribués comme MHYDAS (Moussa *et al.* 2010), HYDROTEL (Fortin *et al.* 2004) pour les prévisions hydrologiques; les modèles globaux et semi-globaux comme KARINE (Thiéry 1988) pour les systèmes karstiques; les modèles produits par le BRGM (GARDENSOL, TEMPO). Ces deux derniers permettent la modélisation simultanée de l'évolution du stock en eau dans la zone non saturée et du niveau piézométrique en un point de la nappe, de prévoir l'évolution de la piézométrie et des débits des rivières en fonction des scénarii de pluviométrie, de déterminer et d'analyser les relations entre des séries temporelles de mesures, ainsi que d'étudier les corrélations entre la pluie efficace et le niveau de la nappe.

Le modèle GARDENIA du BRGM permet de simuler, à partir de 6 paramètres les niveaux piézométriques en fonction des précipitations, mais aussi, après calibration d'intégrer des scénarios prévisionnels de précipitations (Thiéry 2003, 2011).

C'est un modèle semi physique à trois réservoirs superposés représentant du haut en bas, le sol, une partie de la zone non saturée et l'aquifère. La calibration du modèle requiert les données suivantes:

- ✓ une chronique journalière de précipitations,
- ✓ une chronique journalière d'observations piézométriques,
- ✓ une estimation d'évapotranspiration potentielle.

Les principaux paramètres calibrés sont:

- ✓ le coefficient de ruissellement,
- ✓ les pertes d'eau de la nappe,
- ✓ la porosité de l'aquifère.

Les différents jeux de paramètres obtenus sont présentés et comparés avec l'environnement des différents piézomètres et les changements de cet environnement au cours des dernières décennies.

# **Chapitre 1 : Contexte environnemental de la zone d'étude**

## **1 Introduction**

Les caractéristiques naturelles d'une ville et de ses environs (géographie, topographie, climat géologie et hydrogéologie) sont des déterminants de la nature de ses problèmes environnementaux. L'alimentation en eau potable à Ouagadougou s'effectue surtout par des prélèvements d'eau de surface dans les retenues collinaires et les barrages mais un appoint en eau souterraine s'avère important. Environ 500 forages dans la nappe profonde contribuent à l'AEP et 1800 puits forés dans les altérites ont été inventoriés dans les concessions (Yaméogo 2008).

Ce chapitre se propose de faire une synthèse de la description environnementale des différents sites de la zone d'étude ainsi que l'ensemble des puits et des forages. Ces informations vont aider à analyser les résultats obtenus lors de la modélisation pluie-niveau piézométrique.

## **2 Cadre géographique**

Situé au centre de l'Afrique occidentale, le Burkina Faso couvre une superficie de 274 000 km<sup>2</sup> et Ouagadougou la capitale occupe une surface de 350 km<sup>2</sup>. Notre zone d'étude à Ouagadougou est située entre 1°29 à 1°31 de longitude ouest et 12°22 à 12°24 de latitude nord pour une superficie de 4,9 km<sup>2</sup> (Figure 1. 1).

Elle comprend :

- ✓ une zone d'urbanisation ancienne : le quartier de Zogona,
- ✓ une zone verte protégée : le Parc Bangr Weogo,
- ✓ une partie de l'Université de Ouagadougou
- ✓ la bordure sud du Barrage n°3 utilisée pour le maraichage.

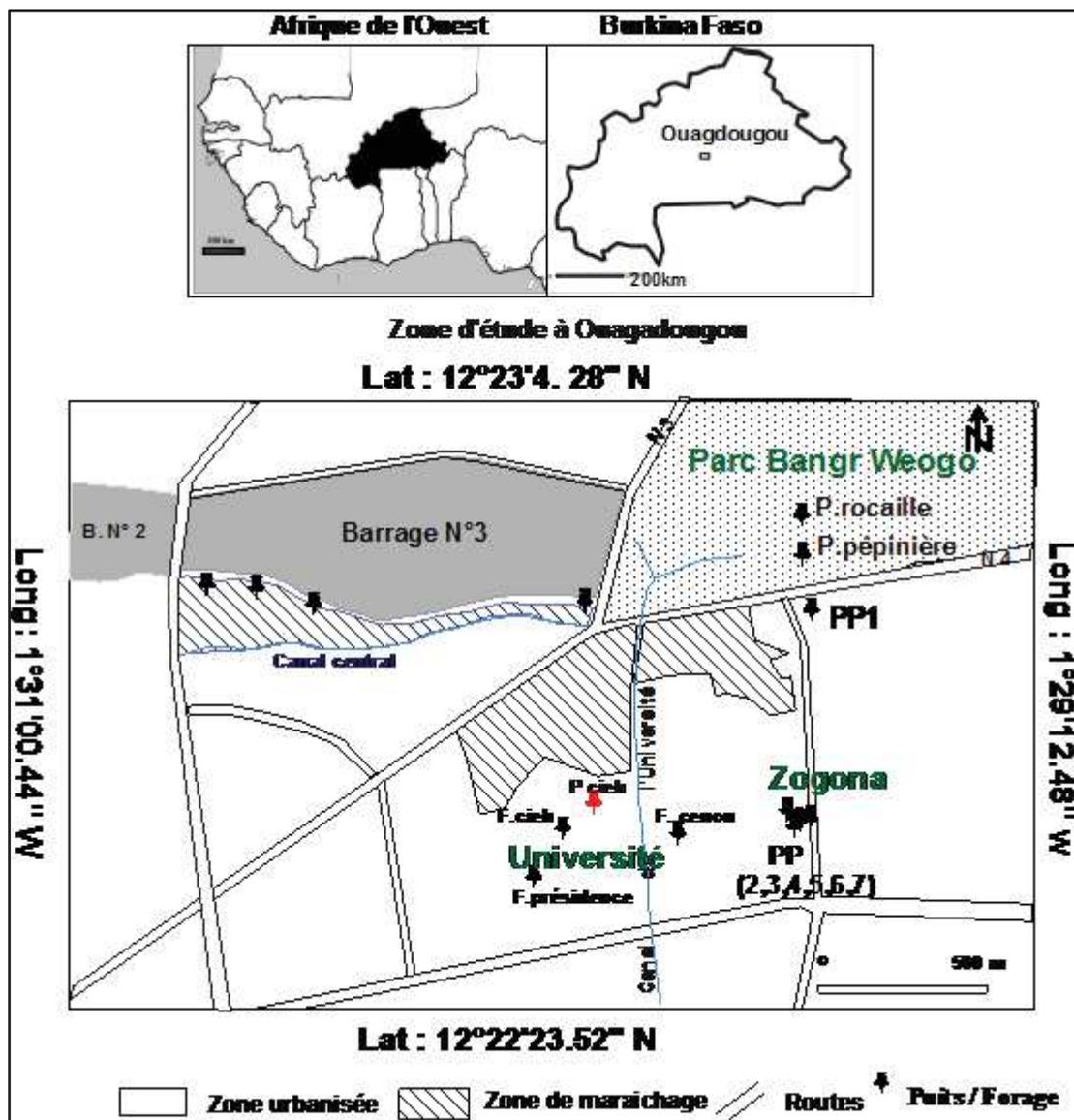
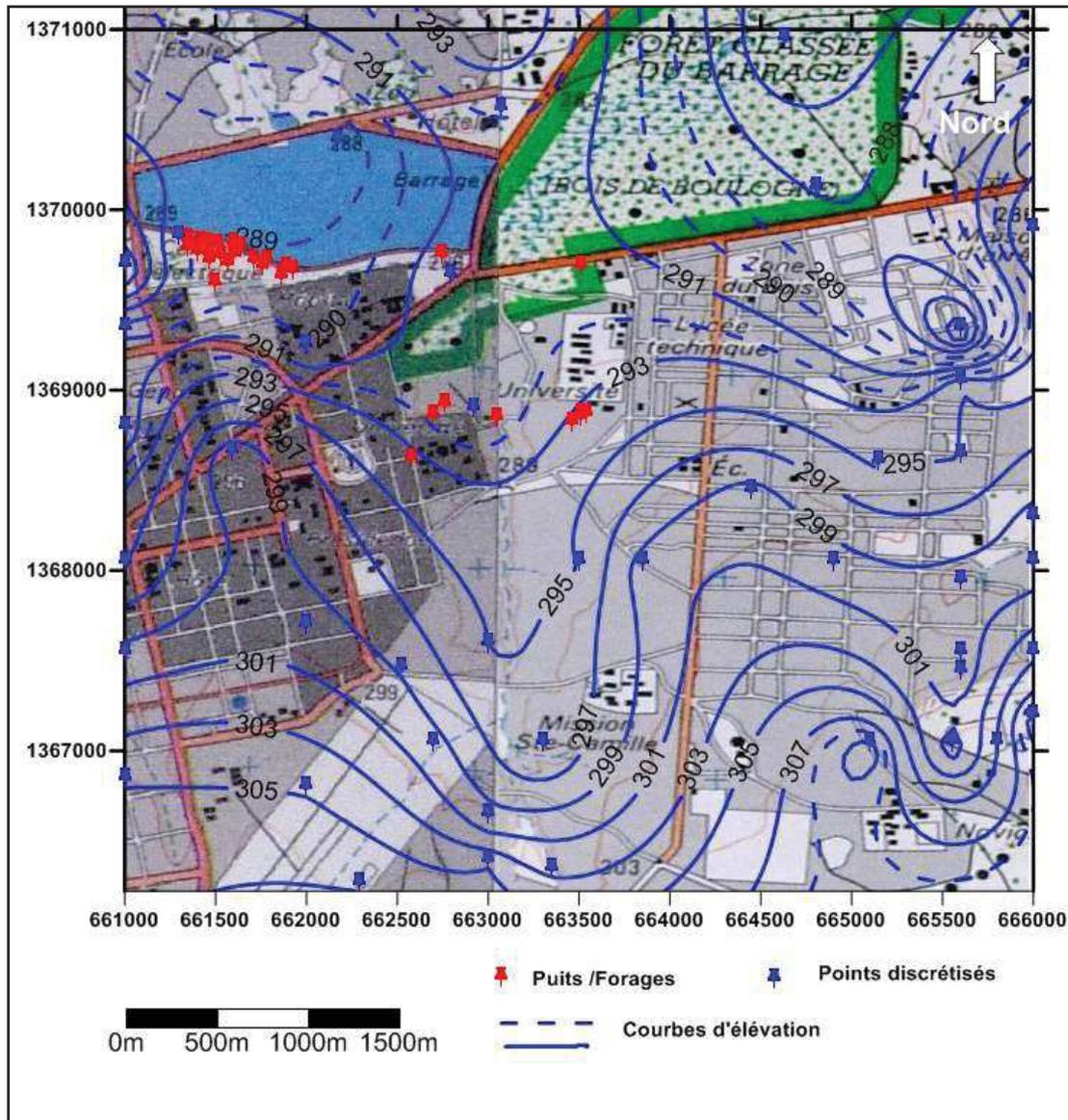


Figure1. 1 : Présentation de la zone d'étude

## 2. 1Relief et hydrographie

Deux grands types de paysages existent au Burkina. La plus grande partie du pays est couverte par une pénéplaine. Elle forme un relief très légèrement vallonné comprenant par endroits des collines isolées, ultimes vestiges d'un massif du précambrien. C'est un paysage assez monotone, avec un sol le plus souvent coloré en ocre par la latérite. La carte d'élévation de la zone d'étude issue des données discrétisées de la carte IGN 1/100 000 de Ouagadougou présente un relief aplani avec une altitude comprise entre 280 et 300 m (Figure 1. 2).



**Figure 1. 2** : Carte d'élévation de la zone d'étude à Ouagadougou construite par discrétisation des courbes de niveau de la carte 1/100 000 (IGN, 1984)

Ouagadougou est située dans le bassin versant du Massili, affluent du Nakambé. Elle est traversée par un ensemble de marigots et par une série de canaux. Les risques d'inondation sont importants pour les populations riveraines comme par exemple lors des fortes pluies enregistrées en septembre 2009.

### 3- Les barrages

La ville de Ouagadougou était alimentée en eau potable à partir des eaux superficielles stockées en saison des pluies derrière trois barrages situés à proximité immédiate de la ville. Ces trois barrages sont situés en cascade. Le barrage n° 1 est alimenté par un marigot, le barrage n° 2 reçoit le trop plein du barrage n° 1 et les eaux de son bassin versant. Quant au barrage n° 3, il n'a pas de bassin versant propre et est alimenté par les déversements du barrage n° 2 ainsi que par les précipitations directes sur le plan d'eau. Le barrage n°3 est situé en limite Nord de la zone d'étude et présente une surface moyenne de 0,845 Km<sup>2</sup> ainsi qu'une profondeur moyenne de 3,3 m. La hauteur maximale de la digue est de 4,90 m (Figure1. 3).



**Figure 1. 3** : Photo de l'échelle de mesure de la hauteur d'eau au barrage N° 3

Le barrage n°3 est ceinturé par des digues routières. Il recharge une nappe exploitée par les maraichers au moyen de nombreux puits traditionnels de très faible débit dont certains sont busés. Le barrage n°3 est longé au sud par le canal central convergeant avec le canal de l'Université à l'entrée du parc Bangr Weogo.

#### **4 Les canaux d'assainissement**

Deux canaux principaux traversent notre zone d'étude. Le canal central est de direction est-ouest tandis que le canal de l'université est de direction nord-sud.

#### 4.1 Le canal central

Encore appelé canal de Paspanga, ou de SONABEL (Figure 1. 4), il est en grande partie bétonné. Il commence à la station d'épuration, actuellement non fonctionnelle, située au rond-point des Nations Unies. A ce niveau convergent les eaux usées provenant de la zone du marché central et de l'Hôtel Indépendance et amenées par un réseau enterré.

A partir de la station, le canal central recueille principalement les eaux usées des quartiers populaires de Dapoya et de Paspanga drainées par un réseau de caniveaux. Son cours longe ensuite le barrage N°3 (écoulement W-E). Il reçoit les eaux usées de la SONABEL, puis celles de la station de traitement de l'ONEA (nettoyage des filtres). Le canal traverse encore une étroite bande de cultures maraichères et de pépinières. En aval, il reçoit les eaux usées de l'hôpital Wédraogo, puis, au-delà de la route de Kaya, il pénètre dans la Forêt du parc Bangr Weogo.



**Figure 1. 4 :** Photo du canal central de Ouagadougou. La pompe est utilisée pour l'arrosage des cultures.

#### 4.2 Le canal de l'Université

Ce canal bétonné en 2004 passe au milieu de l'université de Ouagadougou (Figure 1. 5). Il reçoit les apports des eaux de ruissellement ainsi que les eaux usées de certains quartiers par l'intermédiaire d'un réseau de canaux secondaires et de caniveaux. Son écoulement est très faible, voire nul en saison sèche et il déborde parfois en saison de pluies. Les eaux drainées par ce canal sont utilisées pour l'arrosage des zones de maraichage.



**Figure 1. 5** : Photo du canal de l'Université de Ouagadougou.

## **5 Le Parc Bangr Weogo et les zones de maraichage**

Situé à côté du barrage n°3 en face de l'hôtel Silmandé, le parc urbain de Bangr-weogo (Figure 1. 6) est une forêt classée d'une superficie de 240 ha; il présente une biodiversité exceptionnelle. Ce poumon vert de la ville de Ouagadougou est un lieu de promenade, de détente et de pratique pour l'enseignement des Sciences Naturelles. Cette forêt protégée a été délimitée et bornée à partir de 1932.



**Figure 1. 6** : le parc Bangr Weogoen pleine ville de Ouagadougou.

Les activités de maraichage se concentrent autour des points d'eau (figure 1. 7 et 1. 8), mais aussi, dans beaucoup de cas, autour de rejets d'eaux usées qu'on trouve dans des canaux. Dans certains sites les maraichers utilisent des pesticides pour améliorer leurs rendements.



**Figure 1. 7** : Photo d'une zone de maraichage à côté du puits FAO 15.



**Figure 1. 8** : Zone de maraichage du coté sud du barrage n°3(en jaune les points identifiés comme P FAO sont les puits aménagés par la FAO au profit des maraichers; PJ sont les puits traditionnels).

## 6 Le milieu urbain

Notre zone d'étude est urbanisée et comporte des grandes infrastructures telles que les routes nationales goudronnées N° 3 et 4, l'hôpital, l'Université de Ouagadougou, l'institut 2iE. On note que la majorité des routes secondaires ainsi que les cours des maisons et des établissements publics ne sont pas étanchéifiées.

### 6.1 Le quartier Zogona

Il est limité au nord par l'avenue Thoma Sankara et au sud par le boulevard Charles De Gaule. La route qui sépare l'université du quartier Zogona constitue une zone inondable (Figure 1. 9) Les concessions qui correspondent à des unités d'habitation ne disposent pas toutes de dispositifs adéquats d'évacuation des eaux usées et une décharge de ferraille est présente dans le quartier. Ainsi, les populations, du fait de l'absence de réseau d'assainissement rejettent leurs eaux usées dans des fosses septiques ainsi que directement sur la piste, ce qui impacte la qualité des eaux de surface et souterraines.



**Figure 1. 9** : Présentation du quartier Zogona (en jaune les points PP2 à PP7 représentent les puits des particuliers dans les concessions).

## **6.2 L'université de Ouagadougou**

L'urbanisation du campus a commencé au cours des années 1970. Pendant la même période une série de forages ainsi que le piézomètre du CIEH ont été implantés dans la zone. Le site contient actuellement des écoles supérieures à vocation régionale telles que l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) mis en place en 2006. La zone est traversée par le canal dit de l'université étanchéifié en 2004. Une végétation arborée longe les routes non goudronnées du campus et les cours des établissements (Figure1. 10).



**Figure 1. 10** : Présentation du campus de l’université de Ouagadougou.

## 7 Les sols

L’Atlas jeune Afrique 1993 classe les sols Africains en plusieurs familles A Ouagadougou, on trouve principalement des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériau sableux, sablo-argileux ou argileux-sableux. Ces sols ferrugineux tropicaux couvrent environ la moitié de la surface du pays. Ils se développent sur des matériaux riches en kaolinite, et se caractérisent par leur richesse en oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse qui leur donnent une couleur rouge ou ocre.

## 8 Environnement des puits et des forages

### 8.1 Les forages de l’université

Depuis la construction du bâtiment du CIEH (Comité Interafricain d’Etudes Hydrauliques) en 1975, actuellement devenu le laboratoire de l’hydrogéologie de l’université de Ouagadougou, un réseau de forage pour l’alimentation en eau potable ainsi qu’un piézomètre ont été mis en place. On note sur ce site (Figure 1. 13) (Tableau 1.1):

- ✓ le forage de CIEH situé à 100 m du piézomètre CIEH;

- ✓ le forage de la présidence : il est situé à l'entrée de l'université en bordure de la route et à 1m d'un canal d'assainissement. Il est couvert d'une végétation de grande taille dont les racines ont été retrouvées dans le forage lors de la mesure;
- ✓ le forage de CENOU. Il est situé entre le restaurant universitaire et la mosquée de l'université; un canal d'assainissement passe à proximité. Son niveau piézométrique moyen est situé à 3 m de profondeur seulement. Cette faible profondeur pourrait être due à une recharge ponctuelle provenant soit des eaux usées de la mosquée s'infiltrant à partir du canal voisin dont d'étanchéité n'est pas garantie (Figure1. 11. De plus, les trous d'infiltration des eaux du toit du restaurant sont situés seulement à 4 m du forage (Figure 1.12).



**Figure 1. 11 :** Eaux usées de la mosquée de l'université déversées dans un canal mal étanchéifié.

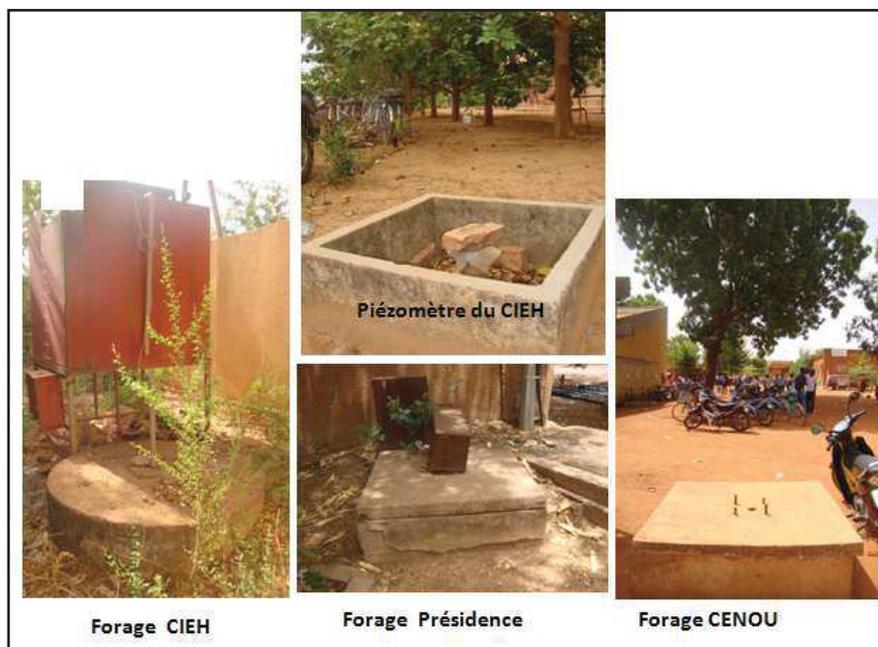


**Figure 1. 12:** Trou de recharge artificielle de la nappe à l'aplomb du toit du restaurant universitaire.

**Tableau 1. 1** Cordonnées et environnement des ouvrages piézométriques de l'Université de Ouagadougou

Ouvrages	Coordonnées	Niveau piézo 30/5/2013 à 6h	Utilisation	Géologie	Environnement (Site: Université de Ouagadougou)
<b>Piézomètre CIEH</b>	N 12° 22' 41,9'' W 001° 30' 10,5''	4,42	piézo	altérites	Situé entre les locaux de l'université et l'institut 2ie à 150 m du canal, sous une végétation
<b>Forage CIEH</b>	N 12° 22' 41,0'' W 001° 30' 12,6''	5,40	Abandonné (piézo)	granites	Situé entre les locaux de l'université et l'institut 2ie à 100 m du piézomètre du CIEH.
<b>Forage Présidence</b>	N 12° 22' 33,3'' W 001° 30' 16,4''	5,79	Abandonné (piézo)	granites	Situé à l'entrée de l'université au bord de la route
<b>Forage CENOU</b>	N 12° 22' 40,3'' W 001° 30' 0,9''	3,05	Abandonné (piézo)	granites	A 5m du restaurant universitaire et 10 m de la mosquée de l'université au milieu d'une route non goudronnée.

Après l'arrivée de l'eau de l'ONEA tous ces forages sont abandonnés et sont utilisés comme piézomètres depuis 2013. Malgré les efforts fournis, il n'a pas été possible de retrouver les caractéristiques de ces forages.



**Figure 1. 13:** Etat actuel des ouvrages piézométrique de l'université.

## **8.2 Le piézomètre du CIEH**

Ce piézomètre représente le point de référence de notre étude. Il est foré dans les altérites à une profondeur de 20 m. Cet ouvrage se situe à l'Université de Ouagadougou non loin du laboratoire d'hydrogéologie (ancien bâtiment de CIEH). Il est situé aujourd'hui entre le bâtiment des Sciences Humaines (SH) mis en place en 1999, le laboratoire de Géochimie et les locaux de l'institut 2IE (Figure 1. 14). Les informations concernant ce forage semblent perdues.

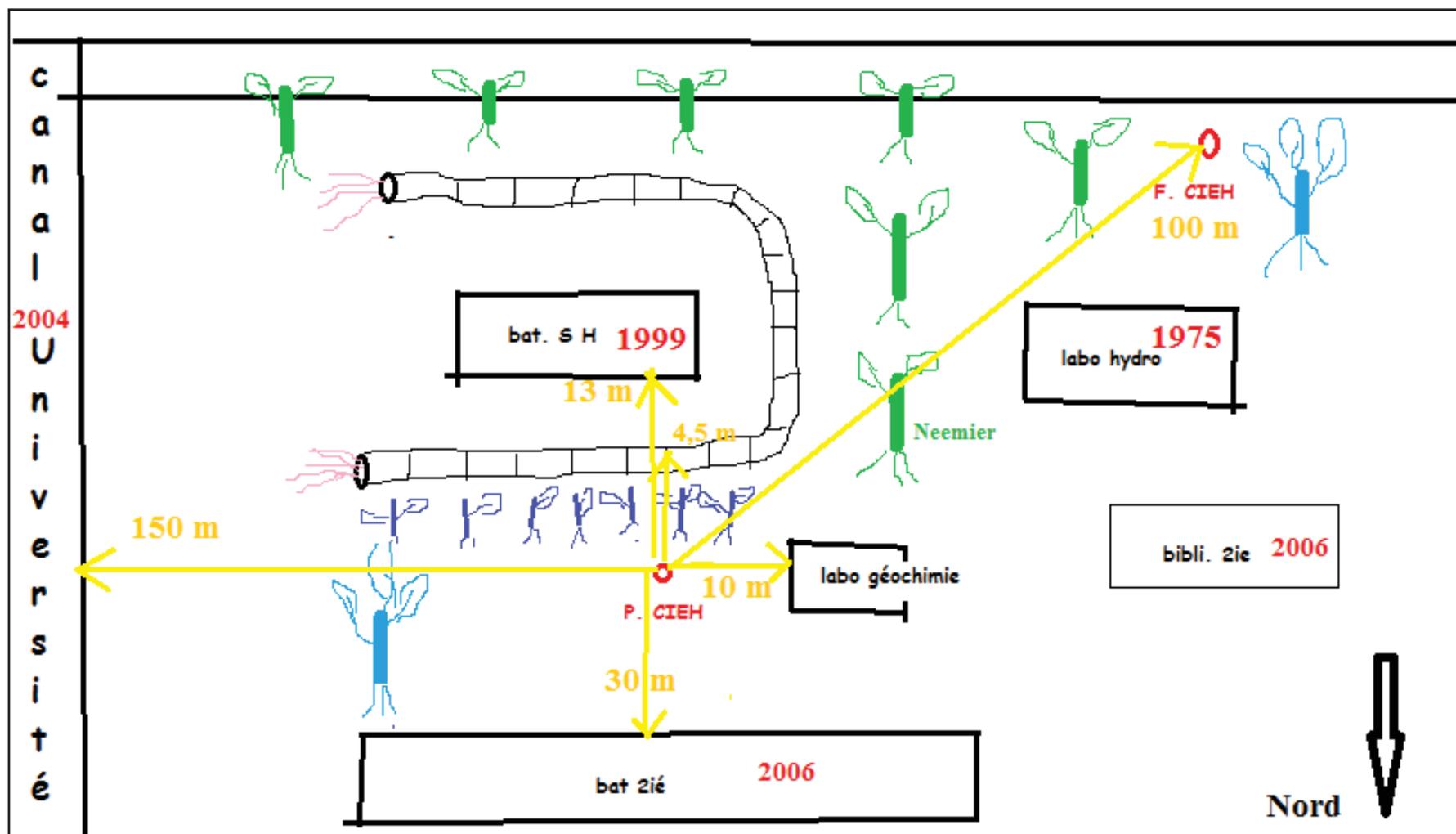


Figure 1. 14 Situation environnementale autour du piézomètre du CIEH.



**Figure 1. 15** Photo de l'environnement du piézomètre du CIEH.

A 5 m du piézomètre du CIEH, un canal d'assainissement évacue les eaux de ruissellement et les eaux usées des toilettes du bâtiment SH. Il les déverse dans la nature un peu en amont du canal de l'université (Figure 1. 16).



**Figure 1. 16** Embouchure d'un petit canal d'assainissement à 20 m du canal de l'université.

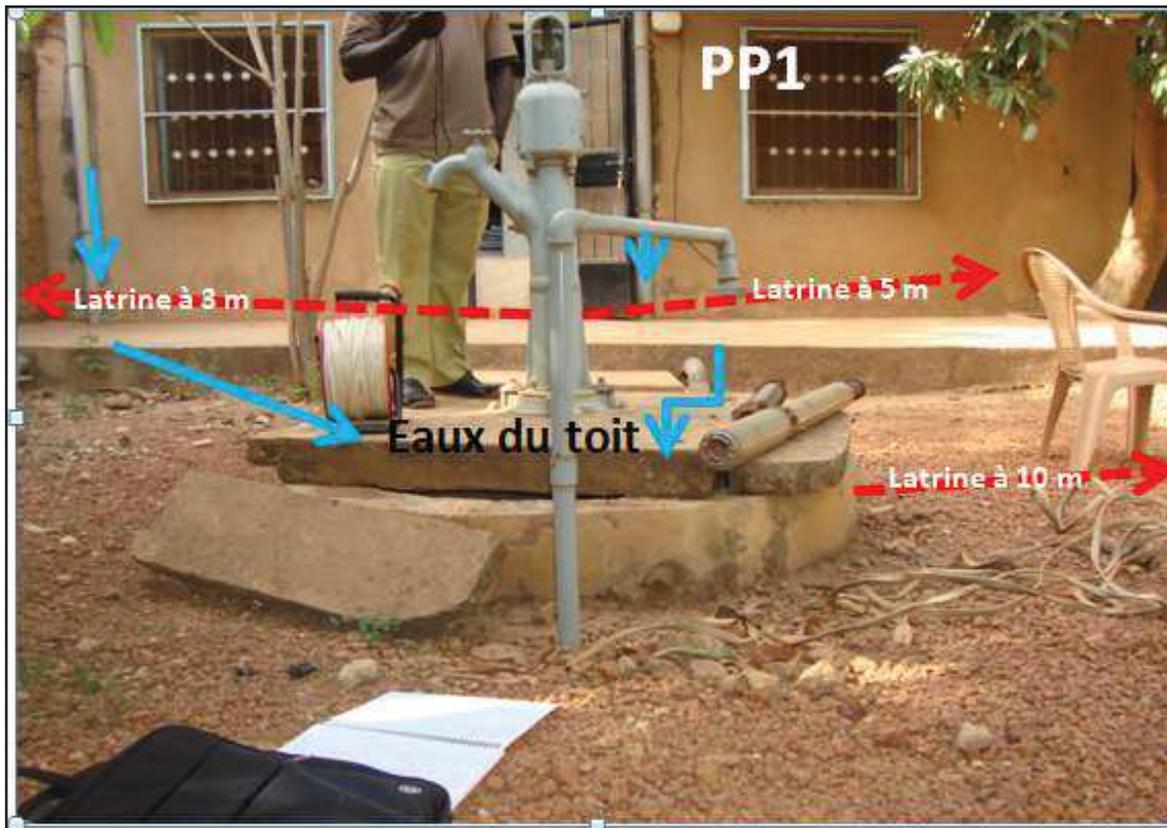
### **8.3 Les puits de Zogona**

Zogona est un des quartiers anciens de Ouagadougou, proche de l'université; il abrite des puits privés dont certains sont cachés par les propriétaires. Suite à des enquêtes sur le terrain nous avons recensé sept puits qui ont fait l'objet d'un suivi piézométriques et d'un suivi chimique des eaux (Tableau 1. 2).

**Tableau 1. 2** Cordonnées et environnement des ouvrages piézométriques des concessions de Zogona

Ouvrages	Coordonnées	Niveau piézo 30 /5/2013 à 6h	Utilisation	Géologie	Environnement (Site : Quartier Zogona)
Puits Particulier 1	N 12° 23' 07,6'' W 001° 29' 45,6''	4,14	Abandonné	altérites	Puits moderne Situé dans la cours d'une villa à proximité de trois latrines à 3 m 5m et 10m. il est alimenté par les eaux du toit de la maison .
Puits Particulier 2	N 12° 22' 39,5'' W 001° 29' 47,1''	5,52	Lessive douche	altérites	Puits à ciel ouvert dans la concession à 7 m de la latrine
Puits Particulier 3	N 12° 22' 40,5'' W 001° 29,01' 45,7''	4,48	AEP	altérites	Puits bien protégé dans une concession bien aménagée avec une margelle de 20 cm, latrine à 8m
Puits Particulier 4	N 12° 22' 41,1'' W 001° 29' 45,7''	7,27	AEP	altérites	Puits non bien protégé dans une concession d'une famille moins aisée, latrine à 15 m
Puits Particulier 5	N 12° 22' 41,1'' W 001° 29' 44,5''	3,17	abandonné	altérites	Puits non protégé reçoit les ordures de genre sachet emportés pas le vent latrine à 7 m
Puits Particulier 6	N 12° 22' 41,3'' W 001° 29' 43,4''	2,50	Lessive Douche	altérites	Puits non bien protégé dans une concession d'une famille moins aisée, latrine à 15m
Puits Particulier 7	N 12° 22' 42,1'' W 001° 29' 46,6''	5,02	AEP	altérites	Puits protégé mais sans margelle, latrine à 10 m

Tous ces puits sont situés dans des concessions privées. Le puits particulier PP1 (Figure 1. 17) est muni d'une pompe. Il est situé à l'intérieur d'une villa bien clôturée et est alimenté par des tuyaux qui recueillent les eaux des pluies provenant du toit de la maison. Lors des grandes averses la cour de cette maison est inondée et l'eau peut déborder au-dessus de margelle du puits. Trois latrines sont situées au voisinage de ce puits. La première à 3m située chez le voisin, les deux autres situés dans la cour à 5 et 10m.



**Figure 1. 17 :** Environnement du puits particulier PP1.

Les puits particuliers de Zogona (Figure 1. 18) sont à usage domestique sauf PP1 et PP5 qui sont abandonnés. Tous les puits visités sont situés au voisinage d'au moins une latrine.



Figure 1. 18 : Etat actuel des puits particuliers dans les concessions de Zogona.

#### **8.4 Les puits de la zone de maraichage**

Le site se situe tout près du barrage n°3 de Ouagadougou. Une vingtaine de puits (Tableau 1. 3) est répertoriée et est utilisée pour l'arrosage des cultures maraichères.. Les puits aménagés par la FAO sont d'une profondeur moyenne de 8 m et sont busés avec une margelle d'environ 60 cm. Les autres sont aménagés de manière tout à fait artisanale (Fig. 1.19). Cette zone est inondée dès le mois de juin et reste inondée pendant les mois de juillet et août. Les puits artisanaux sont alors rechargés par l'eau d'inondation l'ensemble de la zone est inaccessible pour les mesures. Le 27 mai 2013, une lame d'eau de 60 mm est tombée (voir Fig. 1.20), et ce site est resté inaccessible pendant tout l'hivernage. Nous avons remarqué qu'en général la profondeur de l'eau dans les puits et d'autant plus faible que l'on s'approche du lac de barrage.

**Tableau 1. 3** Cordonnées et environnement des puits de la zone de maraichage tout prêt du barrage n°3

Ouvrages	Coordonnées	Niveau piézo 30 /5/2013 à 6h	Utilisation	Géologie	Environnement (Site : zone de maraichage )
P J1	N 12° 23' 07,1'' W 001° 30' 37,9''	2,84	Arrosage des plantes	altérites	Puits traditionnel situé à 10 m du barrage n°3
PJ2	N 12° 23' 06,0'' W 001° 30' 40,2''	1,52	Arrosage des plantes	altérites	Puits traditionnel non loin du barrage n°3 aménagé par des pneus de voiture, situé à 15 m d'une concession
PJ3	N 12° 23' 05,9'' W 001° 30' 41,4''	1,76	Arrosage des plantes	altérites	Puits traditionnel situé à 5 m du puits PJ2
P1 FAO	N 12° 23' 07,8'' W 001° 30' 39,3''	0,36	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P2 FAO	N 12° 23' 07,9'' W 001° 30' 43,5''	0,28	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P3 FAO	N 12° 23' 09,1'' W 001° 30' 42,7''	0,3	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P4 FAO	N 12° 23' 09,0'' W 001° 30' 45,1''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P5 FAO	N 12° 23' 11,5'' W 001° 30' 47,5''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P6 FAO	N 12° 23' 10,1'' W 001° 30' 48,7''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P7 FAO	N 12° 23' 08,5'' W 001° 30' 49,7''	1,51	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m

P8 FAO	N 12° 23' 09,8'' W 001° 30' 51,01''	0,87	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P9 FAO	N 12° 23' 05,1'' W 001° 30' 52,3''	4,01	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P10 FAO	N 12° 23' 09,1'' W 001° 30' 53,3''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P11 FAO	N 12° 23' 10,5'' W 001° 30' 53,3''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P12 FAO	N 12° 23' 10,8'' W 001° 30' 55,2''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P13 FAO	N 12° 23' 11,4'' W 001° 30' 57,1''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P14 FAO	N 12° 23' 13,1'' W 001° 30' 57,1''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P15 FAO	N 12° 23' 12,4'' W 001° 30' 54,7''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P16 FAO	N 12° 23' 12,1'' W 001° 30' 53,4''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P17 FAO	N 12° 23' 12,0'' W 001° 30' 51,6''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m
P18 FAO	N 12° 23' 12,2'' W 001° 30' 48,7''	0	Arrosage des plantes	altérites	Puits aménagé par la FAO , avec une margelle de 60 cm et d'une profondeur de 8 m



**Figure 1. 19** Les différents aménagements des puits rencontrés dans la zone de maraichage.



**Figure 1. 20** Inondation des puits de la zone de maraichage tout prêt du barrage n°3.

## 9 Conclusion

Ouagadougou est une ville relativement plate. Les paramètres physiques de cette ville permettent de distinguer des zones fragiles, à protéger telles que le parc Bangr Weogo et le barrage n°3. D'une manière générale les problèmes environnementaux à Ouagadougou sont anthropiques. Le manque de réseau d'assainissement dans certains quartiers implique l'utilisation des fosses septiques dans les concessions, ce qui peut engendrer des pollutions plus ou moins étendues en saison des pluies, si les fosses ne sont pas étanches.

## **Chapitre 2: Géologie et hydrogéologie de Ouagadougou**

# 1 Cadre géologique

## 1.1 Aperçu général

Le Burkina est situé essentiellement sur le bouclier Ouest-africain désigné sous le nom de bloc Baoulé-Mossi ou dorsale de Léo (Ducellier 1963; Bessoles 1977; Savadogo 1984; Yameogo 2008). Ce bouclier est constitué de roches granitiques ou sédimentaires métamorphisées datant du Précambrien moyen et inférieur. Une couverture sédimentaire repose sur le socle au Nord et au Sud-Ouest du pays, où elle est représentée par des grès et des schistes primaires et infra cambriens, ou par des grès, des sables et des argiles tertiaires (Kone. 1989). Cette couverture sédimentaire forme des reliefs accidentés au Sud-Ouest du pays (figure 2. 1).

Les cuirasses latéritiques sont présentes presque partout, en général en association avec des terrains d'âge précambrien (Etrillard 1994).

Trois groupes de formations géologiques sont reconnues au sein du socle cristallin au Burkina Faso :

- ✓ les noyaux granito-migmatitiques,
- ✓ les formations volcano-sédimentaires épi-métamorphiques des sillons,
- ✓ les roches plutoniques.

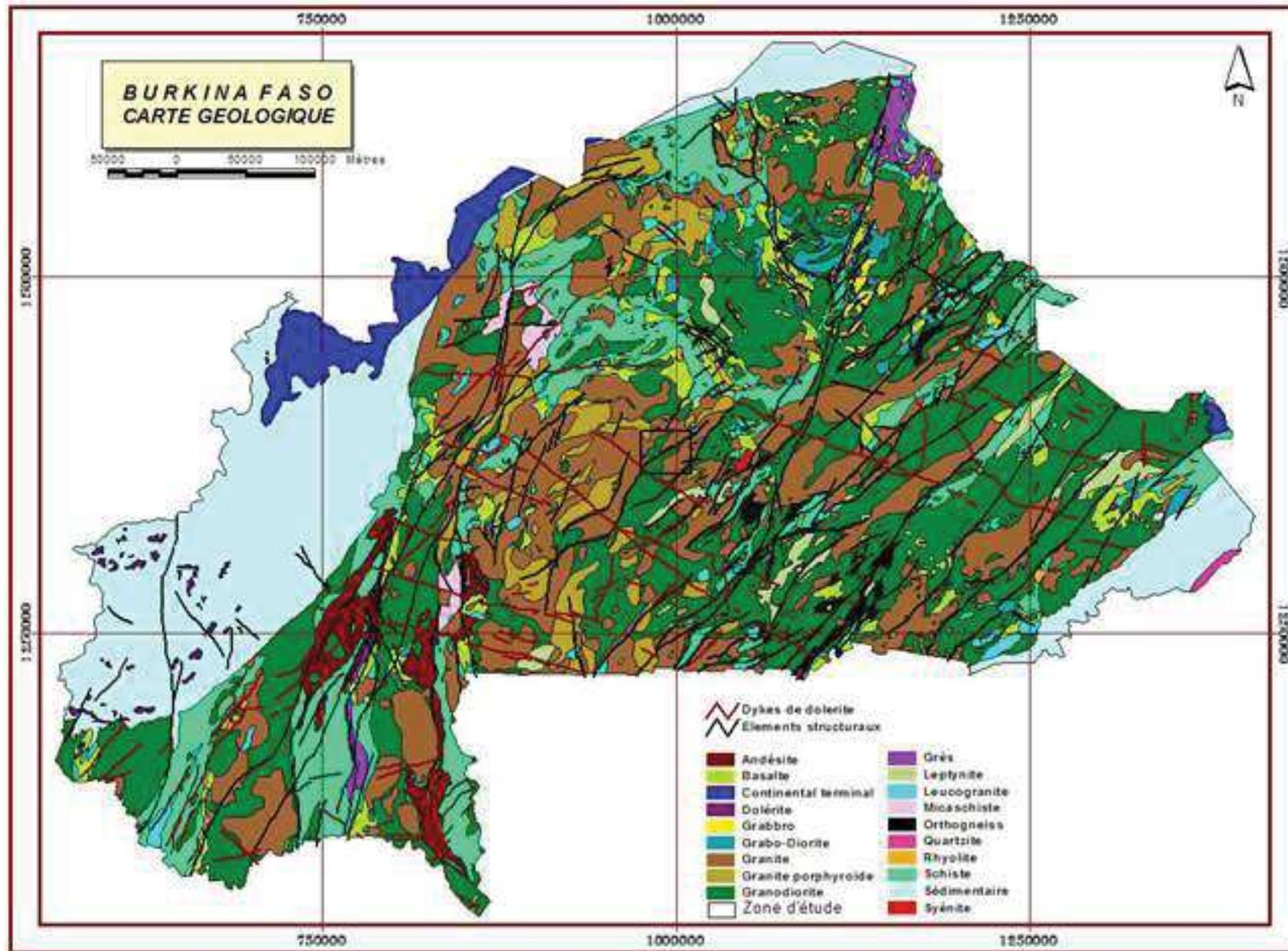
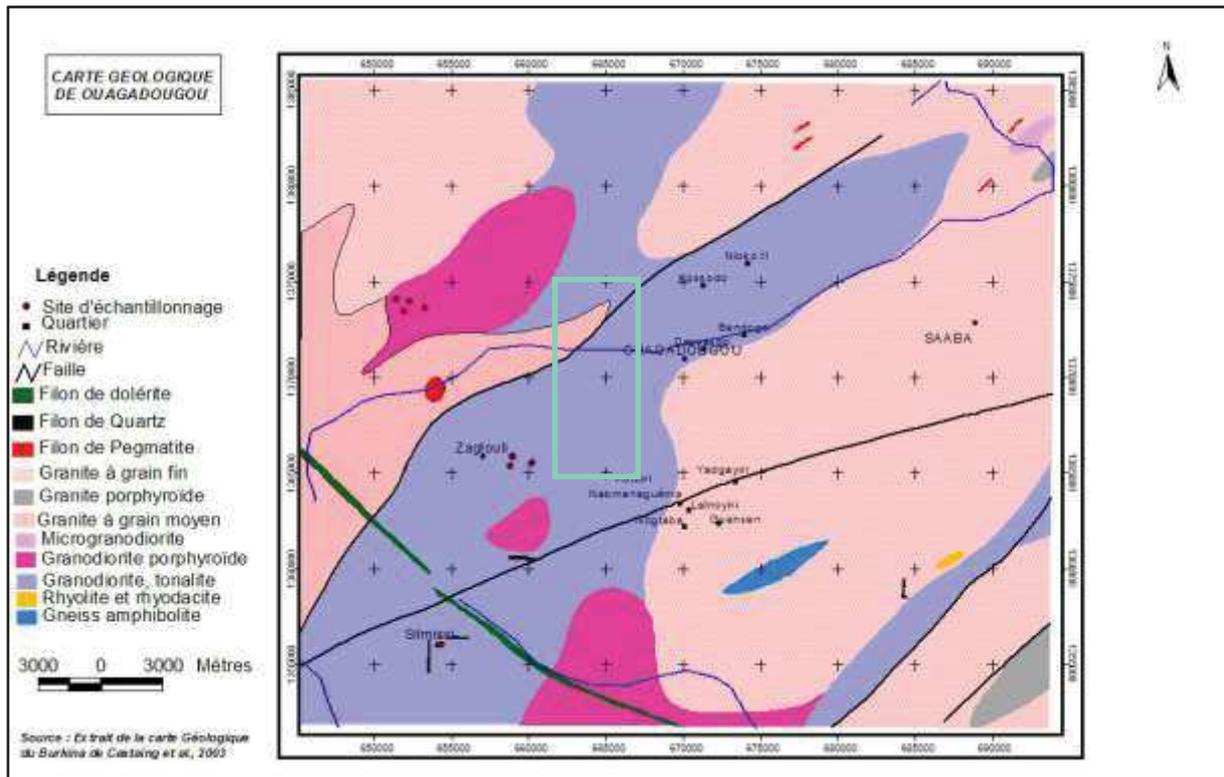


Figure 2. 1 : Carte géologique du Burkina Faso (source Casting 2003).

La carte géologique du Burkina Faso ci-dessus (Fig. 2.1) montre que Ouagadougou repose sur une formation géologique constituée de socle cristallin paléo-protérozoïque. On y trouve essentiellement des granodiorites, des tonalites des diorites quartzifères foliées, des filons de pegmatite et d'aprites à feldspath potassique et plagioclase (figure 2. 1). La carte géologique de Ouagadougou (Figure 2. 2) montre que notre zone d'étude, encadrée en bleu, est en grande partie constituée de granodiorites et tonalites.



**Figure 2. 2 :** Carte géologique de Ouagadougou (source Yameogo 2008)

## 1.2 Le socle cristallin du Burkina

Les aquifères de socle se développent au sein de roches cristallines d'origine plutonique (granite), métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes, etc.) ou volcaniques. Elles présentent ainsi, malgré des origines et des compositions très diverses, un comportement d'ensemble relativement homogène et des propriétés similaires. Elles se caractérisent principalement par une perméabilité de fissures et de fractures et sont surmontées par un manteau d'altération. Les aquifères qu'elles renferment sont donc classiquement considérés comme des aquifères de socle (hard rock aquifers). Ces roches constituent le soubassement de

l'ensemble des continents. Elles affleurent sur une grande partie des continents africain, nord et sud-américain, eurasiens, et constituent les deux tiers de l'Inde et l'Australie (Lachassagne *et al.* 2005).

Compaoré (1997) confirme qu'en grande partie du sous-sol de l'Afrique de l'Ouest est constitué de formation de socle cristallin. Au Burkina Faso il constitue environ 80% du territoire national. D'après Yameogo (2008), la ville de Ouagadougou repose sur ce que l'on appelle le môle d'Ouagadougou qui affleure en pointements de petites dimensions au sud-est au nord-ouest et à l'Ouest de la ville. Kone (1989) montre que ce socle s'est structuré au cours des deux cycles orogéniques :

- ✓ l'orogénèse libérienne qui s'est déroulée entre 2700 et 2300 million d'années;
- ✓ le cycle éburnéen, de 2300 à 1500 million d'années, qui débute par un stade de fracturation du bâti libérien.

### **1.3 Altération des formations cristallines**

Les roches cristallines et cristallophylliennes de l'Afrique de l'Ouest sont surmontées par des formations d'altérites qui résultent de l'altération physico-chimique des roches sous l'action de l'eau. Cette transformation des roches cristallines résulte des réactions chimiques accompagnant l'infiltration de l'eau de pluie. Les observations effectuées dans des carrières par Yameogo (2008) à l'Ouest et au Nord-ouest de la ville de Ouagadougou, montrent des ensembles de multiples fractures subhorizontales et verticales qui peuvent constituer des zones d'infiltration et d'altération préférentielle de la roche.

Les études menées sur le socle cristallin en Afrique de l'Ouest et en particulier au Burkina Faso ont montré que l'hydrogéologie du socle cristallin était contrôlée par les failles qui favorisent la fracturation et l'altération des roches (Engalenc *et al.* 1975, Savadogo 1984). Les altérites, produits de cette altération, couvrent les formations du Précambrien et présentent une épaisseur dépendant de la faciès géologique, de la pluviométrie et de la température ainsi que des formes de paysage passées.

A Ouagadougou, le substratum est constitué de granodiorites de tonalites et de diorites, enfouis sous une épaisse couverture d'altération. Cette dernière comprend une cuirasse latéritique alumino-ferrugineuse surmontant des altérites argileuses et des arènes grenues avec

des épaisseurs partout décimétriques. (Yameogo. 2008). Courtois *et al* (2010) a mis en relation à l'échelle du Burkina Faso la géométrie du manteau d'altération avec les propriétés des aquifères qu'il contient.

#### **1.4 Les formations sédimentaires**

Elles présentent environ 20% du territoire burkinabé et forment une couverture du socle cristallin. Elles sont situées sur les frontières Ouest, Nord-ouest et au Sud-Ouest.

### **2 Cadre hydrogéologique**

L'Afrique, comme une grande partie de l'Amérique du Sud, l'Australie et l'Inde, s'appuie largement sur les ressources en eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable de sa population. Dans beaucoup de pays africains (Burkina Faso, Mali, Ghana, Madagascar) une grande partie de ces ressources se trouve dans des aquifères de socle. Ces aquifères se situent au sein de la zone altérée et fissurée de la roche cristalline (Dewandel *et al.* 2006). Ces aquifères ont en général une épaisseur de moins de 100m et présentent une faible productivité. La transmissivité de ces aquifères de socle provient en grande partie de fissures générées par l'altération (Taylor et Howard, 2000; Lachassagne *et al.* 2011).

La ville de Ouagadougou se situe sur des granitoïdes protérozoïques (granites, granodiorites, tonalites) (Castaing *et al.* 2003) et donc les ressources en eau souterraines se trouvent dans des aquifères de socle dont la structure est maintenant bien connue (Maréchal *et al.* 2003, Wyns *et al.* 2004, Dewandel *et al.* 2006, Lachassagne *et al.* 2009, Dewandel *et al.* 2011, Foster 2012). Ces aquifères sont inclus dans le profil d'altération qui comprend du haut vers le bas:

**de la latérite ou saprolite fine:** elle se forme dans les régions tropicales humides et résulte d'un processus d'altération avancé. Cette formation rouge, ocre ou brune est constituée d'un assemblage d'oxydes de fer et d'aluminium qui représentent la partie insoluble du matériau initial ainsi que de kaolinite et de quartz. Cette couche d'épaisseur métrique est souvent partiellement ou totalement érodée (Lachassagne *et al.* 2005);

**de la saprolite ou altérite:** Il s'agit d'un matériau riche en argile dont l'épaisseur moyenne varie entre 10 et 30 m. La saprolite est caractérisée par une faible perméabilité de l'ordre de  $10^{-6}$  m/s, ce qui rend peu exploitables les ressources en eau qu'elle contient. Sa porosité totale peut avoisiner les 30% (Lawane *et al.* 2011), cependant seule une partie de celle-ci est sollicitée au cours des variations annuelles de niveau ou bien par des opérations de pompage. Pour les altérites de granitoïdes cette porosité efficace ou coefficient d'emménagement varie de 1% à 15% selon Lachassagne *et al.* (2005), de 5% à 30% suivant Dewandel *et al.* (2006) et de 1% à 10% suivant Wyns *et al.* (2004). Au voisinage de notre région d'étude, Filippi *et al.* (2009) proposent des valeurs comprises entre 1% et 5% dans la région centre du Burkina Faso, Campaoré *et al.* (1997) déduisent des valeurs de 0.5% à 5% d'expériences de pompage de courte durée sur le site de Sanon, (50 km à l'Ouest de Ouagadougou), tandis que IWACO (1986) et Yameogo (2008) avancent des valeurs autour de 5% à Ouagadougou même;

**une couche de transition d'arènes grenues épaisse** de quelques mètres et présentant une bonne perméabilité est parfois présente à la base du profil d'altération (Dewandel *et al.* 2006). Cependant, à Ouagadougou ces arènes sont presque partout minces et argileuses (CIEH 1964);

**en base de profil, le socle (granite)** présente sur une épaisseur de 40 à 60 m (Courtois *et al.* 2010) une fissuration subhorizontale d'intensité décroissant avec la profondeur (Wyns 1998, Maréchal *et al.* 2003, Wyns *et al.* 2004, Dewandel *et al.* 2006). Les fractures présentent une perméabilité voisine de  $10^{-4}$  m/s et leur extension est comprise entre 5 et 40 m environ (Lachassagne *et al.* 2005). La caractérisation des propriétés hydrodynamiques de l'horizon fissuré a fait l'objet d'une étude détaillée (Maréchal *et al.* 2004). Au sein des granites, parmi des nombreuses fractures subhorizontales, seules quelques-unes présentent une perméabilité atteignant  $10^{-5}$  m/s. D'autres fractures de moindre perméabilité sont à l'origine d'une perméabilité de blocs voisine de  $5 \times 10^{-8}$  m/s, elle-même plus forte que la perméabilité de matrice de l'ordre de  $10^{-14}$  à  $10^{-9}$  m/s. Les blocs assurent 90% de l'emménagement total de l'horizon fissuré de l'aquifère et les fractures contribuent pour 10%.

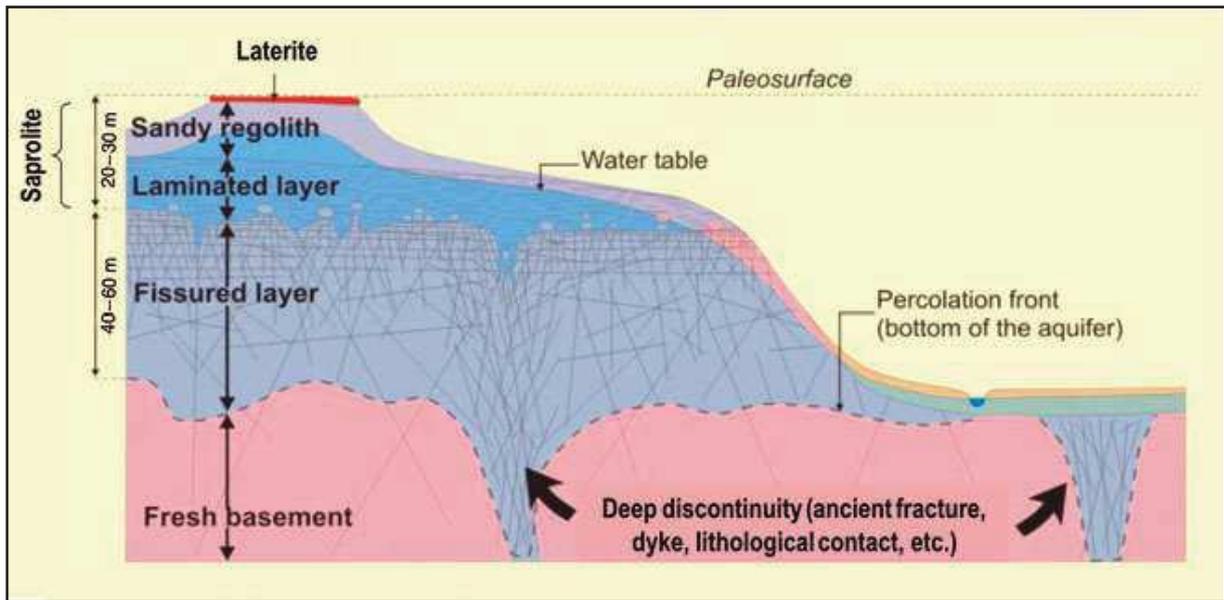


Figure 2. 3 : Profil d'altération typique des roches de socle (Wyns 1998).

## 2.1 Les réservoirs d'eau souterraine au Burkina Faso

Les études hydrogéologiques ont montré que les eaux souterraines du Burkina Faso constituaient des réservoirs superficiels et profonds contenus dans les altérites et au sein du niveau fissuré (Koussoubé 1996). Ces réservoirs sont en continuité ainsi que le montrent les données hydrochimiques (Faillat 1986, Faillat *et al.* 1993). Ces deux réservoirs se distinguent par leurs caractéristiques hydrogéologiques. Les altérites constituent le réservoir dit capacitif, à cause de leur porosité et de leur faible perméabilité tandis que la zone fissurée constitue le réservoir dit conducteur assurant la circulation de l'eau. Le substratum sain constitue la base imperméable de l'aquifère (Toé, 2004, Savadogo 1984; Yameogo . 2008).

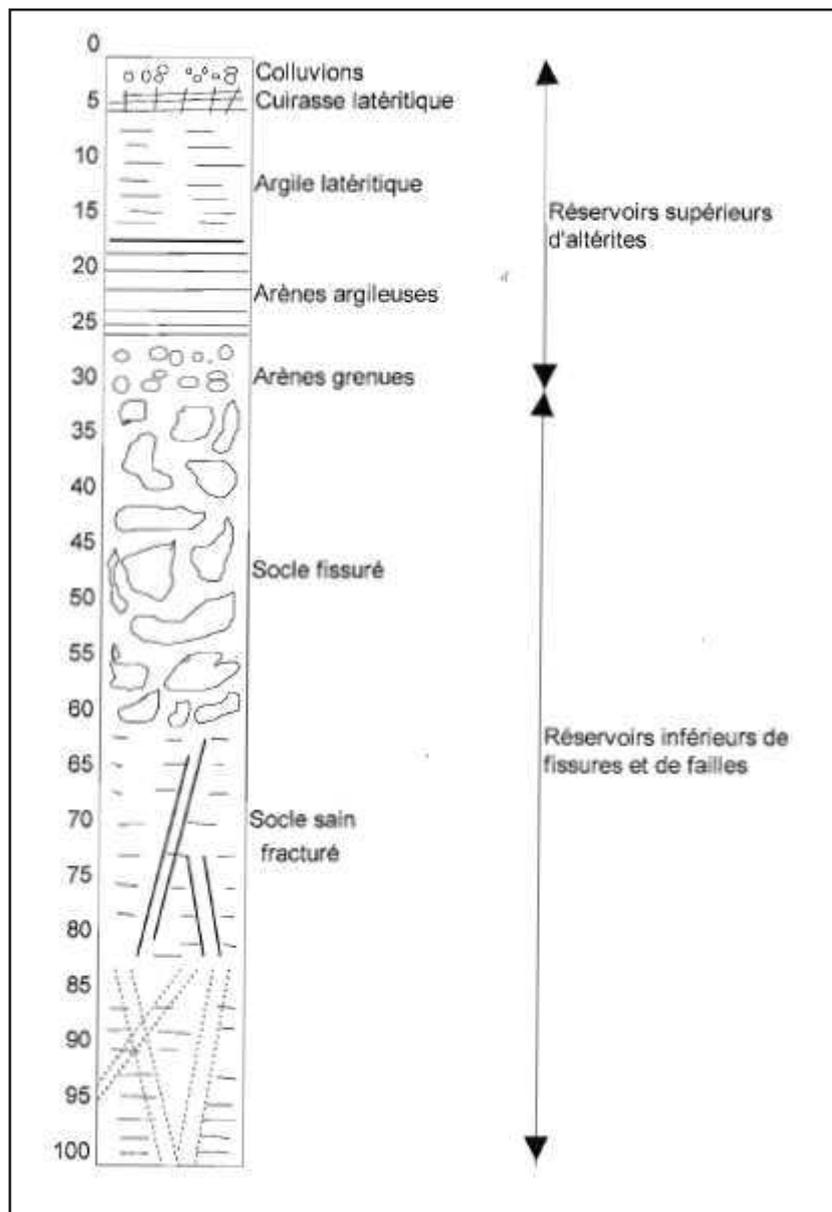
L'exploitation des ressources en eau souterraine débute à partir des années 50 en Afrique de l'Ouest francophone. A cette époque, l'essentiel des équipements hydrauliques (puits, forages) sont mis en place dans les altérites au sein des zones cristallines (Koita 2010). Eu égard à la porosité des altérites noyées, les réserves potentielles sont importantes. Par contre la faible perméabilité des aquifères n'autorise que des prélèvements à des débits unitaires faibles (Nakolendousse *et al.* 2003). Ces réservoirs d'altérites ne peuvent être exploités que par des puits traditionnels ou modernes à grand diamètre (supérieur à 1m), à faible profondeur (3 m à 15 m) (figure 2.4) et avec des débits inférieurs à 500 l/h (Compaoré 1997).

## 2.2 Le réservoir des altérites de Ouagadougou

Au Burkina Faso, du fait des conditions climatiques, les roches dures fracturées sont recouvertes d'une couche d'altérites. L'épaisseur de ces formations de surface varie avec la latitude et la nature du substratum (Compaoré *et al.* 1997).

De nombreuses références bibliographiques (cf Faillat *et al.* 1993) ont montré que la partie superficielle des régions granitiques (moins de 100 m de profondeur) comprenait des réservoirs aquifères dans les altérites et dans la roche saine fissurée sous-jacente. Le concept d'un système bicouche a été illustré par Yameogo (2008) sur l'exemple de la ville Ouagadougou. Il est constitué d'un recouvrement semi-perméable, le réservoir des altérites caractérisé par une bonne fonction capacitive et alimenté par la surface surmontant un aquifère de fissures ou de fractures.

La figure 2.4 ci-dessous illustre la succession de ces réservoirs : l'épaisseur des cuirasses et des alluvions varie entre 3 et 10 m, celle des saprolites de 10 à 35 m parfois 40 m, celle du socle fissuré ou fracturé entre 35 à 60 m en fonction de la lithologie de la roche mère. A Ouagadougou le profil montre trois niveaux plus ou moins aquifères mais généralement les deux derniers prédominent.



**Figure 2. 4 :** Schéma hydrogéologique type de l'ensemble altérites/socle au Burkina Faso (Source : Compaoré 1997).

### 3 Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères du socle granitique au Burkina Faso

On distingue, dans les milieux du socle, deux types de formations superposées, dont les caractéristiques physiques et hydrogéologiques sont différentes. Il s'agit des réservoirs supérieurs d'altérites et ceux des fissures et des failles sous-jacentes.

### 3.1 Caractéristiques hydrodynamiques des altérites

Les caractéristiques de ces aquifères, perméabilité  $K$ , transmissivité  $T$ , coefficient d'emmagasinement  $S$ , ont été déterminés par plusieurs méthodes et par différents auteurs. La grande majorité des auteurs ayant travaillé sur les altérites ont montré que ces réservoirs présentaient une porosité d'interstice ou inter granulaire. Ils sont caractérisés par une forte porosité qui leur confère de très bonnes propriétés de stockage d'eau et par une perméabilité relativement faible liée à leur teneur en argile.

L'épaisseur des altérites varie selon les régions et les zones climatiques; elle est en moyenne de 10 à 20 m en domaine granito-gneissique et de 15 à 40 m en domaine schisteux (Detay et al 1989).

#### 3.1.1 Le coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement représente la porosité efficace des nappes libres. Au sein des altérites, il a été estimé par des différents auteurs travaillant sur le socle granitique. Il varie d'un point à l'autre du fait de la teneur en argile dans les altérites.

Les altérites du socle granitique sont bien connues pour leurs capacités significatives d'emmagasinement : 1% à 15% suivant Lachassagne *et al.* 2005, de 5% à 30% suivant Dewandel *et al.* 2006, et de 3,1%. suivant Milville 1991. Wyns *et al* (2004) avancent une porosité efficace des altérites granitiques variant entre 1% à 10%. Filippi *et al* (2009) ont estimé un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 1% à 5% dans la région du centre du Burkina Faso où se situe Ouagadougou. Compaoré *et al* (1997) estiment ce coefficient d'emmagasinement entre 0,5% et 4% à partir d'essais de pompes de courte durée effectués sur le site de Sanon, situé 30 km à Sud-Ouest de Ouagadougou. Le CIEH (1964), le bureau d'études l'IWACO (1986) ainsi que Yameogo, (2008) avancent une porosité de l'ordre de 5% à Ouagadougou.

#### 3.1.2 La perméabilité des altérites

Ces altérites sont bien connues pour leurs faibles perméabilités. Yameogo (2008) avance une perméabilité moyenne  $5,2 \cdot 10^{-6}$  m/s. Pour le CIEH (1964) cette valeur est de l'ordre  $10^{-6}$  m/s, et Compaoré *et al* (1997) avancent une perméabilité faible de  $10^{-6}$  m/s.

### 3.1.3 La transmissivité

La transmissivité des couches aquifères peut être estimée par une approche géostatistique (Razack *et al.* 2006) ou par des essais de pompage. Elle est de l'ordre de  $10^{-3}$  et  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s sur les aquifères de socle de notre région d'étude (Tableau 2. 1). A Ouagadougou elle a été calculée à partir des essais de pompage et varie entre  $2,9.10^{-5}$  et  $6,46.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s (CIEH, 1964).

Pour les forages de Ouagadougou captant les deux horizons supérieur (capacitif: altérites) et inférieur (transmissif), Yameogo (2008) avance les valeurs suivantes :

- ✓ Transmissivité moyenne  $5,86.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s;
- ✓ Perméabilité moyenne  $5,2.10^{-5}$  m/s;
- ✓ Coefficient d'emménagement moyen 4,06%.

**Tableau 2.1** Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères du socle granitique au Burkina Faso et d'autres régions.

		Transmissivité m <sup>2</sup> /s	Coefficient d'emmagasinement	Perméabilité m/s	Réservoirs Socle granitique
Ouagadougou Yaméogo 2008		2,9 .10 <sup>-5</sup> – 6,46.10 <sup>-3</sup> Moy : 5,86 .10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-1</sup> Moy : 4,06 .10 <sup>-2</sup>	1,2.10 <sup>-5</sup> - 2,78.10 <sup>-4</sup> Moy : 5,2.10 <sup>-5</sup>	altérite/ socle fissuré
Burkina Faso (comparé)	Zigla	2,2.10 <sup>-4</sup> – 4,8.10 <sup>-4</sup>	5,4.10 <sup>-5</sup>	2.10 <sup>-5</sup>	Altérite / socle fracturé fissuré
	Mogtedo	1,3.10 <sup>-5</sup> – 7,5.10 <sup>-5</sup>	2,64.10 <sup>-5</sup>		
	Bougounam	7,75.10 <sup>-5</sup>	0,85.10 <sup>-4</sup> – 7,3.10 <sup>-4</sup>	3,4.10 <sup>-6</sup>	
<b>Togo</b> (comparé)		4,8.10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-3</sup> Theis 6,5.10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-3</sup> Grin	2.10 <sup>-2</sup> – 9,5.10 <sup>-2</sup> 3.10 <sup>-9</sup> – 1,2.10 <sup>-7</sup>		
Burkina Faso (Tôé)	kombissiri	0,3. 10 <sup>-4</sup>		0,3. 10 <sup>-5</sup>	altérite
	Sanon	0,45.10 <sup>-4</sup> - 4.10 <sup>-4</sup>		0,04. 10 <sup>-4</sup> - 0,7. 10 <sup>-4</sup>	
	kombissiri	1,5. 10 <sup>-4</sup>		0,8. 10 <sup>-5</sup>	Fracturé
	Sanon	0,55.10 <sup>-4</sup> - 4.10 <sup>-4</sup>		0,02. 10 <sup>-4</sup> -0,15. 10 <sup>-4</sup>	
<b>Burkina Faso centre Est</b> Compaoré ( kaboté 1975)		10 <sup>-4</sup>		10 <sup>-5</sup>	Altérite (Arène)
<b>Burkina Faso (Compaoré)</b>					altérites
Zigla (Engalenc 1979)		1,65 .10 <sup>-4</sup> - 2,35.10 <sup>-4</sup>	1,8. 10 <sup>-5</sup>	2. 10 <sup>-5</sup>	
Bougounam (IWACO 1990)		9,49. 10 <sup>-5</sup>	7,3.10 <sup>-4</sup>	3,4.10 <sup>-6</sup>	
Sanon		10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-2</sup>		
<b>Bretagne</b> B. Mougouin				10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-6</sup> m/s	Horizon fissuré
<b>Inde</b> (J Marchal)		1,74.10 <sup>-5</sup> - 7,65.10 <sup>-4</sup>	3,7.10 <sup>-5</sup> – 7,1.10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-5</sup>	Socle fissuré

## 3.2 Le réservoir des fissures et des failles sous-jacentes.

### 3.2.1. Composition des couches

A Ouagadougou les zones de forte perméabilité comprennent une couche d'arènes et une couche fissurée. Le socle fissuré des granites est affecté par une fréquence de fissures décroissant avec la profondeur.

Pour Toé (2004) entre la couche altérée et le sommet du socle fracturé il existe une couche intermédiaire bien développée dans les formations granitiques et qui est caractérisée par des fissures essentiellement horizontales. Pour Courtois *et al* (2010) la partie supérieure de la couche fissurée est caractérisée par une fissuration horizontale dense et assure principalement la fonction transmissive au sein de l'aquifère composite global. Le socle sain est perméable seulement au niveau local, là où les discontinuités les plus importantes sont présentes.

La genèse de ces fissures horizontales est attribuée à un processus de gonflement des minéraux au cours du processus d'altération et en particulier des micas noirs (biotite) (Lachassagne *et al.* 2005 et 2009).

Dans le socle granitique, cette couche fissurée peut être traversée par des filons de quartz (Dewandel *et al.* 2011) ou de pegmatite (Yameogo, 2008) qui augmentent sa productivité.

D'après Wyns (1998), sur les 10 premiers mètres la distance moyenne entre fissures est décimétrique et celles-ci sont ouvertes. L'espacement entre fissures diminue au fur et à mesure que l'on descend dans le profil.

### 3.2.2 Caractéristiques hydrodynamiques

Les propriétés hydrodynamiques de l'horizon fissuré ont fait l'objet d'une caractérisation de détail au sein de granites du massif central français (Maréchal *et al.* 2004). Il a été montré que parmi les nombreuses fractures subhorizontales seules quelques-unes présentaient une perméabilité suffisante pour provoquer des venues d'eau. Leur perméabilité est voisine de  $10^{-4}$  m/s, et leur emmagasinement de l'ordre de 0,05 à 0,1%. D'autres fractures de moindre perméabilité sont à l'origine d'une perméabilité de blocs voisine de  $5.10^{-8}$  m/s et un emmagasinement de 0,5 à 1% représentant 90% de l'emmagasinement total de l'horizon

fissuré (Lachassagne *et al* 2005). En Bretagne cet horizon fissuré possède une porosité de 1 à 5% ainsi qu'une perméabilité comprise entre  $10^{-4}$  et  $10^{-6}$  m/s (Mouguin *et al.* 2008).

Au Burkina Faso, comme dans de très nombreuses autres régions du monde, les observations géologiques effectuées sur les granites confirment l'existence d'une forte densité de fractures horizontales au sein de l'horizon fissuré du profil d'altération. Les paramètres hydrodynamiques (transmissivité, emmagasinement ...) sont déterminés essentiellement à partir d'essais de pompage de moyenne à longue durée. La méthode de calcul utilisée est en général celle de THEIS qui assimile l'aquifère à un milieu poreux et homogène. On aurait aussi pu utiliser les méthodes de Neuman et Gringarte mieux adaptées à des aquifères homogènes mais anisotropes.

#### **4 La recharge des nappes**

Au Burkina Faso, on peut rencontrer des mécanismes de recharge contrastés. La recharge par les pluies est soumise à des variations très importantes à l'échelle d'une région ou de tout le pays. Elle varie aussi considérablement d'une année à l'autre sous l'influence de fluctuations climatiques. (IWACO Aout 1990, Filippi *et al.* 2009).

A Basalogho, au Nord-est de Ouagadougou, celle-ci semble uniquement se produire dans les bas-fonds et leurs environs immédiats. La réaction de la nappe est rapide.

A Kazanga, au Sud de Ouagadougou, la recharge des nappes est bien répartie sur le bassin. Des zones de recharge préférentielles n'ont pas été signalées.

A Tougou, au voisinage de la frontière Nord, la recharge des nappes est plus prononcée dans les bas-fonds bien qu'on l'observe aussi sur toute la surface du bassin.

Selon les auteurs, la recharge efficace varie entre 2 et 16% des précipitations annuelles (Sommen *et al* 1988); à 75 km. Au nord ouest de Ouagadougou elle est estimée entre 50 et 100 mm/an (Milville, 1991).

## **5 Conclusion**

La géologie du Burkina Faso comprend essentiellement deux composantes : l'une cristalline et l'autre sédimentaire. La carte géologique montre que la ville de Ouagadougou repose sur le socle cristallin avec un faciès granitique assez homogène (granodiorites, tonalités, diorites).

En résumé, on distingue deux types d'aquifères dans l'hydrogéologie du socle cristallin : les aquifères superficiels au sein des altérites et des alluvions et les aquifères profonds fissurés. La nappe libre des altérites est la plus exploitée par les riverains et la plus exposée aux aléas climatiques et à la pollution anthropique.

## **Chapitre 3 : Analyse des données climatiques et piézométriques**

## **1 Introduction**

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

Nous disposons des données pluviométriques journalières de l’aéroport de Ouagadougou entre 1953 à 2010. Ces données sont complétées à partir de 2011 par celles de l’IRD situé à 1 km au nord de l’aéroport. Les données journalières (de 1940 à 1997) et mensuelles (de 1940 à 1997) de température sont celles de la base de données SIEREM (Boyer et al. 2006) de même que l’évapotranspiration potentielle journalière (de 1961 à 1990) et l’humidité relative mensuelle (de 1961 à 1978). Elles ont toutes été mesurées à l'aéroport de Ouagadougou.

Ce chapitre est consacré à une analyse de l’ensemble de ces données.

## **2 Caractéristiques climatiques**

### **2.1 Cadre général du climat au Burkina Faso**

Au Burkina Faso le climat est tropical de type soudano-sahélien. On distingue trois régions climatiques (Figure 3.1) :

- ✓ la zone soudanienne délimitée au nord par l’isohyète 900mm. Elle occupe tout le sud et est la plus humide avec une saison des pluies durant six mois et des pluviométries annuelles pouvant atteindre 1300mms;
- ✓ la zone soudano-sahélienne comprise entre les isohyètes 900 mm et 600 mm. Elle constitue la région climatique la plus vaste du Burkina Faso avec une saison des pluies et comporte une saison des pluies durant de quatre à cinq mois;
- ✓ la zone sahélienne représentant environ 25% de la superficie du pays est délimitée au sud par l’isohyète 600 mm. C’est donc la région climatique la plus sèche avec des pluviométries pouvant descendre au-dessous de 150 mm et une saison des pluies parfois inférieure à deux mois.

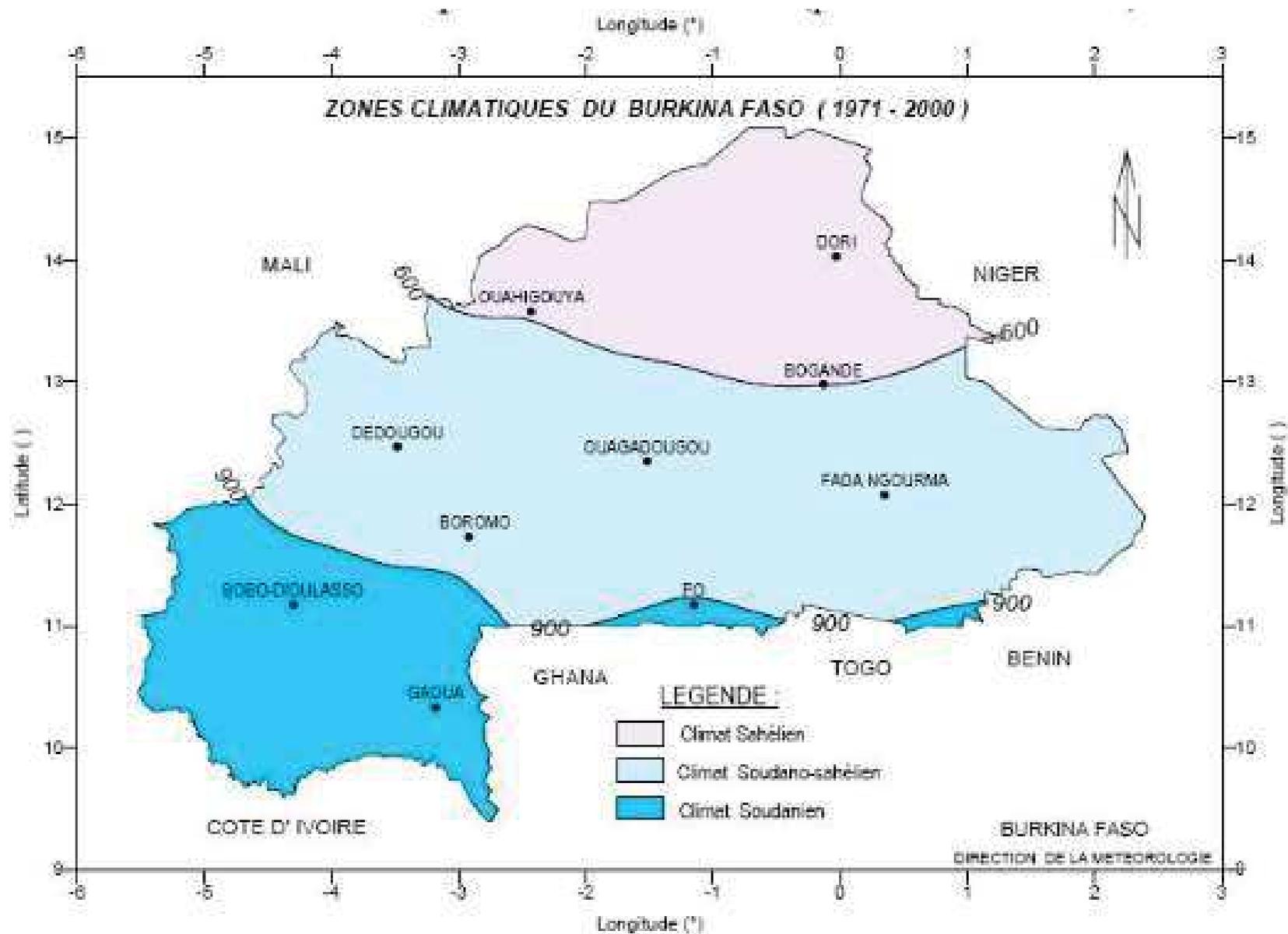


Figure 3.1: les zones climatiques du Burkina Faso (source direction de la météorologie Burkina Faso).

La ville de Ouagadougou est soumise à un climat de type soudano-sahélien caractérisé par l'alternance de deux saisons très contrastées : une saison sèche d'octobre à mai et une saison des pluies ou hivernage de juin à septembre. La durée de la saison des pluies et les quantités précipitées montrent une forte variabilité climatique. Ouagadougou, ville de l'Afrique de l'ouest soudano-sahélienne a enregistré les séquelles des sécheresses qui ont frappé la région.

Depuis le début de la décennie 1970 (Albergel *et al.* 1985, Hulme *et al.* 2001), le Burkina Faso comme l'ensemble des pays tropicaux d'Afrique au sud du Sahara ont connu des sécheresses chroniques dont les plus catastrophiques ont été celles de 1972-74 et de 1983-84. Leurs répercussions sont bien caractérisées par Laclavère (1993) et Sedogo (2007). Elles consistent en :

- ✓ une descente en latitude des isohyètes interannuelles de presque deux degrés,
- ✓ une très forte diminution des quantités d'eau apportées par les précipitations journalières,
- ✓ une baisse généralisée des nappes d'eau souterraines.

La sécheresse observée pendant les décennies des années 1970 et 1980 dans les pays sahéliens s'est fait également ressentir plus au sud en Afrique. L'étude des séries chronologiques de hauteurs précipitées fait apparaître une nette et brutale fluctuation du régime pluviométrique dans toute la région de l'Afrique de l'Ouest (Servat *et al.* 1999).

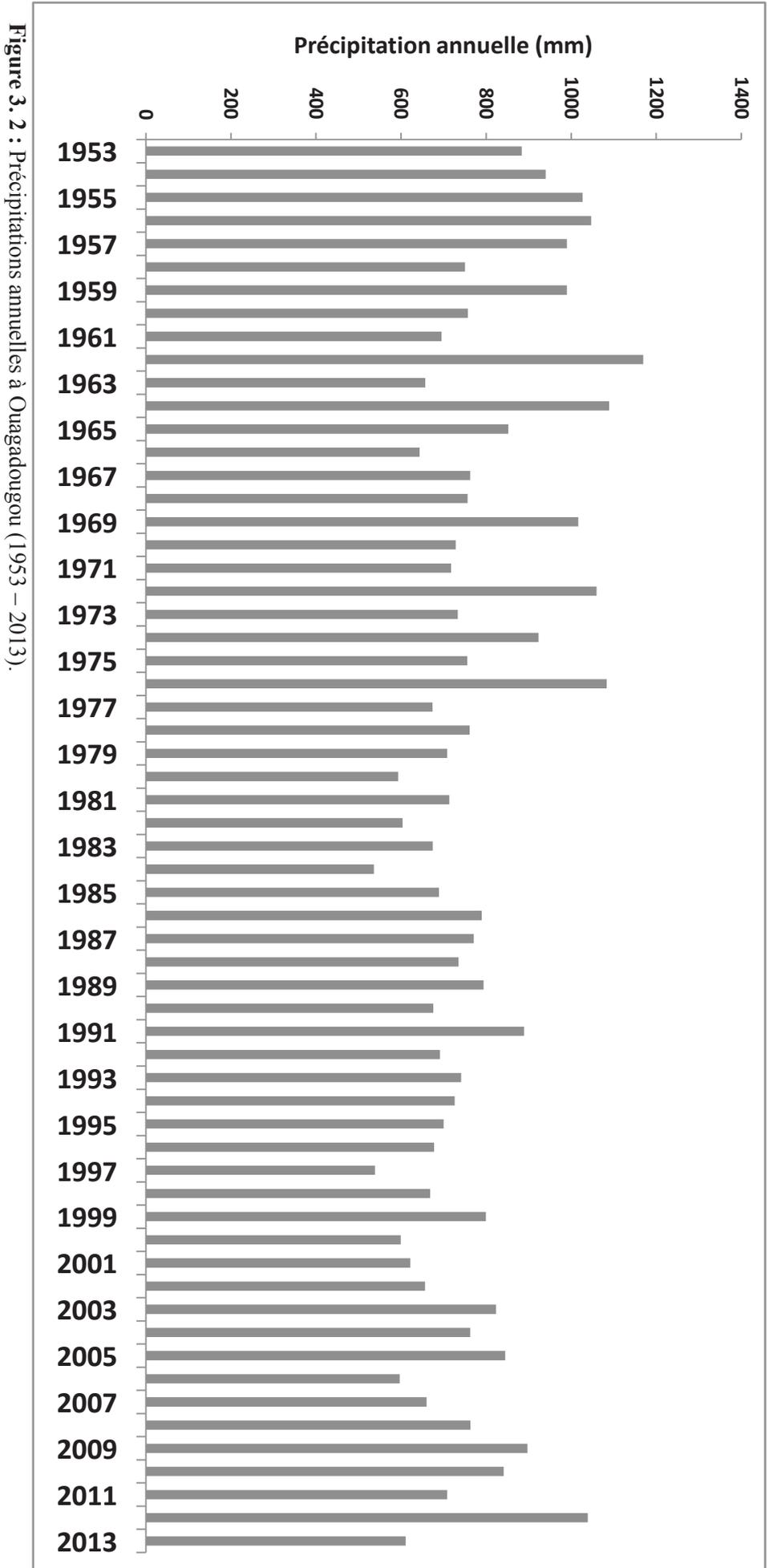
## **2.2 Les précipitations à Ouagadougou**

Les pluies sont suivies à Ouagadougou depuis longtemps. Elles montrent dans le temps des variations importantes, au sein d'une même année comme d'une année sur l'autre.

### **2.2.1 Les précipitations annuelles**

Comme toutes les régions du Sahel, le Burkina Faso a été impacté par l'épisode de sécheresse qui s'est produit entre 1975 et 1997 (Hulme *et al.* 2001). Partant d'une moyenne stable à 876 mm/an entre les années 1953 et 1976, les précipitations ont diminués à 700 mm/an entre 1977 à 1997 pour remonter significativement depuis la fin des années 90. Hulme (2001) note que le Burkina Faso a été relativement épargné par la sécheresse des années 80 et 90 puisque le déficit moyen pluviométrique a atteint 30% en moyenne pour le sahel. Sur une période de

60 ans (1953 - 2013) (Figure 3 2), seulement sept années dépassant les 1000 mm ont été répertoriées. De 1977 à 1997, même les périodes les plus humides n'enregistrent pas plus de 900 mm/an. Depuis la fin des années 2000, il semble que la sécheresse se soit atténuée avec le retour d'années humides (994 mm en 2009 et 1040 mm en 2012). La ville de Ouagadougou est soumise à un climat de type soudano-sahélien avec une pluviométrie moyenne annuelle moyenne de 780 mm pour la période 1953 - 2013.

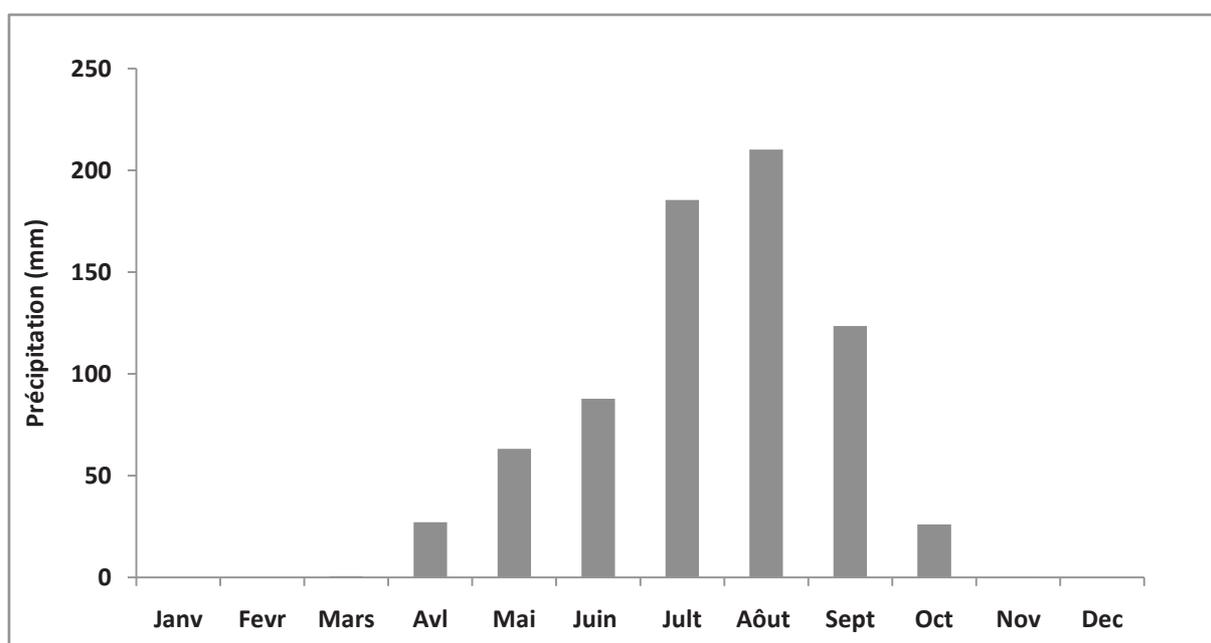


**Figure 3. 2 : Précipitations annuelles à Ouagadougou (1953 – 2013).**

### 2.2.2 Les précipitations mensuelles

Le climat du Burkina Faso est piloté par le régime de la mousson africaine. A partir du mois de mai, un flux d'air humide provenant de l'océan atlantique se met en place entraînant entre juin et septembre des précipitations régulières et abondantes qui définissent la saison des pluies ou hivernage. Durant la saison sèche, entre octobre et mai, les précipitations sont quasiment absentes et un régime de vents secs provenant du nord se met en place (harmattan).

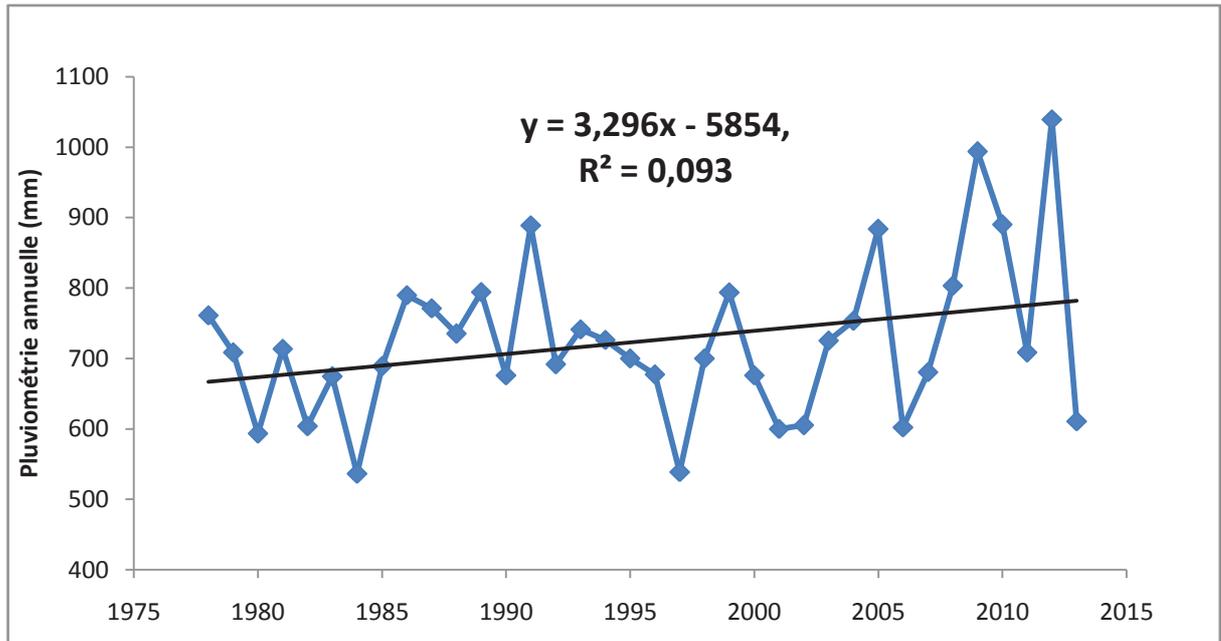
Les précipitations mensuelles de 1978-2013(Figure.3. 3) montrent que les mois de juillet et août sont les plus pluvieux.



**Figure. 3. 3 :** Précipitations moyennes mensuelles à Ouagadougou (1978 - 2013).

Nous avons effectué des analyses pour mettre en évidence la tendance à long terme de la pluviométrie et a essayé d'ajuster une tendance linéaire sur les précipitations.

Les précipitations annuelles montrent une tendance à la hausse avec un coefficient directeur de 3,3 mm/an (Figure 3 4) pour la période 1978 - 2013.



**Figure 3.4 :** Précipitations annuelles à Ouagadougou (1978 – 2013). La droite de régression linéaire est indiquée.

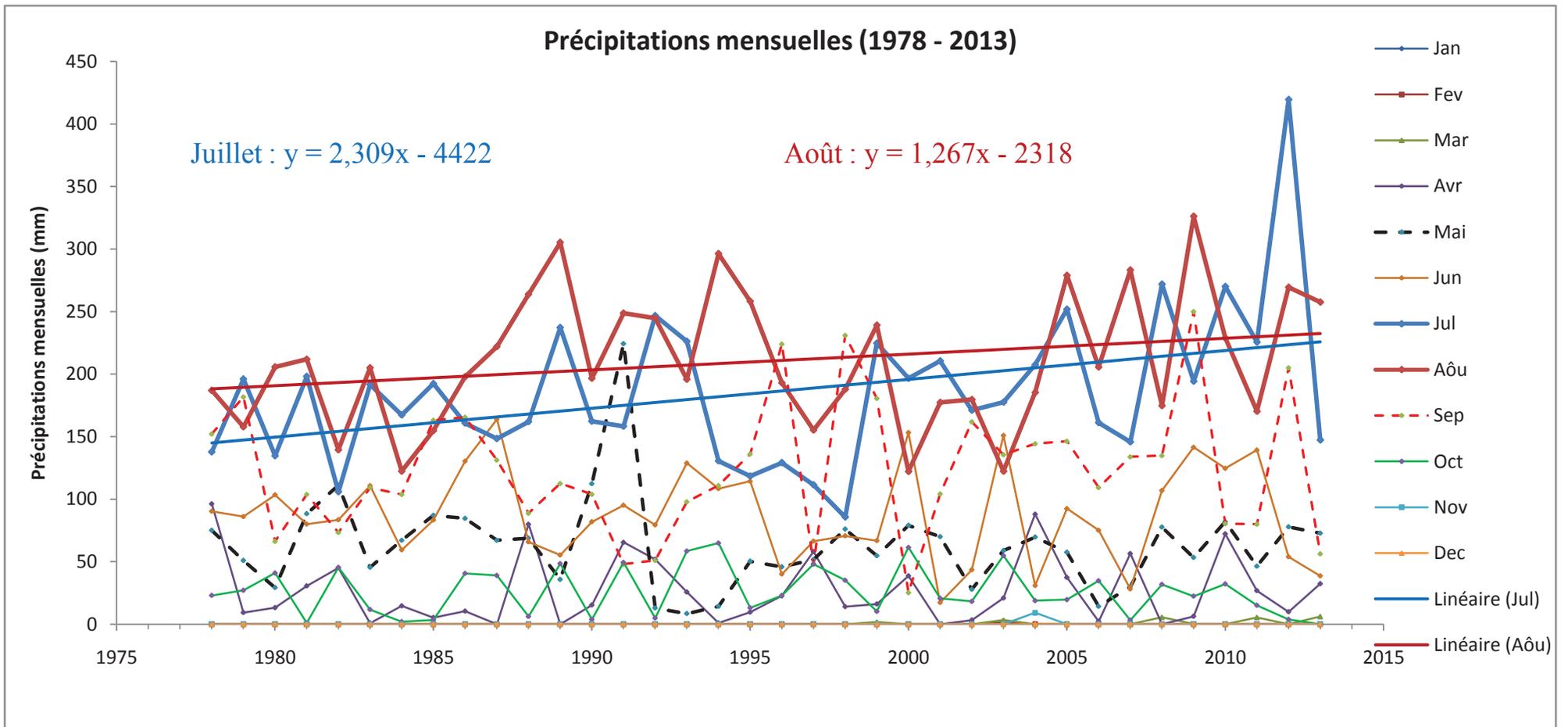


Figure 3. 5 : Précipitations mensuelles à Ouagadougou (1978 – 2013) avec les régressions linéaires pour les mois de Juillet et Aout.

Pour les deux mois les plus humides que sont juillet et août les coefficients de détermination  $R^2$  sont respectivement 15,6% et 6,2% (Figure 3.6).

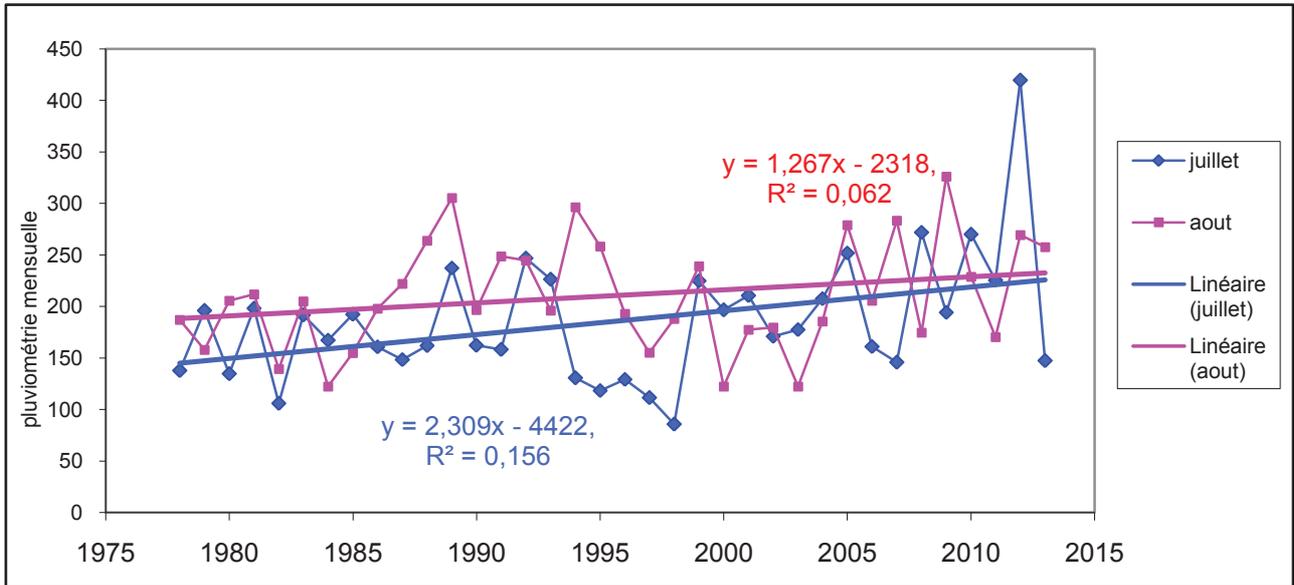


Figure 3. 6 : Pluviométrie moyenne des mois de Juillet et août (1978-2013).

Le coefficient de détermination  $R^2$  est plus important pour les deux mois cumulés : 18% (Figure 3. 7).

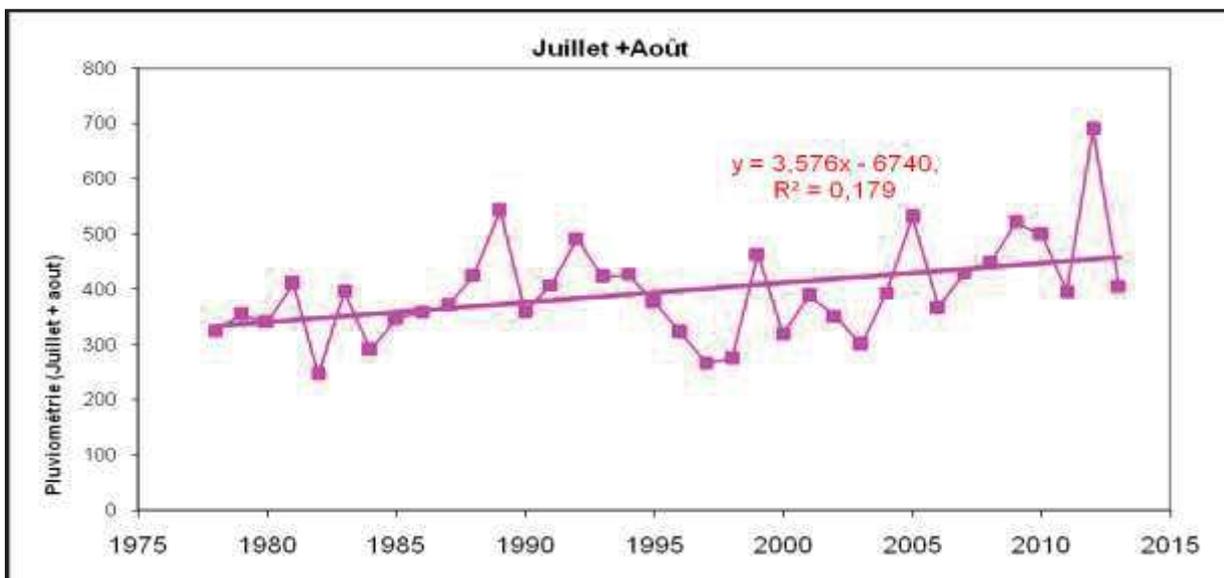
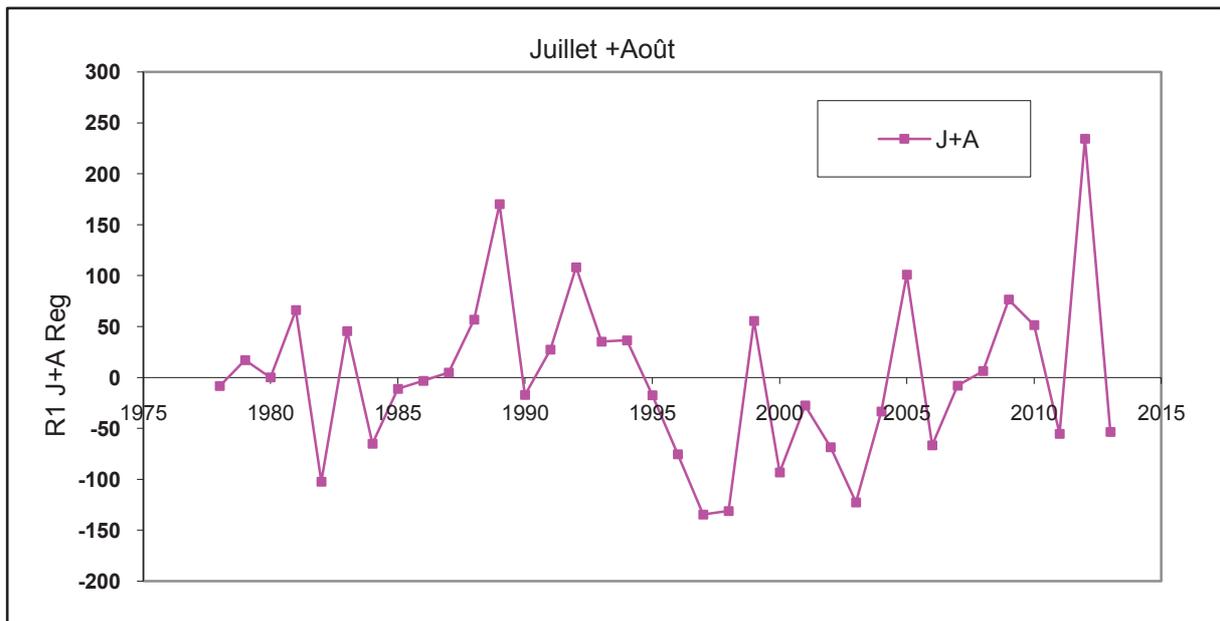


Figure 3. 7 : Précipitation cumulée des mois de Juillet et Août (1978-2013).

### 2.2.3 Modèle linéaire

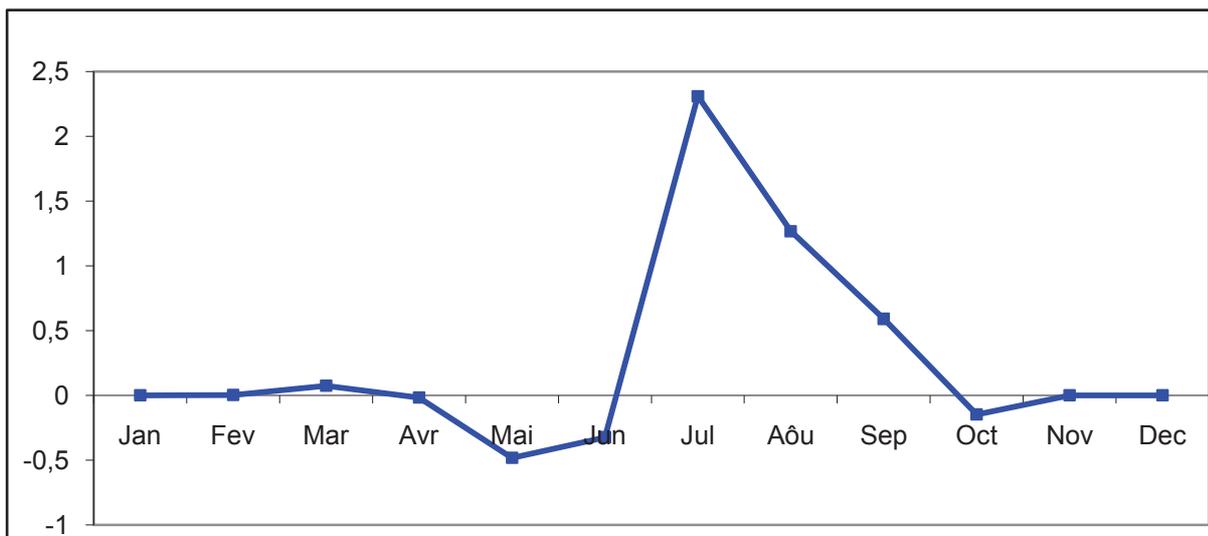
Nous avons considéré l'équation linéaire (Figure 3. 7) ( $Y= 3,576X - 6740$ ) des précipitations cumulées des mois de juillet et août comme étant un modèle linéaire. En remplaçant X par l'année en cours on obtient le modèle du régime linéaire interannuel. La différence entre les précipitations cumulées de juillet et août avec ce modèle donne un résidu  $R_1$ .

Ce résidu montre une tendance cyclique d'environ 20 ans de période pour les mois de juillet et août cumulés (Figure 3.8)



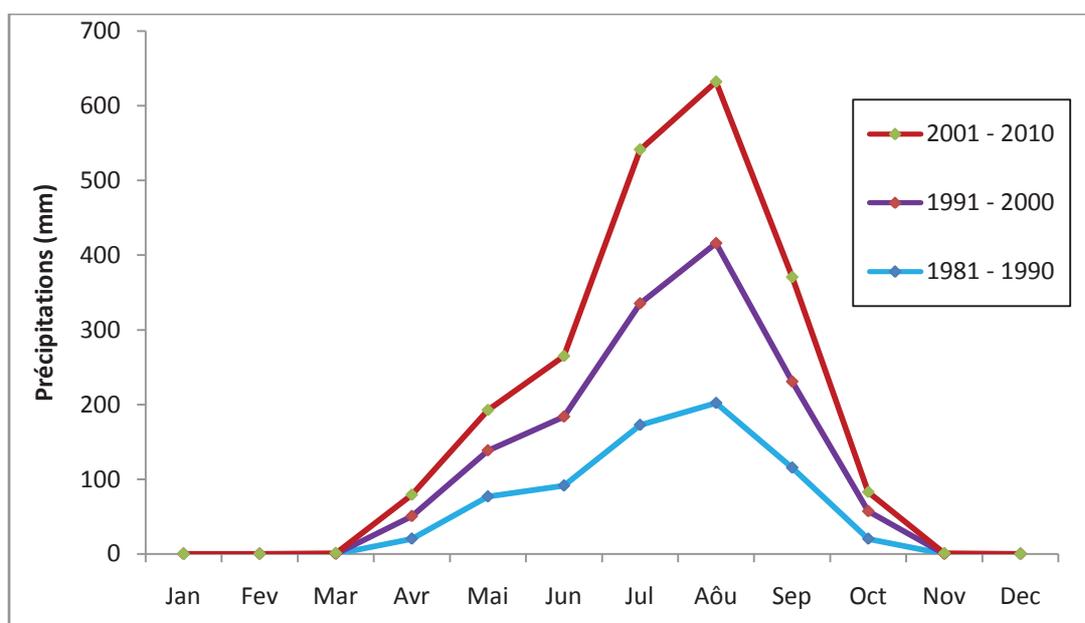
**Figure 3. 8** : Modélisation du régime linéaire interannuelle des mois de juillet et août cumulés.

Les coefficients directeurs des droites linéaires (Figure 3. 9) montrent une augmentation relative des pluviométries des mois de juillet et août depuis les années 2000.



**Figure 3. 9 :** Variation des coefficients directeurs des droites linéaires des précipitations mensuelles.

Considérant les précipitations moyennes mensuelles décennales depuis 1980 (Figure 3.10), on constate une diminution des pluies de mai et juin à Ouagadougou avec un démarrage de l'hivernage retardé jusqu'en juillet. Ce comportement des pluies est aussi observé en Afrique occidentale sahélienne dans le bassin versant du fleuve du Niger (Nicholson, 2005; Descroix *et al.* 2012).



**Figure 3. 10 :** Variation des précipitations moyennes mensuelles décennales entre 1980 à 2010.

#### 2.2.4 Modèle saisonnier

Un autre modèle prenant en compte les précipitations moyennes mensuelles est mis aussi en place, considérant que les précipitations annuelles croissent linéairement selon la loi de la Figure 3. 4, tout en gardant une répartition dans l'année constante et donnée par la Figure 3. 3. La comparaison entre le modèle linéaire et le modèle saisonnier permet d'évaluer les changements de répartition annuelle de la pluie.

Le modèle saisonnier, en rouge, montre un bon ajustement avec les précipitations mensuelles observées et une variance expliquée de 83% (Figure 3. 11). Les modèles saisonnier et réel montrent un résidu de variance non expliquée de 17% représenté sur la figure 3. 12. Les pics positifs peuvent s'expliquer par l'arrivée des précipitations en abondance à partir du mois juin avec des averses importantes en juillet et août. Deux pics positifs sont remarquables, celui de 1991 (160<sup>ème</sup> mois) pour lequel les précipitations sont tombées bien avant les mois de juillet et août et le deuxième pic en 2012 (415<sup>ème</sup> mois) avec une forte pluviométrie en juillet, août et septembre. Les pics négatifs indiquent des années sèches.

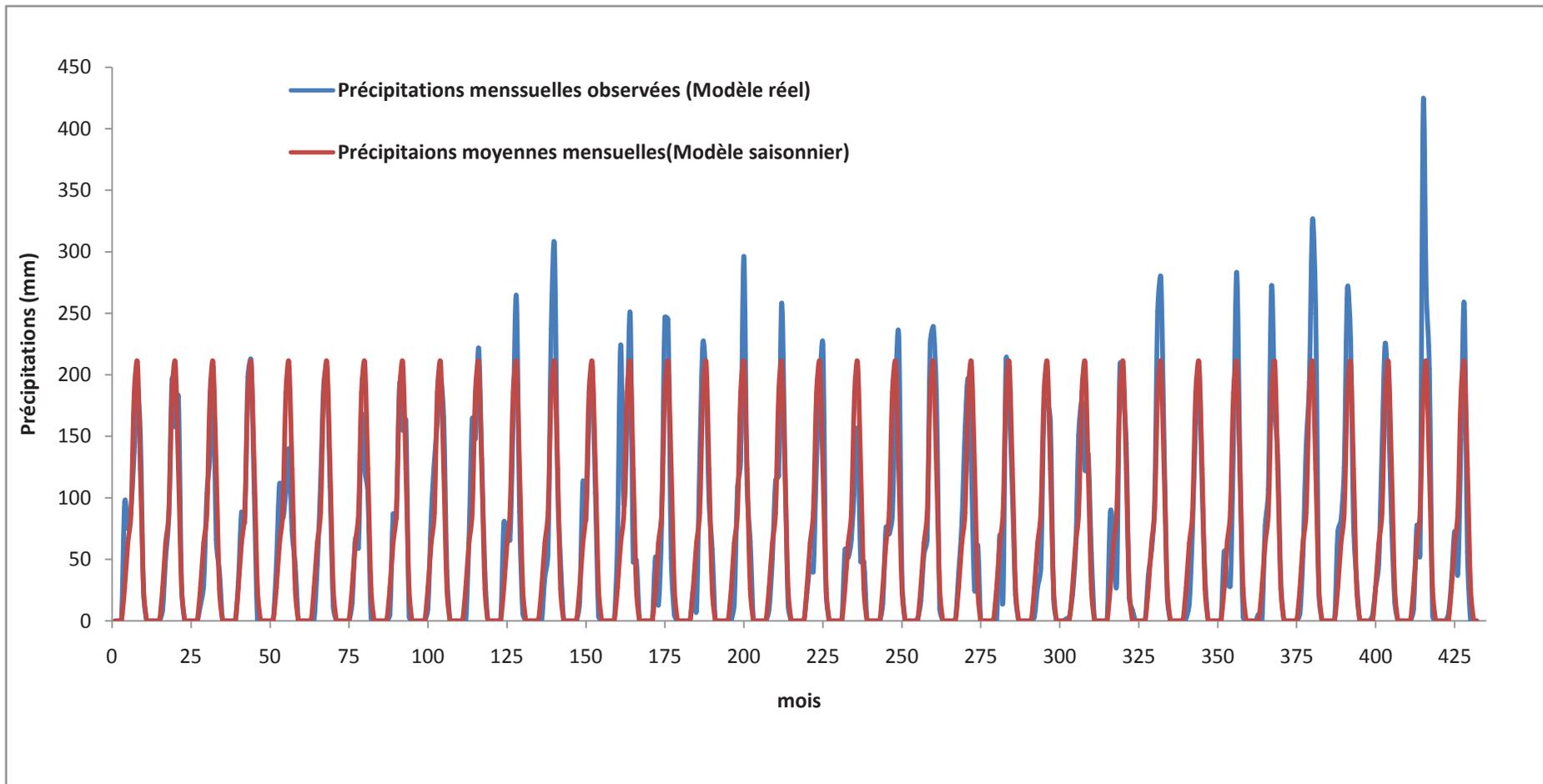


Figure .3.11 : Les modèles saisonnier et réel des précipitations mensuelles.

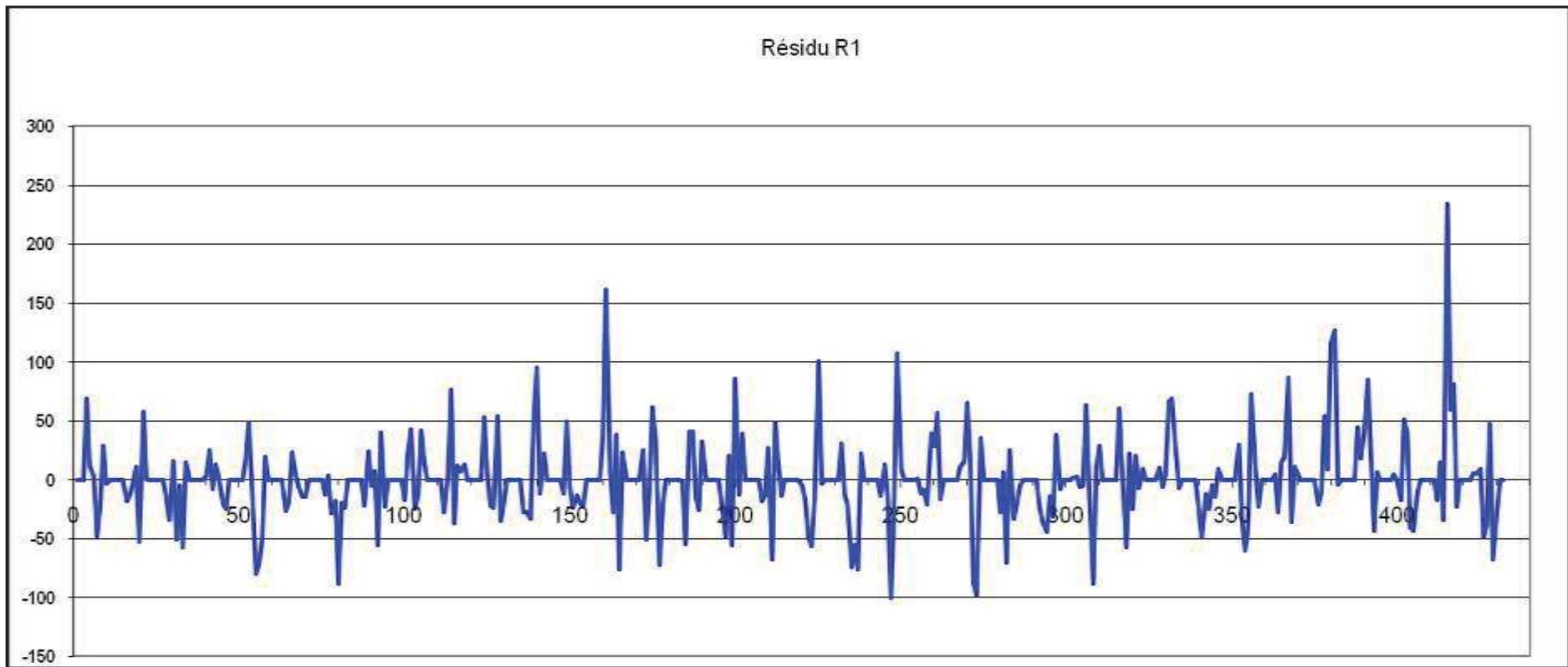
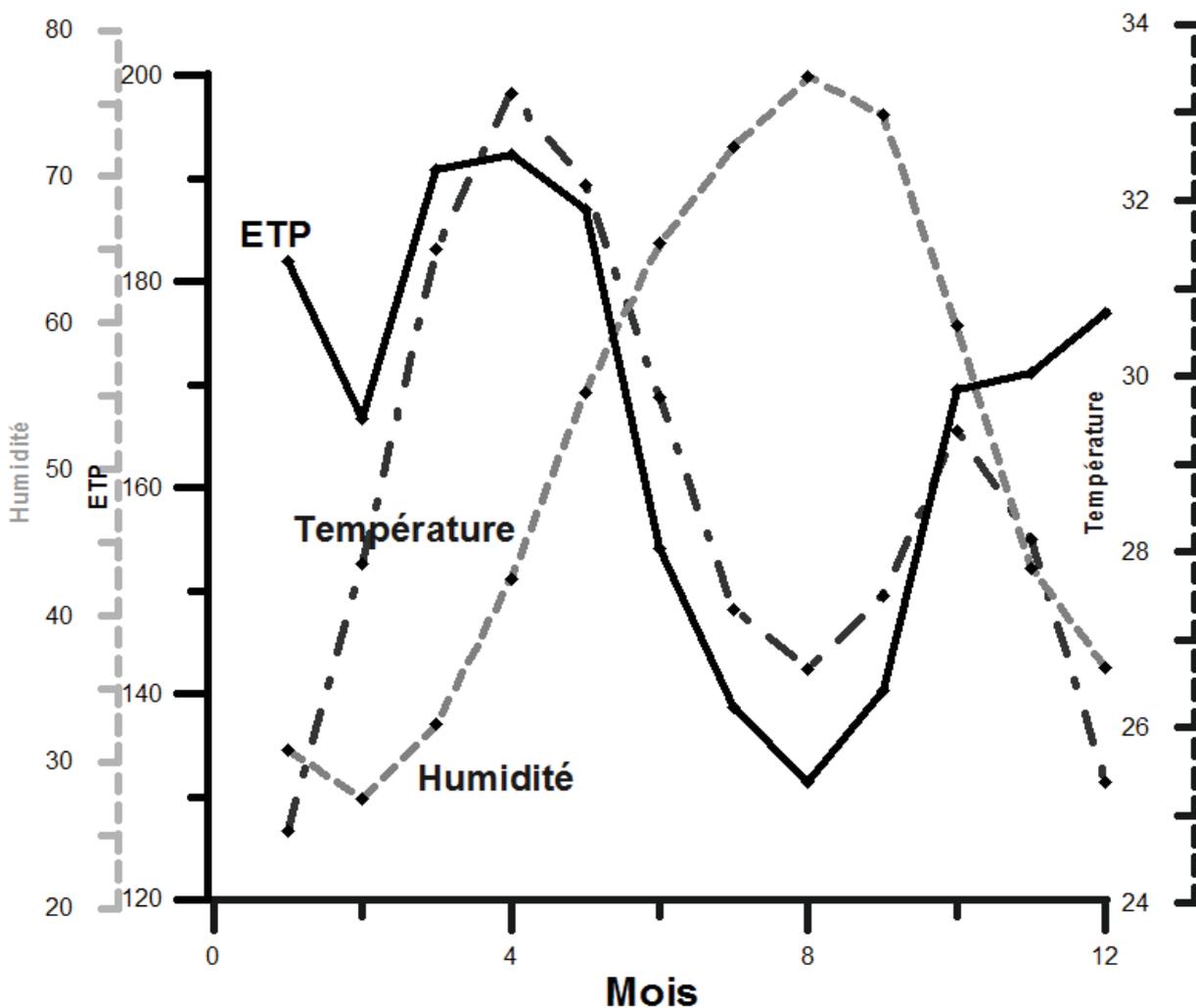


Figure .3. 12 : Ecart entre le modèle saisonnier et le modèle réel des précipitations mensuelles.

### 2. 3 La température, l'évapotranspiration potentielle et l'humidité relative

A Ouagadougou, les températures moyennes mensuelles calculées sur la période de 1978 à 2012 sont comprises entre 24°C et 34°C. Le mois le plus chaud est Avril pour lequel la température maximale journalière dépasse couramment 40°C (Figure 3.13).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) moyenne annuelle entre 1978 et 1990 est de 2017,7 mm/an, et sa valeur mensuelle est toujours au-dessus de 100 mm. La plus forte ETP, observée en avril (190 mm), résulte de la température élevée, tandis que la forte humidité de la saison des pluies est responsable de la baisse de l'ETP au mois d'août (130 mm). D'août à octobre, la température croît et provoque une hausse de l'ETP. A partir de novembre la température diminue et l'humidité de l'air diminue aussi, ce qui contrecarre l'effet de la température. L'ETP continue donc à augmenter pendant la saison fraîche jusqu'en février. Cette même tendance est communément observée dans la bande sahélienne (L'Hôte, 1998).



**Figure 3. 13** : Variation mensuelle de la température (période : 1978 - 2012), de l'ETP (période : 1978 - 1990) et de l'humidité relative (période : 1961 - 1978) à Ouagadougou.

## 2. 4 La mousson et l'harmattan

Deux principaux types de vents sont observés à Ouagadougou : les vents secs de l'harmattan et les vents frais de la mousson. Le climat saisonnier est commandé par l'influence alternée de ces vents. L'harmattan est un vent chaud et sec qui souffle d'octobre à mars du Nord Est vers le Sud Ouest sur tout le Burkina Faso. De novembre à février, l'Harmattan est relayé par l'Alizé boréal, vent frais et même froid soufflant dans le même sens que l'Harmattan.

À partir du mois de mars, le Sahara se réchauffe et devient une zone de basses pressions aspirant les masses d'air océaniques. Les vents de mousson se mettent alors en place et soufflent depuis le Sud Ouest.

La mousson est contrôlée par la position du Front intertropical (F.I.T) qui la navette entre la côte océanique et le sud du Sahara. Le climat à Ouagadougou va dépendre de la progression du FIT (Laclavère 1993) (Figure 3.14).

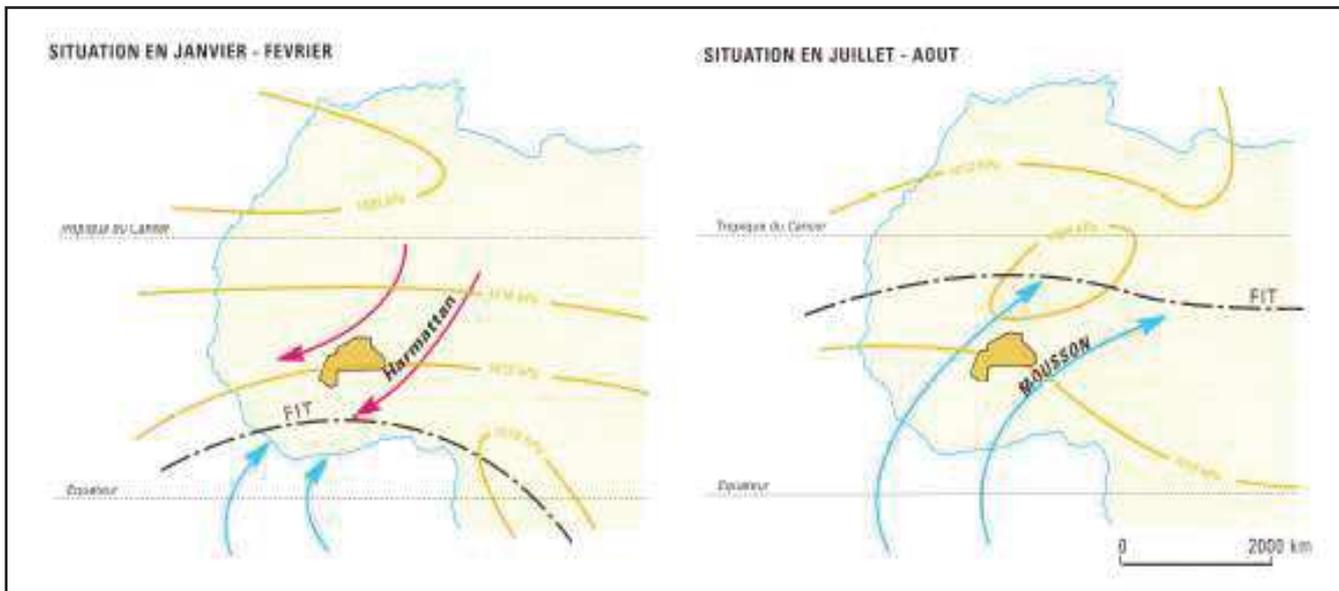


Figure 3.14 : le déplacement du FIT en Afrique de l'Ouest (source : Laclavère 1993).

## 3 Analyse piézométrique

### 3.1 Le piézomètre du CIEH

Ce piézomètre est creusé jusqu'à une profondeur de 20 m. Les informations quantitatives concernant cet ouvrage semblent être perdues (position des crépines, nature des milieux traversés). Sa profondeur semble indiquer qu'il n'atteint que les saprolites, ce que confirme un essai récent de pompage infructueux (débit inférieur à 1.5 m<sup>3</sup>/h, Somé, pers. com., 2014). Son amplitude annuelle varie entre 0,6 à 2 m et son niveau moyen à l'échelle décennale est bien corrélé avec la pluie avec en particulier deux minima en 85 - 86 et 99 (Figure. 3.15).

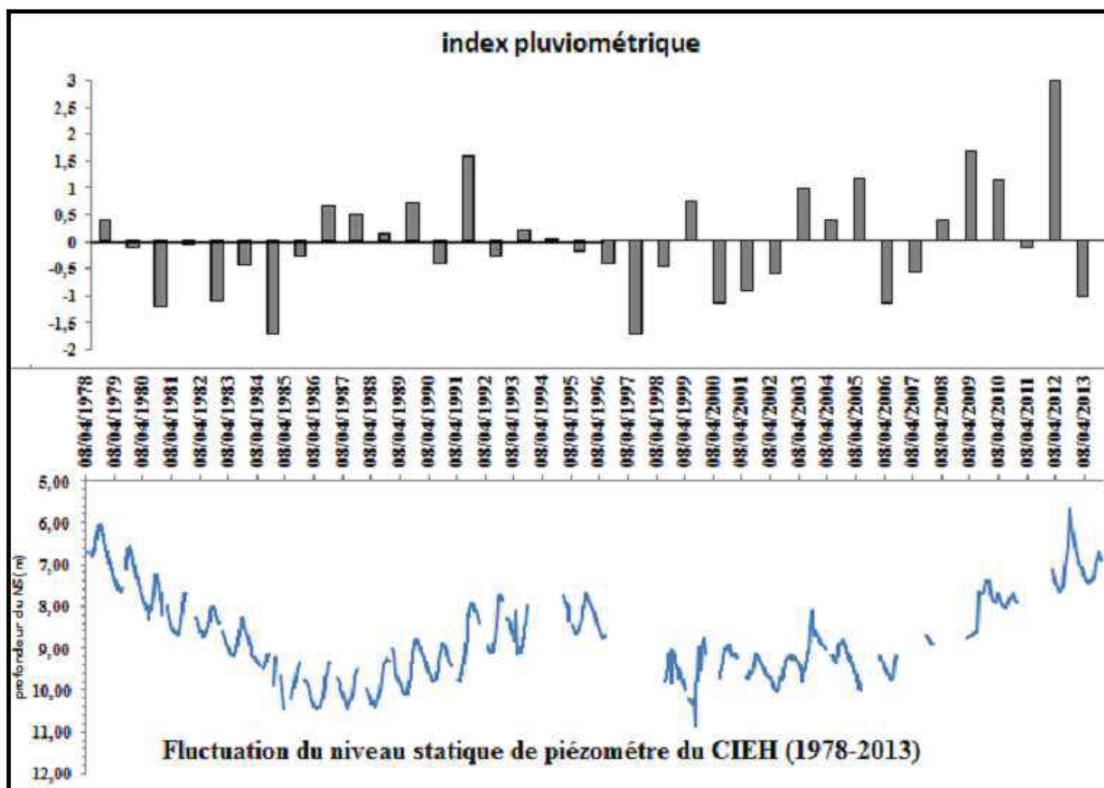
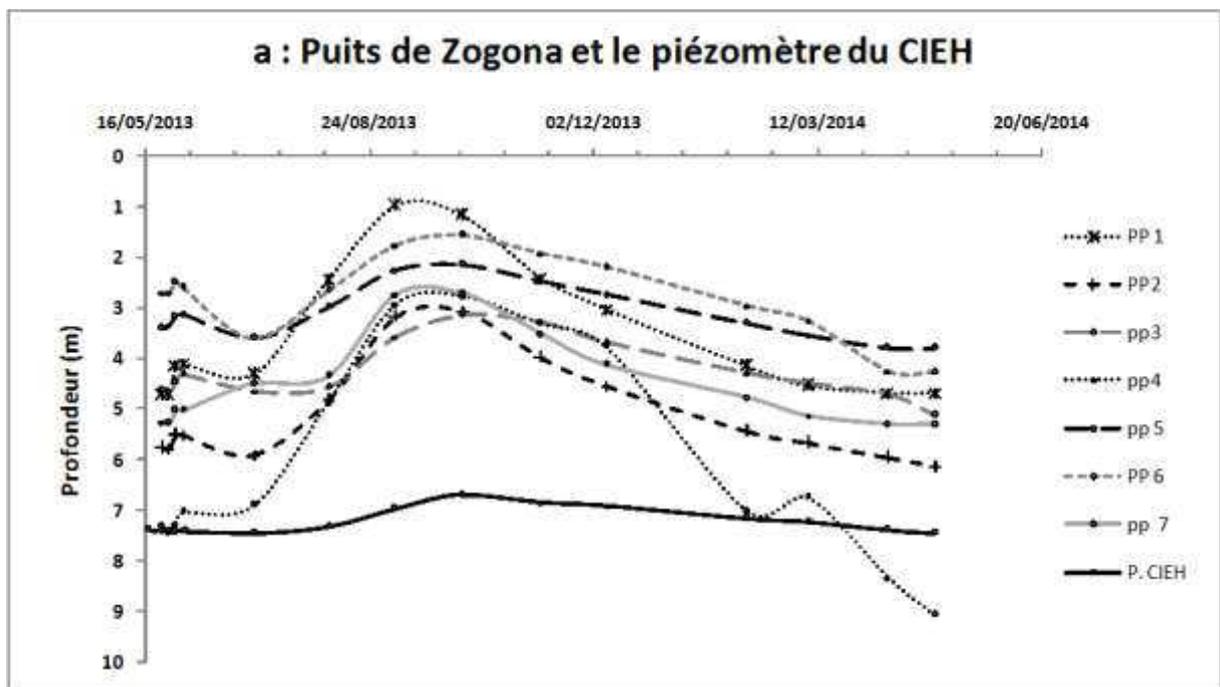


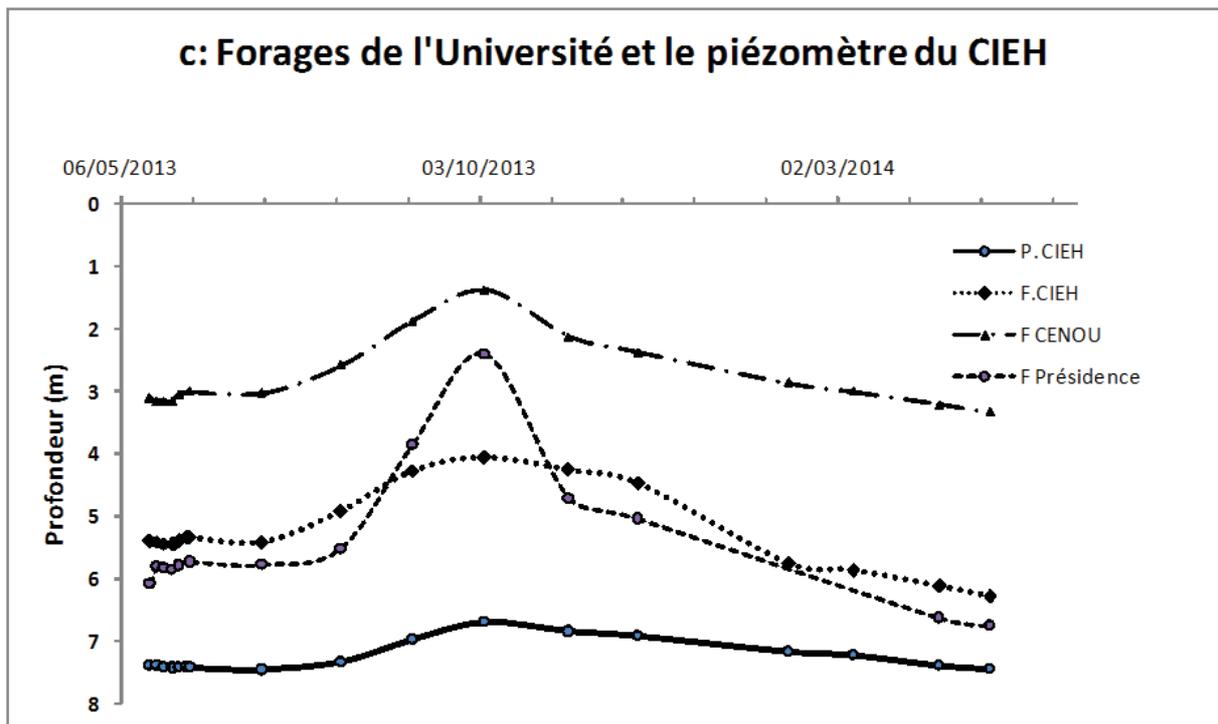
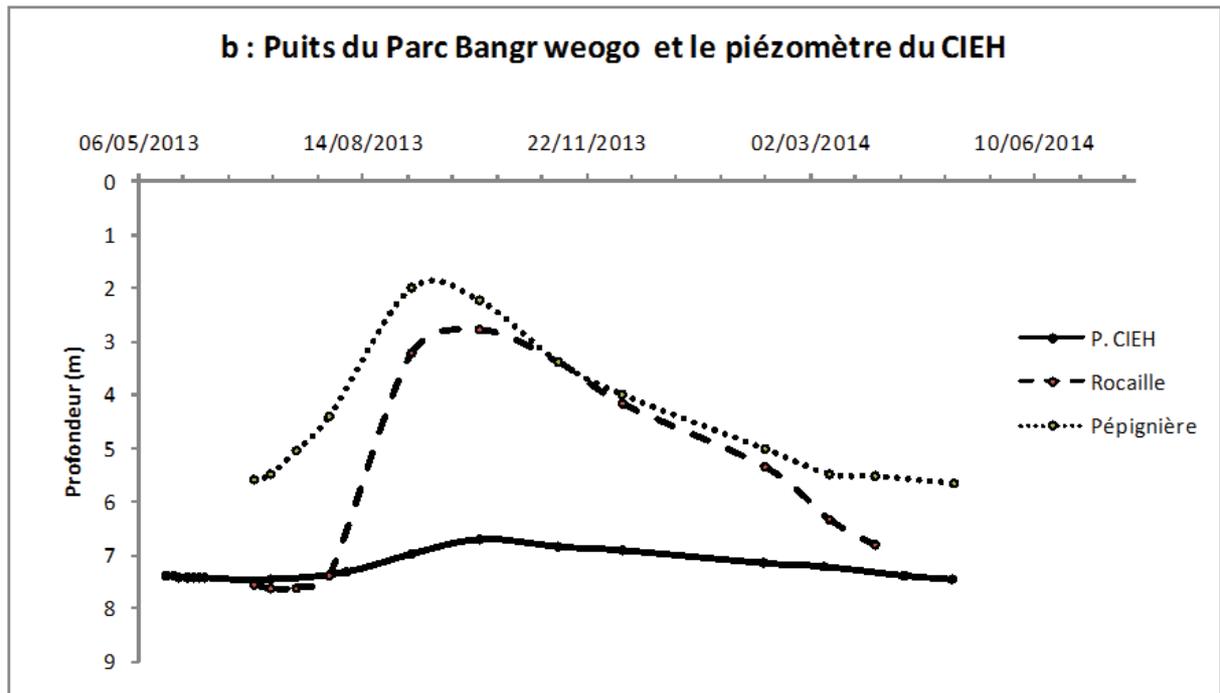
Figure 3. 15 : Variation du niveau statique du piézomètre du CIEH comparées avec l'index pluviométrique calculé sur la période 1978 – 2013.

### 3. 2 Les mesures piézométriques

Durant l'année hydrologique 2013 - 2014, une mesure au moins tous les mois a été effectuée sur l'ensemble des puits et forages de notre réseau (Figure 3.16). Le niveau minimal annuel est observé entre le mois de mars et avril et le niveau maximal est atteint entre le mois de

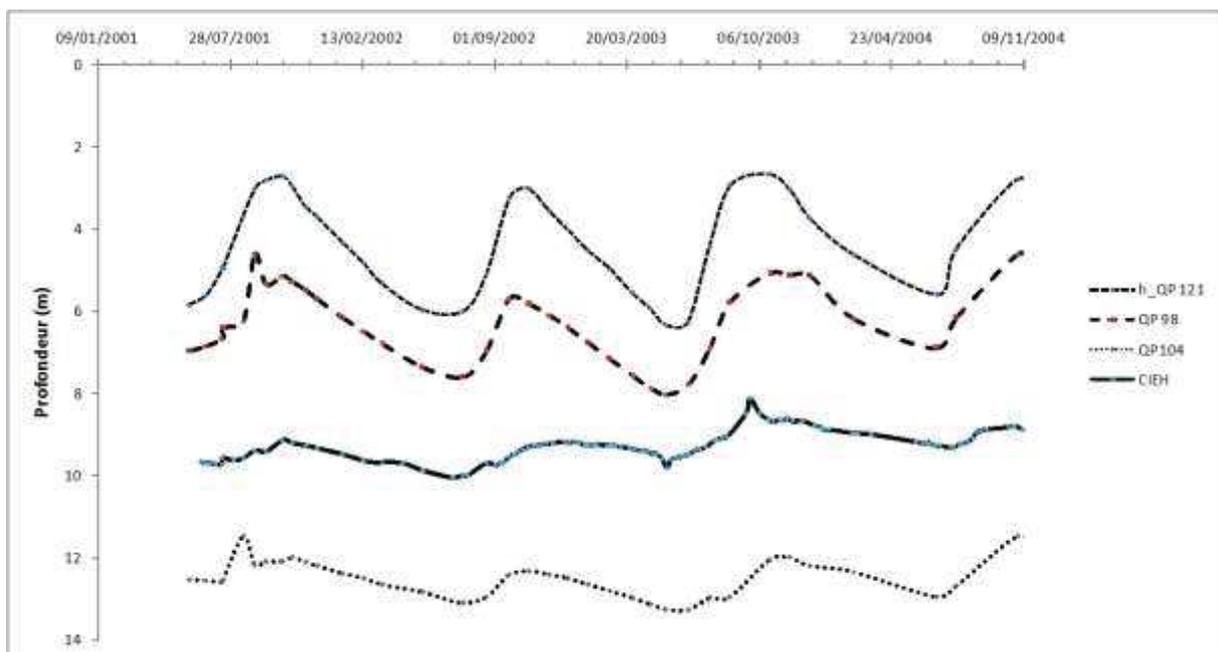
septembre et le mois d'octobre, (Figure 3.17), la remontée du niveau commençant au mois de juillet. La quasi-totalité des puits de la zone de maraichage ont été inondés à partir de la mi-juin, ce qui a entraîné l'arrêt de leur suivi. L'amplitude la plus faible a été enregistrée au niveau du piézomètre du CIEH (0,76 m). L'amplitude totale annuelle varie de 1,64 m à 2,7 m dans les puits de Zogona, de 1,96 m à 2,56 m dans les forages de l'université de Ouagadougou et de 3,63 m à 4,83 m au parc Bangr Weogo. La comparaison de nos données avec celles présentées dans la thèse de Yameogo (2008) montre que la forme des variations piézométriques est commune (minimum en début de saison des pluies et maximum entre septembre et octobre mais que l'amplitude la plus faible est celle du piézomètre du CIEH) (Figure 3.16).





**Figure 3.16 :** Variations piézométriques sur l'année 2013 - 2014 dans trois parties de notre zone d'étude. a) la zone de Zogona : puits PP1,...PP7 ; b) le site de l'université : piézo CIEH, forage CIEH, forage Cenou et forage Présidence ; c) le parc Bangr Weogo: puits Rocaille et Pépinière. Pour chaque sous figure l'échelle verticale (hauteur piézométrique) est différente et le piézomètre du CIEH est figuré, à titre de comparaison.

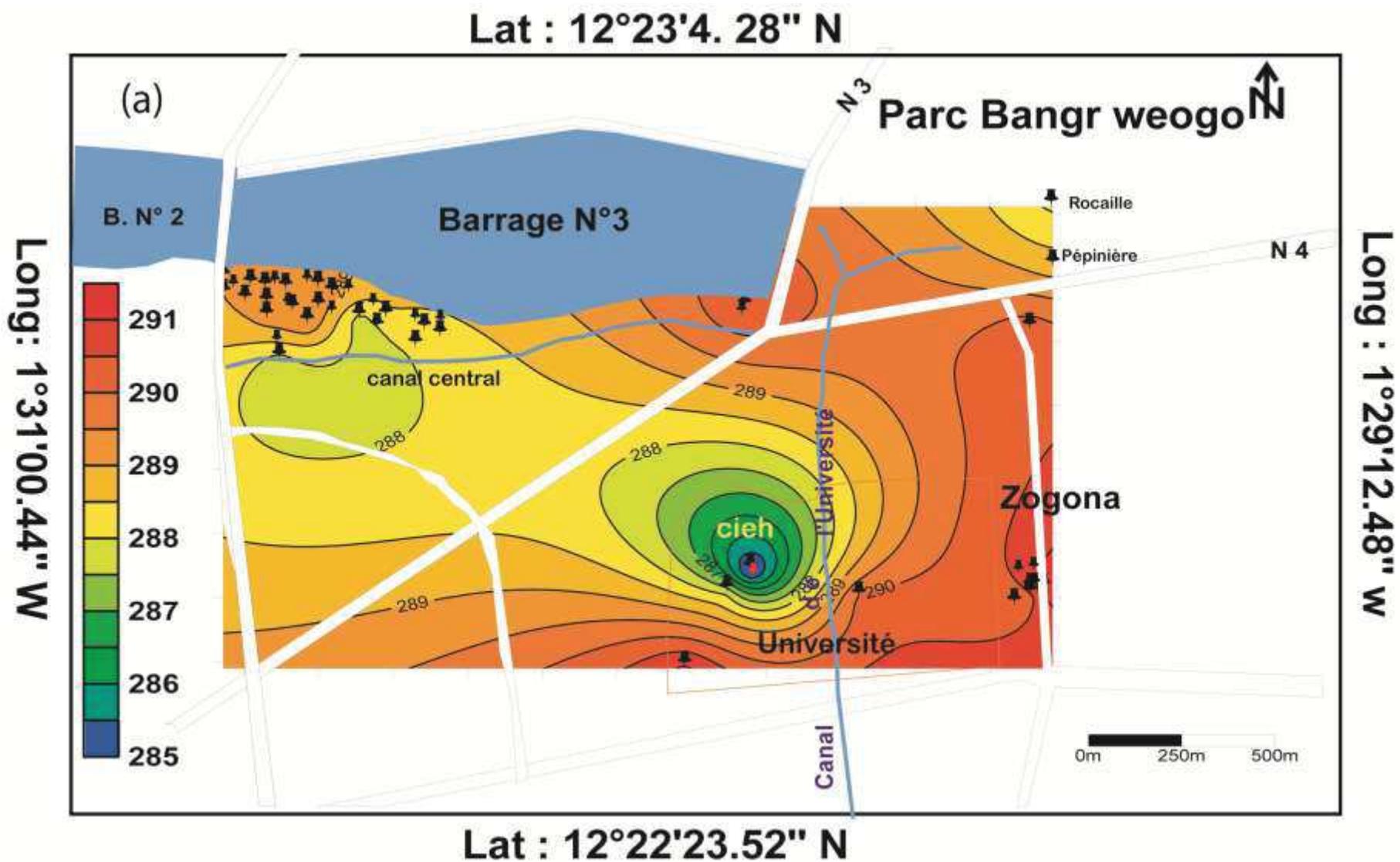
Sur les cartes piézométriques ci-dessous (Figure.3.18) il apparaît que le niveau statique du piézomètre du CIEH est plus profond que celui de tous puits et forages suivis et qu'il présente la plus faible amplitude. Le piézomètre du CIEH et le forage du CIEH distants de 100 m sont situés sur une zone presque horizontale. Les mesures piézométriques montrent une dénivellation entre ces deux points de 2 m au mois de mai 2013, de 2,64 m au mois d'octobre et de 1,16 m au mois de mai 2014. La comparaison des observations faites entre 2001 et 2004 par Yameogo (2008) (Figure 3.17), au niveau du piézomètre, QP 104 avec celles du piézomètre du CIEH pour lesquels les niveaux moyens sont à 13 m et 10 m respectivement de profondeur, montrent des comportements similaires avec des faibles amplitudes. Le cas du piézomètre du CIEH n'est donc pas unique.



**Figure 3.17 :** Variation des niveaux piézométriques des forages QP 98, 104 et 121 au sein de la ville de Ouagadougou entre de 2001 à 2004 (d'après Yameogo 2008) comparées à celles enregistrées au CIEH.

### 3. 3 Les cartes piézométriques

Deux cartes piézométriques (Figure 3.18) ont été établies avec les données piézométriques de l'année hydrologique 2013 – 2014. Elles correspondent aux niveaux d'octobre et d'avril (haut niveau et bas niveau annuels). Ces deux cartes doivent être considérées avec précaution à cause de la répartition non homogène des points de mesure, et en particulier l'absence de couverture la zone centrale de la figure, entre les piézomètres et forages du CIEH et les puits de la zone de maraichage. Ces deux figures montrent une recharge métrique au niveau du quartier de Zogona comme de la zone de maraichage du barrage n°3. Néanmoins leur caractéristique commune est constituée par le creux piézométrique au niveau du CIEH, visible à la fois sur le piézomètre et dans une moindre mesure sur le forage. Comme l'ensemble de la zone est subhorizontale, il paraît difficile que ce creux soit dû à une erreur sur le MNT. Le piézomètre du CIEH est donc à la fois situé sur un creux piézométrique et présente une amplitude annuelle faible. Ce creux peut s'expliquer par un déficit du flux de recharge de la nappe autour du piézomètre.



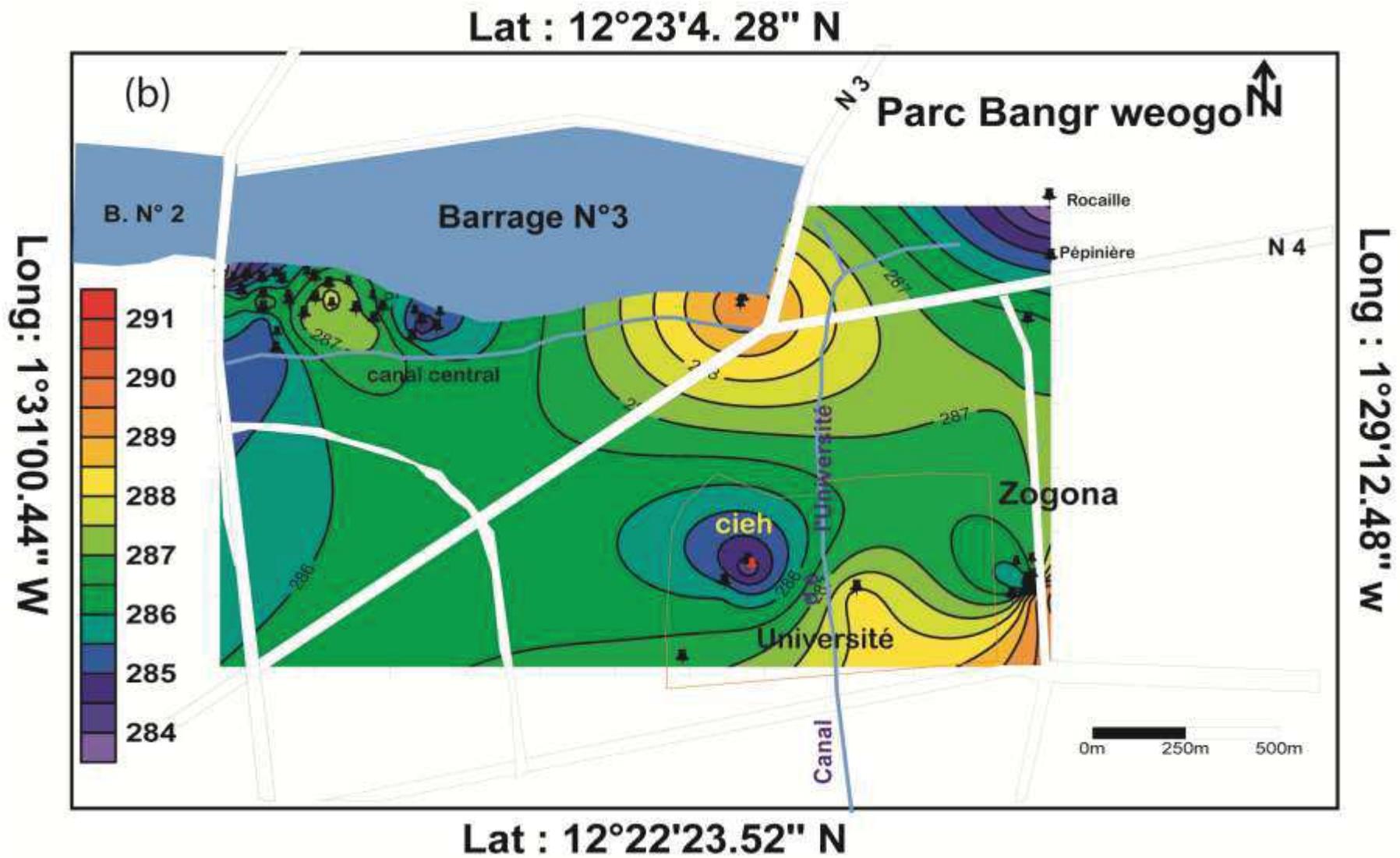


Figure 3.18 : Cartes piézométriques de la zone d'étude à Ouagadougou: (a) Octobre 2013; (b) Avril 2014.

### 3. 4 Corrélation des données pluviométriques et piézométriques

Des analyses de corrélation ont été réalisées entre le piézomètre du CIEH et la pluie. La corrélation entre l'amplitude annuelle du signal piézométrique et la pluie est élevée (0.62) mais celle entre la pluie et le niveau moyen du piézomètre du CIEH est faible (-0.2). Le tableau 3.1 présente précisément les corrélations entre l'amplitude annuelle et la pluie. La corrélation décroît significativement après les années 90. La construction du bâtiment des Sciences Humaines de l'Université, à 15 m du piézomètre, ou bien l'étanchéification (bétonnage) du canal de l'Université, à 100 m peuvent être partiellement responsables de cet effet, de même que la fin de la sécheresse.

**Tableau 3.1** Corrélation entre les précipitations et l'amplitude du piézomètre du CIEH

Événement	Période	Coefficient de corrélation
Avant le bétonnage du canal	<b>1978-2004</b>	<b>0,72</b>
Après le bétonnage du canal	<b>2005-2013</b>	<b>0,63</b>
Pendant la sécheresse	<b>1978-1994</b>	<b>0,72</b>
Après la sécheresse	<b>1995-2013</b>	<b>0,60</b>
Avant la construction du Bat. SH	<b>1978-1999</b>	<b>0,75</b>
Après la construction du Bat. SH	<b>2000-2013</b>	<b>0,62</b>

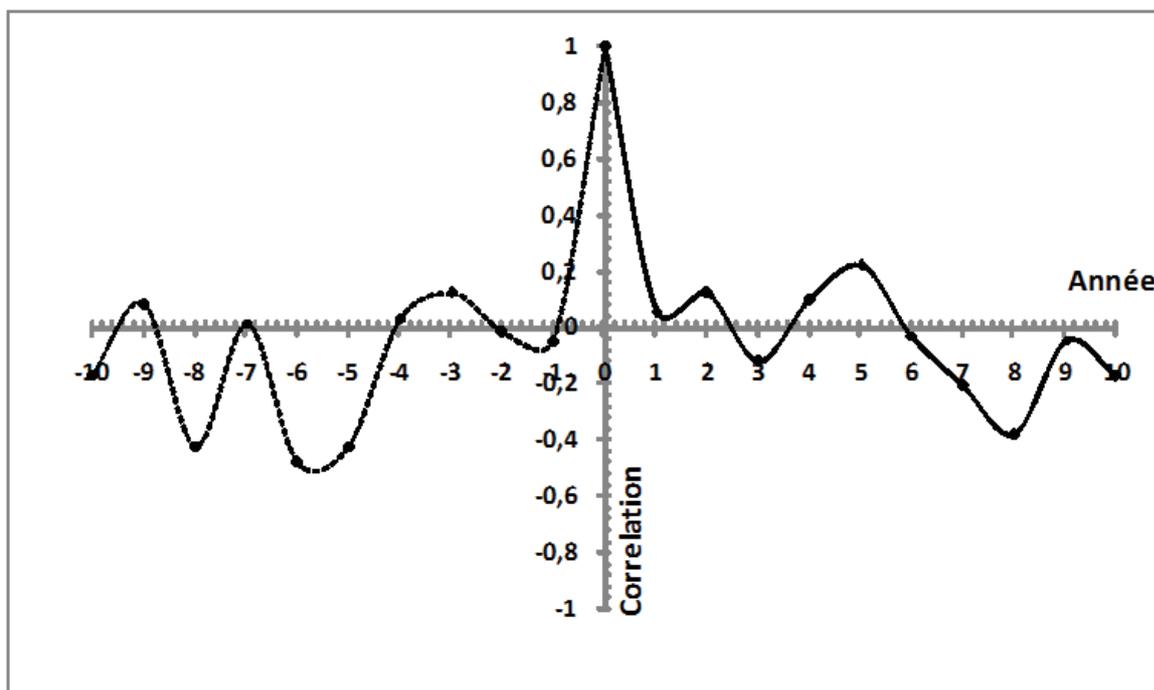


Figure 3.19: Autocorrélation des précipitations.

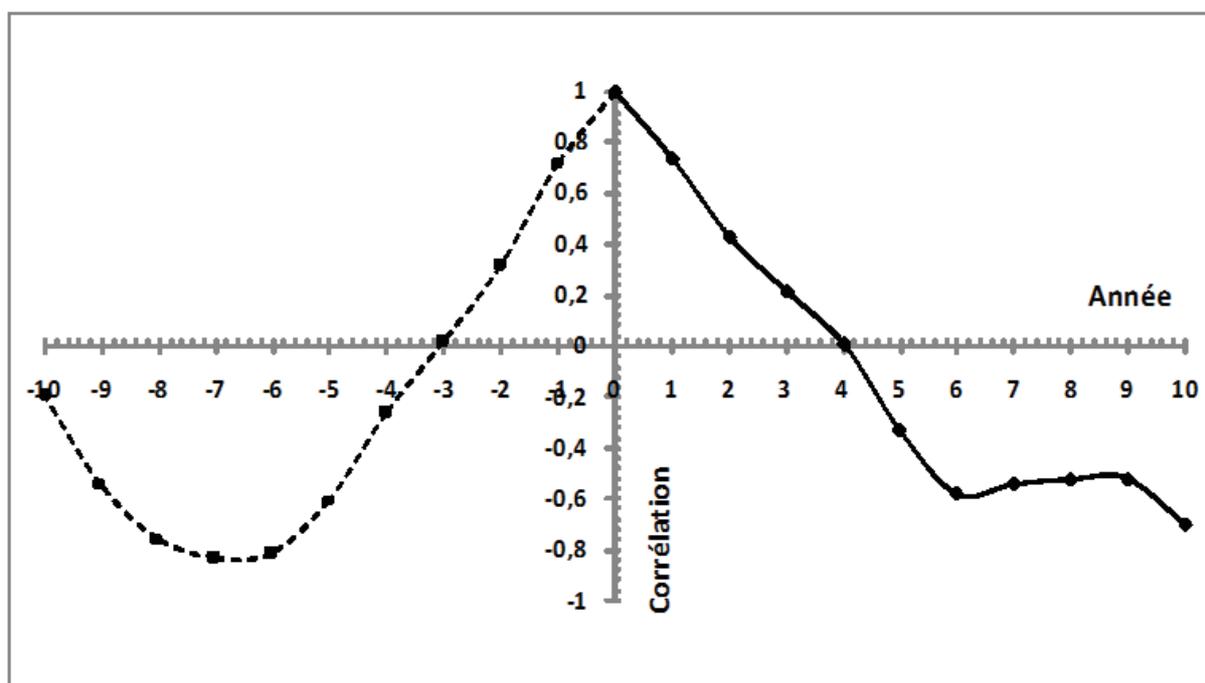
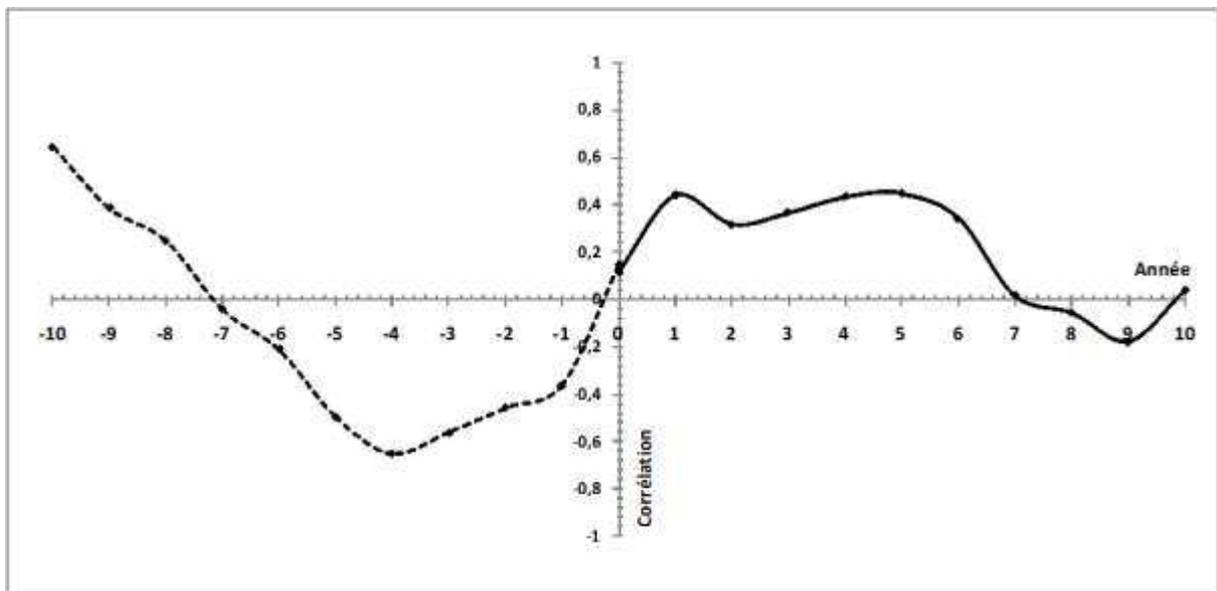


Figure 3.20 : Autocorrélation du niveau moyen du piézomètre du CIEH.

En vue d'identifier une réponse différée de la piézométrie à la pluie, les corrélogrammes simples et croisés de ces deux variables ont été calculés. Le corrélogramme de la pluie (Figure 3.19) ne montre pas de corrélation stable avec les valeurs des années passées. Cependant, celui de la piézométrie (Figure.3.20) montre une anti-corrélation significative

avec les valeurs entre - 4 ans et -10 ans. Le fait qu'une anti-corrélation similaire existe avec les valeurs entre +5 ans et +10 ans montre que la corrélation résulte plutôt d'une composante quasi périodique dans le signal. En effet, une périodicité autour de 7 ans est bien visible sur la figure. 2.21. En conséquence, la forme du corrélogramme croisé de la figure 3.21 ne doit pas être interprétée comme indiquant une relation à long terme entre pluie et piézométrie, mais comme une conséquence de la composante périodique autour de 15 ans dans le signal piézométrique. Le corrélogramme croisé montre des oscillations qui reflètent le niveau moyen du CIEH présenté ci-dessus. Par conséquent, la relation entre pluie et niveau piézométrique est analysée dans la suite de cette étude au travers d'une modélisation.



**Figure 3.21** : Corrélogramme croisé entre précipitation et niveau moyen du piézomètre du CIEH.

### 3. 5 Corrélation température – précipitation - niveau piézométrique du CIEH

Le tableau ci-dessous représente la matrice de corrélation entre la température, les précipitations et le niveau statique au piézomètre du CIEH. Il ressort de cette matrice qu'une faible corrélation positive existe entre la température et les précipitations pendant les mois les plus chauds et que celle-ci est faible et négative pour les mois les plus humides.

**Tableau 3.2** : Matrice de corrélation entre température, précipitations et niveau statique du piézomètre du CIEH

	Précipitation	T° moy (Mrs-Av Mai)	T° moy ( juill Aout spt)	Niveau moyen CIEH	Amplitude CIEH
Précipitation	1				
T° moy (Mrs-Av Mai)	<b>0,1</b>	1			
T° moy ( juill Aout spt)	<b>-0,1</b>	0,3	1		
Niveau moyen CIEH	-0,3	0,3	0,2	1	
Amplitude CIEH	0,6	-0,2	-0,2	-0,1	1

Cette faible corrélation entre les précipitations et la température peut surprendre mais est conforme aux observations de Trenberth, *et al.* 2005 à l'échelle mondiale.

## 4 Conclusion

Les précipitations à Ouagadougou varient d'une année à l'autre et montrent une tendance à la hausse de 1978 à 2013 avec un coefficient de détermination  $R^2 = 9,3\%$ . Les mois de juillet et août restent les plus pluvieux avec une tendance à la hausse. Les modèles saisonnier et réel des précipitations montrent un bon ajustement avec un résidu de 17% de variance non expliquée.

Le corrélogramme de la pluie ne montre pas de corrélation stable avec les valeurs des années passées. Cependant, celui de la piézométrie montre une anti-corrélation significative avec les valeurs entre - 4 ans et -10 ans. Cette anti-corrélation résulte d'une composante quasi périodique dans le signal. La forme du corrélogramme croisé entre pluie et piézométrie n'indique pas une relation à long terme et donc la relation entre pluie et niveau piézométrique est analysée dans la suite de cette étude au travers d'une modélisation.

Une très faible corrélation est obtenue entre les précipitations et la température.

L'eau souterraine est présente à de faibles profondeurs à Ouagadougou, surtout en fin de saison des pluies. Elle fournit une ressource facilement accessible, mais cependant sujette à la pollution. Celle-ci est largement utilisée à Ouagadougou y compris dans certains cas pour l'eau de boisson. Dans la zone de Zogona, qui est un quartier traditionnel ancien, nous en avons trouvé deux exemples.

L'établissement d'un mini réseau piézométrique en ville et son suivi sur une année hydrologique permettent de tirer des conclusions sur la ressource en eau.

## **Chapitre 4 : Modélisation pluie-niveau piézométrique à Ouagadougou.**

## **1 Introduction**

Le changement climatique et ses conséquences sur les ressources en eau souterraines constituent une préoccupation majeure. Afin de mieux appréhender cette problématique, nous avons fait appel à la modélisation à partir des différentes chroniques de mesures climatiques et piézométriques disponibles.

Nous nous proposons ici de préciser les propriétés des aquifères de socle dans la ville de Ouagadougou. Le piézomètre dit du CIEH, situé en plein cœur de la ville sur le site de l'Université est suivi depuis le début des années 80. Nous avons établi un mini réseau piézométrique autour de celui-ci. La modélisation comparée de la piézométrie de ce réseau sur une année hydrologique en complément de celle effectuée sur une durée pluridécennale au piézomètre du CIEH est ici utilisée pour préciser la variabilité du comportement de l'aquifère sur une échelle de quelques kilomètres carrés.

## **2 Les données disponibles**

### **2.1 Données piézométriques**

Nous avons effectué un suivi piézométrique autour de l'université de Ouagadougou sur 29 puits et 3 forages pendant l'année hydrologique 2013-2014. Tous ces puits sont repartis sur trois sites dont deux sont dans le milieu urbain (université de Ouagadougou et le quartier Zogona) et le troisième site regroupe les zones de maraichage et le parc Bangr Weogo. Nous disposons aussi d'une chronique piézométrique longue, observée au piézomètre de l'Ex Comité Inter Africain d'Études Hydrauliques (CIEH) et pour laquelle la série de mesures commence en mars 1978.

### **2.2 Données pluviométriques**

Nous disposons des données pluviométriques journalières de l'aéroport de Ouagadougou entre 1953 à 2010. Elles sont complétées entre 2011 à 2014 par celles de l'IRD situé à 1 km au nord de l'aéroport.

### **2.3 Evapotranspiration potentielle**

L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée par la méthode de Penman dans la station synoptique de l'aéroport de Ouagadougou à un pas de temps journalier. L'ETP

moyenne annuelle (1978-1990) est de 2017,7mm. Les données nécessaires au calcul n'étant pas disponibles pour notre période d'étude, nous avons donc estimé cette ETP valait 2000 mm/an pour notre modèle.

#### **2. 4 Le coefficient d'emmagasinement**

Ce coefficient d'emmagasinement représente la porosité des aquifères libres des altérites. Il a été estimé et calculé par des différents auteurs travaillant sur le socle granitique. Dans notre modèle nous avons choisi un coefficient d'emmagasinement moyen de 6% pour les altérites.

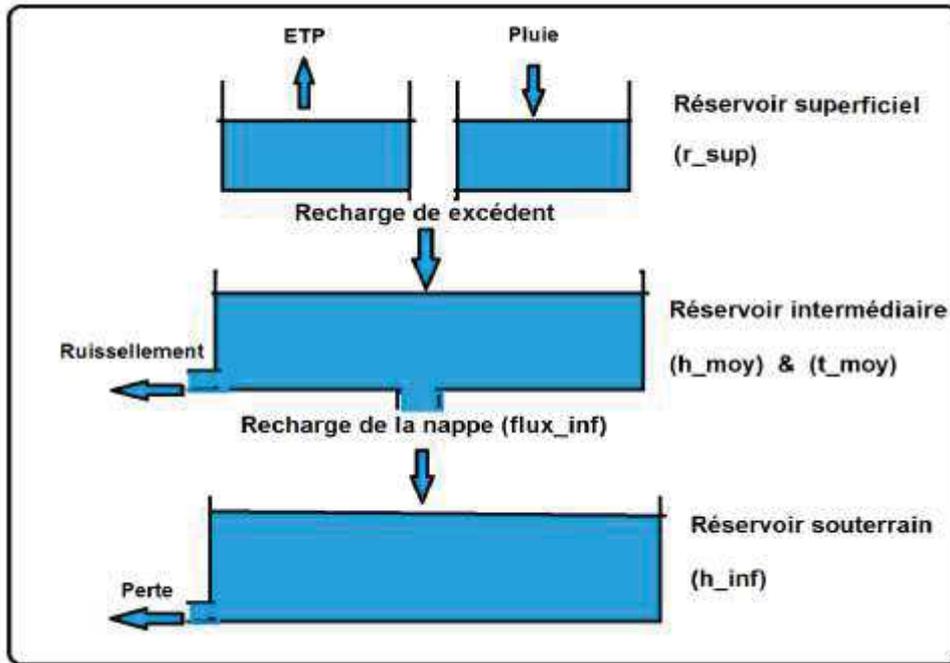
### **3 La modélisation**

L'objectif du modèle est d'analyser la relation entre les observations climatiques et les niveaux piézométriques afin d'évaluer la recharge naturelle de la nappe par les pluies à Ouagadougou.

#### **3. 1 Principe du modèle**

Les modèles hydrologiques pluie-niveau sont utilisés classiquement dans un bassin versant pour estimer la recharge naturelle d'un aquifère par les pluies. De nombreux modèles ont été publiés, par exemple les modèles distribués comme MHYDAS (Moussa *et al.* 2010), HYDROTEL (Fortin et Royer 2004), les modèles globaux et semi-globaux comme KARINE (Thiéry 1988). Les modèles produits par le BRGM (GARDENSOL, TEMPO) permettent la modélisation simultanée de l'évolution du stock d'eau dans la zone non saturée et du niveau piézométrique en un point de la nappe ainsi que de prévoir l'évolution de la piézométrie et des débits des rivières en fonction de scénarii de pluviométrie, de déterminer et d'analyser les relations entre des séries temporelles de mesures, et d'étudier les corrélations entre la pluie efficace et le niveau de la nappe.

Le modèle hydrologique à réservoirs, GARDENIA, permet de simuler, à partir de 6 paramètres, les niveaux piézométriques en fonction des précipitations, mais aussi autorise des prolongements par des scénarios prévisionnels de précipitations (Thiéry 2003, 2011). Le modèle choisi dans cette étude est proche du modèle GARDENIA. C'est un modèle unidimensionnel semi physique à trois réservoirs superposés (Figure.4.1) :



**Figure 4. 1** : Schéma de fonctionnement du modèle utilisé.

le **réservoir superficiel** représente les premiers centimètres du sol. Il contient les reliefs centimétriques qui se remplissent d'eau avant que le ruissellement ne se déclenche. Il est alimenté par la pluie, vidé par l'évapotranspiration et recharge le réservoir intermédiaire si son niveau dépasse la hauteur  $r_{sup}$ ,

le **réservoir intermédiaire** est alimenté par l'excédent du réservoir superficiel. Il est vidangé par percolation vers le réservoir inférieur avec une constante de temps ( $t_{moy}$ ). Il faut noter dans ce modèle que le ruissellement se produit après prélèvement d'une partie de l'ETP,

le **réservoir inférieur** représente la zone aquifère; il est alimenté par le réservoir intermédiaire et vidangé par une perte supposée constante dans le temps. Cette perte représente une abstraction qui peut être due soit aux écoulements au sein de l'aquifère soit aux racines profondes des arbres, réputés être capables d'extraire de l'eau jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur (Canadell *et al.* 1996).

Le pas de temps est journalier et les données nécessaires sont les suivantes :

- ✓ une chronique journalière de précipitations,
- ✓ une chronique journalière d'observations piézométriques obtenue par interpolation linéaire à partir des données mensuelles.

Les principaux paramètres de ce modèle sont les suivants:

- ✓ l'épaisseur du réservoir superficiel ( $r_{sup}$ ),
- ✓ l'évapotranspiration potentielle annuelle (ETP),
- ✓ le coefficient ( $r_{off}$ ), qui est la fraction de la pluie quittant le réservoir intermédiaire,
- ✓ le temps de vidange du réservoir intermédiaire ( $t_{moy}$ ),
- ✓ l'emménagement de l'aquifère ( $\phi$ ), il s'agit de la partie de la porosité qui se remplit et se vide durant les fluctuations annuelles de niveau,
- ✓ la perte qui est une fraction d'eau infiltrée dans le réservoir souterrain reprise par les racines des plantes ou écoulée au sein de l'aquifère,
- ✓ le niveau piézométrique initial ( $h_{inf}(1)$ ).

### 3. 2 Calage du modèle

Des simulations préliminaires nous ont montré que les paramètres les plus sensibles dans l'inversion étaient le ruissellement, puis le coefficient d'emménagement et enfin la perte. D'autre part nous avons constaté que plusieurs combinaisons de ruissellement et de porosité pouvaient conduire à des résultats similaires. En effet, augmenter le ruissellement revenait à infiltrer moins d'eau, donc à des variations piézométriques de plus faible amplitude, ce qui pouvait être compensé par une diminution de la porosité efficace qui produit une plus grande variation de piézométrie pour la même quantité d'eau infiltrée. La ville de Ouagadougou étant située sur un substrat homogène, nous avons supposé que le coefficient d'emménagement était le paramètre le moins variable. Celui-ci a donc été fixé à 6%, correspondant au coefficient d'emménagement moyen des altérites déduit de la bibliographie.

Un ajustement manuel des autres paramètres a été effectué dans l'ordre de leur sensibilité décroissante, i.e. d'abord le ruissellement puis la perte. Dans un premier temps, l'ensemble des piézomètres ont été ajustés pour l'année hydrologique 2013 - 2014, puis une modélisation de l'ensemble de la chronique du CIEH a été tentée. On notera (cf. Figure. 3) qu'avec une pluviométrie de 604 mm, l'année 2013 – 2014 est une année sèche.

### **3. 3 Résultats de la modélisation**

#### **3. 3. 1 Simulation des niveaux pour l'année hydrologique 2013 - 2014**

Les paramètres ajustés pour chaque puits et forage sont présentés dans le tableau 4.1. Les niveaux piézométriques observés et simulés sont donnés dans la figure 4.2 pour les sites de l'Université, du quartier de Zogona et pour ceux du parc Bangr Weogo, respectivement. Les différents termes du bilan hydrologique calculés avec les paramètres ajustés sont présentés dans le tableau 4. 2.

**Tableau 4.1** Paramètres ajustés pour chaque puits ou forage

	r_sup (mm)	ETP (mm/an)	t_moy (jours)	runoff coefficient	porosité	Perte (mm/an)	h_inf (1) (m)
<b>Site : Université de Ouagagougou</b>							
PiézoCieh	9	2000	10	65,3%	6%	94,83	-7
Forage.Cenou	//	//	9	42%	//	169,73	-2.2
Forage .Cieh	//	//	10	42%	//	201,92	-4.29
Forage Présidence	//	//	6	38	//	217,69	-4.66
<b>Site : Quartier Zogona de Ouagadougou</b>							
PP2	//	//	7	<b>9%</b>	//	270,68	-4.2
PP3	//	//	9	<b>40%</b>	//	184,84	-3.55
PP5	//	//	9	<b>50%</b>	//	170,16	-2.35
PP6	//	//	9	<b>43</b>	//	228,64	-1.45
PP7	//	//	7	<b>9%</b>	//	237,18	-4
<b>Site : Parc Bangrweogo de Ouagadougou</b>							
P Pépinière	1	//	5	<b>1%</b>	//	396,61	-4
P .Rocaille	1	//	6	<b>1%</b>	//	377,12	-5

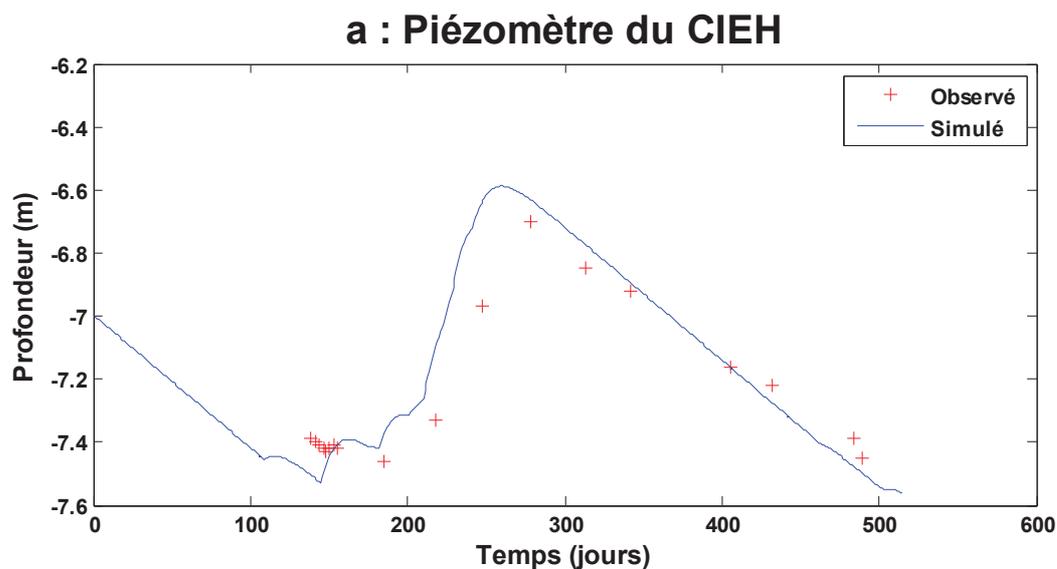
**Tableau 4. 2** Termes du bilan de l'année hydrologique 2013 - 2014. Ces différents termes sont exprimés en lame d'eau

Puits et forages	Recharge		Ruissellement		ETR		Précipitations mm/an
	mm/an	%	mm/an	%	mm/an	%	
Site : Université de Ouagagougou							
Piézocieh	90,62	14,99%	167,61	27,73%	347,73	57,53%	604,4
F.Cenou	151,19	25,01%	107,80	17,84%	//	//	//
F.cieh	151,47	25,06%	107,80	17,84%	//	//	//
F présidence	160,48	26,55%	97,54	16,14%	//	//	//
Site : Quartier Zogona de Ouagadougou							
PP2	236,16	39,07%	23,1	3,82%	//	//	//
PP3	156,41	25,88%	102,67	16,99%	//	//	//
PP5	130,34	21,57%	128,34	21,23%	//	//	//
PP6	148,59	24,58%	110,37	18,26%	//	//	//
PP7	236,16	39,07%	23,1	3,82%	//	//	//
Site : Parc Bangrweogo de Ouagadougou							
P Pépinière	392,91	65,01%	3,95	0,65%	209,79	34,70%	//
P .Rocaille	393,97	65,18%	3,94	0,65%	209,79	34,70%	//

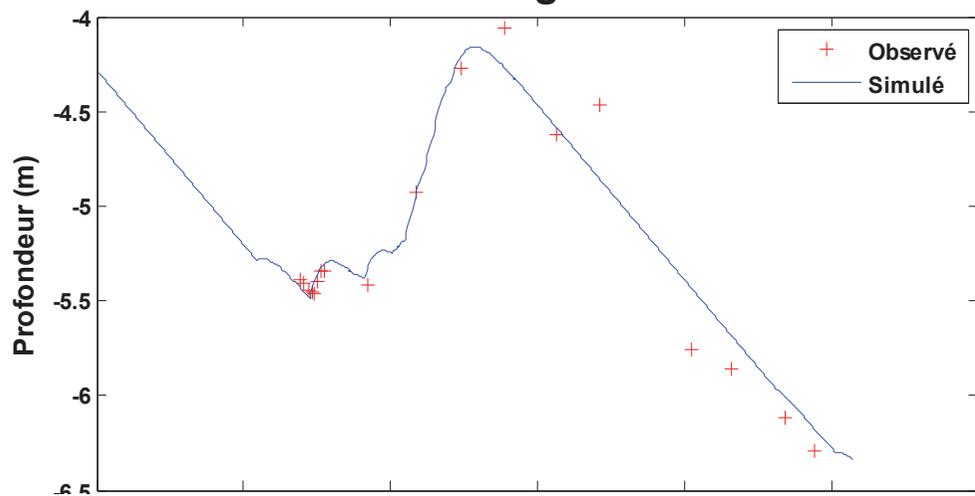
Les modèles ajustés permettent de calculer les termes du bilan d'eau. Tous les termes sont calculés en lame d'eau et en pourcentage de la lame d'eau incidente. Ceci implique que la valeur obtenue pour la recharge doit être divisée par le coefficient d'emmagasinement pour être comparée aux fluctuations piézométriques.

Avec la même précipitation de 604 mm la recharge varie entre 15% et 65%, le ruissellement entre 0,65% et 27,3% et l'ETR s'établit à plus de la moitié des précipitations (57,5%) dans le milieu urbain et 34,7% dans le parc Bangr Weogo. Les plus faibles recharges correspondent à la zone de l'Université en particulier au niveau du piézomètre du CIEH. La plus forte recharge est obtenue autour de la route de Zogona, une zone basse et inondable, où se trouvent les puits PP2 et PP7, ainsi qu'au parc Bangr Weogo. Dans ce parc, le ruissellement est à son minimum. Il faut d'autre part noter que la pépinière est arrosée en permanence durant la saison sèche, ce qui peut expliquer la valeur élevée de la recharge sur ce site, ainsi que la remontée rapide de la surface piézométrique, dès le début de la saison des pluies.

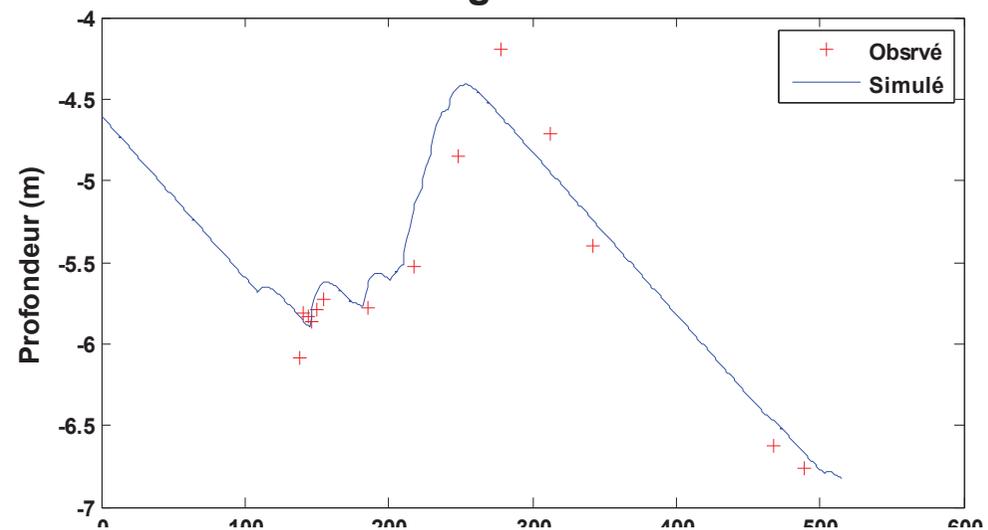
Les valeurs de recharge calculées sur l'année hydrologique 2013 - 2014 sont comparables avec celles calculées dans la région du centre du Burkina Faso (sites de Silmissin, Basseko, Barogo et Tibou) entre 1954 et 1986 par Filippi *et al.* (2009). Cette cohérence s'explique bien par le fait que Ouagadougou se situe dans cette région du centre avec le même contexte géologique et climatique.



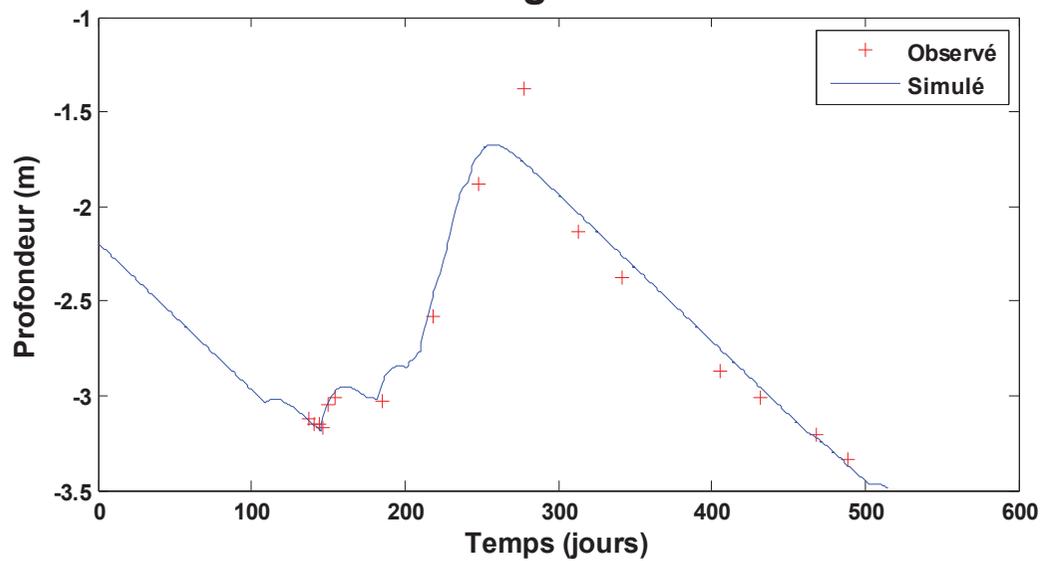
**b : Forage CIEH**



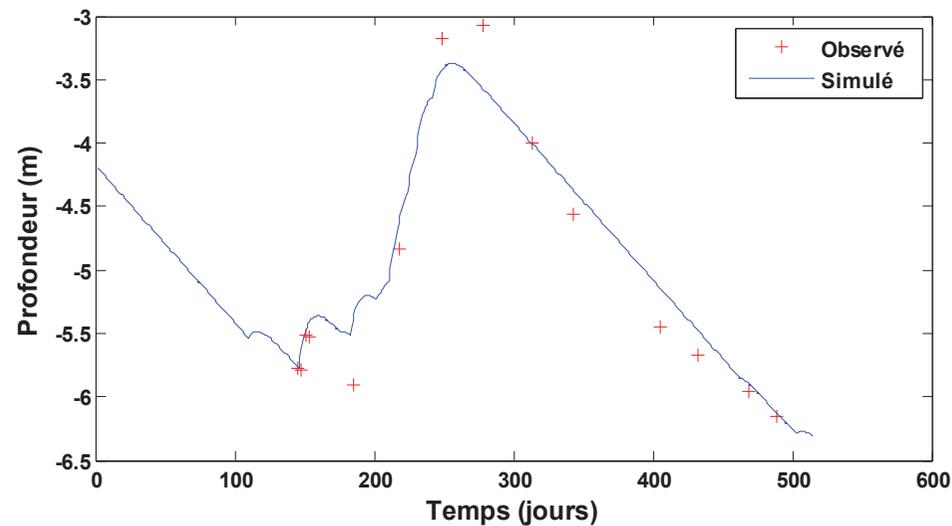
**c : Forage Présidence**



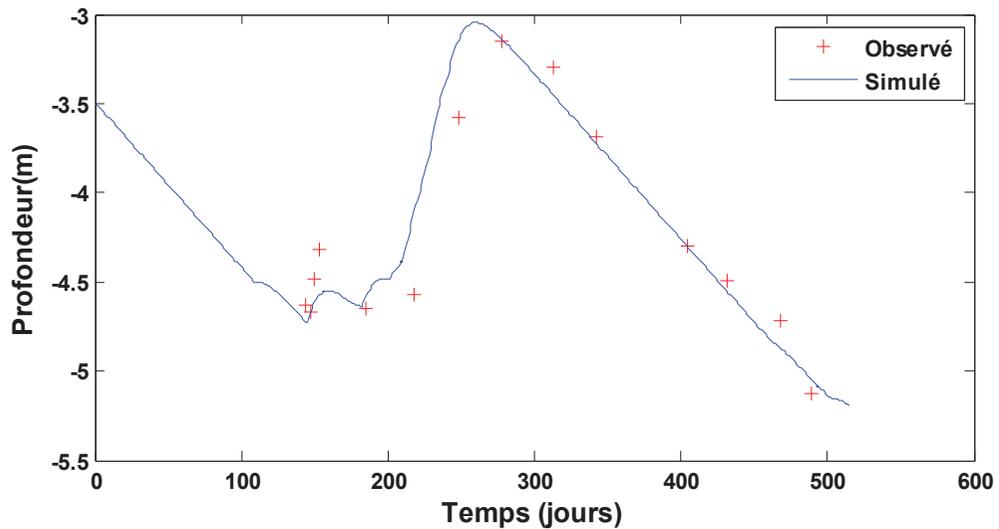
**d : Forage CENOU**



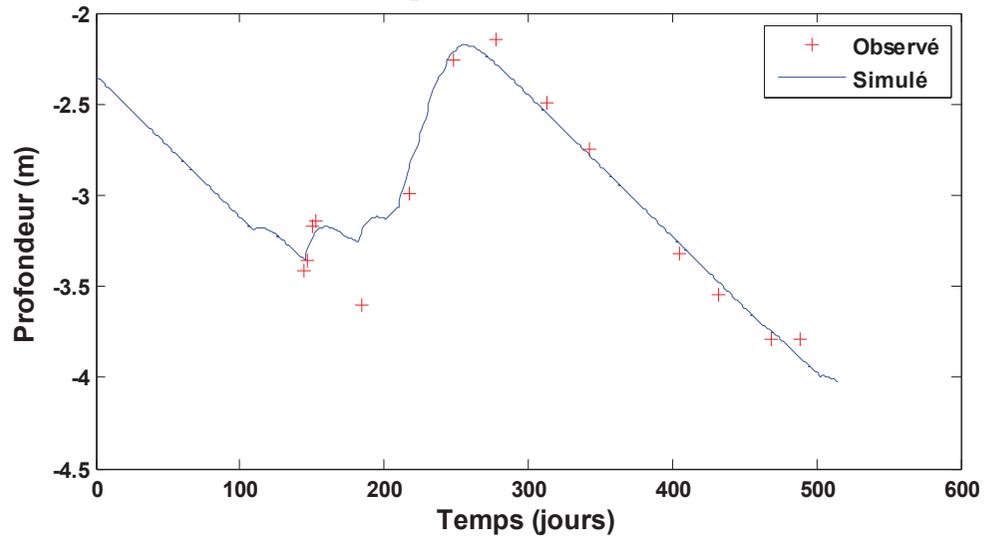
**e : Puits PP2**



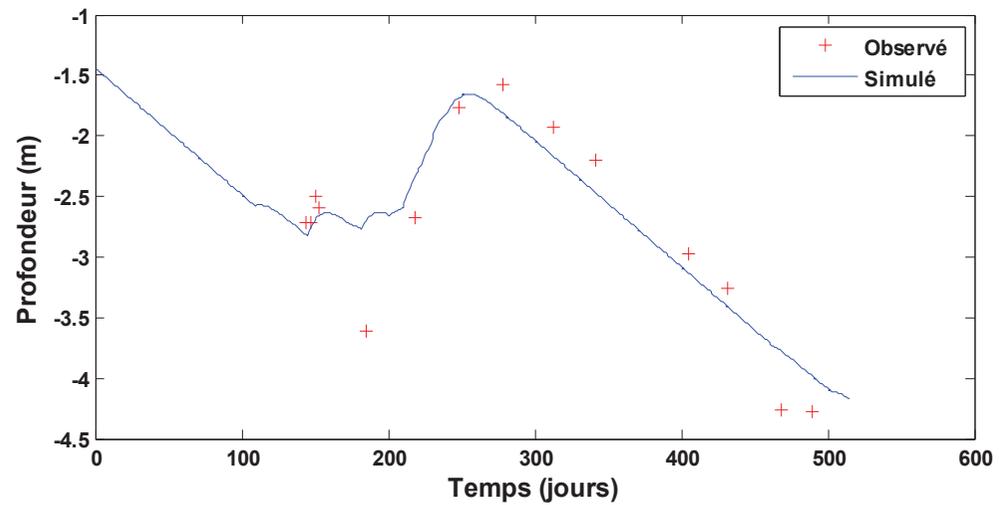
**f : Puits PP3**



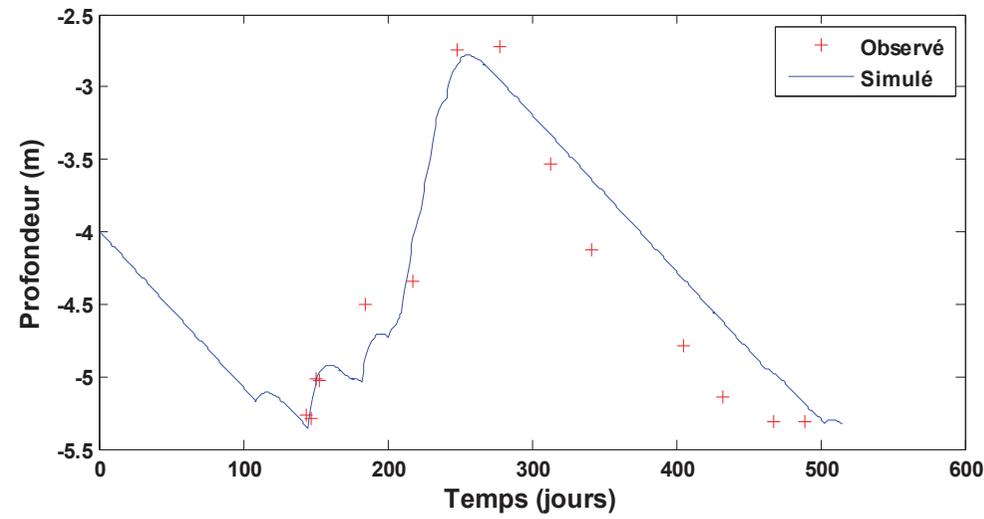
**g : Puits PP5**

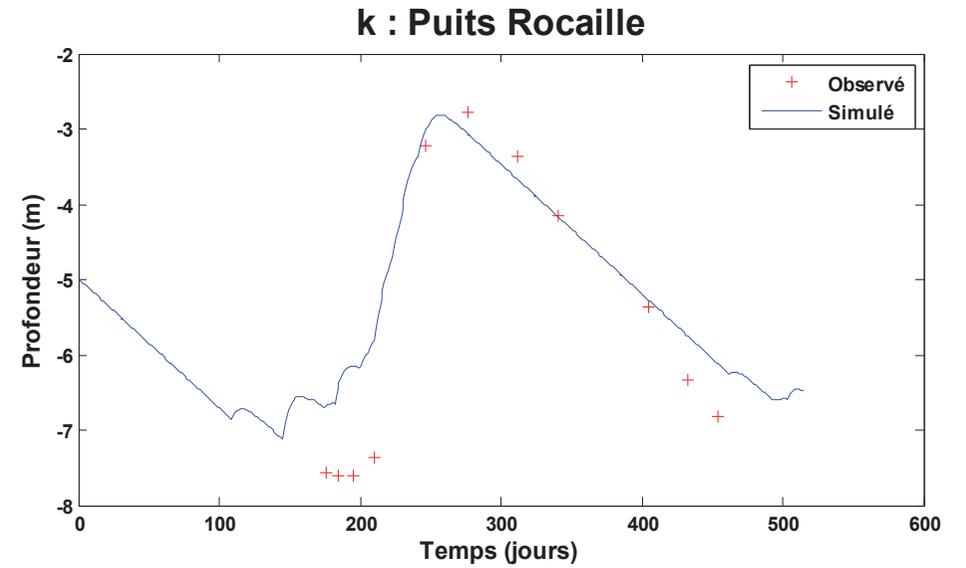
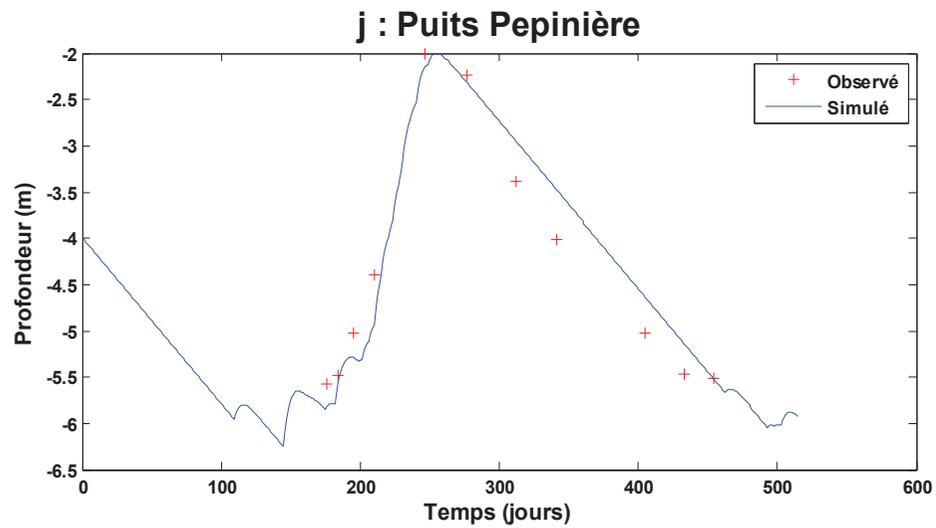


**h : Puits PP6**



**i : Puits PP7**





**Figure 4.2 :** Simulations des niveaux piézométriques pour les sites de l'Université de Ouagadougou (a, b, c, d); du quartier Zogona (e, f, g h, i) et du parc Bangr Weogo (j, k)

### 3. 3. 2 Simulation de la chronique piézométrique du piézomètre du CIEH entre 1978 et 2014

Il n'a pas été possible de reproduire l'ensemble de la chronique avec un jeu unique de paramètres, que soit par ajustement manuel ou automatique, en utilisant les différentes méthodes d'inversion fournies par Matlab, ni même en modifiant le comportement du réservoir moyen du modèle ou bien en rajoutant un réservoir supplémentaire. Ceci peut s'expliquer si les paramètres hydrologiques du site ont changé au fur et à mesure de son aménagement depuis 1978. En particulier, la baisse du niveau au début de la chronique, puis sa remontée a nécessité un changement de paramètres à partir de 1990. Il a été décidé de rallonger le  $t_{\text{moy}}$  en réponse à la baisse du niveau. Cependant le changement le plus sensible a porté sur la perte et a été attribué à la plantation d'arbres à racines profondes sur le site en même temps que son aménagement. De même la remontée du niveau moyen d'environ 1,50 m à partir de 2012 ne peut pas s'expliquer avec un jeu de paramètre constant. Le jeu de paramètres du tableau 4 permet de reproduire au mieux le comportement du système durant toute la période de cette chronique piézométrique

**Tableau 4.3** Paramètres utilisés pour la modélisation de la chronique longue au CIEH

	$r_{\text{sup}}$ (mm)	ETP (mm)/an	$t_{\text{moy}}$ (jours)	Ruisselle ment	Coef d'emmagasinement	Perte (mm/an)		$h_{\text{inf}}$ (m)
<b>1978-2014</b>	9	2000	10	65,3%	6%	<u>1978 1990</u> 103,37	<u>1991-2013</u> 92,42	-6.5
<b>2012-2014</b>	9	2000	10	65,3%	6%	<u>Jan 2012- Mai 2013</u> 182,43	<u>Juin à Déce. 2013</u> 92,42	-6.5
<b>Mai 2013 Mai 2014</b>	9	2000	10	65,3 %	6%	92,42		-7

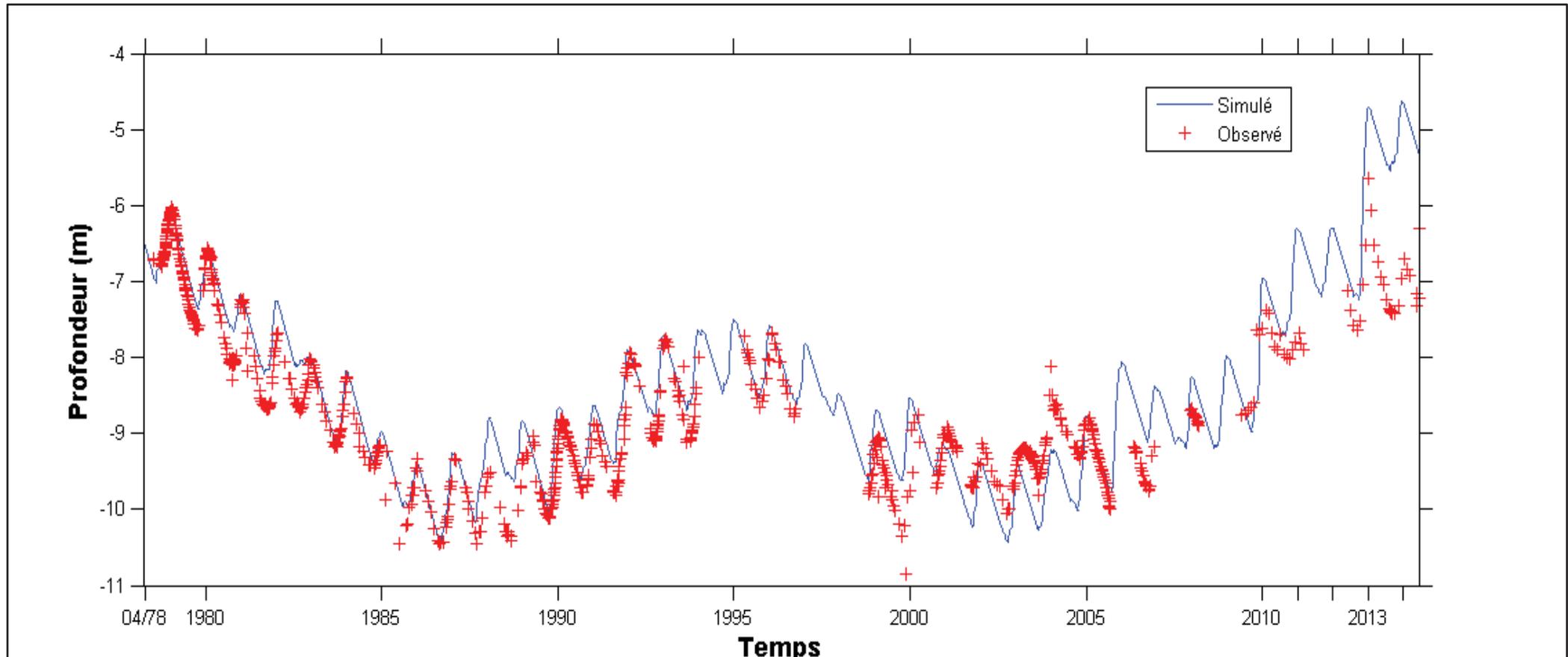
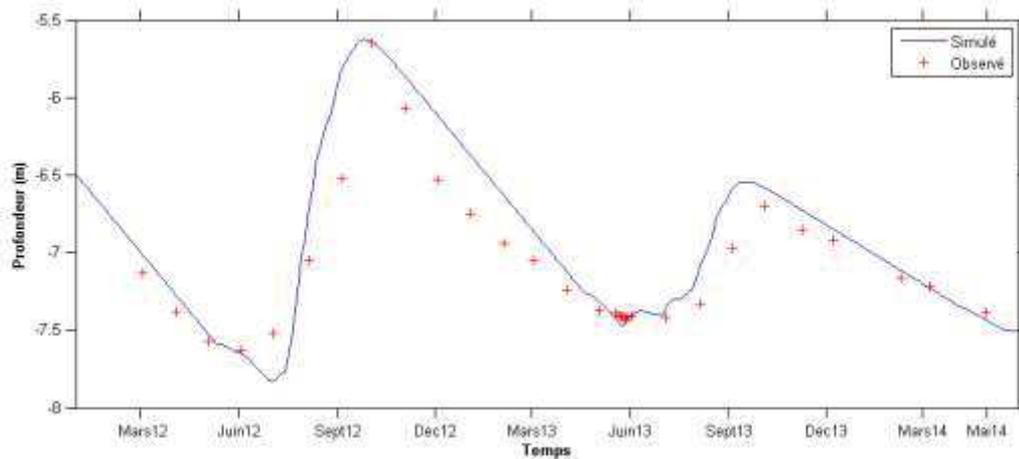


Figure 4.3 : Simulation des niveaux piézométriques du piézomètre du CIEH de 1978 à 2014



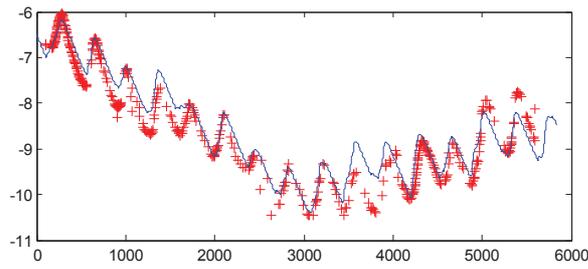
**Figure 4. 4 :** Simulation des niveaux piézométriques du piézomètre du CIEH pour la période 2012 – 2014

### 3. 3. 3 Sensibilité des paramètres

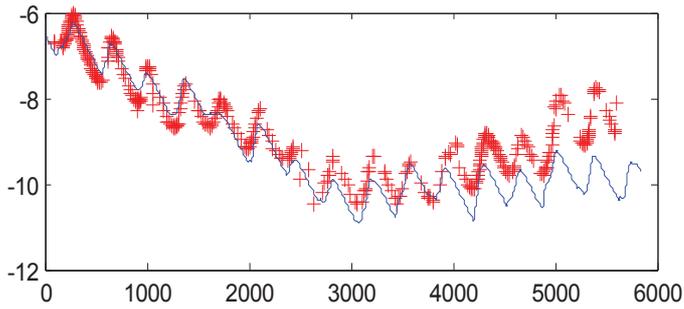
La modélisation du piézomètre du CIEH entre les années 1978 et 1994 a été utilisée pour évaluer la sensibilité du modèle à un changement de 5% des différents paramètres (Tableau 4. 4). Ce tableau confirme, pour une chronique ajustée de manière satisfaisante, que les paramètres les plus sensibles sont dans l'ordre le ruissellement, la perte, le coefficient d'emménagement, le niveau piézométrique initial (h-inf), l'épaisseur du réservoir supérieur(r-sup) et le temps de vidange du réservoir intermédiaire (t-moy)

**Tableau 4. 4** Variations de l'erreur quadratique moyenne de la simulation du piézomètre du CIEH pour un changement de 5% des différent paramètres du modèle (période de simulation : 1978 – 1994)

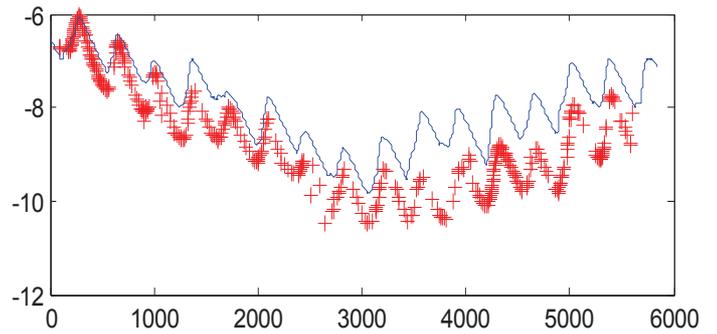
Paramètres	Coefficient d'emménagement		Ruissellement		Perte (mm/an)		h-inf		r-sup		t-moy	
	Valeur (%)	Erreur (m)	Valeur (%)	Erreur (m)	Valeur (mm/an)	Erreur (m)	Valeur (m)	Erreur (m)	Valeur (mm)	Erreur	Valeur (jours)	Erreur
+5%		0,55		1,08		0,65		0,31		0,34		0,33
0%	6%	0,31	65,3%	0,31	4,72	0,31	-6,5	0,31	9	0,31	15	0,31
-5%		0,82		1,31		0,88		0,56		0,52		0,31



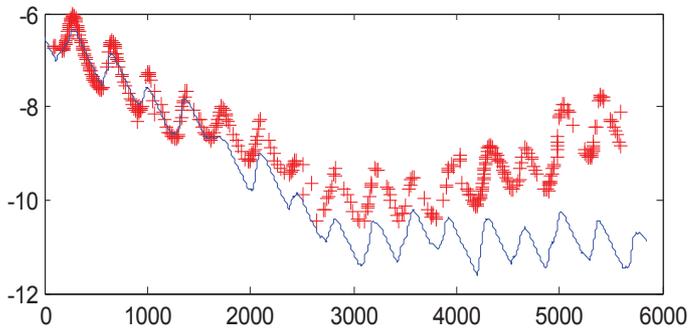
**Sensibilité : Porosité + 5%**



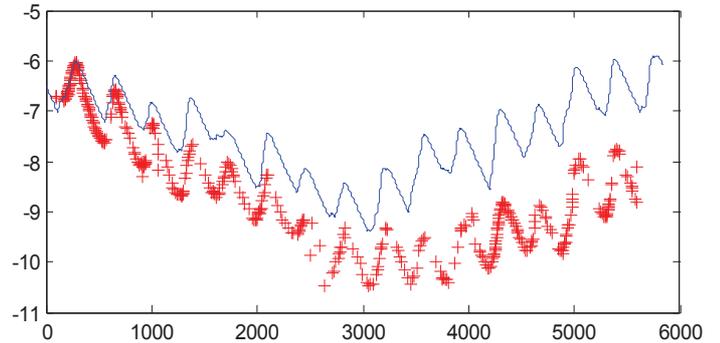
**Sensibilité : Porosité - 5%**



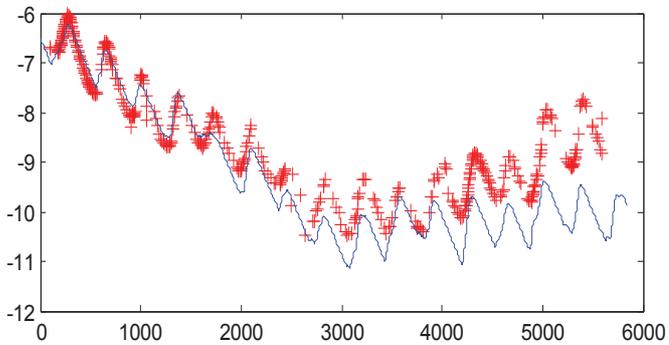
**Sensibilité : Ruissellement + 5%**



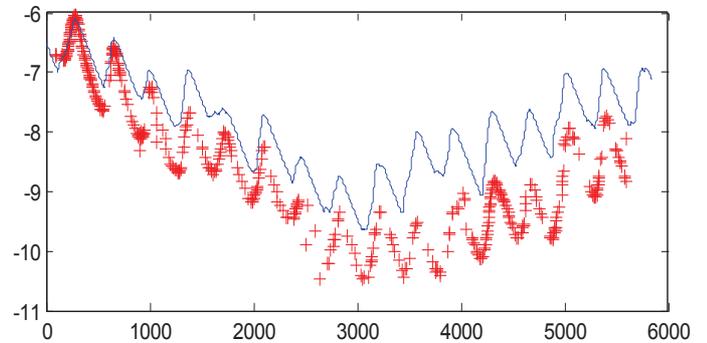
**Sensibilité : Ruissellement - 5%**



**Sensibilité : Perte + 5%**



**Sensibilité : Perte - 5%**



**Figure 4.5** : Simulation du piézomètre du CIEH pour un changement de 5% des différents paramètres du modèle (période de simulation 1978 – 1994)

### 3. 3. 4 Discussion

La modélisation avec le même outil numérique des différents puits et forages de cette étude autorise à effectuer des comparaisons des différents termes de leur bilan hydrologique. Cependant les particularités du modèle rendent difficile les comparaisons des valeurs absolues de ruissellement et d'ETR avec celles publiées par ailleurs. En effet, dans notre modèle, le ruissellement se produit à la base du réservoir superficiel après prélèvement de l'ETR qui n'est limitée que par l'ETP et par la quantité d'eau disponible dans ce réservoir. Ceci revient à sous-estimer le ruissellement et à surestimer l'ETR. D'autre part le choix de conserver l'emménagement à 6% compte tenu de l'homogénéité du substratum géologique fait porter toute la variabilité par les paramètres ETR et ruissellement. Dans nos modèles, le ruissellement est autour de 15 - 20% avec plusieurs exceptions notables; il est à 28% au piézomètre du CIEH, autour de 4% dans la zone inondable de Zogona et quasiment nul au Parc Bangr Weogo qui est une zone naturelle arborée favorisant donc l'infiltration et l'ETR. Le piézomètre du CIEH se situe dans une zone de creux piézométrique marqué et son amplitude annuelle est la plus faible de notre réseau ce qui peut s'expliquer par une lame d'eau infiltrée faible. Avec une estimation de transmissivité de l'aquifère, il est possible de calculer un ordre de grandeur du débit convergeant vers le piézomètre du CIEH du fait du creux piézométrique. Le faible débit disponible au forage du CIEH (1,5 m<sup>3</sup>/h, Savadogo, pers. com., 2013) indique une faible influence du niveau fissuré et nous retiendrons donc à titre d'ordre de grandeur une transmissivité de  $6 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s. Si l'on considère que le creux piézométrique est de diamètre 500 m avec un gradient moyen de 0.5 m/100 m, le creux peut s'expliquer par une anomalie de lame d'eau infiltrée de 7 cm à 180 cm si on suppose que cette anomalie se produit sur un disque de 500 m à 50 m de diamètre. Le tableau 3 du bilan des modèles indique que la quantité d'eau ruisselée est plus importante de 68 mm par rapport aux piézomètres et forages voisins. L'étanchéification des surfaces au voisinage du piézomètre du CIEH correspondant à la construction progressive des bâtiments de l'Université et de la fondation 2iE pourrait donc à la fois expliquer le creux piézométrique comme la faiblesse des amplitudes piézométriques annuelles pour la période postérieure aux années 90.

Il faut noter d'autre part que la modélisation des années 2012 et 2013 du piézomètre du CIEH repose sur un doublement temporaire de la perte puis son retour à sa valeur initiale. La pluviométrie de 2012 a été de 1040 mm dont 419 mm durant le seul mois de juillet. Notre modèle essentiellement calibré durant des périodes sèches (1978-1990 pour le CIEH et 2013

- 2014 pour l'ensemble du réseau) ne modélise pas de manière consistante l'année 2012 - 2013. Ce défaut pourrait être corrigé en introduisant une perte variable d'une année sur l'autre, à condition de disposer d'une série d'années humides pour la calibration.

Ainsi que cela a été signalé plus haut, les valeurs de ruissellement déduites d'analyses des écoulements de surface à Ouagadougou sont nettement plus importantes que celle de nos modèles : de 24% à 67% suivant Le Barbe (1982) et 50% en moyenne d'après Bouvier et Desbordes (1990).

## **4 Conclusion**

L'eau souterraine est présente à de faibles profondeurs à Ouagadougou, surtout en fin de saison des pluies. Elle fournit une ressource facilement accessible, mais cependant sujette à la pollution. Celle-ci est largement utilisée à Ouagadougou y compris dans certains cas pour l'eau de boisson. Dans la zone de Zogona, qui est un quartier traditionnel ancien, nous en avons trouvé deux exemples.

L'établissement d'un mini réseau piézométrique en ville et son suivi sur une année hydrologique permettent de tirer des conclusions sur la ressource en eau. La modélisation simplifiée (ici avec un modèle à 3 réservoirs) des variations des niveaux piézométriques sur une région géologiquement homogène pendant une année hydrologique permet d'effectuer une comparaison des paramètres des modèles et donc des termes du bilan hydrologique pour des occupations des sols variés : une zone verte naturelle, une zone urbanisée avec forte densité d'arbres, un quartier d'urbanisation ancienne.

Cependant, la tentative de modélisation du piézomètre du CIEH sur une période pluridécennale montre que la modélisation sur une année ne peut être extrapolée sur une plus longue période. Nous avons été amenés à attribuer la dérive des paramètres hydrologiques au piézomètre du CIEH aux changements des surfaces urbanisées. Ces changements rendent caduque la procédure de calage d'un modèle sur une période, puis son évaluation sur une période ultérieure. D'autre part notre modèle, validé essentiellement sur une année sèche, 2013 - 2014 (604 mm) ainsi que sur la période 1978 - 1994, aussi une période sèche, s'est

avérée incapable de reproduire de manière satisfaisante l'année 2012 - 2013, caractérisée par une pluviométrie de 1040 mm dont 419 mm pour le seul mois de juillet.

Il est important de pouvoir prédire le comportement des ressources en eau souterraines de la ville de Ouagadougou pendant les futurs changements climatiques. Le travail de modélisation du CIEH effectué ici montre qu'il faut pouvoir prendre en compte les changements de propriétés hydrologiques des surfaces résultant des changements d'occupation des sols. D'autre part le modèle utilisé devra être calibré pour des années caractéristiques sèches et humides. Ceci requiert des séries longues.

Il est donc important de disposer dans la région de Ouagadougou d'un jeu de piézomètres de référence suivis sur des périodes pluridécennales. Le piézomètre du CIEH doit continuer à être suivi. Les nombreuses interruptions dans son suivi depuis les années 90 sont bien sur préjudiciables à une modélisation détaillée mais n'empêchent pas la compréhension des grandes tendances dues au climat ou bien concernant l'aménagement de l'espace. Un des puits du Parc Bangr Weogo pourrait être préservé de toute exploitation et réservé à un suivi piézométrique dans un environnement naturel. Dans le même ordre d'idées, on pourrait reprendre le suivi d'un certain nombre de piézomètres sur le pourtour de la ville de Ouagadougou.

## **Chapitre 5 : Qualité de l'eau souterraine de quelques puits à Ouagadougou**

## 1 Introduction

Depuis les années 1990, des teneurs excessives en nitrates sont détectées en Afrique de l'Ouest dans les aquifères superficiels exploités par les riverains. Cette pollution est la plupart du temps localisée à l'environnement immédiat des forages et puits en relation avec leur mauvaise protection (Travi *et al.* 1997).

Pour étudier la qualité des eaux à Ouagadougou, nous avons effectué des prélèvements sur deux sites représentatifs. Le premier est situé dans le quartier de Zogona où s'exercent des activités anthropiques et le deuxième est dans une zone de maraîchage. Pour cette étude, deux analyses chimiques de l'eau des puits ont été effectuées sur huit puits en fin de saison sèche et en hivernage. Ces données chimiques ont été traitées par le logiciel Diagramme du LHA puis interprétées.

Nous nous sommes intéressés en particulier aux nitrates qui font partie des principaux indicateurs de pollution des eaux souterraines et qui présentent des concentrations élevées à Ouagadougou.

Au Burkina Faso, pays de l'Afrique de l'Ouest soumis à un climat de type soudano-sahélien, l'eau est un enjeu important pour les populations et pour les activités qui en sont tributaires. Depuis les années 1980, plusieurs programmes d'études, de campagnes et d'investigation à court et moyen termes ont donc été réalisés pour faire face au problème urgent de la gestion durable de l'eau. Les eaux de surface ayant montré leur limite du fait de leur vulnérabilité, on a eu recours aux eaux souterraines qui ne sont également pas épargnées par la pollution anthropique.

A Ouagadougou, avec la rapide croissance démographique, les problèmes d'alimentation en eau en quantité et en qualité sont récurrents. Le développement du réseau d'adduction d'eau potable ne se fait pas au même rythme que celui de la ville qui s'étale, et est confrontée aux problèmes d'alimentation en eau, en quantité et surtout en qualité.

La présente étude se propose d'analyser succinctement quelques données hydrochimiques obtenues sur les huit points de prélèvement relatifs aux deux sites représentatifs. Les deux campagnes de prélèvement en saison sèche (juin 2013) et à la fin de la saison des pluies (octobre 2013) ont permis d'évaluer l'évolution de la qualité de l'eau sur deux secteurs aux conditions environnementales différentes, Zogona (zone urbaine) et autour du barrage N°3 (zone de maraîchage et d'horticulture). Les eaux analysées ont été prélevées dans des puits et à quelques mètres de profondeur.

## 2. Les données

### 2.1 Les paramètres in situ

Sur les huit puits échantillonnés et analysés, trois variables ont été mesurées sur le terrain : la température, la conductivité et le pH.

**Tableau 5. 1** : Valeurs caractéristiques des paramètres in situ des eaux de puits

Paramètres	T° C	pH	CE <sub>20°C</sub>
Moyenne	28,82	6,54	904,12
Médiane	28,90	6,57	782,00
Mini	28,30	5,43	305,00
Maxi	29,20	7,05	1992,00
Ecart type	0,36	0,46	578,91

La distribution de ces variables (Tableau 5.1) appelle les remarques suivantes:

- ✓ la température de l'eau prélevée varie entre 28°C et 29 °C. Elle est proche de la température moyenne atmosphérique durant la saison des pluies, ce qui indique un équilibre thermique entre les eaux des puits et l'atmosphère.
- ✓ les valeurs de pH mesurées sont comprises entre 5,43 à 7,05. Les valeurs faibles pourraient être dues au lessivage des acides organiques provenant de la végétation en décomposition pour les puits de la zone de maraichage, ainsi qu'à la présence d'acide carbonique de l'atmosphère pour les puits de Zogona. La concentration en CO<sub>2</sub> du sol maintient le pH acide en milieu ouvert. En saison de pluie le pH des eaux des puits du jardin est proche de la neutralité, soit pH=7,

- ✓ les conductivités mesurées sont comprises entre 305 et 1992  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cette conductivité varie entre 776  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 1458  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en saison sèche et entre 305  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 1992  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en saison des pluies. Une médiane de 782  $\mu\text{S}/\text{cm}$  témoigne d'eaux relativement minéralisées. La majorité des eaux de la zone d'étude présentent une minéralité élevée avec des maximums de 1760  $\mu\text{S}/\text{cm}$  au niveau du puits PP6 et de 1992  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour le puits PP4 en saison des pluies.

On remarque que les eaux de Zogona comme celles de la zone de maraichage présentent des conductivités électriques plus élevées en saison des pluies. Le puits PP6 fait exception avec une conductivité électrique élevée quelle que soit la saison. On verra avec les analyses des ions majeurs que ces valeurs élevées de conductivité correspondent à des pollutions locales ou ponctuelles des nappes correspondant à la présence, dans l'environnement immédiat, de latrines, d'ordures ménagères et de cultures. Ceci corrobore les observations de Yaméogo *et al.* 2013.

## 2.2 Caractéristiques chimiques des eaux

Dix variables ont été analysées: les teneurs en bicarbonate, chlorure, sulfate, phosphate, nitrate, nitrite, sodium, potassium, calcium, magnésium.

De manière globale, on observe que les bicarbonates sont les ions dominants avec un maximum de 363 mg/L en saison sèche et de 633 mg/L en saison de pluie. On remarque que les sulfates, le potassium, le sodium et les nitrates montrent des écarts importants en saison sèche avec des coefficients de variation élevés de l'ordre 106%, 195%, 97% et 77% respectivement. Par contre en saison des pluies seuls les sulfates et les nitrates conservent une variabilité importante, avec des coefficients de variation 112 % et 100% (Tableau 5.2 et 5.3).

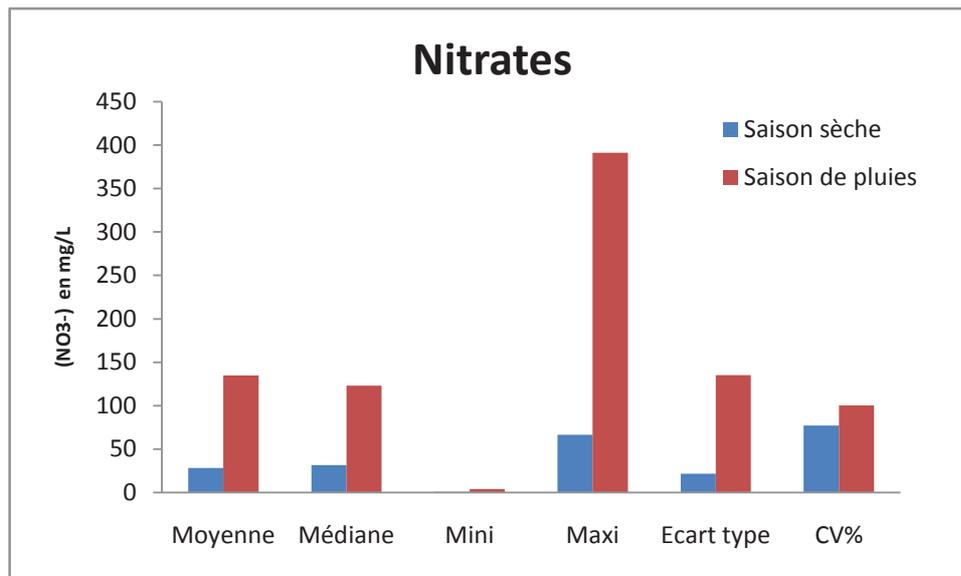
Au niveau des moyennes, les teneurs en Ca,  $\text{HCO}_3$ , et Cl sont multipliées par 2, la plus forte progression étant celle des nitrates avec une moyenne de 28 mg/L en saison sèche qui passe à 135 mg/L en saison des pluies (Figure 5.1).

**Tableau 5.2 :** Concentrations caractéristiques en éléments majeurs de huit analyses en saison sèche

[mg/L]	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Moyenne	45,18	33,93	46,61	26,40	200,69	7,84	19,88	28,11	0,91
Médiane	44,70	27,25	32,80	8,25	142,15	6,60	9,00	31,68	1,01
Mini	30,90	15,00	7,00	2,30	72,00	2,74	2,00	0,88	0,43
Maxi	64,80	69,60	135,10	153,00	363,20	20,11	48,00	66,44	1,23
Ecart type	11,96	17,78	45,48	51,55	133,58	5,61	21,14	21,67	0,29
CV%	26,47	52,41	97,56	195,28	66,56	71,59	106,37	77,10	32,33

**Tableau 5.3:** Concentrations caractéristiques en éléments majeurs de huit analyses en saison des pluies

[mg/L]	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Moyenne	80,88	29,91	59,75	16,51	332,46	14,01	28,75	134,70	0,65
Médiane	83,90	32,20	49,10	11,30	317,85	11,24	18,00	123,20	0,56
Mini	30,20	7,80	15,10	5,20	104,90	3,05	2,00	3,96	0,24
Maxi	138,10	45,50	112,90	34,20	633,20	26,11	94,00	391,16	1,36
Ecart type	41,66	13,81	34,50	10,85	194,39	9,69	32,21	135,08	0,38
CV%	51,52	46,17	57,74	65,69	58,47	69,17	112,03	100,29	57,66



**Figure 5.1:** Représentation graphique des concentrations caractéristiques en nitrate des huit analyses des eaux souterraines de Ouagadougou.

L'examen détaillé des résultats des analyses chimiques des ions majeurs, présentés dans les tableaux 5.4 et 5.5, montre une certaine hétérogénéité chimique. Si on considère les concentrations des cations dans les puits du jardin, PJ1, PJ2, PJ4 l'ordre d'abondance en saison sèche (Tableau 5.4) est le suivant:

- ( $Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+ > K^+$ ) dans les eaux du puits PJ4
- ( $Mg^{2+} > Na^+ > Ca^{2+} > K^+$ ) dans les eaux du puits PJ2
- $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$  dans les eaux du puits PJ1

On observe aussi que le potassium est généralement le cation le moins abondant.

En ce qui concerne les puits de Zogona, 3 types de relations peuvent être observées:  $Mg > Ca > Na$  (PP2 et PP7),  $Ca > Mg > Na$  (PP3 et PP4) et  $Na > Mg > Ca$  (PP6).

Pour les concentrations en anions, les ions bicarbonates dominent largement dans tous les puits prélevés quelle que soit la saison.

Dans la zone de maraichage, les concentrations en nitrates sont faibles et nettement inférieures à celles des chlorures, excepté pour le puits PJ2 où  $SO_4$  est nettement supérieur à Cl.

**Tableau 5. 4** Concentrations en éléments majeurs en saison sèche pour chaque puits

[mg/L]	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
PJ1 s	47,50	25,00	84,00	3,20	348,30	7,65	40,00	0,02	0,88	1,07
PJ2 s	49,70	69,60	61,60	12,40	360,80	8,10	48,00	0,06	17,16	0,56
PJ4 s	41,90	26,90	11,30	10,90	175,70	5,26	8,00	0,01	1,32	0,43
PP2 s	30,90	31,10	19,40	5,60	98,80	5,55	2,00	0,07	29,04	1,08
PP3 s	33,60	15,00	8,30	2,30	72,00	2,84	2,00	0,04	35,64	0,94
PP4 s	57,40	24,50	46,20	<b>21,10</b>	78,10	10,45	10,00	0,10	66,44	1,19
PP6 s	64,80	51,70	135,10	<b>153,00</b>	363,20	20,11	47,00	1,14	34,32	0,78
PP7 s	35,60	27,60	7,00	2,70	108,60	2,74	2,00	0,14	40,04	1,23

Dans la zone de Zogona les teneurs en nitrates sont nettement supérieures. Les teneurs en Cl et SO<sub>4</sub> sont sensiblement identiques excepté pour PP6 pour lequel NO<sub>3</sub> est relativement faible et SO<sub>4</sub> plus élevé.

On observe donc en fin de saison sèche des concentrations relativement élevées en chlorures, sulfates et nitrates si on les compare aux concentrations généralement faibles relevées dans les eaux issues des aquifères granitiques superficiels (Travi et al. 1985, Onugba, 1990 ; Mbonu *et al*, 1991). On peut remarquer que c'est également souvent le cas pour l'ensemble des eaux des nappes captées par les puits de Ouagadougou (Yameogo. 2008).

En saison des pluies (Tableau 5. 5) on observe une nette augmentation relative des concentrations en Ca pour la zone de maraîchage et à la fois en Ca et Na pour la zone de Zogona.

Pour les anions, les bicarbonates, toujours les plus abondants, marquent une croissance particulièrement nette dans la zone de maraîchage. Dans cette même zone Cl et SO<sub>4</sub> évoluent peu sauf pour PJ1. A Zogona SO<sub>4</sub> évolue peu alors que Cl marque une croissance significative sauf pour PP3.

Les nitrates marquent une augmentation très nette excepté pour PJ4. Cette augmentation est particulièrement forte dans le secteur de Zogona où les concentrations dépassent nettement les normes OMS de potabilité (50 mg/L).

Les concentrations très élevées en nitrates, calcium, sodium et dans une moindre mesure en magnésium et potassium montrent à l'évidence l'impact des apports de surface qui entraînent une augmentation de la minéralisation des eaux souterraines pendant les mois les plus arrosés. La comparaison de cette évolution avec celle d'autres ions devrait fournir des indices sur l'origine de ces éléments, comme discuté un peu plus loin.

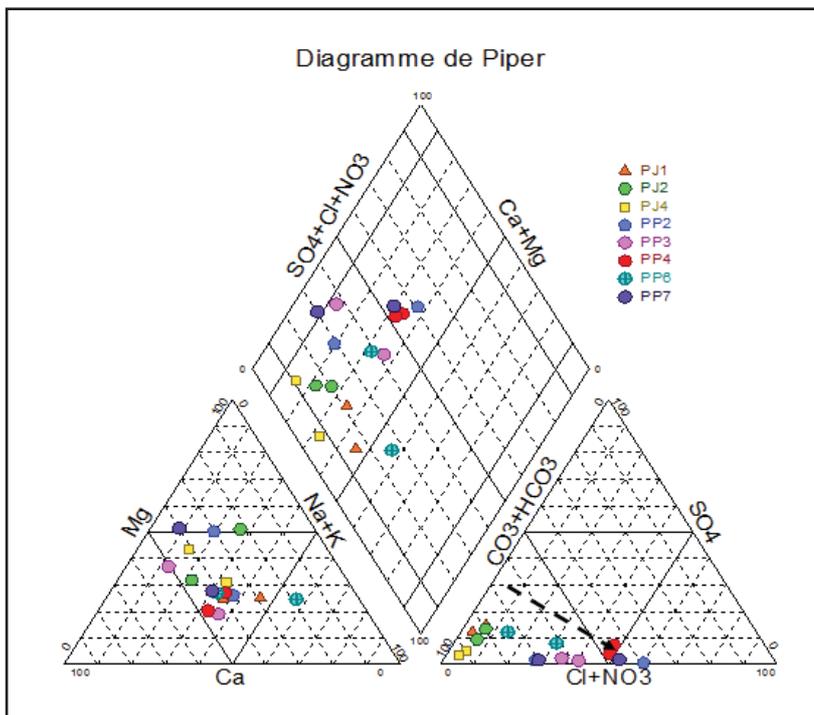
**Tableau 5. 5** Concentrations en éléments majeurs en saison des pluies pour chaque puit

[mg/L]	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
PJ1 h	117,60	43,40	112,90	7,70	633,20	24,17	94,00	0,19	7,04	0,54
PJ2 h	97,80	41,00	48,00	9,50	494,10	8,02	43,00	0,09	23,32	0,31
PJ4 h	34,20	17,80	15,10	34,20	211,10	3,05	6,00	0,01	3,96	0,24
PP2 h	45,10	19,40	46,20	10,10	126,90	10,90	2,00	2,11	178,20	0,46
PP3 h	30,20	7,80	25,10	5,20	104,90	3,26	2,00	2,08	68,20	1,36
PP4 h	138,10	36,10	94,60	25,70	424,60	26,11	30,00	2,04	391,16	1,03
PP6 h	114,00	45,50	85,90	27,20	456,30	25,00	47,00	0,07	186,12	0,58
PP7 h	70,00	28,30	50,20	12,50	208,60	11,58	6,00	0,06	219,56	0,69

Reportées sur un diagramme de Piper les données analytiques permettent de visualiser les faciès chimiques et l'évolution relative des éléments entre les deux périodes de mesure (figure 5.2)

Au niveau du triangle des cations la plupart des eaux se situent dans la zone centrale où aucun cation ne domine. On remarque que les eaux de la saison sèche sont proches du pôle magnésien alors que certaines (deux échantillons) se situent nettement vers le pôle sodique. Dans le triangle des anions, les points sont logiquement regroupés autour du pôle bicarbonaté avec une tendance vers le pôle chloruré nitraté, en particulier pour les points correspondant à la saison des pluies, influencés par l'augmentation des teneurs en nitrates, comme vu précédemment.

Il y a donc deux faciès dominant : des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes, et des eaux chlorurées/nitratées calciques et magnésiennes. Seul le point PP6 présente un faciès bicarbonaté sodique en saison sèche.



**Figure 5.2** : Faciès chimique de l'ensemble des eaux de la zone d'étude.

### 3. Variation des concentrations (en particulier nitrates et chlorures) au cours de la saison des pluies dans les puits du jardin et les puits de Zogona : origine des pollutions

Dans les milieux cristallins, nitrates et chlorures sont les 2 éléments dont l'origine est essentiellement anthropique. Leur évolution comparée peut donc fournir des informations sur l'origine des pollutions. Les autres éléments, dont l'origine diverse implique une évolution plus difficile à interpréter, peuvent également être utilisés.

#### 3.1 Variation des teneurs en nitrate dans les puits du jardin et les puits de Zogona

La concentration en nitrates dans les puits (PJ1, PJ2 et PJ4) (Figure 5.3) ne dépasse pas les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) fixées à 50 mg/L, mais on constate qu'elle augmente sensiblement en saison des pluies. Les puits PJ1 et PJ2 sont à 30 m du barrage n°3 dans une zone de maraichage où on utilise parfois des pesticides et des engrais. Le PJ4 est situé à une centaine de mètre du barrage tout près d'une habitation et non loin du canal central. La pollution semble donc indépendante de la proximité du barrage.

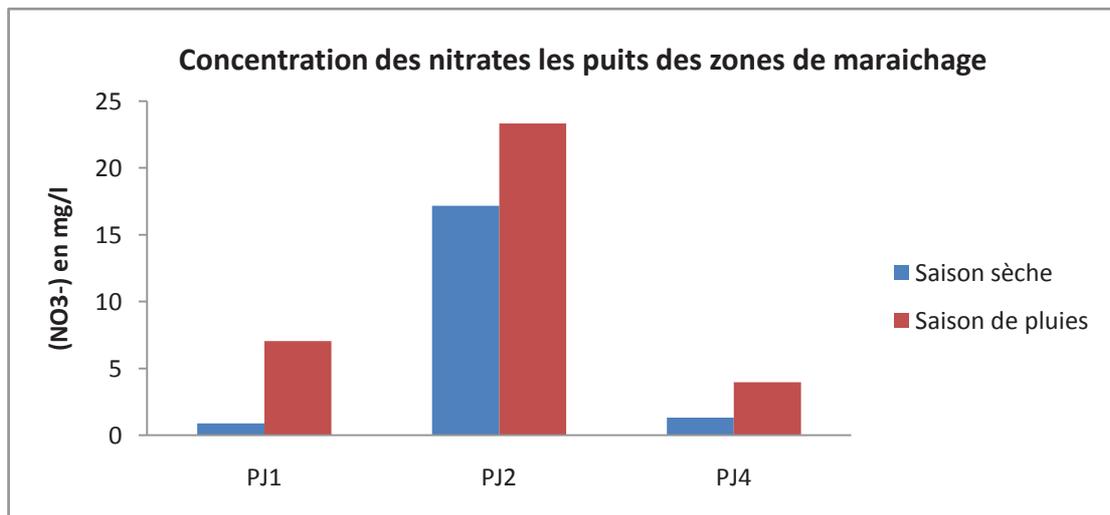
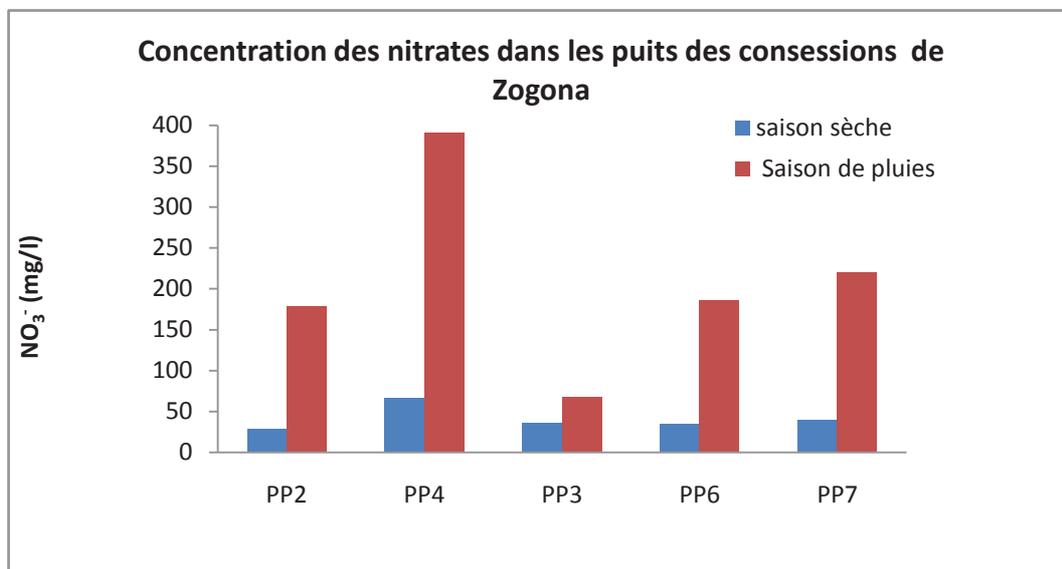


Figure 5.3 : Représentation graphique des concentrations en nitrates dans les eaux du jardin.

Dans le secteur de Zogona, le puits PP4 a une teneur de 66,44 mg/l en saison sèche et de 391,16 mg/l en saison de pluies. Au puits PP7 on observe 40,04 mg/l en saison sèche et 220 mg/l en saison des pluies (Figure 5.4). Ces puits, généralement mal protégés, sont également situés à quelques dizaines de mètres des latrines et des fosses septiques dans les concessions de Zogona.

Les teneurs en saison sèche sont relativement équivalentes, mais évoluent différemment en saison des pluies. Le puits PP3 étant le mieux protégé (cf chap.1) ses fortes concentrations en nitrates semblent indiquer, au moins partiellement une origine superficielle liée à l'alimentation (recharge).

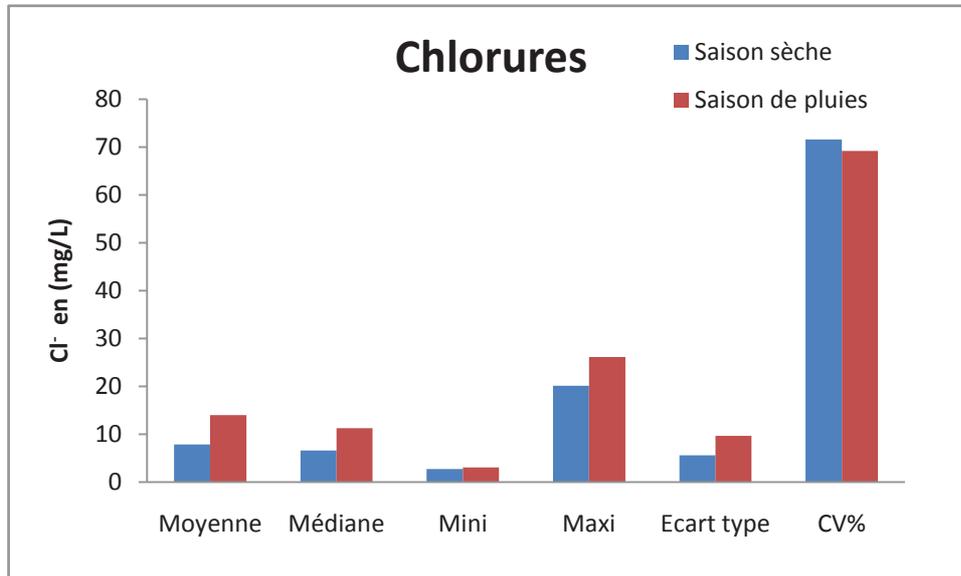


**Figure 5.4** : Représentation graphique des concentrations en nitrates dans les eaux de Zogona.

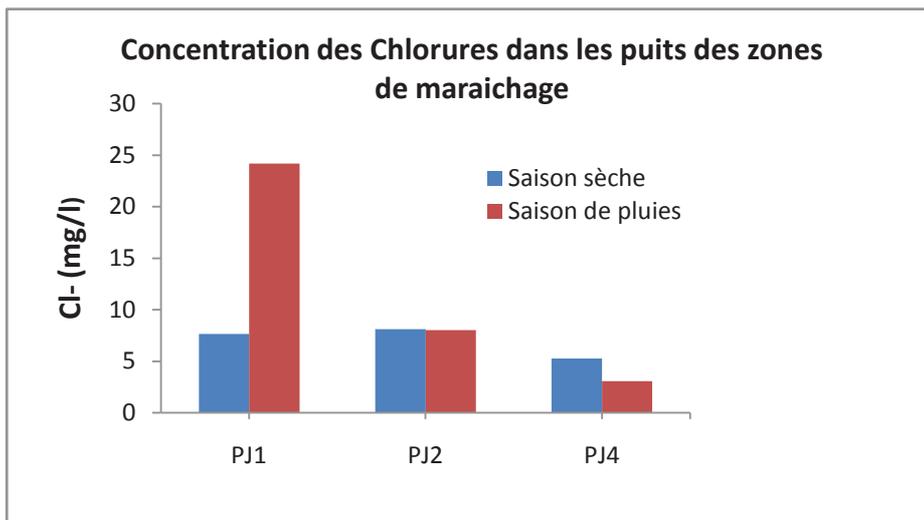
### **3.2 Variation des chlorures au cours de la saison des pluies dans les puits de la zone de maraichage et les puits de Zogona**

Les chlorures sont bien en dessous des normes (250 mg/l). Ils ont un comportement légèrement différent de celui des nitrates dans la zone de maraichage où seul le puits PJ1 voit ses concentrations augmenter parallèlement à celui des nitrates. En revanche, ils ont un comportement

très similaire au cours de l'hivernage dans la zone de Zogona, à l'exception de PP6 où Cl augmente peu (Figures 5.5 ; 5.6 ; 5.7).



**Figure 5.5** : Représentation graphique des concentrations en chlorures des huit analyses des eaux de Ouagadougou.



**Figure 5.6** : Représentation graphique des concentrations en chlorures dans les eaux des puits de la zone de maraichage.

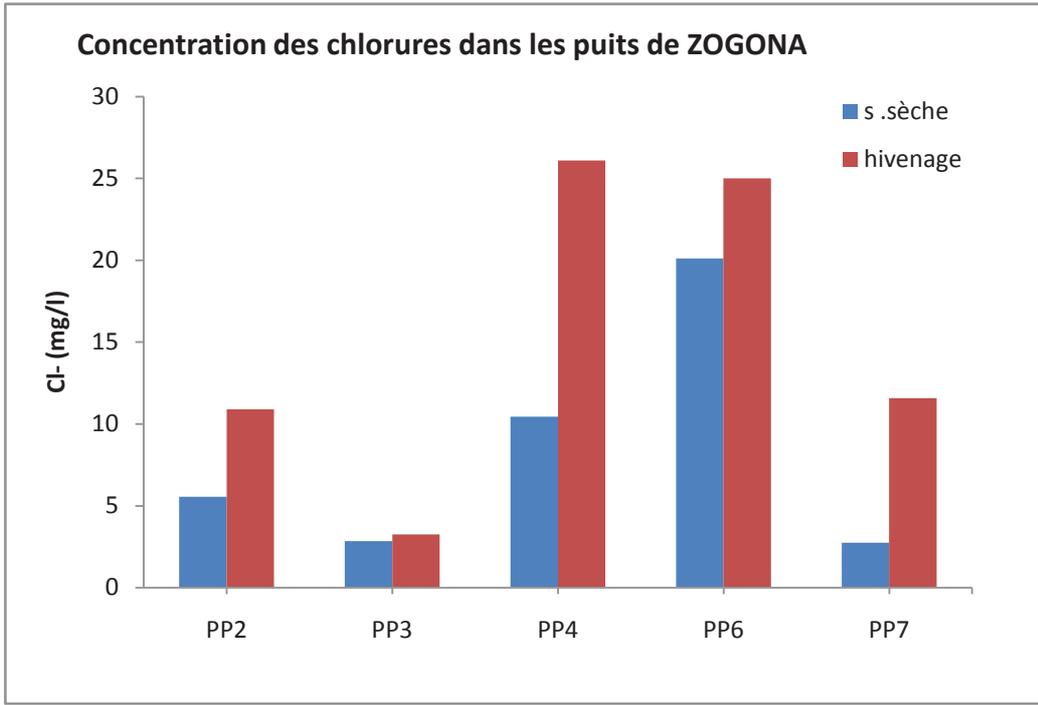


Figure 5.7 : Représentation des concentrations en chlorures dans les eaux du quartier Zogona.

La très forte augmentation au niveau des puits PP4 et PP7 pourrait marquer l'influence des latrines, dont le fond serait atteint par la remontée de la nappe.

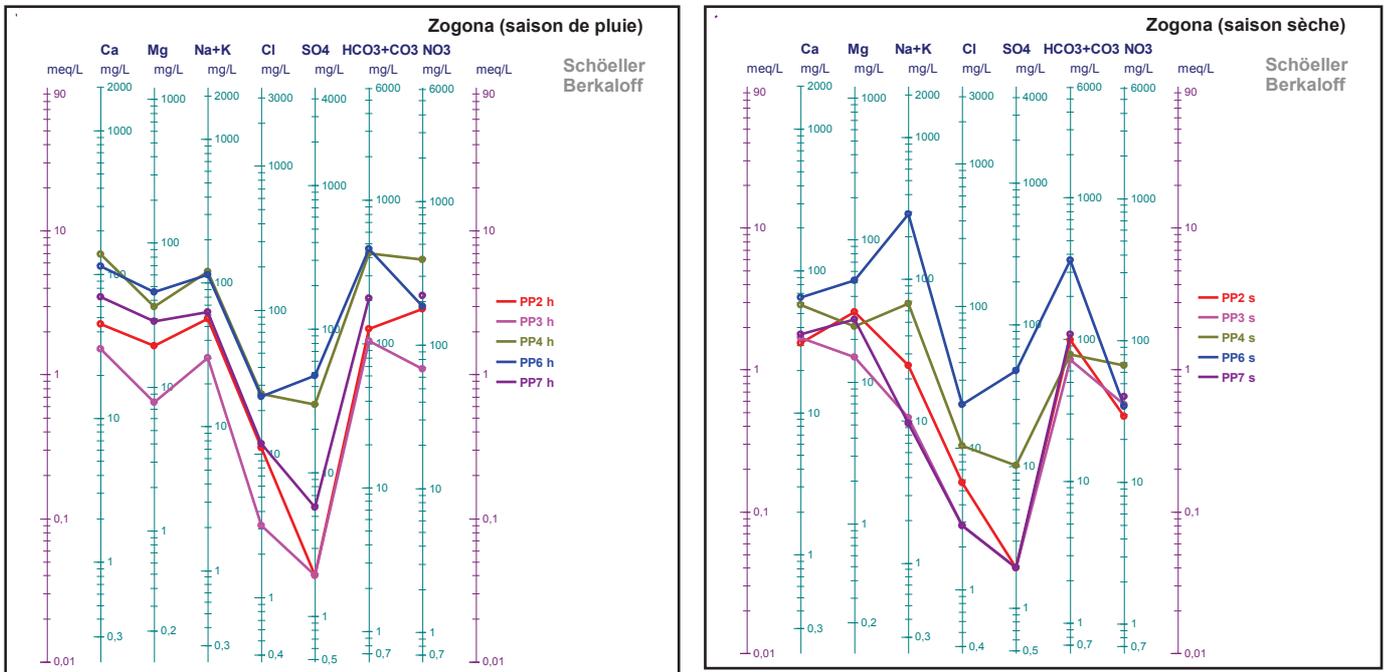
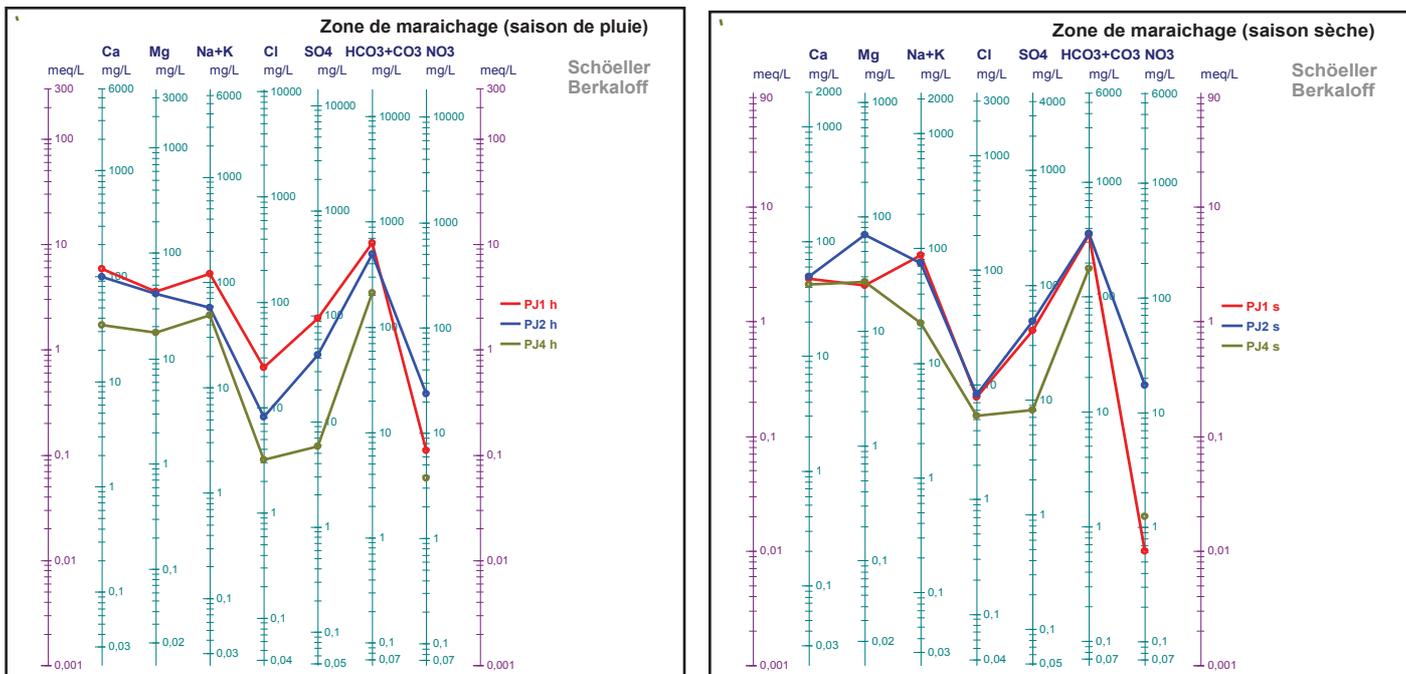


Figure 5.8 : Diagramme de Schoeller – Berkaloff des eaux souterraines de la zone urbaine de Zogona.



**Figure 5. 9** : Diagramme de Schoeller – Berkaloff des eaux souterraines de la zone de maraichage du barrage N°3.

L'examen de l'ensemble des données sur le diagramme de Schoeller permet d'observer l'évolution concomitante de tous les éléments au cours de la saison des pluies sur les 2 zones (figures 5.8 et 5.9). On remarque une assez forte variabilité des comportements. Du fait du petit nombre de points et d'éléments analysés ainsi que de l'incertitude sur les mesures, il n'est pas possible de faire une analyse plus poussée (calculs des indices de saturation, diagrammes de concentrations, éléments trace..), et il paraît ainsi difficile de tracer avec certitude l'origine de la pollution. Il est cependant possible de relever quelques indices.

En premier lieu on note un apport minéral variable, mais systématique, par les eaux d'infiltration, alors que l'on pourrait s'attendre à une dilution de certains éléments comme généralement observé sur un socle cristallin. Ceci témoigne de la présence de nombreux éléments minéralisateurs sur la surface du sol.

Dans le secteur des jardins, seul un point (PJ2) montre des teneurs en nitrate significative, les 2 autres demeurant très proches des valeurs naturelles. Toutefois, tous les points subissent une augmentation significative qui s'accompagne d'une augmentation des cations et de Cl pour le puits PJ1. Outre le lessivage très probable de détritux, on peut y voir l'influence des

phytosanitaires et globalement une pollution (encore modérée) essentiellement issue de l'eau de ruissellement.

Dans le secteur de Zogona, où la pollution apparaît beaucoup plus forte, le puits PP3, qui est le mieux protégé par une margelle, montre les teneurs les plus faibles mais surtout une évolution peu significative de tous les éléments. La pollution par le ruissellement de surface apparaît donc comme non négligeable, directement pour les puits mal protégés. Les puits PP4, PP7 et dans une moindre mesure PP2 montrent une influence des latrines avec une augmentation parallèle de NO<sub>3</sub> et Cl et une augmentation globale des cations en particulier de Na et K. Toutefois les différences observées entre les différents points montrent que les influences sont multiples.

#### **4. La pollution des eaux souterraines par les nitrates à Ouagadougou.**

Pour l'année hydrologique 2013 - 2014 les résultats des analyses chimiques obtenus au cœur de la ville de Ouagadougou sont similaires à ceux trouvés par Yaméogo en 2008 (Figure 5. 10, zone cadrée en jaune). Les analyses effectuées en fin de saison sèche dans les concessions de Zogona à Ouagadougou confirment la teneur moyenne de 35 mg/l en nitrates (avec un puits présentant 66.44 mg/l). Ces teneurs ont quasi triplé, dans tous les puits des concessions, pendant la saison des pluies. Les quelques mesures réalisées au cours de cette étude semblent représentatives de la pollution sur l'ensemble de la ville.

Cette pollution concerne évidemment beaucoup plus la nappe des altérites captée par des milliers de puits traditionnels et modernes pour la consommation humaine. Cela s'explique à la fois par l'insuffisance d'infrastructures d'assainissements adéquats (pollution directe) et un ramassage des ordures déficient (pollution par ruissellement de surface et infiltration) sur beaucoup de quartiers à Ouagadougou notamment à Zogona.

D'après (Travi *et al* 1997), depuis de nombreuses années, des teneurs excessives en nitrates se rencontrent en Afrique de l'Ouest, particulièrement dans les aquifères superficiels. Ces fortes teneurs ont indéniablement pour origine les excréments et les ordures ménagères en relation avec le mode d'habitat, et ont tendance à s'étendre dans les aquifères du socle fracturé là où le recouvrement latéritique est peu épais ou discontinu.



## 5 Conclusion

L'eau souterraine est présente à de faibles profondeurs à Ouagadougou, surtout en fin de saison des pluies. Elle fournit une ressource facilement accessible, mais cependant sujette à la pollution. Cette ressource est largement utilisée y compris dans certains cas pour l'eau de boisson. Quelques ménages continuent en effet à la consommer du fait qu'ils n'ont pas accès à l'eau de robinet de l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA).

Dans la zone de Zogona, qui est un quartier traditionnel ancien, nous en avons trouvé deux exemples.

Les analyses réalisées en 2013 donnent des résultats assez représentatifs de la situation sur l'ensemble de la ville de Ouagadougou. Elles montrent des teneurs en nitrates trois fois supérieures aux normes de l'OMS dans tous les puits de Zogona et exceptionnellement sept fois supérieures au niveau du puits PP4 (391,16 mg/L).

La pollution nitratée reste encore relativement compartimentée entre les zones de maraichage encore peu touchée et les zones d'habitat traditionnel ancien. Dans ces derniers secteurs, si les points d'entrée de la pollution sont relativement ponctuels l'homogénéisation en saison sèche maintient des concentrations élevées sur l'ensemble de la zone.

L'examen de l'ensemble des éléments chimiques majeurs permet, en première approche, de distinguer au moins 2 grands mécanismes de pollution : par lessivage des sols puis infiltration ou par mise en connexion de la nappe avec les latrines lors de sa remontée en saison des pluies. Dans le premier cas les sources de pollution peuvent être très diverses : intrants agricoles, dépôts de toutes nature et eaux usées. Rechercher l'origine et les sources exactes des pollutions nécessiterait de caractériser chimiquement les sources potentielles et de réaliser des analyses plus nombreuses et plus complètes. D'autres éléments, à l'état de trace, pourraient s'avérer beaucoup plus nocifs qu'une simple pollution par les nitrates.

# **Chapitre 6 : Modélisation des écoulements souterrains : Gravimétrie et pompage en zone du socle**

## 1-Introduction

Le champ gravimétrique terrestre est sensible aux masses souterraines et donc aux variations de stock d'eau au sein des aquifères. Les mesures gravimétriques peuvent donc en principe informer sur les changements de niveau piézométrique au sein des aquifères. A titre d'ordre de grandeur, le changement de hauteur piézométrique de 1 m dans un aquifère de porosité de drainage 0.1 produit un signal de 4 $\mu$ gal. Le gal est une unité de mesure ancienne provenant du système CGS et vaut un  $\text{cm/s}^2$  soit 10  $\text{nm/s}^2$  (1 $\mu$ gal =  $10^{-8}\text{m/s}^2$ ). Il est utilisé ici car il constitue encore une unité de référence dans le monde des gravimétriciens.

La précision relative d'un gravimètre de terrain actuel (CG5) est de l'ordre de 2  $\mu$ gal. On voit donc qu'un gravimètre est à l'heure actuelle un médiocre piézomètre, fournissant une précision d'environ 0.5 m sur les mesures de niveau d'eau. Cependant la précision et la portabilité des gravimètres s'accroît continument et une sensibilité meilleure que 0.1  $\mu$ gal est obtenue avec les gravimètres supraconducteurs de type Igrav transportables sur le terrain.

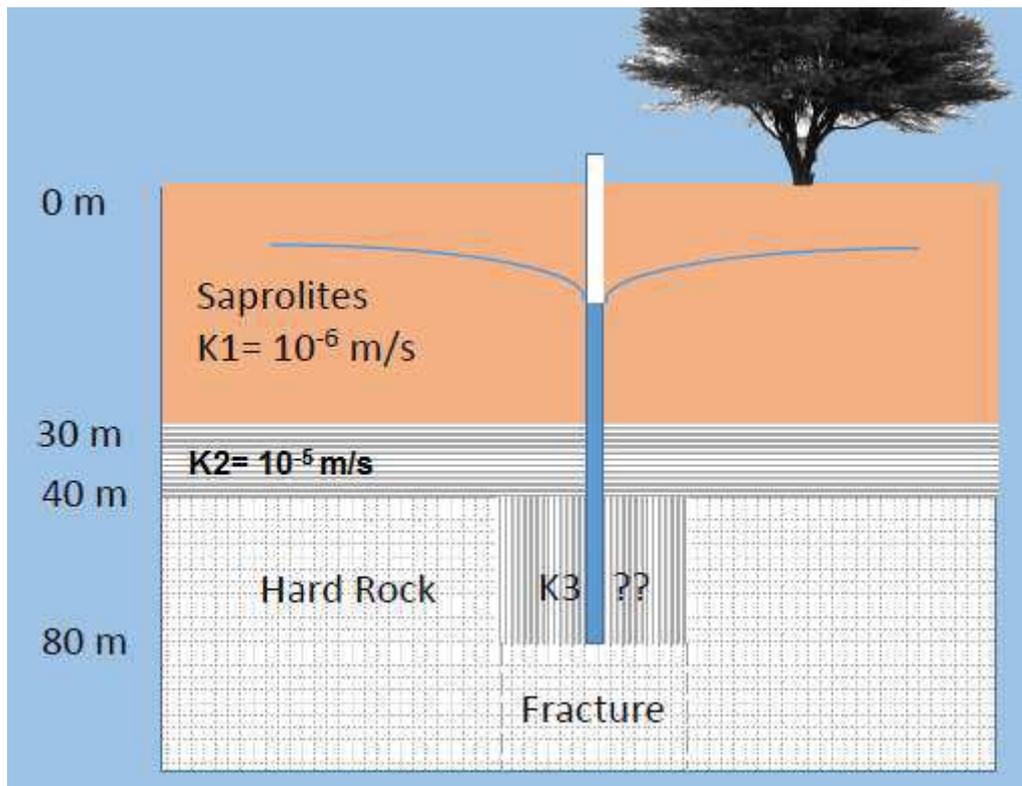
D'autre part, à partir de 2008 et au cours du projet ANR GHYRAF ainsi qu'à l'occasion de travaux récents de la même équipe, la combinaison de mesures effectuées par un gravimètre absolu de type FG5 et d'un gravimètre de terrain de type CG5 ont permis 1) d'estimer la porosité de drainage d'un aquifère sédimentaire libre au Niger et au Bénin, 2) d'estimer la distribution de la recharge au cours de la saison des pluies (Hinderer *et al.* 2009, Hector *et al.* 2010, Hinderer *et al.* 2012, Pfeffer 2011, Hector 2014, Hector *et al.* 2014).

Il existe actuellement un débat sur la validité des mesures gravimétriques pour estimer les propriétés d'un aquifère en cours de pompage. Ce débat est alimenté par plusieurs publications portant sur des cas théoriques considérant uniquement des aquifères sédimentaires. Damiata et Lee (2006) montrent que l'amplitude du signal gravimétrique attendu au cours d'un pompage type est dans la gamme des signaux mesurables avec les gravimètres de l'époque. Herckenrath *et al.* (2012), partant d'inversion de données synthétiques de pompages d'essai suivis avec la RMP (Résonance Magnétique des Protons) et de la gravimétrie, concluent cependant à une très faible valeur apportée par la gravimétrie seule aussi bien que combinée à la RMP. Cependant ces auteurs considèrent des zones bien couvertes par des réseaux piézométriques et d'autre part, ils ne travaillent qu'avec la précision d'un gravimètre de type CG5. Au contraire, nous considérons qu'avec un coût de forage de l'ordre de 10 000 Euros et vue la précision croissante des gravimètres de terrain, toutes les possibilités de l'hydrogravimétrie doivent être exploitées pour construire l'hydrogéologie opérationnelle du futur.

Cependant vue la difficulté logistique et les coûts de transport liés à une expérimentation sur le terrain, il est nécessaire de questionner la validité d'un test de pompage suivi gravimétrique par des études préliminaires portant sur des cas théoriques. L'étude présentée ci-dessous constitue un effort pour valider les mesures gravimétriques en combinaison avec un suivi de nivellement pour l'interprétation d'un essai de pompage longue durée dans un aquifère de socle.

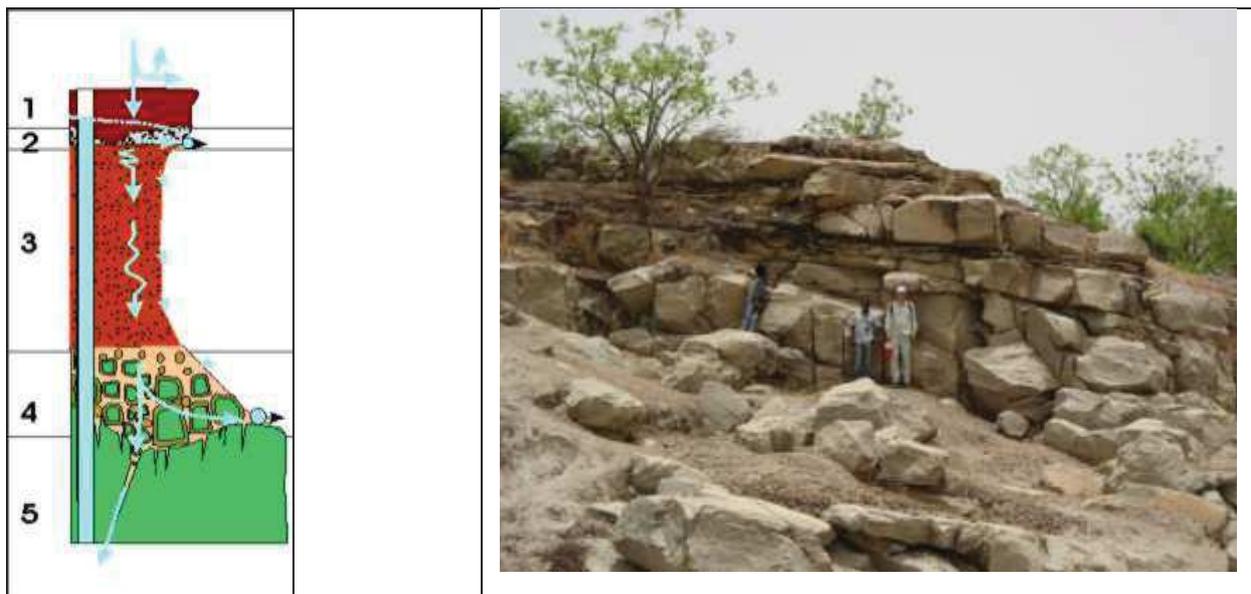
## 2-Monitoring gravimétrique d'un pompage en aquifère de socle.

Dans le sous-sol des régions de climat tropical, les roches de socle subissent une altération chimique qui a comme conséquence la formation d'un manteau d'altération épais de plusieurs dizaines de mètres au sein duquel les ressources en eau sont localisées. L'hétérogénéité des aquifères de socle résulte donc de l'interaction des roches hétérogènes initiales avec le processus d'altération.



**Figure 6.1** : Le modèle schématisé de l'aquifère de socle granitique. La géométrie de la couche fissurée est censée être connue par l'exploration géophysique. La largeur de la faille est supposée égale à 40 m.

La saprolite de 20 - 30 m d'épaisseur constitue une couche semi perméable. Elle présente généralement un bon rendement spécifique (jusqu'à 0,1) et une basse perméabilité ( $\sim 10^{-6}$ m/s). (figure 6.1). Elle est drainée à sa base par un milieu perméable, fracturé horizontalement, de porosité faible mais de bonne perméabilité. On va supposer que les propriétés de la saprolite (latérite) sont bien connues et que ce sont celles du milieu basal qui nous intéressent (Figure 6.2).



**Figure 6.2** : A gauche un profil d'altération typique de socle. Le milieu inconnu correspond au (4). A droite, l'aspect de ce niveau au Burkina : essentiellement de la fracturation subhorizontale (= perméabilité sans porosité). La photo a été prise à Kombissiri, à 50 km au sud de Ouagadougou.

### 3- Modélisation des écoulements souterrains : Gravimétrie et pompage en zone du socle

Il existe divers types de modèles et tout modèle fait référence à un système réel qu'il prétend représenter plus ou moins complètement. (Bonnet 1982). On utilise en hydrogéologie des modèles physiques déterministes dans les milieux poreux et comme dans les milieux fissurés

### 3.1 Choix du code

Le modèle MOFLOW et son interface Processing MOFLOW (PMWIN) ont été choisis comme outils de modélisation pour les propriétés avancées de modélisation des écoulements souterrains ainsi par leur capacités à simuler des modèles de grande taille (80 couches, 250 000 cellules dans chaque couche). Ce logiciel libre a pour qualités premières d'être simple, modulaire et d'avoir été rendu fiable par une utilisation mondiale massive. Il peut simuler des situations hydrologiques variées avec une interface graphique très élaborée. Nous avons intégré un code de calcul du signal gravimétrique travaillant sur le même maillage que PMWIN.

Avant d'effectuer une simulation d'écoulement il faut créer le modèle et assigner les données. La création du modèle nécessite dans un premier temps de définir le système aquifère, c'est à dire définir la nature des unités stratigraphiques, leur confinement éventuel, la hauteur du toit et du mur de chaque couche, la charge hydraulique initiale; ensuite de subdiviser ces couches en mailles, de fixer les conditions aux limites et enfin de spécifier les paramètres hydrologiques. Toutes ces étapes sont facilitées par l'interface graphique de PMWIN.

### 3.2 Choix du maillage

Le modèle comporte 6241 mailles (Figure 6.4). La géométrie du maillage est basée sur des mailles rectangulaires à tailles variables, que l'on ajuste par lignes et colonnes entières. Le tableau 6.1 ci-dessous montre les tailles de mailles utilisées. Le puits de pompage est de 10 cm de rayon et est placé au centre du maillage.

**Tableau 6.1** Les mesures du maillage en mètre

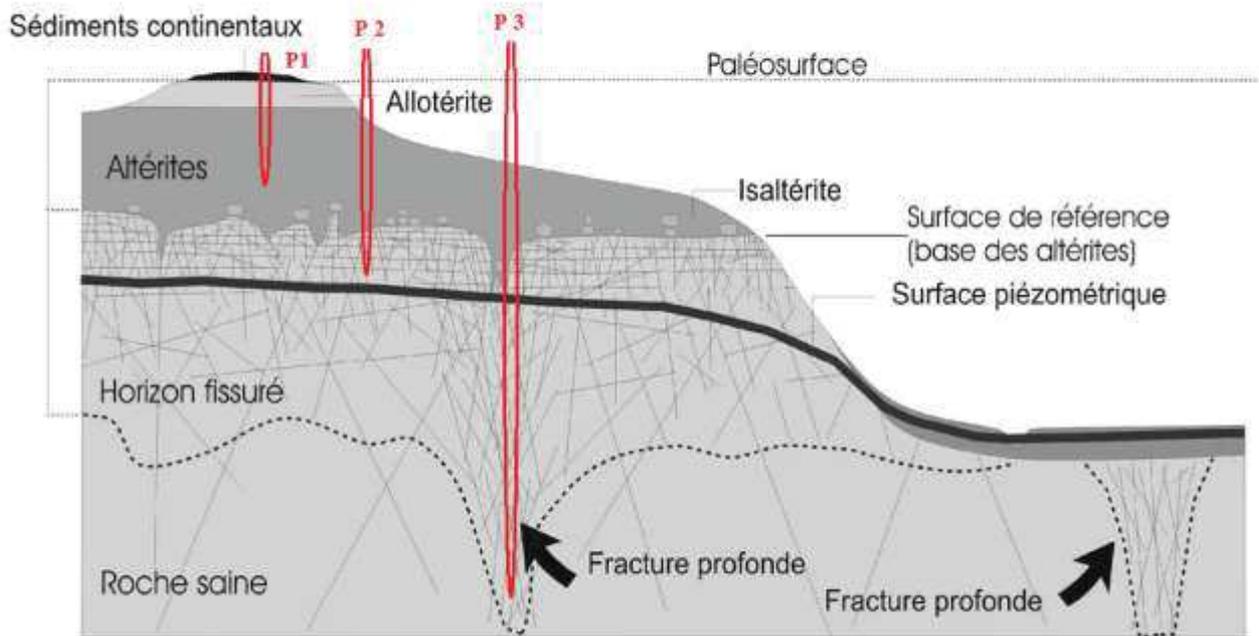
Maillage du modèle en (m)																			
0,2	1,2	1,5	1,7	2	2,3	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6,5	7,5	8	8,5	9	9,5	10
11	13	15	17	19	20	25	30	40	50	60	80	100	200	500	800	1000	1500	2000	2500

Le modèle couvre une superficie de 329,5 Km<sup>2</sup> incluant certaines cellules inactives. La grille du modèle contient 6241 mailles irrégulières (79 lignes et 79 colonnes). Le maillage le plus fin couvre une zone d'une centaine de mètre de rayon autour du puits au sein de laquelle le

rabattement varie très rapidement; cependant, au-delà de ce rayon le maillage devient de plus en plus grossier.

Le domaine hydrogéologique modélisé est considéré dans un premier temps comme étant un système monocouche, constitué par les altérites, ensuite deux couches sont considérées (les altérites et le milieu fissuré). Enfin on considère l'influence d'une faille profonde (Fig. 6.1).

Dans ces trois cas on observe toujours le rabattement et le signal gravimétriques au niveau de la couche superficielle (les altérites) (figure 6. 3).



**Figure 6.3** : Illustration des 3 cas de pompage modélisés.

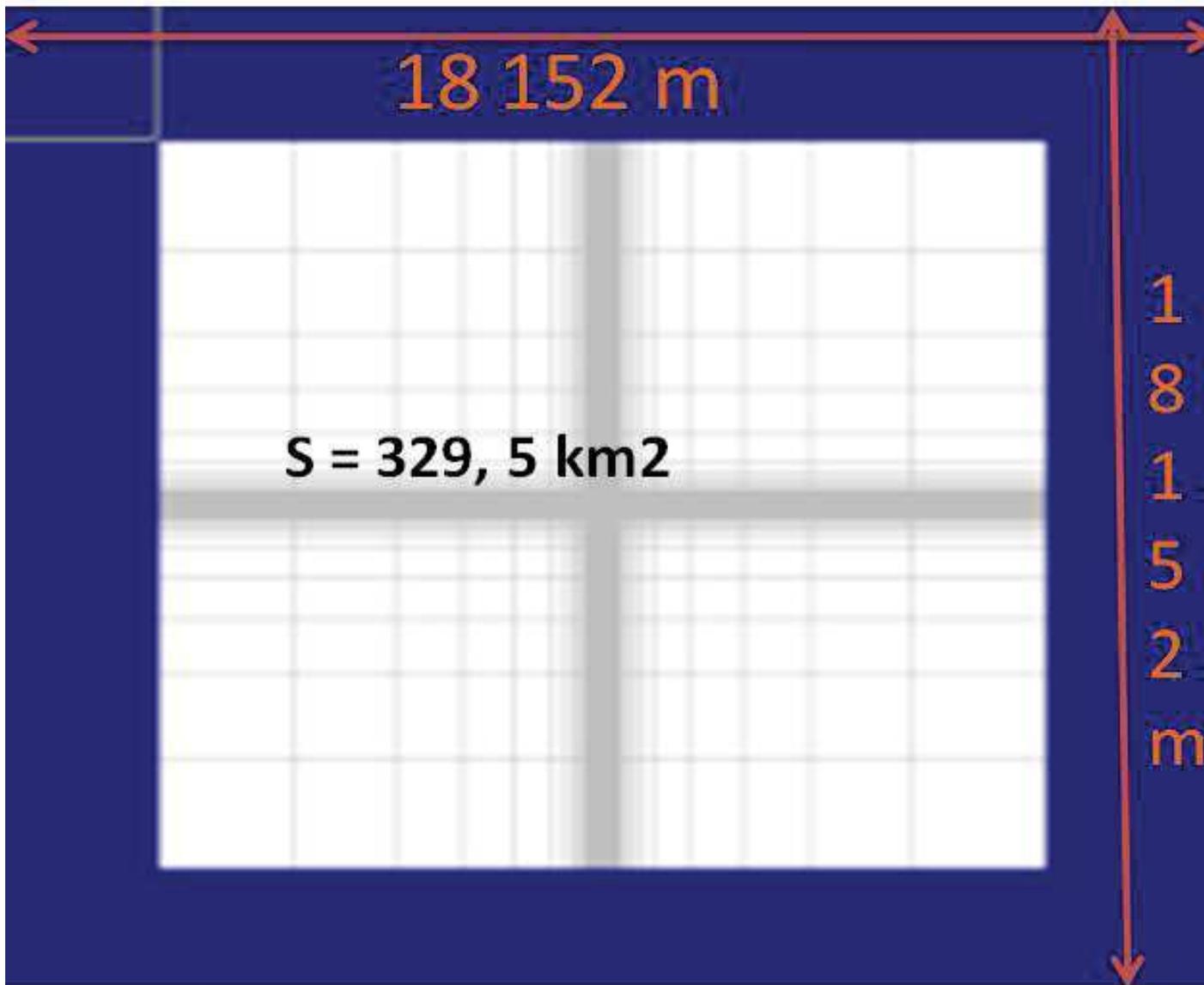


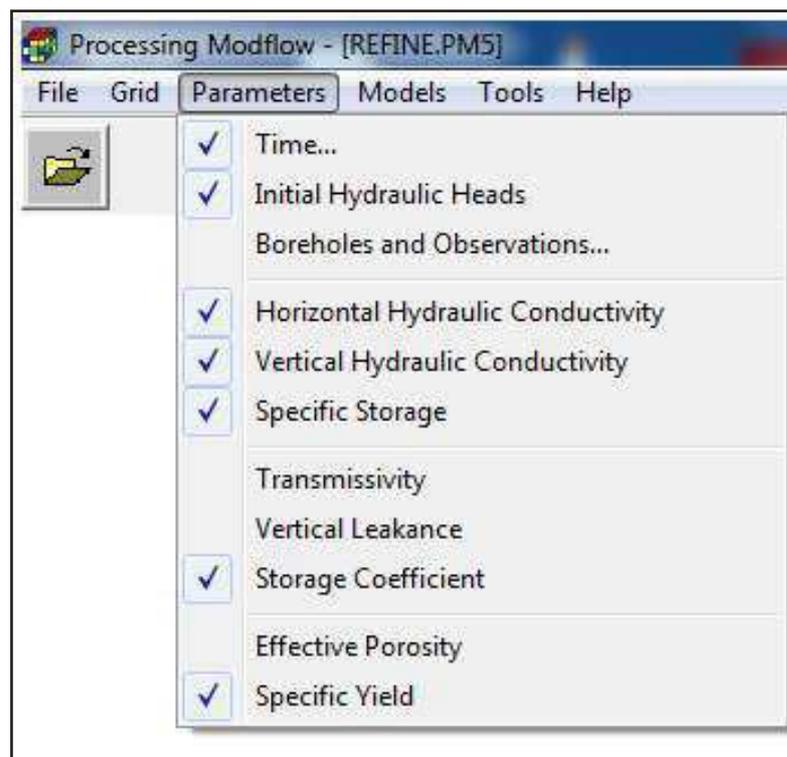
Figure 6.4 : Maillage rectangulaire à taille variable utilisé pour les modélisations.

Le maillage ci-dessus, (Fig. 6.4) représente le maillage qui nous a permis d'avoir des résultats compatibles avec ceux déjà publiés pour le rabattement et le signal gravimétrique dans des aquifères sédimentaires homogènes en nappe libre ou confinée.

### 3.3-Les paramètres

Après avoir défini la géométrie de l'aquifère et le maillage, il est nécessaire de renseigner les paramètres ci-dessous avant de lancer la simulation (figure 6.5).

Conditions aux limites : les conditions aux limites sur les frontières verticales sont des conditions d'imperméabilité. Cependant il faut noter que compte tenu de la grande taille du maillage, les résultats sont très peu sensibles à ces conditions aux limites. Dans tous les cas, la limite inférieure du modèle est considérée comme imperméable et l'aquifère superficiel est considéré comme libre.



**Figure 6.5** : Vue de l'interface graphique de Pmwin figurant les paramètres à renseigner.

**Le temps de simulation** (Time) : il faut spécifier les paramètres temporels, y compris l'unité de temps, la durée des périodes de stress et le nombre de périodes de stress, le pas de temps et les étapes de transport.

**La charge hydraulique initiale** (inial hydraulic heads) : cette charge hydraulique est supposée constante aux limites du domaine.

**Forages d'observation** (Boreholes and observations) : il est nécessaire d'indiquer les coordonnées (abscisses (x), ordonnées (y)) de chaque point d'observation.

**Conductivité hydraulique horizontale et Transmissivité** : PMWIN utilise la conductivité hydraulique horizontale et l'épaisseur de la couche pour calculer la transmissivité. On peut remarquer que comme l'écoulement est essentiellement horizontal dans un test de pompage, la conductivité hydraulique horizontale est majoritairement sollicitée.

#### **La conductivité hydraulique verticale et drainance verticale**

On peut spécifier la drainance verticale directement dans le menu Paramètres. Dans le cas contraire cette drainance est calculée par Modflow

**Porosité effective** : elle est utilisée par les modèles de transport pour calculer la vitesse moyenne de l'écoulement à travers le milieu poreux. Elle n'est pas utilisée pour nos simulations.

**Stockage spécifique** (specific storage), **Coefficient d'emmagasinement** (storage coefficient ou storativity), **Rendement spécifique** (specific yield): sont des propriétés physiques qui caractérisent la capacité d'un aquifère à libérer les eaux souterraines. Ces paramètres parfois appelés «propriétés de stockage» sont souvent déterminés, dans le domaine de l'hydrogéologie, en utilisant une combinaison de tests sur le terrain et de tests de laboratoire. Pour les simulations transitoires, MODFLOW requiert de spécifier ces paramètres pour chaque couche du modèle. Pour une simulation en régime permanent, ces éléments ne sont pas utilisés et sont donc grisées dans le menu correspondant.

### **3.4 Les conditions aux limites**

Un modèle numérique a une extension limitée dans l'espace et sur ses limites les échanges d'eau avec le milieu extérieur sont régis par les conditions aux limites. Ces conditions aux limites sont de trois types (Bonnet 1982) :

✓ **limites à niveau imposé**

Les limites à niveau imposé correspondent à des plans d'eau libre (rivière, lacs ou étangs). Les sources permanentes peuvent également être considérées comme des points limites à niveau imposés.

✓ **limites étanches**

Ce sont les contacts entre corps aquifères et corps imperméables.

✓ **limites à flux imposé**

Ce type de condition est utilisé quand le flux à une limite est imposé par un système aquifère de grande ampleur.

Les limites de notre modèle ont été considérées comme suffisamment éloignées du point de pompage pour pouvoir utiliser des conditions aux limites à charge constante.

### **3.5 Calcul de l'anomalie gravimétrique**

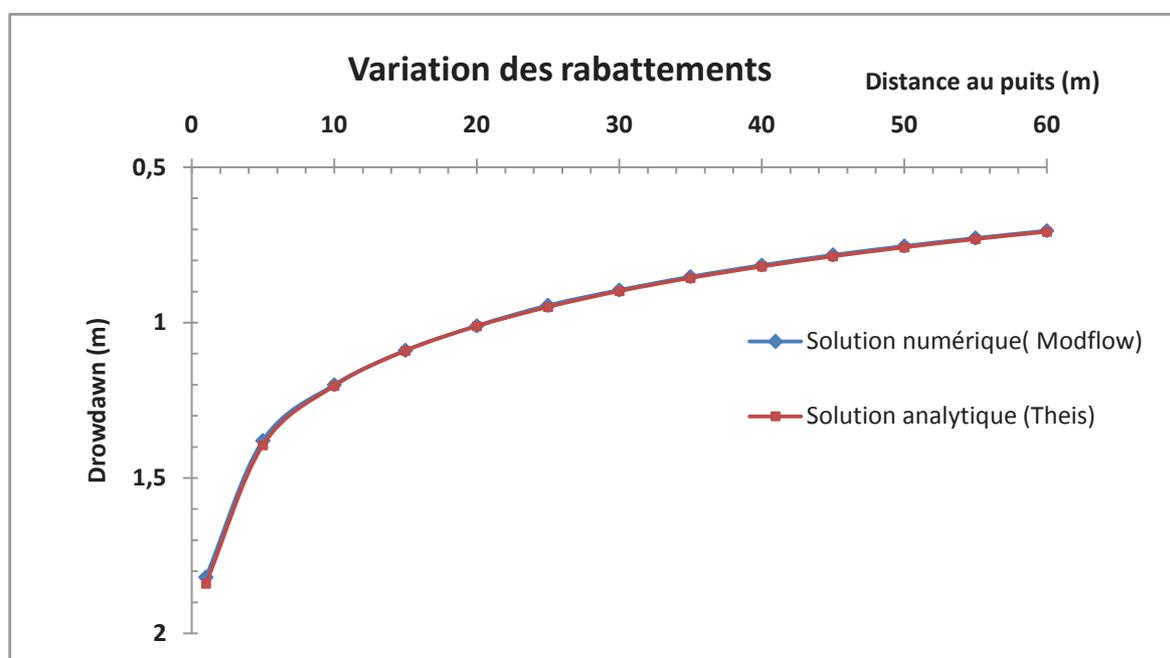
Le signal gravimétrique est calculé comme la somme des signaux générés par des prismes verticaux s'appuyant sur les mailles de Modflow et dont les limites supérieure et inférieures correspondent au niveau de l'eau souterraine avant et après pompage. Pour de tels polyèdres, l'anomalie gravimétrique peut être calculée facilement et de manière analytique par intégration le long des arêtes du polyèdre (Paul, 1974, Genthon et Souriau, 1987)

Nous utilisons ici un code initialement écrit et utilisé par R. Bayer (Géosciences Montpellier). Il a par la suite été utilisé par nos collègues de l'EOST de Strasbourg et a été validé par Pierre Genthon par comparaison des résultats obtenus sur des corps de géométrie simple pour lesquels des solutions analytiques existent. Le code de simulation s'interface très facilement avec Modflow / Pmwin puisqu'il utilise exactement le même maillage.

### 3.5.1 Validation du modèle

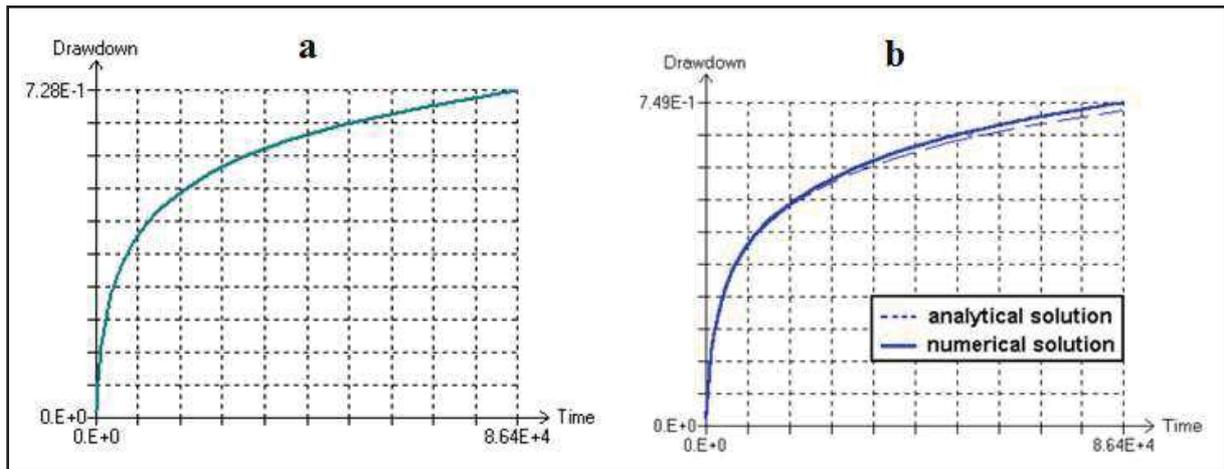
Dans le but de valider notre modèle nous avons été amenés à effectuer dans un premier temps une comparaison des rabattements avec ceux obtenus avec la méthode analytique de Theis. Les données utilisées pour ces deux méthodes sont les suivantes : Epaisseur de l'aquifère confiné = 50 m, charge hydraulique initiale = 0 m, Transmissivité =  $0.0023 \text{ m}^2/\text{s}$ , Débit de pompage  $Q = 4.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , Coefficient d'emménagement =  $0.00075$ , Temps de simulation = 24h.

Avec ces données ci-dessus issues du tutoriel Processing Modflow (Chiang *et al* 2008) et avec notre maillage, nous avons obtenu un écart de 0,2% avec la solution analytique (Figure 6.6).



**Figure 6.6:** Comparaison des rabattements entre solution analytique de Theis et solution numérique de Modflow.

Nous avons d'autre part obtenu un écart de moins de 1% à 55 m du point de pompage avec l'exemple intitulé "calibration 3" du tutoriel de Pmwin. (figures 6.7).



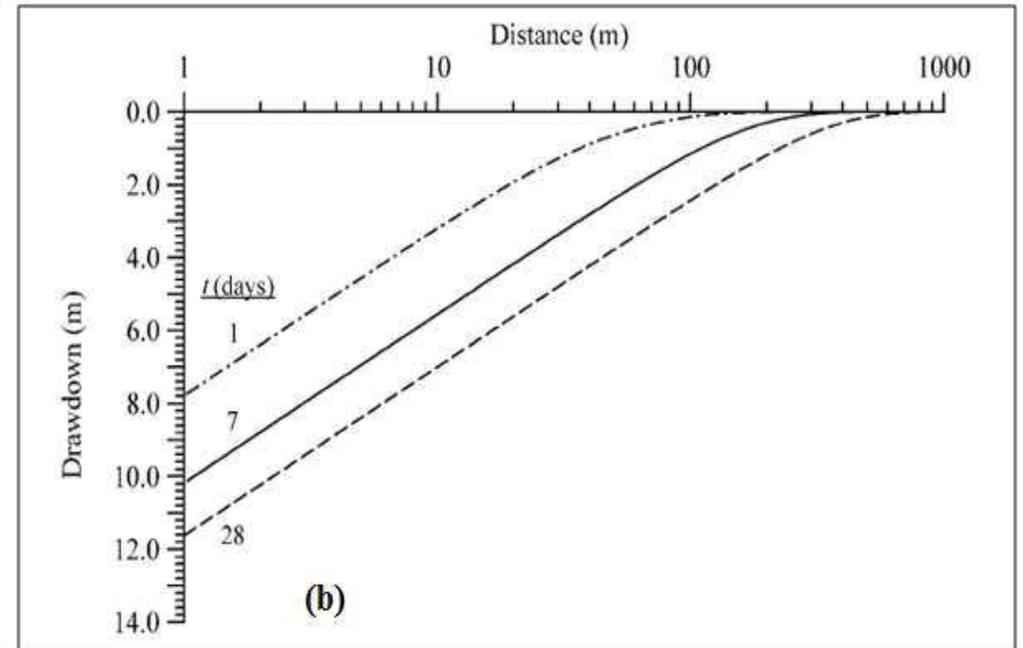
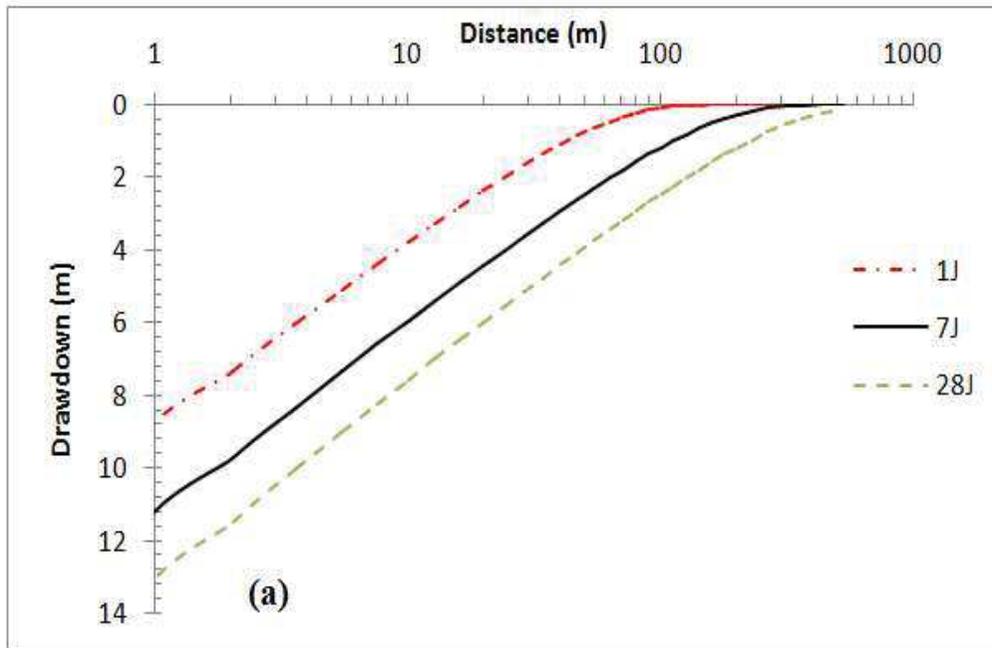
**Figure 6. 7** : Courbe de rabattement du niveau piézométrique pendant 24h à 55 m du puits avec des maillages différents (a : notre maillage, b : du tutorial Processing Modflow).

### 3.5.2 Comparaison des rabattements et du signal gravimétrique simulés avec les résultats de Damiata et Lee (2006)

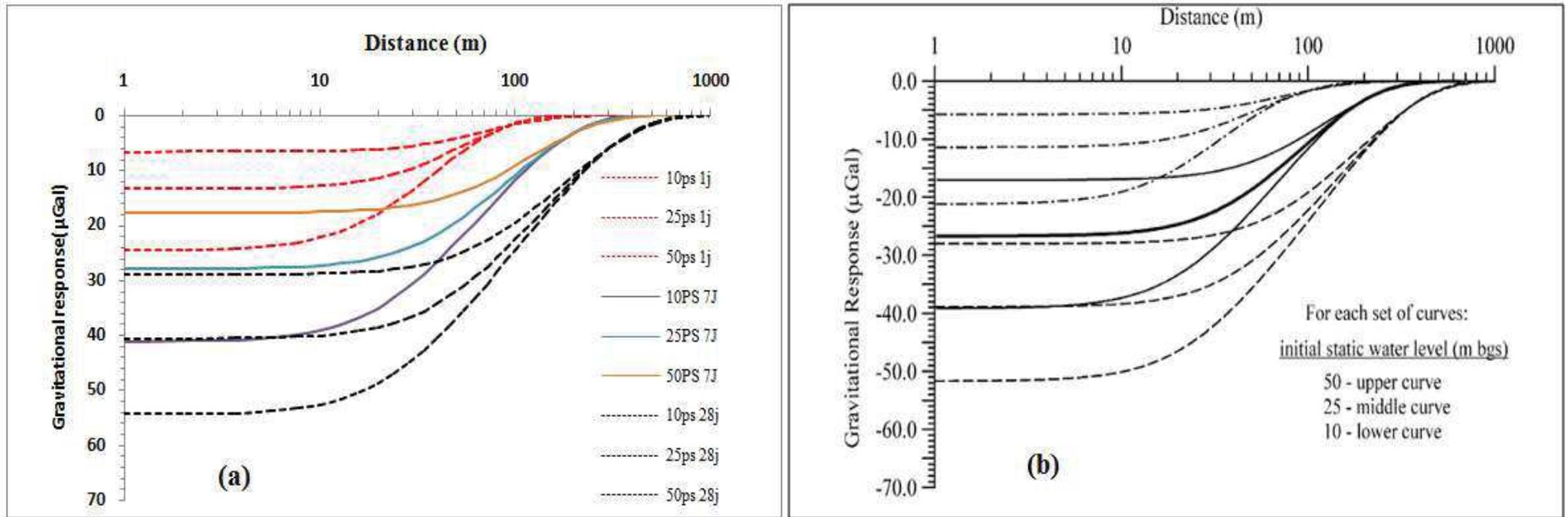
Dans ce deuxième cas nos résultats sont comparés avec le rabattement et l'anomalie gravimétrique publiés par Damiata et Lee (2006). Les données du modèle sont les suivantes: perméabilité  $K = 10^{-4}$  m/s, coefficient d'emmagasinement  $S = 10^{-3}$ , «specific yield»  $S_y = 0.25$  et débit  $Q = 0.06309$  m<sup>3</sup>/s. L'épaisseur de l'aquifère est de 50 met la charge hydraulique initiale de 50m. Les temps de simulation sont de 1 jour, 7 jours et 28 jours.

Avec les mêmes données, nous avons des résultats différents de moins de 3% de ceux de Damiata et Lee (2006) (Figure 6.8 et 6. 9).

Compte tenu des résultats de toutes ces comparaisons, nous avons considéré comme acceptable l'ensemble du code qui a été validé pour la suite de nos calculs.



**Figure 6. 8:** Comparaison des rabattements obtenus dans cette étude (a) et publiés par Damiata et Lee (2006) (b).



**Figure 6.9 :** Comparaison des signaux gravimétriques obtenus Damiat (2006) (b) et au cours de cette étude (a). Les trois séries de courbes correspondent à un pompage durant 1 jour, 7 jours et 28 jours, avec un niveau statique initial à 10 m 25 m et 50 m sous la surface du sol.

## 4. Simulation des rabattements et du signal gravimétrique

### 4.1 Simulation et données du modèle

La simulation du modèle est faite en régime transitoire avec un pas de temps de deux heures pendant une semaine. Les données du modèle sont résumées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 6. 2** : Paramètres caractéristiques de l'aquifère de socle au Burkina Faso

	<b>K (m/s)</b>	<b>S</b>	<b>Ss</b>	<b>Epaisseur (m)</b>	<b>Type de couche</b>
altérites	$10^{-6}$	$10^{-2}$		30	Unconfined
Couche basale	$10^{-5}$		3.3E-6	10	Confined/Unconfined T = cste
Couche basale (faille)	$10^{-5}$		3.3E -6	40m de large 50m profondeur	Confined/Unconfined T = cste
	<b>Variation du niveau statique entre 0 et 7m;</b>				<b>Débits</b>
	<b>de pompage des 3 cas : Q1=0,7m<sup>3</sup>/h ; Q2=7,5 m<sup>3</sup>/h; Q3= 55m<sup>3</sup>/h</b>				

### 4.2 Résultats du modèle

#### 4.2.1 Pompage dans les altérites (Cas 1)

Nous avons retenu de la documentation qu'à Sanon le niveau statique en basse eau est entre 6 m et 10 m. Le niveau 7 m est celui mesuré dans le piézomètre de CIEH en période sèche. Le débit pompé à Sanon dans les altérites est inférieur à 500 l/h dans des puits dont la profondeur moyenne est de 11 m. D'après N. Savadogo (com. pers., 2013) on ne peut pas pomper plus de 1m<sup>3</sup>/h dans les altérites.

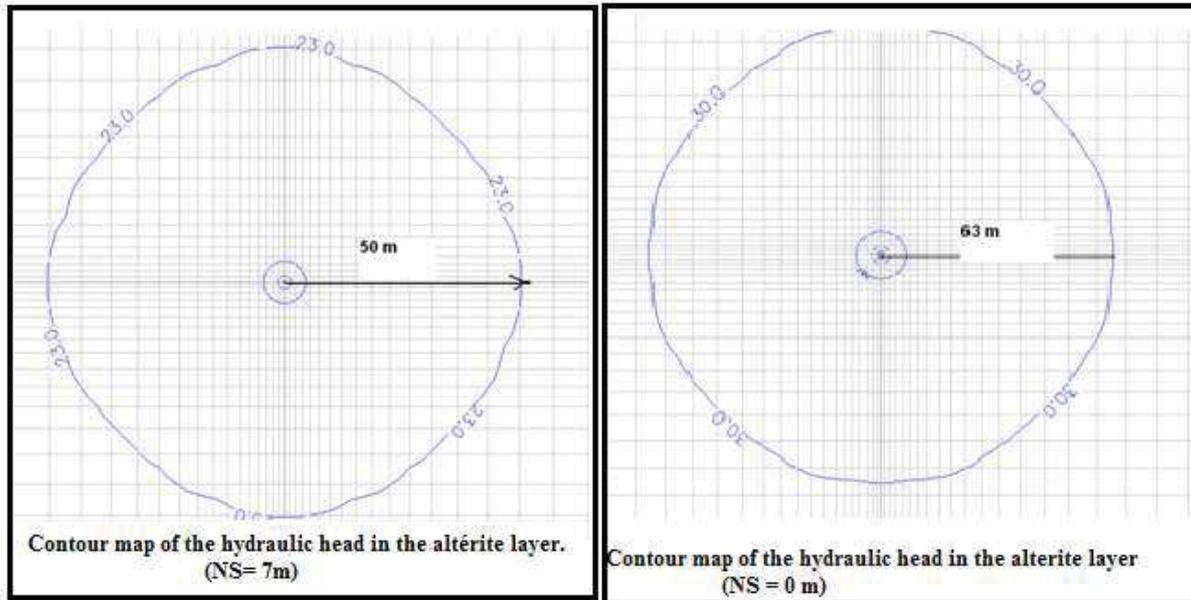


Figure 6. 10 : Courbes de la charge hydraulique obtenues dans le cas 1 (pompage dans les altérites).

Ce premier cas rentre dans le cadre des aquifères libres et homogènes comme le cas de Damiata. Lors de la simulation nous avons gardé fixe le débit (Figure 6.10). On a constaté que plus le niveau statique de la nappe est haut plus le rabattement est faible (figure 6. 11). Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que plus le niveau statique est élevé, plus la tranche d'aquifère participant au pompage est importante.

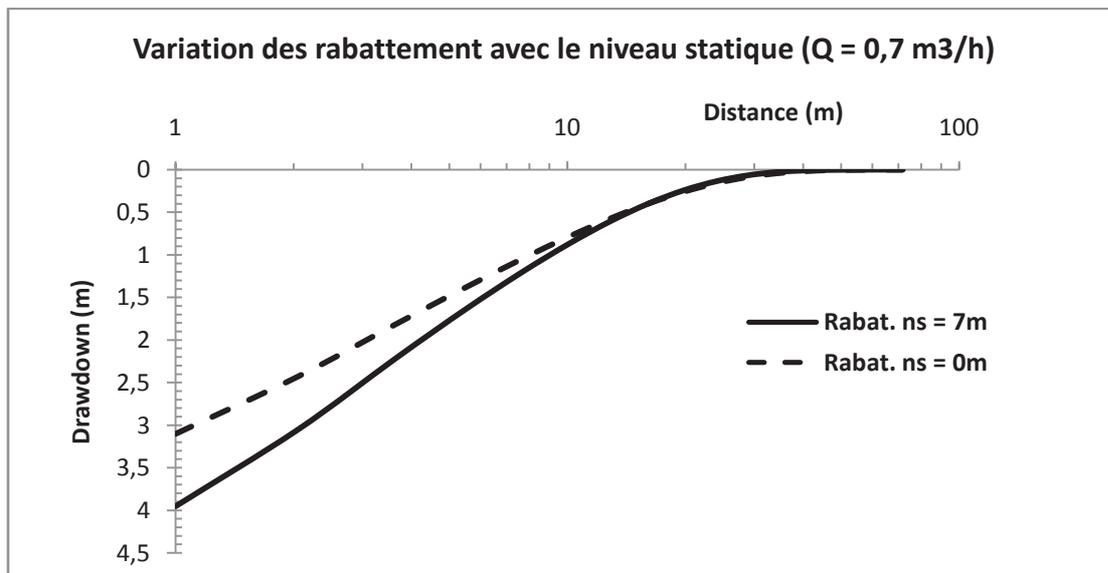


Figure 6. 11 : Courbe de rabattement dans les altérites pour des pompages à différents niveaux statiques initiaux.

Pour la réponse gravitationnelle, plus le niveau piézométrique est profond, plus le signal gravimétrique est faible. Ceci résulte du fait la distance entre le gravimètre et l'eau sous-jacente est alors plus grande (figure 6. 12).

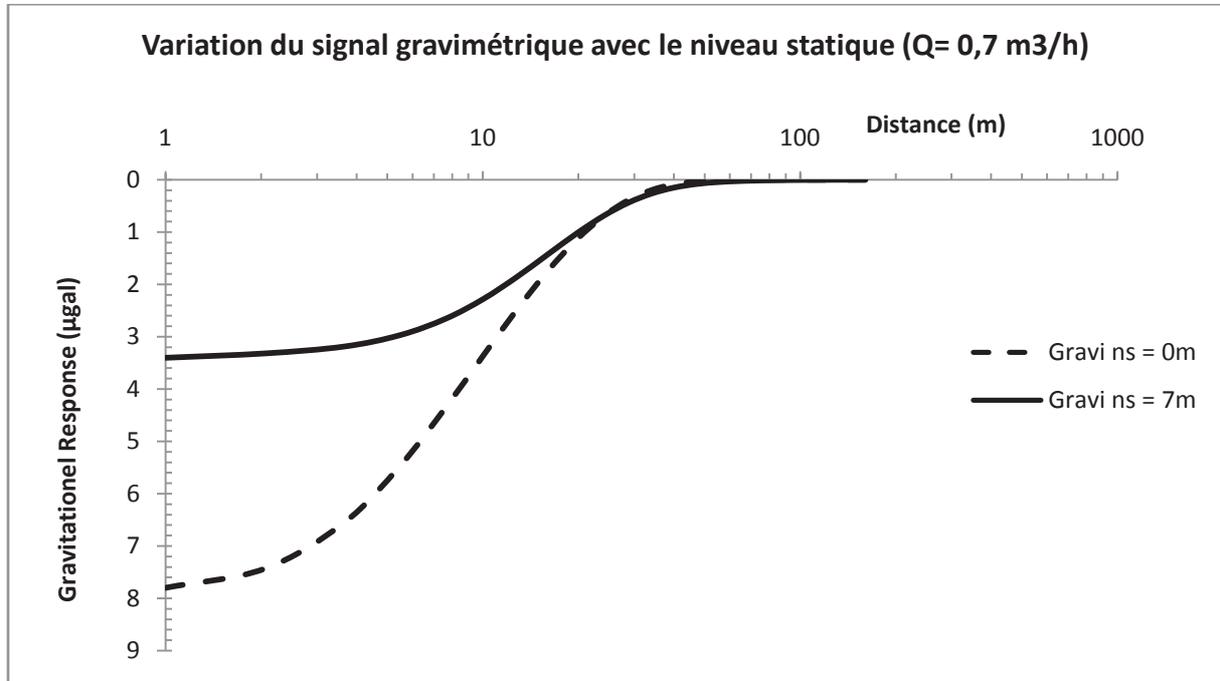
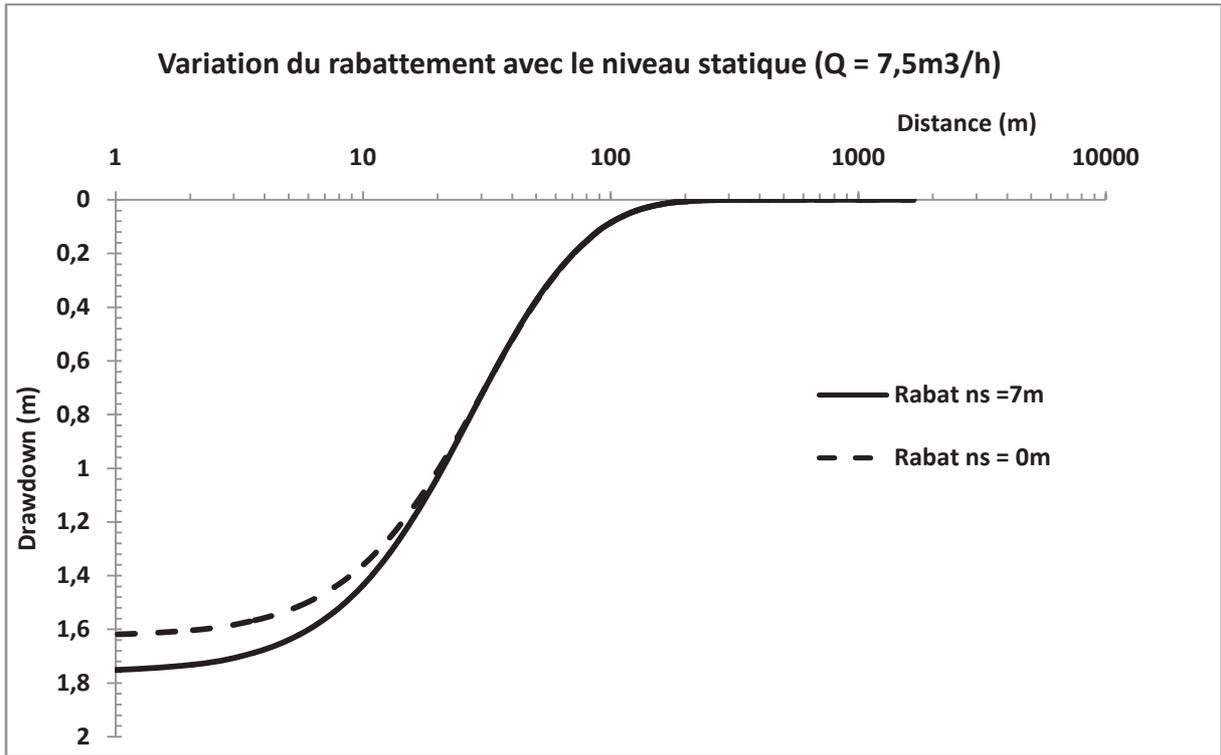


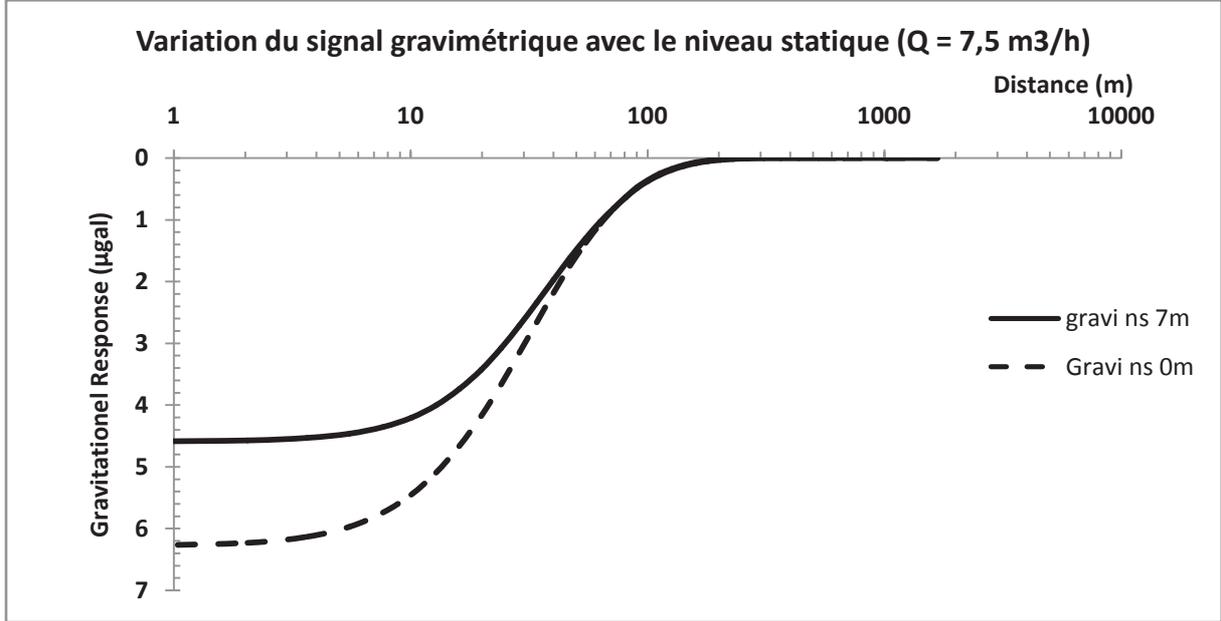
Figure 6. 12: Signal gravimétrique modélisé pour différents niveaux statiques (cas 1).

#### 4.2.2 Pompage dans la couche fissurée à la base des altérites (Cas 2)

Compte tenu des caractéristiques hydrodynamiques du niveau fissuré, nous avons pu augmenter le débit jusqu'à 7,5 m<sup>3</sup>/h. Nous avons observé dans les altérites, à 1 m du puits, un rabattement de 1,6 m et 1,75 m pour les pompes aux niveaux statiques 0 m et 7 m respectivement (figure 6 13). Le signal gravimétrique correspondant est présenté en figure 6. 14.



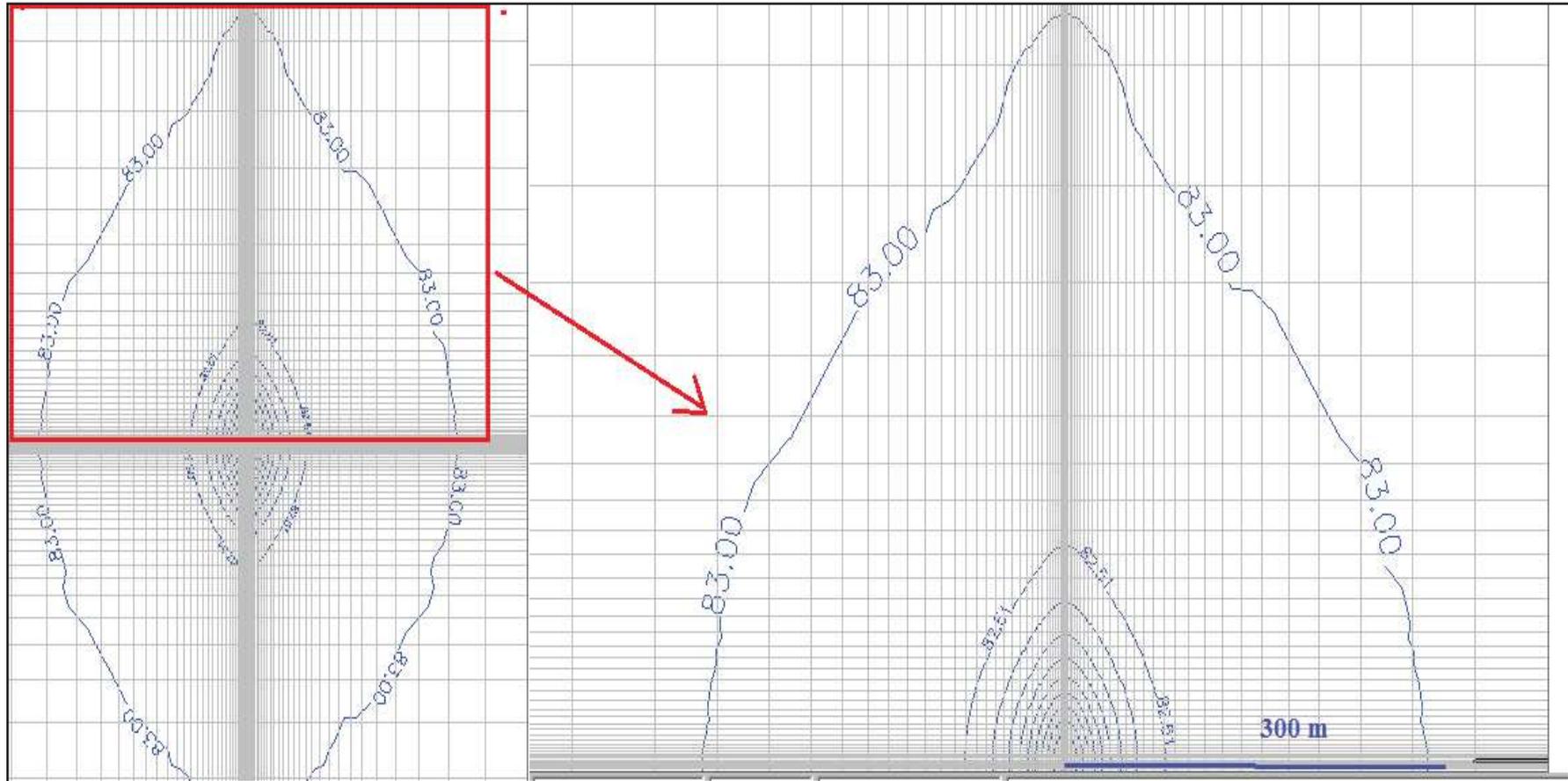
**Figure 6. 13:** Rabattement dans les altérites pour différents niveaux statiques avec pompage dans le niveau fissuré (cas 2).



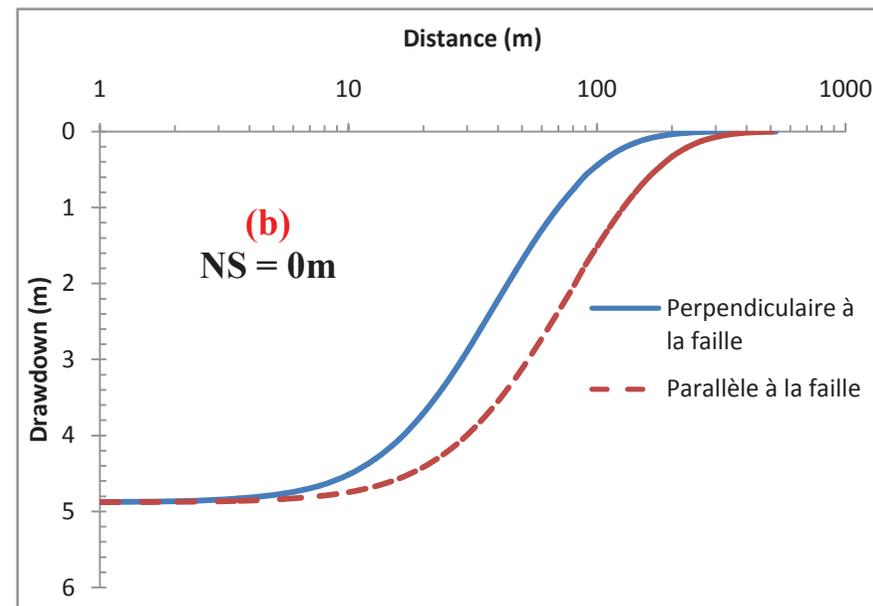
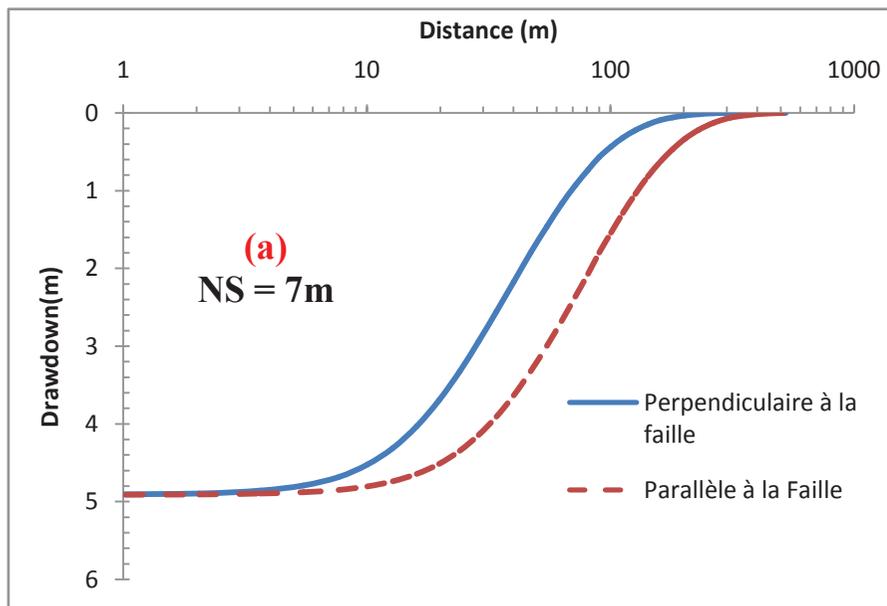
**Figure 6.14 :** Signal gravimétrique modélisé pour différents niveaux statiques avec pompage dans le milieu fissuré (cas 2).

### **4.2.3 Pompage dans une faille (Cas 3)**

Tenant compte des bonnes caractéristiques hydrodynamiques de cette faille le débit simulé est de 55 m<sup>3</sup>/h. Le rabattement et le signal gravimétrique sont observés dans les altérites parallèlement et perpendiculairement à la faille (Figures 6.16, 6 17 et 6.18).

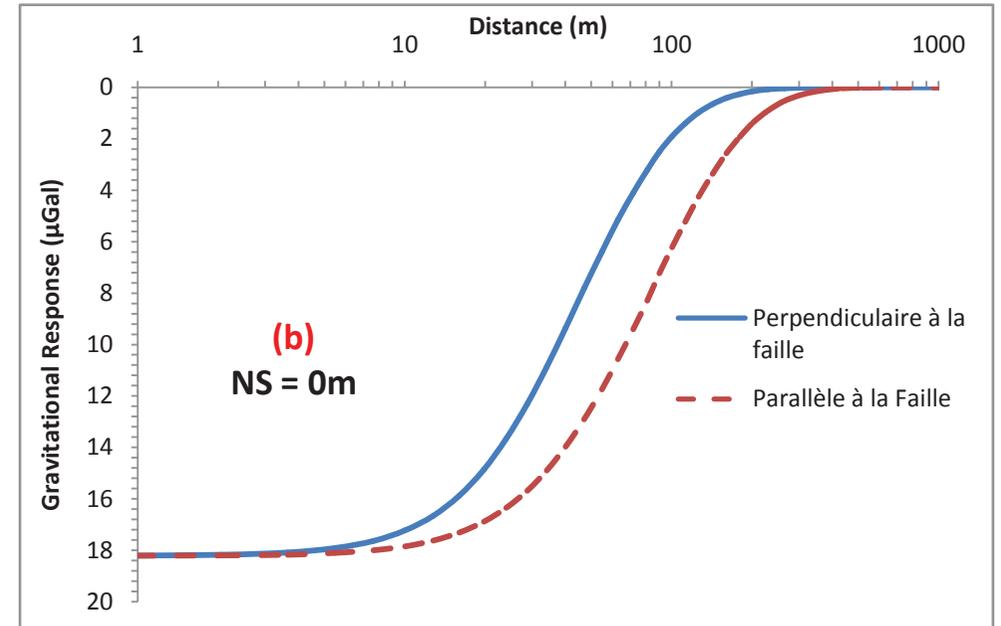
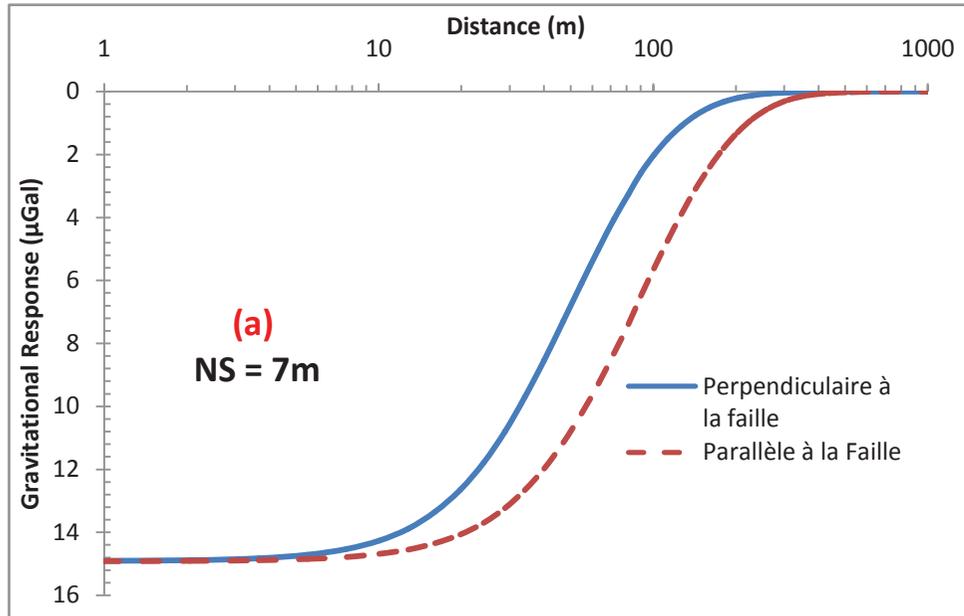


**Figure 6.16 :** Anisotropie des isopièzes pour un pompage au sein d'une faille. L'allongement des isopièzes est suivant la direction de la faille.



**Figure 6.17** : Rabattement dans les altérites avec pompage dans la faille (cas 3) pour différents niveaux statiques. A gauche, niveau statique 7 m; à droite niveau statique 0 m (l'eau est sub-affleurente).

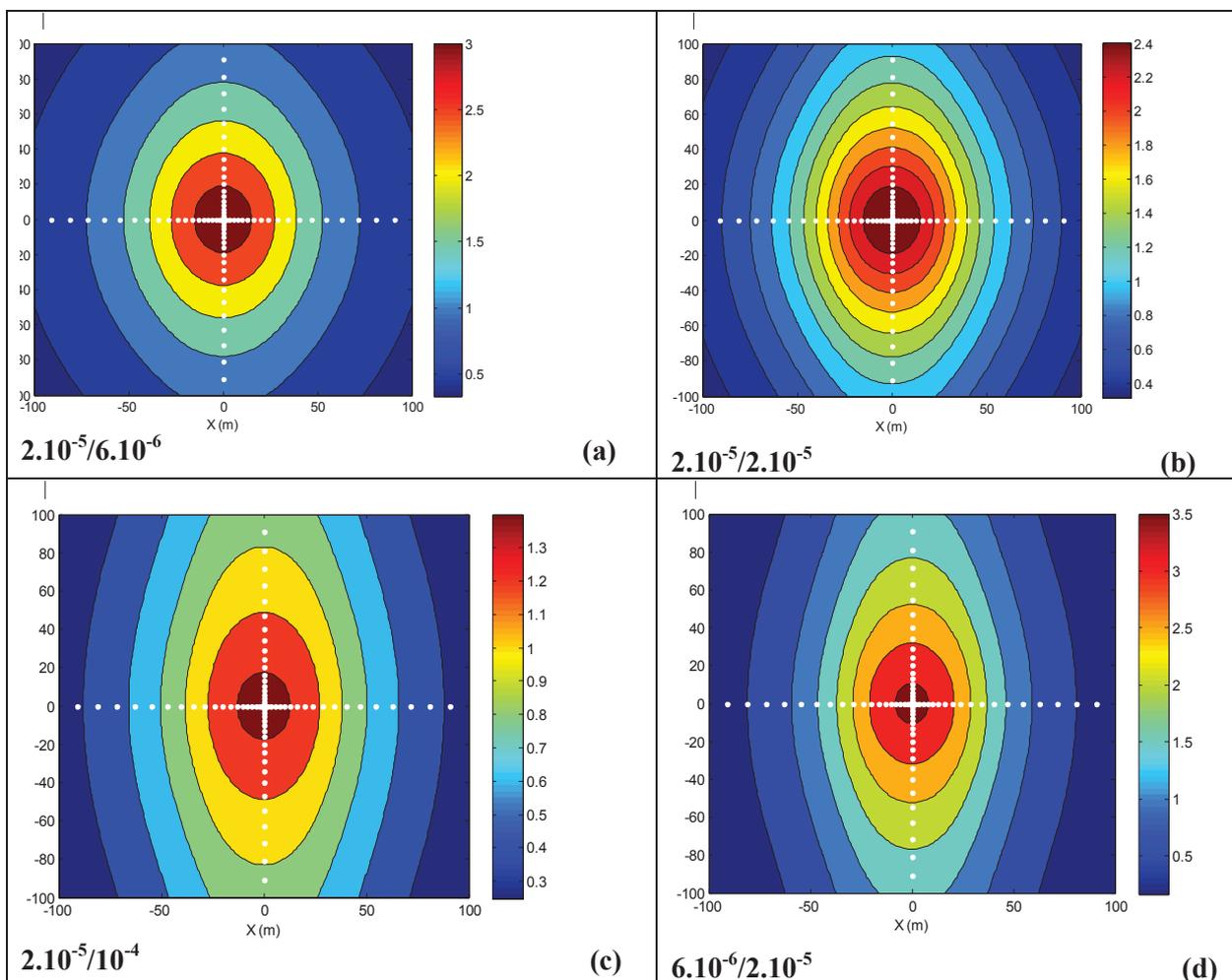
Le pompage dans la faille pour les deux niveaux statiques différents montre presque le même rabattement dans les altérites à quelques centimètres près. Cependant on constate que le rabattement est anisotrope, particulièrement dans l'intervalle 10 - 100 m (figure 6. 17 a et b). Il est plus faible à une distance donnée dans le sens parallèle à la faille que dans le sens perpendiculaire. Pour la gravimétrie le signal est toujours plus important pour les niveaux statiques faibles et bien différencié dans l'intervalle 10 et 100 m suivant que l'on se place parallèlement ou perpendiculairement à la faille (figure 6.18 a et b).



**Figure 6.18** : Courbes des signaux gravimétrique pour des pompages dans la faille avec différents niveaux statiques initiaux. A gauche, niveau statique 7 m; à droite niveau statique 0 m.

### 4.3 Variation du rabattement en fonction des conductivités hydrauliques

On calcule le rabattement au bout de 7 jours de pompage en fonction des conductivités hydrauliques  $K_2$  dans la couche basale des altérites et  $K_3$  dans la faille. Pour chaque figure le couple  $K_2/K_3$  est indiqué en légende (m/s). La conductivité des altérites est fixée à  $K_1=10^{-6}$  m/s. Le rabattement augmente quand la conductivité hydraulique diminue. L'anisotropie du rabattement (rabattement plus élevé dans la direction de la faille) augmente quand le rapport  $K_2/K_3$  diminue figure 6 19).



**Figure 6. 19** : Rabattement en fonction du rapport ( $K_2/K_3$ ) des conductivités de la couche basale des altérites et celle de la faille. Les conductivités sont exprimées en m/s et le rabattement en m.

#### **4.4 Variations du rabattement, de la subsidence et du signal gravimétrique avec le module d'Young**

Il est connu que le pompage dans les aquifères déformables entraîne une subsidence. Nous utilisons ici un modèle simplifié dans lequel la subsidence est proportionnelle au rabattement et inversement proportionnel au module d'Young  $E$ . Dans ce modèle on suppose que la matrice solide se déforme de manière élastique sous l'effet des variations de pression effectives induites par la variation de la pression de l'eau s'exerçant sur la matrice solide.

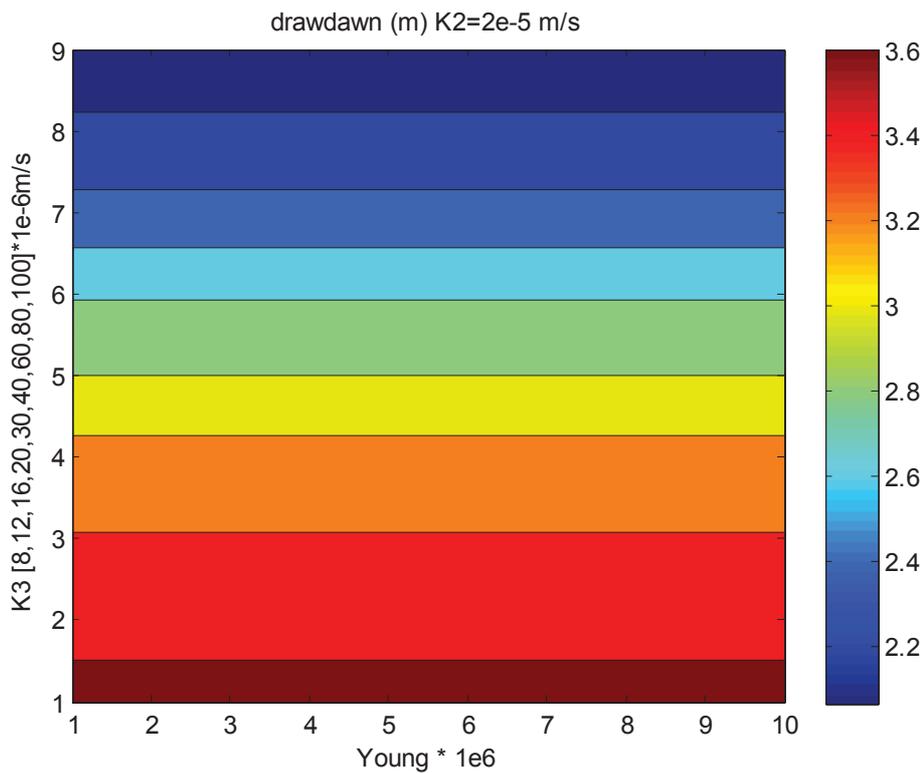
$$\Delta z/z = \rho g \Delta h/E$$

Notre étude s'intéresse à des modules d'Young compris entre  $10^6$  et  $10^7$  Pa

Nous supposons que la subsidence est instantanée. C'est clairement une approximation, d'autant plus que les ordres de grandeurs de modules d'Young disponibles sont obtenus pour des subsidences se produisant sur durées plus longues, de l'ordre de plusieurs années.

##### **4.4.1 Variation du rabattement en fonction du rapport ( $K_2/K_3$ ) et du module d'Young**

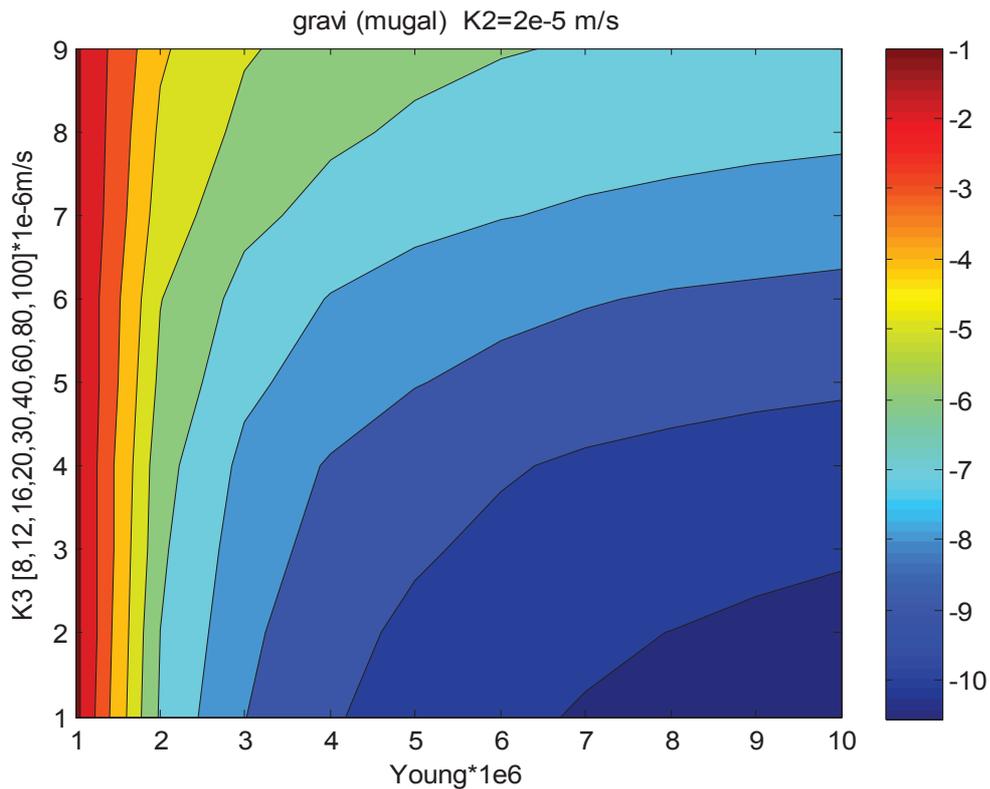
Dans ce cas de figure on a supposé que  $K_2$  est fixe et on fait varier  $K_3$ . Plus  $K_3$  est faible plus le rabattement est important. On constate que le module de Young n'influence pas le rabattement (Figure 6. 20)



**Figure 6. 20 :** Variation du rabattement en fonction de K3, pour une valeur de K2 fixée. Le rabattement est en mètres.

#### 4.4.2 Variation du signal gravimétrique en fonction du rapport ( $K_2/K_3$ ) et du module d'Young

Nous avons gardé fixe  $K_2$  et fait varier  $K_3$  ainsi que le module de Young. La figure 6. 21 ci-dessous montre que plus le module d'Young est faible plus la réponse gravitationnelle est importante. Ceci se comprends en considérant qu'avec un module d'Young faible la matrice poreuse se déforme de manière plus importante et donc que la déformation est plus forte.

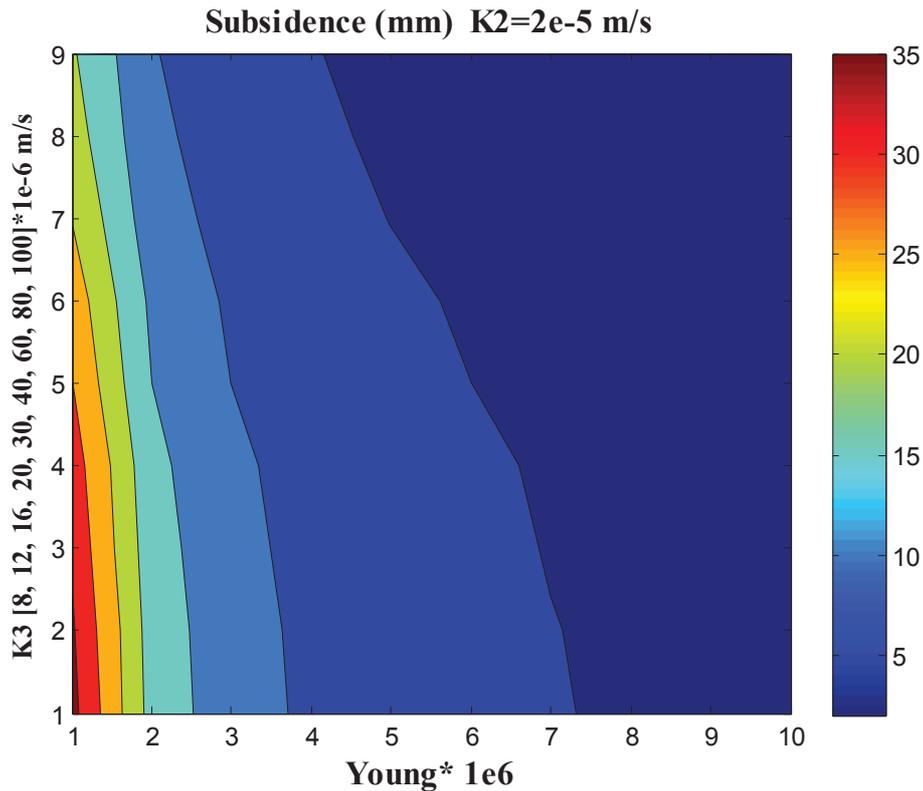


**Figure 6.21 :** Variation de la réponse gravitationnelle ( $\mu\text{gal}$ ) en fonction de la conductivité  $K_3$  et du module de Young en (Pa) pour une conductivité  $K_2$  fixée.

#### 4.4.3 Variation de la subsidence en fonction du rapport ( $K_2/K_3$ ) et du module d'Young

Si l'on connaît la proportion d'argile dans le manteau d'altération, la subsidence peut permettre d'estimer le rabattement. Avec une épaisseur d'argile de 2 m, soit une proportion d'argile de 10% sur une épaisseur de 20 m, on obtient une subsidence de 2 mm à 2 cm par mètre de rabattement et un signal gravimétrique additionnel  $0.3\mu\text{gal}$  par mm de subsidence. Le nivellement peut donc aussi contraindre le rabattement à condition d'être effectué avec une précision millimétrique.

La figure 6 22 ci-dessous montre que plus  $K_3$  et le module de Young sont faibles, plus la subsidence est importante.



**Figure 6.22** : Variation de la subsidence en (mm) en fonction du rapport K3 et du module d'Young en (Pa), pour une conductivité K2 fixée.

## 5 Conclusion

Sept jours de test de pompage théorique dans un aquifère de socle ont été modélisés en utilisant MODFLOW/PMWIN et une grille d'espacement variable avec un maillage de 0,2 m près du puits augmentant progressivement jusqu'à 2 km près de la frontière de la boîte de modélisation. Ce modèle est calibré avec des solutions analytiques et numériques publiées dans la littérature et est combiné avec un modèle gravimétrique fonctionnant sur la même grille. Nous avons obtenu un écart de moins de 3% avec Damiata et Lee(2006) pour les aquifères libres et homogènes et de 0,2% avec Theis pour les aquifères confinés ce qui a été considéré comme acceptable pour la suite de nos calculs.

Des simulations des rabattements et des réponses gravitationnelles ont été effectuées lors d'un pompage s'effectuant soit dans les altérites, soit dans la couche fissurée à la base des altérites soit dans une faille. A chaque fois, nous avons utilisé le débit maximum possible compte tenu de la conductivité des différents milieux.

Si l'on pompe dans une zone de faille, ce qui correspond au cas d'un forage productif, on constate que le signal gravimétrique est d'autant plus important que le niveau statique est élevé. Ceci est dû au fait que les anomalies de masses sont alors plus proches du gravimètre. Par contre le rabattement dans les altérites est presque indépendant du niveau statique. Cependant on constate que dans l'intervalle 10 - 100 m on arrive à distinguer que le rabattement est anisotrope, i.e. plus important dans la direction parallèle à la faille. De même le signal gravimétrique est anisotrope.

Les travaux de ce chapitre ont été poursuivis par Pierre GENTHON et une partie des résultats a été présentée à l'AGU 2014 sous forme de poster. Il a été notamment montré que des expériences de pompage suivies par un réseau gravimétrique et de nivellement pouvaient permettre d'estimer l'ordre de grandeur des conductivités  $K_2$  et  $K_3$ , mais pas le rapport entre ces deux quantités.

Les résultats présentés ici sont théoriques et ils concernent un milieu très simplifié. Il n'y a pas de doute que le milieu réel sera plus complexe, les zones de failles n'ont pas de raison d'être verticales, les milieux fracturés présenteront une perméabilité hétérogène et anisotrope. L'intérêt d'un tel modèle est néanmoins de montrer que les signaux gravimétriques obtenus rentrent dans la gamme de ceux qui sont mesurables compte tenu de la précision actuelle des appareils, ce qui justifie la mise en place de premières expériences de terrain sur des sites bien connus.

## **Conclusion Générale et perspectives**

Notre étude s'inscrit dans le cadre de la problématique de la caractérisation et la modélisation des aquifères du socle. Compte tenu de l'urbanisation croissante en Afrique, les ressources en eau des villes sont soumises à de fortes pressions qualitatives autant que quantitatives. Notre site d'étude est donc situé en zone urbaine Africaine au cœur de la ville de Ouagadougou, capitale du Burkina Faso.

La géologie du Burkina Faso comprend essentiellement deux composantes : l'une cristalline et l'autre sédimentaire. La carte géologique montre que la ville de Ouagadougou repose sur du socle cristallin comprenant essentiellement des granodiorites, des tonalites et des diorites. La ville est donc située exclusivement sur des aquifères de socle.

L'objectif de notre recherche est de caractériser le fonctionnement hydrodynamique des aquifères de socle dans un milieu urbain. Notre apport a consisté à (i) montrer la variabilité, à l'échelle du  $\text{km}^2$ , du bilan annuel de l'eau sur une année hydrologique, (ii) montrer comment les aquifères de socle réagissent aux variations de climat à une échelle annuelle à pluri-décennale à l'aide d'un modèle physique (iii) calculer le signal gravimétrique attendu lors d'un pompage d'essai dans un aquifère de socle (iv) faire le suivi de la pollution à l'intérieur d'une zone d'extension kilométrique à Ouagadougou.

La méthodologie utilisée dans cette étude a consisté dans un premier temps à analyser les données climatiques par des méthodes de corrélations et dans un deuxième temps à intégrer ces données dans un modèle numérique 1D semi conceptuel permettant de quantifier les flux intervenant dans le bilan en eau de l'aquifère.

Cette étude a présenté diverses difficultés provenant du fait qu'elle a été réalisée dans un contexte urbain. L'accès aux points de mesure n'a pas été facile du fait que la quasi-totalité de les puits et forages sont privés et situés dans des concessions. Par manque de moyens pour se raccorder au réseau d'adduction en eau potable et de peur qu'on les oblige à fermer leurs puits, les habitants des quartiers, surtout les plus démunis, préfèrent les garder cachés bien que la qualité de l'eau ne soit pas assurée.

Les données climatiques à Ouagadougou ont été recherchées dans les différentes bases de données. Les précipitations varient d'une année à l'autre et montrent une tendance à la hausse entre 1978 et 2013 avec un coefficient de détermination  $R^2$  de 9,3%. Les mois de juillet et août restent les plus pluvieux avec une tendance à la hausse de la part de précipitation se produisant durant ces deux mois. Les modèles saisonnier et réel des précipitations montrent un bon ajustement avec un résidu de 17% de variance non expliquée.

Une très faible corrélation a été obtenue entre les précipitations et la température. Une corrélation significative a été trouvée entre la pluie et la hauteur d'eau au piézomètre du CIEH. Cependant, cette corrélation doit être traitée avec prudence compte tenu de la composante périodique contenue dans le signal piézométrique.

L'établissement d'un mini réseau piézométrique en ville et son suivi sur une année hydrologique permettent de tirer des conclusions sur la ressource en eau. La modélisation simplifiée (ici avec un modèle à 3 réservoirs) des variations des niveaux piézométriques sur une région géologiquement homogène pendant et une année hydrologique permet d'effectuer une comparaison des paramètres des modèles et donc des termes du bilan hydrologique pour des occupations des sols variés : une zone verte naturelle, une zone urbanisée avec forte densité d'arbres, un quartier d'urbanisation ancienne.

Les paramètres hydrologiques obtenus permettent de distinguer des zones fragiles à protéger telles que le parc Bangr Weogo et le barrage n°3. L'urbanisation accélérée de la ville (étanchéification des routes, des canaux d'évacuation, mise en place d'un réseau d'assainissement...) favorise le ruissellement et défavorise la recharge naturelle de la nappe souterraine.

La tentative de modélisation du piézomètre du CIEH sur une période pluridécennale montre que la modélisation sur une année ne peut être extrapolée sur une plus longue période. Nous avons été amenés à attribuer la dérive des paramètres hydrologiques au piézomètre du CIEH aux changements des surfaces urbanisées. Ces changements rendent caduque la procédure de calage du modèle sur une période, puis son évaluation sur une période ultérieure. D'autre part notre modèle, validé essentiellement sur une année sèche, 2013 - 2014 (604 mm) ainsi que sur la période 1978 - 1994, aussi une période sèche, s'est avérée incapable de reproduire de manière satisfaisante l'année 2012 - 2013, caractérisée par une pluviométrie de 1040 mm dont 419 mm pour le seul mois de juillet.

Il est important de pouvoir prédire le comportement des ressources en eau souterraines de la ville de Ouagadougou pendant les futurs changements climatiques. Le travail de modélisation du CIEH effectué ici montre qu'il faut pouvoir prendre en compte les changements de propriétés hydrologiques des surfaces résultant des changements d'occupation des sols. D'autre part le modèle utilisé devra être calibré pour des années caractéristiques sèches et humides. Ceci requiert des séries longues.

Il est donc important de disposer dans la région de Ouagadougou d'un jeu de piézomètres de référence suivis sur des périodes pluri - décennales. Le piézomètre du CIEH doit continuer à être suivi. Les nombreuses interruptions dans son suivi depuis les années 90 sont bien sur préjudiciables à une modélisation détaillée mais n'empêchent pas la compréhension des grandes tendances dues au climat ou bien concernant l'aménagement de l'espace. Un des puits du Parc Bangr Weogo pourrait être préservé de toute exploitation et réservé à un suivi piézométrique dans un environnement naturel. Dans le même ordre d'idées, on pourrait reprendre le suivi d'un certain nombre de piézomètres sur le pourtour de la ville de Ouagadougou.

La simulation du signal gravimétrique a nécessité l'interfaçage d'un code de calcul d'anomalies gravimétrique avec Modflow. L'ensemble a été validé d'une part avec des solutions analytiques et d'autre part en comparant nos résultats avec ceux obtenus par Damiat et Lee (2006).

Des simulations des rabattements et des réponses gravitationnelles ont été effectuées lors d'un pompage effectué soit dans les altérites, soit dans la couche fissurée à la base des altérites soit dans une faille. Le rabattement est associé à une subsidence due à la compaction des argiles présentes dans le profil d'altération.

Le signal gravimétrique est important si le niveau initial de l'eau est proche du sol. Le pompage dans la faille montre qu'entre 10 et 100 m du point de pompage, on obtient des rabattements nettement différents le long de la faille et perpendiculairement à celle-ci : le rabattement est plus important dans la direction de la faille.

Les données gravimétriques peuvent donc donner des informations sur les fluctuations des niveaux d'eau des aquifères de socle.

Connaissant le module de Young des altérites ainsi que la réponse gravimétrique et la subsidence lors d'un pompage on peut donner des informations sur le rapport  $k_2/k_3$  de la couche fissurée à la base des altérites et sur l'orientation de la faille.

La suite des travaux de cette partie a été poursuivi par Pierre GENTHON et une partie des résultats a été présentée à l'AGU 2014 sous forme de poster. Ces résultats restent théoriques et ils représentent un aquifère granitique de socle idéalisé. Ils doivent donc être confirmés par des expériences sur le terrain.

L'eau souterraine est présente à de faibles profondeurs à Ouagadougou, surtout en fin de saison des pluies. Elle fournit une ressource facilement accessible, mais cependant sujette à la pollution. Celle-ci est largement utilisée y compris dans certains cas pour l'eau de boisson. Dans la zone de Zogona, qui est un quartier traditionnel ancien, nous en avons trouvé deux exemples.

Les analyses réalisées en 2013 montrent :

- ✓ deux faciès dominant : des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes, et des eaux chlorurées/nitratées calciques et magnésiennes. Seul le point PP6 présente un faciès bicarbonaté sodique en saison sèche ;
- ✓ des teneurs en nitrates trois fois supérieures aux normes de l'OMS dans tous les puits de Zogona et exceptionnellement sept fois supérieures au niveau du puits PP4 (391,16 mg/L).

D'une manière générale les problèmes environnementaux à Ouagadougou sont anthropiques. Deux grands mécanismes de pollution sont distingués : par lessivage des sols puis infiltration ou bien par mise en connexion de la nappe avec les latrines lors de remontée du niveau d'eau en saison des pluies.

Les résultats de la présente étude peuvent être critiqué (et nous même l'avons fait au sein du présent manuscrit). Ces résultats devront être étendus à l'échelle de la ville de Ouagadougou et comparés à ceux obtenus dans le futur dans d'autres sites comparables. L'apport de la gravimétrie lors des pompages devra être confirmé sur des cas concrets. Pour suivre la qualité des eaux souterraines, il est important de continuer des analyses chimiques pendant et après la saison des pluies afin de pouvoir modéliser l'évolution des nitrates dans les aquifère de socle du Burkina Faso.

Cette thèse s'inscrit dans l'objectif d'amener les enseignants de l'Université des Comores à un niveau élevé dans le domaine de la modélisation des eaux souterraines, une compétence utile dans un contexte insulaire dans lequel la ressource en eau est rare. Cette problématique est particulièrement présente sur l'île de Ngazidja aux Comores où il n'y a aucun écoulement superficiel.

## **Références Bibliographiques**

- Albergel, J., Carbonnel, J. P., Grouzis, M. (1985). Péjoration climatique au Burkina Faso : Incidences sur les ressources en eau et les productions végétales. *Cah OSTROM, Sér. Hydrol. Vol XXI*, 1, 3–19.
- Amoussou, E., Camberlin, P., & Mahé, G. (2012). Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Afrique de l'Ouest). *Hydrological Sciences Journal*, 57805–817. doi:10.1080/02626667.2011.643799
- Antoine, P. (1997). L'urbanisation en Afrique et ses perspectives, Revue de FAO «Aliments dans les villes» 21p.
- Ardoin, S., Lubes-niel, H., Servat, E., Dezetter, A., & Boyer, J. (2003). Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'ouest: caractérisation de la situation de la décennie 1990. *Hydrology of Die Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an International Symposium Held at Montpellier. IAHS Publ., 278*, 223–228.
- Ardoin, S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eaux de grands bassins hydrographiques en zone soudano sahélienne. Thèse de l'Université Montpellier2 437p
- Assouma D. (1988) Etude par modèle mathématique de la structure et du fonctionnement d'un aquifère de socle exploité, en région tropicale (alimentation en eau potable de la ville de Dapaong-Togo). Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Orléans, 183 p.
- AFRICAPOLIS : Dynamiques de l'urbanisation ouest-africaine 1950 – 2020  
<http://www.afd.fr/jahia/Jahia/Africapolis>
- Bayer, R., Lesquer, A., 1978. Les anomalies gravimétriques de la bordure orientale du craton ouest-africain: géométrie d'une suture pan-africaine. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7) 20, 863-876.
- Bazie, P., Dieng, B., Ackerer, P. (1995). Bilan des transferts verticaux d'eau en zone non-saturée sous climat soudano-sahélien: application à l'estimation de la recharge des nappes. *Revue Des Sciences de L'eau*, 8(2), 237. doi:10.7202/705221ar
- Berger J., Camerlo J. Cfahy J. et Haubert M. (1980) Etudes des ressources en eaux souterraines dans une région de socle cristallin : la boucle du cacao (Côte d'Ivoire). *Bull. BRGM, section III, 2<sup>e</sup> série, n°4*, 273-291
- Bessoles, B. (1977). Géologie de l'Afrique : craton Ouest-Africain. *Mémoire B.R.G.M n° 88*.
- Blainey, J. B., Ferré, T. P., & Cordova, J. T. (2007). Assessing the likely value of gravity and drawdown measurements to constrain estimates of hydraulic conductivity and specific yield during unconfined aquifer testing. *Water Resources Research*, 43(12), n/a–n/a. doi:10.1029/2006WR005678
- Bonnet M. (1982) Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. Thèse Doctorat d'Etat en Sciences, Institut National Polytechnique de Lorraine Nancy Serie Document n°34, 438p.

- Boubacar, A. H. (2010). Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique: cas de la communauté urbaine de Niamey (Niger). Thèse Université Abdou Moumouni de Niamey.198p
- Boyer, J.F., Dieulin C., Rouché, N., Cres, A., Servat, E., Paturel, J.E., Mahé, G. (2006) SIEREM an environmental information system for water resources. 5th World FRIEND Conference, La Havana - Cuba, November 2006, *IAHS Publ* 308: 19-25
- Castaing C., et al., 2003. Notice explicative de la carte géologique et minière à 1/1 000 000ème du Burkina Faso. Proj. SYSMIN 7 ACP BK 074 UE
- Chiang W.H , and. Kinzelbach W (1998) Processing Modflow; A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution 325p  
<http://www.simcore.com/files/pm/v5/pm5.pdf>
- Chilton, P. J. et Foster, S. (1995) Hydrogeological characterisation and water-supply potentiel of basement aquifers in tropical Africa. *Hydrogeology Journal*, v.3. n°1, p 36-49.
- Compaoré, G., Lachassagne, P., Pointet, T., & Travi, Y. (1997). Evaluation du stock d'eau des altérites : expérimentation sur le site granitique de Sanon (Burkina Faso ). *IAHS Publ*, 241, 37–46.
- Compaoré, G. (1997) Evaluation de la fonction capacitive des altérites: site expérimental de Sanon Burkina Faso. Thèse université d'Avignon ; 178p.
- Courtois, N., Lachassagne, P., Wyns, R., Blanchin, R., & Bouga, F. D. (2010). Large-Scale Mapping of Hard-Rock Aquifer Properties Applied to Burkina Faso, *48(2)*, 269–283.
- CIEH (1964). Alimentation en eau de Ouagadougou :Etudes hydrogéologiques. Rapport du ministère des travaux publics de la construction et des transports. Service de l'hydraulique. 67p.
- CIEH et BRGM (1992) Document guide pour l'implantation et la mise en exploitation des forages à gros débit en zone du socle cristallin 73p
- Damiata, B. N., & Lee, T.-C. (2006). Simulated gravitational response to hydraulic testing of unconfined aquifers. *Journal of Hydrology*, 318, 348–359. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.024
- Dennis, I., & Dennis, R. (2012). Climate change vulnerability index for South African aquifers. *International Conference on Groundwater Special Edition 2012*, 38(3), 417–426.
- Derman, A. (1990) Etude par modele mathématique de la structure et du fonctionnement d'un aquifère se socle cristallin en region tropicale au Togo. *Bulletin de liaison du CIEH, Editorial études techniques* , n°79, 6-15
- DESA, United Nations, Population Division (2008) World urbanization prospects. The 2007 Revision, Highlights NY 10017, USA;230p

- DESA, United Nations, Population Division (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352), 32p.
- Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Rajot, J. L., Sighomnou, D., & Vauclin, M. (2012). Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Global and Planetary Change*, 98-99, 18–30. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.07.009
- Descroix, L., Moussa, I. B., Genthon, P., Sighomnou, D., Mahé, G., Mamadou, I., Olivry, J.-C. (2013). Impact of Drought and Land – Use Changes on Surface – Water Quality and Quantity: The Sahelian Paradox. *Current Perspectives in Contaminant Hydrology and Water Resources Sustainability*, 243–271. doi:43185
- Detay, M., P. Poyet, Y. Emsellem, A. Bernard, et G. Aubrac, (1989) Influence du développement capacitif d'altérites et de son état de saturation sur les caractéristiques hydrodynamiques des forages en zone de socle cristallin, C. R. Acad. Sci. Paris, 309, 429
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J. C., & Krishnamurthy, N. S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*, 330, 260–284.
- 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. *Journal of Hydrology*, 405, 474–487. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.050
- Döll, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environmental Research Letters*, 4(3), 035006. doi:10.1088/1748-9326/4/3/035006
- Ducellier . J (1963) Contribution à l'étude des formations cristallines et métamorphiques du centre et du nord de la Haute Volta, Mémoires du BRGM No 10,
- Engalenc, M., Sawadogo, A.N. (1975). Rôle de la fracturation dans la recherche des eaux souterraines dans les granites de l'Afrique occidentale. Bull CIEH n°20, Ouagadougou, p.2-7.
- Etrillard A. P. (1994) Etude de la recharge des nappes aquifères de Bidi au Burkina Faso. Mémoire d'un DEA de génie civil et minier, Ecole Nationale Supérieure de géologie et des mines de Nancy, 124p.
- Faillat J. P. (1986). Aquifères fissurés en zone tropicale humide: structure hydrodynamique et hydrochimie. Thèse d'État, Université de Montpellier 536 p
- Faillat, J. P. (1990). Origine des nitrates dans les nappes de fissures de la zone tropicale humide. Exemple de la Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 113, 231–264. doi:10.1016/0022-1694(90)90177-Y

- Faillat, J. P., & Drogue, C. (1993). Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Hydrological Sciences Journal*, 38, 215–229
- Fifi, U., Winiarski, T., & Emmanuel, E. (2010). Vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis des polluants contenus dans les eaux pluviales urbaines dans les pays en développement Etude de l'adsorption des métaux lourds sur un sol représentatif de Port-au-Prince, Haïti Groundwater vulnerability t. *NOVATECH*, 1–10.
- Filippi, C., Milville, F., & Thiery, D. (2009). Evaluation de la recharge naturelle des aquifères en climat Soudano-Sahélien par modélisation hydrologique globale: Application à dix sites au Burkina Faso. *Hydrological Sciences Journal*, 35, 29–48
- Fournet, F., Meunier-Nikilema, A., & Salem, G. (2008). Ouagadougou une urbanisation différenciée (1850-2004) (*IRD Editio.*, p. 146).
- Fortin, J. P., et Royer, A., 2004. Le modèle hydrologique HYDROTEL : bases théoriques. Manuel d'utilisation, rapport INRS-ETE, Sainte-Foy, 104 p
- Foster, S. D., Hirata, R., & Howard, K. W. F. (2010). Groundwater use in developing cities: policy issues arising from current trends. *Hydrogeology Journal*, 19(2), 271–274. doi:10.1007/s10040-010-0681-2
- Foster, S. (2012). Hard-rock aquifers in tropical regions: using science to inform development and management policy. *Hydrogeology Journal*, 20, 659–672. doi:10.1007/s10040-011-0828-9
- Gehman, C. L., Harry, D. L., Sanford, W. E., Stednick, J. D., & Beckman, N. a. (2009). Estimating specific yield and storage change in an unconfined aquifer using temporal gravity surveys. *Water Resources Research*, 46, 1–16. doi:10.1029/2007WR006096
- Genthon, P., Hector, B., Luxereau, A., Descloitres, M., Abdou, H., Hinderer, J., & Bakalowicz, M. (2015). Groundwater recharge by Sahelian rivers — consequences for agricultural development: example from the lower Komadugu Yobe River ( Eastern Niger , Lake Chad Basin ). *Environmental Earth Sciences*. doi:10.1007/s12665-015-4119-y
- Genthon, P., Souriau M., (1987). New constraints on Aegean Subduction from SEASAT altimetry, *J. Geophys. Res.*, 92, 616-632.
- GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages
- González-Quirós, A., & Fernández-Álvarez, J. P. (2014). Simultaneous Solving of Three-Dimensional Gravity Anomalies Caused by Pumping Tests in Unconfined Aquifers. *Mathematical Geosciences*, 46, 649–664. doi:10.1007/s11004-014-9539-9

- Goulden, M., Conway, D., & Persechino, A. (2009). Adaptation to climate change in international river basins in Africa: a review / Adaptation au changement climatique dans les bassins fluviaux internationaux en Afrique: une revue. *Hydrological Sciences Journal*, 54, 805–828. doi:10.1623/hysj.54.5.805
- Haarsma RJ, Selten FM, Weber SL, Kliphuis M. 2005. Sahel rainfall variability and response to greenhouse warming. *Geophysical Research Letters* 32: L17702
- Hector, B. (2010 a) Caractérisation de la recharge d'une nappe phréatique en contexte sahélien à Difa (Est-Niger) : effet de site incluant poro-élasticité et reprise évapo-transpiratoire, Rapport de stage pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de l'Université de Strasbourg, 62p
- Hector, B., Genthon, P., Le Coz, M., Hinderer, J., Chalikakis, K., Descloitres, M., (2010 b). Gravimetric response of water table fluctuations in the Sahelian Difa site (East Niger): local effects including poro-elasticity, Abstract H12B-05, Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif.
- Hector B.(2014) Caractérisation hydro-géophysique multi-échelles des stocks d'eau souterrains d'un bassin versant en zone soudanienne de socle : apport de la gravimétrie. Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg 313p.
- Hector, B., Hinderer, J., Séguis, L., Boy, J.-P., Calvo, M., Descloitres, M., Riccardi, U. (2014). Hydro-gravimetry in West-Africa: First results from the Djougou (Benin) superconducting gravimeter. *Journal of Geodynamics*, 80, 34–49. doi:10.1016/j.jog.2014.04.003
- Herckenrath, D., Auken, E., Christiansen, L., Behroozmand, A. A., and Bauer Gottwein, P.(2012): Coupled hydrogeophysical inversion using time-lapse magnetic resonance sounding and time-lapse gravity data for hydraulic aquifer testing: Will it work in practice?, *Water Resour. Res.*, 48, W01539
- Hinderer, J., de Linage, C., Boy, J.P., Gegout, P., Masson, F., Rogister, Y., Amalvict, M., Pfeffer, J., Littel, F., Luck, B., Bayer, R., Champollion, C., Collard, P., Le Moigne, N., Diamant, M., Deroussi, S., de Viron, O., Biancale, R., Lernoine, J.M., Bonvalot, S., Gabalda, G., Bock, O., Genthon, P., Boucher, M., Favreau, G., Seguis, L., Delclaux, F., Cappelaere, B., Oi, M., Descloitres, M., Galle, S., Laurent, J.P., Legchenko, A. & Bouin, M.N., 2009. The GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment: Description and first results, *Journal of Geodynamics*, 48, 172-181.
- Hinderer, J., Pfeffer, J., Boucher, M., Nahmani, S., de Linage, C., Boy, J. P., Descloitres, M. (2012). Land Water Storage Changes from Ground and Space Geodesy: First Results from the GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) Experiment. *Pure and Applied Geophysics*, 169, 1391–1410. doi:10.1007/s00024-011-0417-9
- Holman, I. P. (2006). Climate change impacts on groundwater recharge-uncertainty , shortcomings , and the way forward? *Hydrogéologie Journal*, 14(0), 637–647. doi:10.1007/s10040-005-0467-0

- Hsi, J. P., Carter, J. P., & Small, J. C. (1994). Surface subsidence and drawdown of the water table due to pumping. *Géotechnique*, 44(3), 381–396. doi:10.1680/geot.1994.44.3.381
- Hulme, M. (2001). Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973-1998. *Global Environmental Change*, 11(August 2000), 19–29. doi:10.1016/S0959-3780(00)00042-X
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., & Lister, D. (2001). African climate change : 1900 – 2100. *Climate Res.*, 17, 145–168.
- IWACO (Aout 1990) : Etude du bilan d'eau au Burkina Faso : étude des quatre bassins versants expérimentaux au Burkina Faso ; volume I synthèse des études. Ministère de l'eau Direction des Etudes et de la planification 20p.
- IWACO (Juin 1986) : Approvisionnement en eau potable de la ville de Ouagadougou (periode 1985-2005) : étude hydrogéologique. Rapport général Ministère de l'eau Direction des Etudes planification et contrôle 51p.
- Jacob, T., Bayer, R., Chery, J. & Le Moigne, N., 2010. Time-lapse microgravity surveys reveal water storage heterogeneity of a karst aquifer, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 115, 18.
- Jacobsen M., Webster M. and Vairavamoorthy K.(2012) Le futur de l'eau dans les villes africaines. Pourquoi gaspiller l'eau? Vue d'ensemble. Rapport de la banque mondiale <http://water.worldbank.org/sites/water.worldbank.org/files/publication/Water-iuwm-full-report-french.pdf>
- Jyrkama, M. I., & Sykes, J. F. (2007). The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed ( Ontario ). *Journal of Hydrology*, 338, 237–250. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.02.036
- Kamga AF, Jenkins GS, Gaye AT, Garba A, Sarr A, Adedoyin A. 2005. Evaluating the National Center for Atmospheric Research climate system model over West Africa: Present-day and the 21st century A1 scenario. *Journal of Geophysical Research* 110: D03106, DOI:10.1029/2004JD004689
- Koïta, M., & Jourde, H. (2011)Hydrogeological proprieties of fractured rocks (granites,metasediments and volcanites) under the humid tropical climate of West Africa. *Advances in the Research of Aquatic Environment*, 2, 3–10.
- Koïta, M. (2010) Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire) thèse université Montpellier 2; 220 p.
- Kone, M. (1989) Aperçu sur la piézométrie du Burkina Faso. Mémoire de fin d'étude, Université de Ouagadougou,Institut des sciences de la nature 83p
- Kouassi, A.M.; Ahoussi, K.E. Yao K.A.; Ourega, W.E.J.A; Yao K.S.B.; Biemi, J. (2012). Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la region du N ' ZI-COMOÉ,(centre de la cote d'Ivoir). *Larhyss Journal*, 10,. 57-74

- Kouassi, A.M.; Kouame, K.F. ; Saley, M.B. ; Biemi, J. (2013) Impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines des aquifères du socle cristallin et cristallophyllien en Afrique de l'ouest : cas du bassin versant du N'ZI'BANDAMA (Cote D'Ivoire) *Larhyss Journal*, 16, 121-138
- Koussoubé, Y. (1996): Hydrogéologie en milieu du socle cristallin du Burkina Faso ; Cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (province du Yatenga) : thèse université Cheik Anta Diop de Dakar ; 207 p.
- Koussoubé, Youssouf- Savadogo, Alain Nindaoua - Nakolendoussé, S. (2003). Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone Sahélo-Soudanienne du Burkina Faso (bassin versant de Bidi). *Téledétection*, 3, 419-427.
- Lachassagne, P., Maréchal, J. C., Ahmed, S. H., Dewandel, B., Gandolfi, J. ., Krishnamurthy, N. , Wyns, R. (2005). Eaux souterraines : Nouveaux outils et méthodes pour gérer et protéger la ressource en eau souterraine des régions de socle. *HYDRO sciences. Hydroplus* N° 150, (February), 54-57.
- Lachassagne, P., Ahmed, S. H., Dewandel, B., & Courtois, N. (2009). Recent improvements in the conceptual model of hard rock aquifers and its application to the survey , management , modelling and protection of groundwater. *IAHS Publ*, 334, 250-256.
- Lachassagne, P., Maréchal, J. C., Ahmed, S. H., Dewandel, B., Gandolfi, J. ., Krishnamurthy, N. , Wyns, R. (2005). Eaux souterraines : Nouveaux outils et méthodes pour gérer et protéger la ressource en eau souterraine des régions de socle. *HYDRO sciences. Hydroplus* N° 150, (February), 54-57.
- 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. *Terra Nova*, 23(APRIL), 145-161.
- Laclavère G.(1993) Atlas du Burkina Faso, les éditions Jeune.Afrique. n°éditeur 1363/2, ISBN : 2-86950-229-X; ISSN :0337-0658 54p.
- Lawane A. ; Pantet A. ;Vinai R.;Thomassin J.H. (2011). Caractérisation des matériaux latéritiques pour une meilleure utilisation en Afrique Abstract : *20ème Congrès Français de Mécanique*, 1-6.
- Leduc, C., Bromley, J., & Schroeter, P. (1997). results of the HAPEX-Sahel hydrodynamic survey ( Niger ). *Journal of Hydrology*, 189, 123-138.
- Lemoine L. et Prat J. C.(1971) Etude des procédés de lutte contre l'évaporation sur les plan d'eau : Bilan d'une campagne d'essais à Ouagadougou Mars – Avril 1991. Rapport du CIEH 66p
- Lerner, Y. Y. D. N., & Tellam, M. H. B. J. H. (1999). Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham , UK. *Environmental Geology*, 38, 183-198

- Leusink, A. & Tyano, B. (1985) Observations du niveau de la nappe des eaux souterraines et de sa composition chimique et isotopique en zone de socle cristallin au Burkina Faso, *bulletin de liaison du CIEH* n° 62 Editorial études techniques
- L'Hôte Yann. 1998. *Climatologie et agroclimatologie de la province extrême nord* (P.E.N.) du Cameroun : préparation de l'atlas de la P.E.N. Montpellier : ORSTOM. 31p.
- Lienou, G., Mahe, G., Paturel, J. E., Servat, E., Sighomnou, D., Ekodeck, G. E., ... Dieulin, C. (2008). Evolution des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise: un impact de la variabilité climatique en Afrique équatoriale? *Hydrological Sciences Journal*, 53(February 2015), 789–801. doi:10.1623/hysj.53.4.789
- Mahé, G., & Paturel, J. (2009). 1896 – 2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers, *Comptes Rendus Geoscience* 341, 538–546.
- Mahe, G. , Olivry, J. C., & Servat, E. (2005). Sensibilité des cours d ' eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes. *Regional Hydrological Impact of Climatic Change-Hydroclimatic Variability IAHS Pub*, (April), 169–177.
- Mahe, G., Leduc, C., Seryat, E., & Dezetter, A. (2003). Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. *Hydrology of the Mediterranean and and Semiarial Regions IAHS Publ*, n°278, 215–222.
- Marguerat, Y. (1992). L'urbanisation de l'Afrique noir et ses conséquences. *Ann. Univ. Bénin, Sér. Lett, Tome XIII*1992, (1), 135–144.
- Maréchal, J. C., Dewandel, B., & Subrahmanyam, K. (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resources Research*, 40(11),
- Maréchal, J.-C., Wyns, R., Lachassagne, P., Subrahmanyam, K., & Touchard, F. (2003). Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(5), 451–460.
- Margat, J. (2008). Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde, Coédition : UNESCO et BRGM 52p
- Maynard K, Royer J, Chauvin F. 2002. Impact of greenhouse warming on the West African summer monsoon. *Climate Dynamics* 19: 499–514.
- Mbonu M, Travi Y, Guidaud R (1991). Groundwater quality in the basement complex region of North-Central, Nigeria: A precursory survey of nitrate concentration. In: E.O.A. Aina and N.O. Ogundipe (Eds), *Water Quality Monitoring and Environmental Status in Nigeria*. FEPA Monograph 6:176-190.
- Mérino, M. (2008). L'eau : quels enjeux pour l'Afrique subsaharienne ? *Fondation Pour La Recherche Stratégique*, 43, 1–13.

- Milville F., (1990 a) Contribution à l'étude des mécanismes de la recharge naturelle des aquifères par les pluies en climat semi-aride. Application au site de Barogo au Burkina Faso. Thèse Université P.et Marie Curie, Paris VI.
- Milville, F. (1990 b). Etude de la recharge naturelle des aquifères : Modélisation hydrologique globale du bassin expérimental de Barogo au Burkina Faso. *Bull. de liaison du CIEH N° 80* , Editorial études techniques
- Milville, F. (1991), Etude hydrodynamique et quantification de la recharge des aquifères en climat soudano-sahélien : application à un bassin expérimental au Burkina Faso (*IAHS pub l. n°199*; 1991)
- Morton, K. Y. A. O., Emile, S. G., Eugene, K., Alex, K. Z., Diaye, M. N., Hermann, E., Savane, I. (2014). Scenarios des changements climatiques pour les précipitations et les températures en Afrique subsaharienne tropicale humide: cas du bassin versant de Davo, Cote D'Ivoire. *Larhyss Journal, n° 18*, 197–213.
- Mouguin,B.; Allier, D.; Blanchin, R. ; Carn, A. ; courtois, N. ; Gateau, C. ; Pulot, E. ; Jegou, J-P. ; Lachassagne, P. ; Stolsteiner , P. ; Wyns , R. (2008) SILURES Bretagne. Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines) Rapport final-année 5 –BRBM/RP 56457-FR 129p,
- Moussa, R. *et al.*, 2010. Distributed hydrological modelling of farmed catchments ( MHYDAS ) : assessing the impact of man-made structures on hydrological processes. *LANDMOD* ,3, 1–14.
- Mouyen, M. (2011). Apport de la gravimétrie à l'étude de l'orogénèse taïwanaise. Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg 188p
- Nakolendousse, S.; Koussoubé, Y.;Savadogo A.N.; Rouleau, A. (2003) Les eaux souterraines du socle cristallin du Burkina Faso : disponibilité et qualité. *Anale de l'université d'Ouagadougou*, Serie C Vol. 001 ; 278- 303
- Neuman, S. P. (1975). Analysis of Pumping Test Data From Anisotropic Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response. *Water Resources Research, Vol, 11*(n° 2), 329–342.
- Neuman, S. P. (1972). Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed reponse of the water table *Water Resources Research, Vol 8* , 1031 - 1044
- N'Go, Y. A., Goné, D. L., & Goblé, I. S. M. M. (2005). Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d ' Agboville ( Sud Ouest de la Côte d ' Ivoire ) : Caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique SCIENCE, 01*(1), 127–144.
- Niassé M., Afouda A. et Amani A.(2004). Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. UICN, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni. ISBN : 2-8317-0783-8, 71pp

- Nicholson, S. (2005). On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, 63, 615–641. doi:10.1016/j.jaridenv.2005.03.004
- ONU (2000) Eliminer la pauvreté 2015. Résolution adoptée par l’assemblée générale, 55/2. Déclaration du Millénaire. Disponible sur le site : <http://www.un.org/french/millenaire/ares552f.htm>
- Onugba, A (1990) Contribution à la connaissance des systèmes aquifères de la Haute Benoue (Nigéria). Etude hydrochimique et isotopique de zones témoins du socle et du sédimentaire. Vulnérabilité des forages à la pollution. Thèse de doctorat Université d’Avignon. 203p
- Ouattara A., Some L. (2009) La croissance urbaine au Burkina Faso. Rapport du ministère de l’économie et des finances, Bureau central du recensement 118p
- Ouerghi, S., Rebai, N., Gabtni, H., Farhat, B., & Bouaziz, S. (2013). Apport de la gravimétrie à l’étude des structures effondrées du Nord-Est de la Tunisie: implications hydrogéologiques. *Hydrological Sciences Journal*, 58(March 2015), 1361–1373. doi:10.1080/02626667.2013.818219
- Paul, M.K., (1974). The gravity effect of a homogeneous polyhedron for tridimensional interpretation, *Pure Appl. Geophys.*, 112, 553-561
- Paturel, J. E., Boubacar, I., L’Aour, A., & Mahé, G. (2010). Analyses de grilles pluviométriques et principaux traits des changements survenus au 20ème siècle en Afrique de l’Ouest et Centrale. *Hydrological Sciences Journal*, 55(February 2015), 1281–1288. doi:10.1080/02626667.2010.527846
- Pfeffer J. (2011) Etude du cycle de l’eau en Afrique sahélienne : Approche multidisciplinaire et apport de la gravimétrie terrestre et spatiale, Thèse de doctorat de l’Université de Strasbourg 206p.
- Pool, D. R. (2008). The utility of gravity and water-level monitoring at alluvial aquifer wells in southern Arizona. *Geophysics*, 73(6), WA49. doi:10.1190/1.2980395
- Razack, M., & Lasm, T. (2006). Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology*, 325, 164–178. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.10.014
- Remini, W. et Remini, B. (2003). La sédimentation dans les barrages de l’Afrique du nord. *Larhyss Journal*, ISSN, 1112-3680, 45–54
- Rescan M (2005) Préviation des ressources en eau en Afrique de l’Ouest et Centrale jusqu’en 2099 par application des sorties du modèle d’évolution du climat HadCM3 au modèle hydrologique GR2M. Rapport d’un DEA Université Montpellier 2, 101p.
- Savadogo. A. N (1984). Géologie et Hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etudes régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de Doctorat ès. Grenoble I.

- Savadogo, N. A., et Nakolendousse, S., 1997. Etude comparée de l'apport des méthodes électromagnétique Max Min et électriques dans l'implantation des forages gros débits dans les régions de socle cristallin du Burkina Faso. *Journal of African Earth Sciences*, 24, 169–181.
- Sedogo L. (2007) Programme d'Action d'Adaptation à la variabilité et aux changements climatiques (PANA du Burkina Faso), Rapport du ministère de l'environnement et du cadre de vie. 76p
- Servat, É., Paturel, J. E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J. M., Travaglio, M., & Marieu, B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue Des Sciences de L'eau*, 12(2), 363.
- Sommen, J. J. V. D.; Merton, H.; Geirnat, W. (1988) Exploitation concentrée de l'eau souterraine par champs de captage pour la ville de Ouagadougou. *Bulletin de liaison du CIEH*, ISBN/ISSN/EAN : CI 11505.1
- Takem, G. E., Chandrasekharam, D., Ayonghe, S. N., & Thambidurai, P. (2010). Pollution characteristics of alluvial groundwater from springs and bore wells in semi-urban informal settlements of Douala, Cameroon, Western Africa. *Environmental Earth Sciences*, 61, 287–298. doi:10.1007/s12665-009-0342-8
- Taylor, R. et Howard, K. (2000). A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: Evidence from Uganda. *Hydrogeology Journal*, 8, 279–294. doi:10.1007/s100400050015
- Thiéry, D., 1988. Modélisation hydrologique semi-globale du fonctionnement hydraulique d'un système karstique exploité par pompages. 4<sup>ème</sup> colloque d'Hydrologie en pays calcaire et en milieu fissuré, *Annales Scientifiques de l'Université de Besançon*, 6, 113–120.
- Thiéry, D., 2003. Logiciel GARDENIA, version 6.0. Guide d'utilisation BRGM/RP 52832-FR, 102p,
- Thiéry, D., 2011. Plaquette de présentation du code de calcul du BRGM, GARDENIA version 8.1, note technique NT eau 2011/05, 10p.
- Travi, Y.; Murdy, J. (1997). Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *hydrogéologie*, n°1; pp.13-21
- Travi, Y. et Dia, O (1986). Interprétation hydrochimique sur les nappes de formation de socle du Sénégal Oriental. Programme C.E.A.O. Rapport, Département de Géologie. Dakar, 9 p.
- Trenberth, K. E., Shea, D. J. (2005). Relationships between precipitation and surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 32(14). doi:10.1029/2005GL022760

- Toé, G. (2004) : Apport des nouvelles techniques géophysiques à la connaissance du socle. Tomographie électrique électromagnétisme fréquentiel, résonance magnétique protonique. Application au Burkina Fasso. Thèse Université Paris 6 ; 272p.
- Wyns, R. O., Baltassat, J. E. A. N. I., Lachassagne, P. A., & Legchenko, A. N. (2004). Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bull. Soc. Géol. France*, 175, 21–34
- Wyns, R. (1998) –Ressource en eau de la Margeride ouest – PRD 324- Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitique du bassin versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif central). Rapport BRGM R 40191, 18p
- Woodworth J. (2011) Estimation of unconfined aquifer hydraulic proprieties using gravity and drawdown data. In partial fulfillment of the requirements For the Degree of Master of Science, Department of Geosciences Colorado State University Fort Collins, Colorado 76p
- Yameogo, S., 2008. Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso. Thèse Université d’Avignon et des Pays de Vaucluse.245p
- Yameogo, S.;Nakolendousse, S.; Koussoubé, Y.; Nikiema, J.; Savadogo, A.N.;Blavoux,B.; Valles, V. . (2009). contribution de méthode géostatique à l’étude de la structure spatiale des nitrates de 1800 puits à Ouagadougou au Burkina Faso. *Annales de l’Université de Ouagadougou-Série C*, vol.007, 172–199.
- Yameogo, S., Blavoux, B., Nikema, J., & Savadogo, A. N. (2013). Caracterisation du fonctionnement des aquifères de socle dans la région de Ouagadougou à partir d’une étude de la qualité chimique des. *Revue Des Sciences de L’eau*, 26(3), 173–191.

## Liste des figures

<b>Figure 1. 1</b> : Présentation de la zone d'étude.....	13
<b>Figure 1. 2</b> : Carte d'élévation de la zone d'étude à Ouagadougou construite par discrétisation des courbes de niveau de la carte au 1/50 000 (IGN.1984).....	14
<b>Figure1. 3</b> : Photo de l'échelle de mesure de la hauteur d'eau au barrage N° 3.....	15
<b>Figure 1.4</b> : Photo du canal central de Ouagadougou. La pompe est utilisée pour l'arrosage des cultures.....	16
<b>Figure 1. 5</b> : Photo du canal de l'Université de Ouagadougou .....	17
<b>Figure 1. 6</b> : le parc Bangr Weogo en pleine ville de Ouagadougou .....	18
<b>Figure 1. 7</b> : Photo d'une zone de maraichage à coté du puits FAO 15.....	18
<b>Figure 1. 8</b> : zone de maraichage du coté sud du barrage n°3(en jaune P FAO ce sont les puits aménagés par la FAO au profit des maraichers, PJ puits traditionnels).....	19
<b>Figure 1. 9</b> : présentation du quartier Zogona. (En jaune PP ce sont les puits des particuliers dans les concessions).....	20
<b>Figure 1. 10</b> : Présentation du campus de l'université de Ouagadougou.....	21
<b>Figure 1. 11</b> Eaux usées de la mosquée de l'université déversées dans un canal mal étanchéifié .....	22
<b>Figure 1. 12</b> Trou de recharge artificielle de la nappe .....	22
<b>Figure 1. 13:</b> Etat actuel des ouvrages piézométrique de l'université .....	23
<b>Figure 1. 14</b> Situation environnementale autour du piézomètre du CIEH.....	25
<b>Figure 1. 15</b> Photo de l'environnement autour du piézomètre du CIEH.....	26
<b>Figure 1. 16</b> Embouchure d'un petit canal d'assainissement à 20 m du canal de l'université.....	26
<b>Figure 1. 17</b> Environnement du puits particulier PP1.....	29
<b>Figure 1. 18</b> Etat actuelle des puits particuliers dans les concessions de Zogona .....	30
<b>Figure 1. 19</b> Les différents aménagements des puits rencontrés dans la zone de maraichage.....	34
<b>Figure 1. 20</b> Inondation des puits de la zone de maraichage tout prêt du barrage n°3.....	34

<b>Figure 2. 1</b> carte géologique du Burkina Faso (source Casting 2003).....	37
<b>Figure 2. 2</b> Carte géologique de Ouagadougou.....	38
<b>Figure 2. 3</b> Profil d'altération typique au sein de roches de socle.....	42
<b>Figure 2. 4 :</b> Schéma hydrogéologique type de l'ensemble altérites/socle au Burkina Faso (Source : Compaoré 1997).....	44
<b>Figure 3.1</b> les zones climatiques du Burkina Faso (source direction de la météorologie Burkina Faso).....	53
<b>Figure 3. 2</b> Précipitations annuelles à Ouagadougou 1953 – 2013.....	56
<b>Figure. 3. 3</b> Précipitations moyennes mensuelles à Ouagadougou (1978 - 2013).....	57
<b>Figure 3. 4</b> Précipitations annuelles à Ouagadougou (1978-2013). La droite de régression linéaire est indiquée.....	58
<b>Figure 3. 5</b> Précipitations mensuelles à Ouagadougou (1978 – 2013) avec les régressions linéaires pour les mois de juillet et aout.....	59
<b>Figure 3. 6</b> Pluviométrie moyenne des mois de Juillet et août (1978-2013) .....	60
<b>Figure 3. 7</b> Précipitation moyenne cumulée des mois de Juillet et Août (1978-2013).....	60
<b>Figure 3. 8</b> Modélisation du régime linéaire interannuelle des mois de juillet et août cumulés.....	61
<b>Figure 3. 9</b> Variation des coefficients directeurs des droites linéaires des précipitations mensuelles.....	62
<b>Figure 3. 10</b> Variation des précipitations moyennes mensuelles décennales entre 1980 à 2010.....	62
<b>Figure .3.11</b> Les modèles saisonnier et réel des précipitations mensuelles .....	64
<b>Figure 3. 12</b> L'écart entre le modèle saisonnier de la moyenne des précipitations mensuelles et le modèle réel des précipitations mensuelles.....	65
<b>Figure 3. 13</b> Variation mensuelle de la température entre (1978 - 2012), de l'ETP entre (1978 - 1990) et de l'humidité relative entre (1961 - 1978) à Ouagadougou .....	66
<b>Figure 3. 14 :</b> le déplacement du FIT avec l'harmattan et la mousson sur le Burkina Faso.....	67
<b>Figure 3. 15</b> Variation du niveau statique du piézomètre du CIEH et l'index pluviométrique calculé sur la période 1978 – 2013.....	68
<b>Figure 3. 16</b> Variations piézométriques sur l'année 2013 - 2014 dans trois parties de notre zone d'étude. a) la zone de Zogona : puits PP1,...PP7 ; b) le site de l'université : piézo CIEH, forage CIEH, forage cenou et forage présidence ; c) le parc Bangr Weogo: puits Rocaille et Pépinière. Pour chaque	

sous figure l'échelle verticale (hauteur piézométrique) est différente et le piézomètre du CIEH est figuré, à titre de comparaison.....	70
<b>Figure 3. 17</b> Variation des niveaux piézométriques des forages QP 98, 104, 121 au sein de la ville de Ouagadougou entre de 2001 à 2004 comparées à celles enregistrées au CIEH.....	71
<b>Figure 3. 18</b> Cartes piézométriques de la zone d'étude à Ouagadougou: (a)Octobre 2013; (b) Avril 2014.....	74
<b>Figure 3. 19</b> Autocorrélation des précipitations.....	76
<b>Figure 3.20</b> Autocorrélation du niveau moyen au piézomètre du CIEH.....	76
<b>Figure 3. 21</b> Corrélogramme croisé entre précipitation et niveau moyen du piézomètre du CIEH.....	77
<b>Figure 4.1</b> Schéma de fonctionnement du modèle utilisé.....	82
<b>Figure 4.2</b> Simulations des niveaux piézométriques pour les sites de l'Université de Ouagadougou (a, b, c, d); du quartier Zogona (e, f, g h, i) et du parc Bangr Weogo (j, k).....	90
<b>Figure 4. 3</b> Simulation des niveaux piézométriques du piézomètre du CIEH de 1978 à 2014.....	92
<b>Figure 4. 4</b> Simulation des niveaux piézométriques du piézomètre du CIEH pour la période 2012 – 2014.....	93
<b>Figure 4. 5</b> Simulation du piézomètre du CIEH pour un changement de 5% des différents paramètres du modèle (période de simulation : 1978 – 1994).....	94
<b>Figure 5.1:</b> Représentation graphique des concentrations caractéristiques en nitrate des huit analyses des eaux de Ouagadougou.....	103
<b>Figure 5.2 :</b> Faciès chimique de l'ensemble des eaux de la zone d'étude.....	106
<b>Figure 5.3 :</b> Représentation graphique des concentrations en nitrates dans les eaux du jardin.....	107
<b>Figure 5.4 :</b> Représentation graphique des concentrations en nitrate dans les eaux de Zogona.....	108
<b>Figure 5.5 :</b> Représentation graphique des concentrations en chlorure des huit analyses des eaux de Ouagadougou.....	109
<b>Figure 5.6 :</b> Représentation graphique des concentrations en chlorure dans les eaux des puits du jardin.....	109

<b>Figure 5.7 :</b> Représentation des concentrations en chlorure dans les eaux de Zogona.....	110
<b>Figure 5. 8:</b> Diagramme de Schoeller – Berkaloff des eaux souterraines de la zone urbaine (Zogona).....	110
<b>Figure 5. 9 :</b> Diagramme de Schoeller – Berkaloff des eaux souterraines de la zone de maraichage du barrage N°3.....	111
<b>Figure 5.10</b> Carte de distribution des nitrates au 1800 puits de l’agglomération de Ouagadougou (source Yameogo 2008).....	113
<b>Figure 6.1 :</b> Le modèle schématique de l'aquifère de socle.....	117
<b>Figure 6.2 :</b> A gauche un profil d'altération typique de socle. Le milieu inconnu correspond au (4). A droite, l'aspect de ce niveau au Burkina : essentiellement de la fracturation subhorizontale (= perméabilité sans porosité). La photo a été prise à Kombissiri, à 50 km au sud de Ouagadougou....	118
<b>Figure 6.3 :</b> Les milieux de pompage dans les aquifère du socle .....	120
<b>Figure 6.4 :</b> Maillage rectangulaire à taille variable.....	121
<b>Figure 6.5 :</b> Les paramètres à renseigner au modèle.....	122
<b>Figure 6.6:</b> Comparaison des rabattements entre solution analytique de Theis et solution numérique de Modflow.....	125
<b>Figure 6. 7</b> Courbe de rabattement du niveau piézométrique pendant 24h à 55 m du puits avec des maillages différents ( <b>a</b> : notre maillage, <b>b</b> : du tutoriel Processing Modflow).....	126
<b>Figure 6. 8:</b> Comparaison des rabattements obtenus dans cette étude (a) et publiés par Damiata et al. (2006) (b).....	127
<b>Figure 6.9 :</b> Comparaison des signaux gravimétriques obtenus Damiata (2006) (b) et au cours de cette étude (a). Les trois séries de courbes correspondent à un pompage durant 1 jour, 7 jours et 28 jours, avec un niveau statique initial à 10 m 25 m et 50 m sous la surface du sol.....	128
<b>Figure 6. 10 :</b> Courbe de la charge hydraulique (isopièze) .....	130
<b>Figure 6. 11</b> Courbe de rabattement dans les altérites pour des pompages à différents niveaux piézométriques.....	130
<b>Figure 6. 12:</b> Courbe des signaux gravimétriques pour des pompages à des différents niveaux piézométriques.....	131

<b>Figure 6. 13:</b> Courbes de rabattement dans les altérites avec pompage dans la couche basale à différents niveaux statiques initiaux.....	132
<b>Figure 6.14 :</b> Courbe des signaux gravimétriques pour des pompages à des différents niveaux statiques initiaux.....	132
<b>Figure 6.15 :</b> Rabattement dans les altérites pour un pompage au sein des altérites ou bien au sein de la couche basale.....	133
<b>Figure 6.16 :</b> Anisotropie des isopièzes pour un pompage au sein d'une faille. L'allongement des isopièzes est suivant la direction de la faille.....	134
<b>Figure 6.17 :</b> Courbes de rabattement dans les altérites avec pompage dans la faille avec différents niveaux statiques initiaux. A gauche, niveau statique 7 m; à droite niveau statique 0 m (l'eau est sub-affleurente).....	135
<b>Figure 6.18 :</b> Courbes des signaux gravimétrique pour des pompages dans la faille avec différents niveaux statiques initiaux. A gauche, niveau statique 7 m; à droite niveau statique 0 m.....	137
<b>Figure 6. 19 :</b> Variation du rabattement en fonction du rapport ( $K_2/K_3$ ) des conductivités de la couche basale des altérites et celle de la faille. Les conductivités sont exprimées en <b>m/s</b> et le rabattement en m.....	138
<b>Figure 6. 20 :</b> Variation du rabattement en mètres en fonction de $K_3$ , pour une valeur de $K_2$ fixée. Le rabattement est en mètres.....	140
<b>Figure 6.21 :</b> Variation de la réponse gravitationnelle ( <b><math>\mu\text{gal}</math></b> ) en fonction de la conductivité $K_3$ et du module de Young en ( <b>Pa</b> ) pour une conductivité $K_2$ fixée.....	141
<b>Figure 6.22 :</b> Variation de la subsidence en (mm) en fonction du rapport $K_3$ et du module de Young en (Pa), pour une conductivité $K_2$ fixée.....	142

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1. 1</b> Cordonnées et environnement des ouvrages piézométriques de l'université de ouagadougou.....	23
<b>Tableau 1. 2</b> Cordonnées et environnement des ouvrages piézométriques des concessions de Zogona.....	28
<b>Tableau 1. 3</b> Cordonnées et environnement des puits de la zone de maraichage tout prêt du barrage n°3.....	32
<b>Tableau 2.1</b> Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères du socle granitique au Burkina Faso et d'autres régions.....	47
<b>Tableau 3.1</b> Corrélation entre les précipitations et l'amplitude du piézomètre du CIEH.....	75
<b>Tableau 3.2</b> Matrice de corrélation entre température, précipitations et niveau statique du piézomètre du CIEH.....	78

<b>Tableau 4.1</b> Paramètres ajustés pour chaque puits ou forage .....	85
<b>Tableau 4. 2</b> Termes du bilan de l'année hydrologique 2013 - 2014. Ces différents termes sont exprimés en lame d'eau.....	86
<b>Tableau 4.3</b> Paramètres utilisés pour la modélisation de la chronique longue au CIEH.....	91
<b>Tableau 4. 4</b> Variations de l'erreur quadratique moyenne de la simulation du piézomètre du CIEH pour un changement de 5% des différent paramètres du modèle (période de simulation : 1978 – 1994).....	93
<b>Tableau 5. 1</b> : Valeurs caractéristiques des paramètres in situ des eaux de puits.....	100
<b>Tableau 5.2</b> : Concentrations caractéristiques en éléments majeurs de huit analyses en saison sèche.....	102
<b>Tableau 5.3:</b> Concentrations caractéristiques en éléments majeurs de huit analyses en saison des pluies.....	102
<b>Tableau 5. 4</b> Concentrations en éléments majeurs en saison sèche pour chaque puits.....	104
<b>Tableau 5. 5</b> Concentrations en éléments majeurs en saison des pluies pour chaque puits.....	105
<hr/>	
<b>Tableau 6.1</b> Les mesures du maillage en mètre .....	119
<b>Tableau 6. 2</b> : Paramètres caractéristiques de l'aquifère de socle au Burkina Faso .....	129

## Liste des abréviations

**CIEH** : Comité Inter Africain d'Études Hydrauliques

**HSM** : Hydro science Montpellier

**IRD** Institut de recherche pour le développement

**LHA** Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon

**MNT** : Modèle Numérique de terrain

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

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé

**ONU** Organisation des Nations unies

**PP1** : Puits particulier 1

**SIEREM** Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation

**2iE** Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

## **Annexe 1 : Les mesures piézométriques**

## 1 les mesures des niveaux statiques du piézomètre du CIEH (1978 – 2014)

dates	niveau statique(m)						
08/04/1978	6,71	24/08/1978	6,32	02/11/1978	6,18	09/05/1979	7,48
09/04/1978	6,73	25/08/1978	6,31	06/11/1978	6,19	14/05/1979	7,47
10/04/1978	6,70	28/08/1978	6,27	13/11/1978	6,27	17/05/1979	7,50
01/05/1978		29/08/1978	6,25	16/11/1978	6,30	18/05/1979	7,50
04/06/1978	6,70	30/08/1978	6,25	22/11/1978	6,36	21/05/1979	7,52
20/06/1978	6,77	31/08/1978	6,25	25/11/1978	6,38	23/05/1979	7,51
21/06/1978	6,78	01/09/1978	6,24	29/11/1978	6,40	27/05/1979	7,55
23/06/1978	6,76	05/09/1978	6,21	01/12/1978	6,40	31/05/1979	7,55
26/06/1978	6,80	06/09/1978	6,20	04/12/1978	6,45	05/06/1979	7,56
28/06/1978	6,76	07/09/1978	6,20	06/12/1978	6,46	08/06/1979	7,61
29/06/1978	6,77	08/09/1978	6,19	12/12/1978	6,56	12/06/1979	7,61
05/07/1978	6,78	12/09/1978	6,18	15/12/1978	6,58	15/06/1979	7,61
07/07/1978	6,73	13/09/1978	6,18	18/12/1978	6,57	20/06/1979	7,62
08/07/1978	6,73	15/09/1978	6,16	22/12/1978	6,64	25/06/1979	7,62
09/07/1978	6,73	18/09/1978	6,14	01/01/1979	6,70	27/06/1979	7,62
11/07/1978	6,72	19/09/1978	6,12	08/01/1979	6,74	29/06/1979	7,62
17/07/1978	6,70	20/09/1978	6,11	10/01/1979	6,75	02/07/1979	7,61
18/07/1978	6,68	21/09/1978	6,13	15/01/1979	6,78	09/07/1979	7,64
19/07/1978	6,65	22/09/1978	6,13	17/01/1979	6,80	12/07/1979	7,62
20/07/1978	6,65	25/09/1978	6,09	23/01/1979	6,86	16/07/1979	7,58
21/07/1978	6,65	27/09/1978	6,10	29/01/1979	6,89	20/07/1979	7,58
22/07/1978	6,65	28/09/1978	6,08	31/01/1979	6,90	01/08/1979	
25/07/1978	6,62	29/09/1978	6,08	05/02/1979	6,94	05/09/1979	7,13
26/07/1978	6,64	02/10/1978	6,06	07/02/1979	6,96	10/09/1979	7,05
27/07/1978	6,61	03/10/1978	6,06	13/02/1979	6,98	18/09/1979	6,84
31/07/1978	6,61	05/10/1978	6,03	22/02/1979	7,05	20/09/1979	6,82
01/08/1978	6,66	06/10/1978	6,04	23/02/1979	7,09	25/09/1979	6,70
03/08/1978	6,57	06/10/1978	6,05	02/03/1979	7,10	26/09/1979	6,71
04/08/1978	6,55	10/10/1978	6,05	05/03/1979	7,12	27/09/1979	6,69
06/08/1978	6,52	11/10/1978	6,06	13/03/1979	7,13	30/09/1979	6,67
08/08/1978	6,50	13/10/1978	6,05	19/03/1979	7,18	03/10/1979	6,69
09/08/1978	6,49	16/10/1978	6,07	22/03/1979	7,21	07/10/1979	6,61
10/08/1978	6,48	17/10/1978	6,07	26/03/1979	7,24	09/10/1979	6,60
11/08/1978	6,48	18/10/1978	6,07	02/04/1979	7,30	11/10/1979	6,59
14/08/1978	6,45	19/10/1978	6,07	10/04/1979	7,34	18/10/1979	6,57
16/08/1978	6,48	20/10/1978	6,10	17/04/1979	7,38	22/10/1979	6,61
17/08/1978	6,40	23/10/1978	6,10	23/04/1979	7,42	25/10/1979	6,62
18/08/1978	6,37	25/10/1978	6,11	27/04/1979	7,41	28/10/1979	6,61
21/08/1978	6,36	27/10/1978	6,12	03/05/1979	7,45	29/10/1979	6,64
23/08/1978	6,34	30/10/1978	6,15	08/05/1979	7,46	04/11/1979	6,69

dates	niveau statique(m)						
06/11/1979	6,67	30/07/1980	8,04	22/09/1981	7,78	07/02/1983	8,71
07/11/1979	6,67	04/08/1980	7,98	29/09/1981	7,69	01/03/1983	8,83
11/11/1979	6,70	19/09/1980	7,34	19/10/1981	7,67	06/04/1983	8,95
13/11/1979	6,73	22/09/1980	7,30	01/11/1981		09/05/1983	9,12
20/11/1979	6,68	25/09/1980	7,25	28/12/1981	8,06	27/05/1983	9,17
26/11/1979	6,85	06/10/1980	7,27	01/01/1982		01/06/1983	9,13
28/11/1979	6,88	07/10/1980	7,27	09/02/1982	8,27	10/06/1983	9,16
02/12/1979	6,93	13/10/1980	7,25	17/02/1982	8,28	20/06/1983	9,18
06/12/1979	6,96	15/10/1980	7,29	11/03/1982	8,42	24/06/1983	9,13
11/12/1979	6,99	18/10/1980	7,34	30/03/1982	8,54	27/06/1983	9,12
17/12/1979	7,03	01/11/1980	7,43	13/04/1982	8,61	04/07/1983	9,05
20/12/1979	7,04	24/11/1980	7,87	28/04/1982	8,59	11/07/1983	9,01
27/12/1979	7,13	02/12/1980	7,68	03/05/1982	8,61	17/07/1983	9,03
21/01/1980	7,30	02/12/1980	8,17	13/05/1982	8,63	23/07/1983	8,97
01/02/1980	7,33	01/01/1981		18/05/1982	8,65	25/07/1983	8,95
15/02/1980	7,45	05/02/1981	7,97	01/06/1982	8,71	01/08/1983	8,93
03/03/1980	7,54	26/02/1981	8,11	07/06/1982	8,67	11/08/1983	8,78
28/03/1980	7,73	06/03/1981	8,28	09/06/1982	8,67	18/08/1983	8,70
14/04/1980	7,82	03/04/1981	8,44	17/06/1982	8,65	27/08/1983	8,62
25/04/1980	7,87	12/04/1981	8,54	24/06/1982	8,65	08/09/1983	8,46
07/05/1980	7,95	30/04/1981	8,57	01/07/1982	8,62	19/09/1983	8,32
23/05/1980	8,02	11/05/1981	8,61	06/07/1982	8,54	25/09/1983	8,27
02/06/1980	8,05	27/05/1981	8,64	26/07/1982	8,45	04/10/1983	8,26
05/06/1980	8,08	11/06/1981	8,64	01/08/1982	8,39	01/11/1983	8,5
12/06/1980	8,05	18/06/1981	8,67	09/08/1982	8,35	15/12/1983	8,73
16/06/1980	8,04	02/07/1981	8,68	17/08/1982	8,29	06/01/1984	8,88
19/06/1980	8,04	06/07/1981	8,67	23/08/1982	8,21	31/01/1984	8,99
24/06/1980	8,30	07/07/1981	8,68	30/08/1982	8,10	06/02/1984	9,18
27/06/1980	8,10	10/07/1981	8,66	06/09/1982	8,01	12/03/1984	9,24
01/07/1980	8,01	13/07/1981	8,65	13/09/1982	8,02	08/04/1984	9,32
08/07/1980	8,07	17/07/1981	8,65	19/09/1982	8,05	10/05/1984	9,42
10/07/1980	8,10	21/07/1981	8,62	23/09/1982	8,04	25/05/1984	9,42
11/07/1980	8,07	23/07/1981	8,63	18/10/1982	8,09	01/06/1984	
17/07/1980	8,08	29/07/1981	8,59	25/10/1982	8,14	11/07/1984	9,45
18/07/1980	8,02	12/08/1981	8,33	01/11/1982	8,20	18/07/1984	9,42
21/07/1980	8,06	18/08/1981	8,25	08/11/1982	8,26	24/07/1984	9,39
22/07/1980	8,08	27/08/1981	8,09	16/11/1982	8,31	25/07/1984	9,39
24/07/1980	8,06	01/09/1981	7,98	28/11/1982	8,40	30/07/1984	9,35
28/07/1980	8,04	10/09/1981	7,91	01/12/1982		01/08/1984	9,36
29/07/1980	8,03	14/09/1981	7,87	13/01/1983	8,61	06/08/1984	9,30

dates	niveau statique(m)	dates	niveau statique(m)	dates	niveau statique(m)	dates	niveau statique(m)
08/08/1984	9,29	12/08/1986	10,10	26/09/1988	9,39	21/09/1989	9,20
13/08/1984	9,26	27/08/1986	9,94	27/09/1988	9,36	25/09/1989	9,13
17/08/1984	9,23	03/09/1986	9,73	28/09/1988	9,34	28/09/1989	9,08
22/08/1984	9,20	05/09/1986	9,70	31/10/1988	9,26	03/10/1989	9,04
29/08/1984	9,17	16/09/1986	9,64	16/11/1988	9,30	09/10/1989	8,96
05/09/1984	9,15	13/10/1986	9,34	01/12/1988		11/10/1989	8,94
01/10/1984		27/10/1986	9,36	10/01/1989	9,03	16/10/1989	8,89
08/11/1984	9,88	07/11/1986	9,36	16/01/1989	9,11	23/10/1989	8,86
23/11/1984	9,24	01/12/1986		23/01/1989	9,15	30/10/1989	8,82
01/12/1984		01/01/1987		08/02/1989	9,63	03/11/1989	8,83
01/01/1985		05/02/1987	9,72	28/03/1989	9,78	13/11/1989	8,82
05/02/1985	9,66	20/02/1987	9,77	03/04/1989	9,80	20/11/1989	8,89
23/03/1985	10,46	06/03/1987	9,90	17/04/1989	9,87	24/11/1989	8,86
01/04/1985		16/03/1987	10,00	27/04/1989	9,90	29/11/1989	8,88
01/05/1985		22/04/1987	10,16	10/05/1989	10,00	14/12/1989	8,99
06/06/1985	10,21	21/05/1987	10,32	23/05/1989	10,05	21/12/1989	9,00
17/06/1985	10,20	09/06/1987	10,45	29/05/1989	10,07	28/12/1989	8,98
30/06/1985	9,98	01/07/1987	10,30	01/06/1989	10,07	03/01/1990	9,05
29/07/1985	9,93	14/07/1987	10,29	15/06/1989	10,11	10/01/1990	9,03
08/08/1985	9,82	06/08/1987	10,12	29/06/1989	10,11	16/01/1990	9,11
12/08/1985	9,81	02/09/1987	9,77	10/07/1989	10,09	23/01/1990	9,15
23/08/1985	9,72	18/09/1987	9,69	24/07/1989	9,99	31/01/1990	9,15
25/08/1985	9,72	01/10/1987	9,58	26/07/1989	9,98	05/02/1990	9,17
16/09/1985	9,45	05/10/1987	9,54	28/07/1989	9,98	14/02/1990	9,22
17/09/1985	9,45	26/10/1987	9,51	31/07/1989	9,94	28/02/1990	9,29
22/09/1985	9,50	01/11/1987		02/08/1989	9,94	16/03/1990	9,36
30/09/1985	9,34	01/12/1987		07/08/1989	9,89	21/03/1990	9,40
01/10/1985		01/01/1988		10/08/1989	9,88	28/03/1990	9,43
01/11/1985		01/02/1988	9,98	16/08/1989	9,82	10/04/1990	9,51
18/12/1985	9,75	16/03/1988	10,19	18/08/1989	9,78	19/04/1990	9,56
24/01/1986	9,90	07/04/1988	10,30	22/08/1989	9,73	03/05/1990	9,62
20/02/1986	10,03	11/04/1988	10,35	24/08/1989	9,72	17/05/1990	9,71
18/03/1986	10,25	21/04/1988	10,30	28/08/1989	9,65	29/05/1990	9,77
27/04/1986	10,42	26/04/1988	10,30	31/08/1989	9,58	11/06/1990	9,78
11/05/1986	10,46	04/05/1988	10,33	04/09/1989	9,52	18/07/1990	9,70
24/05/1986	10,44	26/05/1988	10,36	07/09/1989	9,44	23/07/1990	9,70
30/06/1986	10,44	01/06/1988	10,41	12/09/1989	9,36	26/07/1990	9,68
24/07/1986	10,24	09/08/1988	10,02	13/09/1989	9,33	02/08/1990	9,61
01/08/1986	10,17	31/08/1988	9,71	18/09/1989	9,25	06/08/1990	9,59
07/08/1986	10,14	01/09/1988	9,70	19/09/1989	9,23	08/08/1990	9,59

dates	niveau statique(m)						
14/08/1990	9,56	12/09/1991	8,24	16/10/1992	7,75	01/05/1994	
27/08/1990	9,32	16/09/1991	8,14	29/10/1992	7,79	01/06/1994	
03/09/1990	9,08	24/09/1991	8,08	06/11/1992	7,80	01/07/1994	
06/09/1990	9,19	14/10/1991	7,94	17/11/1992	7,86	01/08/1994	
10/10/1990	8,88	31/10/1991	7,95	01/12/1992		01/09/1994	
29/10/1990	8,90	27/11/1991	8,07	13/01/1993	8,28	01/10/1994	
20/11/1990	8,98	03/12/1991	8,10	21/01/1993	8,31	01/11/1994	
07/12/1990	9,10	10/12/1991	8,12	26/01/1993	8,31	01/12/1994	
13/12/1990	9,14	21/01/1992	8,38	19/02/1993	8,44	13/01/1995	7,72
03/01/1991	9,29	01/02/1992		03/03/1993	8,52	08/02/1995	7,90
22/01/1991	9,37	01/03/1992		04/03/1993	8,50	13/02/1995	7,93
05/02/1991	9,43	01/04/1992		15/03/1993	8,58	27/02/1995	8,00
01/03/1991		07/05/1992	8,93	09/04/1993	8,75	06/03/1995	8,04
17/04/1991	9,75	20/05/1992	9,00	13/04/1993	8,76	13/03/1995	8,08
19/04/1991	9,77	02/06/1992	9,05	20/04/1993	8,82	18/03/1995	8,36
06/05/1991	9,77	17/06/1992	9,09	26/04/1993	8,12	01/04/1995	
21/05/1991	9,78	23/06/1992	9,06	17/05/1993	9,12	02/05/1995	8,42
22/05/1991	9,82	29/06/1992	9,08	24/05/1993	9,07	15/05/1995	8,53
28/05/1991	9,70	30/06/1992	9,08	28/06/1993	9,10	19/06/1995	8,66
29/05/1991	9,70	03/07/1992	9,09	30/06/1993	9,05	17/07/1995	8,57
30/05/1991	9,70	06/07/1992	9,08	09/07/1993	9,08	31/07/1995	8,49
04/06/1991	9,63	07/07/1992	9,10	13/07/1993	9,00	31/08/1995	8,28
05/06/1991	9,61	10/07/1992	9,08	15/07/1993	8,96	11/09/1995	8,02
06/06/1991	9,61	13/07/1992	9,03	19/07/1993	8,98	25/09/1995	8,03
13/06/1991	9,65	14/07/1992	9,05	23/07/1993	8,98	23/10/1995	7,68
17/06/1991	9,61	23/07/1992	8,98	30/07/1993	8,92	30/10/1995	7,70
18/06/1991	9,49	27/07/1992	8,94	02/08/1993	8,87	20/11/1995	7,82
21/06/1991	9,49	28/07/1992	8,90	09/08/1993	8,78	05/12/1995	7,90
25/06/1991	9,44	30/07/1992	8,88	11/08/1993	8,78	08/01/1996	8,06
09/07/1991	9,34	04/08/1992	8,84	20/08/1993	8,62	15/01/1996	8,06
15/07/1991	9,26	07/08/1992	8,77	25/08/1993	8,47	23/02/1996	8,30
16/07/1991	9,27	10/08/1992	8,75	03/09/1993	8,40	11/03/1996	8,37
22/07/1991	9,27	25/08/1992	8,45	28/09/1993	8,00	01/04/1996	8,47
14/08/1991	9,07	28/08/1992	8,43	01/10/1993		02/05/1996	8,67
16/08/1991	8,90	18/09/1992	7,88	01/11/1993		07/06/1996	8,77
20/08/1991	8,82	01/10/1992	7,83	01/12/1993		12/06/1996	8,73
23/08/1991	8,75	02/10/1992	7,78	01/01/1994		19/06/1996	8,67
27/08/1991	8,65	06/10/1992	7,77	01/02/1994		01/07/1996	
06/09/1991	8,19	08/10/1992	7,77	01/03/1994		01/08/1996	
10/09/1991	8,24	12/10/1992	7,75	01/04/1994		01/09/1996	

dates	niveau statique(m)						
01/10/1996		13/12/1998	9,36	11/09/2000	9,02	15/05/2002	9,87
01/11/1996		21/12/1998	9,41	18/09/2000	9,01	30/06/2002	10,05
01/12/1996		04/01/1999	9,45	11/10/2000	8,92	15/07/2002	10,00
01/01/1997		11/01/1999	9,51	17/10/2000	8,96	22/07/2002	10,00
01/02/1997		18/01/1999	9,72	23/10/2000	9,00	19/08/2002	9,70
01/03/1997		26/01/1999	9,56	30/10/2000	8,95	02/09/2002	9,74
01/04/1997		01/02/1999	9,61	06/11/2000	9,00	09/09/2002	9,70
01/05/1997		08/02/1999	9,67	13/11/2000	9,08	16/09/2002	9,66
01/06/1997		15/02/1999	9,68	20/11/2000	9,03	23/09/2002	9,55
01/07/1997		16/03/1999	9,84	28/11/2000	9,09	30/09/2002	9,49
01/08/1997		24/03/1999	9,87	04/12/2000	9,12	07/10/2002	9,42
01/09/1997		25/03/1999	9,75	11/12/2000	9,19	14/10/2002	9,35
01/10/1997		08/04/1999	9,95	18/12/2000	9,19	21/10/2002	9,31
01/11/1997		27/04/1999	10,01	04/01/2001	9,15	28/10/2002	9,28
01/12/1997		01/05/1999		10/01/2001	9,18	04/11/2002	9,26
01/01/1998		10/06/1999	10,20	15/01/2001	9,18	11/11/2002	9,25
01/02/1998		08/07/1999	10,35	22/01/2001	9,20	18/11/2002	9,23
01/03/1998		02/08/1999	10,21	29/01/2001	9,24	29/11/2002	9,21
01/04/1998		18/08/1999	10,86	01/02/2001		16/12/2002	9,19
01/05/1998		03/09/1999	9,83	01/03/2001		23/12/2002	9,21
01/06/1998		21/09/1999	9,76	01/04/2001		30/12/2002	9,19
23/07/1998	9,76	04/10/1999	8,96	01/05/2001		06/01/2003	9,20
28/07/1998	9,80	22/10/1999	9,52	15/06/2001	9,67	15/01/2003	9,25
03/08/1998	9,76	15/11/1999	8,85	22/06/2001	9,70	20/01/2003	9,24
10/08/1998	9,72	21/12/1999	8,76	29/06/2001	9,70	27/01/2003	9,27
17/08/1998	9,65	12/01/2000	9,12	06/07/2001	9,72	03/02/2003	9,25
25/08/1998	9,56	01/02/2000		16/07/2001	9,71	17/02/2003	9,26
01/09/1998	9,53	01/03/2000		17/07/2001	9,57	24/02/2003	9,24
09/09/1998	9,28	01/04/2000		02/08/2001	9,63	03/03/2003	9,28
14/09/1998	9,40	01/05/2000		17/08/2001	9,58	10/03/2003	9,30
21/09/1998	9,15	26/06/2000	9,72	04/09/2001	9,40	24/03/2003	9,32
01/10/1998	9,22	03/07/2000	9,66	20/09/2001	9,42	31/03/2003	9,35
07/10/1998	9,12	10/07/2000	9,56	15/10/2001	9,14	07/04/2003	9,38
12/10/1998	9,32	17/07/2000	9,53	30/10/2001	9,20	14/04/2003	9,39
20/10/1998	9,10	24/07/2000	9,50	20/11/2001	9,26	21/04/2003	9,43
27/10/1998	9,83	31/07/2000	9,44	07/12/2001	9,34	28/04/2003	9,47
04/11/1998	9,06	07/08/2000	9,35	15/01/2002	9,49	05/05/2003	9,48
10/11/1998	9,08	14/08/2000	9,25	15/02/2002	9,64	12/05/2003	9,59
17/11/1998	9,10	21/08/2000	9,20	15/03/2002	9,68	19/05/2003	9,82
30/11/1998	9,18	04/09/2000	9,06	15/04/2002	9,70	26/05/2003	9,60

dates	niveau statique(m)						
02/06/2003	9,57	23/08/2004	9,10	01/07/2005		19/10/2007	8,75
09/06/2003	9,53	30/08/2004	8,95	01/08/2005		26/10/2007	8,77
16/06/2003	9,51	06/09/2004	8,90	01/09/2005		02/11/2007	8,77
23/06/2003	9,48	13/09/2004	8,88	01/10/2005		09/11/2007	8,79
30/06/2003	9,40	18/10/2004	8,83	01/11/2005		16/11/2007	8,83
07/07/2003	9,35	25/10/2004	8,80	01/12/2005		23/11/2007	8,87
17/07/2003	9,30	08/11/2004	8,88	30/01/2006	9,18	30/11/2007	8,85
30/07/2003	9,16	15/11/2004	8,90	09/02/2006	9,20	07/12/2007	8,89
04/08/2003	9,11	22/11/2004	8,93	13/02/2006	9,25	01/01/2008	
11/08/2003	9,08	29/11/2004	8,96	27/02/2006	9,24	01/02/2008	
18/08/2003	9,05	05/12/2004	8,97	06/03/2006	9,25	01/03/2008	
16/09/2003	8,49	13/12/2004	9,02	10/04/2006	9,40	01/04/2008	
22/09/2003	8,12	20/12/2004	9,08	18/04/2006	9,46	01/05/2008	
06/10/2003	8,49	27/12/2004	9,13	02/05/2006	9,50	01/06/2008	
20/10/2003	8,64	03/01/2005	9,21	08/05/2006	9,55	01/07/2008	
27/10/2003	8,69	10/01/2005	9,22	22/05/2006	9,64	01/08/2008	
06/11/2003	8,64	17/01/2005	9,23	29/05/2006	9,65	01/09/2008	
10/11/2003	8,67	24/01/2005	9,28	05/06/2006	9,67	01/10/2008	
17/11/2003	8,62	31/01/2005	9,32	12/06/2006	9,70	01/11/2008	
24/11/2003	8,68	07/02/2005	9,33	03/07/2006	9,76	01/12/2008	
11/12/2003	8,67	14/02/2005	9,38	10/07/2006	9,73	01/01/2009	
29/12/2003	8,80	21/02/2005	9,43	19/07/2006	9,70	01/02/2009	
05/01/2004	8,81	28/02/2005	9,44	11/08/2006	9,30	01/03/2009	8,75
12/01/2004	8,89	07/03/2005	9,47	02/09/2006	9,17	01/04/2009	8,73
19/01/2004	8,89	14/03/2005	9,50	01/10/2006		01/05/2009	8,70
24/02/2004	8,97	21/03/2005	9,54	01/11/2006		01/06/2009	8,65
02/03/2004	8,98	28/03/2005	9,57	01/12/2006		01/07/2009	8,59
23/03/2004	9,01	04/04/2005	9,61	01/01/2007		01/08/2009	7,63
01/04/2004		11/04/2005	9,61	01/02/2007		02/09/2009	7,70
31/05/2004	9,18	18/04/2005	9,66	01/03/2007		01/10/2009	7,62
08/06/2004	9,20	25/04/2005	9,72	01/04/2007		01/11/2009	7,39
14/06/2004	9,20	02/05/2005	9,78	01/05/2007		01/12/2009	7,42
21/06/2004	9,20	09/05/2005	9,81	01/06/2007		01/01/2010	7,68
28/06/2004	9,28	16/05/2005	9,82	01/07/2007		02/02/2010	7,86
05/07/2004	9,28	23/05/2005	9,86	01/08/2007		03/03/2010	7,89
20/07/2004	9,32	30/05/2005	9,90	14/09/2007	8,69	04/04/2010	7,70
26/07/2004	9,33	13/05/2005	9,96	21/09/2007	8,68	05/05/2010	7,95
02/08/2004	9,25	20/05/2005	9,98	28/09/2007	8,68	06/06/2010	8,00
09/08/2004	9,23	27/05/2005	10,00	05/10/2007	8,76	07/07/2010	8,02
16/08/2004	9,18	30/06/2005		11/10/2007	8,73	05/08/2010	7,90

dates	niveau statique(m)	dates	niveau statique(m)
05/09/2010	7,80	04/07/2013	7,42
10/10/2010	7,68	06/08/2013	7,33
05/11/2010	7,82	05/09/2013	6,97
05/12/2010	7,90	05/10/2013	6,70
01/01/2011		09/11/2013	6,85
01/02/2011		08/12/2013	6,92
01/03/2011		09/02/2014	7,16
01/04/2011		08/03/2014	7,22
01/05/2011		29/04/2014	7,39
01/06/2011		04/05/2014	7,45
01/07/2011		01/06/2014	
01/08/2011		01/07/2014	
01/09/2011		03/08/2014	7,33
01/10/2011		14/09/2014	6,31
01/11/2011			
01/12/2011			
01/01/2012			
01/02/2012			
03/03/2012	7,13		
03/04/2012	7,38		
03/05/2012	7,57		
03/06/2012	7,63		
03/07/2012	7,52		
05/08/2012	7,05		
05/09/2012	6,52		
03/10/2012	5,65		
03/11/2012	6,07		
03/12/2012	6,53		
03/01/2013	6,75		
03/02/2013	6,94		
03/03/2013	7,05		
03/04/2013	7,24		
03/05/2013	7,37		
18/05/2013	7,39		
21/05/2013	7,40		
24/05/2013	7,41		
27/05/2013	7,42		
28/05/2013	7,43		
30/05/2013	7,42		
02/06/2013	7,41		

## 2 Les puits de zogona

	PP 1	PP2	pp3	pp4	pp 5	PP 6	pp 7
24/05/2013	4,74	5,77	4,63	7,33	3,41	2,71	5,27
27/05/2013	4,74	5,79	4,67	7,44	3,36	2,71	5,29
30/05/2013	4,14	5,52	4,48	7,27	3,17	2,5	5,02
02/06/2013	4,1	5,53	4,32	7,04	3,14	2,6	5,03
04/07/2013	4,32	5,91	4,65	6,9	3,6	3,61	4,5
06/08/2013	2,46	4,83	4,57	4,88	2,99	2,67	4,34
05/09/2013	0,99	3,18	3,58	2,94	2,26	1,77	2,74
05/10/2013	1,18	3,07	3,15	2,78	2,15	1,57	2,72
09/11/2013	2,42	4	3,3	3,31	2,49	1,93	3,53
08/12/2013	3,04	4,56	3,69	3,77	2,75	2,2	4,12
09/02/2014	4,16	5,45	4,3	7,03	3,32	2,97	4,79
08/03/2014	4,54	5,67	4,49	6,75	3,55	3,26	5,14
13/04/2014	4,68	5,96	4,72	8,34	3,79	4,26	5,31
04/05/2014	4,68	6,15	5,13	9,07	3,79	4,27	5,31

## 3 Les forages de l'Université

	P. CIEH	F.CIEH	F. Prési	F.CENOU
18/05/2013	7,39	5,39	6,09	3,12
21/05/2013	7,4	5,41	5,81	3,15
24/05/2013	7,41	5,44	5,83	3,15
27/05/2013	7,42	5,45	5,86	3,17
28/05/2013	7,43	5,46		
30/05/2013	7,42	5,4	5,79	3,05
02/06/2013	7,41	5,34		
04/06/2013	7,42	5,34	5,73	3,01
04/07/2013	7,46	5,42	5,78	3,03
06/08/2013	7,33	4,93	5,53	2,58
05/09/2013	6,97	4,27	3,85	1,88
05/10/2013	6,7	4,06	2,4	1,38
09/11/2013	6,85	4,26	4,71	2,13
08/12/2013	6,92	4,47	5,04	2,38
09/02/2014	7,16	5,76		2,87
08/03/2014	7,22	5,86		3,01
13/04/2014	7,39	6,12	6,63	3,21
04/05/2014	7,45	6,29	6,76	3,34

#### 4 Les puits des zones de maraichage et du parc Bangr weogo

	P FAO 1	P FAO 2	P FAO 3	P FAO 4	PJ1	PJ2	PJ3	PJ4		puits rocaille	Puits Pépignière
27/05/2013	2,48	2,7	2,3	1,35	4,6	2,44	2,86	2,2			
30/05/2013	0,36	0,28	0,3	0	2,84	1,52	1,76	2	26/06/2013	7,57	5,58
02/06/2013	0,5	0,44	0,47	0	3,15	1,7	1,82	1,2	04/07/2013	7,61	5,48
06/08/2013	0,82	1,46	0,87	2,24	1	1,3	1,03	1,05	15/07/2013	7,61	5,03
05/09/2013	0,7	1,35	0,75	1,2	0,57	0,99	0,95	1,05	30/07/2013	7,37	4,4
05/10/2013	0,91	1,38	0,77	1,52	1	1,33	1,26	1,13	05/09/2013	3,22	2,01
09/11/2013	1,63	2,07	1,45	3,48	3,22	1,77	2,11	1,3	05/10/2013	2,78	2,24
08/12/2013	2,01	1,6	1,94	1,22	3,53	1,9	2,42	1,38	09/11/2013	3,37	3,38
09/02/2014	1,86	1,53	2,29	1,34	3,63	2,02	2,15	1,71	08/12/2013	4,16	4,01
08/03/2014	2	1,58	2,55	1,36	3,72	2,12	2,38	1,74	10/02/2014	5,36	5,02
13/04/2014	4,75	2,01	2,85	2,19	3,83	3,13	2,87	2,06	10/03/2014	6,33	5,47
04/05/2014	6,45	2,69	3,18	2,03	3,97	3,85	3,99	2,54	31/03/2014	6,81	5,51

## Annexe 2 : les précipitations

### 2. 1 Les précipitations annuelles de Ouagadougou

Années	Précipitations mm/an	Années	Précipitations mm/an
<b>1953</b>	883,6	<b>1983</b>	674,4
<b>1954</b>	940,5	<b>1984</b>	536,2
<b>1955</b>	1027,1	<b>1985</b>	689,2
<b>1956</b>	1047,2	<b>1986</b>	789,7
<b>1957</b>	990,1	<b>1987</b>	771,2
<b>1958</b>	750,1	<b>1988</b>	735,1
<b>1959</b>	990,2	<b>1989</b>	794,3
<b>1960</b>	757,2	<b>1990</b>	675,9
<b>1961</b>	695,2	<b>1991</b>	889
<b>1962</b>	1169,5	<b>1992</b>	691,5
<b>1963</b>	656,8	<b>1993</b>	741,2
<b>1964</b>	1089,4	<b>1994</b>	726,1
<b>1965</b>	852,2	<b>1995</b>	699,8
<b>1966</b>	643,7	<b>1996</b>	677,4
<b>1967</b>	762,7	<b>1997</b>	538,6
<b>1968</b>	756,3	<b>1998</b>	668,3
<b>1969</b>	1016,8	<b>1999</b>	799,5
<b>1970</b>	728,8	<b>2000</b>	599,3
<b>1971</b>	717,6	<b>2001</b>	621,8
<b>1972</b>	1060	<b>2002</b>	656,2
<b>1973</b>	733,1	<b>2003</b>	823,1
<b>1974</b>	923,3	<b>2004</b>	762,2
<b>1975</b>	755,6	<b>2005</b>	845
<b>1976</b>	1083,2	<b>2006</b>	596,8
<b>1977</b>	673,7	<b>2007</b>	659,9
<b>1978</b>	761,1	<b>2008</b>	763
<b>1979</b>	708,7	<b>2009</b>	897,4
<b>1980</b>	593,2	<b>2010</b>	841,1
<b>1981</b>	713,6	<b>2011</b>	708,4
<b>1982</b>	603,6	<b>2012</b>	1039,3
		<b>2013</b>	610,6

## 2. 2 Précipitations mensuelles de Ouagadougou (1978 – 2013)

Mois	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Jan	0	0	0	0	0	0	0	0
Fev	0	0	0	0	0	0	0	0
Mar	0	0	0	0	0	0	0	0
Avr	96,2	9,3	13,2	30,6	45	0,9	14,6	5,3
Mai	75	50,9	29,2	88,3	111,2	45,4	67	87
Jun	90,3	86	103,4	80	83,5	110,7	59,4	83,3
Jul	137,7	196	134,6	198,1	105,8	191,6	167,2	192,3
Aôu	186,9	157,8	205,7	211,8	139,4	205	122,3	154,8
Sep	152	181,6	66,2	103,7	73,3	109,1	103,7	163
Oct	23	27,1	40,9	1,1	45,4	11,7	2	3,5
Nov	0	0	0	0	0	0	0	0
Dec	0	0	0	0	0	0	0	0
Mois	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Jan	0	0	0	0	0	0	0	0
Fev	0	0	0	0	0	0	0	0
Mar	0	0	0	0	0	0	0	0
Avr	10,4	0	79,9	0	15,3	65,4	51,9	25,7
Mai	84,5	67	68,8	35,7	112,3	224,3	12,9	8,4
Jun	130,3	163,8	65,8	55,3	81,9	95,1	79,4	128,8
Jul	160,7	148,3	161,9	237,2	162,2	158,2	246,7	226,2
Aôu	197,8	221,9	263,8	305,3	196,6	248,7	244,7	195,8
Sep	165,4	131,2	88,7	112,4	103,8	47,9	51	97,8
Oct	40,6	39	6,2	48,4	3,8	49,4	4,9	58,5
Nov	0	0	0	0	0	0	0	0
Dec	0	0	0	0	0	0	0	0
Mois	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Jan	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fev	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mar	0	0	0	0	0,0	1,7	0,0	0,0
Avr	1	9,6	22,6	58	14,0	16,1	38,6	0,0
Mai	14,2	50,3	45,8	51,6	76,0	54,7	79,0	69,9
Jun	108,4	114,3	40,1	66,4	70,6	66,8	153,2	17,3
Jul	130,5	118,3	129,1	111,3	85,6	224,7	196,5	210,5
Aôu	296,3	258,2	193	155,2	187,8	239,1	122,1	177,3
Sep	110,8	136	223,9	48	230,8	180,5	25,2	104,1
Oct	64,9	13,1	22,9	48,1	35,1	10,2	61,4	20,7
Nov	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dec	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mois	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Jan	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fev	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mar	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5	0,1
Avr	3,3	20,9	87,9	37,3	2,3	56,4	0,0	6,3
Mai	27,8	58,8	69,6	57,5	14,2	30,0	77,6	53,3
Jun	43,5	150,9	30,9	92,4	75,1	28,2	106,9	141,4

Jul	171,0	177,5	207,5	251,8	161,1	145,7	271,9	194,2
Aôu	179,6	122,3	185,3	278,9	205,6	283,2	174,7	326,2
Sep	161,7	135,4	144,2	146,2	109,2	133,7	134,7	249,8
Oct	18,2	54,8	18,8	19,6	34,7	3,2	31,8	22,4
Nov	0,0	0,0	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dec	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Mois</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>				
Jan	0,0	0,0	0,0	0,0				
Fev	0,0	0,0	0,0	0,0				
Mar	0,0	5,4	0,0	6,1				
Avr	72,2	26,8	9,9	32,3				
Mai	81,9	46,3	77,8	72,7				
Jun	124,6	139,2	53,9	38,6				
Jul	270,0	225,5	419,6	147,2				
Aôu	228,9	170,2	269,4	257,5				
Sep	80,2	79,9	204,9	56,2				
Oct	32,2	15,1	3,8	0,0				
Nov	0,0	0,0	0	0,0				
Dec	0,0	0,0	0	0,0				

### Annexe 3 Evapotranspiration potentielle mensuelle de Ouagadougou 1961 – 1990

	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
JAN	216,4	199,1	207	203,8	183,2	187,7	205,5	170,2	196,8	189,7
FEV	221,3	209,7	207,7	211,8	178,6	196	191,3	181,3	192,3	182,6
MARS	231,5	226,9	232,8	210,1	195,1	202,3	188	201,3	214,8	211,1
AVL	195,9	184,2	194,5	192,4	183,9	191,9	192,2	183,3	197,4	197,7
MAI	181,5	164,1	160,3	167,7	159	167,6	177,5	153,4	181,9	170,3
JUI	118,7	120,9	134,9	114,5	126,2	116,3	128,2	109,2	125,4	140,9
JULT	109,1	112,3	119,6	102,9	106,8	127,4	100,5	98,4	104,5	108,4
AOUT	104	98,2	115,6	103,2	101,6	113	94,9	118,7	101,4	101,9
SEPT	129,2	123,8	137,1	116,4	124,8	128,9	110,9	123,1	125,6	125
OCT	188,6	173	159,3	171,4	171,6	160,2	161,3	170,8	163,8	182,5
NOV	186	181,6	185,7	175,6	183,3	175,9	168,8	171,9	168,3	178,2
DEC	193,4	200,8	201,3	165,1	183,5	180	158,1	183	176,4	183
	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
	194,5	187,8	206,5	188,4	194,9	191,6	185,9	180,4	218,8	195,3
	191,2	208,1	187	194,9	181,6	193,8	191,8	162,9	211,1	199,6
	209	213,5	216,3	208,5	207	198,5	217	183,1	225,8	219,5
	196,2	173,2	182,3	182,1	186,9	186	183	161,9	209,7	191,2
	176,5	147,9	171,8	175,7	164,7	155,5	163,8	146,6	161	189,2
	142,5	109,9	127,1	142,1	131,7	113,6	124	111	118,3	124
	110,5	107,1	117,2	105,3	95,1	110,7	113,9	101,9	107,7	118,8
	109,6	103,6	110,6	107,9	108,2	103,8	109,6	112,2	113,4	109,8
	124,8	135,9	136,4	123,4	122,5	128,3	132,8	129,1	125,6	142,3
	176,1	174,4	179,5	167,5	173,2	149,5	174,9	168,6	169,7	186,5
	178,8	171,8	200,9	171,6	177,7	172,9	175,2	189,1	176,1	181,8
	176,7	179,1	178,9	182,1	193,7	176,8	169,7	181,4	198,3	199,3

1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
187,2	195,5	187,9	193	171,7	169,1	172,5	156,7	171,7	165,6
182,4	174,5	152,7	191,4	169,4	139,9	152,1	141,6	139,7	150,3
188,6	179,5	184,1	210,7	184,9	177	182,1	171,7	168,9	206,1
185,9	203,2	197,1	207,8	186,1	206,6	204,7	174,5	187,8	183,3
172,8	191,2	204,6	170,7	204,7	185,9	206,5	192,8	206,9	198,9
172,3	168,5	162,4	126,9	181,3	171,5	168,2	159,3	176,3	163,1
147,7	153,8	157,8	126,9	144,6	143,8	155,5	139,1	153	152
145	135,3	129,7	131	146	138,2	140,1	132,7	129,3	145,1
151,4	150,1	145,6	135,7	140	132,9	147,4	136,1	141,8	145,3
189,1	168,3	167	175,6	158,1	165,9	156,7	168,1	156,8	173,2
197,9	175,5	155,5	184,6	164,6	154,9	155,7	154,8	169,6	164,2
191,1	183,4	153,9	188,9	172,2	173,8	160,4	168	163,6	165,7

#### Annexe 4 Température mensuelle 1978 – 2012 de Ouagadougou

	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
janv	<b>25,3</b>	<b>26,5</b>	<b>26</b>	<b>23,8</b>	<b>23,6</b>	<b>22,6</b>	<b>24,2</b>	<b>26,1</b>	<b>23,6</b>	<b>25,6</b>
fev	28,9	26,4	28	28,4	27,3	28,8	26,3	26,9	29	28,9
Mars	<b>31,9</b>	31,5	31,7	31,7	30,2	30,5	31,4	32	31	30,9
Avl	31,4	<b>33</b>	<b>33,3</b>	<b>32,8</b>	<b>32,6</b>	<b>34,1</b>	<b>32,9</b>	<b>32,9</b>	<b>33,9</b>	33
Mai	30,7	31	<b>32</b>	31	30,8	32,6	31,7	32,7	32	<b>33,7</b>
jui	28,6	28,1	29	29,9	29	29,1	29,7	30	29,3	29,8
juill	26,8	27,2	27,6	17,1	28	28,1	28,5	26,6	26,6	28,6
Aout	26,7	26,6	26,1	26,5	26,4	26,9	27,7	26,6	26,4	27,2
sept	26,8	26,8	27,8	27,4	28	27,7	27,2	26,8	26,2	28,3
oct	28,7	29,7	29,1	30	28,6	29,2	29,3	29,4	28,9	28,6
nov	27,6	<b>28</b>	28,4	27,1	27	27,7	28,6	28,4	27,3	28,1
dec	<b>25,8</b>	<b>26</b>	<b>24,2</b>	<b>25,1</b>	<b>24,8</b>	<b>25,5</b>	<b>24</b>	<b>23,8</b>	<b>23,6</b>	<b>25,3</b>
	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
	<b>24,4</b>	<b>23,1</b>	25,7	25,9	23,4	23	24,6	23,1	26,9	26,7
	27,9	25,6	26,7	29,2	27,2	27,8	27,6	26	29,5	26
	32	30,2	29,3	31,9	30,5	31	31,5	32,3	32	30,1
	<b>32,5</b>	<b>33,5</b>	33,6	32,5	32,4	33,3	33,6	33,2	32,8	31,4
	<b>32,5</b>	32,8	32,3	29,6	31,3	34	32,7	32,5	32,4	31,7
	29,3	30,3	29,3	29	29,4	29,8	29,5	30	30	29,6
	26,9	27,8	27,3	27,6	27,1	27,8	28	27,8	28,7	28,6
	26,1	25,6	27,4	26,2	25,9	27,1	26,3	26,6	27	27,9
	27,1	27,3	27,8	28,3	27,8	27,7	27,3	28,1	27,5	28,6
	29,4	28,2	30,2	28,6	29,3	30,3	28,3	29,6	29,2	30,6
	27,6	28,1	29,1	27,6	26,6	29,1	27,2	28	26,6	29,5
	<b>24</b>	<b>25,4</b>	27	24,3	25,2	25,5	24	26,9	26,2	26

1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
25,1	25,8	27,4	24,7	24,7	25,6	25,9	24,7	24,9	24,2
29,5	27,2	25,3	26,5	27,1	29,7	28,4	30,4	28,3	27,9
30,5	32,4	30	31,6	32,6	31	30,8	33,7	31,7	31,3
34,6		34,3	34,4	34	33,8	32,7	34,1	33,4	33
32,4	31,7	32,2	33,4	33,5	33,1	31,6	32,9	32,9	32,2
31	31	29,4	30	31,2	28,5	30,2	30,1	30,8	30,9
28,1	27,1	27	27,5	29	27,4	27,2	27,5	28,2	28,2
26,8	25,7	26,7	26,3	27,1	26,8	27	26,6	26,9	26,3
27,3	26,1	28,5	27,9	27,7	27,3	27,6	27,9	27	27,3
29,4	29,1	29,4	29,9	29,3	29,8	29	29,5	29,3	30,6
28,8		28,7	28	28,3	28,9	28,8	28,1	27,1	30,6
26,4	25	25,2	26,8	25,9	25,3	26,8	26,9	24,7	25,8

2008	2009	2010	2011	2012
22,6	24,5	27,1	24,7	24,4
27,2	30	28	28,6	28,6
31,5	32,8	32,5	33,5	31,3
33,1	33,2	33,9	33,6	33,3
32,1	32,4	<b>32</b>	32,5	31,9
29,7	30,1	29,5	30,2	30
26,9	28	27,5	27,9	27
26,4	27,3	26,8	26,9	26,4
27,2	27,9	27,4	28,1	26,7
29	29,9	28,8	30,1	29,6
27,3	28	29	28	29,6
26,2	26,4	24,9	24,4	25,9

### Annexe 5 Humidité relative moyenne mensuelle de Ouagadougou 1961 1978

	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969
Jan	24	28	28	27,5	30,5	27,5	26	26,5	30,5
Fev	21	20,5	30,5	22,5	22	25,5	27	31	26,5
Mars	23	21,5	22	29,5	21	28	33,5	33	35,5
Avl	41,5	40,5	41,5	33,5	29,5	44	41	51	41,5
Mai	49,5	58	47,5	54,5	52	56	54,5	59	51,5
Jui	63	68,5	61	70	62,5	70	61,5	73	66,5
Jllet	66	73,5	69,5	74	74	71,5	74,5	79	75
Aout	77,5	80	75	77,5	79,5	81,5	80,5	76	79
Sept	74	77	71,5	76	76,5	78,5	79,5	76	78
Oct	49	62	63	57,5	64,5	65	60	62,5	67,5
Nov	35	50,5	36,5	40,5	39	44,5	42	45	48
Dec	28	29	28	43,5	30	33,5	32,5	56	35
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
	31,5	28,5	29	25	33	34	48	41	37
	27,5	28,5	28	29	26	34,5	30,5	28,5	36,5
	27	37	27	28	41	39,5	47	46,5	46
	34	42	49,5	41	44	42	47,5	50	51,5
	54	51,5	59	51,5	54	59	59,5	58	65
	61,5	59,5	71	62	64	64	66,5	66,5	66,5
	74	73,5	74,5	70,5	68,5	70	70,5	67	72
	80	77,5	78	76	73,5	74	74	68,5	74
	76,5	75	73,5	71	73	70	70	70,5	70
	57,5	54,5	64	52,5	59	54	68	56	60,5
	40	39,5	40,5	36,5	50	46	53,5	45,5	46,5
	34,5	37,5	35,5	30	38	41	42	42,5	39,5

## Annexe 6 Les analyses Chimiques



# LABORATOIRE AïNA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux** : - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente** : - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretiens** : - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

07/06/2013

### RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 1558/2013

Date de prélèvement : 06/06/2013

Date de réception : 06/06/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P J 1

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	28.7	
pH		7.05	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	776	
Turbidité	NTU	3.36	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	28.6	
Dureté totale (TH)	°F	22.2	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	47.5	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	25.0	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	84.0	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	3.20	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.12	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.15	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	348.3	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	7.65	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	40.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.020	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.88	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	1.07	5
Phosphore (P)	mg/L	0.35	2

**Conclusion** : Eau conforme aux normes sur le plan physico-chimique pour les paramètres analysés.

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AïNA Suarl  
01 BP 558 Ouagadougou 01  
Tél 50 35 74 40 - Fax: 50 35 74 39  
Cel. 70 20 40 38 - ~~Sevrou TRAORE~~



# LABORATOIRE AÏNA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux** : - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente** : - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretiens** : - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

07/06/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 1559/2013

Date de prélèvement : 06/06/2013

Date de réception : 06/06/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P J 2

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	28.7	
pH		6.97	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	980	
Turbidité	NTU	3.2	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	29.6	
Dureté totale (TH)	°F	41.2	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	49.7	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	69.6	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	61.60	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	12.40	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.04	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	360.8	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	8.10	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	48.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.056	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	17.16	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0.56	5
Phosphore (P)	mg/L	0.18	2

**Conclusion** : Eau conforme aux normes sur le plan physico-chimique pour les paramètres analysés.

LE CHEF DU LABORATOIRE





# LABORATOIRE AïNA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux** : - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente** : - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretiens** : - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

07/06/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 1560/2013

Date de prélèvement : 06/06/2013

Date de réception : 06/06/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P J 4

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	28.7	
pH		6.91	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	427	
Turbidité	NTU	3.3	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	14.4	
Dureté totale (TH)	°F	21.6	50
Calcium (Ca <sup>++</sup> )	mg/L	41.9	100
Magnésium (Mg <sup>++</sup> )	mg/L	26.9	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	11.30	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	10.90	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.05	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.04	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	175.7	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	5.26	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	8.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.010	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	1.32	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0.43	5
Phosphore (P)	mg/L	0.14	2

**Conclusion** : Eau conforme aux normes sur le plan physico-chimique pour les paramètres analysés.

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AïNA Suarl  
01 BP 558 Ouagadougou 01  
Tél 50 35 74 40 - Fax 50 35 74 39  
Cél. 70 20 40 38 - Burkina Faso  
Sévoou TRAORE



# LABORATOIRE AïNA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux** : - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente** : - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretiens** : - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

07/06/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 1561/2013

Date de prélèvement : 06/06/2013

Date de réception : 06/06/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P P 2

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	28.6	
pH		6.30	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	428	
Turbidité	NTU	2.83	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	8.1	
Dureté totale (TH)	°F	20.6	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	30.9	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	31.1	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	19.40	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	5.60	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.01	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	98.8	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	5.55	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	2.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.073	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	29.04	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	1.08	5
Phosphore (P)	mg/L	0.35	2

**Conclusion** : Eau conforme aux normes sur le plan physico-chimique pour les paramètres analysés.

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AïNA Suarl  
01 BP 558 Ouagadougou 01  
Tél 50 35 74 40 - Fax 50 35 74 39  
Cei. 70 20 40 38 - Burkina FASO  
Seydou TRAORE



# LABORATOIRE AïNA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux :** - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente :** - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretiens :** - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

07/06/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 1562/2013

Date de prélèvement : 06/06/2013

Date de réception : 06/06/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P P 3

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	28.5	
pH		6.16	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	305	
Turbidité	NTU	2.48	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	5.9	
Dureté totale (TH)	°F	14.6	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	33.6	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	15.0	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	8.30	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	2.30	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.04	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	72.0	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	2.84	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	2.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.043	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	35.64	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0.94	5
Phosphore (P)	mg/L	0.31	2

**Conclusion :** Eau conforme aux normes sur le plan physico-chimique pour les paramètres analysés.

LE CHEF DU LABORATOIRE  
**LABORATOIRE AïNA Suarl**  
01 BP 558 Ouagadougou 01  
Tél 50 35 74 40 Fax: 50 35 74 39  
Cei. 70 20 40 38 - Burkina Faso  
Seydou TRAORE



# LABORATOIRE AïNA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux :** - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente :** - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretien :** - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

07/06/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 1563/2013

Date de prélèvement : 06/06/2013

Date de réception : 06/06/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P P 4

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	28.3	
pH		6.23	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	788	
Turbidité	NTU	2.94	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	6.4	
Dureté totale (TH)	°F	24.5	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	57.4	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	24.5	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	46.20	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	21.10	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.03	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	78.1	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	10.45	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	10.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.096	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	66.44	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	1.19	5
Phosphore (P)	mg/L	0.39	2

**Conclusion :** Eau conforme aux normes sur le plan physico-chimique pour les paramètres analysés.

NB : Teneur en Nitrates à surveiller.

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AïNA Suarl  
01 BP 558 Ouagadougou 01  
Tél 50 35 74 40 - Fax: 50 35 74 39  
Cel. 70 20 46 38 - SANDOY TRAORE



# LABORATOIRE AINA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux:** - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente:** - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretiens:** - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

07/06/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 1564/2013

Date de prélèvement : 06/06/2013

Date de réception : 06/06/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P P 6

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	28.3	
pH		6.81	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	1458	
Turbidité	NTU	2.51	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	29.8	
Dureté totale (TH)	°F	37.5	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	64.8	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	51.7	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	135.10	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	153.0	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	1.50	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	363.2	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	20.11	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	47.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	1.142	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	34.32	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0.78	5
Phosphore (P)	mg/L	0.25	2

**Conclusion :** Eau non conforme : teneur en Potassium en Ammonium très élevés.

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AINA Suarl  
01 BP 558 Ouagadougou 01  
Tél 50 35 74 40 - Fax 50 35 74 39  
Cel 70 20 40 38 - Burkina Faso  
Seydou TRAORE



# LABORATOIRE AINA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux :** - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente :** - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques Industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretiens :** - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

07/06/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 1565/2013

Date de prélèvement : 06/06/2013

Date de réception : 06/06/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu: P P 7

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	28.2	
pH		6.43	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	375	
Turbidité	NTU	2.23	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	8.9	
Dureté totale (TH)	°F	20.3	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	35.6	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	27.6	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	7.0	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	2.70	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.01	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	108.6	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	2.74	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	2.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.139	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	40.04	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	1.23	5
Phosphore (P)	mg/L	0.40	2

**Conclusion :** Eau conforme aux normes sur le plan physico-chimique pour les paramètres analysés.

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AINA Suarl  
01 BP 558 Ouagadougou 01  
Tél 50 35 74 40 Fax 50 35 74 39  
Seydou TRAORE  
Cei. 70 20 40 38 - Burkina Faso



# LABORATOIRE AÏNA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux:** - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente:** - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretiens:** - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

07/06/2013

## **RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU**

Analyse n° : 1566/2013

Date de prélèvement : 06/06/2013

Date de réception : 06/06/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P F AO 9

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	28.4	
pH		6.49	6,5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	900	
Turbidité	NTU	3.31	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	20.5	
Dureté totale (TH)	°F	29.2	50
Calcium (Ca <sup>++</sup> )	mg/L	70.6	100
Magnésium (Mg <sup>++</sup> )	mg/L	28.0	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	66.40	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	18.30	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	1.29	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	250.1	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	15.18	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	47.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.086	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	9.24	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0.54	5
Phosphore (P)	mg/L	0.18	2

**Conclusion:** Eau conforme aux normes sur le plan physico-chimique pour les paramètres analysés.

**NB:** Teneur en Ammonium à surveiller.

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AÏNA Suarl  
01 BP 558 Ouagadougou 01  
Tél 50 35 74 40 - Fax 50 35 74 39  
Cell 70 20 40 38



# LABORATOIRE AÏNA Suarl

Laboratoire d'analyse des eaux: - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

Société de vente: - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels.

Fabrication et de vente de produits d'entretien: - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com e-mail : labo.aina@fasonet.bf Compte BIZ siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V Division fiscale: DME du centre Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

28/10/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n°: 2684/2013

Date de prélèvement: 28/10/2013

Date de réception: 28/10/2013

Identité du préleveur: I R D

Lieu: P F

Identité du demandeur: I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température:	°C	28,9	
pH		6,89	6,5-8
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	1226	
Turbidité	NTU	2,07	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	40,3	
Dureté totale (TH)	°F	39,3	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	112,4	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	27,1	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	63,60	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	9,50	12
Fer total (Fe)	mg/L	0,02	0,3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0,32	0,5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	491,7	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	22,42	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	46,0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0,139	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	19,36	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0,59	5
Phosphore (P)	mg/L	0,19	2

LE CHEF DU LABORATOIRE





# LABORATOIRE AINA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux:** - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente:** - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretien:** - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIZ siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boulboul Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

29/10/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 2685/2013

Date de prélèvement : 28/10/2013

Date de réception : 28/10/2013

Identité du preleveur : I R D

Lieu : P J 1

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par le CEE ou OMS
Température	°C	29.2	
pH		7.04	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	1910	
Turbidité	NTU	4.63	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	51.9	
Dureté totale (TH)	°F	47.3	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	117.6	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	43.4	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	112.90	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	7.70	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.10	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.22	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	633.2	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	24.17	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	94.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.191	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	7.04	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0.54	5
Phosphore (P)	mg/L	0.18	2

LE CHEF DU LABORATOIRE



Seydou TRAORE



# LABORATOIRE AINA Suarl

Laboratoire d'analyse des eaux : - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

Société de vente : - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

Fabrication et de vente de produits d'entretien : - Eau déminéralisée.

01 BP 858 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boulbala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

29/10/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHEMIQUE D'EAU

Analyse n° : 2686/2013

Date de prélèvement : 28/10/2013

Date de réception : 28/10/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P J 2

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	29.1	
pH		6.96	6.5-8
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	939	
Turbidité	NTU	2.97	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	40.5	
Dureté totale (TH)	°F	41.4	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	97.8	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	41.0	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	48.0	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	9.50	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.17	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	494.1	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	8.02	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	43.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.086	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	23.32	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0.31	5
Phosphore (P)	mg/L	0.10	2

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AINA Suarl  
01 B.P. 858 Ouagadougou 01  
Tél: 50 35 74 40 - Fax: 50 35 74 39  
Cat. 70 20 40 58 - Burkina Faso  
Saydou TRAORE



# LABORATOIRE AÏNA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux:** - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente:** - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

**Fabrication et de vente de produits d'entretien:** - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIZ siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boulboul Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

29/10/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHEMIQUE D'EAU

Analyse n° : 2687/2013

Date de prélèvement : 28/10/2013

Date de réception : 28/10/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P J 4

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	29,1	
pH		7,01	6,5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	311	
Turbidité	NTU	2,75	5
Titre alcali métrique (TA)	*F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	*F	17,3	
Dureté totale (TH)	*F	15,9	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	34,2	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	17,8	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	15,10	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	8,10	12
Fer total (Fe)	mg/L	0,04	0,3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0,13	0,5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	211,1	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	3,05	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	6,0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0,010	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	3,96	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0,24	5
Phosphore (P)	mg/L	0,08	2

LE CHEF DU LABORATOIRE



Seydou TRAORE



# LABORATOIRE AÏNA Svarl

Laboratoire d'analyse des eaux: - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

Société de vente: - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

Fabrication et de vente de produits d'entretien: - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BJS siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

29/10/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 2688/2013

Date de prélèvement : 26/10/2013

Date de réception : 28/10/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P P 2

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	29.1	
pH		5.43	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	685	
Turbidité	NTU	1.92	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	10.4	
Dureté totale (TH)	°F	19.3	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	45.1	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	19.4	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	46.20	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	10.10	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.20	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	126.9	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	10.90	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	2.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	2.105	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	178.20	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0.46	5
Phosphore (P)	mg/L	0.15	2

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AÏNA Svarl  
01 B.P. 558 Ouagadougou 01  
Tél: 50 35 74 40 - Fax: 50 35 74 39  
Cell: 70 20 40 30

Soydou TRAORE



# LABORATOIRE AïNA Suarl

Laboratoire d'analyse des eaux : - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

Société de vente : - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

Fabrication et de vente de produits d'entretien : - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIS siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boulbala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

29/10/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 2689/2013

Date de prélèvement : 26/10/2013

Lieu : P P 4



# LABORATOIRE AïNA Suarl

Laboratoire d'analyse des eaux : - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

Société de vente : - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

Fabrication et de vente de produits d'entretien : - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIS siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boulbala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

29/10/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 2690/2013

Date de prélèvement : 26/10/2013

Date de réception : 28/10/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P P 4

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	29.1	
pH		6.20	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	1992	
Turbidité	NTU	1.93	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	34.8	
Dureté totale (TH)	°F	49.4	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	138.1	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	36.1	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	94.60	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	25.70	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	2.39	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	424.6	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	26.11	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	30.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	2.039	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	391.16	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	1.03	5
Phosphore (P)	mg/L	0.34	2

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AïNA Suarl  
01 B.P. 558 Ouagadougou 01  
Tél: 50 35 74 40 - Fax: 50 35 74 39  
Cet. TS 20 03 95 - Bp 558

Seydou TRAORE



# LABORATOIRE AÏNA Sual

Laboratoire d'analyse des eaux : - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

Société de vente : - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels

Fabrication et de vente de produits d'entretien : - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIZ siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boulbala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

29/10/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 2691/2013

Date de prélèvement : 26/10/2013

Date de réception : 28/10/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P P 6

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par la CEE ou OMS
Température	°C	29.2	
pH		6.71	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	1760	
Turbidité	NTU	2.05	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	37.4	
Dureté totale (TH)	°F	47.3	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	114.0	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	45.5	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	85.90	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	27.20	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.11	0.5
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	456.3	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	25.0	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	47.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.069	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	186.12	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0.58	5
Phosphore (P)	mg/L	0.19	2

LE CHEF DU LABORATOIRE

LABORATOIRE AÏNA Sual

01 B.P. 558 Ouagadougou

Tél: 50 35 74 40 - Fax: 50 35 74 39

Cel: 70 20 40 38 - Bureau 1

Seydou TRAORE



# LABORATOIRE AINA Suarl

**Laboratoire d'analyse des eaux :** - Analyses physico-chimiques et bactériologiques - Etude sur l'eau, l'assainissement et la santé.

**Société de vente :** - Produits et appareils de laboratoire - Instrument, matériel et consommable de laboratoire - Produits chimiques industriels.

**Fabrication et de vente de produits d'entretien :** - Eau déminéralisée.

01 BP 558 Ouagadougou 01 Tél bureau : (226) 50 35 74 40 FAX : (226) 50 35 74 39 RC N° BF OUA 2009 M 1622

www.laboratoire-aina.com

e-mail : labo.aina@fasonet.bf

Compte BIB siège n° 012421109451020131

IFU N°00021261V

Division fiscale: DME du centre

Situé sur la rue Boalboala Secteur 24 Ouagadougou

Ouagadougou le

29/10/2013

## RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAU

Analyse n° : 2692/2013

Date de prélèvement : 26/10/2013

Date de réception : 26/10/2013

Identité du préleveur : I R D

Lieu : P P 7

Identité du demandeur : I R D

PARAMETRES	UNITES	VALEURS	Valeur inférieure ou égale recommandée par le CEE ou OMS
Température	°C	29.1	
pH		6.27	6.5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	939	
Turbidité	NTU	1.8	5
Titre alcali métrique (TA)	°F	0	
Titre alcali métrique complet (TAC)	°F	17.1	
Dureté totale (Th)	°F	29.2	50
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	70.0	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	26.3	50
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/L	50.20	200
Potassium (K <sup>+</sup> )	mg/L	12.50	12
Fer total (Fe)	mg/L	0.02	0.3
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	0.08	0.6
Carbonates (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	0	
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	206.6	
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	11.58	250
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	6.0	250
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.059	3
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	219.56	50
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	0.69	5
Phosphore (P)	mg/L	0.22	2

LE CHEF DU LABORATOIRE



Seydou TRAORE