

Caractérisation hydrodynamique de la nappe phréatique et son influence sur la durabilité du corps de chaussée : cas de la chaussée des axes routiers de Bonaberi, Douala, Cameroun

Ludovic Ivan NTOM NKOTTO¹, Judicaël SANDJONG KANDA^{2*}, Marlyse NANKAP DJANGUE³,
Christian WANDA⁴, Roger FEUMBA⁵ et Jules-Remy NGOUPAYOU NDAM⁵

¹ *Mission de Promotion des Matériaux Locaux (MIPROMALO), Département de la Conception et de la Construction, BP 2393, Yaoundé, Cameroun*

² *Institut National de Cartographie (INC), Direction de la Recherche, Laboratoire de Recherche sur les Risques Naturels, BP 157, Yaoundé, Cameroun*

³ *Institut National de Cartographie (INC), Direction de la Recherche, Laboratoire de Recherche sur le Changement Climatique, BP 157, Yaoundé, Cameroun*

⁴ *Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Département de Biologie et Physiologie Végétale, BP 337, Yaoundé, Cameroun*

⁵ *Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Départements des Sciences de la Terre, BP 337, Yaoundé, Cameroun*

* Correspondance, courriel : sandjongjudicael@yahoo.fr

Résumé

L'étude des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe phréatique et son influence sur le corps de la chaussée des axes routiers de Bonaberi (Bonassama-sodiko) à Douala (Cameroun) a été menée de novembre 2014 à mars 2015. Le travail a consisté à relever la topographie du corps de chaussée à l'aide d'une station totale, installer les piézomètres sur des points recensés et lire le niveau d'eau statique mensuel sur chaque piézomètre. Les résultats obtenus montrent que les profils topographiques de ces deux routes sont constitués des pentes dont les plus grandes sont 1,02 % et 1,09 % et les plus petites -0,17 % et -0,18 % respectivement pour l'ancienne et la nouvelle route. Le niveau d'eau maximal de la nappe est de 17,5 m et le niveau minimal est de 10,5 m. Les fluctuations à la surface piézométrique varient de 0,2 à 3,5 m. Il est constaté que la surface piézométrique suit le profil topographique du site et l'écart entre la nappe phréatique et la route est moins perceptible. Cet écart varie de 0,4 à 5,08 m. Le calcul du bilan hydrologique de la zone montre que 12 % des précipitations s'infiltrent pour alimenter la nappe phréatique. Cette dernière constitue un facteur dangereux pour la durée de vie de la chaussée car quel que soit la saison, elle affleure la surface du sol.

Mots-clés : *caractérisations hydrodynamiques, nappe phréatique, durabilité, chaussée.*

Abstract

Hydrodynamic characterization of the water table and its influence on the durability of the body of the roadway : case of the roadway of Bonaberi highways, Douala, Cameroon

The study of the hydrodynamic characteristics of the water table and its influence on the surface of the Bonaberi (Bonassama-sodiko) highway in Douala (Cameroon) was conducted from November 2014 to March 2015. This work consisted in carrying out topographic surveys with the help of a total station. Piezometric points were chosen and the monthly measurements of the static level of the piezometers are taken in order to determine the hydrodynamic characteristics of the water table. The results obtained show that the topographic profiles of these two roads consist of slopes with the highest at 1.02 % and 1.09 % and lowest of at -0.17 % and -0.18 % respectively for the old and new highway. The maximum water level of the water table is 17.5 m and the minimum level is 10.5 m. The piezometric surface varies between 0.2 to 3.5 m. However, the piezometric surface follows the topographic profile of the site. Globally, the difference between the water table and the road is less noticeable, it varies from 0.4 to 5.08 m. The hydrological balance of the area shows that 12 % of precipitation infiltrates to supply the water table. The latter is a dangerous factor for the lifespan of the highway because whatever the season, it approaches the surface of the highway.

Keywords : *hydrodynamic characteristics, water table, durability, highway.*

1. Introduction

Le secteur des transports, en tant que facteur de stabilité, joue un rôle important dans le développement économique et social, le renforcement de la solidarité et de l'intégration nationale, la réduction des disparités locales et l'ouverture régionale [1]. Pour se faire, les infrastructures de transport sont une priorité car elles permettent la circulation des biens et des personnes [2] et constituent une activité à forte intensité capitalistique [3] ; de ces faits apportent une contribution substantielle à la lutte contre la pauvreté. Le transport routier constitue le principal mode de déplacement dans le monde, ceci grâce à sa flexibilité et son accessibilité [1]. En 2013, la densité estimée du réseau routier en Afrique était la plus faible au monde avec en moyenne 7 km pour 100 km contre 12 km pour l'Amérique Latine et 18 km pour l'Asie, soit un taux de bitumage de 2,2 km de routes pour 100 km pour l'Afrique Centrale [4]. Ce faible réseau routier plonge l'Afrique dans un essor précaire. Au Cameroun depuis les indépendances, les pouvoirs publics ont mis sur pieds un réseau routier moderne. Quoique louables, ces initiatives n'ont pas résolu le problème de désenclavement de l'arrière-pays et des centres urbains qui sont encore moins desservis [5]. Le Cameroun compte environ 112 973 kilomètres de routes, avec un total de 10 158 kilomètres de routes revêtues et 102 815 kilomètres de routes en terre. Parmi celles revêtues, 57 % concernent les routes nationales [6]. Néanmoins, ces routes restent insuffisantes et sont en très mauvais états. Ainsi, elles causent en moyenne 16 583 accidents chaque année avec plus de 1 500 décès de personnes [6] et coûtent au Cameroun environ 200 millions d'USD, soit environ 1 % de son Produit International Brut (PIB) [7]. Le Gouvernement conscient de ce déficit infrastructurel a défini des orientations à moyen et long termes dans sa Stratégie de Croissance et de l'Emploi (SCE), visant à faire passer la fraction du réseau routier bitumé de 10 % en 2010 à 17 % à l'horizon 2020. Dans la même période, le réseau prioritaire en bon état devrait passer à 55 % contre 12 % en 2010 [8]. Or la capitale économique du Cameroun (Douala) compte environ 450 km de route bitumé mais 10 % seulement peuvent être considérée comme en moyen et bon état [9], soit 90 % dégradées. Ces dégradations constituent un frein à la croissance économique du pays. En dépit des efforts menés par la Communauté Urbaine de Douala (CUD) et les partenaires associés (Banque Mondiale, etc.) sur le développement infrastructurel de la ville [10], ces axes routiers restent toujours désuets pour cause des

solutions techniques limitatives [11]. Après de nombreuses constructions routières dans la ville de Douala notamment la RN3 de Bonaberi, il a été observé une dégradation précoce de la route et d'immersion des surfaces de sol [12]. Cependant, cette infrastructure est confrontée à une difficulté qui est celle de la non durabilité, qui se traduit par les dégradations que sont les nids de poule, les fissures, l'affaissement de la chaussée, les bombements, les épaufures et les arrachements [13]. Ce problème devenu récurrent a une forte influence sur l'économie nationale du pays, compte tenue de la position géographique de la ville de Douala comme porte d'échange import-export [12]. Les travaux de recherche et les rapports d'expertises se sont toujours limités aux facteurs tels que les conditions météorologiques, le climat, l'intensité du trafic, les surcharges routières, la qualité des travaux, le contrôle des chantiers, les risques naturels, les études géotechniques mal ou non réalisées, la nature et la texture du sol pour justifier ces dégradations précoces [13 - 16]. Or le niveau de la nappe phréatique est une donnée non prise en compte dans les études routières en dépit d'importantes précipitations qui saturent la nappe souterraine de manière régulière et intensive. Par ailleurs, la rencontre des eaux souterraines au cours des travaux routiers est fréquente [17]. Ainsi, quel est l'influence du niveau de la nappe phréatique sur la durabilité du corps de chaussée? Le présent travail est une contribution à l'amélioration des constructions routières dans l'arrondissement de Douala IV^{ème}. Dans ce cadre, le but visé est de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe phréatique de l'ancienne et de la nouvelle route de Bonaberi à Douala afin de montrer son influence sur le corps de chaussée.

2. Matériel et méthodes

2-1. Situation géographique de la zone d'étude

Cette étude a été menée dans la ville de Douala chef-lieu de la région du Littoral, précisément dans l'arrondissement de Douala IV^{ème} à Bonaberi (*Figure 1*). Les investigations ont débuté au niveau du carrefour Bonassama situé à environ 200 m du pont du Wouri et se sont achevées au carrefour Sodiko à 200 m de la gare routière. Du point de vue géographique, la ville de Douala est située entre 04°01' et 04°06' de latitude Nord et entre 09°04' et 09°45' longitude Est. Elle constitue le plus vaste des bassins côtiers camerounais avec une superficie de 19 000 km² dont 7000 km² sont immergés et une plate-forme continentale d'une largeur de 25 km [18]. Cette ville est caractérisée par une morphologie de plaine étalée ne dépassant pas 60 m. Ses collines sont constituées uniquement de terrain sédimentaire et sont entaillées par un réseau dense de cours d'eau et ruisseau qui affluent des fleuves côtiers. Le Wouri est l'unique fleuve qui traverse la ville de Douala dans sa partie Nord-Ouest, il s'écoule suivant la direction NE-SW et est alimenté par les quartiers traversant le Nord et l'Ouest. Douala a un climat de type tropical humide influencé par la déviation de la mousson due au relief du mont Cameroun situé à 60 km de l'Ouest et qui culmine à 4070 m [19]. Elle est marquée par des précipitations abondantes et quasi permanentes d'une hauteur allant de 2400 à 4000 mm avec une température qui oscille autour de 26,7°C [20]. Son sol est ferrallitique et hydromorphe et son bassin sédimentaire présente deux systèmes aquifères importants : un système profond (grès de base, sable paléocène) et un système superficielle (formation miopliocène, alluvions du quaternaire). Quant à sa forêt ombrophile, elle comprend : une partie atlantique biafréenne située au niveau du Wouri, les mangroves localisées au niveau de la bordure côtière (*Rhizophoras* Moza et *Avicennisa* germinan) [21] et une partie secondaire vieille et dégradée qui se trouve au niveau des zones de dépression.

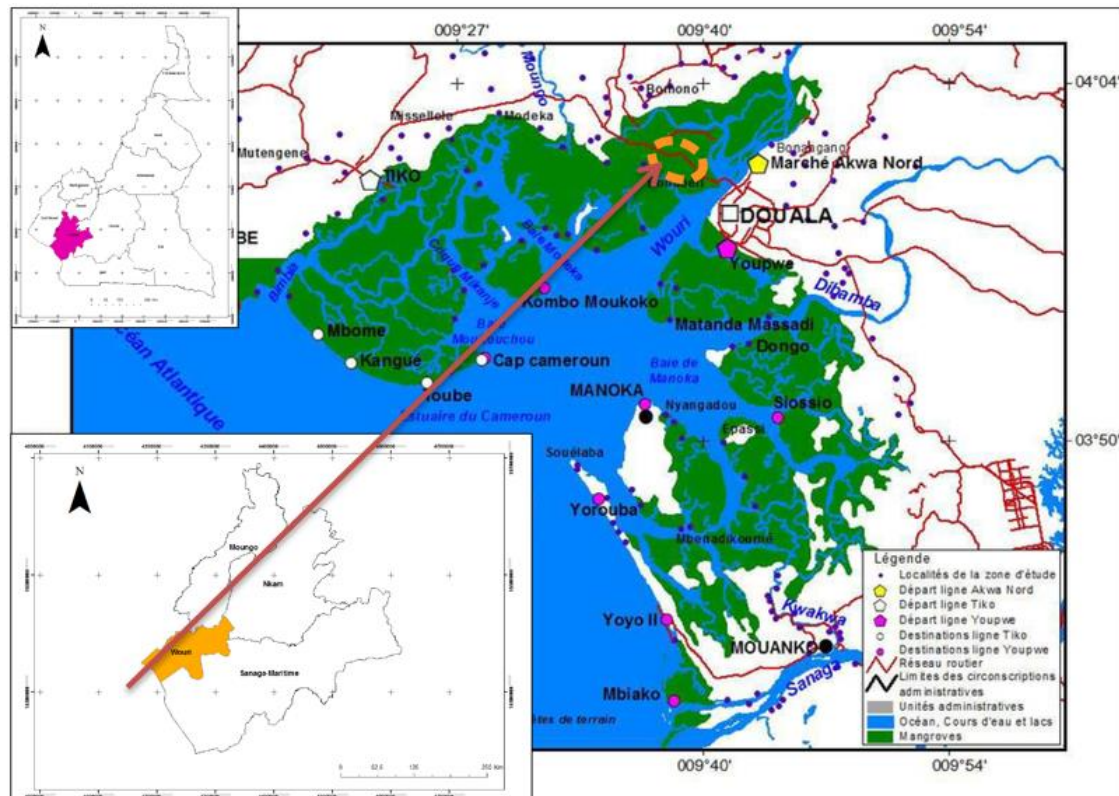


Figure 1 : Plan de localisation de la zone d'étude.

Source : (M. KAMDEM)

2-2. Travaux de terrain

Pour mener à bien cette étude une descente a été effectuée sur le site pour un état des lieux. Ensuite, elle a été poursuivie par plusieurs campagnes de collecte de données enfin par l'analyse et la caractérisation des données obtenues.

2-2-1. Réalisation des profils en longs des axes routiers

Cette étape consistait à faire le tracé de l'axe sur lequel sera restitué le profil en long des deux routes. Ensuite à l'aide d'une station totale les levées topographiques de ces axes (ancienne et nouvelle route) ont été faites, ceux-ci accompagnés d'une prise des coordonnées géographiques tout au long de ces routes. Toutes ces informations obtenues ont été transférées dans le logiciel COVADIS pour le tracé du profil en long proprement dit. Les pentes entre le Point le plus Haut (PH) et le Point le plus Bas (PB) ont été calculées suivant la **Formule** de [22] ci-dessous :

$$\rho = \frac{D_n}{D_h \times 100} \quad (1)$$

avec, $D_n = PH - PB$

ρ étant la pente du terrain ; D_n la dénivelée entre le Point le plus Haut et celui le plus Bas et D_h la distance planimétrique entre ces deux points. Cependant, il est à noter que c'est la pente du relief qui détermine l'écoulement des eaux souterraines et de surface [19]

2-2-2. Choix des points piézométriques et installation des piézomètres

Cette phase de l'étude consistait premièrement à sélectionner et prendre les coordonnées des points piézométriques. Le choix reposait sur la distance par rapport à la route (proches de la route), au point d'eau existant (puits moins utilisés) et l'accessibilité aux puits. Ensuite les piézomètres ont été installés. A cet effet, les trous allant de 25 à 30 cm de diamètre et 4 m de profondeur et plus ont été creusés à l'aide d'un engin appelé Dando (foreur). Au total 80 piézomètres ont été recensés et une cartographie de ces points a été réalisée avec le logiciel MAPINFO (**Figure 2**).

ETAT DES LIEUX DES ROUTES ANCIENNE ET NOUVELLE DE BONABERI (DOUALA - CAMEROUN)

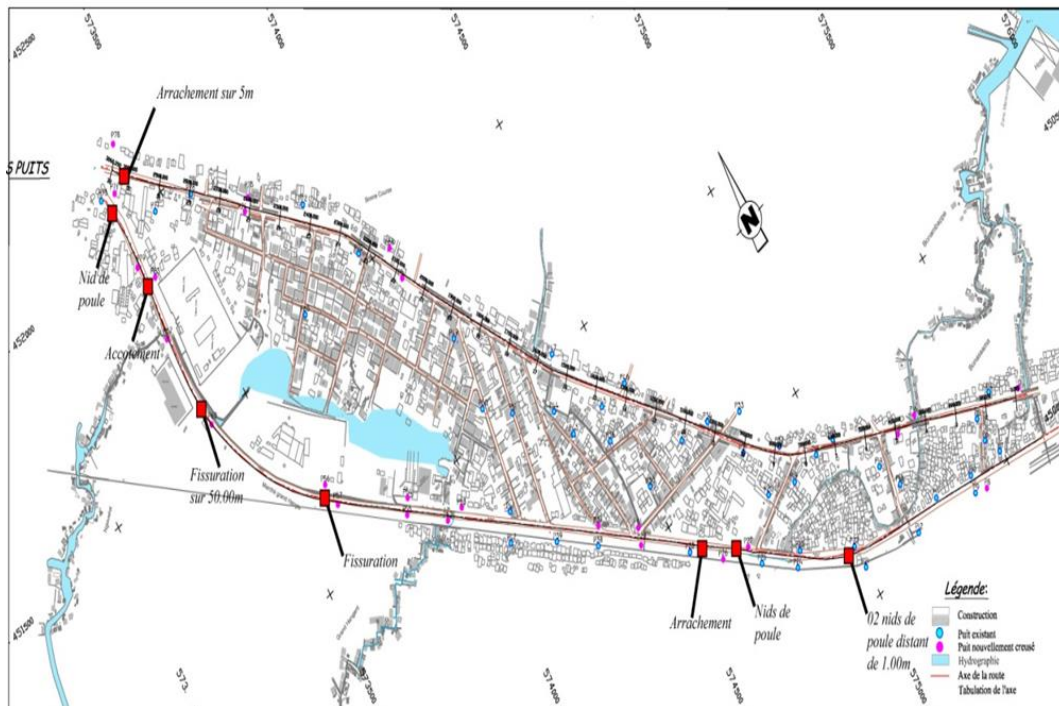


Figure 2 : Carte de localisation des piézomètres (MOIFFO Judicaël)

2-2-3. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe phréatique

Pour poursuivre la caractérisation hydrodynamique, les mesures des niveaux piézométriques ont été effectuées dans les conditions de stabilisation de la nappe pour l'ensemble des points du site. Un suivi mensuel a été effectué dans 72 piézomètres sur 80 points qui ont été initialement choisis. Sur les 72 piézomètres, 26 ont été mesurés en régime statique et le reste en régime dynamique. Ce suivi du niveau d'eau s'est étalé sur une période 5 mois (de novembre à mars 2015). La mesure du niveau piézométrique dans les ouvrages s'est effectuée à l'aide d'une sonde électrique. Le niveau piézométrique (NP) a été calculé par la différence entre la côte topographique Z (repère sur l'ouvrage) et la profondeur de l'eau dans le puits (Ns ou hp) [23] cit [24]. Il est ainsi exprimé par **l'Équation 2** suivante :

$$H(Np) = Z - Ns(hp) \quad (2)$$

Les niveaux statiques des ouvrages mesurés tout le long des deux routes et le calcul des niveaux piézométriques ont été représentés sur fond COVADIS. Ceci pour montrer l'évolution du niveau piézométrique en fonction du Terrain Naturel de la route (fluctuations). Cette carte présente la différence d'altitude entre le model numérique de terrain et la surface piézométrique. Elle permet de donner des ordres de grandeur de la

profondeur des eaux souterraines (le mètre). Les niveaux piézométriques maximaux ont été sélectionnés pour la réalisation de la carte des niveaux piézométriques. Elle a été faite suite à l'interpolation par des programmes informatiques en se servant des logiciels SURFER [25]. Ce dernier a permis de ressortir la configuration de la carte hydrodynamique. Pour faciliter l'interprétation de la carte piézométrique, les opérations d'habillage ont été effectuées, elles sont de deux ordres :

- le tracé des lignes de courant de la surface piézométrique ;
- le fléchage des lignes de courant : elle obéit au sens de l'écoulement qui se déduit des niveaux piézométriques de l'eau dans le sol.

Pour clôturer cette phase, le calcul du bilan hydrique de la ville de Douala a été fait. Il était question de chercher à la délégation régionale des transports de Douala les fiches des relevés ombrothermique sur une période de 30 ans. Douala étant situé dans une région tropicale, la méthode utilisée est celle du bilan hydrique de [26] cit [27]. Celle-ci permet d'évaluer le déficit d'écoulement mensuel et tient compte de la réserve du sol d'un mois à l'autre. Elle consiste à calculer tout d'abord pour chaque mois, une évapotranspiration potentielle, que l'on peut assimiler au pouvoir évaporant de l'atmosphère sur le bassin considéré. Cette évaporation potentielle est fonction de la température moyenne mensuelle par l'entremise des indices thermiques mensuels i , calculé par la **Formule** :

$$\text{ETP (mm)} = 16 \times \left(\frac{10T}{I} \right)^\alpha \times F(\lambda) \quad (3)$$

$$\text{Avec } I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (4)$$

$$\text{Et } i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad (5)$$

$$\alpha = 0,492 + 1,7 \times 10^2 \times I - 7,7 \times 10^{-5} \times I^2 + 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 = 4,009 \quad (6)$$

avec, T la température moyenne mensuelle, I : l'indice annuel de température, i : l'indice mensuel de température et λ le facteur de correction qui dépend de la latitude.

L'évapotranspiration potentielle est ainsi confrontée aux précipitations. Les paramètres suivants du bilan hydrologique sont calculés : L'évapotranspiration réelle (ETR), la réserve facilement utilisable (RFU), la variation de la réserve facilement utilisable (Δ RFU), l'excédent pluviométrique ou water surplus (ws), le déficit agricole (DA), le coefficient mensuel d'humidité (α). Le calcul de tous ces paramètres est effectué suivant l'Organigramme de la **Figure 3** [26].

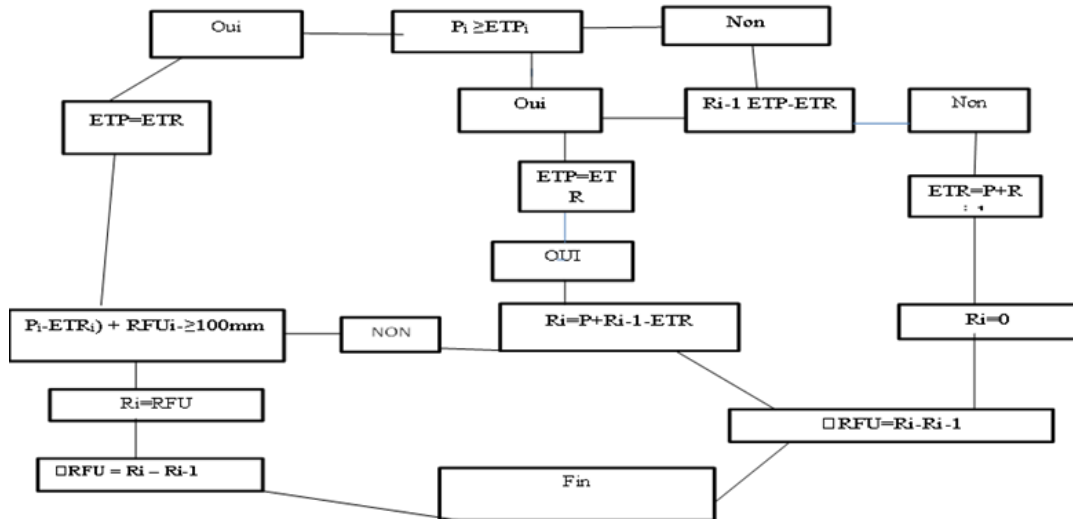


Figure 3 : Organigramme de calcul du bilan hydrique selon Thornthwaite

L'infiltration peut donc être déterminée suivant la relation :

$$P = R + E + I \Leftrightarrow I = P - R - E \quad (7)$$

avec, I : l'infiltration moyenne annuelle (en mm), E : l'évaporation réelle (en mm), R : le ruissellement moyen annuel et P la précipitation moyenne annuelle.

3. Résultats

3-1. Profil en long de l'ancienne et la nouvelle route

Les profils topographiques du terrain naturel ont été réalisés à l'échelle 1/50 pour l'altitude et 1/2500 pour les distances. Le calcul des pentes de ces profils donne les allures suivantes : pour l'ancienne route (**Figure 4**), on constate qu'il y a plusieurs variations d'altitude donc le point le plus haut est 19,02 m et le point le plus bas est de 13,02 m. Les différents pentes sont : entre les PK 100 et 200, elle est de 0,72 % ; entre les PK 200 et 400, elle est de -0,17 % ; entre les PK 400 et 810, la pente est de 1,29 % ; entre les PK 810 et 1600, la pente est de -0,5 % ; entre les PK 1600 et 2400, elle est de 0,25 % ; entre les PK 3000 et 3120, elle est de 0,7 %.

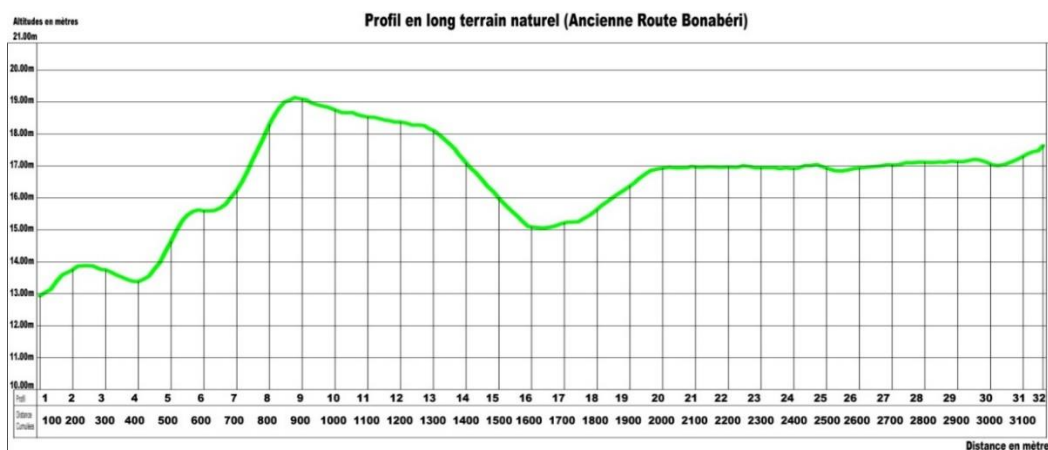


Figure 4 : Profil en long de l'Ancienne Route (AR)

Le terrain naturel de la nouvelle route (**Figure 5**) montre que le point le plus haut est de 18,35 m et le point le plus bas est 13,17 m. Le calcul des différentes pentes montre que : entre les PK 200 et 400, elle est de 0,54 % ; entre les PK 400 et 565, la pente a une valeur de -0,38 % ; entre les PK 535 et 650, elle est de 0,4 % ; entre les PK 650 et 700, elle est de -0,88 % ; entre les PK 700 et 1300, la pente est de 0,79 % ; entre les PK 2200 et 2300, elle est de 0,43 % ; entre les PK 2900 et 3150, elle est de -0,18 % ; entre les PK 3150 et 3420, la pente est de 1,07 %.

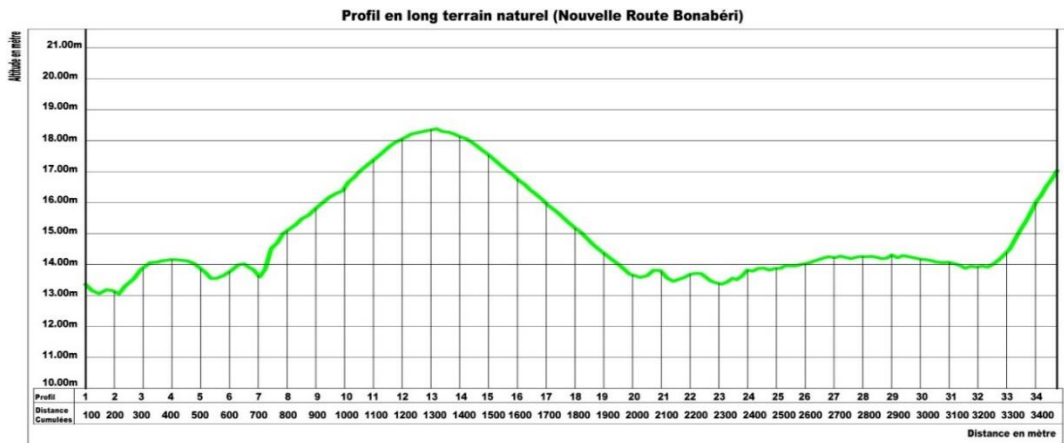


Figure 5 : Profil en long de la nouvelle route (NR)

3-2. Caractéristiques hydrodynamiques du sol

3-2-1. Synthèse des données piézométriques de Novembre à Mars

Les données relatives à la fluctuation de la surface piézométrique sont présentées dans le **Tableau 1**. Il en ressort que pendant ces cinq campagnes piézométriques, le niveau maximal piézométrique varie de 11,03 à 17,41 m, le niveau piézométrique minimal varie de 10,57 à 14,87 m et les fluctuations à la surface piézométrique sont peu perceptibles, elles varient de 0,2 à 3,85 m. Ainsi le puits n° 49 est celui qui a le plus grand NP 17,41 m qui correspond à une fluctuation de 3,31 m, il est suivi des puits n° 29, 76 et 78 pour des NP respectifs de 16,97 ; 16,52 et 16,32 m et des fluctuations de 0,19 ; 2,72 et 3,85 m. En ce qui concerne les NP minimaux, on note que le puits n° 1 a la plus petite valeur 10,57 m pour une fluctuation de 0,46 m. Il est suivi des puits n° 60, 51 et 55 avec des NP respectifs de 11,21 ; 11,47 et 11 m qui correspondent successivement aux fluctuations de 1,6 ; 0,58 et 0,3 m.

Tableau 1 : Niveaux piézométriques maximaux, minimaux et fluctuations

n° du puits	NP max (m)	NP min (m)	Fluctuations(m)	n° du puits	NP max (m)	NP min (m)	Fluctuations(m)
1	11,03	10,57	0,46	38	13,68	12,97	0,71
3	12,19	12,04	0,15	39	14,18	13,1	1,08
4	12,73	12,58	0,15	41	13,79	13,15	0,64
5	13,18	12,84	0,34	42	12,47	11,89	0,58
6	13,03	12,71	0,32	43	14,38	13,66	0,72
7	12,14	12,02	0,12	44	14,05	13,4	0,65
8	13,38	12,68	0,7	45	14,74	14,29	0,45
9	14,29	13,04	1,25	46	15,1	14,52	0,58
10	12,84	12,4	0,44	47	13,81	13,21	0,6
11	12,97	12,04	0,93	49	17,41	14,1	3,31

12	12,91	12,61	0,3	50	14,1	13,52	0,58
13	13,32	13,24	0,08	51	12,05	11,47	0,58
14	13,69	13,48	0,21	52	12,22	12,1	0,12
15	13,44	13,2	0,24	53	13,08	12,69	0,39
16	12,58	12,56	0,02	54	12,88	12,24	0,64
17	14,53	14,18	0,35	55	12,17	11,87	0,3
18	15,27	14,94	0,33	56	13,87	12,15	1,72
19	14,83	14,45	0,38	57	12,62	11,81	0,81
20	14,92	14,38	0,54	60	12,81	11,21	1,6
21	12,8	12,4	0,4	61	14,64	13,44	1,2
22	13,22	12,92	0,3	62	12,28	12,03	0,25
23	13,66	13,16	0,5	63	14,61	14,06	0,55
24	15,52	12,04	3,48	65	15	12,95	2,05
25	13,78	13,23	0,55	67	15,53	13,71	1,82
26	14,5	14,31	0,19	68	14,96	14,29	0,67
27	14,38	13,7	0,68	70	15,34	14,61	0,73
28	14,43	13,35	1,08	71	14,72	11,97	2,75
29	16,97	14,31	2,66	72	15,61	14,82	0,79
30	14,94	14,01	0,93	73	14,88	14,48	0,4
31	15,58	14,6	0,98	74	14,77	14,22	0,55
32	15,04	14,21	0,83	75	14,83	14,23	0,6
33	15,82	14,87	0,95	76	16,52	13,8	2,72
34	15,68	14,63	1,05	77	15,35	13,75	1,6
35	15,67	14,81	0,86	78	16,32	12,47	3,85
36	14,55	13,67	0,88	79	14,05	13,44	0,61
37	14,08	13,48	0,6				

3-2-2. Relation entre précipitations mensuelles et niveau piézométrique moyen mensuel

Durant ces cinq mois de campagnes piézométriques, malgré de grande de variation des hauteurs de précipitations : 344,1 mm pour le mois de novembre, 156,9 mm pour décembre, 13,4 mm pour janvier, 67,7 mm pour février et 169,5 mm pour mars, les niveaux piézométriques restent constantes de valeurs respectives 13,78 m, 13,55 m, 13,33 m, 13,53 m et 12,7 m. Il est remarqué que le mois de mars a le plus fort taux de précipitations et le NP maximal comparé aux autres mois. Par ailleurs, l'on remarque que la nappe réagit de façon antagoniste à la tombée de la pluie.

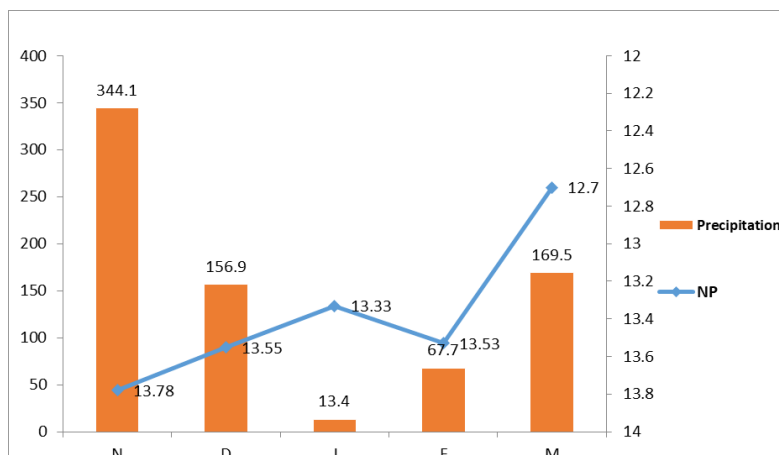


Figure 6 : Évolution du niveau de la nappe souterraine en fonction des précipitations

3-2-3. Cartes piézométriques

3-2-3-1. Évolution du niveau piézométrique en fonction du terrain naturel de la route

La prise des niveaux d'eau pour chaque mois a permis de tracer les courbes montrant les écarts entre le niveau d'eau souterrain et la route. D'une manière globale, il est à noter que le niveau piézométrique évolue en fonction de la forme du terrain naturel. En effet, au niveau des zones de faible altitude, la distance entre les deux variantes est très minime par opposition aux endroits où l'altitude est un peu élevée, la distance est perceptible. Donc, la surface piézométrique épouse la topographie du site. On constate que l'écart entre la surface topographique et le niveau piézométrique est faible. Les plus petites valeurs sont 0,40 et 0,71 m, ensuite les valeurs maximales sont 5,08 et 4,89 m successivement pour l'ancienne et la nouvelle route. Pour ce qui est des cinq campagnes, on constate que l'eau semble se frotter à la route entre les PK 00 et PK 900 pour les deux routes.

- Mois de novembre

Au niveau de la nouvelle route, on constate qu'entre les PK 00 et 720, l'écart entre la route et le NP va de 0,77 à 2,36 m ; entre les PK 750 et 1650 l'écart varie de 1,93 à 3,83 m ; entre les PK 1680 et 2280 l'écart varie de 0,77 à 1,66 m ; entre les PK 2310 et 3210, l'écart varie de 1,6 à 2,05 m ; entre les PK 3240 et 3420, l'écart entre le niveau d'eau et la route va de 1,3 à 2,66 m. Ici l'écart maximal est de 2,66 m et l'écart minimal est de 0,77 m. Les résultats de l'ancienne route (*Figure 7*) pour le mois de novembre montrent qu'entre les PK 00 et PK 300, l'écart entre le niveau de la nappe et de la route varie de 0,7 à 1 m ; entre les PK 450 et 810 l'écart varie de 1,28 à 4,01 m ; entre les PK 840 et 1350, l'écart varie de 1,94 à 3,81 m ; entre les PK 1380 et 2100 l'écart varie de 0,96 à 2,33 m ; entre les PK 2130 et 2760 l'écart varie de 1,53 à 2,87 m ; entre les PK 2760 et 3000, l'écart varie de 2,87 à 5,08 m. Ainsi, l'écart maximal est de 5,08 m et l'écart minimal de 0,7 m.

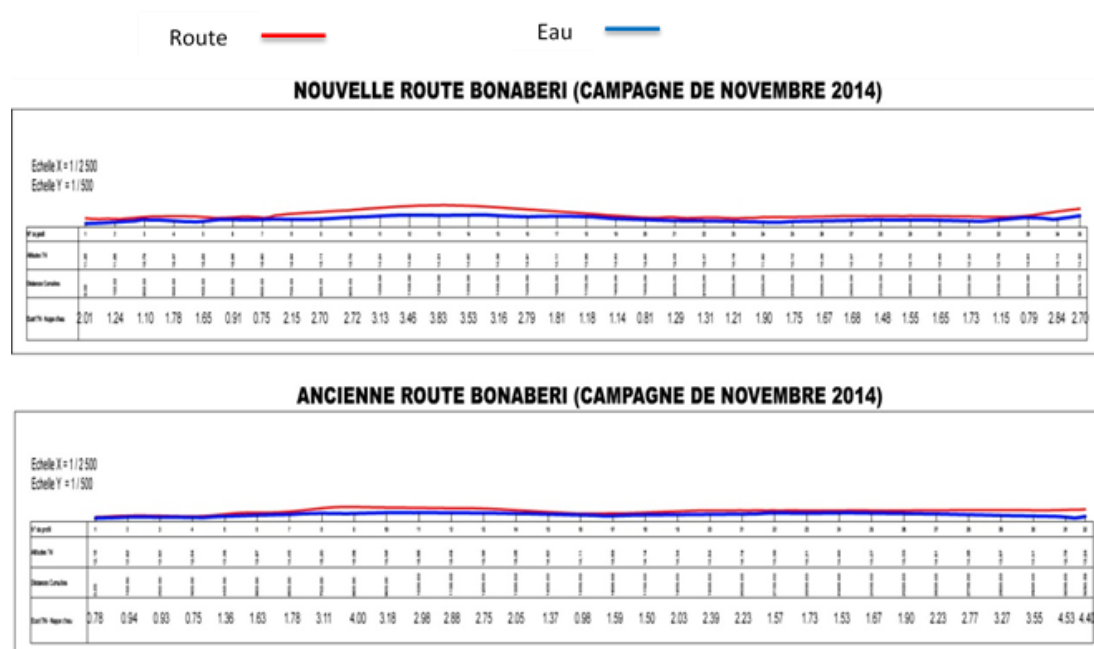


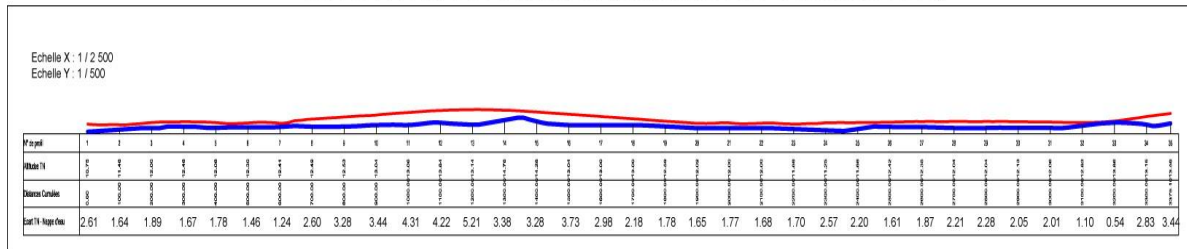
Figure 7 : Évolution du niveau piézométrique en fonction de la topographie ou du terrain naturel

- Mois de décembre

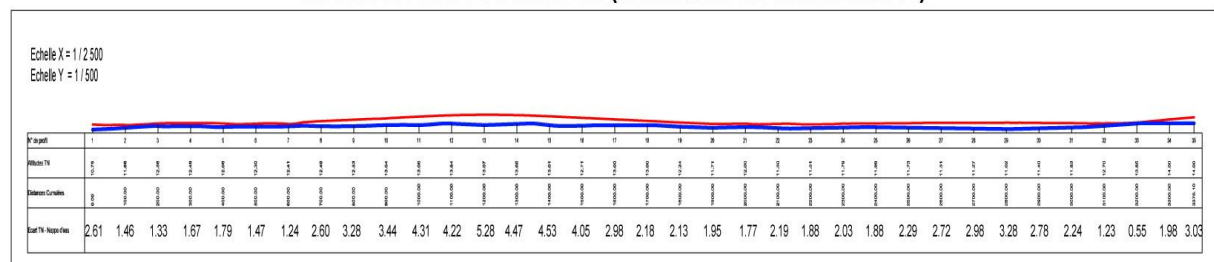
En ce qui concerne la nouvelle route, on note que la hauteur maximale entre la route et le NP est de 2,66 m et la hauteur minimale est de 0,72 m. Entre les PK 00 et 720, l'écart entre la route et le NP varie de 0,72 à

2,36 m; entre les PK 750 et 1650, cet écart varie de 1,99 à 3,83 m ; entre les PK 1680 et 2280, l'écart varie de 0,77 à 1,66 m; entre les PK 2310 et 3210, l'écart varie de 1,06 à 2,06 m et entre les PK 3240 et 3420, l'écart varie de 1,13 à 2,66 m. Pour le compte du mois de décembre, l'évolution des courbes (**Figure 8**) montrent les écarts entre la route et le niveau d'eau qui varie de 0,77 à 1,64 m pour les PK 00 à PK 450, ensuite entre les PK 480 et 810, l'écart va de 1,64 à 4,49 m ; entre les PK 840 et 1350, l'écart varie de 2,47 à 4,37 m; entre les PK 1380 et 2100, l'écart entre la route et l'eau du sol varie de 1,37 à 2,70 m; entre les PK 2130 et 2760, l'écart varie de 2,11 à 2,80 m, enfin entre les PK 2790 et 3090, l'écart entre la route et le niveau d'eau varie de 2,41 à 3,67 m. Ici, on constate que la distance maximale est de 4,49 m et la distance minimale est de 0,77 m.

NOUVELLE ROUTE BONABERI (CAMPAGNE DE DECEMBRE 2014)



NOUVELLE ROUTE BONABERI (CAMPAGNE DE JANVIER 2015)



ANCIENNE ROUTE BONABERI (CAMPAGNE DE JANVIER 2015)

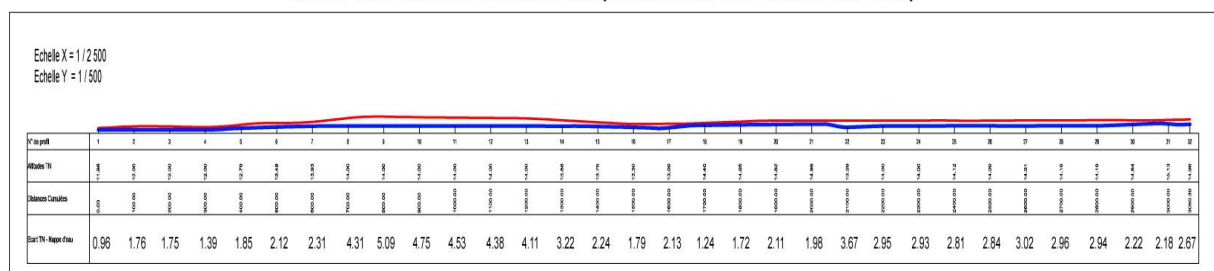
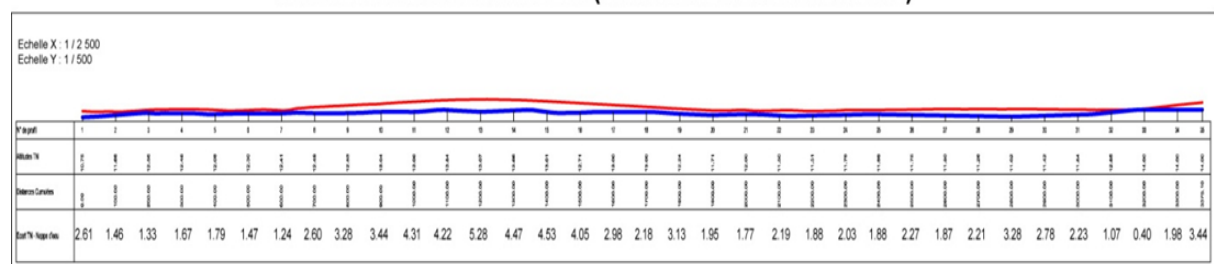


Figure 9 : Évolution du niveau piézométrique en fonction de la topographie ou du terrain naturel

- Mois de février

Pour la nouvelle route, la **Figure 10** montre qu'entre les PK 00 et 720, l'écart entre le TN de la route et le NP est de 1,22 à 2,61 m; ensuite entre les PK 750 et 1650, l'écart est de 2 à 5,20 m; entre les PK 1680 et 2280, le NP varie de 1,36 à 4,02 m; entre les PK 2310 et 3210, l'écart va de 1,88 à 2,88 m; entre les PK 3240 et 3420, l'écart varie de 0,40 à 3,09 m. On note, un écart maximal entre le TN et le niveau d'eau est de 5,20 m et 0,4 m pour l'écart minimal. Pour l'ancienne route, la **Figure 10** présente une écart minimal de 0,88 m et maximal de 5,09 m. En effet, entre les PK 00 et 450 l'écart entre le TN et le NP varie de 0,88 m à 1,75 m, entre les PK 480 et 810, l'écart est de 0,88 m à 4,31 m, de 4,11 à 5,09 m entre les PK 840 et 1350; 1,24 à 3,22 m entre les PK 1380 et 2100; 1,96 à 3,67 m entre les PK 2130 et 2760 et 2,07 à 2,22 entre les PK 2790 et 3090.

NOUVELLE ROUTE BONABERI (CAMPAGNE DE FEVRIER 2015)



ANCIENNE ROUTE BONABERI (CAMPAGNE DE FEVRIER 2015)

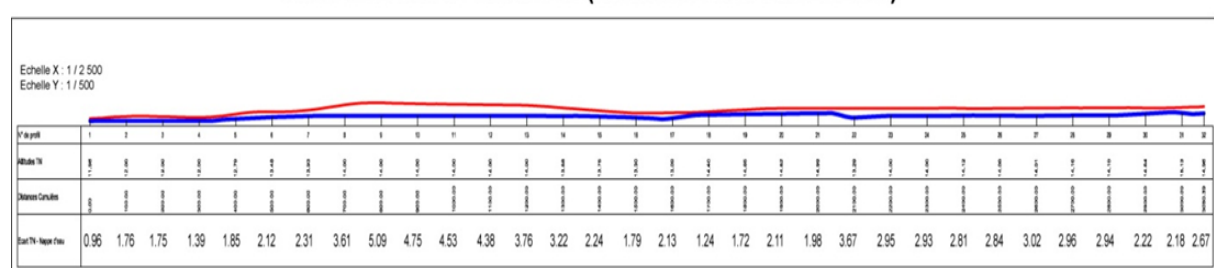


Figure 10 : Évolution du niveau piézométrique en fonction de la topographie ou du terrain naturel

- Mois de mars

Pour la nouvelle route, on note ce mois que l'écart maximal entre le TN et le NP est de 4,20 m et l'écart minimal de 0,41 m, la **Figure 11** montre qu'entre les PK 00 et 720, l'écart entre la route et le niveau d'eau souterrain est de 1,00 à 1,43 m; ensuite entre les PK 750 et 1650 l'écart est de 2,03 à 4,22 m ; entre les PK 1680 et 2280, le niveau d'eau varie de 2 à 2,36 m; entre les PK 2310 et 3210, l'écart va de 1,07 à 2,22 m; entre les PK 3240 et 3420, l'écart varie de 0,41 à 2,02 m. On note, un écart maximal entre le TN et le NP est de 4,99 m et 0,86 m pour l'écart minimal. Pour l'ancienne route, la **Figure 11** présente un écart minimal de 0,88 m et maximal 5,09 m. En effet, entre les PK 00 et 450 l'écart entre le TN et le NP varie de 0,88 m à 1,41 m, entre les PK 480 et 810, l'écart est de 2,12 à 4,99 m entre les PK 840 et 1350; 1,02 à 3,18 m entre les PK 1380 et 2100; 2,03 à 3,07 m entre les PK 2130 et 2760 et 2,22 à 2,90 entre les PK 2790 et 3090.

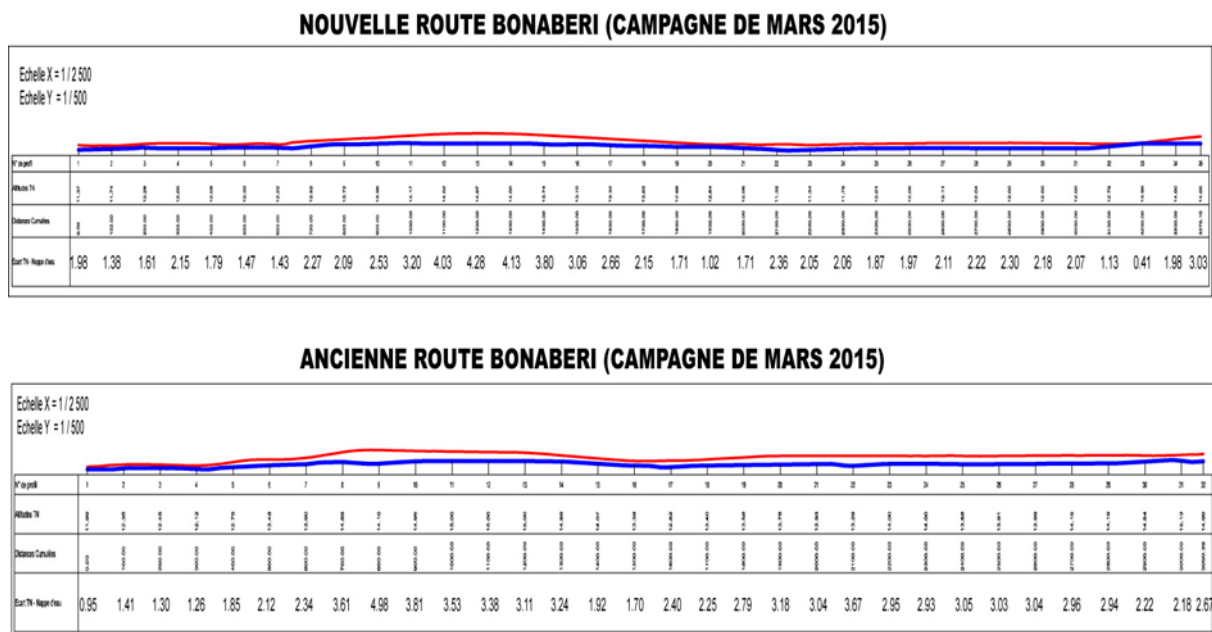


Figure 11 : Évolution du niveau piézométrique en fonction de la topographie ou du terrain naturel

3-2-3-2. Carte des niveaux piézométriques maximaux de la nappe phréatique

L'analyse de la **Figure 12** montre que les lignes de courants sont perpendiculaires aux courbes hydroisohypses, ces lignes sont d'une part centripètes car ils se dirigent de la périphérie vers les axes routiers et d'autre part centrifuges car ils partent de la route pour les périphéries. Les courbes hydroisohypses sont décroissantes partant de la chaussée vers les périphéries. L'on observe des courbes qui se resserrent sur les deux axes routiers pour former des dômes piézométriques. Ces derniers sont plus nombreux (03) au niveau de la NR (03) précisément à la gare routière qu'à l'AR (01). Aussi, les courbes hydroisohypses suivent la NR et vont dans la même direction que le courant de l'eau et ces courbes à isovaleurs sont espacés d'une part et resserré d'autre part.

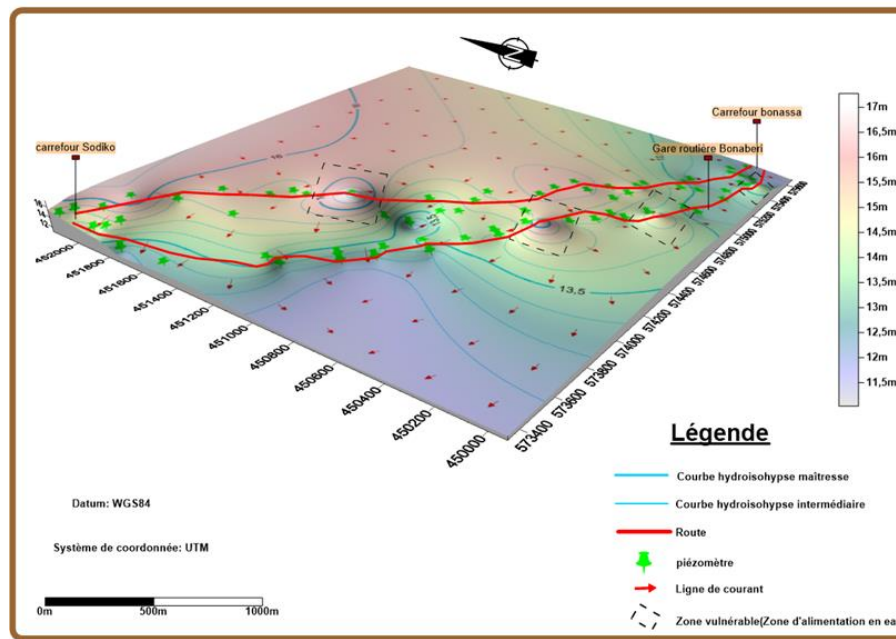


Figure 12 : Carte piézométrique de la nappe phréatique

3-2-4. Bilan hydrique de la ville de Douala et ses environs

Le bilan hydrique établi est celui de l'année hydrologique 2000 à 2014. Les **Tableaux 2 et 3** présentent respectivement les différents paramètres du bilan hydrique. Il en ressort les indicateurs suivants : 3716,4 mm de hauteur de précipitations moyennes annuelles, 1421,4 mm de pertes d'évapotranspiration réelle, soit 38,2 % de précipitations. Par ailleurs, 1849 mm desdites précipitations sont ruisselées et 445,5 mm infiltrées dans le sol soit un taux de 12 % des précipitations, quant à la température moyenne, elle est de 27°C. Le surplus d'écoulement d'eau est de 2211 mm et la lame d'eau écoulee correspond à de 2295 mm.

Tableau 2 : Bilan hydrique de Douala et ses environs (2000 - 2014)

paramètre/mois	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE	JANVIER	FÉVRIER	Total
P	169,5	241,4	254,7	476,4	583,5	730,7	596,4	362,1	155,6	38,6	37,3	70,2	3716,4
T	27,8	27,5	27,4	26,8	24,3	24,8	25,8	26,8	26,8	26,8	28,1	28,4	27,0
F(λ)	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,01	1,01	0,94	
i	13,32	14,47	13,14	12,49	11,12	11,12	11,99	12,45	13,98	12,78	13,65	13,87	154,39
alpha													3,8
ETP	149,1	177,8	144,1	123,4	95,3	92,6	114,9	122,5	168,2	130,6	153,9	149	1621,3
DE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,6	116,6	78,8	199,9
Ri	20,4	84,1	100	100	100	100	100	100	87,4	0	0	0	
Δri	20,4	63,7	15,9	0	0	0	0	0	-12,6	-87,4	0	0	0
S	11,3	11,3	5,3	179,1	333,7	485,9	483,7	361,6	180,8	90,4	45,2	22,6	2211
LEP	20,4	63,6	110,6	353	488,2	638,1	481,5	239,6	-12,6	-87,4	0	0	2295,1
ETR	149,1	177,8	144,1	123,4	95,3	92,6	114,9	122,5	168,2	126	37,3	70,2	1421,4
p-ETP	20,4	63,6	110,6	353	488,2	638,1	481,5	239,6	-12,6	-92	-116,6	-78,8	2095,1
ETP-ETR	128,7	114,2	33,5	-229,6	-392,9	-545,5	-366,6	-117,1	180,8	222,6	270,5	227,8	-473,6

Tableau 3 : Paramètres du bilan hydrologique

P	3716,4	100 %
E	1421,4	38,2 %
R	1849	49,8 %
I	445,7	12 %

4. Discussion

4-1. Profil en long ou topographique des axes routiers

La variation du relief après calcul des pentes sur les deux routes pourrait s'expliquer par le fait qu'on y trouve des valeurs de pentes positives et négatives. Par ailleurs, ces valeurs montrent que le terrain naturel de la zone d'études est relativement plat. Ces résultats sont similaires à [19]. Cet auteur travaillant sur l'hydrogéologie et l'évaluation de la vulnérabilité des nappes dans le bassin de Besseke de Douala a montré que pour un indice de pente global (IPG) de 0,27 % le bassin versant de Besseke a un relief faible. En effet, les faibles pentes du terrain naturel sont à l'origine du faible ou du mauvais écoulement d'eau de ruissellement d'où la stagnation de l'eau sur la chaussée en période de crue. Or la présence de l'eau sur la chaussée est un facteur favorable à la dégradation des routes. Car un trafic intense sur une chaussée mouillée favorise l'arrachement progressif des matériaux et entraîne son usure.

4-2. Caractérisation hydrodynamique

4-2-1. Synthèse des données piézométriques

Les fluctuations de la nappe phréatique sont peu perceptibles du fait que la campagne s'est déroulée en saison sèche, ce qui corrobore avec [27, 28] qui ont montré que les puits sont sensibles aux variations météorologiques et donc les fluctuations des nappes sont fonctions des saisons et de la topographie du site. La réaction de la nappe antagoniste à la tombée de la pluie pourrait s'expliquer par la nature lithologique du sol qui contient des argiles [13]. Par ailleurs, cette réaction montrant aussi la recharge de la nappe allant de novembre à janvier s'expliquerait par les pluies tombées en octobre et la décharge de la nappe qui va de janvier à février, ceci à cause du déficit hydrique et une recharge de février à mars. Il est noté que la recharge et la décharge sont très rapides dans ce milieu à cause de l'absence de rétention de l'eau par les sols sableux.

4-2-2. Cartes piézométriques

4-2-2-1. Évolution du niveau piézométrique en fonction du terrain naturel de la route

Les faibles écarts entre le niveau de la nappe phréatique et le TN pourraient être liés à la destruction des fondations de la chaussée de l'ancienne et la nouvelle route de Bonaberi en cas de remontées de la nappe. Ces résultats sont similaires à ceux des études réalisées au Dalifort dans le cadre de la résolution des difficultés rencontrées et méthodologie d'exécution pour la construction d'une route [28] où les auteurs ont obtenu des valeurs minimales et maximales de l'ordre de 0,85 à 3,38 m respectivement sur une période allant d'octobre à décembre. En outre, l'eau qui semble se frotter à la route montre que même en période sèche, la nappe d'eau affleure la surface du sol. Cela s'expliquerait du fait que cette zone soit marécageuse. Douala IV^{ème} est une zone inondable [29], de ce fait le code des bonnes pratiques pour la réduction de l'effet de l'eau sur le corps de chaussée devrait être pris en compte durant sa mise en œuvre. Ce code prescrit la prise en compte de la nappe phréatique au moins à 1,4 m de la surface de la chaussée [30].

4-2-2-2. Carte des niveaux piézométriques maximaux

L'espacement entre les courbes hydrohysoipse ou isovaleurs confère un écoulement de type laminaire de la nappe phréatique de la zone d'étude. En outre, les dômes piézométriques formés sur les axes routiers pourraient s'expliquer par le fait que ce sont des zones d'alimentation par infiltration des eaux de pluies. En effet, selon [31] ces zones correspondent à des zones de dépression piézométrique. Ces zones de dépression sont considérées comme des zones à risque pour la chaussée car, elle favorise la dégradation rapide du corps de chaussée. C'est le cas de la NR qui reçoit les eaux issues de l'AR par écoulement laminaire.

4-2-2-3. Bilan hydrique

Il en ressort globalement du tableau des paramètres du bilan hydrique de la ville de Douala et ses environs que les précipitations sont faibles pendant les mois de novembre à mai. Ceci correspond à la saison sèche. L'augmentation des pluies s'observe de juin à octobre ce qui correspond à la saison humide et montre que la ville de Douala a un climat équatorial avec un régime uni modal à deux saisons. La réserve facilement utilisable commence à se reconstituer au mois de mars dès le retour des pluies. Elle atteint son maximum au mois de mai et reste constante jusqu'au mois d'octobre, ensuite commence à baisser à partir du mois de novembre jusqu'à s'annuler au mois de décembre, janvier et février. L'évapotranspiration potentielle est égale à l'évapotranspiration réelle de mars à novembre. Pendant cette période, la lame d'eau apportée par les précipitations est donc suffisante pour alimenter l'évapotranspiration potentielle et les réserves du sol [32]. Des mois de novembre à février, l'évapotranspiration potentielle est supérieure à la hauteur moyenne des précipitations mensuelles. L'eau emmagasinée dans la nappe va être restituée dans la végétation. Ainsi, la variation mensuelle des réserves d'eau utilisable dans la NP devient négatif de novembre à décembre et nulle de janvier à février. Le fort taux d'évapotranspiration de novembre à décembre est dû au déficit hydrique observé durant cette période, cette analyse est identique à celle de [33]. L'évolution des paramètres du bilan hydrique laisse penser que la période de vidange de l'aquifère à nappe libre va de novembre à mars tandis que la période de recharge va de juin à octobre. En effet, les paramètres du bilan hydrologique montrent que 12 % des précipitations s'infiltrent dans le sol pour contribuer à la recharge de la nappe. Ce résultat est différent de celui de [19] qui a trouvé un taux d'infiltration à 9,3 % pour la ville de Douala. Ce décalage peut s'expliquer par la différence du nombre d'années hydrologiques utilisé lors des calculs. Cette valeur de l'infiltration est due à la nature du sol qui est assez perméable et perméable d'après les ordres de la conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-5} m/s obtenue par [13]. Ces dernières témoignent d'une alimentation rapide de la nappe supérieure par les eaux de précipitations, donc un taux d'infiltration important dans cette ville. Ceci peut aussi expliquer les remontées rapides de la nappe qui peuvent atteindre et affleurer la surface du sol après des pluies dont les hauteurs sont supérieures à la normale [34]. Cependant, l'augmentation de la fréquence et l'intensité des pluies réduisent la rigidité du corps de chaussée [35] car l'eau influence la teneur en eau des matériaux constituant le corps de chaussée et ramollit ces derniers. D'où la diminution de la portance du sol support. La chaussée se fatigue alors davantage sur un sol porteur, les chaussées rigides peuvent alors se casser et les chaussées souples se déformer [36]. Le climat de Douala lui confère des températures élevées en période sèche ce qui traduit aussi la détérioration rapide de ses routes. En effet, l'accroissement des températures entraîne une augmentation des dégradations par déformation permanente des chaussées bitumineuses [37, 38].

5. Conclusion

Parvenue au terme de ce travail dont l'objectif était de montrer l'influence de la nappe phréatique sur le corps de chaussée des axes routiers de Bonaberie, il en ressort que le profil en long de ces deux routes sont constituées des pentes très faibles. Pour toutes les campagnes, le niveau d'eau maximal est de 17,5 m et le niveau minimal est de 10,5 m. Il est à noter que les fluctuations de la surface piézométrique varient de 0,2 à 3,5 m et elles présentent des valeurs qui varient en fonction de la topographie. Pour les zones de basses altitudes les écarts minimaux sont de : 0,77; 0,72; 0,88; 0,40 et 0,86 m. En ce qui concerne les zones d'altitude un peu élevées, les écarts sont de : 4,49 ; 4,76 ; 4,99 ; 5,09 et 5,20 m. Le niveau moyen de la nappe phréatique varie très peu pendant les 05 mois. La carte piézométrique montre des zones de dépressions qui constituent un risque pour la chaussée. De plus 12% des eaux s'infiltrent pour alimenter la nappe. De ce fait, peu importe la saison dans la ville de Douala, l'eau de la nappe phréatique affleure la surface du sol.

Références

- [1] - Banque d'Afrique de Développement (BAD), " Cameroun : note sur le secteur de transport", Département des Transports du Développement Urbain et des TIC, (2015) 44 p.
- [2] - OUAIL OULMAKKI, "Impact des infrastructures de transport sur la croissance économique : le cas du Maroc", Economies et finances, Université Montpellier, Français. ffnnt : 2015MONTD042ff. fftetel-01432138f, (2015) 411 p.
- [3] - J. BENSALD, V. LEVITA, "Financer les infrastructures pour répondre aux besoins des économies modernes ", *Variances*, N°47 (2013) 7 - 31 p.
- [4] - CABINET INFHOTEP, "Les transports en Afrique : enjeux et perspectives", rue d'Antin 75002 Paris France, Edition, (2016) 22 p.
- [5] - L. DJIKE DONGMO, "Entretien et réhabilitation du réseau routier au Cameroun: Mythe ou réalité", Nkafu Policy Institute, (2016) 6 p., [en ligne] www.foretiafoundation.org
- [6] - NATION UNIS (US), "Évaluation de la performance en matière de sécurité routière (EPSR) Cameroun", New York et Genève, (2018) 71 p.
- [7] - Banque d'Afrique de Développement (BAD), "La sécurité routière en Afrique : Evaluation des progrès et enjeux du système de gestion de la sécurité routière", Département des transports et des TIC, (2013) 57 p.
- [8] - Document Stratégique de Croissance et de l'Emploie (DSCE), "Cadre de référence de l'action gouvernementale pour la période 2010-2020", (2009) 174 p.
- [9] - Communauté Urbaine de Douala (CUD), "Note communautaire du projet de réhabilitation de l'accès Est à la ville de Douala par la RN3", (2013) 13 p.
- [10] - Ministère des Travaux Publics, "Etude d'Impact Environnemental et Social du projet de bitumage de la route Obala-Nanga Eboko-Bouam", Rapport du MINTP& ECTA-BTP / Yaoundé Cameroun, (2009) 135 p.
- [11] - Communauté Urbaine de Douala (CUD), "Etude d'assainissement des drains situés entre l'ancienne et la nouvelle route (RN3) de Bonabéri" Rapport provisoire, (2012) 50 p.
- [12] - P. TENE MBIMBI, "Dimensionnement des chaussées en zone urbaine marécageuse : cas de la ville de Douala", Mémoire/Igénieur, Département de génie civil et urbanisme, ENSP, Université de Yaoundé I, (2014) 102 p.
- [13] - J. SANDJONG KANDA, L. I. NTOM NKOTTO, M. NANKAP DJANGUE, J.R. NGOUPAYOU NDAM, R. FEUMBA, et M. KAMDEM, "influence des caractéristiques physiques du sol sur la durabilité du corps de chaussée : cas des axes routiers de Bonabéri (Douala-Cameroun)", Vol. 16 (5) (2020) 147 - 160 p., ISSN1813-548X, [en ligne] : [http : //www.afriquescience.net](http://www.afriquescience.net)
- [14] - V. MAUDUIT, C. MAUDUIT et al, "Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel : analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire", *Bulletin des Laboratoires des ponts et Chaussées*, (2013) 47 - 63 p.
- [15] - EY MANYO, B. PICOUX, P. REYNAUD, F. ALLOU et C. PETIT, "Vers une modélisation avancée du contact pneu-chaussée en vue de l'amélioration du calcul de durée de vie", *Academic Journal of Civil Engineering*, 86 (1) (2018) 112 - 116 p.
- [16] - FELLAHI WASSIM, "Caractérisation et résilience des risques géotechniques dans un projet routier". Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil Option Infrastructure de Base et Géotechnique, Université Aboubekr Belkaid - Tlemcen Faculté de Technologie Département de Génie Civil, (2012) 112 p.
- [17] - Association Africaine des Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics (ALBTP) " Règles techniques pour la construction routière dans les pays africains de la zone intertropicale : Études, conception, construction, entretien)", Comité Transnational des Géotechniciens d'Afrique (CTGA), Version incorporant l'ensemble du guide de 1980, Complétée par le manuel BCEOM de 1972/1984, (Chap. 6 et 7 du tome 1, tome 2 et tome 3), (2018) 643 p.
- [18] - C. O. MBESSE, E. ROCHE et S. NGOS III, "La limite paléocène - éocène dans le bassin de Douala (Cameroun) : essai de reconstitution des paléoenvironnements par l'étude des Dinoflagellés", *Geo-Eco-Trop*, (2012) 83 - 119 p.

- [19] - R. FEUMBA, "Hydrogéologie et évaluation de la vulnérabilité des nappes dans le bassin versant de Besseke à Douala (Cameroun)", Thèse - Doctorat, Université de Yaoundé I, (2015) 253 p.
- [20] - Institut National De Statistique (INS), "Recueil des séries d'informations statistiques sur les activités économiques, sociales, politiques et culturelles de la région du littoral jusqu'en 2014", Annuaire statistique de la région du littoral, (2015) 405 p.
- [21] - R. A. ESSAGA ENAMA, "Contribution à la gestion de la période d'essai dans les entreprises publiques. Cas de la Société Camerounaise des Dépôts Pétroliers", Licence professionnelle, Institut Supérieur de Gestion et de Technologie, (2011) 45 p.
- [22] - C. PREVOT, "La pente en topographie", *Info EFS*, Archive N° 50, Fédération Française de Spéléologie, Lyon, (2006) 34 - 36 p.
- [23] - W. C. WALTON ET W. H. WALKER, "Evaluation of wells and aquifers by analyticals méthodes", *J. of geophysics, Geophys. Res.*, Vol. 66, (10) (1961)
- [24] - G. CASTANY, "Hydrologie : Principes des méthodes", Ed. Dunod, Paris, (1998) 238 p.
- [25] - B. BOURGINE et N. PEDRON, "piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance", Rapport final de l'étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM, (2013) 55 p.
- [26] - C. M. AMICHIATCHI, "Détermination des termes du bilan hydrologique d'un sous bassin versant du BANDAMA BLANC", Mémoire pour l'obtention de la licence en sciences et techniques de l'eau, Géosciences et environnement, Université de Nangui Abrogoua, (2016) 39 p.
- [27] - I. BOUBACAR, "caractérisation de saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin de Nakanbé", thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, (2013) 246 p.
- [28] - NTEP, "Hydrodynamique et qualité des eaux dans le bassin versant de Mingoa à Yaoundé", Mémoire de DEA, Département des sciences de la terre à l'Université de Yaoundé I, (2008) 107 p.
- [29] - OLINGA, "Une menace permanente : les inondations. Répartition des zones inondables dans la ville de Douala", Travaux de terrain DEM Aster 2008, échantillonné à 15 m, (2011), [En ligne] <https://www.institut-numerique.org/i-une-menace-permanente-les-inondations-52cba085e06d8>
- [30] - A. CLAUDE, "sensibilité d'hydrosystèmes côtiers particuliers aux variations millénaires du niveau marin au Sénégal", mémoire de master II, sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, Parcours Hydrologie-Hydrogéologie, Université de Pierre et Marie Curie, Ecole des Mines de Paris, ENGREF, (2007) 54 p.
- [31] - A. F. BON, "Hydrodynamique d'un bassin versant en zone de socle cristallin fracturé et altéré : cas du bassin versant de l'Olézoa, Yaoundé-Cameroun", Mémoire de DEA. Université de Yaoundé I, (2008) 78 p.
- [32] - M. L. KONGANDEMBOU, "Caractérisation physique et hydrodynamique d'un aquifère a nappe libre en zone de socle cristallin fracturé et altéré cas du Bassin Versant expérimentale du Mengond au sud Cameroun", Mémoire de master présenté au département de science de la terre, (2015) 87 p.
- [33] - A. HATIRA, L. BACCAR et T. GALLALI, "Analyse de sensibilité du système oasien et mesures de sauvegarde de l'oasis de Métouia (Tunisie)", *Revue des sciences de l'eau*, (2007) 59 - 69 p.
- [34] - G. DORE, J. P. BILODEAUX, T. MASSECK, F. P. DROLET, "Impact des changements climatiques sur les chaussées des réseaux routiers Québécois", Département de génie civil et génie des eaux, Université Laval, (2014) 9 p.
- [35] - S. LO, M. NDIAYE, "Elaboration des dégradations des chaussées au Sénégal", projet de fin d'études, Ecole nationale supérieure de Polytechnique de Thiès, Université de Cheikh Anta Diop de Dakar, (2009) 125 p.
- [36] - J. T. HOUGHTON, DING, Y. GRIGGS, D. J. NOGUER, M. VAN DER LINDEN, P. J. DA, X. MASKELL, K. and C. A. JOHNSON, "Climate change 2001 : the scientific basis; contribution of Working " editors, (2001)
- [37] - R. CHAUMONT, D. BROWN, "Analyse de simulations régionales du climat et d'indices climatiques associés au transport routier dans le Sud du Québec", *Revue Routes-Road*, premier trimestre, N° 345 (2010) 78 - 83 p.