

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	xi
ACRONYMES ET ABREVIATIONS	xii
Résumé	1
INTRODUCTION	2
CHAPITRE I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	3
I.1. Cadre physique	3
I.1.1. Situation géographique	3
I.1.2. Situation Socio-économique	3
I.1.3. Evolution démographique	4
I.2. Cadre climatique	4
I.2.1. La pluviométrie	5
I.2.2. Température	6
I.3.4. L'évaporation	8
I.3.5. L'insolation	9
I.3.6. Vitesse des vents	9
I.3. Cadre géologique	11
I.3.1 La Stratigraphie des formations de la presqu'île du Cap-Vert	11
I.3.2. La Tectonique	17
I.4. Cadre hydrogéologique	18
I.4.1. L'aquifère des sables infrabasaltique	19
I.4.1.1. Géométrie de l'aquifère	20
I.4.1.2. Les paramètres hydrodynamiques	24

I.4.1.3 Historique de l'exploitation de la nappe infrabasaltique	25
I.4.2. La nappe de Thiaroye	27
Conclusion partielle	27
CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES	28
II.1. Matériels	28
II.1.1. Les données climatiques.....	28
II.1.2. Les données de prélèvements	28
II.1.3. Les données piézométriques.....	28
II.1.4. Les données chimiques.....	29
II.2. Méthodes.....	30
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	31
III.1. PIEZOMETRIE DE LA NAPPE.....	31
III.1.1. Evolution inter annuelle de la piézométrie	31
III.1.1.1. Morphologie de la nappe entre 1995 ; 2009 et 2019	31
III.1.1.2. Evolution de la piézométrie entre 1985 et 1995	34
III.1.1.3. Evolution de la piézométrie de la nappe infrabasaltique entre 2000 et 2020	37
III.1.2. Evolution mensuelle de la piézométrie	40
III.2. Caractérisation hydro chimique de la nappe infra basaltique	44
III.2.1. Les paramètres physico-chimiques	44
III.2.1.1. La température	44
III.2.1.2. Le pH	44
III.2.1.3. La Conductivité électrique	45
III.2.1.3.1. Variation spatiale de la conductivité électrique	45
III.2.1.3.2. Evolution temporelle de la conductivité électrique.....	46
III.2.2. Evolution de la salinité de la nappe en rapport avec les prélèvements	55
III.2.2.1. Variation spatiale des teneurs en chlorures.....	55
III.2.2.2. Evolution temporelle des teneurs en chlorures	56

III.2.3. Evolution et distribution spatiale des teneurs en nitrates	64
III.2.3.2. Evolution des teneurs en nitrates	65
III.2.4. Variation spatiale des autres éléments chimiques.....	70
III.2.5. Faciès chimiques des eaux de la nappe.....	75
III.2.6. Impact des pompages sur la chimie des eaux de la nappe.....	77
III.2.6.1. Box plot des ions majeurs	77
III.2.6.2. Matrice de corrélation des éléments chimiques	78
III.2.6.3. Diagrammes binaires	79
Conclusion partielle	82
CONLUSION ET RECOMMANDATIONS	83
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	85
ANNEXES	91

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude	3
Figure 2 : Variation inter-annuelle de la pluviométrie à la Station de Dakar-Yoff (1989-2019).....	5
Figure 3 : Pluviométrie moyenne mensuelle à la station de Dakar-Yoff (1989-2019).....	6
Figure 4 : Température moyenne mensuelle maximale et minimale à la station de Dakar-Yoff (1989-2019).....	7
Figure 5 : Variation de la moyenne mensuelle de l'humidité relative à la station de Dakar-Yoff (1989-2019)	8
Figure 6: Evaporation moyenne mensuelle en dixième de mm à la station de Dakar-Yoff (1989-2019).....	8
Figure 7 : Variation de l'insolation moyenne mensuelle à la station de Dakar-Yoff (1989-2019).....	9
Figure 8 : Vitesse moyenne mensuelle des vents à la station de Dakar-Yoff (1989-2019)	10
Figure 9 : Carte géologique de la presqu'île du Cap Vert (Hébrard, 1966)	13
Figure 10 : Coupe synthétique du quaternaire ancien de la tête de la presqu'île de Dakar (Gaye, 1980).....	15
Figure 11 : Cadre structural de la presqu'île du cap vert (MH/OMS, 1972)	17
Figure 12 : Les grandes unités hydrogéologiques de la presqu'île du cap vert (Sarr, 2000 ; in Diouf 2012)	18
Figure 13: Coupe géologique E-O de la presqu'île du Cap-Vert (DGPRE, 2009)	19
Figure 14 : Coupe géologique NW-SE de la presqu'île de Dakar (DGPRE, 2009).....	20
Figure 15 : Carte du toit de la nappe infrabasaltique (OMS, 1972 Modifié ; in Diouf 2012).21	21
Figure 16 : Carte du mur de la nappe infrabasaltique (OMS, 1972 Modifié ; in Diouf 2012).22	22
Figure 17: Corrélation lithologique N-S à travers la zone d'étude	23
Figure 18 : Corrélation lithologique W-E à travers la zone d'étude	23
Figure 19 : Evolution des prélèvements de la nappe infrabasaltique de 1985 à 2018	26
Figure 20: Carte piézométrique de la nappe infrabasaltique (Décembre 1995).....	32

Figure 21: Carte piézométrique de la nappe infrabasaltique (Juin 2009).....	33
Figure 22: Carte piézométrique de la nappe infrabasaltique au mois Décembre 2019	33
Figure 23: Evolution de la piézométrie de 1985 à 1995 au niveau de Bad 2H et Bad 2B	35
Figure 24: Evolution de la piézométrie de 1985 à 1995 au niveau de Bad 3H et Bad 3B	35
Figure 25: Evolution de la piézométrie de 1985 à 1995 au niveau des piézomètres de Bad 4H et Bad 4B	36
Figure 26: Evolution de la piézométrie de 1985 à 1995 au niveau des piézomètres Bad 5H ..	36
et Km 5	36
Figure 27: Evolution de la piézométrie entre 2000 et 2010 au niveau de quelques ouvrages situés sur la côte Ouest	38
Figure 28: Evolution de la piézométrie entre 2000 et 2010 au niveau de quelques ouvrages situés au Nord de la presqu'île	38
Figure 30: Evolution de la piézométrie dans quelques piézomètres (Aéroport Yoff Bad P4 bas bis ; Dakar Mamelles Bad P2 bas bis ; Dakar Mamelles Bad P2 haut bis ; PIB2 et PIB3) de 2017 à 2020	40
Figure 31: Evolution de la piézométrie dans quelques piézomètres (Aéroport Yoff P1, Stade LSS P1, Cimetière Yoff P1, Km 5 et Hann P1) de 2019 à 2020.....	41
Figure 32: Evolution de la piézométrie dans quelques piézomètres (P2 Bas bis, P2 Haut bis et PIB2) de la côte Ouest entre 2017 et 2020.....	42
Figure 33: Evolution de la piézométrie des piézomètres de PIB3 et Aéroport Yoff BAD P4 Bas entre 2017 et 2020	43
Figure 34: Distribution spatiale de la conductivité électrique (Juin 2019)	46
Figure 35: Evolution de la conductivité électrique au niveau des forages Point M1 et Point M2 (2014 à 2019)	48
Figure 36: Evolution de la conductivité électrique du forage Terme Nord (2014 à 2019)	48
Figure 37: Evolution de la conductivité électrique au Terme sud 2 (2014 à 2019)	49
Figure 38: Evolution de la conductivité électrique au Point G1 (2014 à 2019).....	49
Figure 39: Evolution de la conductivité électrique au Camp Pénal (2014 à 2019).....	50
Figure 40: Evolution de la conductivité électrique au Fort A (2014 à 2019).....	50

Figure 41: Evolution de la conductivité électrique au Front de Terre (2014 à 2019)	51
Figure 42: Evolution de la conductivité électrique au niveau des ouvrages Ouest Foire, F1 Nord Foire, F2 Nord Foire et HLM Grand Yoff (2017 à 2019).....	51
Figure 43: Evolution de la conductivité électrique au niveau des ouvrages Terme Sud 3, Camp Leclerc 2 et Point G2 (2017 à 2019)	52
Figure 44: Evolution de la conductivité électrique au niveau des piézomètres Km5, PIB2, P-2H et P-2B (2000 à 2010)	53
Figure 45: Evolution de la conductivité électrique au niveau des piézomètres Km5, PIB2, Dakar Mamelle BAD P2 bas bis et de Dakar Mamelle BAD P2 haut bis (2017 à 2019).....	54
Figure 46: Evolution de la conductivité électrique de 2000 à 2020 au niveau du piézomètre de Parc Hann	54
Figure 47: Distribution spatiale des teneurs en chlorures (Juin 2019).....	55
Figure 48: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des ouvrages Point M1, Point M2, Terme Nord et Camp Pénal (1978 à 2019)	57
Figure 49: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des ouvrages Terme sud 2, Fort A, Front de Terre et Point G1 (1978 et 2019)	58
Figure 50: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des ouvrages Terme sud 3, Cité Tobago, Camp Leclerc 1, Camp Leclerc 2 et Point G2 (2015 et 2019).....	58
Figure 51: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des ouvrages F1 Nord Foire, F2 Nord Foire, Ouest Foire, Point M3 et HLM Grand Yoff (2015 et 2019).....	59
Figure 52: Evolution des teneurs en chlorures au niveau du forage Camp Pénal (1978 à 2019)	60
Figure 53: Evolution des teneurs en chlorures au niveau du forage Terme Sud (1978 à 2019)	60
Figure 54: Evolution des teneurs en chlorures au niveau du forage Point M1 (1978 à 2019).....	61
Figure 55: Evolution des teneurs en chlorures au niveau du forage Camp Leclerc (2015 à 2019).....	61
Figure 56: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des piézomètres P2 bas et P2 haut (1978 à 2019)	63

Figure 57: Evolution des teneurs en chlorures au niveau du piézomètre PIB1 (2000 à 2019)	63
Figure 58: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des piézomètres PIB2 et PIB3 (2000 à 2019).....	64
Figure 59: Distribution spatiale des teneurs en nitrates (Juin 2019).....	65
Figure 60: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Camp pénal et Front Terre (2014 – 2019).....	66
Figure 61: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Terme sud 2 et Terme sud 3 (2014 – 2019)	66
Figure 62: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Terme Nord, Fort A et Cité Tbago (2014 – 2019)	67
Figure 63: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Point M1, Point M2 et Point G2 (2014 – 2019).....	67
Figure 64: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Camp Leclerc F1 et Camp Leclerc F2 (2014 – 2019)	67
Figure 65: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Nord Foire F1, HLM Grand Yoff et Ouest Foire (2014 – 2019)	68
Figure 66: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Aéroport Yoff BAD P4 Bas et Parcelles Assainies PIB3 (Janvier 2017-Mars 2019)	68
Figure 67: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Ouakam PIB2 et Camp Leclerc F1 (Janvier 2017-Mars 2019)	68
Figure 67: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages F1 Nord Foire et F1 Ouest Foire (Janvier 2017-Mars 2019)	69
Figure 68: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Point M3 et Point M Bis (Janvier 2017-Mars 2019)	69
Figure 69: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages P-2B et P-2H (Janvier 2017-Mars 2019)	69
Figure 70: Distribution spatiale des teneurs en sodium (Juin 2019)	72
Figure 71: Distribution spatiale des teneurs en calcium (Juin 2019)	72
Figure 72: Distribution spatiale des teneurs en magnésium (Juin 2019)	73
Figure 73: Distribution spatiale des teneurs en potassium (Juin 2019).....	73

Figure 74: Distribution spatiale des teneurs en bicarbonates (Juin 2019).....	74
Figure 75: Distribution spatiale des teneurs en sulfates (Juin 2019).....	74
Figure 76: Diagramme de Piper des eaux de la nappe infrabasaltique (Juin 2019)	75
Figure 77: Box plot des ions majeurs.....	78
Figure 78 : Relation entre Na^+ et Cl^- des eaux de nappe	80
Figure 79 : Relation entre NO_3^- et Cl^- des eaux de nappe	81
Figure 80 : Diagramme binaire du ratio molaire Na/Cl en fonction de Cl des eaux de nappe	81
Figure 81 : Diagramme binaire du ratio molaire Cl/HCO_3^- en fonction de Cl	82

Liste des tableaux

Tableau 1: Les nouveaux forages captant la nappe infrabasaltique et leurs caractéristiques....	26
Tableau 2: Récapitulatif des données physico-chimique et chimique de la nappe infrabasaltique.....	29
Tableau 3: Statistique descriptive des valeurs de température de la nappe infra basaltique	44
Tableau 4: Statistique descriptive des valeurs de pH de la nappe infra basaltique	45
Tableau 5 : Matrice de corrélation des éléments chimiques	78

ACRONYMES ET ABREVIATIONS

AEP : Alimentation en eau potable

SONES : Société Nationale des Eaux du Sénégal

PDU : Plan directeur d'urbanisme

ANACIM : Agence National de l'Aviation civil et de la Météorologie

DGPRE : Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

CE : Conductivité électrique

Résumé

La nappe infrabasaltique est située dans une zone côtière, à l'extrême Ouest de la presqu'île du Cap-Vert. Cet aquifère est largement en communication avec l'océan Atlantique qui constitue ses limites Ouest, Nord et Sud ce qui la rend vulnérable à l'intrusion saline. Il s'étend sur une superficie d'environ 63 Km^2 et représente une ressource primordiale pour la ville de Dakar. Ce système est soumis à des pompages intensifs pour contribuer à la satisfaction de la demande en eau sans cesse croissante de la ville de Dakar. Ainsi, La production de la nappe passe de $17\ 817 \text{ m}^3/\text{j}$ en 2014 à $42489 \text{ m}^3/\text{j}$ en 2019. Cette production actuelle a largement dépassé le débit d'équilibre supposé de la nappe infra basaltique qui est de $18000 \text{ m}^3/\text{j}$.

Cette présente étude vise à déterminer l'impact de l'augmentation des prélèvements sur la piézométrie et de suivre l'évolution spatio-temporelle de la minéralisation des eaux pour une gestion durable de la ressource.

L'évolution de la piézométrie de la nappe montre une baisse généralisée des niveaux piézométriques causée par le pompage excessif des forages. Cette baisse est faible dans la partie Nord, forte dans le secteur Ouest. Au niveau des ouvrages P1 Aéroport Yoff ; P1 Stade LSS ; P1 Cimetière Yoff et Parc Hann, le niveau piézométrique est très marqué par les variations saisonnières.

Les caractéristiques physico-chimiques révèlent que les eaux sont majoritairement acides à neutres et une minéralisation moyenne à forte s'observe au niveau des secteurs de Hann, Ouakam et de Yoff. Les eaux de la nappe sont caractérisées par deux types de faciès chimiques : faciès chloruré calcique et magnésien (70%) et faciès chloruré sodique et potassique (30%). L'interprétation des résultats a montré que l'intrusion marine joue un rôle important dans la minéralisation des eaux de la nappe.

Mots-clés : Nappe infrabasaltique, pompage intensif, piézométrie, minéralisation, intrusion marine.

INTRODUCTION

La zone d'étude, avec une superficie d'environ 63 Km², est située au niveau de la tête de la presqu'île du Cap-Vert de Dakar. Elle abrite la nappe infrabasaltique qui contribue à l'alimentation en eau potable de Dakar à travers un réseau de 21 forages. La nappe est constituée de sables quaternaires et son toit est formé par les coulées basaltiques qui la rendent captive.

Dakar, capitale administratif et économique du Sénégal, abrite une bonne partie de la population du pays ainsi que l'essentiel des industries. Une partie de l'Approvisionnement en eau potable (à hauteur de 4%) est assurée par la nappe infrabasaltique.

Dakar connaît depuis ces dernières années un déficit d'accès à l'eau potable. Pour pallier à ce déficit, la SONES a initié depuis 2015 des programmes d'urgence consistant à l'exécution de nouveaux forages.

L'exploitation intensive au niveau de certains ouvrages captant la nappe infrabasaltique peut provoquer une dégradation de la qualité pouvant ainsi aboutir à l'abandon de certains forages. Ainsi un contrôle doit être mis en place afin de prévenir les risques d'intrusions et préserver la qualité de la nappe.

C'est dans ce contexte que le sujet intitulé « Impact des prélèvements sur le comportement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe infrabasaltique de Dakar » nous a été proposé par la SONES.

L'objectif de ce mémoire est de comprendre le comportement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe infrabasaltique dans un contexte de forte exploitation. Les objectifs spécifiques consistent à déterminer l'impact de l'augmentation des prélèvements sur la piézométrie et de suivre l'évolution spatio-temporelle de la salinisation de la nappe.

Ce présent mémoire est structuré en trois chapitres.

Dans le premier chapitre nous présentons la zone d'étude dans son contexte physique, climatologique, géologique et hydrogéologique.

Le deuxième chapitre présente les matériels et les méthodes utilisés pour réaliser cette étude. Il décrit les types de données nécessaires, leur acquisition, la démarche méthodologique et à la présentation des différents outils utilisés pour atteindre les objectifs visés.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus. Cette partie étudie l'évolution quantitative et qualitative de la nappe infrabasaltique.

Pour terminer une conclusion générale de ce travail ainsi que quelques recommandations sont dégagées.

CHAPITRE I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Cadre physique

I.1.1. Situation géographique

La presqu'île du Cap-Vert, constitue la partie la plus occidentale du continent africain. Elle est située à l'extrême ouest du Sénégal entre les longitudes 17°25' et 17°30' W et les latitudes 14°40' et 14°45' N.

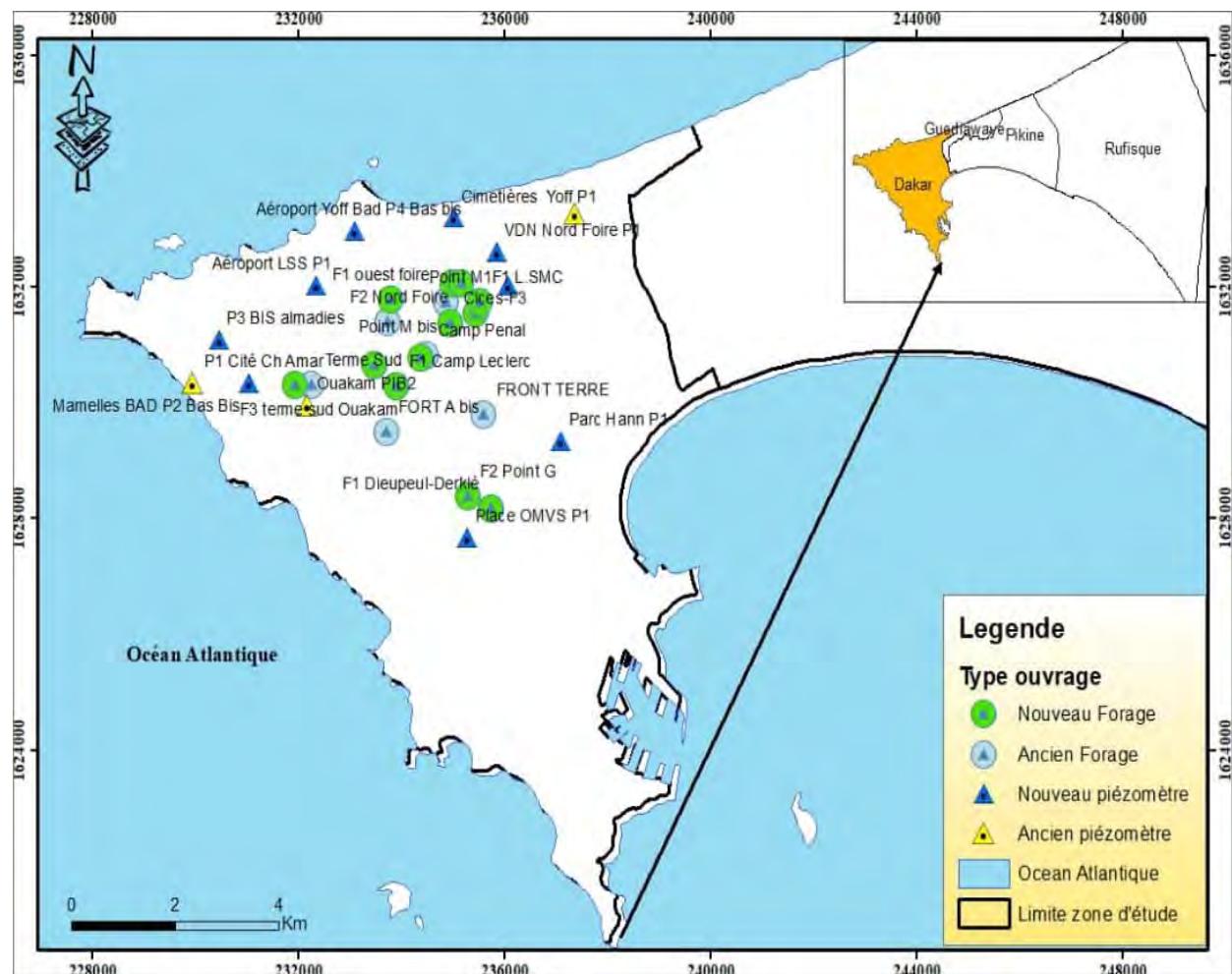


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

I.1.2. Situation Socio-économique

La région de Dakar occupe une place importante dans l'économie du Sénégal. Une situation géographique particulière, des installations portuaires et aéroportuaires et un réseau de communication très dense, ont fait de la région une ville de convergence politique, économique et culturelle. Elle détient 55% du PIB avec 83% des entreprises modernes et concentre aussi 94% des entreprises nationales soit en 2000, environ 1196 entreprises des 1272 que comptait le pays (PDU, 2003).

I.1.3. Evolution démographique

La région de Dakar occupe une place importante dans l'économie sénégalaise. Sa population ne cesse de s'accroître du fait de nombreuses activités socio-économiques qui s'y déroulent. L'augmentation de la population dakaroise est favorisée par le développement industriel qu'a connu la région et par l'exode rural du à la sécheresse des années 1970. La population de la ville qui était de 132 000 habitants en 1946 est passée à 214 000 habitants en 1955. L'accroissement démographique s'est poursuivi et la population atteint 374 000 habitants en 1961 ; 583 000 habitants en 1971 ; 650 000 habitants en 1972 ; 799 000 habitants en 1976 et 1 488 941 habitants en 1988. En 2006, elle atteint 2 496 244 habitants. D'après le recensement de 2013, la population de la région de Dakar est de 2956023 habitants. La projection du PDU estime que la région aura plus de 5 millions d'habitants en 2025. (PDU, 2003)

Cette population est inégalement répartie. La population est plus concentrée dans le département de Dakar avec une population de 1 001 468 habitants (PDU, 2003).

Cette croissance démographique et l'industrialisme rapide ont occasionné une forte demande en eau.

I.2. Cadre climatique

La position avancée de Dakar dans l'Atlantique lui confère un microclimat particulier. Celui-ci est fortement influencé par les alizés maritimes (de Novembre à Juin) et la mousson (de Juillet à Octobre) suivant les directions N-NW et S-SE (Le Borgne, 1988 ; Olivry, 1989). Ce microclimat bien individualisé est caractérisé par une longue saison sèche de Novembre à Mai, relativement fraîche, et une courte saison des pluies, humide et chaude de Juin à Octobre.

Les données climatiques portant sur la pluviométrie, la température, l'humidité relative, l'insolation et la vitesse des vents ont été recueillies à l'Agence National de l'Aviation Civil et de la Météorologie (ANACIM) et concernent la Station de Dakar-Yoff pour la période 1989-2019.

I.2.1. La pluviométrie

La variabilité interannuelle de la pluviométrie est très importante. Les quantités de pluies enregistrées annuellement varient en moyenne entre 161mm (en 2014) à 663mm (en 2005).

L'évolution de la pluviométrie inter-annuelle de 1989 à 2019 au niveau de la station de Dakar-Yoff montre un cumul moyen de 401 mm. La dynamique de la fluctuation de la pluviométrie par rapport à la moyenne met en évidence une forte variabilité inter-annuelle avec des années excédentaires (1989, 1995, 1996, 1999, 2000, 2005, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013, 2015 et 2019) et déficitaires (1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1997, 1998, 2001, 2002, 2003, 2004, 2007, 2011, 2014, 2017 et 2018). (Figure 2)

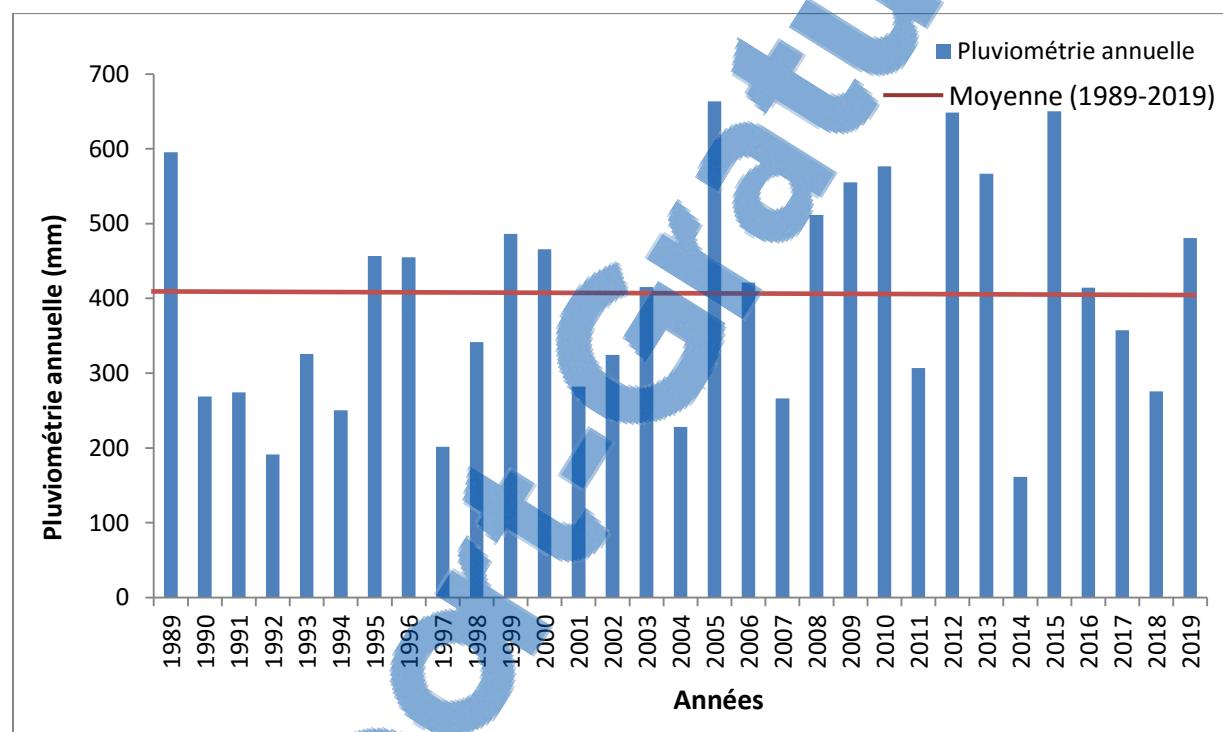


Figure 2 : Variation inter-annuelle de la pluviométrie à la Station de Dakar-Yoff (1989-2019)

La pluviométrie moyenne mensuelle enregistrée à la station de Dakar Yoff sur la période de 1989-2019 (figure 3) indique que la presque totalité des précipitations est concentrée sur deux mois (Août et Septembre) avec un maximum au mois d'Août (179mm) qui est le mois le plus pluvieux.

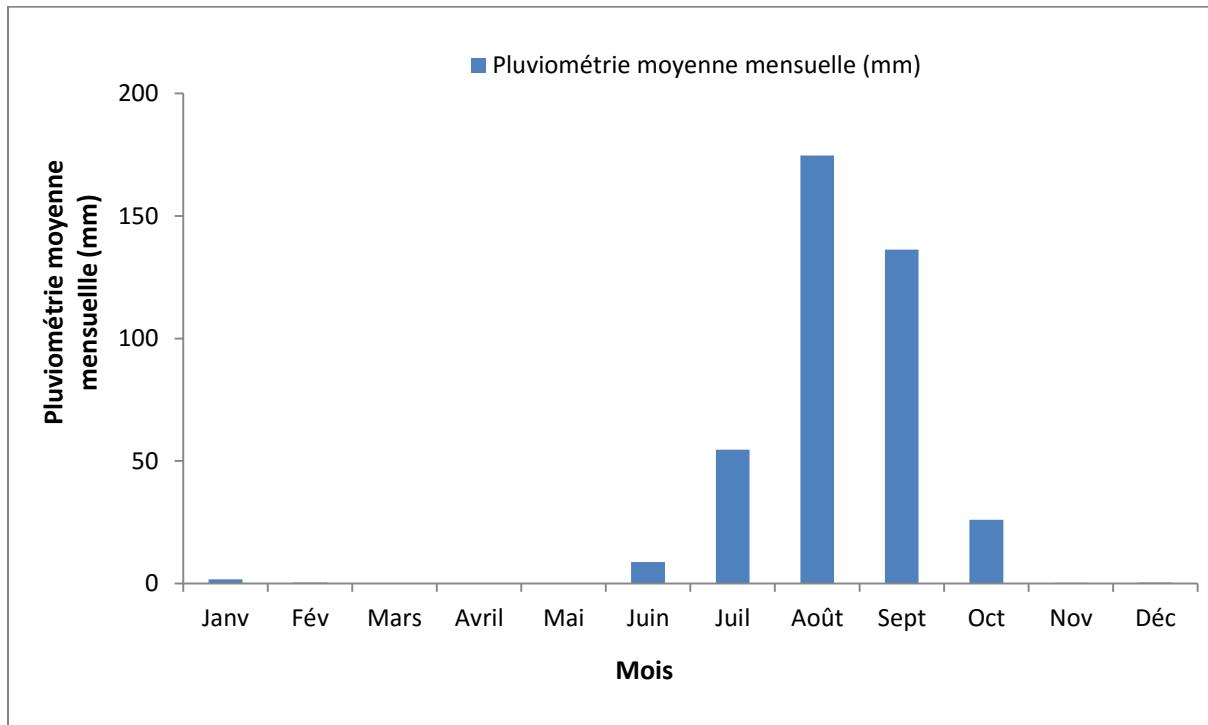


Figure 3 : Pluviométrie moyenne mensuelle à la station de Dakar-Yoff (1989-2019)

I.2.2. Température

Les données de température moyennes mensuelles subdivisent l'année en une saison fraîche et une saison chaude.

Les températures moyennes mensuelles maximales les plus élevées se situent entre 28.7 et 31.2 °C et se rencontrent durant la saison des pluies (de Juillet à Octobre) qui correspond à la période, la plus chaude. Le pic observé au mois d'octobre correspond à la fin de la saison des pluies (Figure 4). Les températures les plus basses sont rencontrées durant la saison sèche (Novembre à Mai) avec des valeurs oscillantes entre 24 et 27.6 °C.

Les températures moyennes mensuelles minimales sont inférieures à 26°C. Les moyennes minimales de températures les plus élevées sont observées durant la saison des pluies et les plus basses sont rencontrées durant la saison sèche.

Les amplitudes entre les températures moyennes mensuelles minimales et maximales varient de 5 à 7.1 °C.

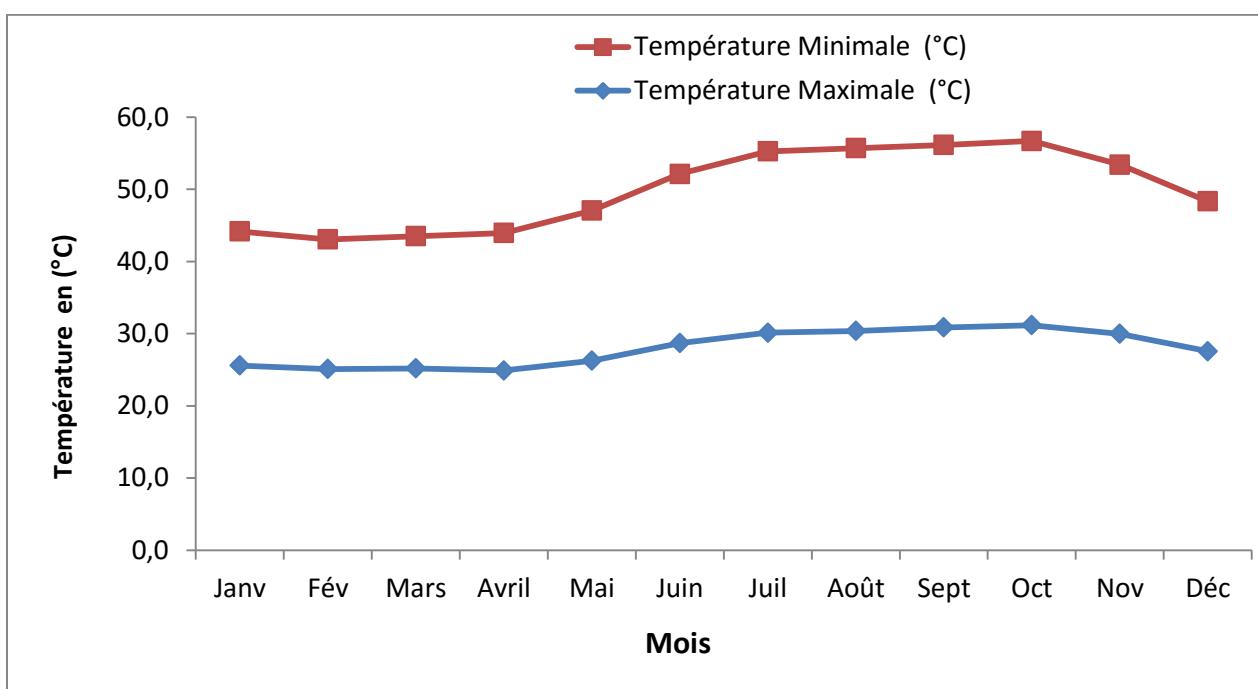


Figure 4 : Température moyenne mensuelle maximale et minimale à la station de Dakar-Yoff (1989-2019)

I.3.3. L'humidité relative

L'humidité relative peut être définie comme le rapport de la pression effective de la vapeur d'eau à la pression maximale. La répartition de l'humidité relative dépend de la température de l'air mais également de l'influence de l'alizé maritime et de la mousson.

La variation de l'humidité relative à la station de Dakar-Yoff entre 1989-2019 (Figure 5) montre que les valeurs les plus élevées de l'humidité relative maximale sont enregistrées durant les mois de Mai, Aout et Septembre correspondant à la saison des pluies avec un maximum au mois de Septembre (93%). On observe la valeur minimale (46%) au mois de Janvier. L'occurrence des pluies en Août et Septembre pourrait expliquer le maximum d'humidité relative enregistré durant ces mois avec des valeurs supérieures à 90%. Par contre, le minimum de Janvier et de Février s'expliquerait par la présence de vents peu chargés en humidité.

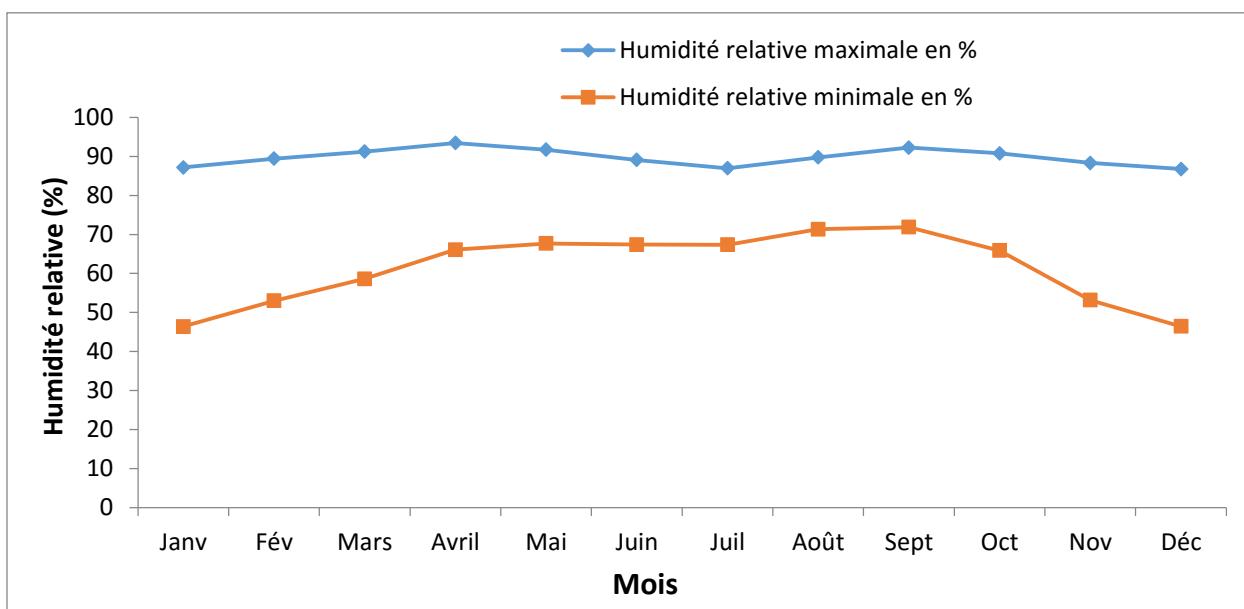


Figure 5 : Variation de la moyenne mensuelle de l'humidité relative à la station de Dakar-Yoff (1989-2019)

I.3.4. L'évaporation

L'évaporation est mesurée à l'aide d'un évaporomètre Piche. C'est un paramètre souvent utilisé dans l'estimation de la recharge et dans le calcul des bilans hydriques. Les valeurs d'évaporation sont inversement proportionnelles à celles de l'humidité relative. La moyenne d'évaporation est de 2.7 mm/j. Elle est plus prononcée en saison sèche qu'en saison de pluie. Les plus faibles valeurs sont enregistrées pendant l'hivernage (pendant les mois d'août et septembre) alors que les plus fortes valeurs sont observées pendant les mois de Novembre, Décembre et Janvier avec une valeur maximale de 3.7 mm/j. (Figure 6)

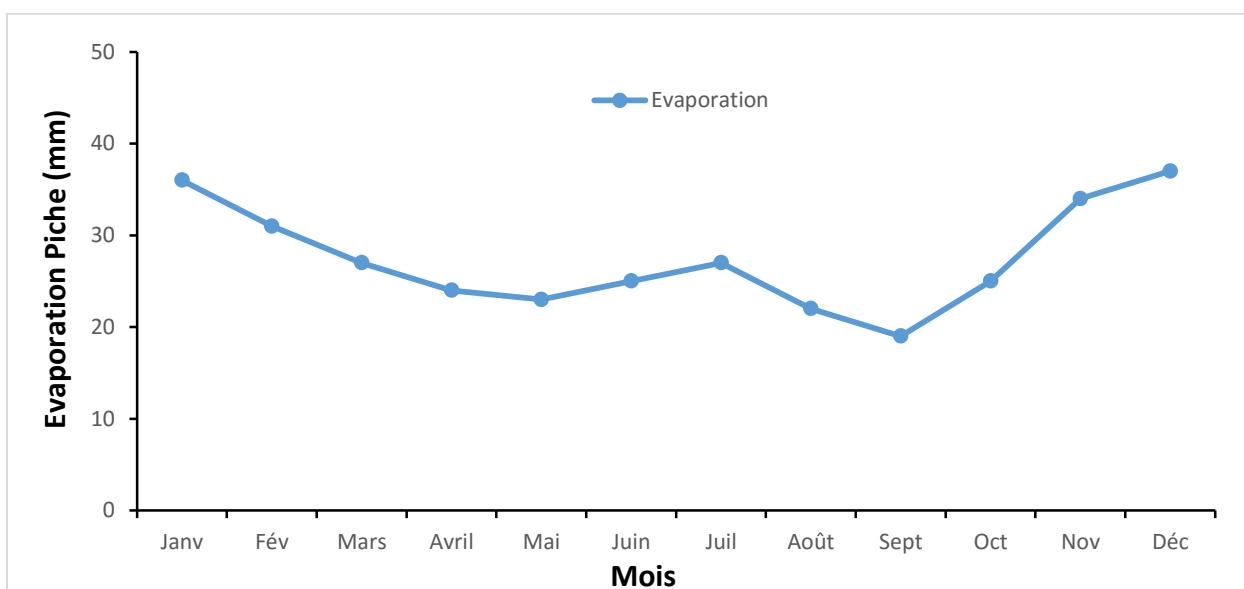


Figure 6: Evaporation moyenne mensuelle en dixième de mm à la station de Dakar-Yoff (1989-2019)

I.3.5. L'insolation

L'insolation est souvent utilisée pour l'estimation de l'évapotranspiration. C'est un paramètre qui dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels, la nébulosité, la poussière, la précipitation et de la durée du jour et de la nuit.

Les valeurs les plus élevées d'insolation au niveau de la station de Dakar-Yoff entre 1989-2019 sont enregistrées au mois de Mars, Avril et Mai avec une valeur maximale de 9.2 h/j (Avril). Les plus faibles valeurs (comprises entre 6.9 et 7.1 h/j) sont observées pendant la saison des pluies entre les mois de Juillet, Août et Septembre et aux mois de Décembre et Janvier (Figure 7).

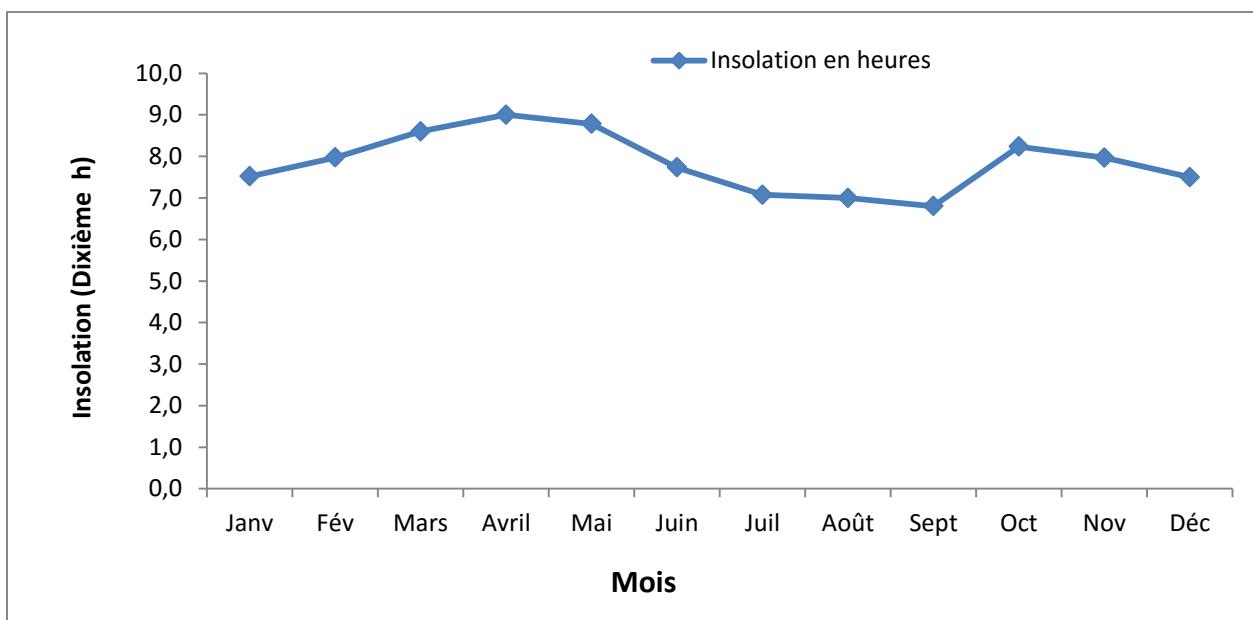


Figure 7 : Variation de l'insolation moyenne mensuelle à la station de Dakar-Yoff (1989- 2019)

I.3.6. Vitesse des vents

Les valeurs moyennes mensuelles de vitesse des vents les plus élevées sont observées au mois d'Avril avec une valeur de 5.6 m/s. Les valeurs les plus faibles sont rencontrées au mois d'Août, Septembre et Octobre avec un minima de 3.2 m/s (Septembre) (Figure 8).

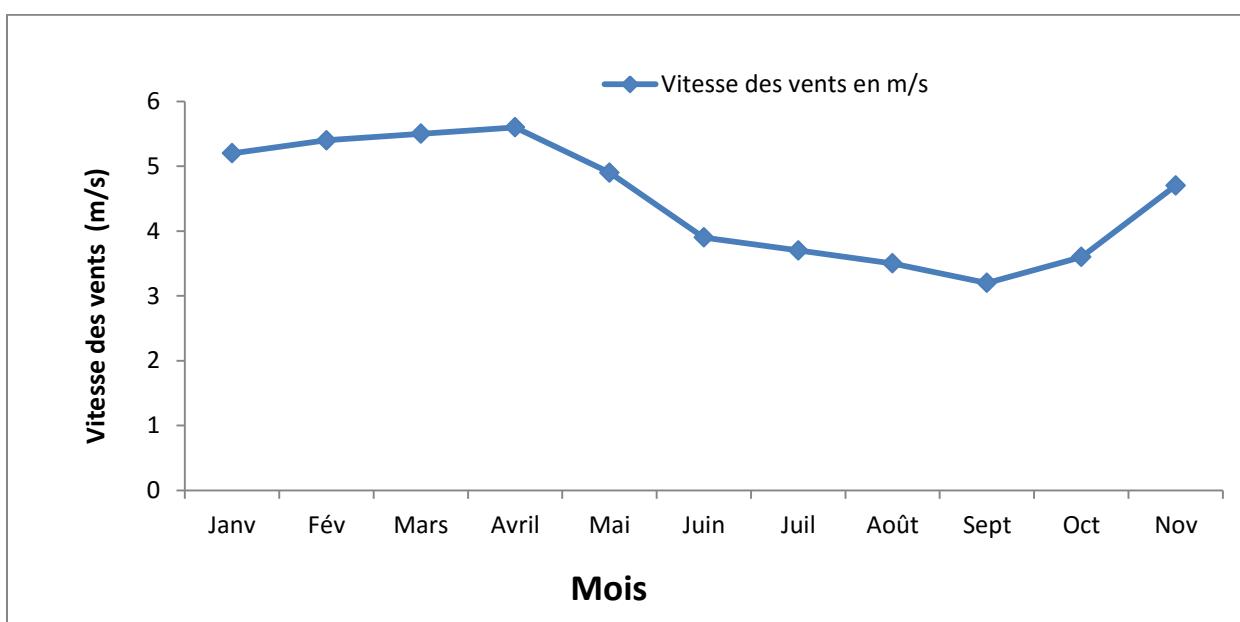


Figure 8 : Vitesse moyenne mensuelle des vents à la station de Dakar-Yoff (1989-2019)

La direction des vents est variable et dépend fortement des différences de pression et des variations de la température. Ces vents présentent généralement des directions N-NE, N-NW et N-NNW.

I. 3. Cadre géologique

Le bassin sénégalo-mauritanien, qui est un des plus grands bassins sédimentaires atlantiques, s'étend sur 500 000 Km². La zone d'étude correspond à sa partie la plus occidentale. Dans cette partie du bassin, la subdivision litho-stratigraphique est connue grâce aux observations des affleurements le long de la côte et les données fournies par les nombreux forages d'exploitation d'eaux et pétroliers.

Cette synthèse est tirée des travaux antérieurs réalisés par Martin (1970) ; Grévolet et Gaye (1979) ; Gaye (1983) ; Sarr (2000) ; Diouf (2005)

Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons aux formations du tertiaire qui constituent le substratum de la nappe et à celle du quaternaire qui forment l'aquifère.

I.3.1 La Stratigraphie des formations de la presqu'île du Cap-Vert

❖ Les formations du tertiaire

Les formations d'âge tertiaire affleurent largement dans la partie sud de la tête de la presqu'île, elles ont également été rencontrées dans les sondages pétroliers. Le tertiaire est caractérisé par des formations argileuses et marneuses.

On peut distinguer les formations suivantes :

- **Le paléocène inférieur**

Le paléocène inférieur est constitué par des marnes argileuses, des marnes calcaires et des argiles. Il affleure sur la côte Est dans l'anse des Madeleines et dans la zone comprise entre le Palais de la république et la plage des enfants. Cet ensemble, d'une dizaine de mètres d'épaisseurs à l'affleurement, peut dépasser 200 mètres dans les sondages (Castelain et al. 1965)

- **L'Eocène inférieur (Yprésien)**

L'éocène inférieur est marqué par une transgression et se manifeste par des dépôts marneux ou argileux qui correspondent aux affleurements des limons de l'hôpital (argiles silicifiées) à la base et les argiles de la prison (attapulgites) au sommet (Martin.1970).

- **L'Eocène moyen**

L'éocène moyen forme le talus de la plage Bernard. Il affleure à Dakar dans les marnes de la poudrière et les marno-calcaires de la plage de l'Anse Bernard. Les marnes de la poudrière sont recouvertes par les marno-calcaires de la plage de l'Anse Bernard (Gaye, 1986). Le sommet de l'éocène moyen (bartonien) est connu uniquement en sondage et correspond à la base des argiles de Yoff (Castelain et al. 1965). (Figure 9)

- **L'éocène supérieur**

L'éocène supérieur n'affleure nul part dans la tête de la presqu'île. Il a été rencontré dans le sondage DK2 à Yoff, où il est représenté par un niveau argileux beige ou argiles de Yoff, épais de 100m (Bellion, 1987). L'absence de formation d'âge éocène supérieur sur la majeure partie de la tête de la presqu'île indique que la mise en place du horst de Dakar s'est effectuée à cette époque.

- **L'oligo-miocène**

A Dakar, l'oligocène n'est connu qu'à travers les calcaires à lépidocyclines emballés dans des tufs volcaniques. Une transgression oligocène semble être à l'origine du dépôt de ces calcaires à lépidocyclines (Castelain et al. 1965).

Le miocène correspond à une période d'altération et d'érosion continentale qui s'accompagnent d'une intense activité volcanique. C'est ce volcanisme intense qui a donné naissance aux tufs des Madeleines et à des coulées d'ankaratrite et de basanite, qui affleurent largement sur tout le littoral sud entre la pointe de Fann et le Cap-Manuel. Ces formations volcaniques sont recouvertes par une cuirasse latéritique qui marque la fin du Tertiaire et le début du Quaternaire (Tessier & Lappartient, 1967).

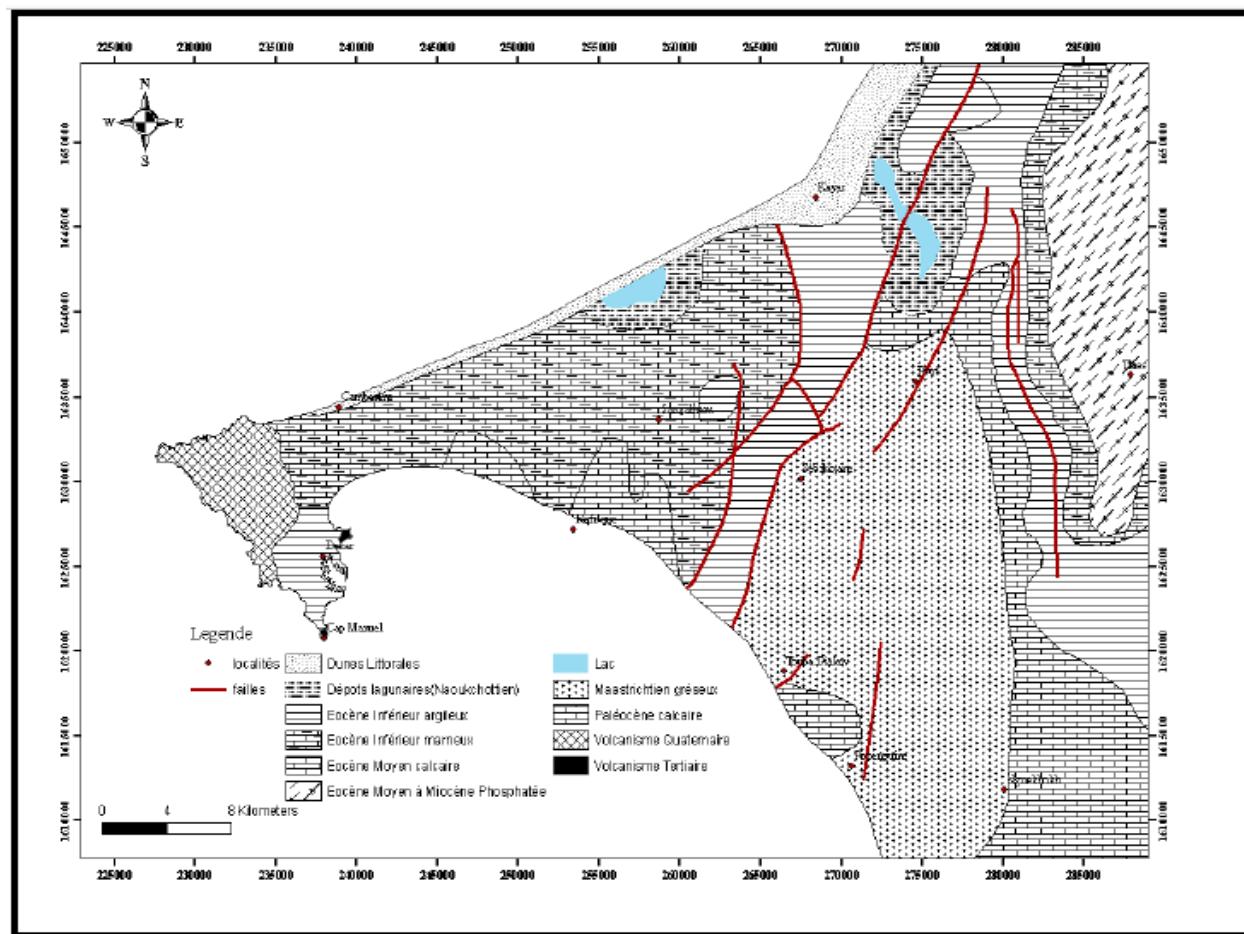


Figure 9 : Carte géologique de la presqu'île du Cap Vert (Hébrard, 1966)

❖ Les formations du Quaternaire

Nous distinguons un quaternaire ancien, essentiellement sableux marqué par le volcanisme des Mamelles et un quaternaire récent dominé par des pulsations climatiques et des fluctuations du niveau marin qui sont à l'origine des dépôts sableux et des plages rencontrées à Dakar (Crévola & Gaye, 1979).

Les faciès du quaternaire sont très variés. Dans la presqu'île du Cap vert, le quaternaire est rencontré sur la tête de la presqu'île où les dépôts sont fossilisés par les coulées volcaniques des Mamelles (sables infrabasaltiques). Au niveau du col de la presqu'île, les dépôts du quaternaire recouvrent ceux de l'éocène et constituent le système aquifère de Thiaroye.

• **Quaternaire ancien (Le Pléostocène)**

a) L'Inchirien (40.000 à 31.000 ans BP)

Il correspond à une élévation du niveau marin au-delà de l'actuelle ligne de rivage. Il est subdivisé en deux périodes : l'Inchirien inférieur (40 000 à 37 000 ans BP) et l'Inchirien supérieur (33 000 à 31 000 ans BP).

Il est constitué des formations sédimentaires suivantes (Hébrard et Elouard, 1976):

- **les sables infrabasaltiques** situés à la base des premières coulées du volcanisme des Mamelles sur le littoral entre Mermoz et Ouakam ;
- **les grès à ciment calcaire** datés de l'Inchirien supérieur sont rencontrés sur le littoral entre Yoff et Cambérène et reposent sur les basanites doléritiques du volcanisme des Mamelles ;
- **les grès de plage** datés d'environ 32.000 ans BP se retrouvent sur le littoral au Sud-Est de Bargny.

b) L'Acheuléen (30 000 ans BP)

Cette période correspond à une régression marine qui s'accompagne d'une accumulation d'alluvions graveleuses au niveau de Thiaroye et au col de la presqu'île.

c) L'Ogolien (20 000 à 10 000 ans BP)

Le Pléistocène se termine par une période aride qui voit se mettre en place un environnement essentiellement continental, durant l'Ogolien (20 000 à 15 000 B.P.).

L'Ogolien correspond à la régression maximale post inchirienne où le niveau marin a atteint la côte -120 m par rapport au niveau actuel (Elouard et Hébrard, 1977). Il a donné naissance sous un climat aride à l'erg de dunes rouges (erg de Pikine) qui va réunir la tête de la presqu'île au continent, et se prolonge le long du littoral nord.

L'étude des sondages montre qu'au niveau de la tête de la presqu'île, le quaternaire ancien est constitué par une alternance de formations sédimentaires et volcaniques.

D'après leur position stratigraphique et leurs caractères lithologiques, quatre ensembles sableux et trois ensembles volcaniques sont disposés de bas en haut selon Gaye, 1980. (Figure 10)

- ensemble de sables de base ;
- ensemble volcanique inférieur ;
- ensemble des sables inférieurs ;
- ensemble volcanique moyen ;
- ensemble des sables moyens ;
- ensemble volcanique supérieur ;
- ensemble des sables supérieurs.

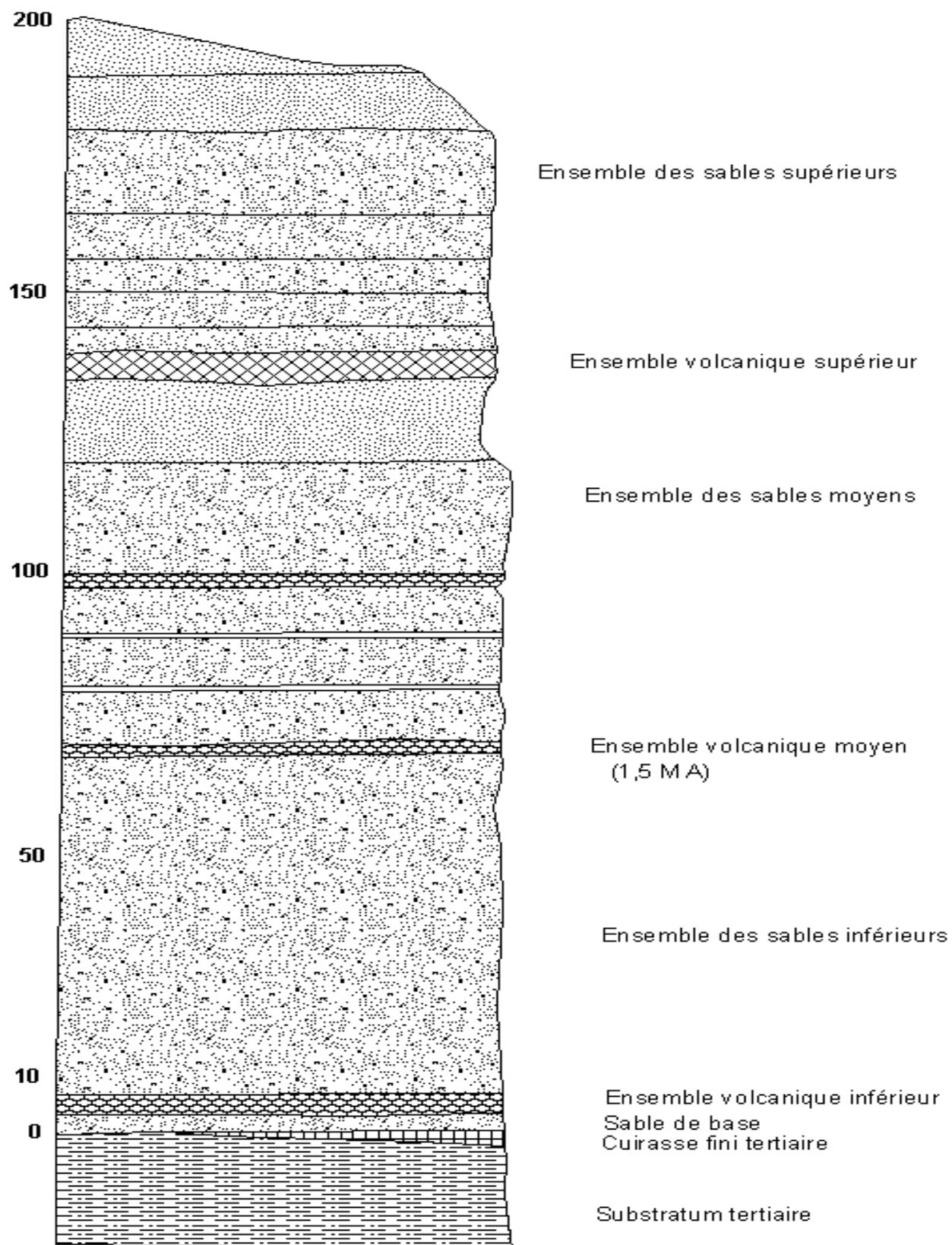


Figure 10 : Coupe synthétique du quaternaire ancien de la tête de la presqu'île de Dakar (Gaye, 1980)

- **Quaternaire récent (L'holocène)**

- a) Le Tchadien (9 000 à 8 000 ans BP)**

Vers cette époque, le climat redevient humide avec la remontée de la mer. Elle se traduit au Sénégal par des dépôts de vases d'embouchure de fleuve qui sont rencontrés actuellement en mer à la cote – 20 m (Hébrard et Elouard, 1976).

- b) Le Nouackchotien (6 800 à 4 200 ans BP)**

Il correspond à un épisode transgressif durant lequel le niveau de la mer a atteint la côte +2 m (Elouard et Hébrard, 1976). C'est une époque caractérisée par des dépôts de sables vaseux riches en coquilles (*Senilia senelis* essentiellement) qui occupent de vastes superficies (bras de mer de Pikine, les lacs Warouwaye, Youi, Mbeubeuss, lagunes de Thiaroye et de Mbao (Hébrard et Elouard, 1976).

- c) Le Tafolien (4 000 à 2 200 ans BP)**

Il correspond à un épisode régressif en climat aride où le niveau de la mer a atteint la côte -2 m (Elouard et Hébrard, 1976). Le Tafolien a donné naissance à des dunes constituées de sables fins orangés appelées « dunes jaunes » épaisses de 15 m. Ces dunes sont de direction N-NE et S-SE et constituent le cordon dunaire littoral de Cambérène qui s'étend sur une longueur d'environ 40 km entre Yoff et Kayar. Il s'élargit en allant vers le Sud. A Kayar, il ne mesure que quelques centaines de mètres de largeur mais atteint 2 km à Cambérène et se termine à Yoff en se plaquant sur les sables argileux et les roches volcaniques. Ces dunes sont essentiellement alimentées par les alizés maritimes. La zone du château d'eau de Cambérène représente le point culminant + 43 m (Elouard et Hébrard, 1976).

- d) Le Dakarien (3 000 ans BP)**

Cette période est caractérisée par la régularisation de la côte sénégalaise et la formation de longues plages sableuses rectilignes (Pointe des Almadies datée de 3 130 ans BP, Cap Manuel datée de 2 880 ans BP, Pointe de Fann datée de 1 910 ans BP). Le niveau de la mer est à la cote +2 m (Elouard et Hébrard, 1977).

I.3.2. La Tectonique

L'instabilité tectonique qui a été observée dans la région de Dakar particulièrement au niveau de la presqu'île du Cap-Vert serait liée à l'ouverture de l'océan Atlantique. Cette ouverture a occasionné la fracturation du substratum anté-oligocène et la manifestation du volcanisme tertiaire et du quaternaire ancien. Cette partie du bassin est affectée par deux directions principales de fracturations : les failles orientés NE-SW à NNE-SSW parallèle à la ride médio-atlantique et qui sont à l'origine de la formation des horsts de Ndiass et de Dakar, et du graben de Rufisque Sangalkam où les dépôts sont subsidents. Le massif de Diass est délimité par quatre grandes failles orientées NE-SW (Figure 11).

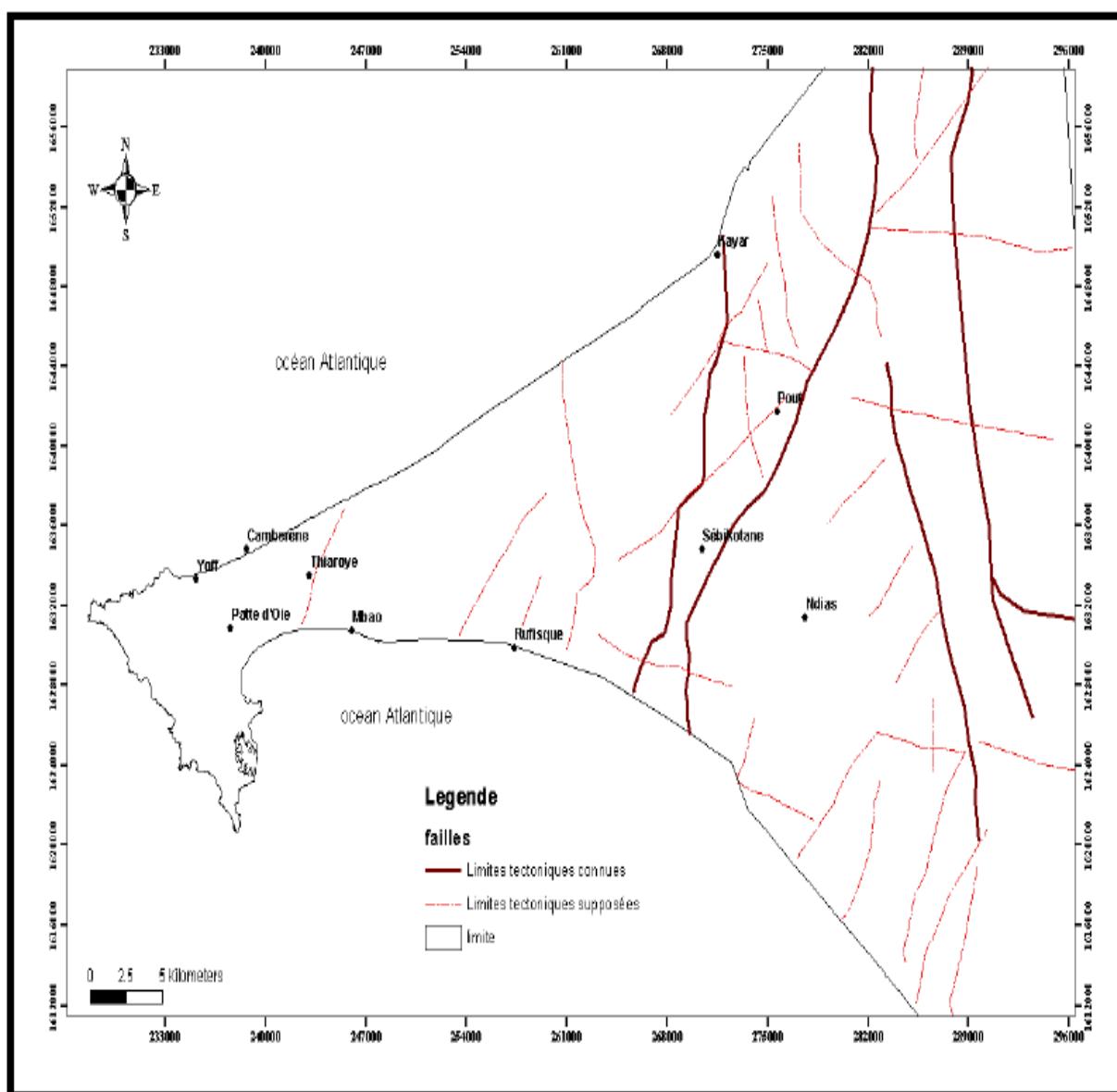
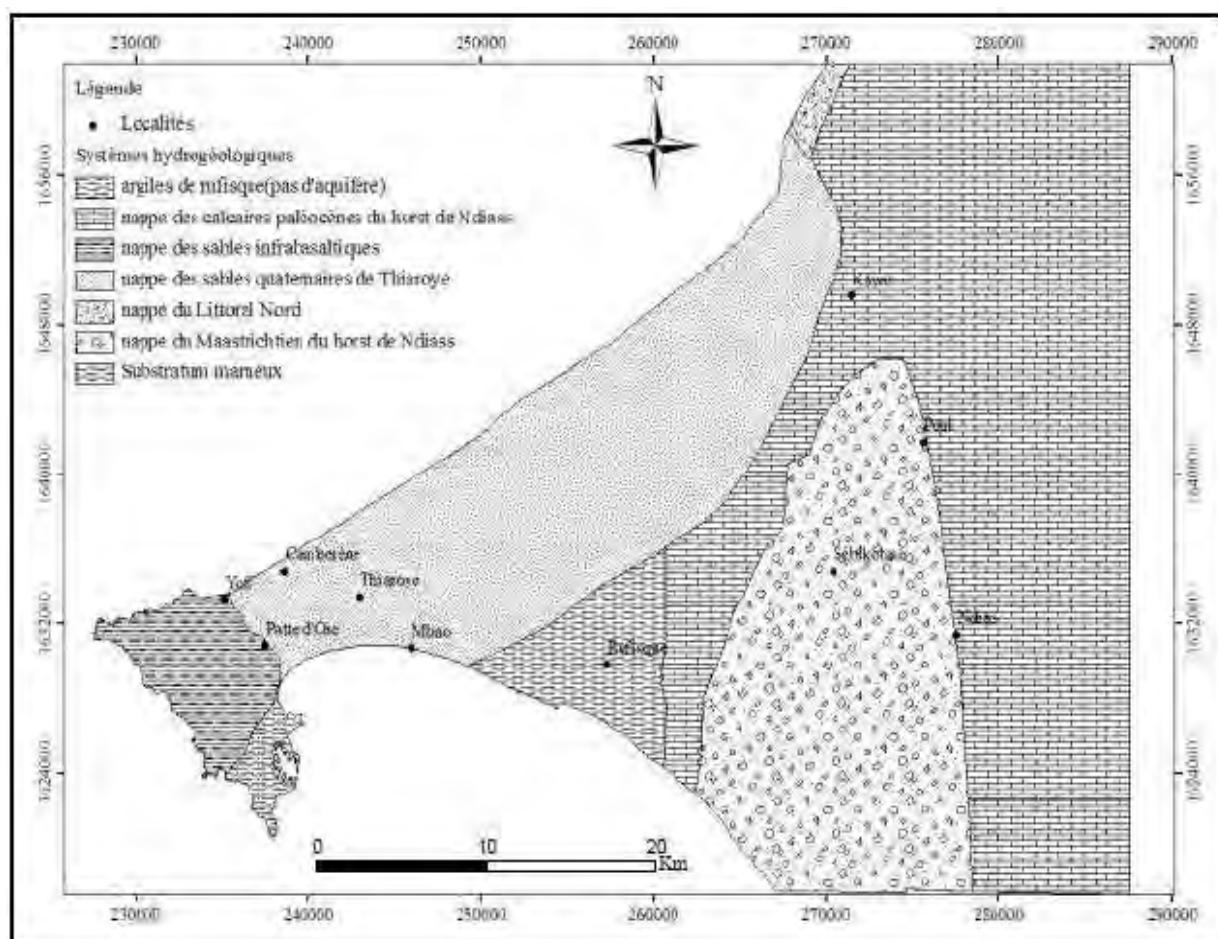


Figure 11 : Cadre structural de la presqu'île du cap vert (MH/OMS, 1972)

I.4. Cadre hydrogéologique

En fonction de la sédimentation (variations latérales de faciès), de la lithologie et de la tectonique (limites imposées par des failles), on peut distinguer au niveau de la presqu'île deux grandes unités hydrogéologiques : le système hydrogéologique des sables quaternaires et le système hydrogéologique du horst de Diass. Le système des sables quaternaires renferme la nappe infrabasaltique située au niveau de la tête de la presqu'île et qui se prolonge vers l'est (Gaye, 1983). Ces deux systèmes sont séparés par le graben de Rufisque (Figure 12).

Les sables quaternaires formés à différentes périodes de l'évolution géodynamique du bassin sénégalais constituent d'un point de vue hydrogéologique un réservoir unique qui repose sur un substratum marneux d'âge tertiaire. Il regroupe la nappe captive des sables infrabasaltique qui s'étend sur l'extrême occidentale de la presqu'île, la nappe libre de Thiaroye et la nappe libre du littoral nord (Figure 12).



I.4.1. L'aquifère des sables infrabasaltique

En 1925, un forage décèle la présence de sables aquifères sous les coulées de basaltes de la tête de la presqu'île du Cap-Vert. Ces sables marins quaternaires emprisonnés sous le volcanisme des Mamelles constituent ce que l'on a appelé la nappe infrabasaltique.

La nappe infrabasaltique, s'étend sous l'ensemble de la tête de la presqu'île du Cap-Vert, à l'exception du plateau de Dakar qui, formé essentiellement par des formations argilo-marneuses de l'éocène inférieur correspondant au relèvement du mur de la nappe (MH/OMS, 1972).

La nappe infrabasaltique, objet de notre étude, est largement en communication avec l'océan atlantique qui constitue ses limites Ouest, Nord et Sud-ouest, ce qui pose le problème d'une intrusion saline résultant souvent d'une surexploitation de la nappe. C'est une nappe peu profonde qui se trouve à l'état captive vers l'ouest et au-delà de la limite orientale d'extension du recouvrement basaltique, la nappe devient libre et se confond avec la nappe de Thiaroye. A l'Est au niveau de la Patte d'Oie sa limite correspond à un dôme piézométrique qui la sépare de la nappe de Thiaroye. (Gaye, 1983). (Figure 13 et 14)

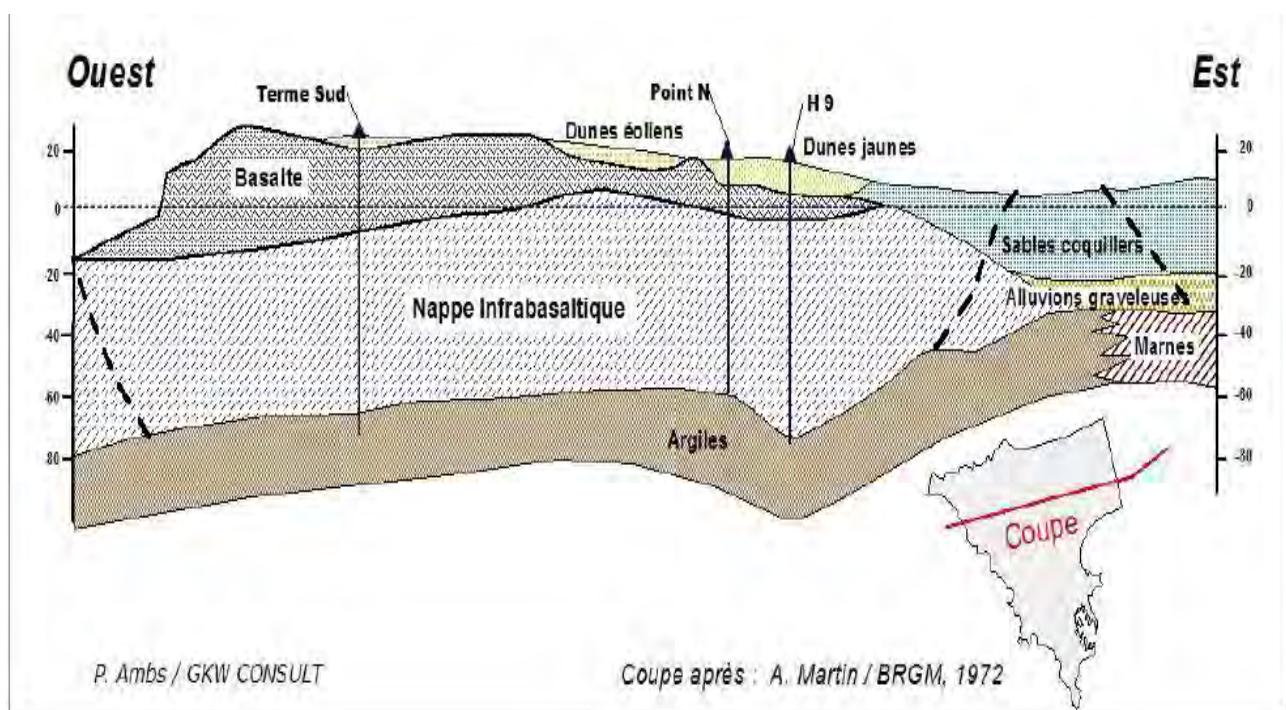


Figure 13: Coupe géologique E-O de la presqu'île du Cap-Vert (DGPTE, 2009)

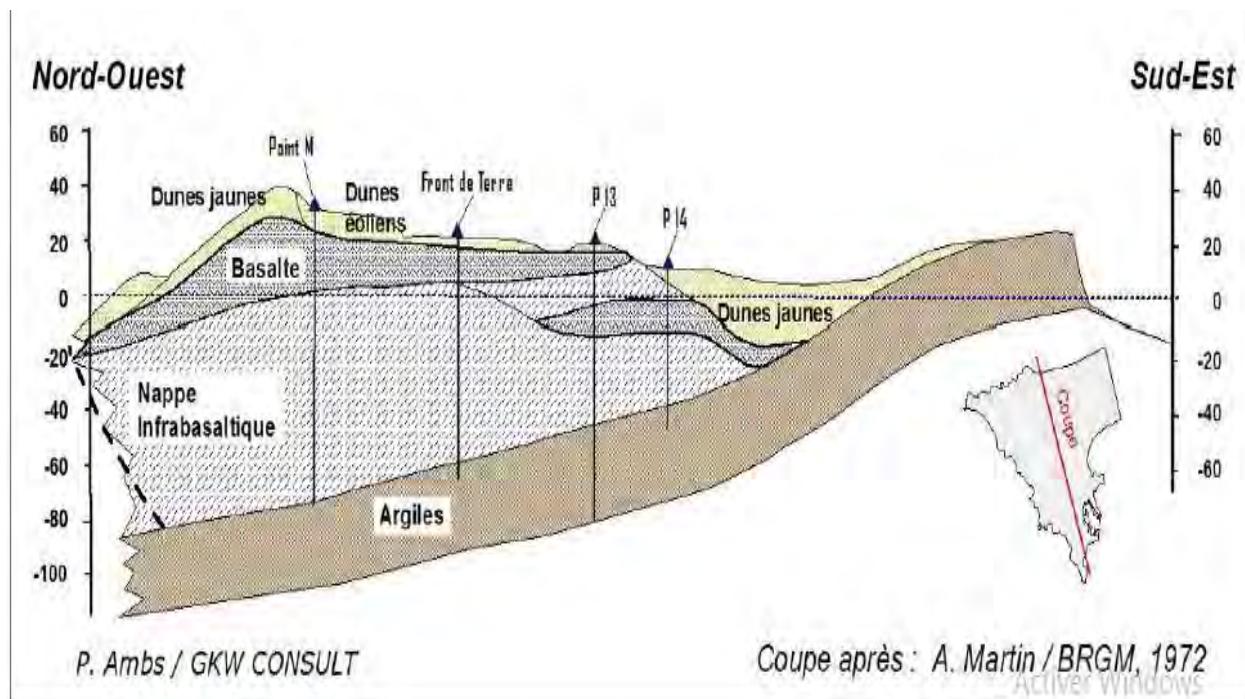


Figure 14 : Coupe géologique NW-SE de la presqu'île de Dakar (DGPRE, 2009)

I.4.1.1. Géométrie de l'aquifère

- **Le Toit de l'aquifère**

La nappe est captive à cause de la couverture volcanique issue de l'ancien volcanisme des Mamelles qui la surmonte dans toute sa partie occidentale. Cette couverture basaltique disparait progressivement vers l'est en direction du col de la presqu'île et la limite orientale du recouvrement correspond à une ligne NW passant par la patte d'oie (OMS, 1972). Au delà du recouvrement volcanique la nappe devient libre (Gaye, 1983). (Figure 15).

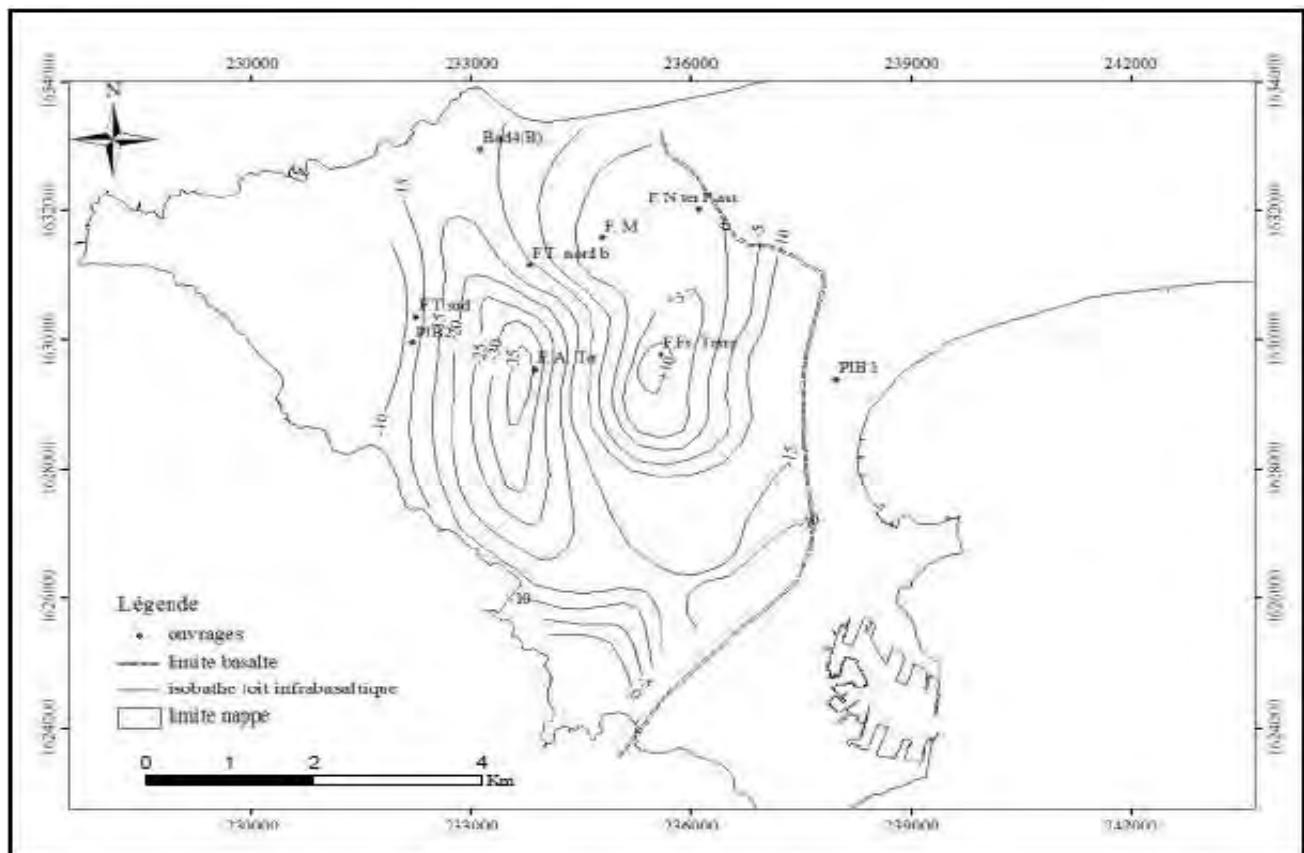


Figure 15 : Carte du toit de la nappe infrabasaltique (OMS, 1972 Modifié ; in Diouf 2012)

• Le Mur de l'aquifère

Le substratum de l'aquifère est composé de marnes et d'argiles de l'éocène inférieur. La profondeur du substratum est variable. Elle diminue globalement du N-S à cause du relèvement des formations marno-argileuses. Au Fort A, l'éocène (le mur) est argileux et se trouve entre 76 et 80 m. Par contre au niveau des ouvrages Terme Nord, Place OMVS et P3 bis Almadies, l'éocène marneux est rencontré entre les profondeurs de 62 et 92m (Figure 16).

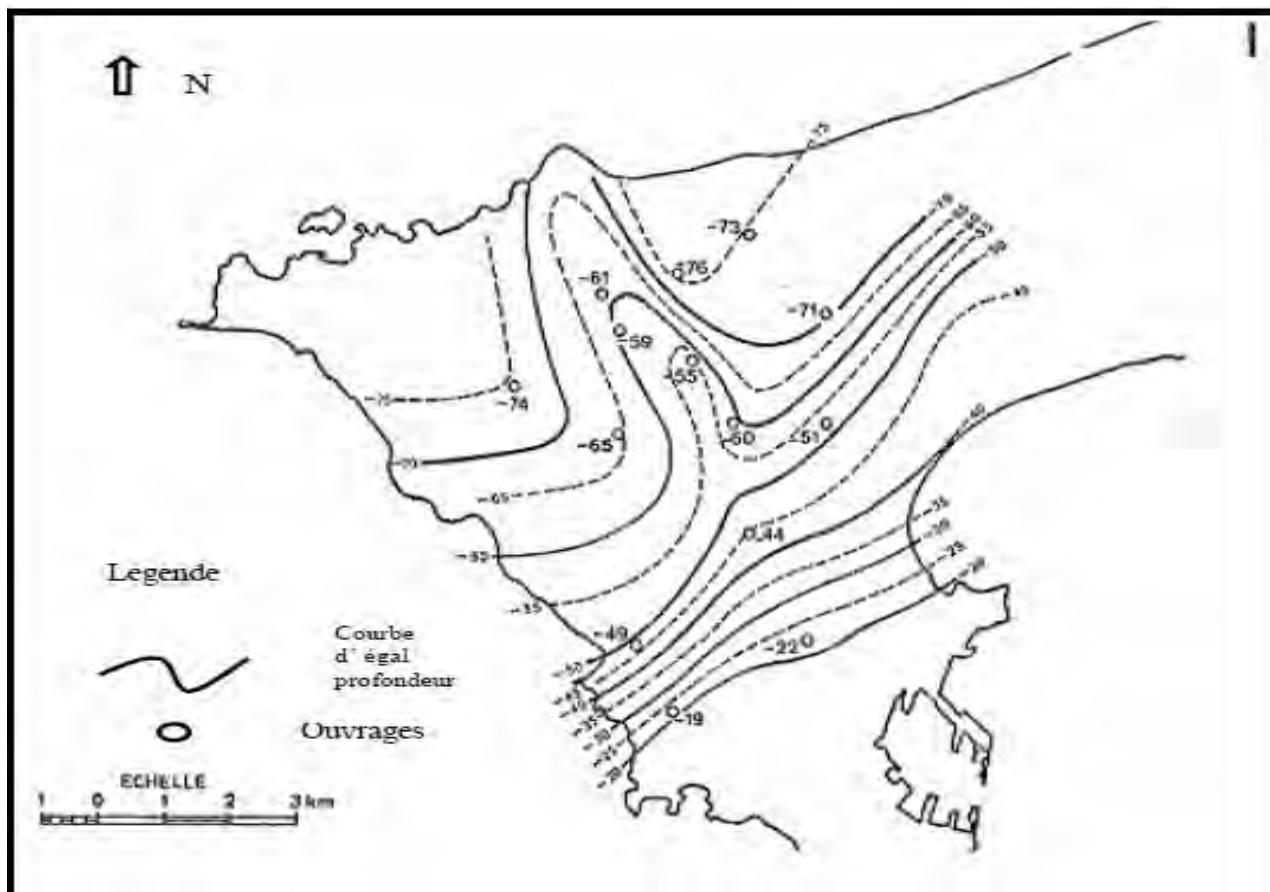


Figure 16 : Carte du mur de la nappe infrabasaltique (OMS, 1972 Modifié ; in Diouf 2012)

• L'épaisseur de l'aquifère

La morphologie du substratum marneux incliné vers le N-W et la forme irrégulière du toit basaltique, confèrent à l'aquifère des variations d'épaisseurs d'un point à un autre.

L'épaisseur des sables de la nappe infrabasaltique varie entre 9m (Fort A) et 42 m (Terme Nord) (Figure 17). On observe une épaisseur de 44 m au P3 bis Almadies à l'Ouest et une forte épaisseur de 78 m au P1 Stade LSS à l'Est. Dans cette partie, la nappe devient libre.

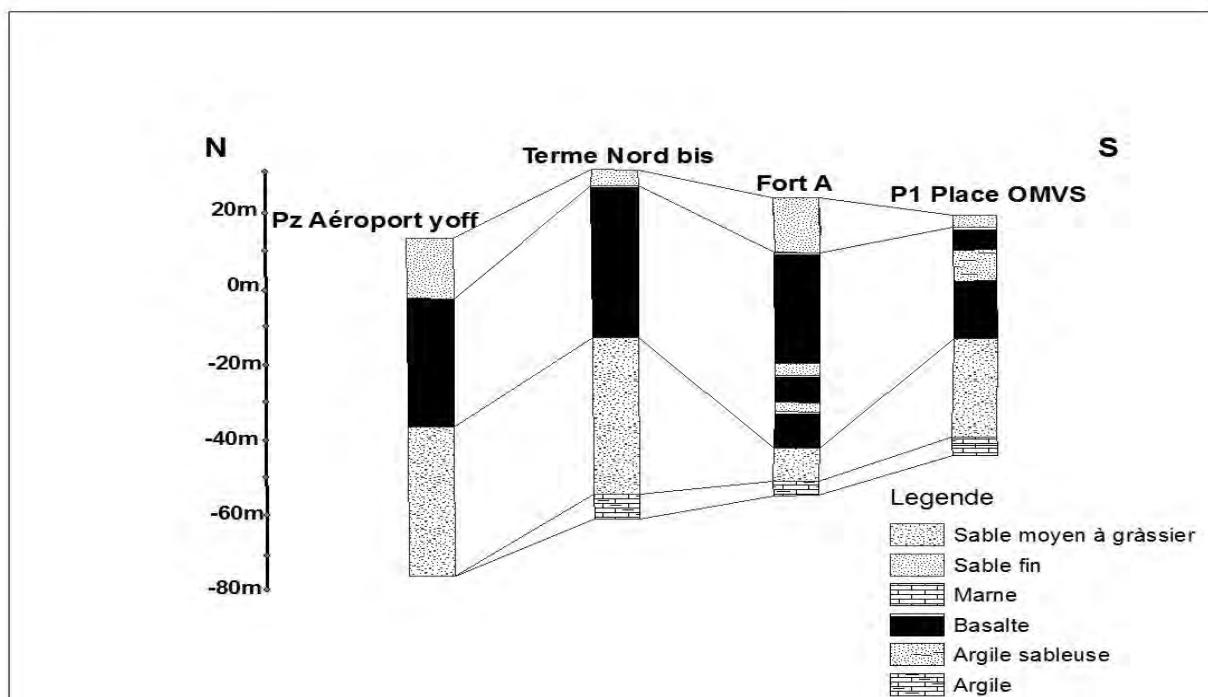


Figure 17: Corrélation lithologique N-S à travers la zone d'étude

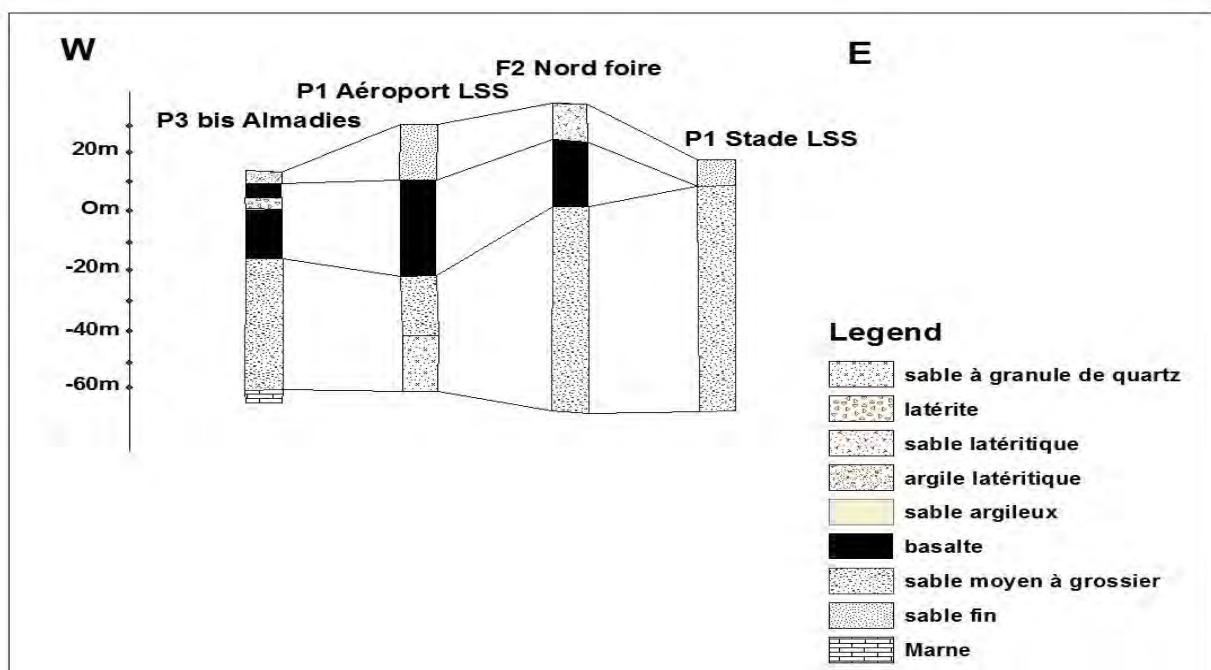


Figure 18 : Corrélation lithologique W-E à travers la zone d'étude

Les corrélations lithologiques (Figure 17 et 18) mettent en évidence les variations d'épaisseurs des formations suivant les directions N-S et W-E.

Les sables suprabasaltiques présentent des variations latérales d'épaisseurs. Ils forment une couche mince au-dessus des basaltes au niveau de Terme Nord et des piézomètres Place OMVS, P3 bis Almadies et P1 Stade LSS.

La figure 17 montre que la couverture basaltique qui provient de l'ancien volcan des Mamelles et recouverte par des sables et alluvions récentes, présente des épaisseurs variant entre 30m (Place OMVS) et 52m (Fort A). La couche basaltique est plus épaisse au forage Fort A (52m). La puissance de la couverture basaltique diminue progressivement lorsqu'on se dirige vers le sud.

Cette couverture basaltique présente également des variations de puissance d'Ouest vers l'est. A l'ouest on y distingue des épaisseurs de 25 m (dans le piézomètre P3 bis Almadies) et de 32 m (P1 Aéroport LSS). A l'Est, la nappe devient libre par exemple au niveau du piézomètre P1 Stade LSS où on observe une absence d'un recouvrement basaltique.

I.4.1.2. Les paramètres hydrodynamiques

Les données des paramètres hydrodynamiques sont extraites essentiellement des travaux antérieurs réalisés dans la zone. Ces paramètres hydrodynamiques sont la perméabilité, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement.

a) La perméabilité

L'étude faite par l'MH/OMS (1972) montre que dans l'aquifère infrabasaltique, la valeur moyenne de perméabilité est de l'ordre de $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s.

b) La transmissivité

Les transmissivités de la nappe infrabasaltique varient entre $9 \cdot 10^{-3}$ $m^2 \cdot s^{-1}$ dans la zone Nord-Est axée sur le forage Front de Terre et $5,3 \cdot 10^{-3}$ $m^2 \cdot s^{-1}$ vers le Terme Sud. Au niveau du forage Fort A, la transmissivité est de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{-3}$ $m^2 \cdot s^{-1}$ (OMS, 1972).

c) Le coefficient d'emmagasinement

Les valeurs de coefficient d'emmagasinement sont déterminées au forage de Cambérène qui disposait d'un ouvrage d'observation. Ces valeurs sont comprises entre 1,25 et 1,5 % (OMS, 1972).

I.4.1.3 Historique de l'exploitation de la nappe infrabasaltique

Mise en exploitation pour l'alimentation en eau de Dakar depuis 1925 avec l'exécution d'un premier forage à raison de $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$, la nappe infrabasaltique a subi par la suite une surexploitation causée par une augmentation des besoins en eau du fait de l'accroissement de la population. (Gaye, 1980) (Figure 19)

En 1940, ce débit passe à $12\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$. A partir de 1947, les prélèvements atteignaient $24\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$. Cette augmentation des prélèvements avait pour conséquence la venue d'eau salée dans certains ouvrages tels que le puits du centre de captage de Hann, Km5, Université (Martin, 1970). Entre 1960 et 1978, pour une exploitation rationnelle et équilibrée, le pompage fut réduit à $18000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ ce qui représenterait le débit équilibré de la nappe et les ouvrages envahis par le biseau salé furent abandonnés (Sarr, 2000). De 1979 à 1982, ces volumes exploités furent réduit à nouveau jusqu'à $13\ 777 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ pour être ensuite ramenés à $18\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ (SONEES, 1986, 1989). Les prélèvements au niveau des forages ont fortement diminués depuis 1989. Cette diminution est due à une panne des ouvrages (ensablement ou rouille des crépines) (Diouf, 2005). Ensuite, on observe une baisse progressive de la production des forages de 1989 à 2010. Cette baisse de la production s'expliquerait par une dégradation de la qualité des eaux du fait de la surexploitation de la nappe. Toutefois, en 2007 et 2008, les productions des forages Terme Sud, Terme Nord, Camp Pénal et Front de Terre ont été augmentées pour combler les déficits en eau suite à l'arrêt de pompage des forages Autoroute, Point M, Point N Ter. Entre 2000 et 2009, cette production varie entre $11000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ et $15\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ (Figure 16 et 17). De 2009 à 2013, la production des forages est passée de $11418 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ à $18\ 105 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$.

Dans le cadre du programme d'urgence de renforcement de l'AEP de Dakar, la SONES a eu à réaliser 12 nouveaux forages entre 2015 et 2018. (Tableau 1)

Entre 2015 et 2018, on observe une augmentation progressive de la production des forages suite à la contribution des nouveaux forages pour l'AEP de Dakar. La production des forages est passée de $19562 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ en 2015 à $25595 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ en 2016 et de $30130 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ en 2017 à $37270 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ en 2018. Cette production actuelle a largement dépassé le débit d'équilibre supposé de la nappe infrabasaltique qui est de $18000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$.

Tableau 1: Les nouveaux forages captant la nappe infrabasaltique et leurs caractéristiques

Désignation	X	Y	Prof total(m)	Débit d'exploitation (m ³ /h)	Date de réception
Cices-F3	234967	1631387	108	125	31/07/2015
F1 Camp Leclerc	233908	1630291	100	117	10/08/2015
F2 Point G	235294	1628400	97		25/09/2015
F1 ouest foire	233794	1631796	100	150	07/12/2016
PtN4 HLM Grand Yoff	235448	1631566	105	130	21/03/2017
F2 CAMP LECLERC(liberté 6)	234386	1630778	118.8	50	19/05/2017
F3 terme sud Ouakam	231933	1630322	95	100	28/06/2017
F1 L.SMC	235540	1631750	105	100	11/08/2017
F2 Nord Foire (Yengoulène)	235184	1632061	105	100	17/08/2017
F1 BIS Nord Foire	235005	1632063	114	120	06/08/2018
F2 Terme Nord Tobago	233493	1630665	126	150	09/08/2018

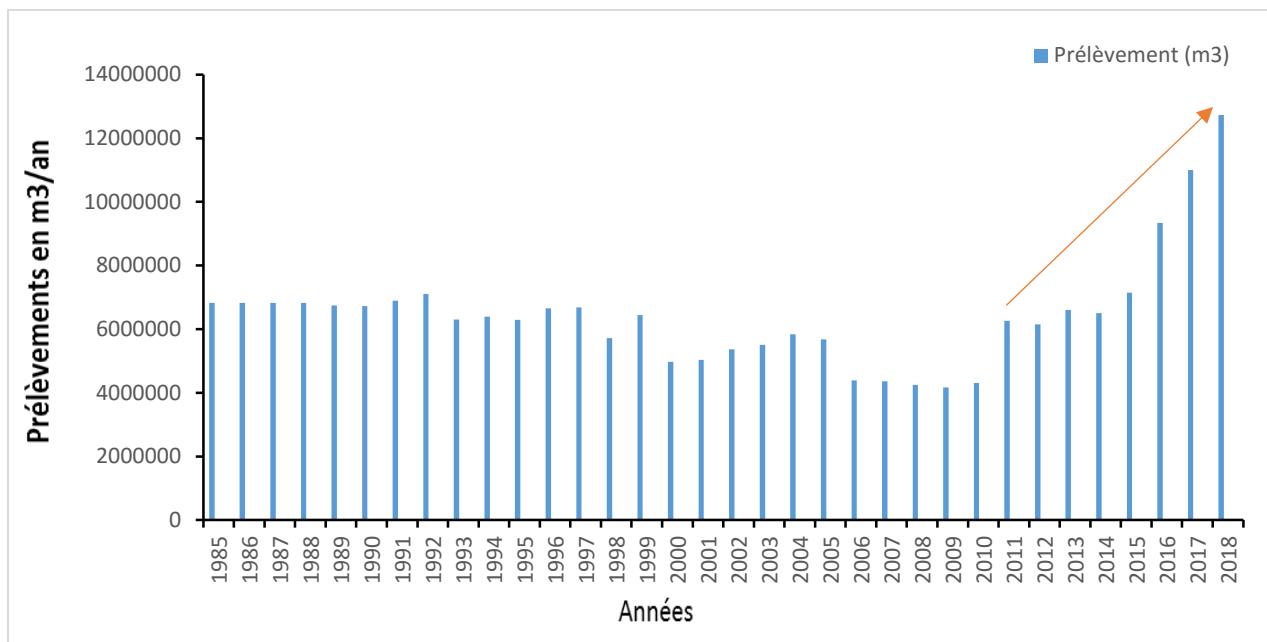


Figure 19 : Evolution des prélèvements de la nappe infrabasaltique de 1985 à 2018

I.4.2. La nappe de Thiaroye

La nappe des sables quaternaires de Thiaroye est une nappe libre ; elle est le prolongement Est de la nappe infrabasaltique et s'étend de la Patte d'Oie à Kayar sur une superficie d'environ 300 km². A l'Ouest, la nappe est séparée de l'infrabasaltique par un dôme piézométrique au niveau de la zone basse de Dagoudane-Pikine. Elle est limitée au Nord par l'Océan Atlantique, au Sud par le substratum marneux éocène du graben de Rufisque et à l'Est par la dépression du lac Tanma à Kayar. Le réservoir est constitué par des sables dunaires d'âge différents reposant sur les marnes et argiles de l'Eocène.

Conclusion partielle

La zone d'étude, située au niveau de la presqu'île du Cap Vert est caractérisée par un microclimat particulier. La région présente une saison sèche et fraîche de Novembre à Mai et une saison humide, chaude et pluvieuse de Juin à Octobre et pendant lesquelles s'établissent respectivement des vents qui sont l'alizé maritime et la mousson suivant les directions N-NW et S-SE.

Sur le plan géologique les formations du quaternaire sont subdivisées en quaternaire ancien et en quaternaire récent. Le quaternaire ancien renferme la nappe des sables infrabasaltique. L'épaisseur des sables de cette nappe est très variable. Elle diminue du Nord vers l'Est à cause du relèvement des formations marno-argileuses qui constituent le substratum de l'aquifère.

La nappe infrabasaltique est mise en contribution pour l'alimentation en eau de Dakar depuis 1925 à un débit de 3000 m³ / j. Ainsi la production de la nappe passe de 18 297 m³ / j en 1985 à 11 418 m³ / j en 2009 et à 42 489 m³ / j en 2019.

CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Matériels

Pour réaliser cette étude différentes données ont été utilisées à savoir

II.1.1. Les données climatiques

Les données climatiques (la pluviométrie, la température, l'humidité relative, l'insolation et la vitesse du vent) durant la période 1989-2019 ont été recueillies à l'ANACIM (Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie). Elles ont permis de caractériser le climat de la région en particulier la pluviométrie qui joue un rôle important dans la recharge des nappes.

II.1.2. Les données de prélèvements

Les données sur les prélèvements de la nappe infrabasaltique ont été recueillies à la SONES (Société Nationale des Eaux du Sénégal), il s'agit des prélèvements mensuels et annuels des forages de Dakar pour la période 1985-2018.

II.1.3. Les données piézométriques

Les données piézométriques ont été collectées à la DGPRE (Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau). Elles ont permis la réalisation des cartes piézométriques et ont été corrélées aux pompes ce qui a permis de voir l'impact de ces dernières sur le niveau de la nappe. Il s'agit essentiellement :

-d'une série chronologique de données de suivies de la nappe infrabasaltique durant la période 2000-2013.

-d'un suivi mensuel des niveaux piézométriques couplés à des mesures physico-chimiques (pH, Température, Conductivité électrique) durant la période 2017-2019. Ces données sont recueillies sur 9 piézomètres (Dakar Mamelles BAD P2 Bas bis, Dakar Mamelles BAD P2 Haut bis, Ouakam PIB2, Parcelles Assainies PIB3, Aéroport Yoff BAD P4 Bas bis, Stade Léopold Senghor P1, Cimetière Yoff P1, Hann P, Seydou nourou).

-Un recueil bibliographique des études antérieures réalisées dans la zone d'étude nous a permis d'acquérir un certain nombre de données à savoir les niveaux piézométriques de 11 ouvrages (Bad 1, Bad 2H, Bad 3H, Bad 4H, Bad 5H, Bad 6, Km 5, Point M, Front de Terre, Camp pénal, Point N bis) pour l'année 1995, les niveaux piézométriques de 12 ouvrages (Fort A, Front de Terre, Terme nord, P-2H, P-2B, P-3H, P-3B, P-5H, P-5B, P-6H, P-6B, Km5) pour la période 1987-1991.

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser les niveaux piézométriques du mois de juin (basses eaux) et du mois de novembre ou Décembre (haute haut).

II.1.4. Les données chimiques

Les données chimiques ont été recueillies à la SONES et à la DGPRE. Elles ont permis d'évaluer la qualité des eaux de la nappe, de caractériser l'évolution des éléments chimiques et l'évolution de la salinité dans le temps et dans l'espace.

Notre stage à la Société Nationale des Eaux du Sénégal (SONES) nous a permis de recueillir un certain nombre de données qui sont consignées dans le tableau 2.

Tableau 2: Récapitulatif des données physico-chimique et chimique de la nappe infrabasaltique

Ouvrage	Typologie	Période	Source
Dakar Mamelles BAD P2 Bas bis, Dakar Mamelles BAD P2 H bis, Ouakam PIB2, Parcelles Assainies PIB3, Aéroport Yoff BAD P4 Bas bis, Stade Léopold Senghor P1, Cimetière Yoff P1, Hann P, Pz Place OMVS, Dakar Camp Leclerc F1, Nord Foire F1, Dakar Foire Point M3, Dakar Ouest Foire	Donnée physico-chimique (pH, Température, CE) et chimique (Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+ ; Cl^- ; K^+ ; SO_4^{2-} ; HCO_3^-)	2017-2019	DGPRE
Camp pénal ; Terme Nord ; Terme Sud ; Fort A ; Front de Terre ; Point G ; Cité Tobago ; Ouest Foire ; Cices bis ; HLM Grand Yoff ; Point M ; Camp Leclerc 1 ; Camp Leclerc 2 ; F1 Nord Foire ; F2 Nord Foire	Donnée physico-chimique (pH, Température, CE) et chimique (Cl^- ; HCO_3^-)	2014-2019	SONES

Les données chimiques antérieures disponibles et intégrées à la présente étude, sont les suivantes :

- les données physico-chimiques et chimiques de 6 ouvrages pour la période 2000-2010,
- les données physico-chimique et chimique de 10 ouvrages (Autoroute, Point N, Terme sud, Point N bis, Point M, Terme nord, Camp pénal, Front de Terre, Fort A, N Ter) pour les années 1978, 1995 et 2004.
- les données chimiques des piézomètres P2 bas et P2 haut pour la période 1978-2019
- les données chimiques des piézomètres PIB1, PIB2 et PIB3 pour la période 2000-2019.

II.2. Méthodes

Différents logiciels (méthodes) ont été utilisés pour traiter les données. Ces logiciels sont :

- **Excel**

Il a permis de réaliser des graphiques pour bien évaluer et mettre en évidence les tendances et les variations du contexte climatique et de suivre l'évolution des prélèvements.

- **Surfer**

Le logiciel surfer a permis la réalisation de cartes piézométriques pour une analyse de la fluctuation de la nappe afin d'évaluer la dynamique de la nappe. La comparaison des variations des niveaux piézométriques actuelles avec celles des années précédentes nous a permis de suivre les variations des côtes d'eaux. Enfin une analyse des impacts des pompages à travers les résultats du suivi piézométriques a été réalisée.

- **Arc GIS**

La distribution spatiale et l'évolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et chimique des eaux a été faite à l'aide du système d'information géographique (Arc GIS).

- **Diagramme de Piper**

La détermination des faciès chimiques nécessite l'utilisation du programme informatique « Diagramme » pour l'élaboration des diagrammes de Piper.

- **Statistica 7**

L'analyse en composantes principales (ACP) et les diagrammes binaires ont été réalisé à l'aide du logiciel Statistica pour pouvoir mettre en évidence les liens qui existent entre les différents paramètres chimiques.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. PIEZOMETRIE DE LA NAPPE

III.1.1. Evolution inter annuelle de la piézométrie

III.1.1.1. Morphologie de la nappe entre 1995 ; 2009 et 2019

L'établissement des cartes piézométriques de Décembre 1995, Juin 2009 et Décembre 2019, a permis de décrire la morphologie globale de la nappe et de caractériser les sens d'écoulement de la nappe.

La morphologie globale de la nappe se présente sous forme de creu du au pompage. L'observation des cartes piézométriques de Décembre 1995 (Figure 20) et de Juin 2009 (Figure 21), montre pratiquement une même allure de la surface piézométrique. Les courbes iso pièzes sont circulaires, fermées et centrées sur les principaux forages d'exploitation. On observe un cône de dépression accentué au niveau des forages Front de Terre et Camp pénal. Cette dépression axée autour des forages d'exploitation dans la partie centrale de la nappe pourrait être due aux prélèvements importants dans ce secteur. En 1995, la production de la nappe était de $17\ 127\ m^3/j$ et les pompages les plus élevés sont notés au niveau des forages Point N, Point M, Terme Nord, Fort A, Front de Terre et Camp pénal situées dans la partie centrale de la nappe. En 2009, on note une baisse des pompages (jusqu'à $11\ 420\ m^3/j$) suite à la diminution de la contribution des forages. L'influence des pompages se fait ressentir sur les côtes piézométriques. Ces dernières observées au niveau des forages Front de Terre, Camp Pénal et Fort A en Décembre 1995 étaient respectivement de -7m, -4m et -3m. Ces niveaux augmentent jusqu'à atteindre respectivement -4 m, -2 m et -1m en Juin 2009. La dépression piézométrique est beaucoup plus importante en Décembre 1995 qu'en Juin 2009. En plus des pompages, les variations saisonnières pourraient avoir un impact sur la diminution de la piézométrie entre Décembre 1995 (hautes eaux) et Juin 2009 (basses eaux). L'écoulement souterrain est centripète sur la zone de regroupement des forages d'exploitation, ce qui permet de mettre en évidence l'influence de l'exploitation sur la piézométrie.

L'analyse de la carte piézométrique de Décembre 2019 (Figure 22) montre une modification de la morphologie observée en Décembre 1995 et Juin 2009. Dans la zone Nord, la surface piézométrique se situe à des côtes inférieures à celle du niveau de la mer. Cette dépression piézométrique pourrait être dû à l'augmentation des prélèvements dans cette zone car en 2018, on note 19 forages fonctionnels au niveau de la nappe qui fournissent une production de

34 890 m³ /j. Parmi ces forages fonctionnels 14 forages sont situés dans le secteur Nord et qui contribuent à hauteur de 25 695 m³ /j. La dépression piézométrique est légèrement orientée vers le N-E. Ces écoulements qui convergent vers le regroupement des forages d'exploitation permettent de mettre en évidence l'influence de l'exploitation. En effet, la forte exploitation de la nappe a entraîné une baisse considérable sur la piézométrie particulièrement dans la zone nord. A l'Est, on note un relèvement des niveaux piézométriques au niveau du piézomètre PIB3 qui pourrait être dû par la recharge de la nappe qui vient de la partie orientale (l'écoulement des eaux souterraines à partir des sables de Thiaroye). Vers le Sud-Est, on observe aussi un relèvement de la nappe qui peut être expliqué par une diminution des pompages dans ce secteur et l'infiltration directe des eaux de pluie (car c'est une zone de limite des couches basaltiques).

La comparaison des cartes piézométriques de Décembre 1995 et Décembre 2019, montre qu'en Décembre 1995, la dépression piézométrique était localisée au niveau de la partie centrale de la nappe avec des cotes piézométriques négatifs observés au niveau des forages Front Terre, Camp pénal et Fort A. Par contre en Décembre 2019, on observe un déplacement de la dépression piézométrique dans la partie Nord et une légère augmentation des niveaux piézométriques des forages Front Terre, Camp pénal et Fort A.

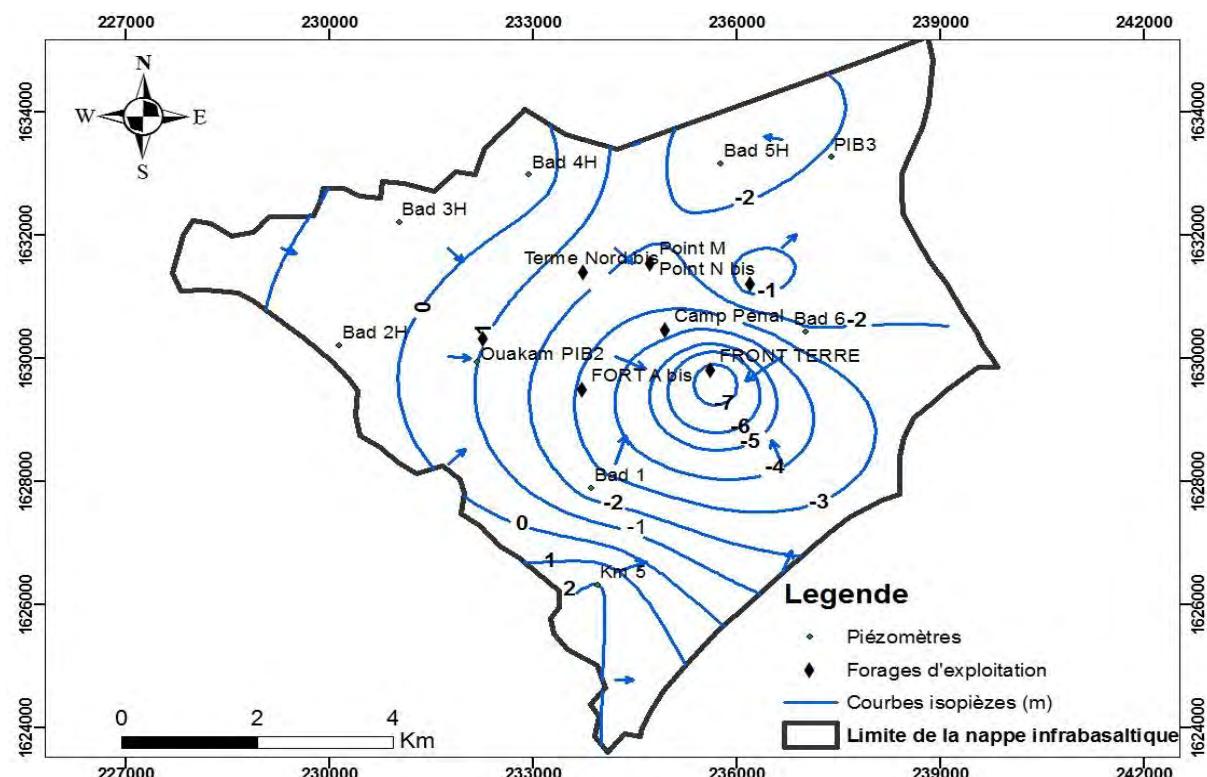


Figure 20: Carte piézométrique de la nappe infrabasaltique (Décembre 1995)

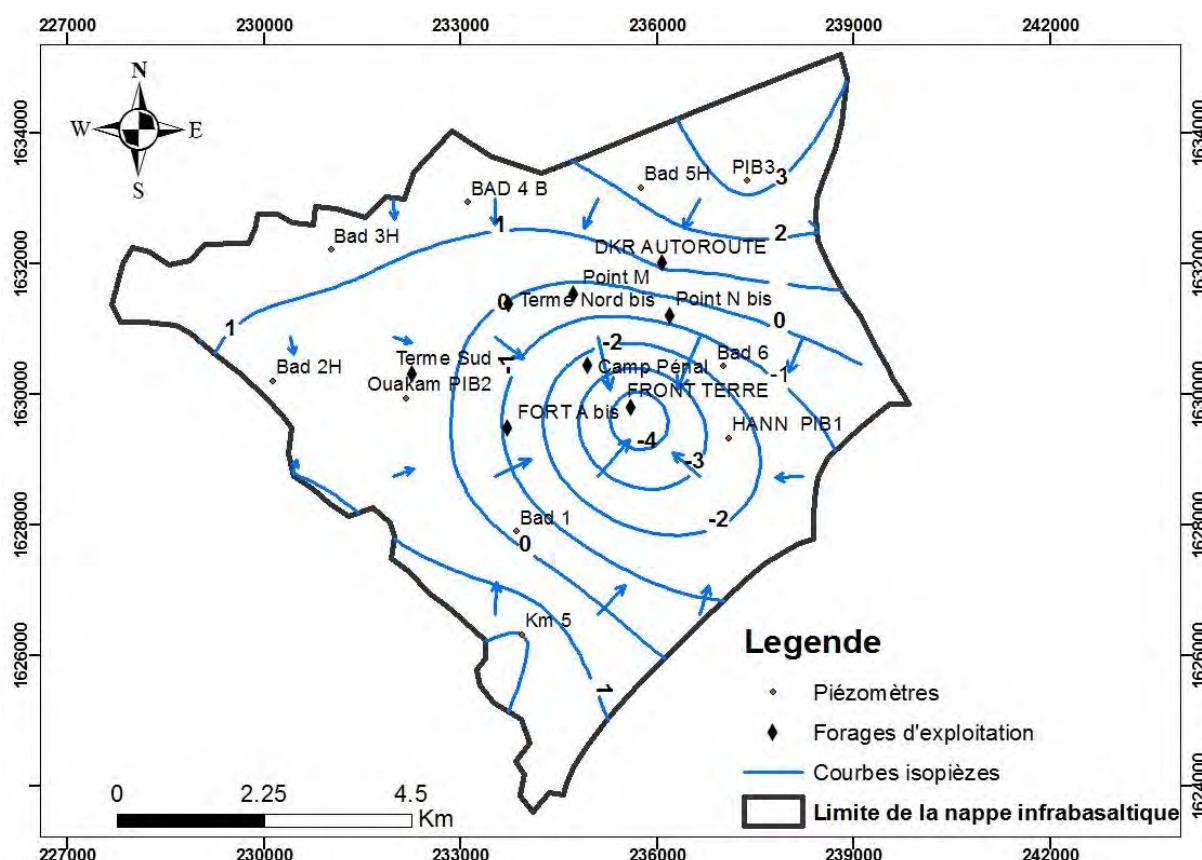


Figure 21: Carte piézométrique de la nappe infrabasaltique (Juin 2009)

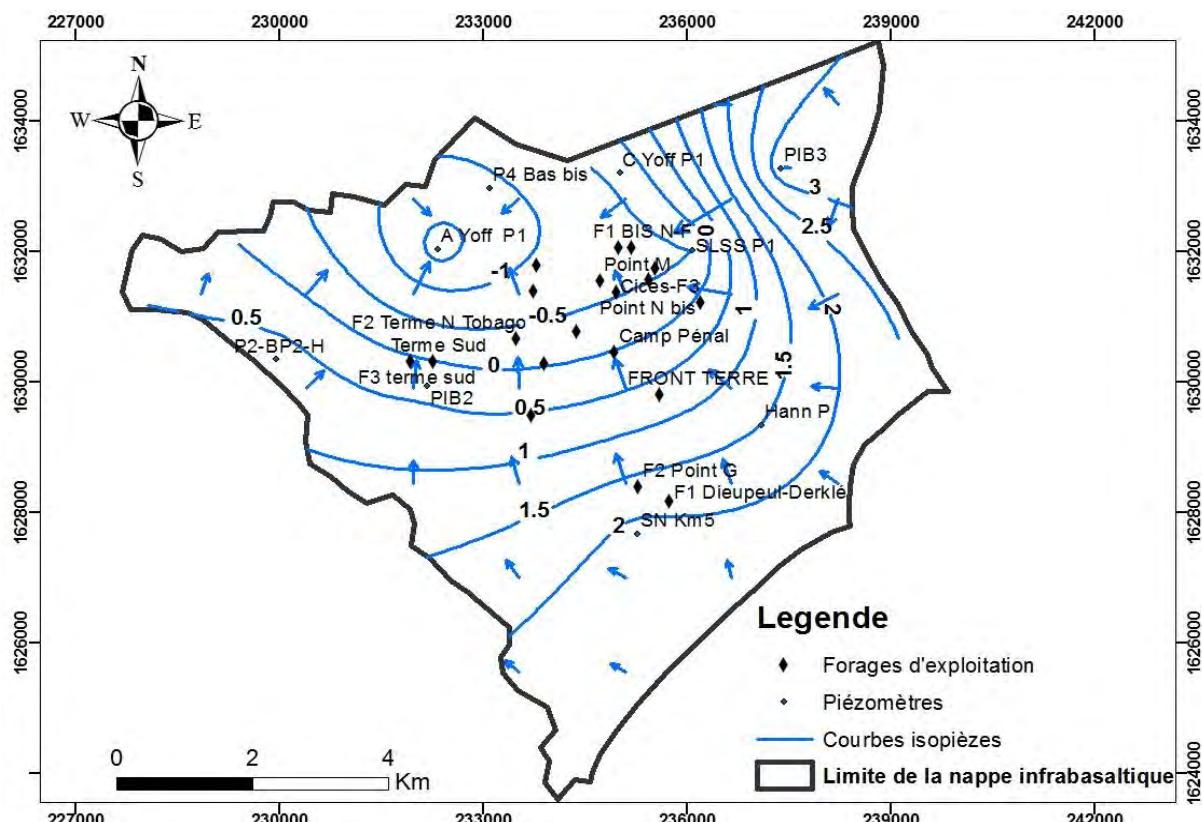


Figure 22: Carte piézométrique de la nappe infrabasaltique au mois Décembre 2019

III.1.1.2. Evolution de la piézométrie entre 1985 et 1995

L'évolution de la piézométrie au niveau de la nappe infrabasaltique montre une remontée des niveaux piézométriques de 1985 à 1990, suivi en moyenne d'une baisse des niveaux jusqu'à 1995. La remontée de la côte piézométrique entre 1985 et 1990 est notée au niveau de l'ensemble des ouvrages, mais elle se fait de manière différente en fonction de la position des ouvrages. Les piézomètres Bad 2H, Bad 2B, Bad 3B, Bad 3H, Bad 4B, Bad 4H, Bad 5H et Km5 montrent des valeurs de remontés piézométriques qui varient en moyenne entre 0.22 et 1.66 m. (Figure 20, 21, 22 et 23). Les pompages sont pratiquement constants durant cette période (La production est passée de 6 821 760 m³ à 6 722 859 m³ entre 1985 et 1990). Donc cette remontée semble être étroitement liée à la recharge de la nappe.

Entre décembre 1990 et juin 1993, on observe une baisse du niveau piézométrique. Les piézomètres Bad 2H, Bad 2B, Bad 3B, Bad 3H, Bad 4B, Bad 4H, Bad 5H et Km5 montrent une baisse comprise entre -0.25 et -0.54 m. Cette baisse du niveau piézométrique pourrait s'expliquer par une augmentation de la production des forages (une production qui était de 6 722 859 m³ en 1990 et qui passe jusqu'à une valeur de 8 629 312 m³ pour l'année 1993), au fluctuations saisonnières et au déficit pluviométrique durant cette période.

Entre Mai 1993 et Octobre 1994, on note une tendance à la hausse des côtes piézométriques. On observe une remontée piézométrique de 0.26 m au Bad 2H, de 0.06 m au Bad 2B, de 0.24 m au Bad 3B, de 0.17 m au Bad 3H, de 0.24 m au Bad 4B et de 0.24 m au Bad 4H. Il s'en est suivi une baisse du niveau piézométrique entre Décembre 1994 et Juin 1995. (Figure 23, 24 et 25)

Au niveau des piézomètres Bad 5H et Km 5, on observe une légère augmentation du niveau piézométrique entre mai 1993 et juin 1995. Le niveau piézométrique est passé de -1.96 à -1.83 au Km 5 et de -3.8 à -3.43 m au Bad 5H. Cette remontée du niveau de la nappe peut être due à la réduction de l'exploitation de l'aquifère. (Figure 26)

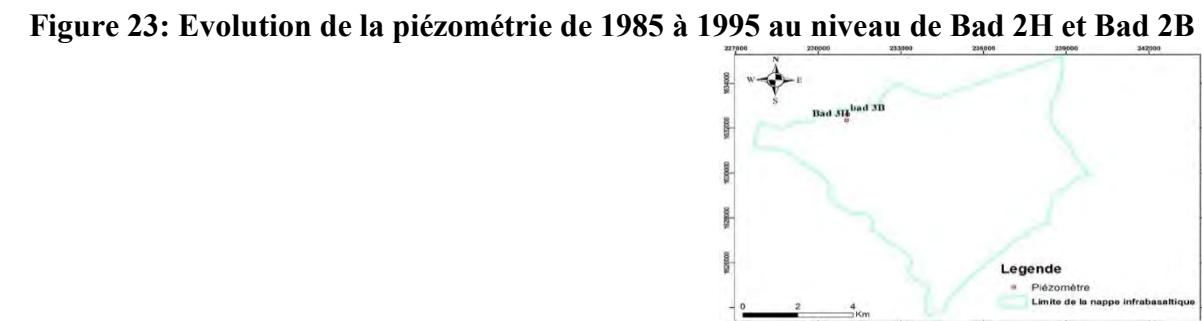
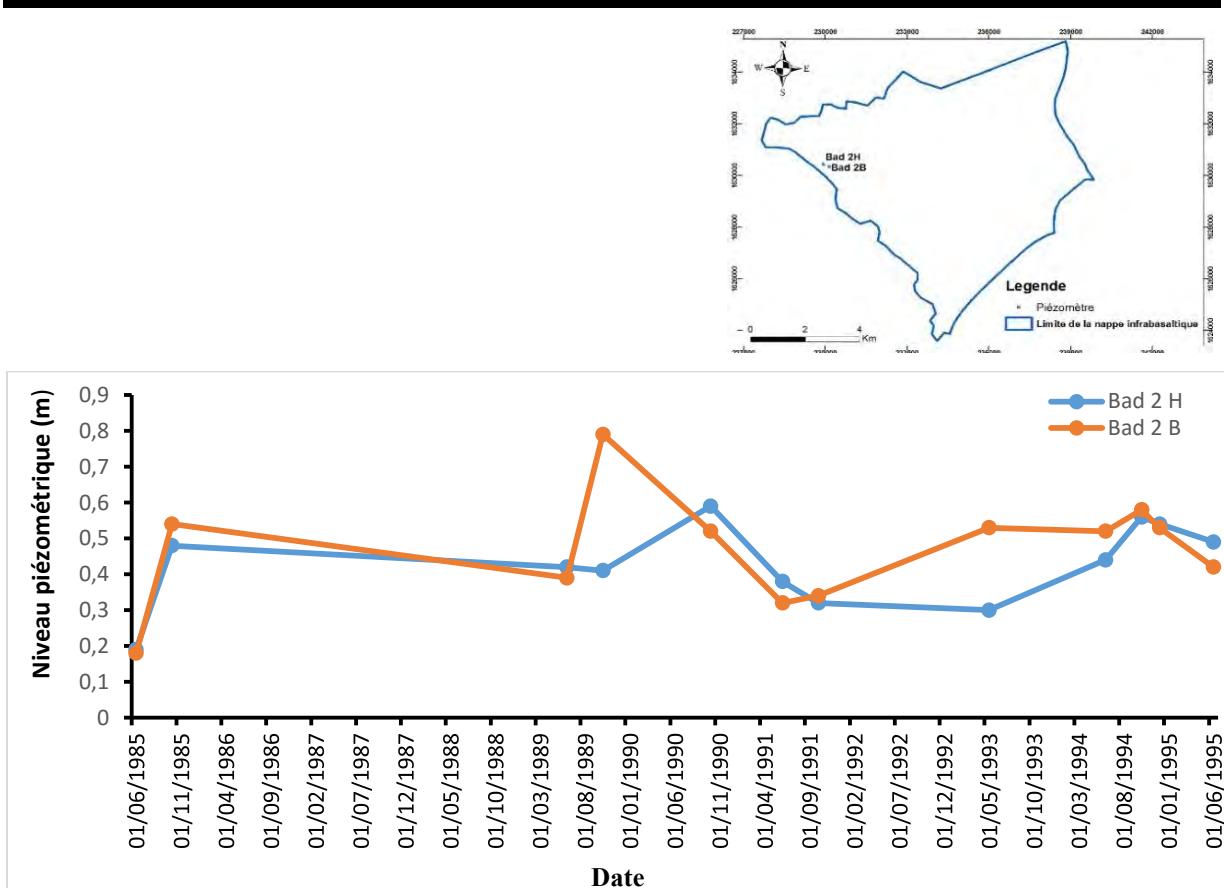


Figure 24: Evolution de la piézométrie de 1985 à 1995 au niveau de Bad 3H et Bad 3B

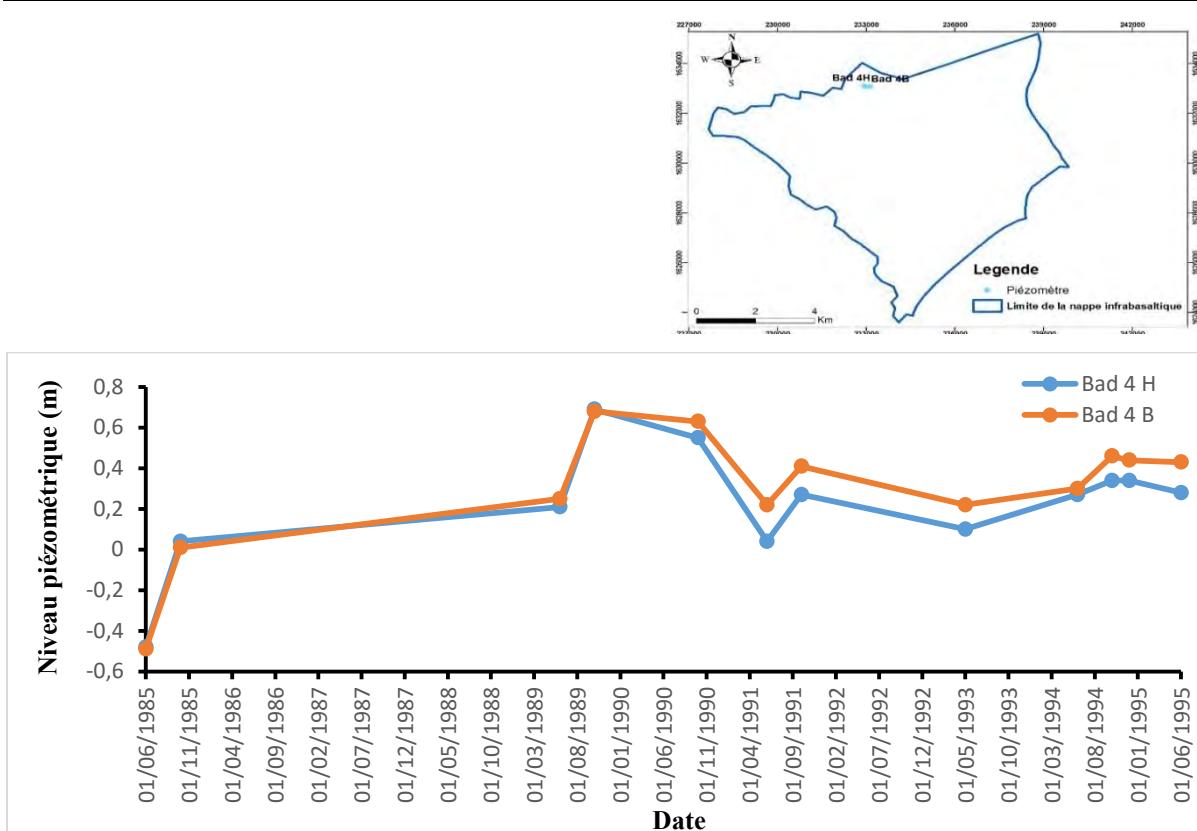


Figure 25: Evolution de la piézométrie de 1985 à 1995 au niveau des piézomètres de Bad 4H et Bad 4B

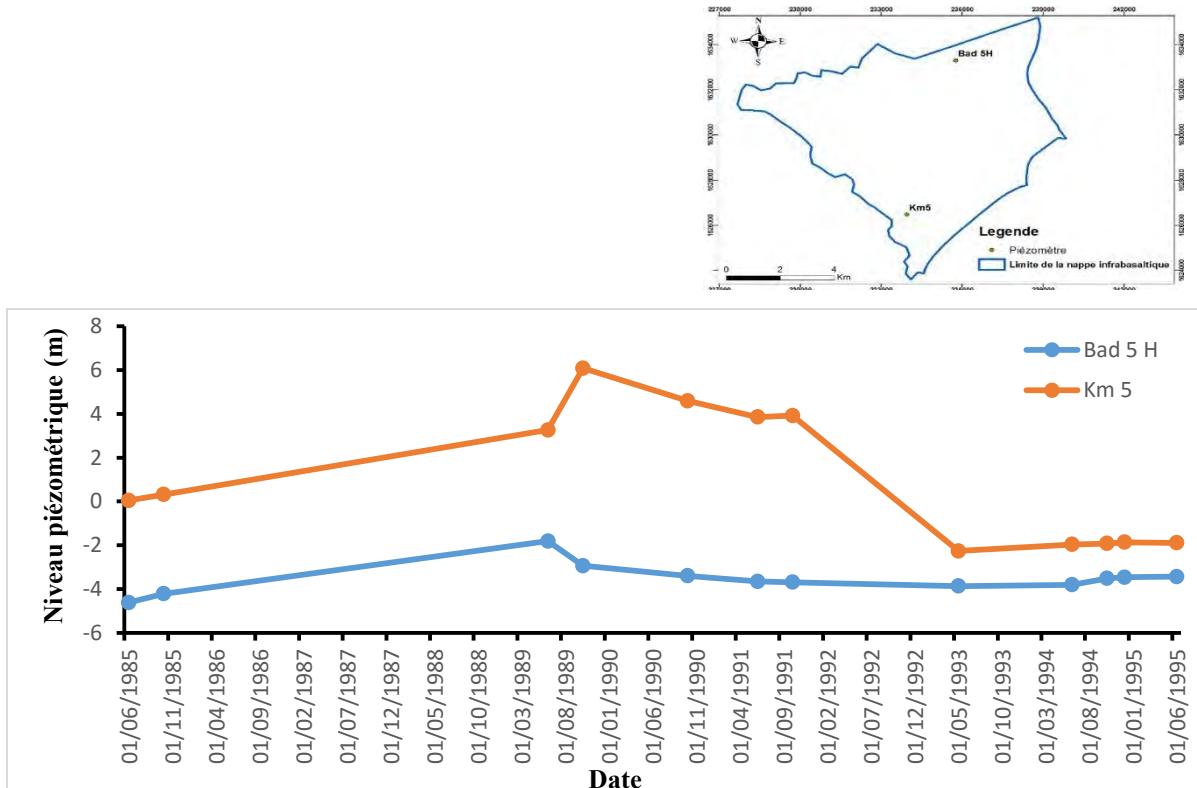


Figure 26: Evolution de la piézométrie de 1985 à 1995 au niveau des piézomètres Bad 5H et Km 5

III.1.1.3. Evolution de la piézométrie de la nappe infrabasaltique entre 2000 et 2020

L'analyse de la piézométrie de 2000 à 2010 montre une tendance à la baisse de la nappe durant la période 2000-2005 au niveau des piézomètres situés sur la côte Ouest (P-2B, P-2H, PIB2) et des piézomètres se trouvant au nord de la presqu'île non loin de la mer (PIB3, P-4B, P-6H) puis une remontée des niveaux piézométriques de 2005 à 2010.

Au niveau des ouvrages P-2H, P-2B et PIB2 les niveaux piézométriques passent respectivement de 1 à 0.74 m, de -2.16 à -2.49 m et de 0.653 à 0.55 m entre 2000 et 2005. (Figure 27)

Au niveau des piézomètres PIB3 ; P-4B, le niveau piézométrique est passé respectivement de 3.59 à 2.72 m entre 2000 et 2005 et de 1.35 à 0.92 entre 2001 et 2005. (Figure 28)

Cette baisse des niveaux piézométriques pourrait être liée à l'augmentation des pompages au niveau des forages de Dakar qui était de 4 977 022 m³ en 2000 et qui est passé à 5 833 920 m³ en 2004.

De 2005 à 2010 ; On observe une remontée des niveaux piézométriques au niveau des ouvrages (P-2B, P-2H, PIB2, PIB3 et P-4B). Les niveaux piézométriques passent respectivement de -2.49 à -1.937 m ; de 0.74 à 0.98 m ; de 2.72 à 3.6m ; de 0.92 à 1.35 m au niveau de ces ouvrages. Cette remontée des niveaux piézométriques durant cette période pourrait être due à la réduction des prélèvements de la nappe, qui est passé de 5 833 920 m³ en 2004 à 4 167 739 m³ en 2009. La réalimentation de la nappe s'expliquerait aussi par l'apport des pluviométries moyennes à excédentaires au cours des années 2005 (665 mm), 2006 (421 mm), 2008 (512 mm), 2009 (555 mm) et 2010 (577 mm).

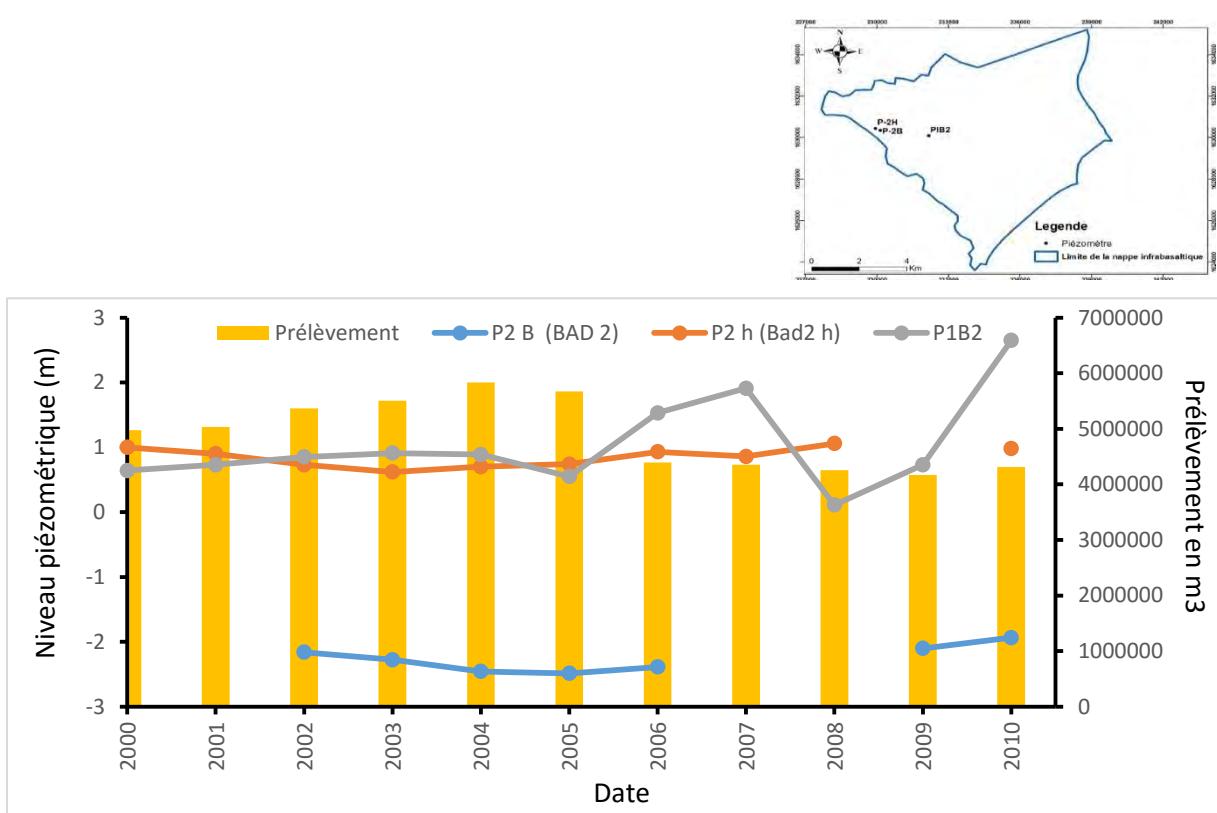


Figure 27: Evolution de la piézométrie entre 2000 et 2010 au niveau de quelques ouvrages situés sur la côte Ouest

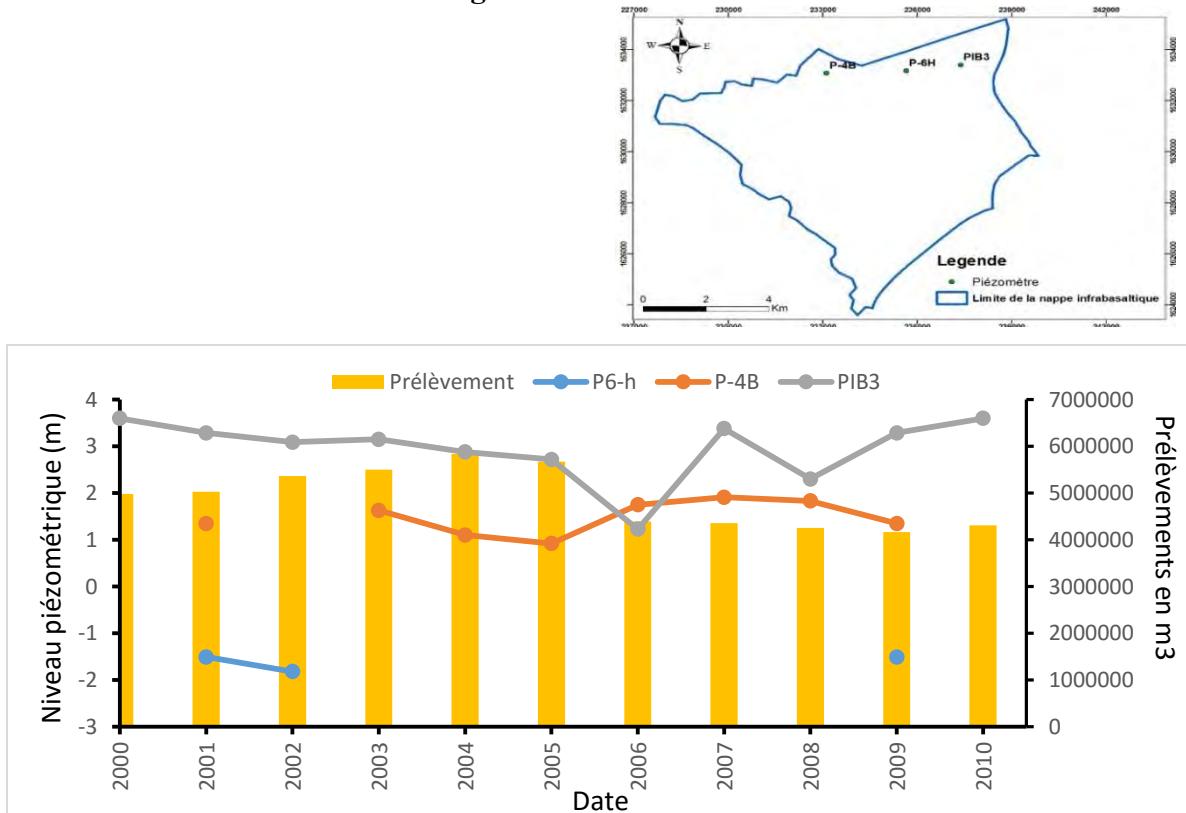


Figure 28: Evolution de la piézométrie entre 2000 et 2010 au niveau de quelques ouvrages situés au Nord de la presqu'île

D'une manière générale, on remarque une diminution progressive de la côte piézométrique de la nappe de 2000-2005 suite à une augmentation des pompages des forages de Dakar durant cette période.

De 2005 à 2010, on observe une remontée du niveau piézométrique qui pourrait être due à la réduction des pompages et aux variations saisonnières.

Durant la période 2010-2020, on note à nouveau une baisse plus marquée du niveau piézométrique, qui pourrait être causée par les prélèvements élevés au niveau de la nappe infrabasaltique pour satisfaire les besoins en eau potable de Dakar. Cette baisse de la côte piézométrique qui est plus prononcée durant la période (2014-2019) pourrait être due à une surexploitation de la nappe avec des prélèvements d'eau qui passent de 6 503 517 à 12 735 091 m³ entre 2014 et 2018 suite aux forts pompages avec la réalisation de nouveaux forages dans le cadre des différents programmes d'urgence de sécurisation de l'AEP de Dakar (Figure 29).

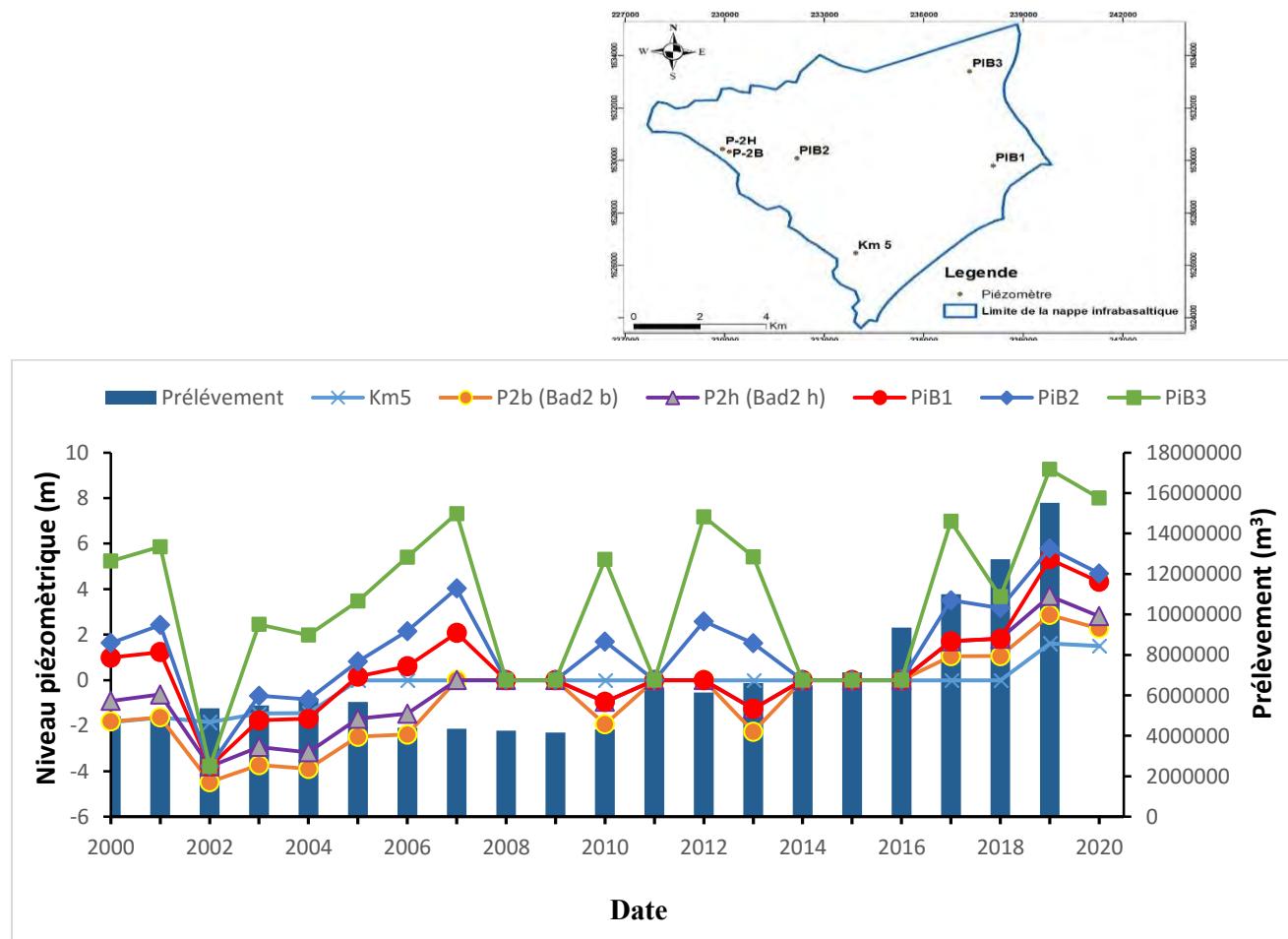


Figure 29: Evolution de la piézométrie au niveau de quelques ouvrages entre 2000 et 2020

III.1.2. Evolution mensuelle de la piézométrie

Au niveau des piézomètres PIB1 ; PIB2 ; PIB3 ; Aéroport Yoff Bad P4 bas bis ; Dakar Mamelles Bad P2 bas bis ; Dakar Mamelles Bad P2 haut bis et Km5 Seydou Nourou, les niveaux piézométriques passent respectivement de 1.21 à 0.21m, de 2.59 à 0.35m, de 3.44 à 2.79m, de 1.15 à 1.09m, de 1.2 à 0.76m, de 0.87 à 0.54m et de 3.92 à 2.18m entre Juin 2017 et Janvier 2020. (Figure 30 et 31)

La baisse de la côte piézométrique pourrait être due à l'augmentation des prélèvements d'eau de la nappe durant cette période car en 2016 la production des forages de Dakar était de 9 342 320 m³ contre 10 997 716 m³ en 2017. Les pompages ont atteint 12 735 091 m³ en 2018 et 13 806 375 m³ en 2019. Cette baisse pourrait également être due à une variation saisonnière de la piézométrie.

Par ailleurs au niveau de certains piézomètres, on observe une remontée de la nappe au mois de Décembre 2017, Décembre 2018 et Novembre 2019 qui correspond à une période de haute eau. Ceci semble étroitement lié à la pluviométrie enregistré au niveau de la zone puisque l'infiltration des eaux de pluies à travers la couverture basaltique constitue une des sources d'alimentation de la nappe. (Gaye, 1986)

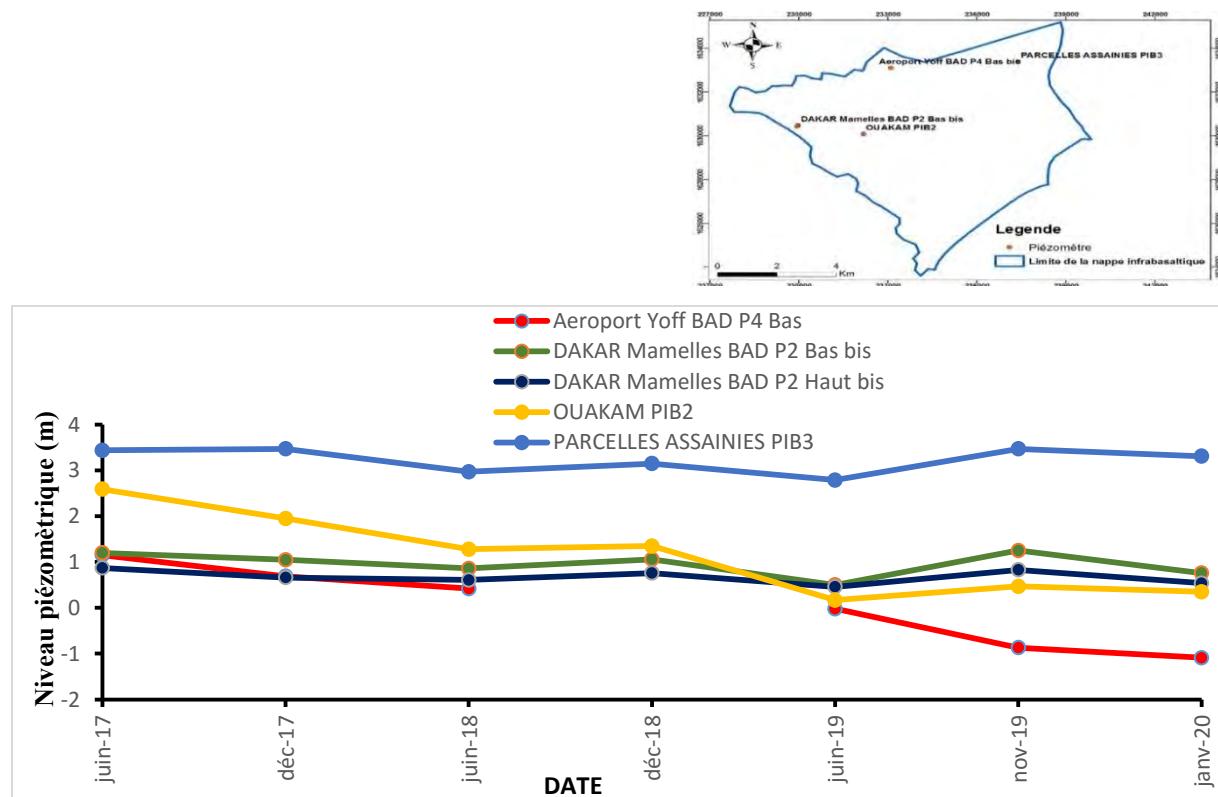
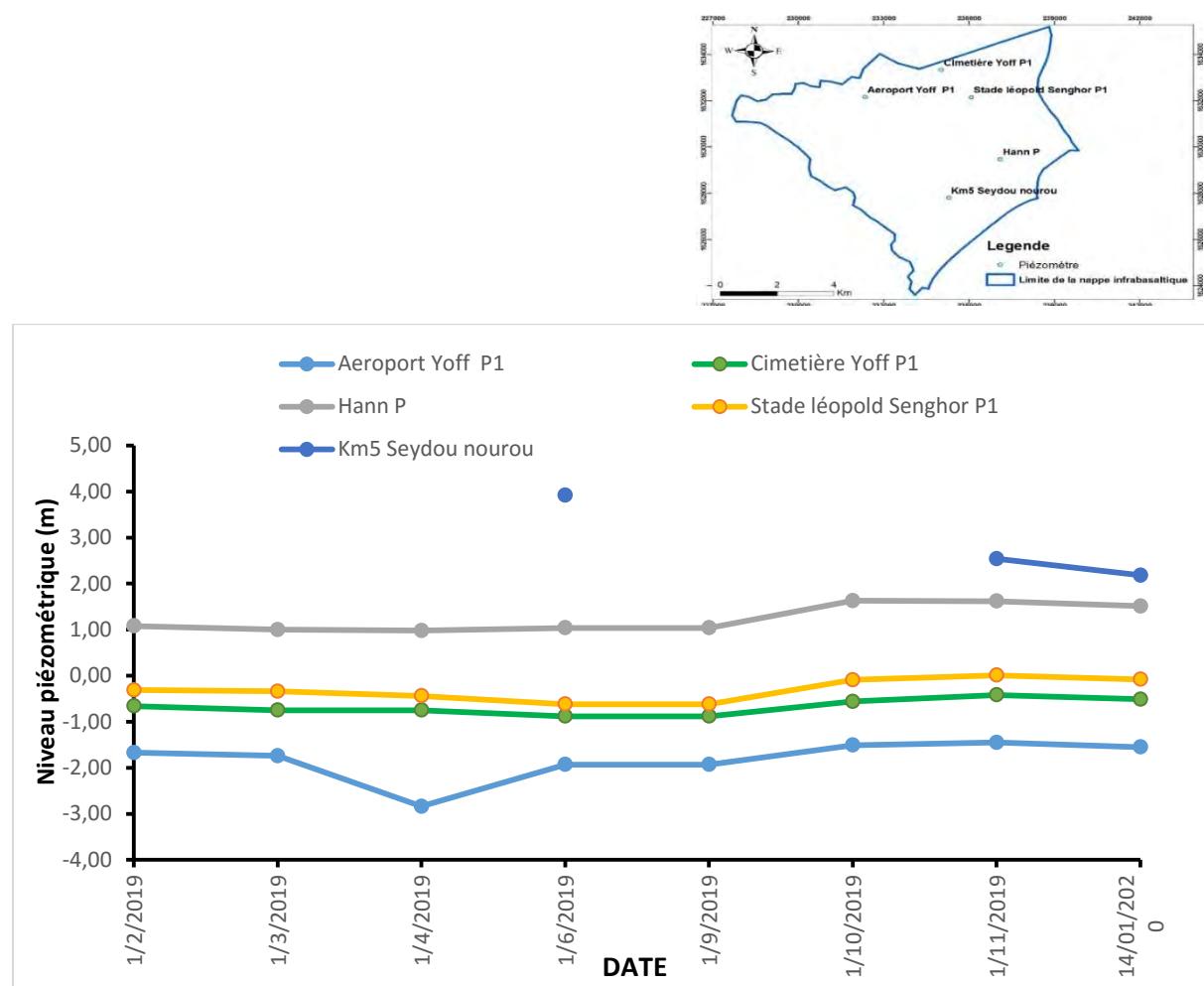
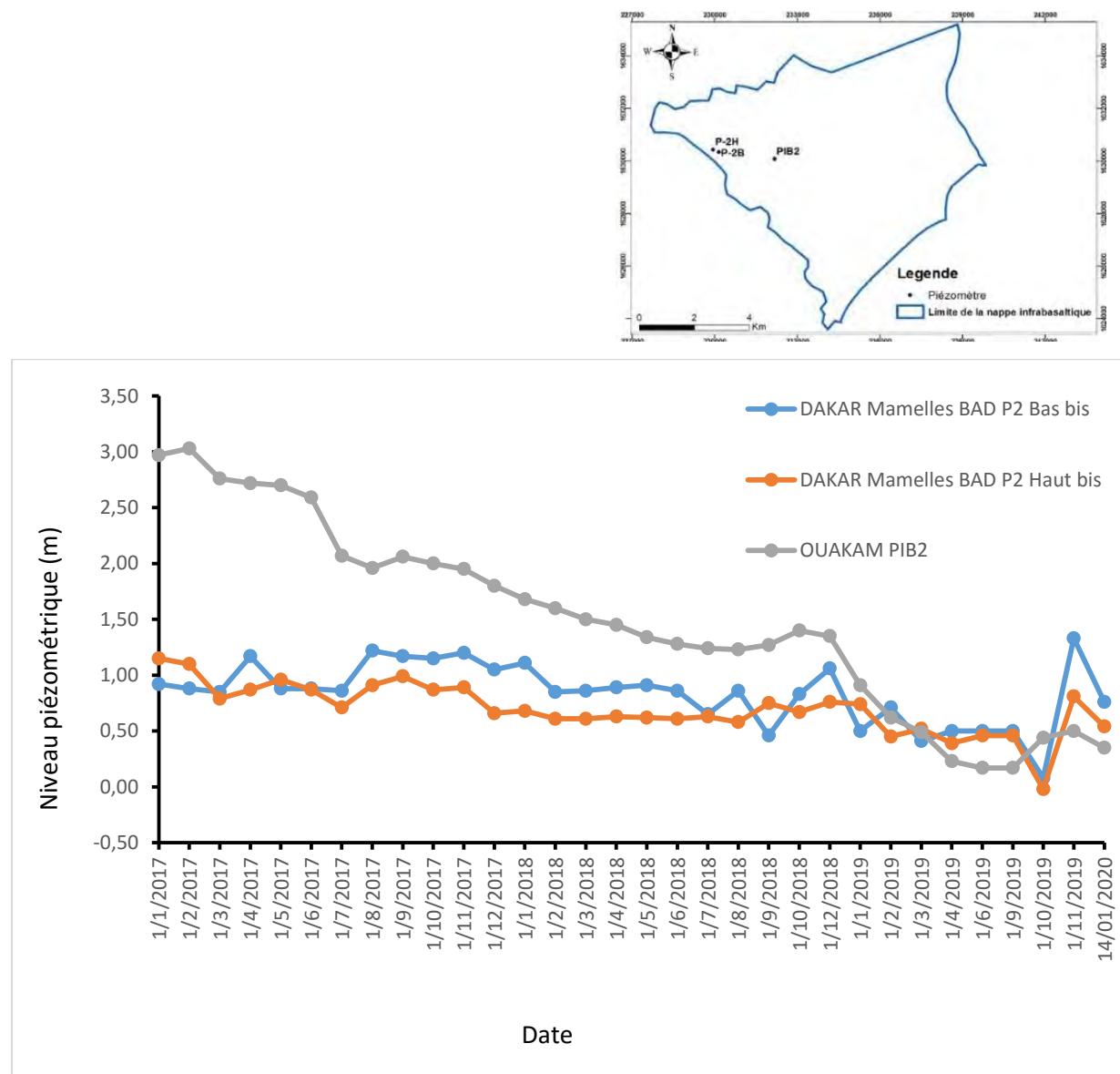


Figure 30: Evolution de la piézométrie dans quelques piézomètres (Aéroport Yoff Bad P4 bas bis ; Dakar Mamelles Bad P2 bas bis ; Dakar Mamelles Bad P2 haut bis ; PIB2 et PIB3) de 2017 à 2020

Cependant, au niveau des piézomètres (Aéroport Yoff P1, Stade LSS P1, Cimetière Yoff P1 et Hann P1), on observe une élévation du niveau piézométrique qui passe de -1.92 à -1.55 m (Aéroport Yoff P1), de -0.62 à -0.51m (Stade LSS P1), de -0.88 à -0.51m (Cimetière Yoff P1) et de 1.04 à 1.51m (Hann P1) entre Juin 2019 et Janvier 2020. (Figure 31). La hausse des niveaux entre Juin et Janvier au niveau des ouvrages de Parc Hann et Aéroport Yoff pourrait être dû à l'infiltration directe des eaux de pluies car ces ouvrages se trouvent dans des zones d'infiltration privilégié (Beture Setame, 1984). La faible couverture basaltique observée au niveau du piézomètre P1 SLSS peut être à l'origine de la remontée de la côte piézométrique.



Les chroniques piézométriques au niveau des trois piézomètres P2 Bas bis, P2 Haut bis et PIB2 montrent une baisse régulière de Janvier 2017 à septembre 2019 suivie d'une remontée de la nappe notée entre septembre 2019 et janvier 2020. (Figure 32)



L'évolution de la piézométrie des ouvrages de PIB3 et Aéroport Yoff BAD P4 Bas montre une tendance globale à la baisse entre janvier 2017 et janvier 2020. (Figure 33)

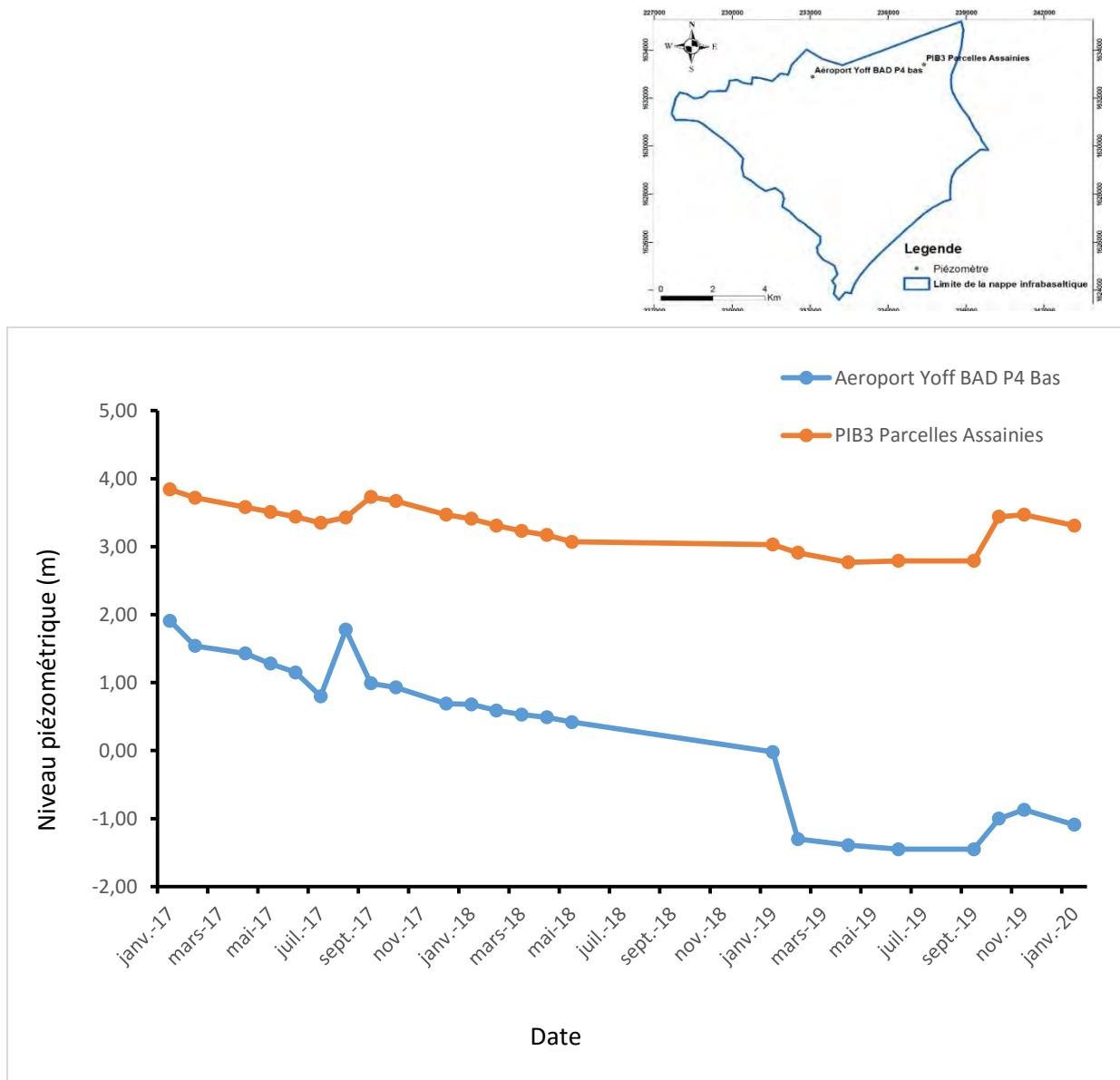


Figure 33: Evolution de la piézométrie des piézomètres de PIB3 et Aéroport Yoff BAD P4 Bas entre 2017 et 2020

III.2. Caractérisation hydro chimique de la nappe infra basaltique

III.2.1. Les paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques obtenus depuis 2014 ont permis de caractériser la nappe infrabasaltique.

III.2.1.1. La température

La température joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux. Elle varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol. Les valeurs de températures relevées dans la nappe entre Juin 2014 et Juin 2019 sont comprises entre 23.5 et 40.1 °C avec une moyenne de 30.3 °C (Tableau 3). On remarque que les valeurs obtenues au cours des campagnes d'échantillonnages du mois de Juin sont plus élevées que celles obtenues au mois de Décembre. Ces variations de la température témoignent l'influence de la température extérieure ou des saisons.

Tableau 3: Statistique descriptive des valeurs de température de la nappe infra basaltique

T°C	Juin 2014	Déc-2014	Juin 2015	Déc-2015	Juin 2016	Déc-2016	Juin 2017	Déc-2017	Déc-2018	Juin 2019
Minimum	30.5	23.5	27.5	25	37.8	25.4	29.1	24.9	24.8	29.6
Maximum	32.2	28.9	31.1	30.6	40.1	29.9	30.2	30.1	30.5	32.5
Moyenne	31.2	27.7	29.6	28.9	38.1	28.5	30	30	29.1	31
Ecart type	0.89	2.49	1.71	1.55	2.72	1.4	0.69	1.49	1.17	1.01

III.2.1.2. Le pH

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Les valeurs de pH montrent que la majorité des points d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme de potabilité (6.5 - 8.5) (OMS, 2011)) mais avec des valeurs variables. Les valeurs relevées entre 2014 et 2019 oscillent entre 5.75 et 7.63 avec une valeur moyenne de 6.85 (Tableau 4). Ces gammes de valeurs de pH montrent que les eaux de la nappe sont majoritairement acides à neutres.

Tableau 4: Statistique descriptive des valeurs de pH de la nappe infra basaltique

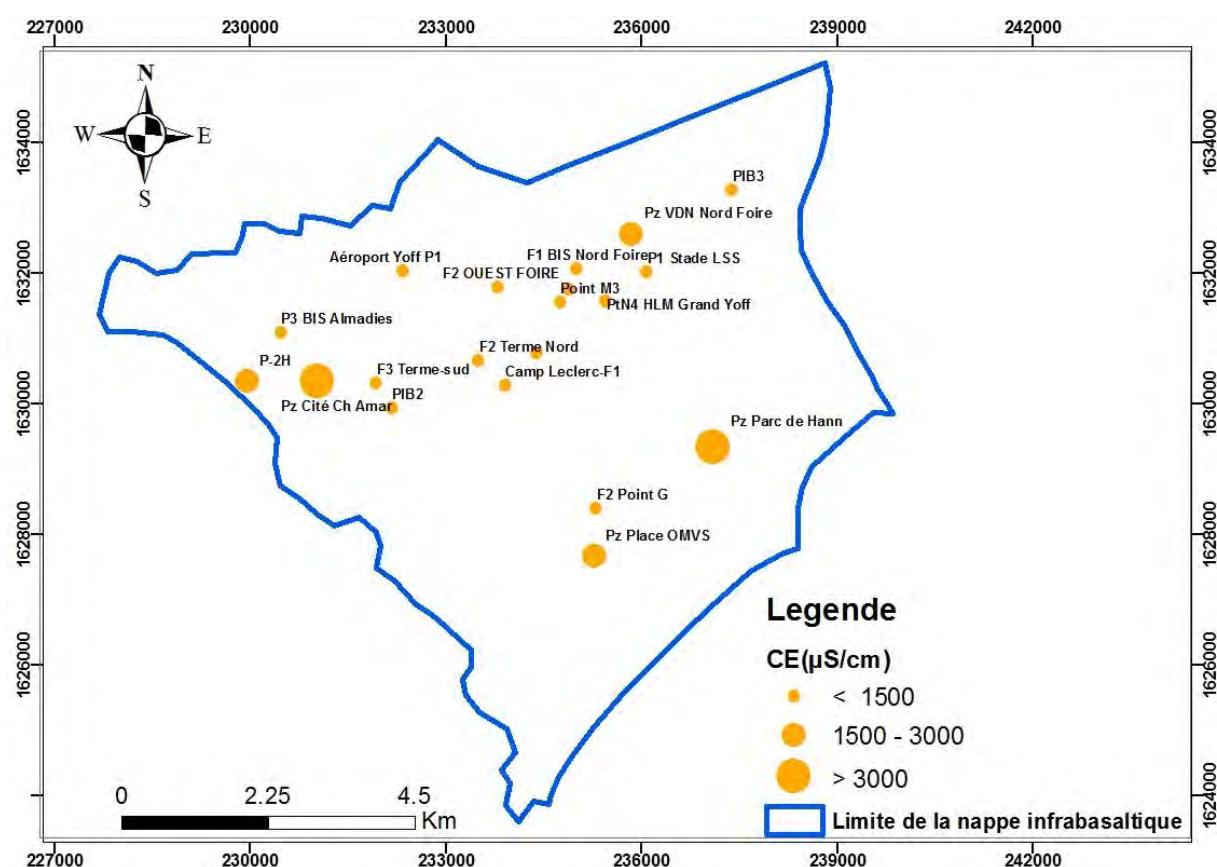
pH	Juin 2014	Déc- 2014	Juin 2015	Déc- 2015	Juin 2016	Déc- 2016	Juin 2017	Déc- 2017	Déc- 2018	Juin 2019
Minimum	6.13	6.2	6.27	6.28	6.38	6.52	6.59	5.75	6.66	6.6
Maximum	6.99	7.19	7.13	7.54	7.4	7.11	7.13	7.63	7.63	7.51
Moyenne	6.59	6.68	6.77	6.81	6.8	6.83	6.94	6.93	7.13	7.03
Ecart type	0.24	0.26	0.18	0.32	0.31	0.16	0.14	0.48	0.3	0.29

III.2.1.3. La Conductivité électrique

La conductivité électrique permet d'apprécier la minéralisation des eaux d'une nappe. Elle est liée à la présence des espèces ioniques en solution.

III.2.1.3.1. Variation spatiale de la conductivité électrique

La conductivité électrique des eaux de la nappe infrabasaltique (Juin 2019) varient entre 365 et 37181 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 3270.22 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Saxena et al. (2004) et Mondal et al. (2009) ont classé les eaux sur la base de la CE en trois catégories : eau douce ($<1500 \mu\text{S}/\text{cm}$), eaux saumâtre ($1500\text{-}3000 \mu\text{S}/\text{cm}$) et eau saline ($>3000 \mu\text{S}/\text{cm}$). Sur la base de cette classification, 70% et 20% des échantillons appartiennent respectivement aux classes d'eau douce et saumâtre. La répartition spatiale des valeurs de la conductivité électrique (Figure 34) montre que les valeurs les plus élevées (≥ 1500) qui indiquent en général une minéralisation moyenne à forte s'observent au niveau des ouvrages Pz de Parc Hann (37181 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Pz Ouakam Cité Cheikh Amar (11590 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Pz Place OMVS (2203 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Pz VDN Nord Foire (1927 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Mamelles Bad P2 haut bis (1957 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Ces valeurs très élevées pourraient être dues à une intrusion saline liées aux pompages mais également à une pollution.



III.2.1.3.2. Evolution temporelle de la conductivité électrique

Entre Juin 2014 et Décembre 2015, la conductivité électrique augmente de l'ordre de 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au Point M1, de 9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au Point M2 et de 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au Terme Nord. De Décembre 2015 à Juin 2016, on observe une augmentation importante de la conductivité. La conductivité a augmenté d'une valeur de 233 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au Point M1, de 273 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au Point M2 et de 162 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au Terme Nord. En décembre 2016, on note une diminution importante de la conductivité. Cette diminution pourrait être due à une variation saisonnière (dilution en hautes eaux). La période allant de Décembre 2016 à Juin 2019, on observe une augmentation de la conductivité de l'ordre de 41, 18 et 17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement au niveau des forages Point M1, Point M2 et Terme Nord. (Figure 35 et 36).

Pour le forage Terme Sud, la conductivité électrique augmente d'une valeur de 245 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre Juin 2014 et Juin 2019.

Au niveau du forage Point G1, on observe une augmentation de la conductivité, passant de 698 à 833 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre Juin 2014 et Décembre 2015. Cette augmentation peut être liée à l'accroissement du débit d'exploitation du forage mais également au variation saisonnière. En

juin 2016, on note une diminution de la conductivité pour une valeur de 137 $\mu\text{s}/\text{cm}$ suite à une réduction des prélèvements. De Décembre 2016 à Juin 2019, on observe une augmentation progressive de la conductivité jusqu'à atteindre une valeur de 1332 $\mu\text{s}/\text{cm}$, soit une augmentation de 636 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Figure 38).

Au Camp Pénal, on note une augmentation progressive de la conductivité électrique passant de 844 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en Juin 2014 à 1083 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en Juin 2019 (Figure 39).

Au Fort A, la conductivité connaît une tendance à la hausse durant la période 2014-2019. En effet cette dernière est passée de 1047 à 1100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ entre juin 2014 et juin 2019. Cependant, on observe une diminution de la conductivité jusqu'à une valeur de 1036 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en juin 2017 suite à une diminution de la production du forage. (Figure 40)

Au front de Terre, la conductivité a augmenté d'une valeur de 154 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pendant la période Juin 2014-Juin 2019.

La période allant de 2017-2019 montre une augmentation importante de la conductivité électrique au niveau de certains forages. La conductivité a augmenté de l'ordre de 171 ; 225 ; 164 ; 96 ; 58 et 95 $\mu\text{s}/\text{cm}$ respectivement au niveau des forages Ouest Foire, HLM Grand Yoff, F2 Nord foire, Terme sud 3, Camp Leclerc 2 et Point G2. (Figure 42 et 43)

Le suivi de l'évolution de la conductivité électrique révèle une tendance générale à la hausse de celle-ci durant la période 2014-2019. Cette période correspond à la mise en service de nouveaux forages dans la zone où les prélèvements passent de 19562 m^3/j en 2015 à 42489 m^3/j en 2019. L'augmentation de la conductivité électrique pourrait être donc due à l'accroissement de la production des forages.

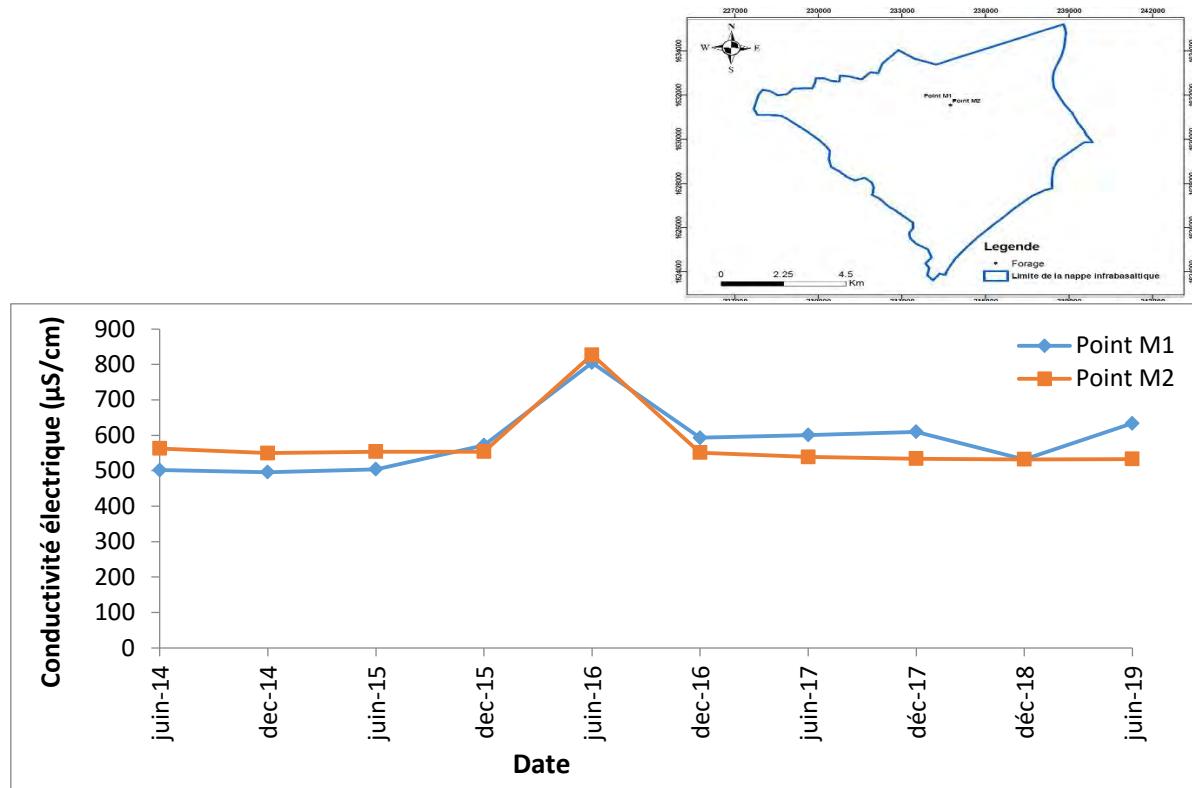


Figure 35: Evolution de la conductivité électrique au niveau des forages Point M1 et Point M2 (2014 à 2019)

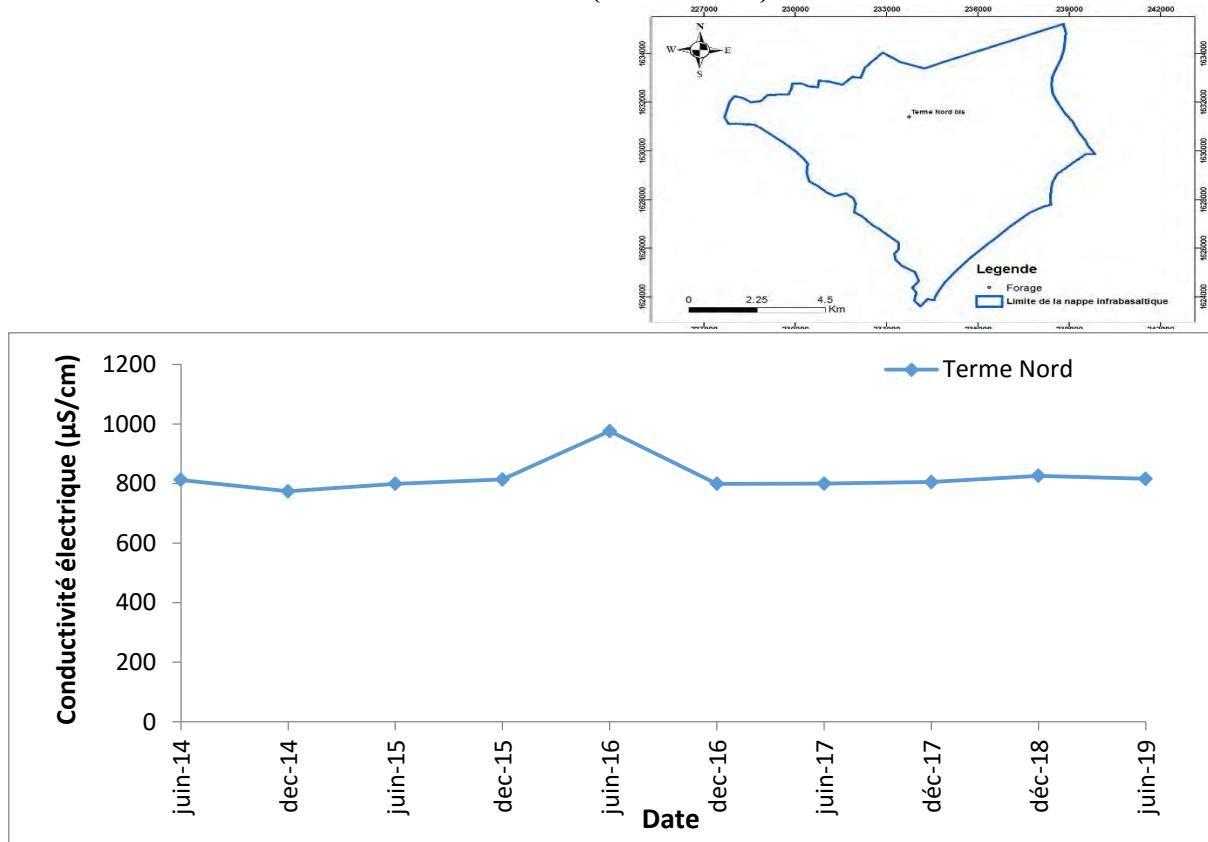


Figure 36: Evolution de la conductivité électrique du forage Terme Nord (2014 à 2019)

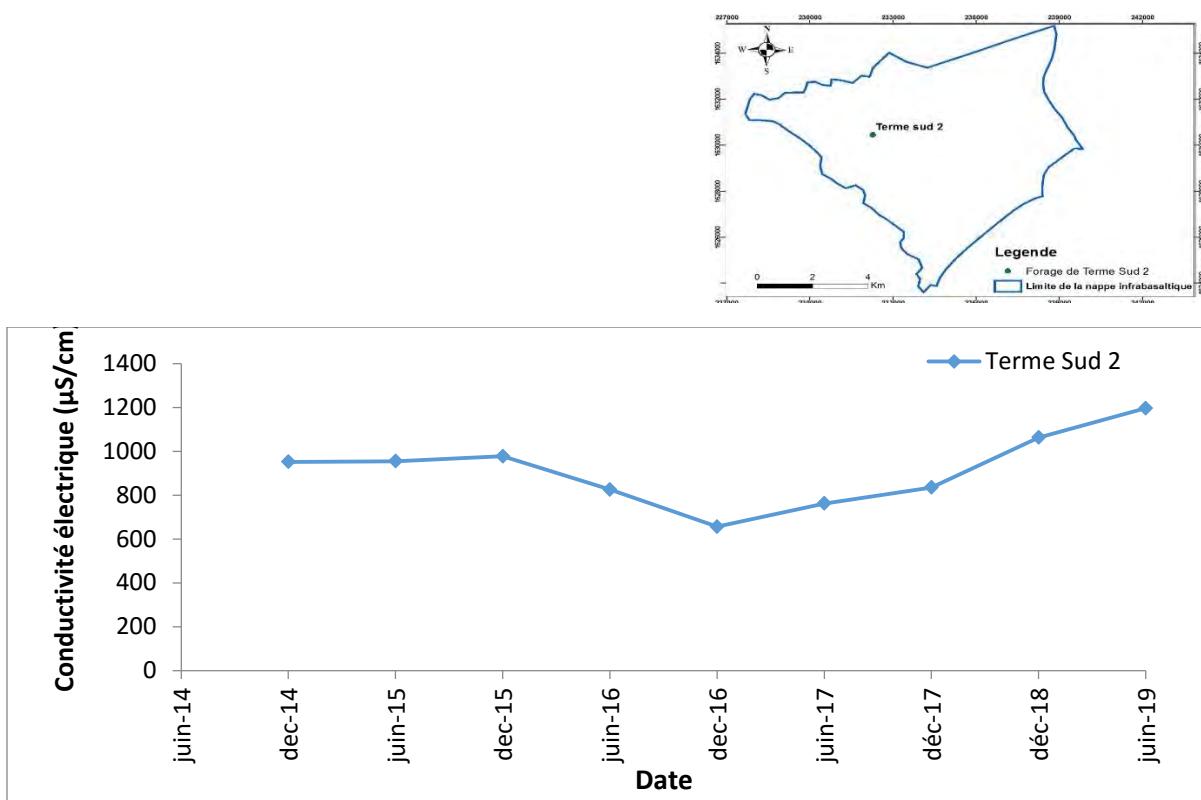


Figure 37: Evolution de la conductivité électrique au Terme sud 2 (2014 à 2019)

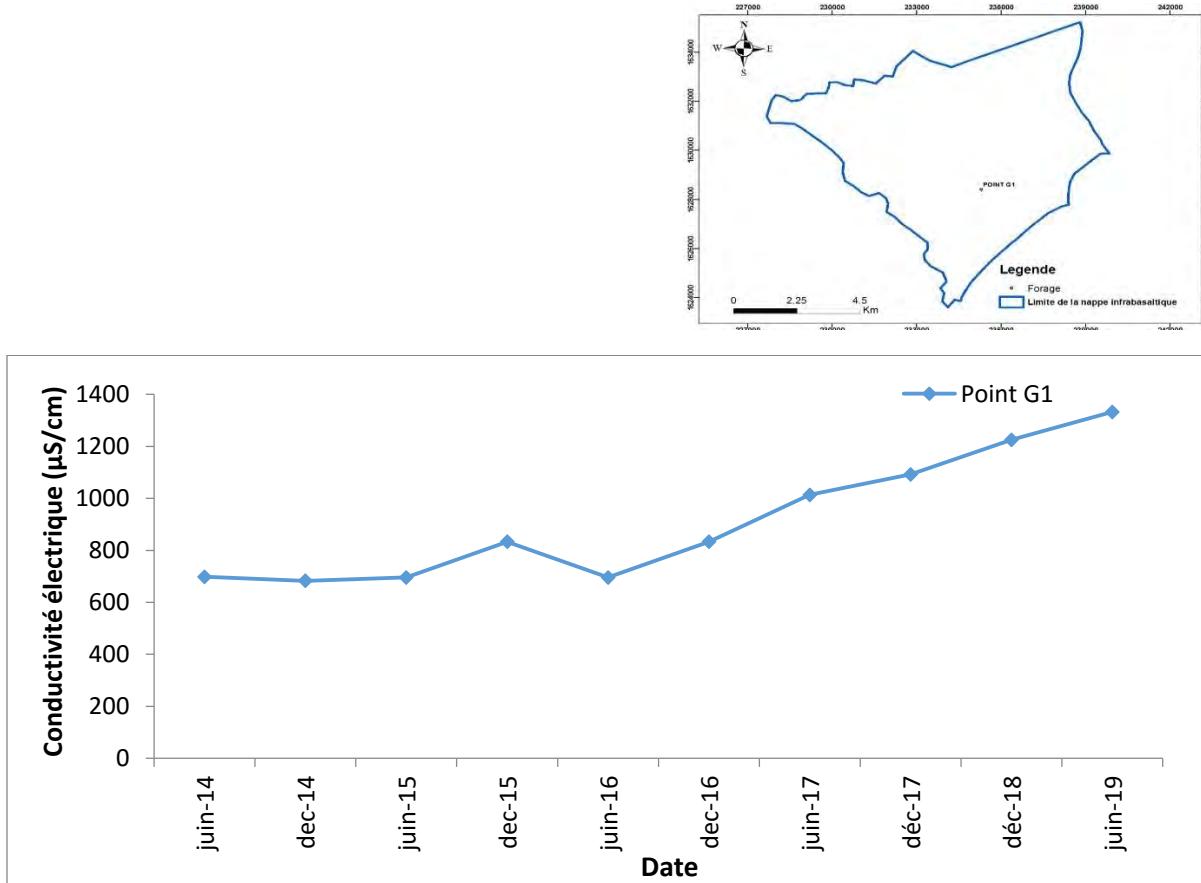


Figure 38: Evolution de la conductivité électrique au Point G1 (2014 à 2019)

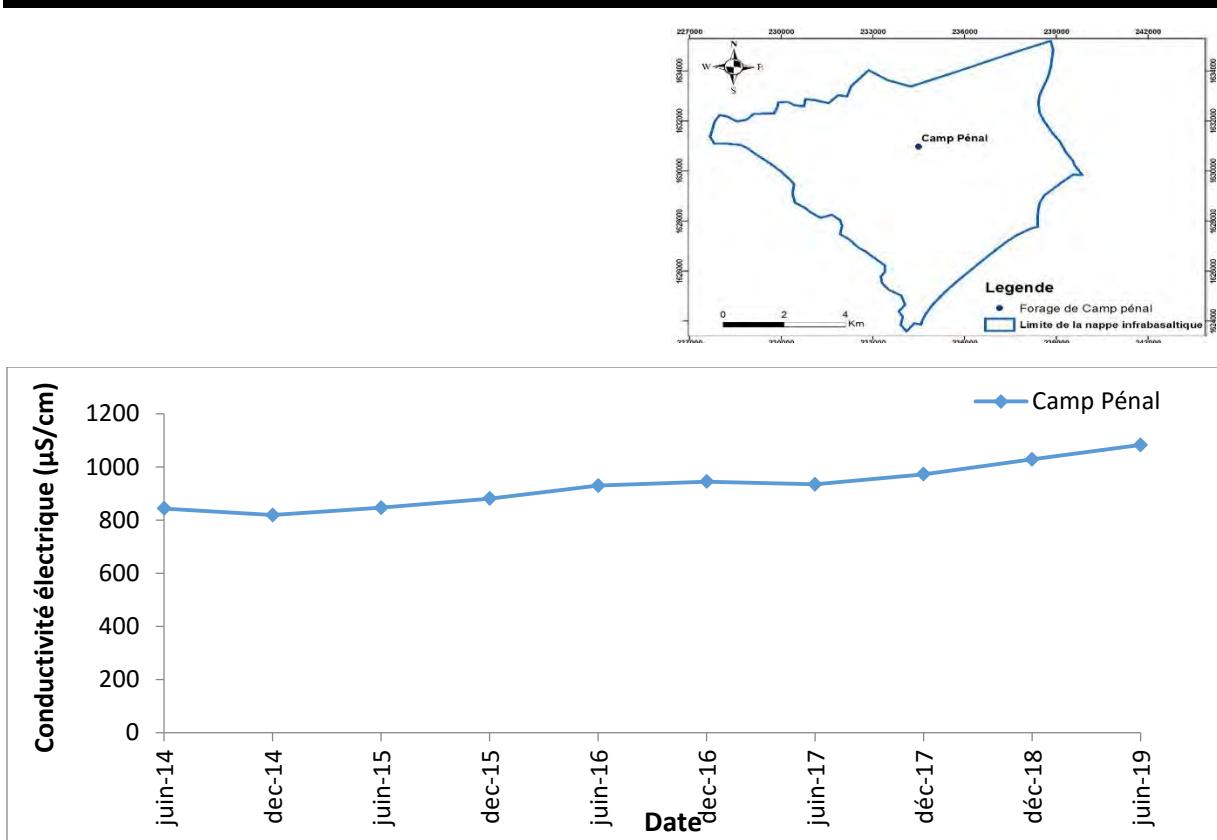


Figure 39: Evolution de la conductivité électrique au Camp Pénal (2014 à 2019)

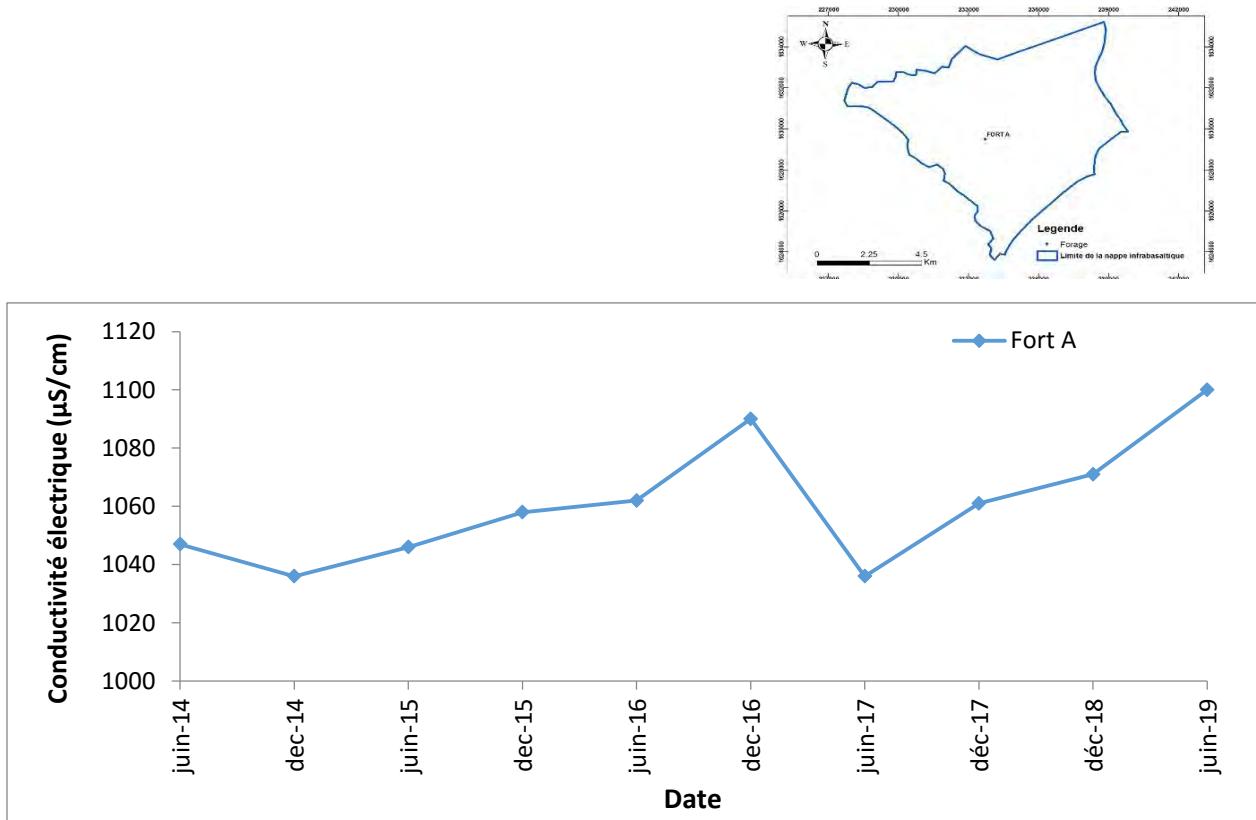


Figure 40: Evolution de la conductivité électrique au Fort A (2014 à 2019)

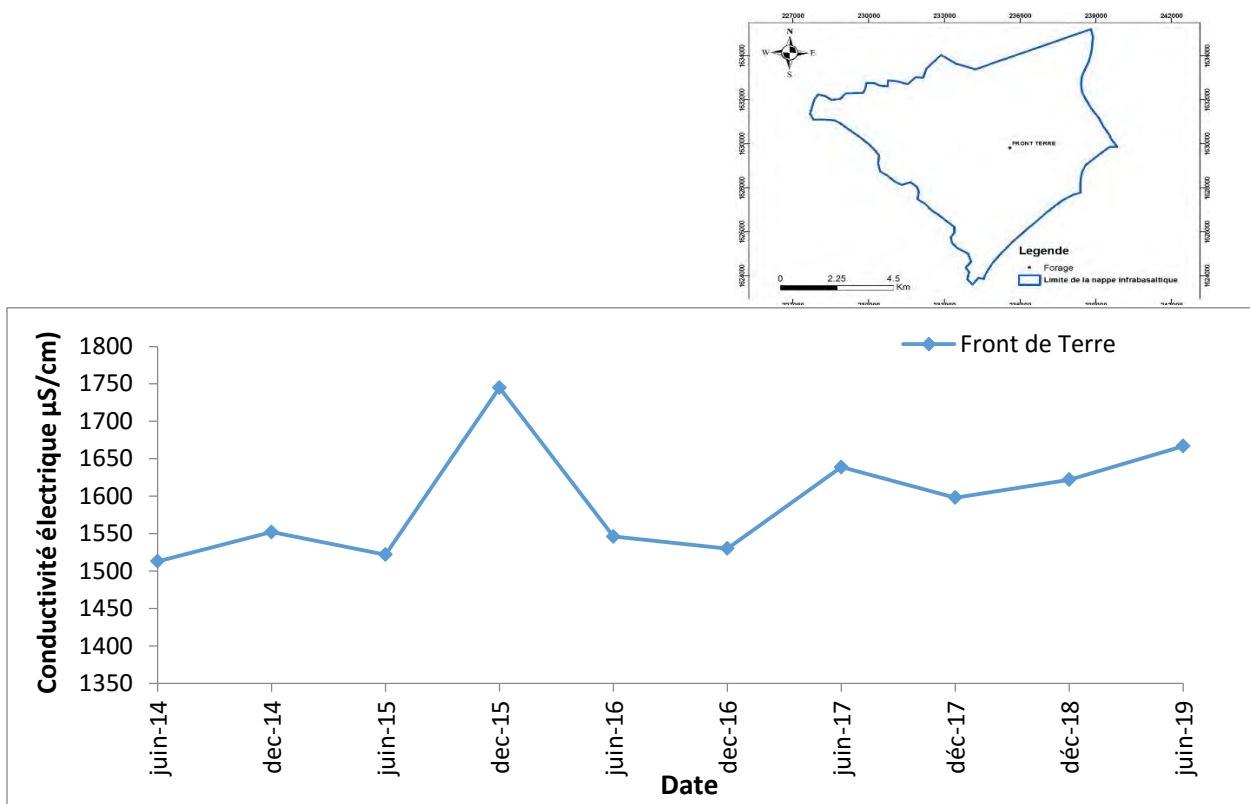


Figure 41: Evolution de la conductivité électrique au Front de Terre (2014 à 2019)

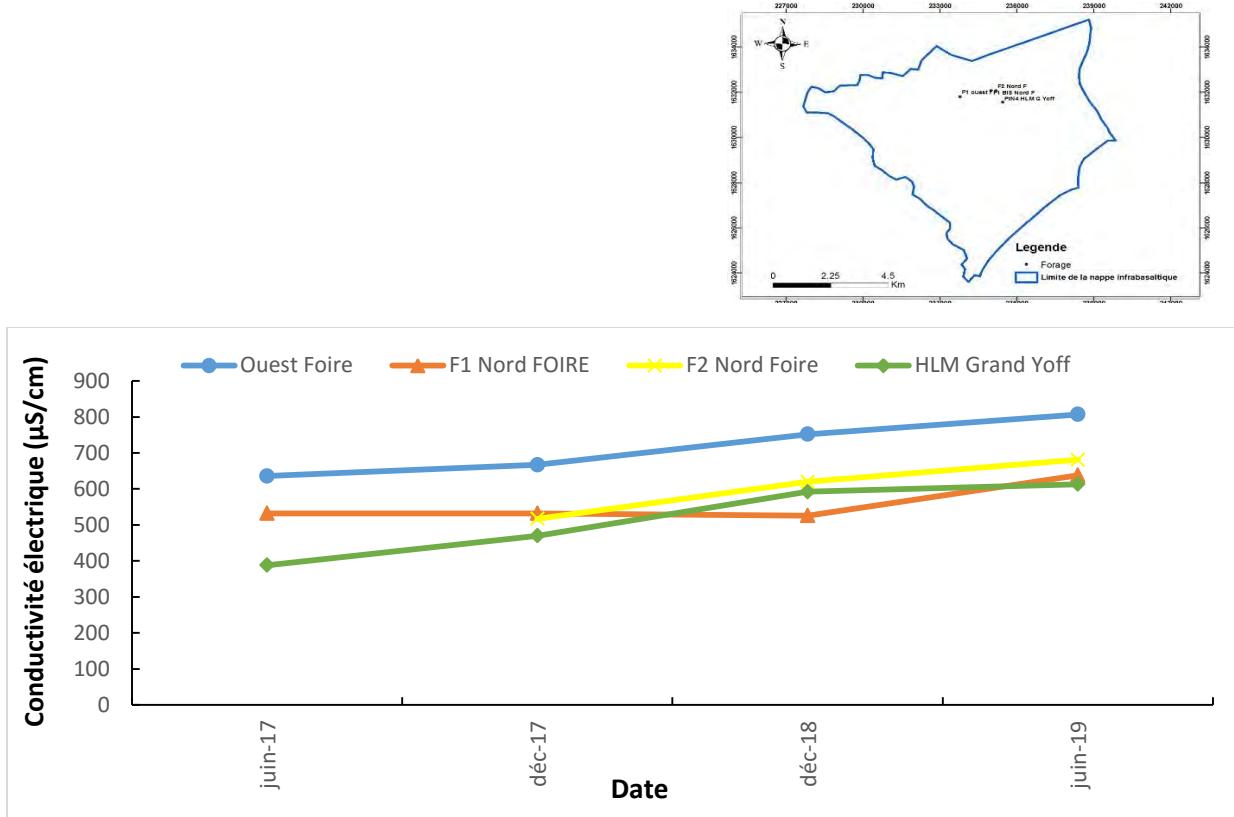


Figure 42: Evolution de la conductivité électrique au niveau des ouvrages Ouest Foire, F1 Nord Foire, F2 Nord Foire et HLM Grand Yoff (2017 à 2019)

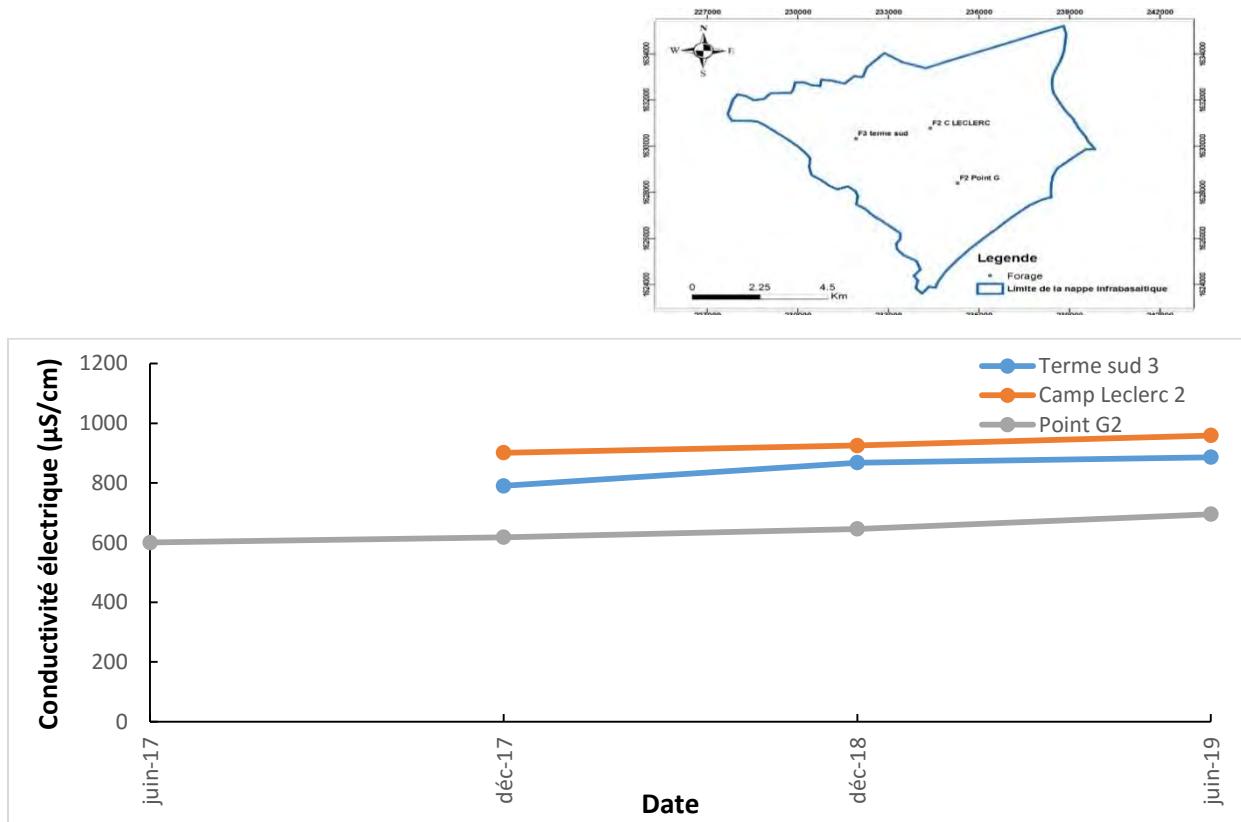


Figure 43: Evolution de la conductivité électrique au niveau des ouvrages Terme Sud 3, Camp Leclerc 2 et Point G2 (2017 à 2019)

Le suivi de l'évolution de la conductivité révèle une augmentation progressive de celle-ci sur la période 2000-2004. La conductivité a augmenté de l'ordre de 170, de 30, de 193 et de 211 $\mu\text{s}/\text{cm}$ respectivement dans les piézomètres de Km5, P2 bas, P2 haut et PIB2 (Figure 44). De 2004 à 2006, on assiste à une réduction des pompages (la production des forages diminue en moyenne d'une valeur de $3498 \text{ m}^3/\text{j}$ entre 2004 et 2006) et une légère diminution de la conductivité.

Entre Juin 2017 et Décembre 2019, on observe une augmentation de la conductivité électrique, passant de 732 à 1056 $\mu\text{s}/\text{cm}$ au niveau du piézomètre PIB2. De Juin 2017 à Juin 2019, la conductivité a augmenté de l'ordre de 52 et de 324 $\mu\text{s}/\text{cm}$ respectivement au niveau des piézomètres Dakar Mamelles BAD P2 bas et Dakar Mamelles BAD P2 haut (Figure 45). Et entre juin 2019 et décembre 2019, la conductivité a diminué de l'ordre de 400, de 189 et de 275 $\mu\text{s}/\text{cm}$ respectivement au niveau des piézomètres de Km5, P2 bas et P2 haut. Cette diminution de la conductivité électrique peut être due à l'infiltration des eaux de pluies.

L'augmentation de la conductivité observée entre les périodes 2000-2004 et Juin 2017-Décembre 2019 pourrait être attribuée à l'accroissement des prélèvements de la nappe (la

production de la nappe qui était de 13636 m³/j en 2000 pour atteindre une valeur de 15 984 m³/j en 2004 entre 2017 et 2019, la production est passé de 30130 à 42489 m³/j).

L'augmentation la plus élevée a été enregistrée au niveau du piézomètre de Parc Hann. La conductivité électrique est passée de 3980 μ s/cm en Décembre 2000 à 4890 μ s/cm en Décembre 2004. En Décembre 2019, on note une augmentation importante de la conductivité électrique avec une valeur de 43100 μ s/cm (Figure 46).

Cet ouvrage se situe dans la partie S-E qui est assimilée comme endroit des premières intrusions salines dans la nappe infrabasaltique (Gaye 1980). L'augmentation des prélèvements pourrait entraîner à une remontée de la conductivité électrique. En effet l'augmentation des pompages mènerait à une aspiration plus forte du biseau d'eau salée venant de la côte de Hann. Donc l'augmentation importante de la conductivité électrique pourrait être liée à une intrusion saline. Ceci est confirmé aussi par les faibles valeurs de nitrates obtenues au niveau de cet ouvrage, qui sont de l'ordre de 18 mg/l.

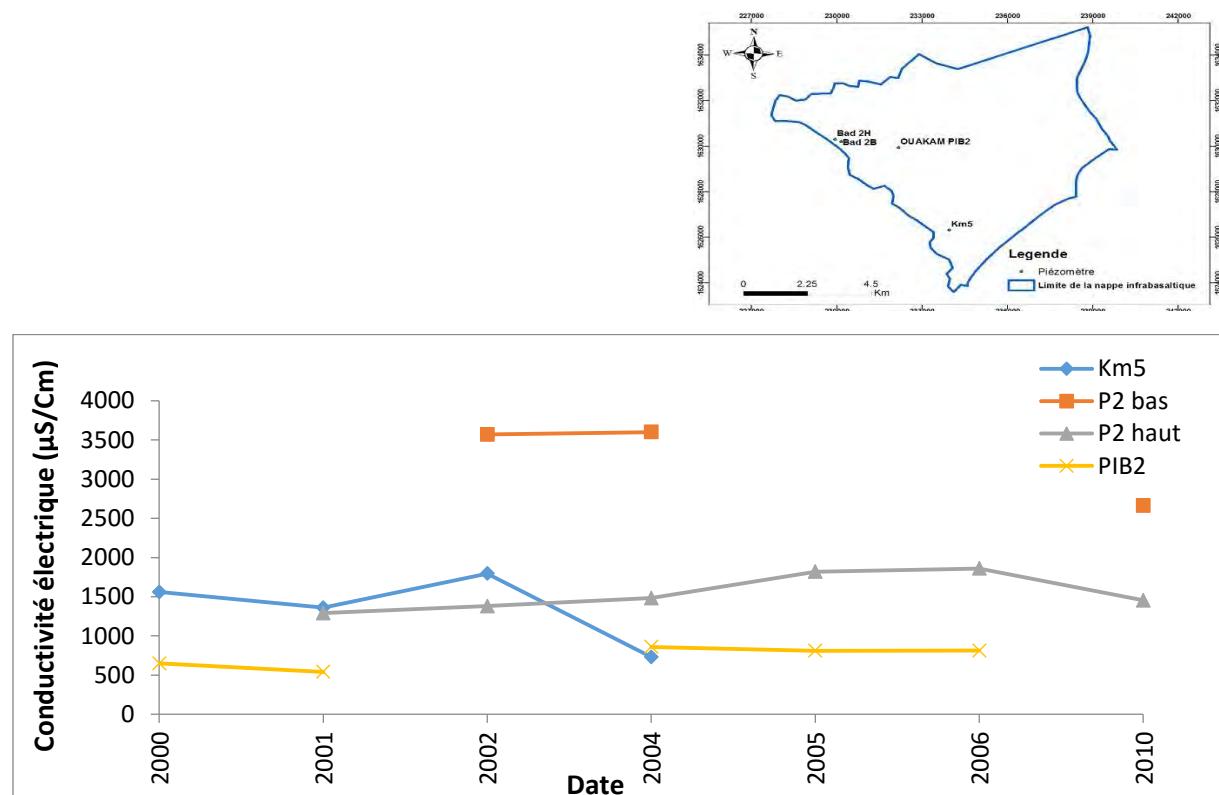


Figure 44: Evolution de la conductivité électrique au niveau des piézomètres Km5, PIB2, P-2H et P-2B (2000 à 2010)

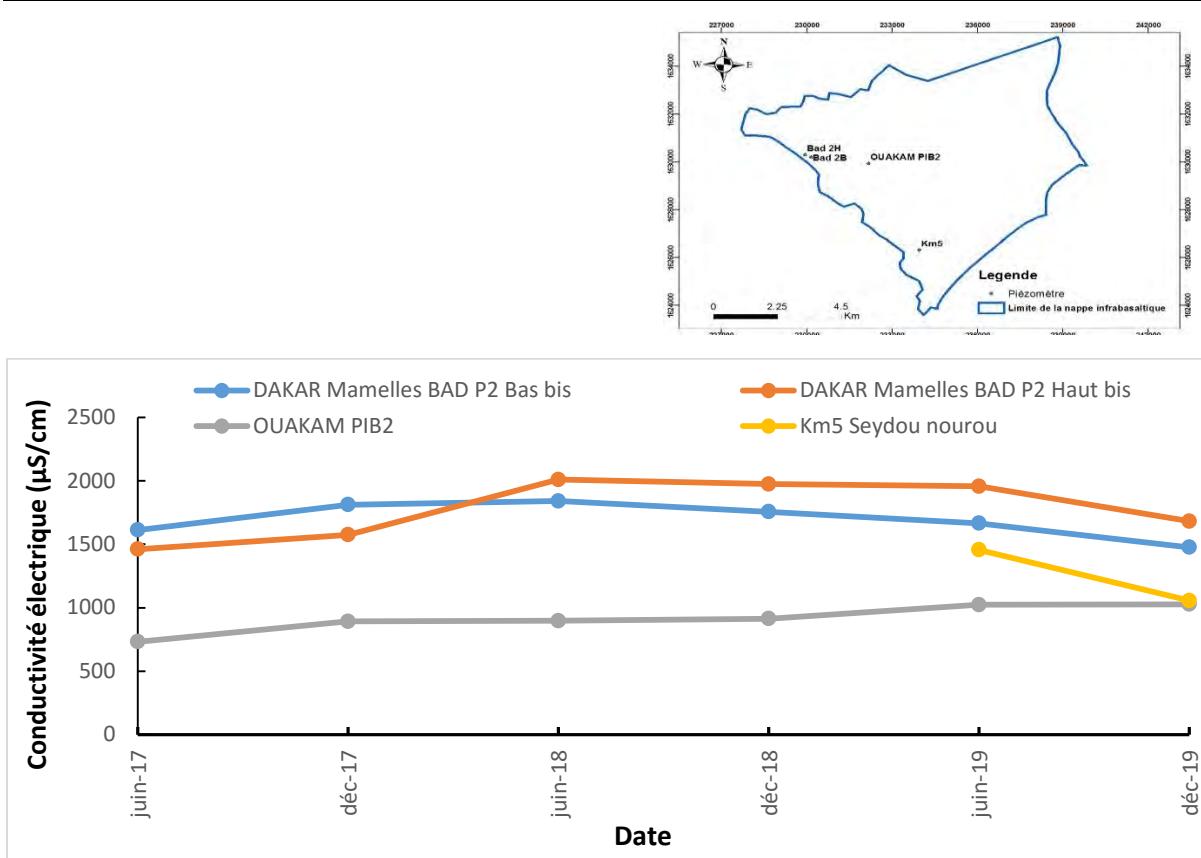


Figure 45: Evolution de la conductivité électrique au niveau des piézomètres Km5, PIB2, Dakar Mamelle BAD P2 bas bis et de Dakar Mamelle BAD P2 haut bis (2017 à 2019)

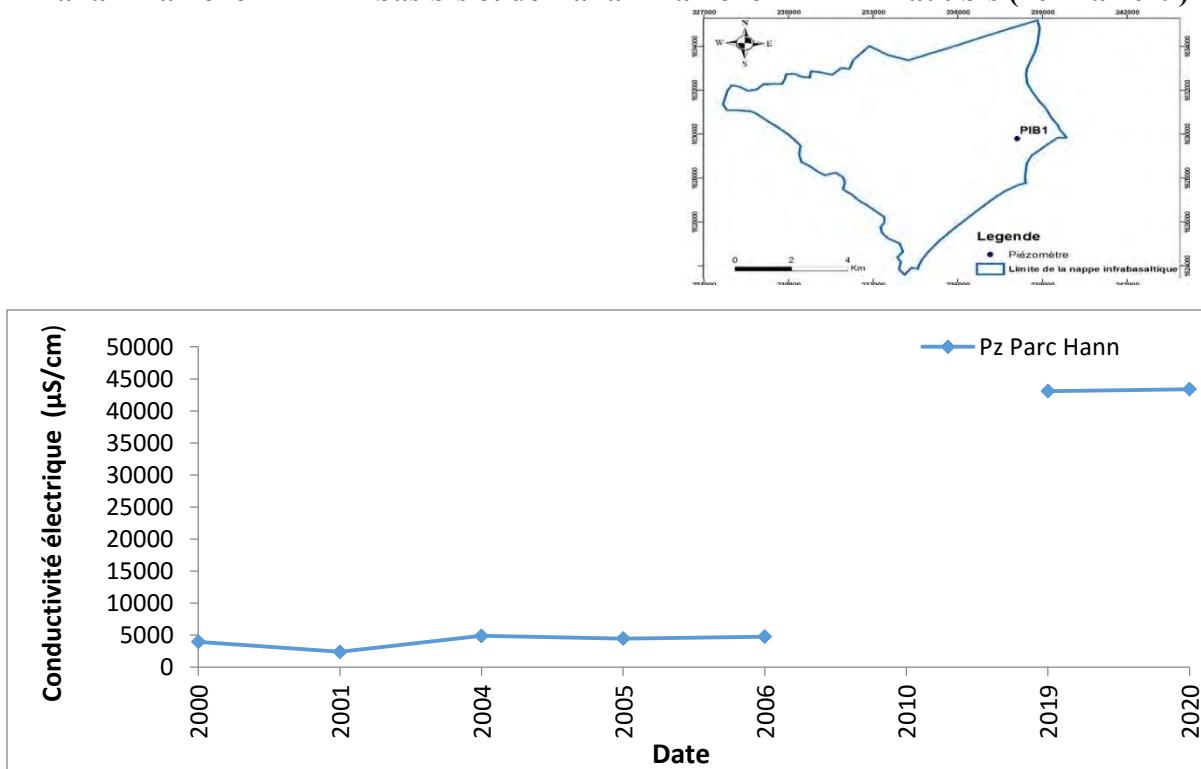


Figure 46: Evolution de la conductivité électrique de 2000 à 2020 au niveau du piézomètre de Parc Hann

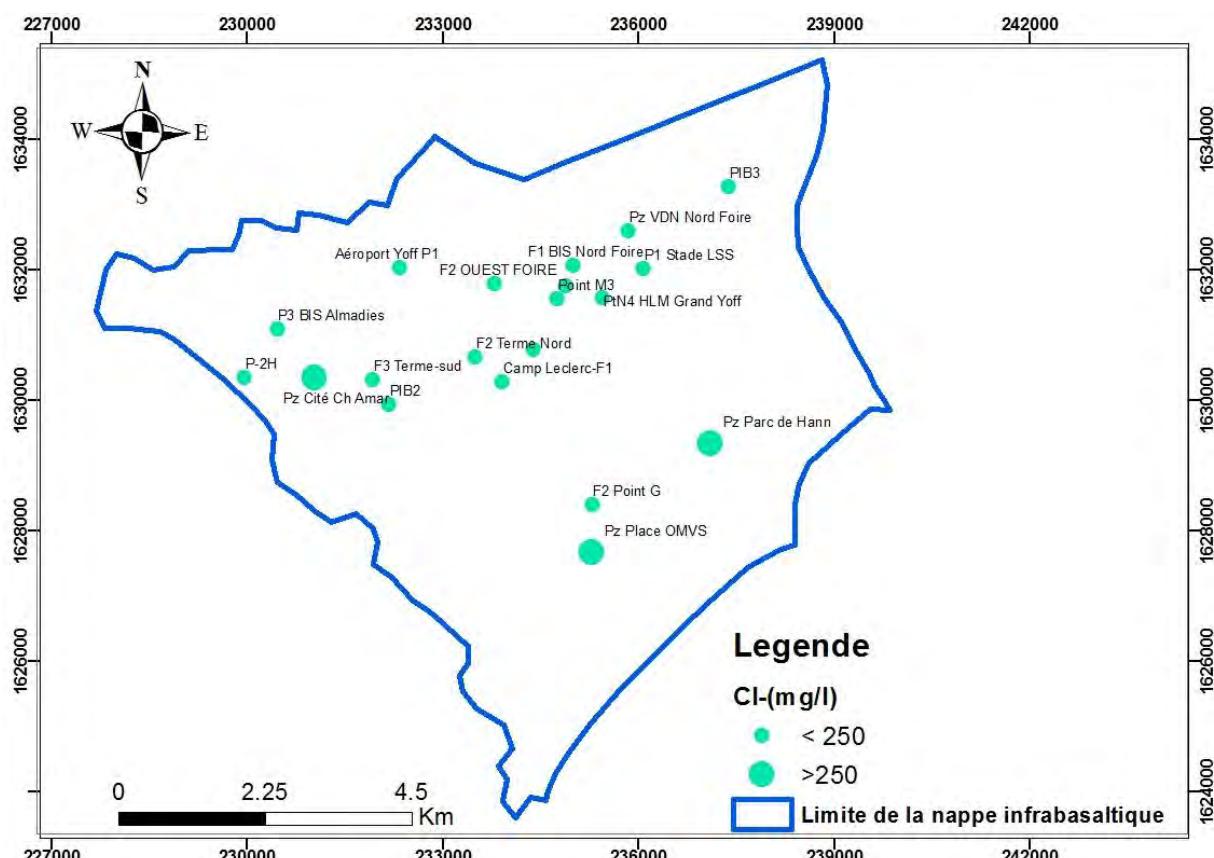
III.2.2. Evolution de la salinité de la nappe en rapport avec les prélevements

L'exploitation d'une nappe côtière se répercute sur son niveau piézométrique qui est souvent en relation avec l'interface eau douce / eau salée et influence la position et la forme de la zone de contact (Frissant et al.2005).

Les mesures de chlorures et de la conductivité électrique permettent de connaître le degré de salinisation de la nappe. L'évolution des concentrations de chlorures et des valeurs de la conductivité électrique nous permettent de suivre l'évolution temporelle de la salinisation et de mettre en évidence l'état de l'intrusion saline.

III.2.2.1. Variation spatiale des teneurs en chlorures

Les chlorures constituent l'espèce chimique prédominante de la nappe infrabasaltique. Elles varient de 67 à 14574 mg/l (Juin 2019). La carte de la variation spatiale (Figure 47) montre que les teneurs les plus élevées sont observées au niveau des piézomètres (Parc Hann avec une valeur de 14574 mg/l et Pz Ouakam Cité Cheikh Amar (4118 mg/l) qui se situent à proximité de la mer. La concentration de chlorures au niveau de ces ouvrages dépasse largement la norme de potabilité des eaux (250 mg/l (OMS, 2011)).



III.2.2.2. Evolution temporelle des teneurs en chlorures

Le chlorure est un élément conservatif, ne participe pas aux interactions eau-roche et est non influencé par les processus redox. Il est très soluble, peu actif chimiquement et constitue un traceur idéal pour mesurer le degré de salinisation de la nappe.

Les données recueillies montrent une augmentation des teneurs en Cl^- sur la période entre Juin 1978 – Juin 2014. Durant cette période, on note que les prélèvements de la nappe infrabasaltique oscillent entre $13777 \text{ m}^3/\text{j}$ et $19465 \text{ m}^3/\text{j}$. Les concentrations augmentent respectivement de 117.5 à 149 mg/l, de 71 à 107 mg/l, de 99.4 à 184 mg/l, de 113.6 à 177 mg/l respectivement au niveau des forages Camp pénal, Point M, Fort A et Terme sud (Figure 48). Par contre, on assiste à une diminution des teneurs en chlorures au niveau du forage de Terme Nord durant la période Décembre 2004 – Juin 2014.

Pour la période Décembre 2014 – Juin 2019 : on observe une augmentation importante des teneurs en chlorures au niveau de certains forages (Figure 49, 50 et 51). Ces teneurs en chlorures varient respectivement entre 127,8 à 227 mg/l au Point G1, 99.4 à 134.9 mg/l au Point G2, 85.2 à 120.7 mg/l au HLM Grand Yoff, 92 à 142 mg/l au Point M1, 177.5 à 220.1 mg/l au Terme sud 2, 277 à 327 mg/l au Front Terre, 184 à 213 mg/l au Fort A, 106 à 156 mg/l au F2 Terme Nord Cité Tobago. Cette augmentation importante des concentrations en chlorures pourrait être due à l'accroissement des prélèvements durant cette période, au variation saisonnière et à la proximité de ces ouvrages par rapport à la mer. Donc l'augmentation de la concentration en chlorure au niveau de ces ouvrages pourrait être liée à une intrusion saline mais également à une influence anthropique. L'augmentation des concentrations en chlorures au niveau des ouvrages HLM Grand Yoff, Point M1 et Terme Nord est certainement liée à une intrusion saline étant donné que ces ouvrages présentent des teneurs en nitrates faibles. Tandis que les ouvrages Camp pénal, Front Terre et Fort A ont des teneurs en nitrates élevés qui sont respectivement de 193, de 260 et de 70 mg/l en Juin 2019. Donc les valeurs de chlorures élevées pourraient être liées à une pollution de la nappe.

Au niveau du forage F1 Nord Foire, la valeur de chlorure est passé de 178 à 106.5 mg/l entre Décembre 2015 – Décembre 2017 et après un arrêt et une réhabilitation du forage, la teneur en chlorure augmente d'une valeur de 28.8 mg/l suite à une augmentation du débit d'exploitation.

Pour le forage Point M3, la teneur en chlorure diminue d'une valeur de 2 mg/l entre Décembre 2015 et Juin 2019. On assiste à une légère diminution du taux de chlorure jusqu'à une valeur de 134.4 mg/l en Décembre 2018 puis une légère augmentation jusqu'à atteindre

une valeur de 140 mg/l en juin 2019. Ceci pourrait s'expliquer par une variation saisonnière des teneurs en chlorures.

Au niveau des forages F2 Terme Nord Cité Tobago et HLM Grand yoff, on observe une augmentation continue du taux de chlorure durant la période Juin 2017 – Juin 2019.

Pour le forage de HLM Grand yoff, on note un taux de chlorure de 68 mg/l, au mois de mars 2017(date de réception du forage) qui augmente jusqu'à atteindre une valeur de 120 mg/l au mois de juin 2019.

Pour le forage F2 Terme Nord, la teneur en chlorure est de l'ordre de 68 mg/l au mois d'août 2018 (date de réception du forage) qui augmente jusqu'à une valeur de 107 mg/l au mois de juin 2019. Cette augmentation pourrait être due aux prélèvements excessifs observés au niveau de ces forages.

On observe une faible teneur en nitrate au niveau de ces ouvrages, indiquant ainsi que les teneurs en ions de chlorures ne sont pas liées à une pollution de la nappe.

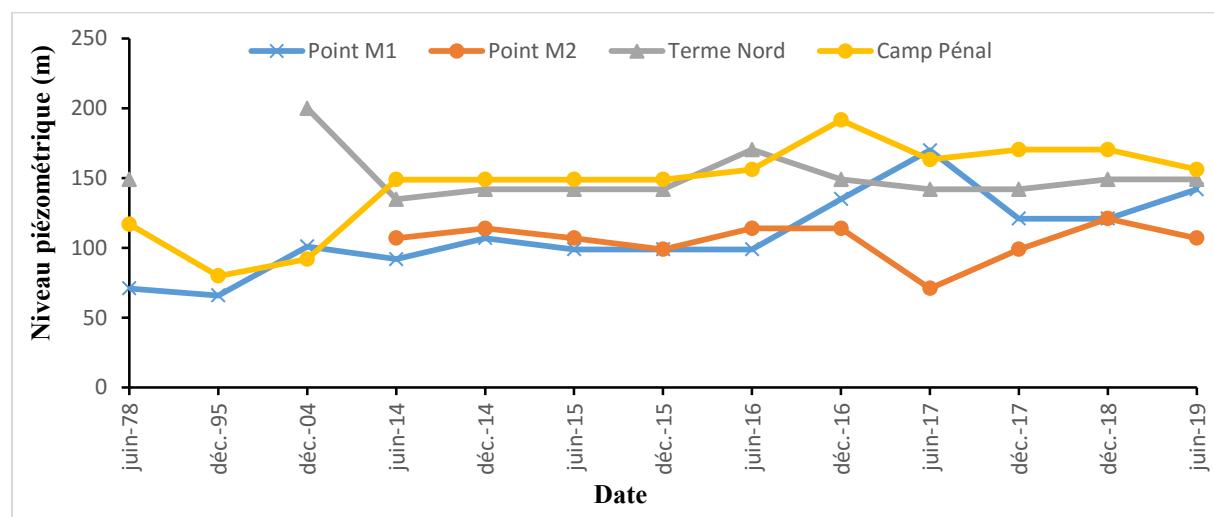
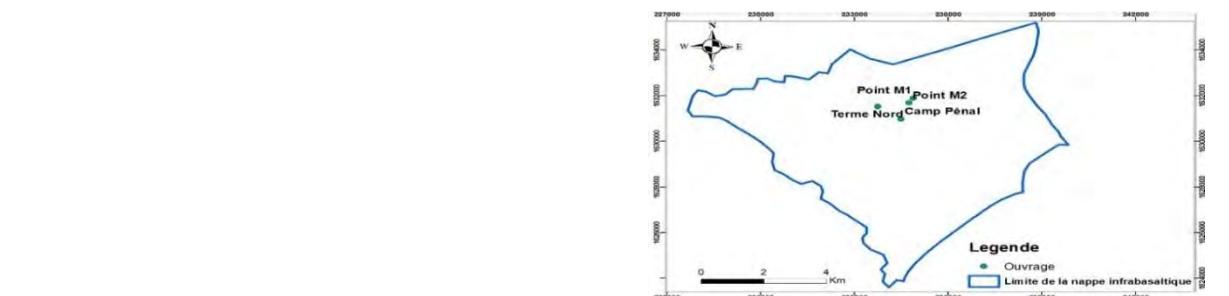


Figure 48: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des ouvrages Point M1, Point M2, Terme Nord et Camp Pénal (1978 à 2019)

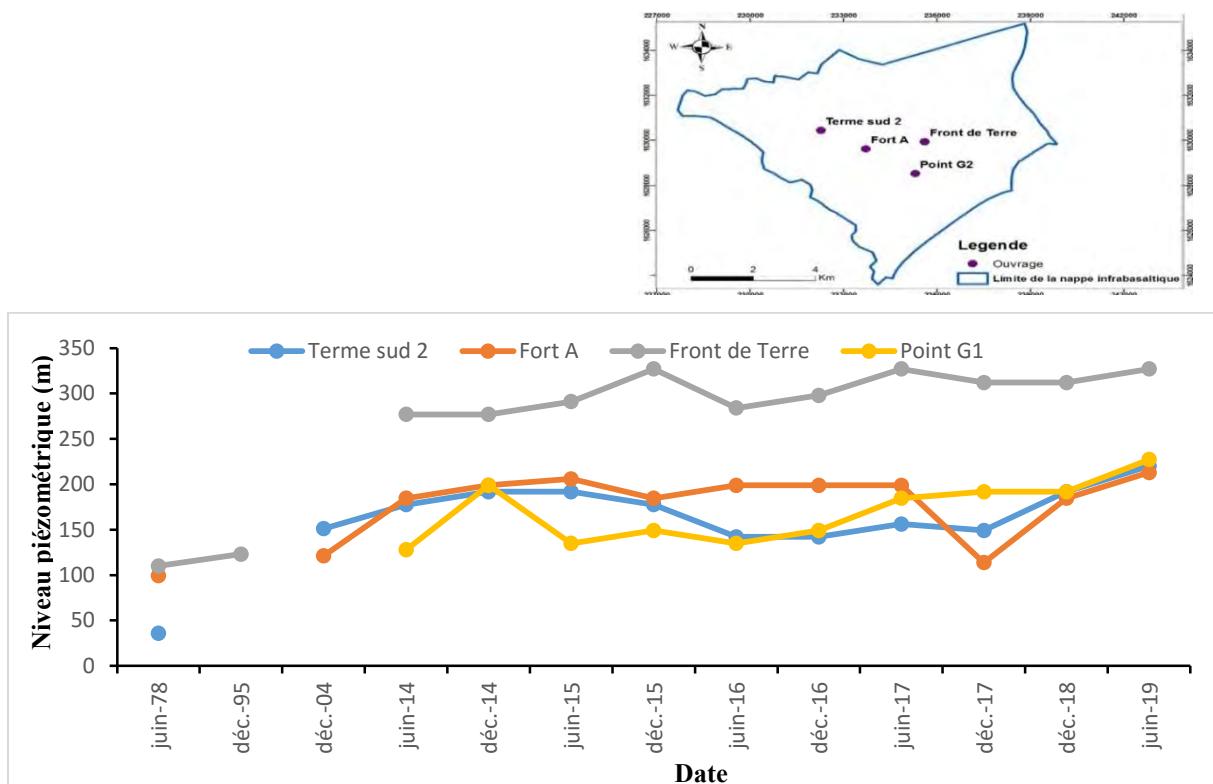


Figure 49: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des ouvrages Terme sud 2, Fort A, Front de Terre et Point G1 (1978 et 2019)

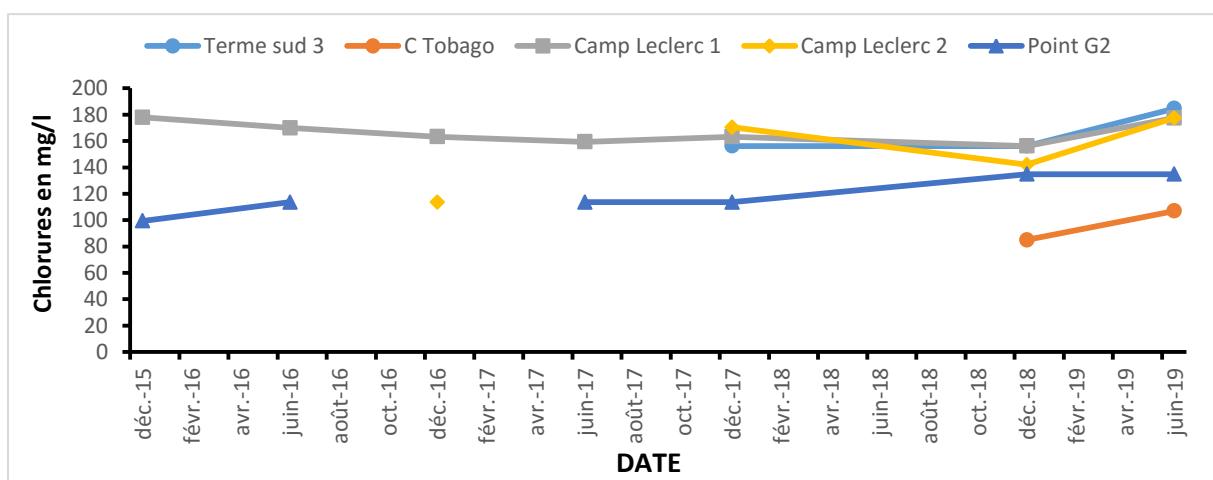
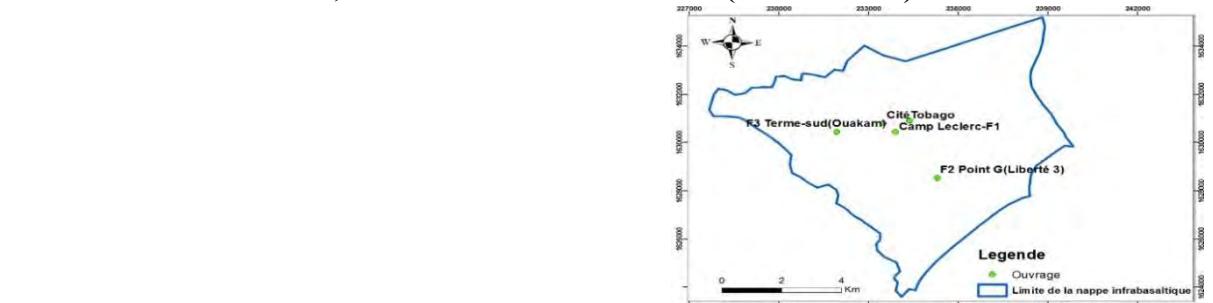


Figure 50: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des ouvrages Terme sud 3, Cité Tobago, Camp Leclerc 1, Camp Leclerc 2 et Point G2 (2015 et 2019)

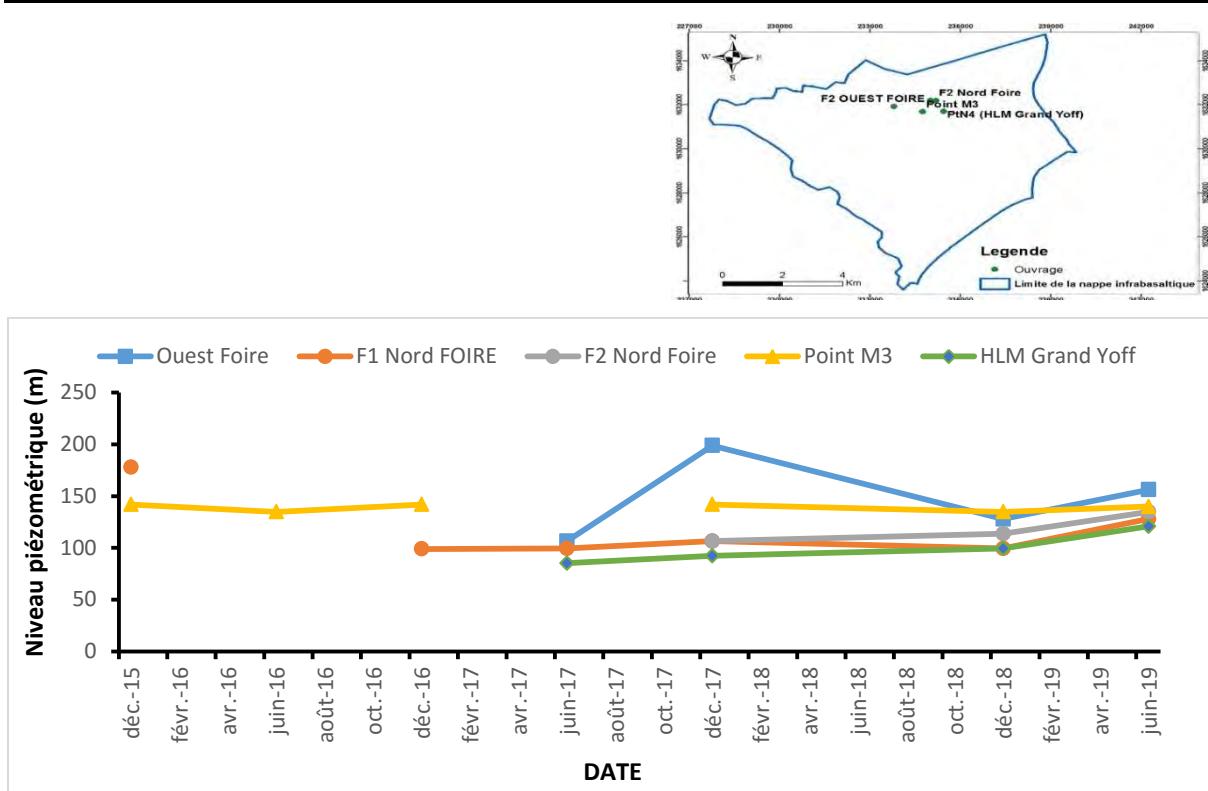


Figure 51: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des ouvrages F1 Nord Foire, F2 Nord Foire, Ouest Foire, Point M3 et HLM Grand Yoff (2015 et 2019)

Au niveau du forage camp pénal, on observe une augmentation importante des valeurs de chlorure durant la période Juin 2014 - Décembre 2016 et une diminution pour la période Décembre 2016-Juin 2019. La teneur en chlorure augmente d'une valeur de 42.7 mg/l entre Juin 2014 et Décembre 2016. Entre Décembre 2016 et Juin 2019, la teneur en chlorure diminue d'une valeur de 35 mg/l (Figure 52). Ceci peut être interprété à une variation saisonnière des teneurs en chlorures.

Au niveau du forage Terme Sud, la concentration en chlorure passe de 177 mg/l en Décembre 2014 à 142 mg/l en Décembre 2016 qui correspond à une diminution des prélèvements, puis les teneurs en chlorures augmentent jusqu'à atteindre une valeur de 220 mg/l en Juin 2019 suite à une augmentation des prélèvements. (Figure 53)

Au niveau du forage Point M1, la teneur en chlorure augmente de 92 mg/l en Juin 2014 à 170 mg/l en Juin 2017. (Figure 54)

Au niveau du forage Camp Leclerc 1, la concentration en chlorure était de 148 mg/l à la réception du forage en août 2015. Cette valeur augmente jusqu'à atteindre 178 mg/l au mois de décembre 2015. Le taux de chlorure diminue jusqu'à 159.4 mg/l en Juin 2017 puis sa augmente jusqu'à atteindre 177 mg/l en juin 2019. (Figure 55)

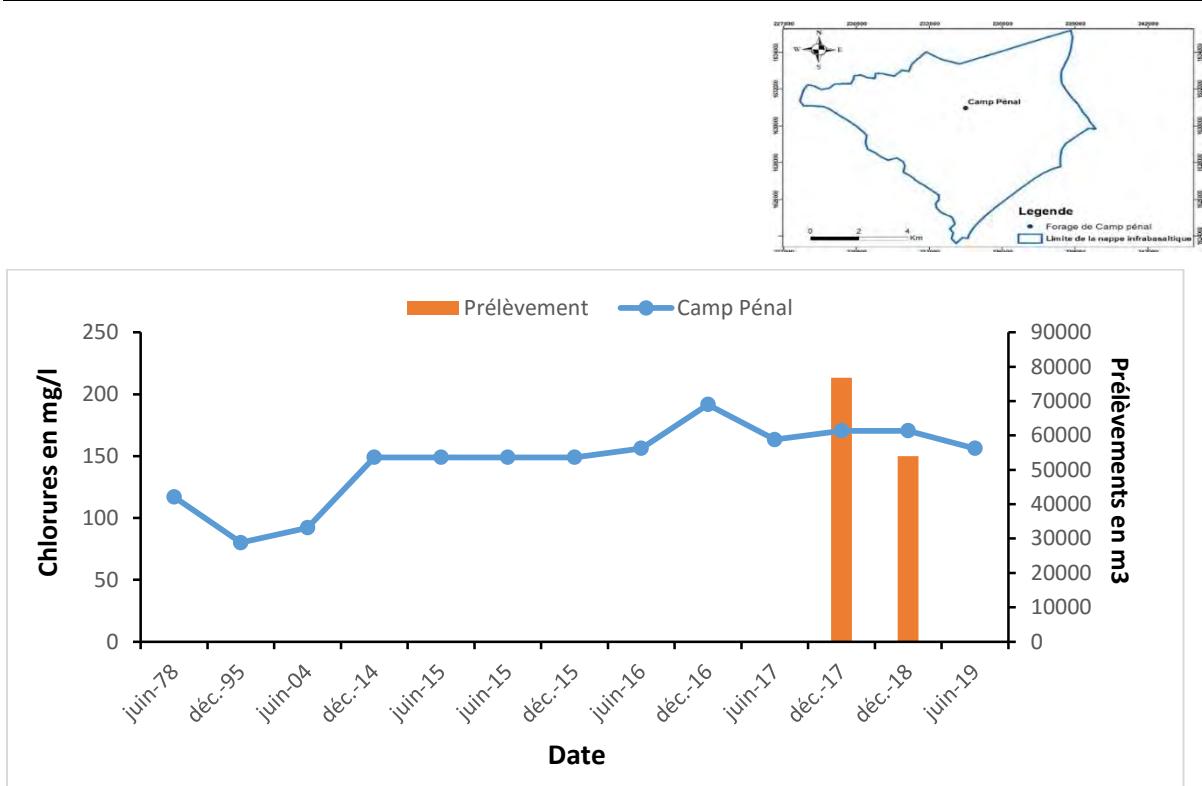


Figure 52: Evolution des teneurs en chlorures au niveau du forage Camp Pénal (1978 à 2019)

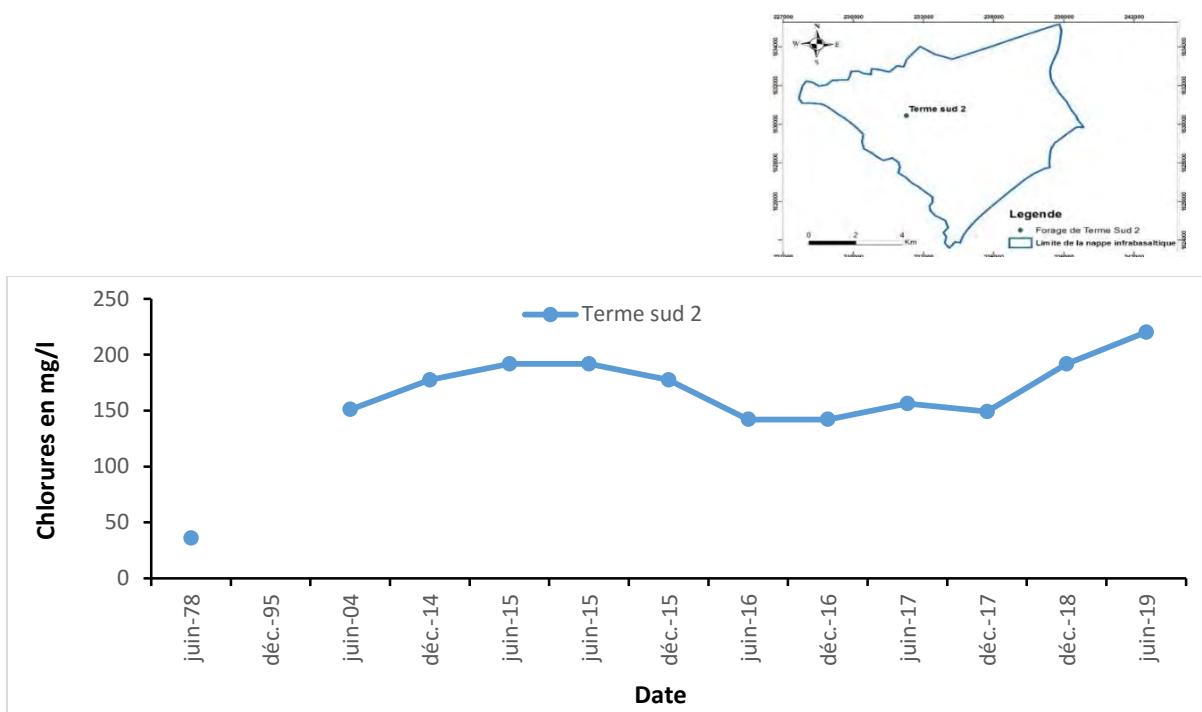


Figure 53: Evolution des teneurs en chlorures au niveau du forage Terme Sud (1978 à 2019)

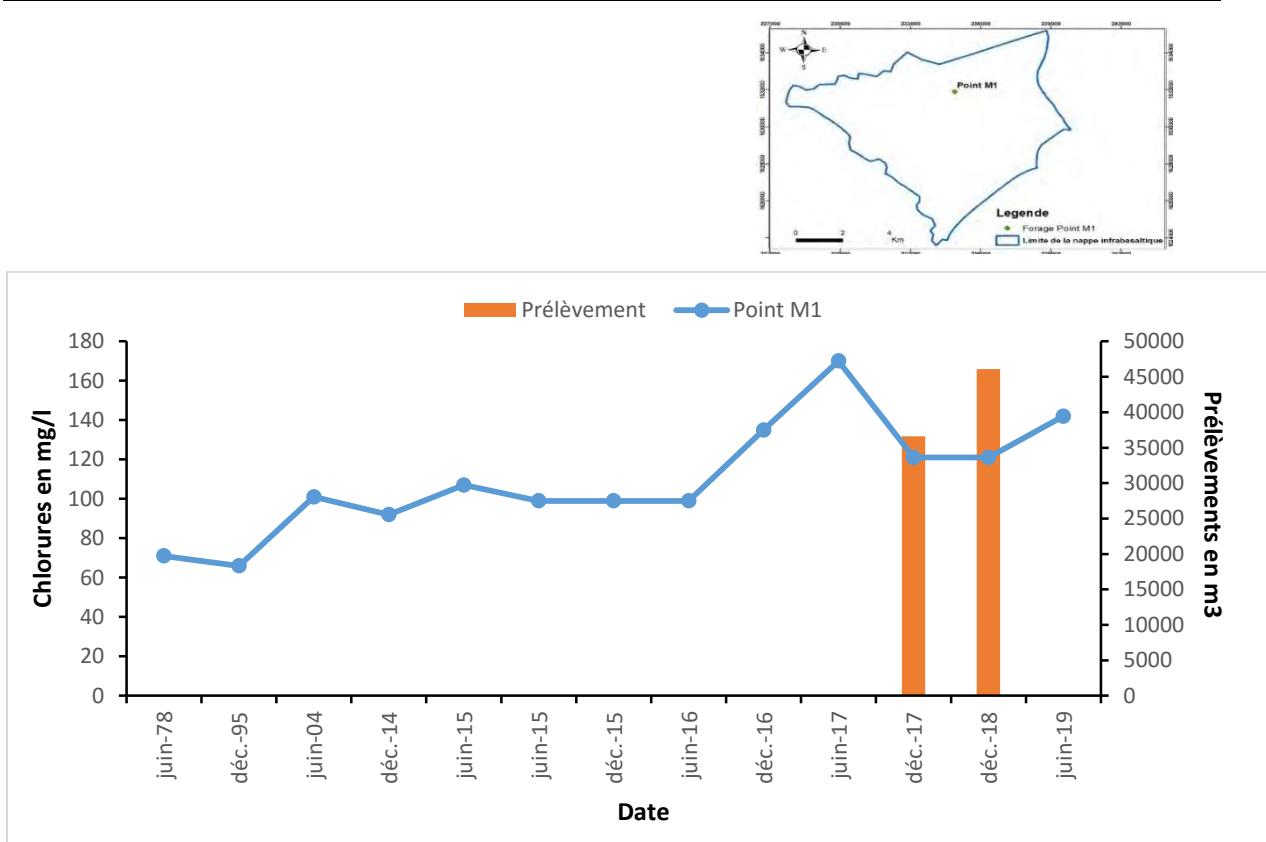


Figure 54: Evolution des teneurs en chlorures au niveau du forage Point M1 (1978 à 2019)

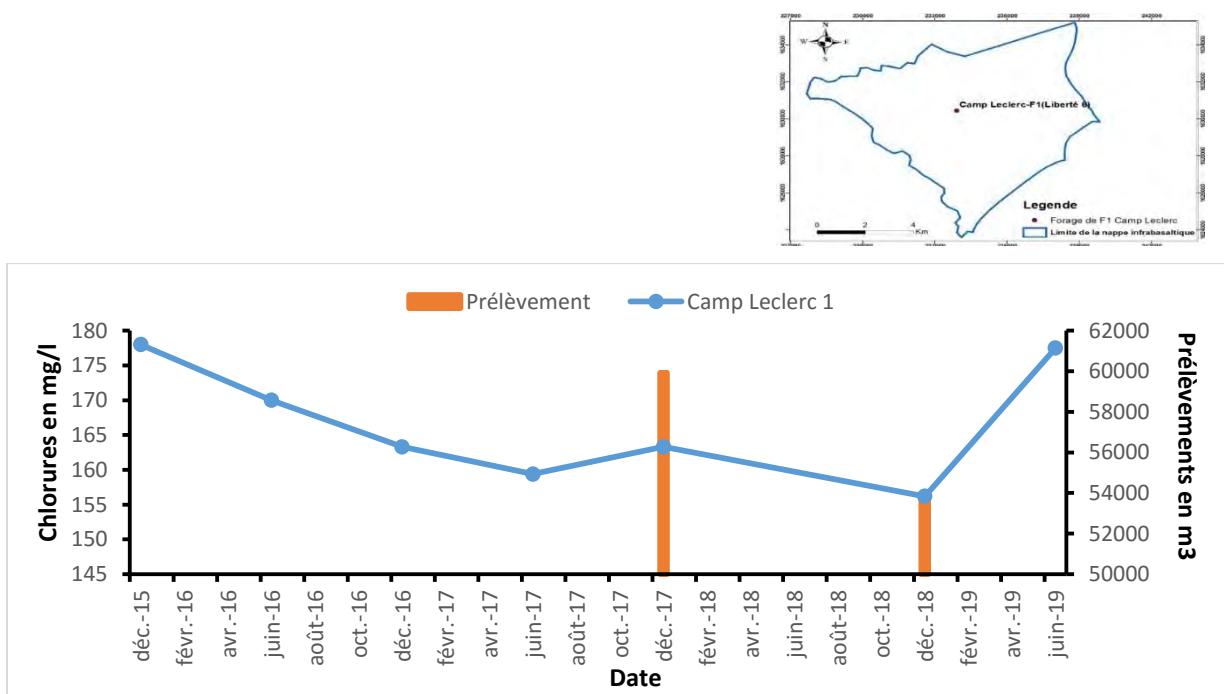


Figure 55: Evolution des teneurs en chlorures au niveau du forage Camp Leclerc (2015 à 2019)

Au niveau des piézomètres P2 haut et P2 bas, la concentration en chlorure augmente respectivement de 289 mg/l et de 226.4 mg/l durant la période de Juin 1978 – Décembre 1995. Pour la période Juin 2006 – Décembre 2010, la teneur en chlorure est passé de 414.9 à 313.3 mg/l au niveau du piézomètre P2 haut et de 571.2 à 570.1 mg/l au niveau du piézomètre P2 bas. Une augmentation des teneurs en chlorures de l'ordre de 50.8 et 90.6 mg/l est observée respectivement au niveau des piézomètres P2 bas et P2 Haut entre Juin 2017 et Décembre 2018. (Figure 56). Entre Décembre 2018 et Juin 2019, on observe une diminution des teneurs en chlorure de l'ordre de 40.5 mg/l au P2 bas et de 202.2 mg/l au P2 Haut qui pourrait être due à une variation saisonnière.

Au niveau du piézomètre PIB1, on observe une augmentation des teneurs en chlorure allant de Juin 2000 à Décembre 2005. Pour la période Décembre 2005 - Décembre 2007, on assiste à une diminution du taux de chlorure. En 2019, on observe des teneurs en chlorure très élevé par rapport aux années précédentes. (Figure 57)

Au niveau des piézomètres PIB2 et PIB3, la teneur en chlorure a augmenté respectivement de l'ordre de 73.4 et 20.7 mg/l entre Juin 2000 et Décembre 2005. Pour la période Décembre 2005 – Décembre 2007, on observe une diminution des teneurs en chlorure passant de 100 à 51 mg/l au niveau du piézomètre PIB3 et de 160 à 125 mg/l au niveau du piézomètre PIB2. De Décembre 2017 à Juin 2019, on note une augmentation des teneurs en chlorure de l'ordre de 23.8 et 9 mg/l respectivement au niveau des piézomètres PIB2 et PIB3. (Figure 58)

L'augmentation des teneurs en chlorures entre Juin 2000 et Décembre 2005 pourrait être liée à une augmentation des prélèvements et la diminution entre Décembre 2005 et Décembre 2007 à une réduction des pompages de l'ordre 1318687 m^3 . L'augmentation observée entre Décembre 2007 et Juin 2019 pourrait être due au variation saisonnière et à l'accroissement important de la production des forages durant cette période (la production augmente d'une valeur de $11\ 152\ 541 \text{ m}^3/\text{an}$ entre 2007 et 2019).

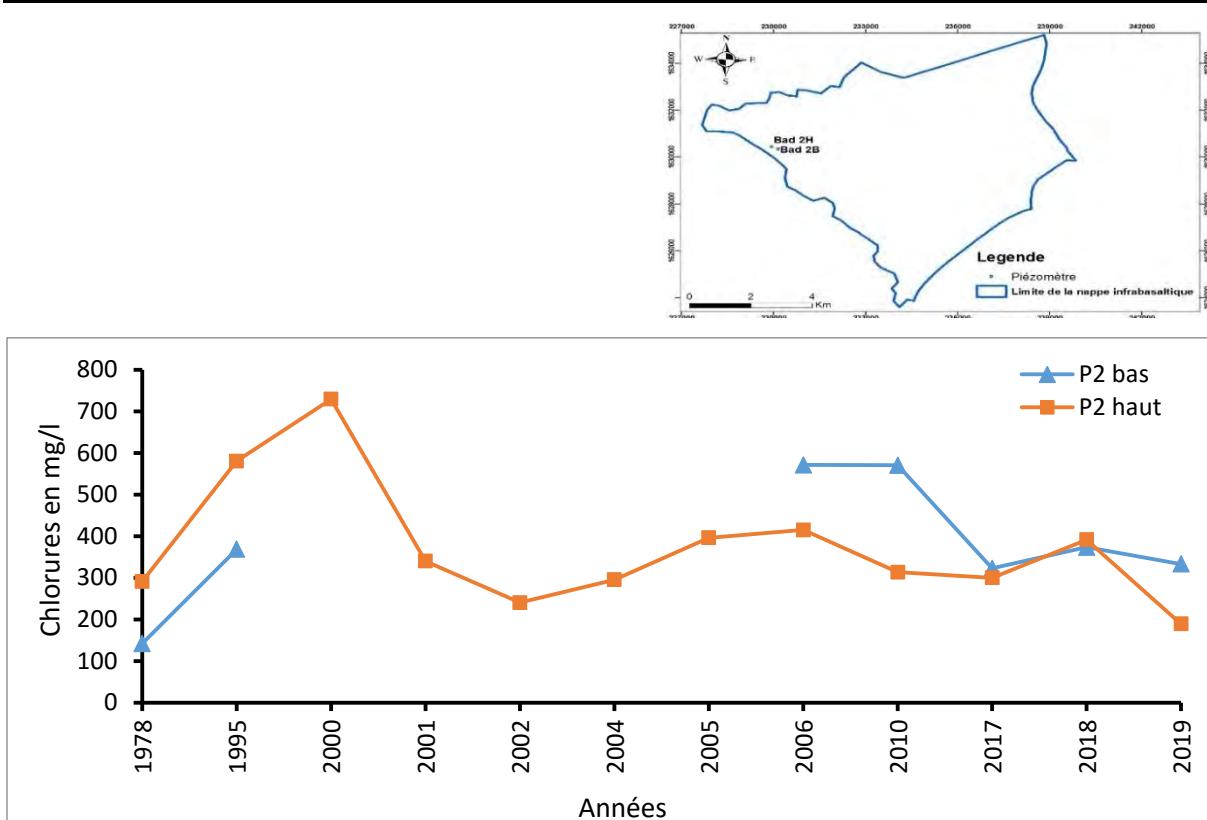


Figure 56: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des piézomètres P2 bas et P2 haut (1978 à 2019)

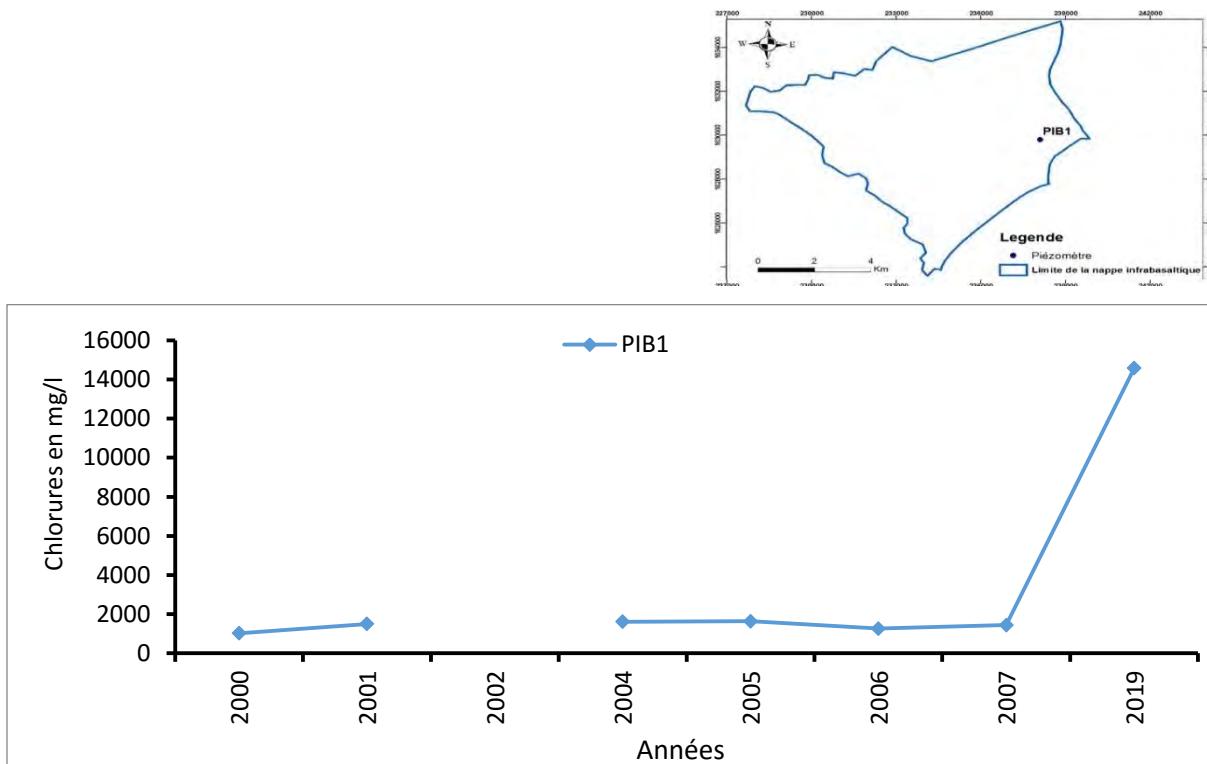


Figure 57: Evolution des teneurs en chlorures au niveau du piézomètre PIB1 (2000 à 2019)

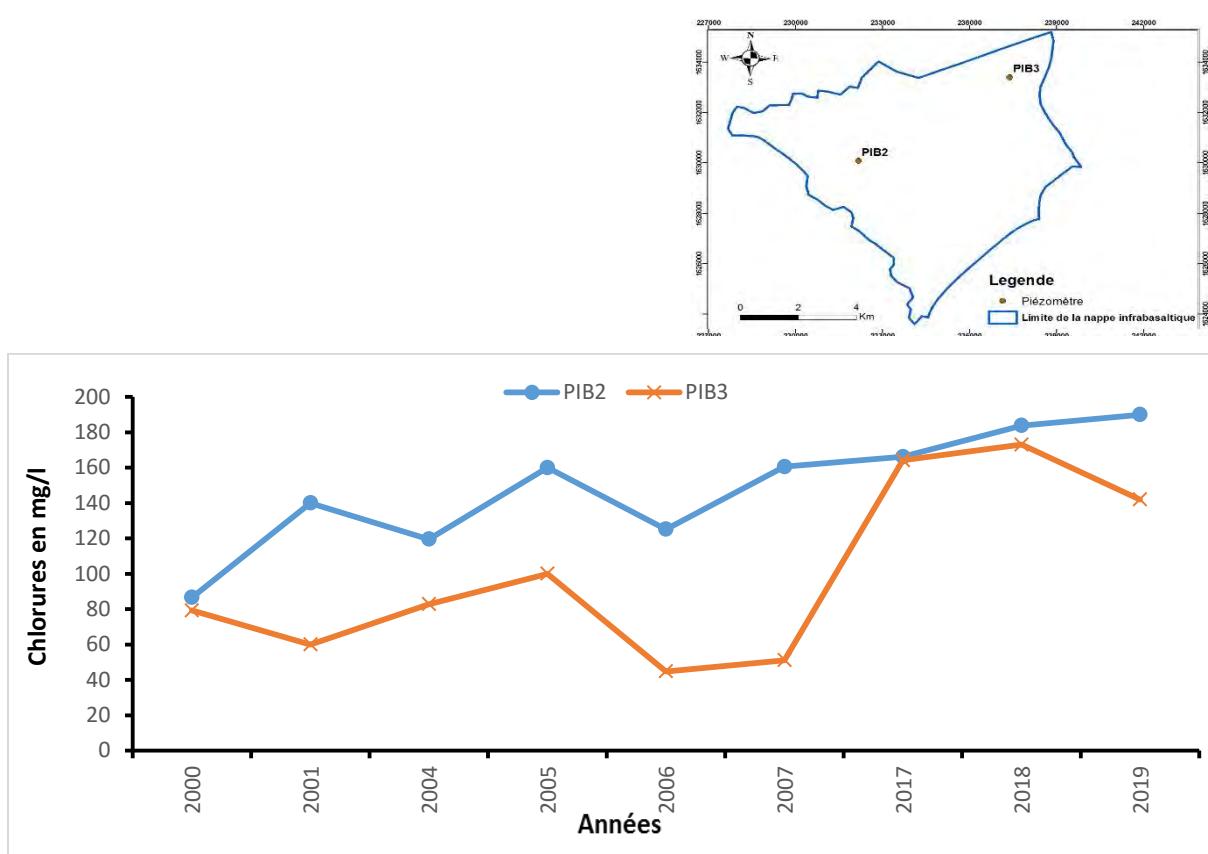


Figure 58: Evolution des teneurs en chlorures au niveau des piézomètres PIB2 et PIB3 (2000 à 2019)

III.2.3. Evolution et distribution spatiale des teneurs en nitrates

III.2.3.1. Distribution spatiale des teneurs en nitrates

Les teneurs en nitrate observées en Juin 2019 au niveau de la nappe infrabasaltique sont comprises entre 0 et 292 mg/l. La Carte de la variation spatiale des teneurs en nitrate montre un taux de nitrate élevé au niveau de certains ouvrages situés au centre et à l'Est de la nappe. Par exemple au niveau des ouvrages PIB3 et P1 Stade LSS, on observe des teneurs élevées de nitrates qui dépassent la norme de potabilité des eaux (50 mg/l (OMS, 2011)) (Figure 59). Les valeurs de nitrate élevées vers la partie libre de la nappe sont liées probablement à une alimentation latérale de la nappe infrabasaltique par la nappe de Thiaroye.

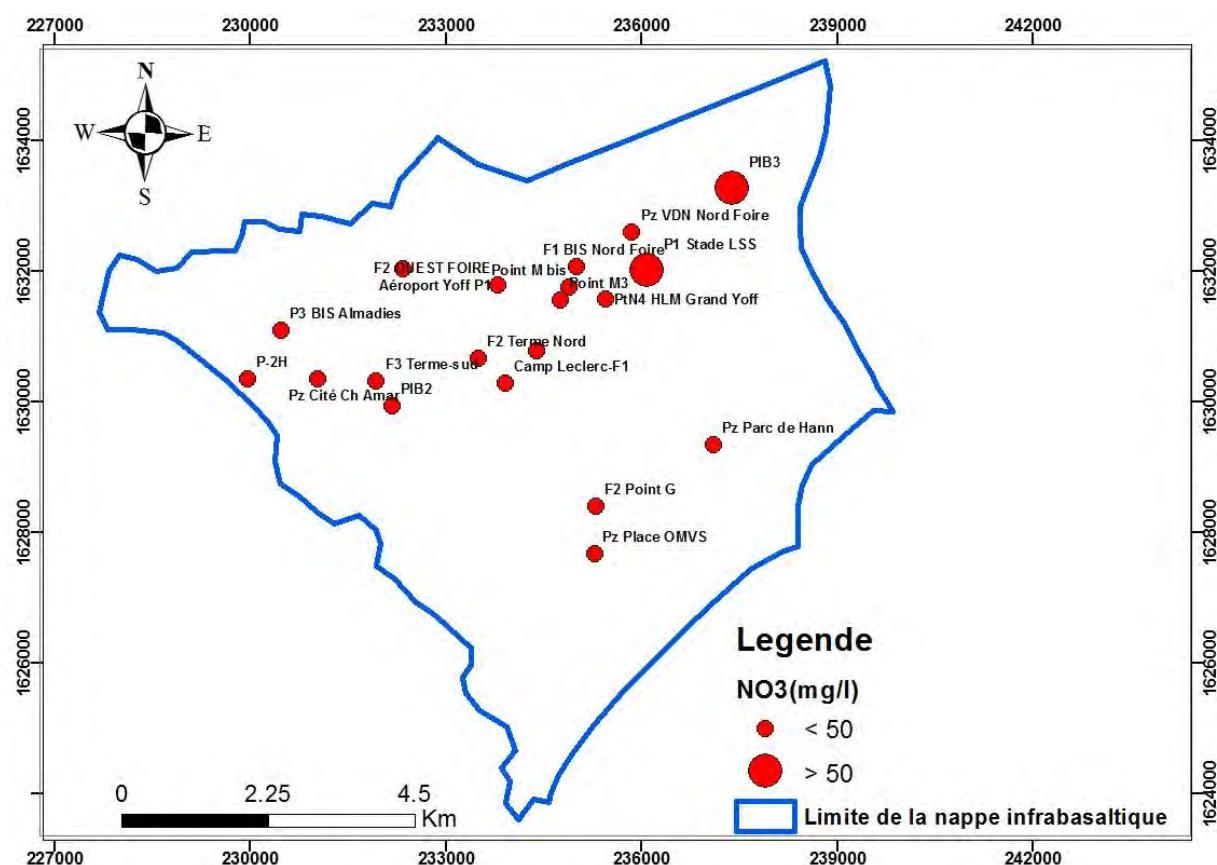


Figure 59: Distribution spatiale des teneurs en nitrates (Juin 2019)

III.2.3.2. Evolution des teneurs en nitrates

L'ion nitrate est la forme la plus oxydée de l'azote. A L'état naturel, les concentrations en nitrates au niveau des eaux souterraines sont faibles et, l'on admet généralement qu'une teneur supérieur à 50 mg/l traduit un appel anthropique (Lessivage, rejet domestique ou industrielle).

L'évolution de la teneur en nitrate entre Juin 2014 et Juin 2019 indique une tendance à la hausse de la concentration en nitrate dans certains ouvrages échantillonnés. Elle montre également une diminution de la concentration en nitrate dans la majorité des ouvrages pour l'année 2017. (Figure 60, 61, 62, 63, 64 et 65)

Les plus fortes augmentations des teneurs en nitrates sont surtout observées au niveau des ouvrages Front de Terre (la teneur en nitrate passe de 64.3 mg/l en Décembre 2014 à 260 mg/l en Juin 2019), Camp Pénal (la teneur en nitrate passe de 38 mg/l en Décembre 2014 à 193 mg/l en Juin 2019) et Fort A (la teneur en nitrate passe de 32.1 mg/l en Décembre 2014 à 70 mg/l en Juin 2019). (Figure 60)

Les fortes teneurs en NO_3^- observées au niveau des ouvrages Terme Sud, Front de Terre et Camp Pénal proviennent très probablement d'une pollution très localisée au droit de ces ouvrages. Ces fortes teneurs peuvent être dues à la présence d'une source de matière azotée dans la zone (Gaye 1979) ou à une alimentation latérale de la nappe infrabasaltique par la nappe de Thiaroye.

L'évolution de la teneur en nitrate entre janvier 2017 et mars 2019 montre une tendance à la baisse durant la période janvier 2017-mars 2018. Et à partir de mars 2018, on observe une augmentation de la concentration en nitrate dans la majorité des ouvrages (Figure 66, 67, 68 et 69). Les phénomènes de dilution par les eaux de pluies peuvent être à l'origine de la diminution de la concentration en nitrate.

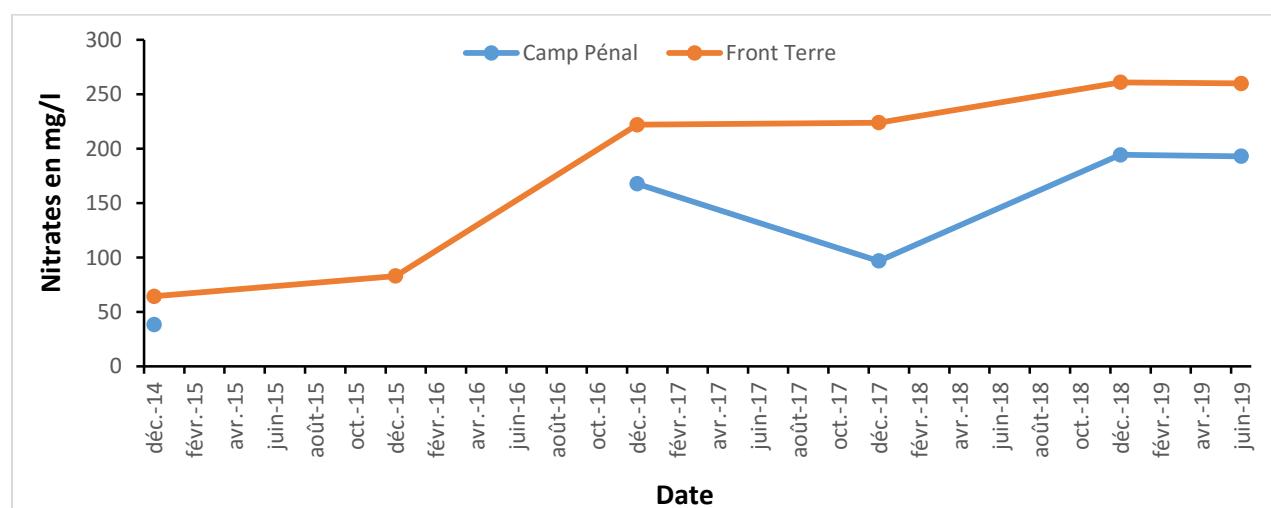


Figure 60: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Camp pénal et Front Terre (2014 – 2019)

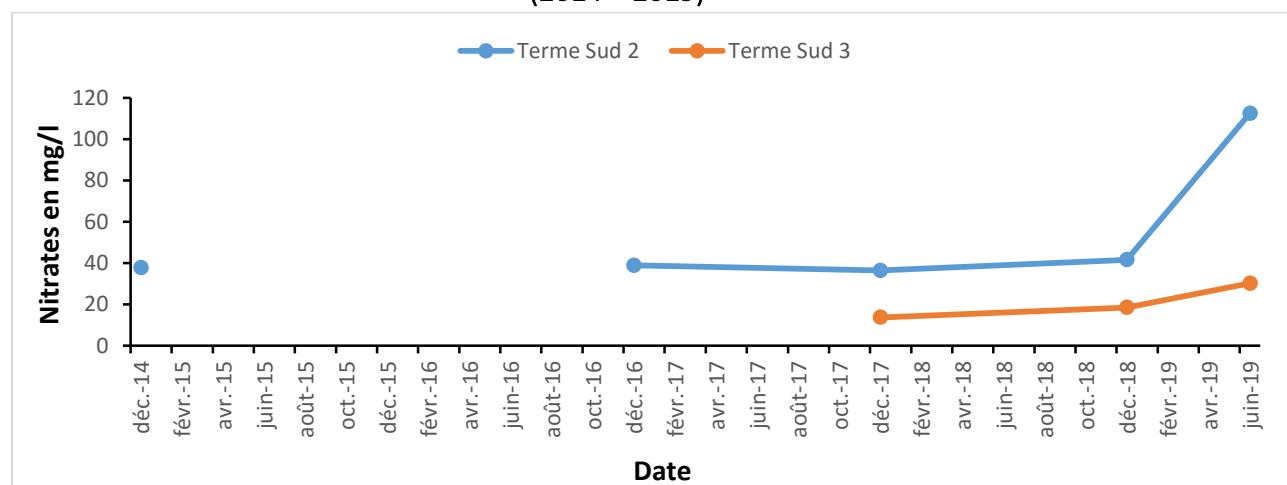


Figure 61: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Terme sud 2 et Terme sud 3 (2014 – 2019)

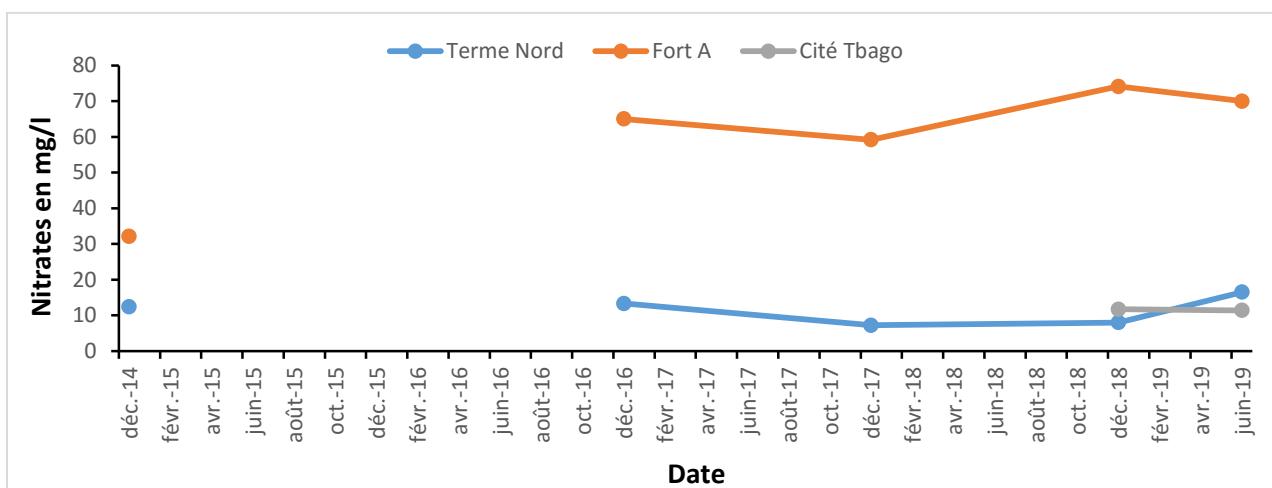


Figure 62: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Terme Nord, Fort A et Cité Tbago (2014 – 2019)

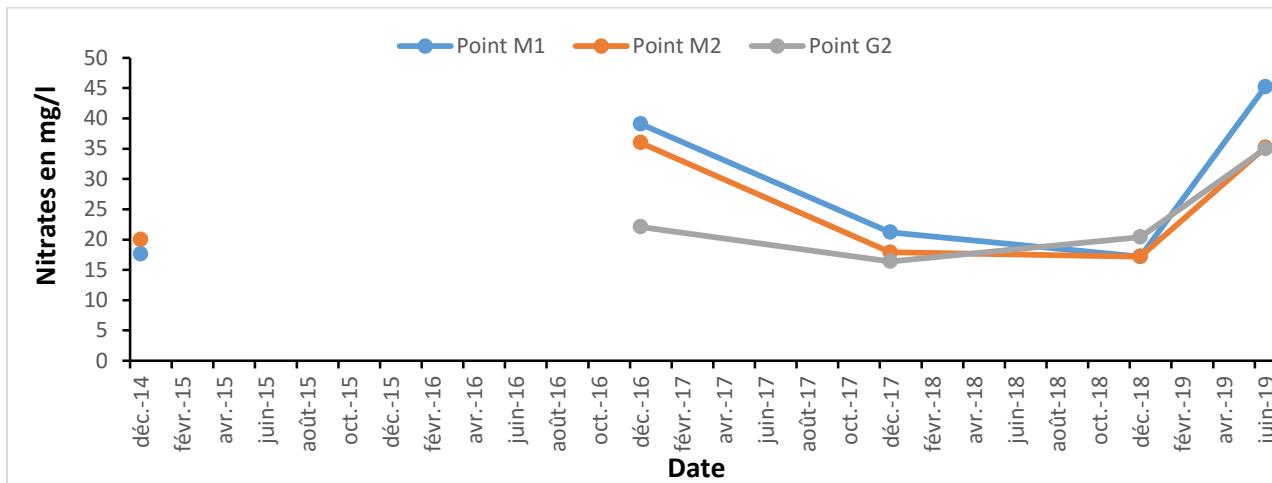


Figure 63: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Point M1, Point M2 et Point G2 (2014 – 2019)

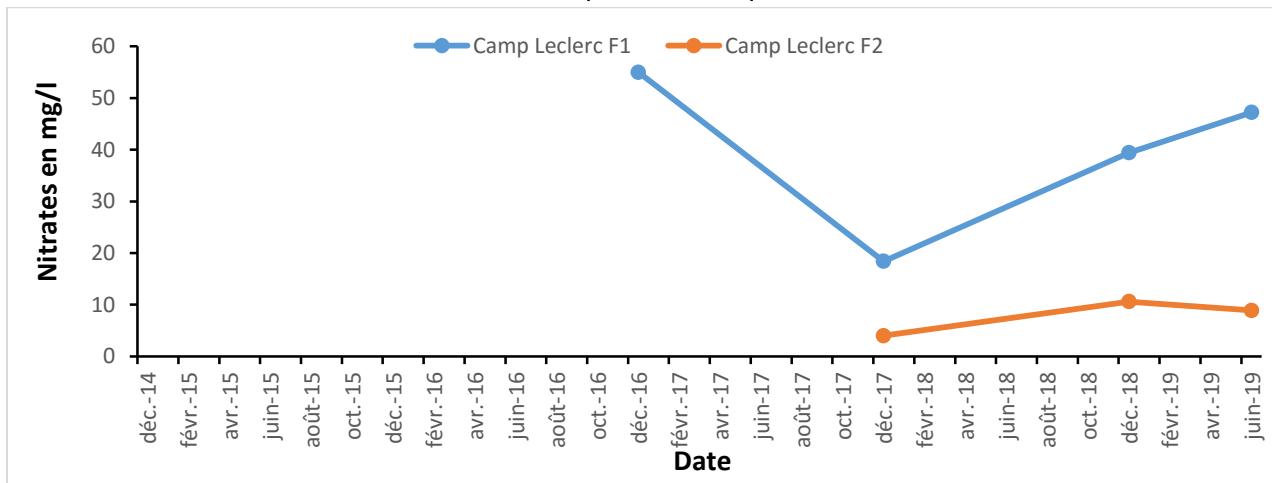


Figure 64: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Camp Leclerc F1 et Camp Leclerc F2 (2014 – 2019)

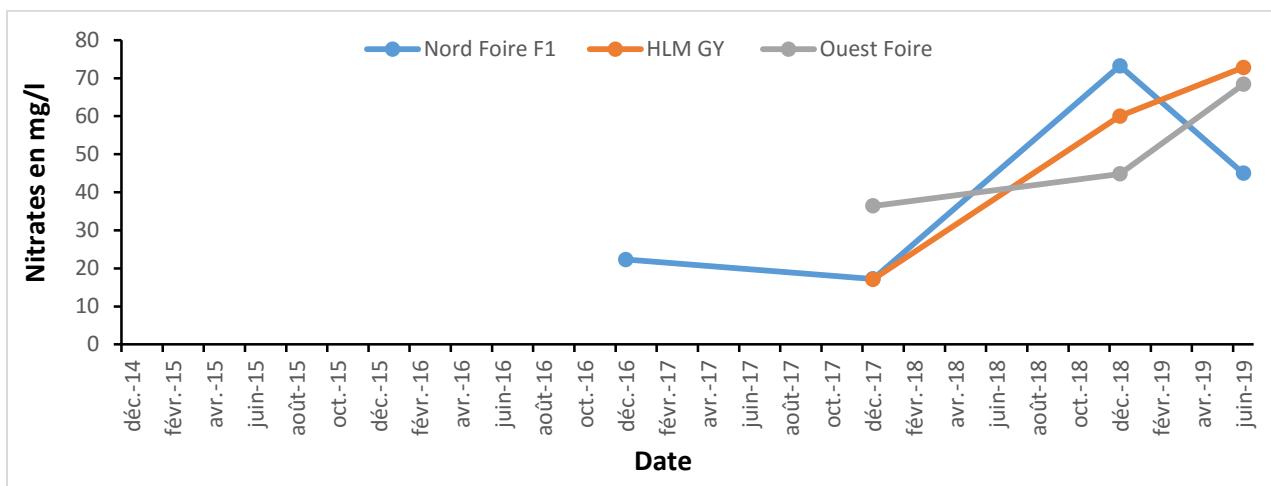


Figure 65: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Nord Foire F1, HLM Grand Yoff et Ouest Foire (2014 – 2019)

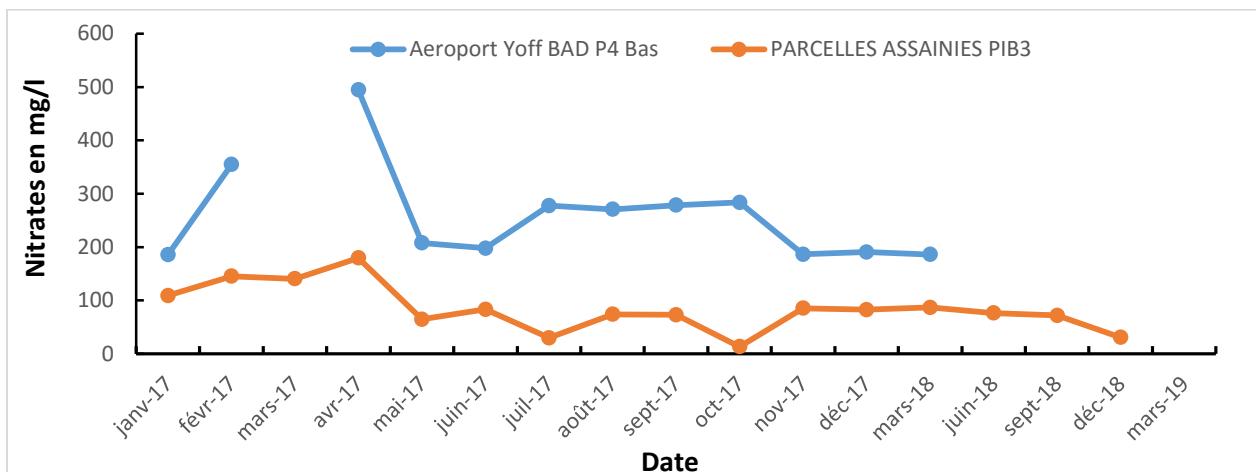


Figure 66: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Aéroport Yoff BAD P4 Bas et Parcelles Assainies PIB3 (Janvier 2017-Mars 2019)

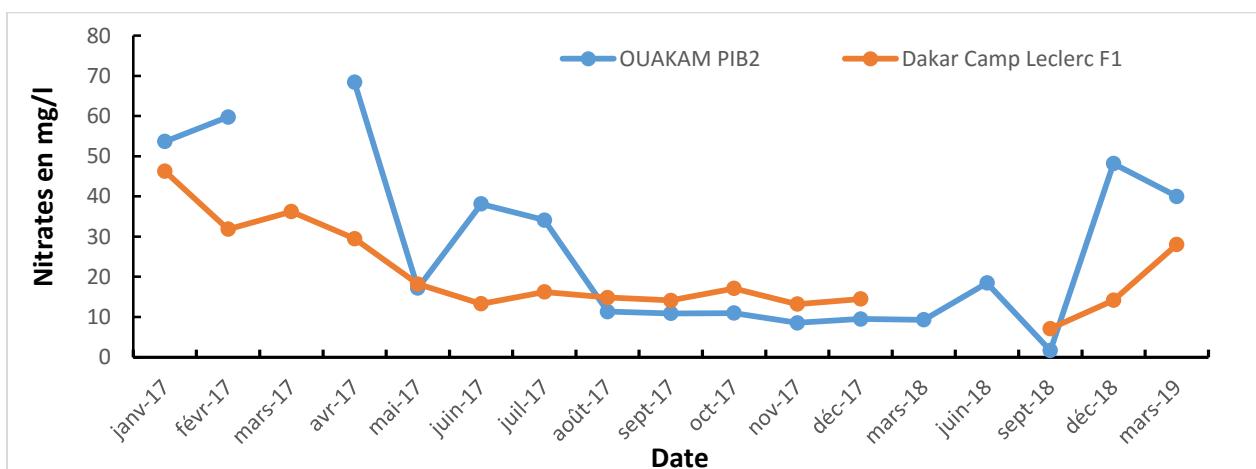


Figure 67: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Ouakam PIB2 et Camp Leclerc F1 (Janvier 2017-Mars 2019)

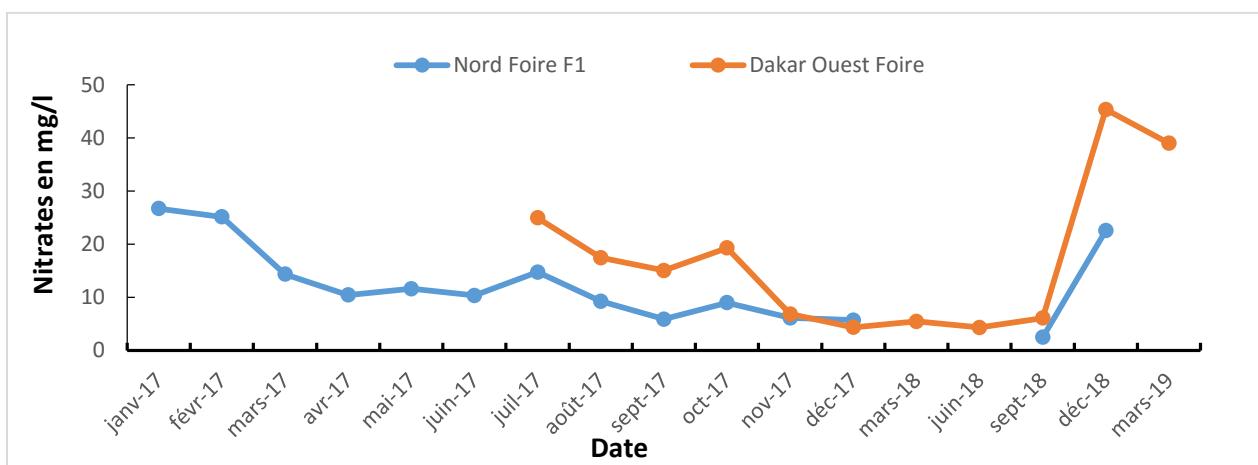


Figure 67: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages F1 Nord Foire et F1 Ouest Foire (Janvier 2017-Mars 2019)

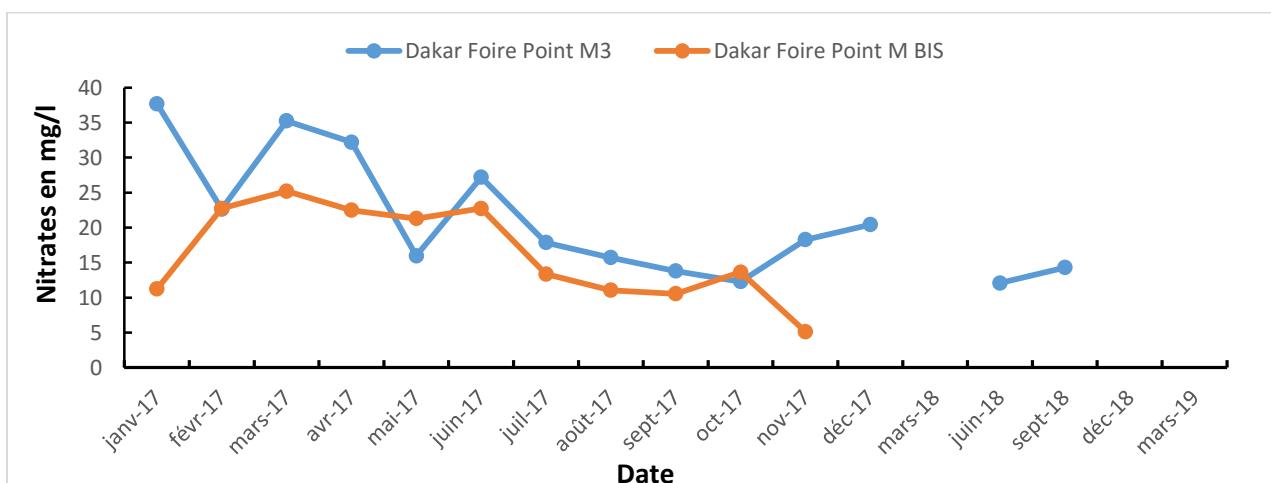


Figure 68: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages Point M3 et Point M Bis (Janvier 2017-Mars 2019)

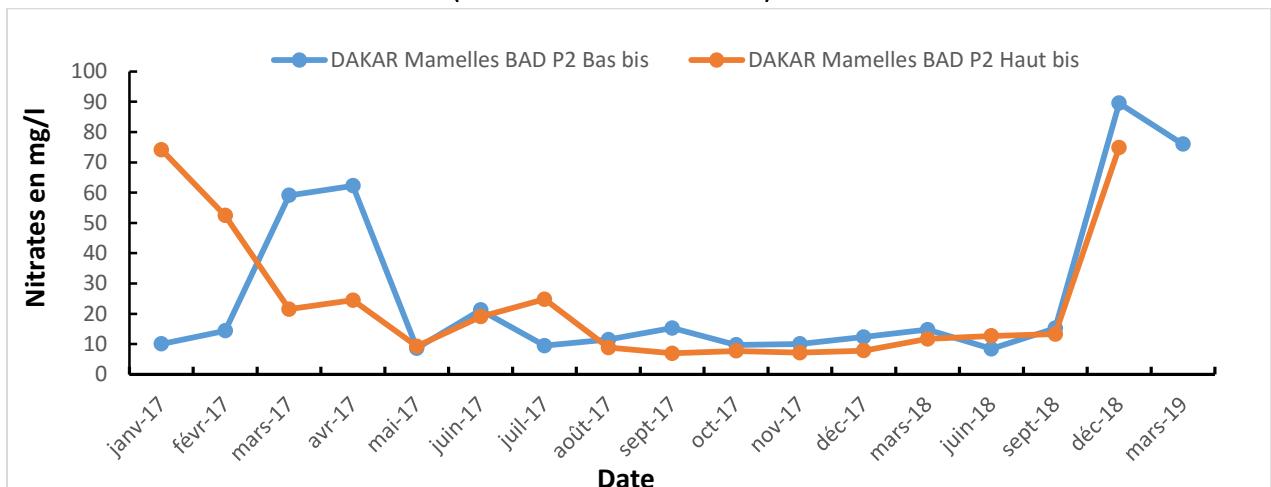


Figure 69: Evolution des teneurs en nitrates au niveau des ouvrages P-2B et P-2H (Janvier 2017-Mars 2019)

III.2.4. Variation spatiale des autres éléments chimiques

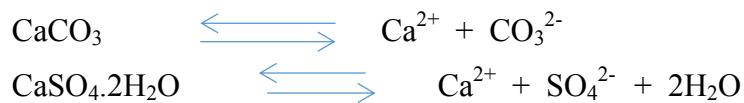
Les résultats d'analyses chimiques obtenus en Juin 2019 ont permis de caractériser la chimie de la nappe infrabasaltique.

- **Le sodium (Na^+)**

L'ion sodium est un élément chimique appartenant à la famille des minéraux alcalins. L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. Sa teneur varie entre 23 et 8557 mg/l. Les valeurs les plus élevées sont observées au niveau des ouvrages de Parc Hann (avec une valeur de 8557 mg/l) et Pz Ouakam cité cheikh Amar (453 mg/l). Les teneurs obtenues au niveau de ces piézomètres dépassent largement la norme de potabilité des eaux (200 mg/l (OMS, 2011)). (Figure 70). Le sodium présente une distribution similaire au chlorure.

- **Le calcium (Ca^{2+})**

La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO_4) (BESBES, 2010).



Les teneurs en calcium varient de 18 à 411 mg/l (Figure 71). Les valeurs élevées en calcium ont été mesurées au niveau des ouvrages Pz Cité Cheikh Amar (411 mg/l) et Parc Hann (292 mg/l). La concentration en Ca^{2+} au niveau de ces ouvrages dépasse la norme de la potabilité des eaux (200 mg/l (OMS, 2011)).

- **Le magnésium (Mg^{2+})**

Les origines des ions Mg^{2+} sont comparables à celles du calcium, car ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite).



Les teneurs varient entre 7 et 479 mg/l et sont plus élevées au niveau des piézomètres Parc Hann (479 mg/l) et Pz Ouakam cité cheikh Amar (309 mg/l) (Figure 72). La concentration en Mg^{2+} au niveau de ces ouvrages dépasse la norme de potabilité des eaux (150 mg/l (WHO, 2006)).

- **Le potassium (K^+)**

Le potassium provient de l'altération des formations silicatés (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrains chimiques (BESBES, 2010). Dans l'ensemble, les valeurs sont pratiquement faibles et sont comprises entre 3 et 213 mg/l (Figure 73). La majorité des ouvrages présentent des teneurs qui sont dans l'intervalle de la norme de potabilité des eaux (12mg/l (OMS, 2011)). Les teneurs les plus élevées se retrouvent dans les piézomètres Parc Hann (213 mg/l) et F1 Camp Leclerc (19.82 mg/l).

- **Le bicarbonate (HCO_3^-)**

La présence des ions HCO_3^- dans l'eau est due à la dissolution de formations carbonatées (cipolin, calcaire, dolomie) par les eaux chargées en gaz carbonique (CO_2). (BESBES, 2010) Les teneurs observées sont comprises entre 18 et 378 mg/l. Les valeurs les plus élevées sont localisées au niveau des ouvrages de Mamelles P2 Bad bis (378 mg/l), Parc Hann (348 mg/l) et F2 Camp Leclerc (219.6 mg/l) (Figure 74). Les valeurs minimales sont observées au niveau du piézomètre P1 Stade LSS (18 mg/l) et PIB3 (31 mg/l). Les ouvrages présentent tous des teneurs en HCO_3^- qui ne dépassent pas la norme de potabilité des eaux (500 mg/l (WHO, 2011)).

- **Le sulfate (SO_4^{2-})**

L'analyse des concentrations en sulfates indique des variations entre 6 et 232 mg/l. Les ouvrages présentent tous des teneurs qui ne dépassent pas la norme de potabilité des eaux (250 mg/l (WHO, 2011)) (Figure 75). Les ions sulfates ont tendance à augmenter proportionnellement aux ions chlorures. En effet, les sulfates sont plus élevés au niveau du piézomètre de Parc Hann (232 mg/l), de Pz Cité Cheikh Amar (216 mg/l) et P3 bis Almadies (193,92 mg/l) et serait d'origine essentiellement marine.

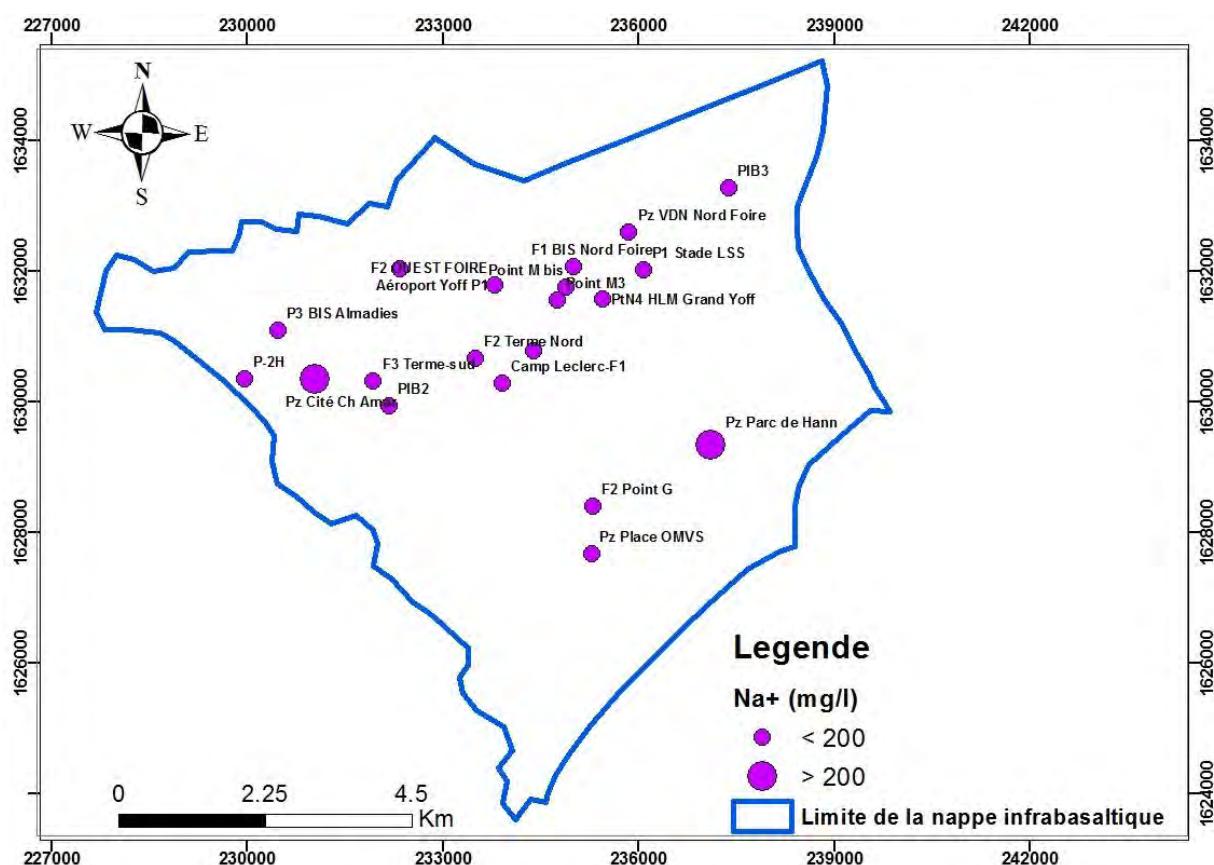


Figure 70: Distribution spatiale des teneurs en sodium (Juin 2019)

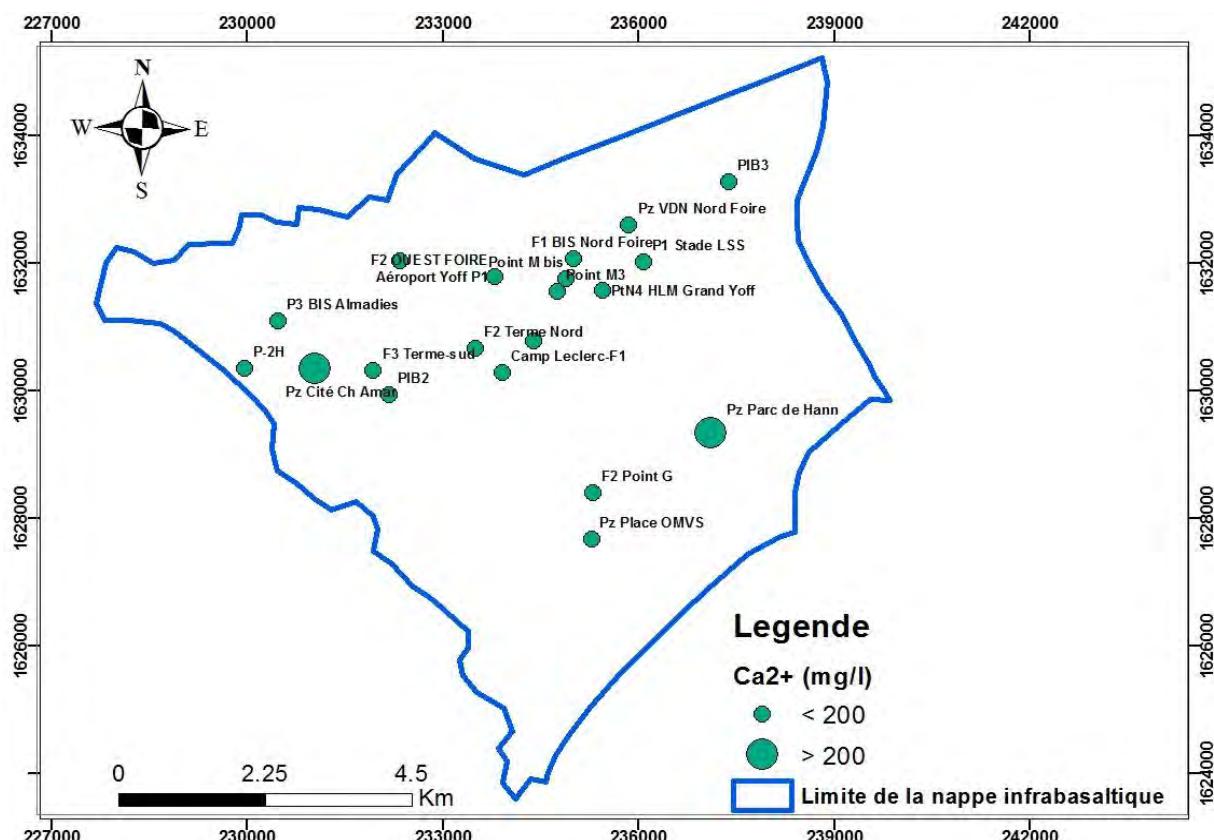


Figure 71: Distribution spatiale des teneurs en calcium (Juin 2019)

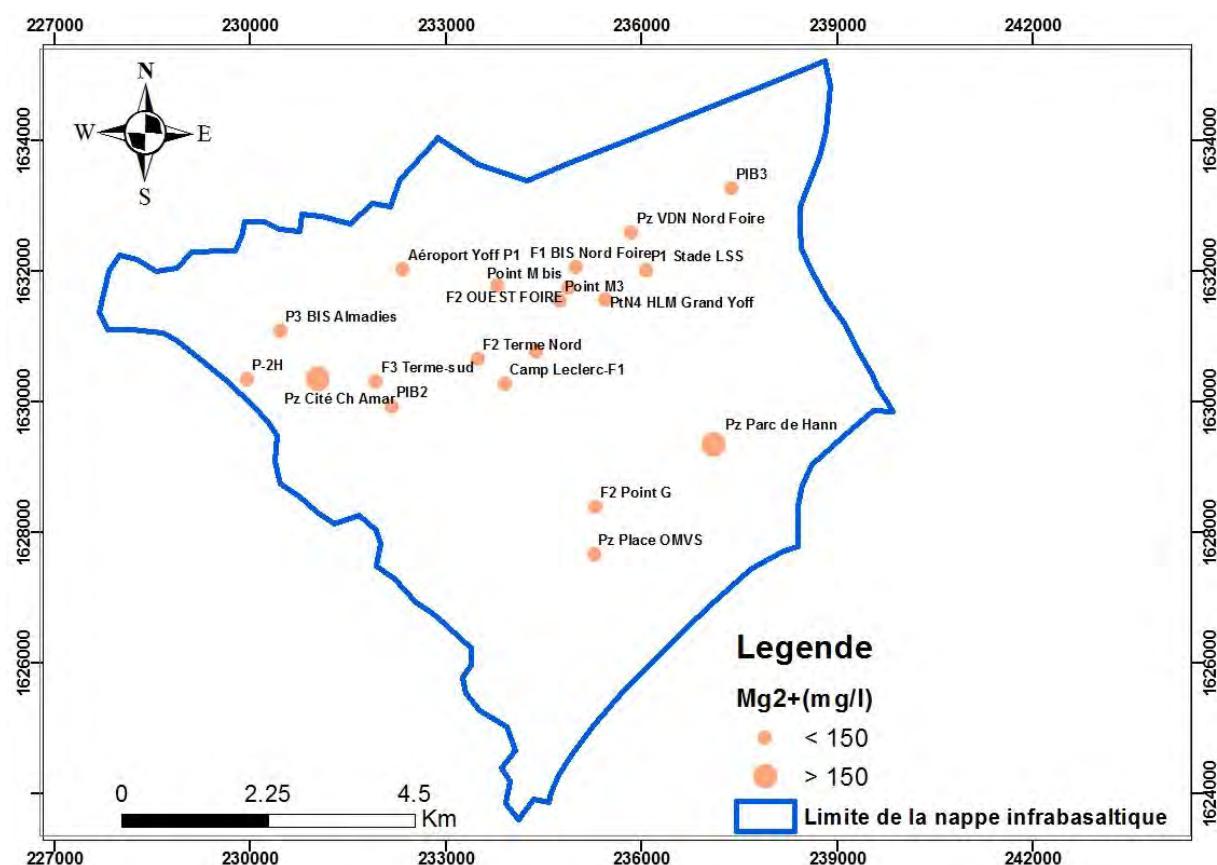


Figure 72: Distribution spatiale des teneurs en magnésium (Juin 2019)

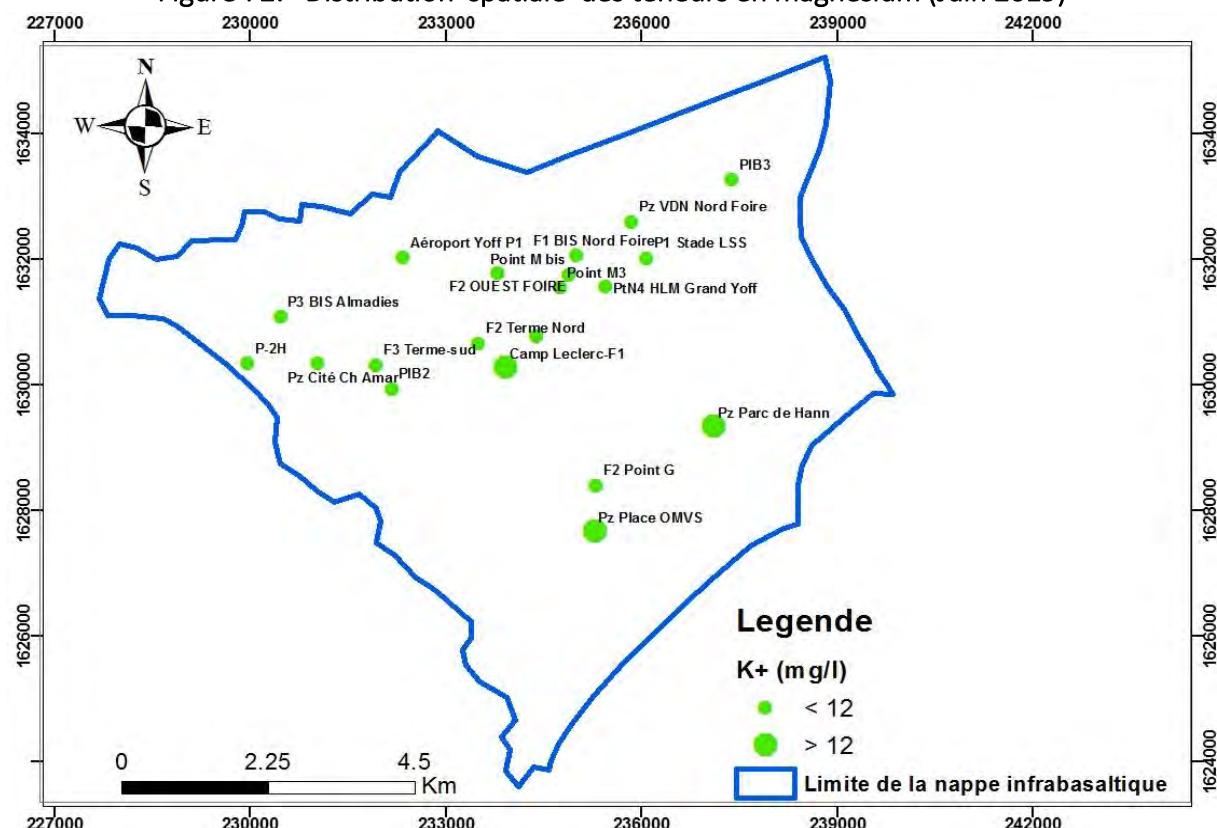


Figure 73: Distribution spatiale des teneurs en potassium (Juin 2019)

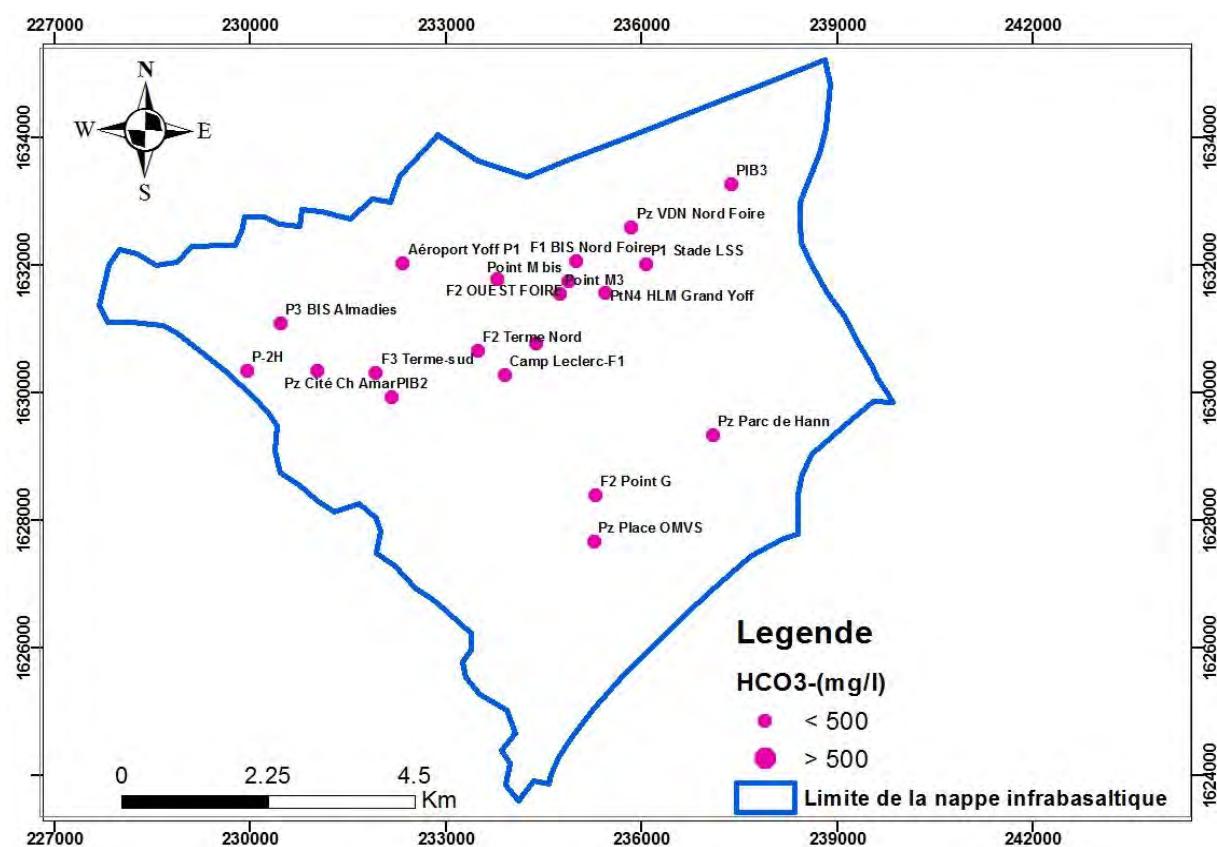


Figure 74: Distribution spatiale des teneurs en bicarbonates (Juin 2019)

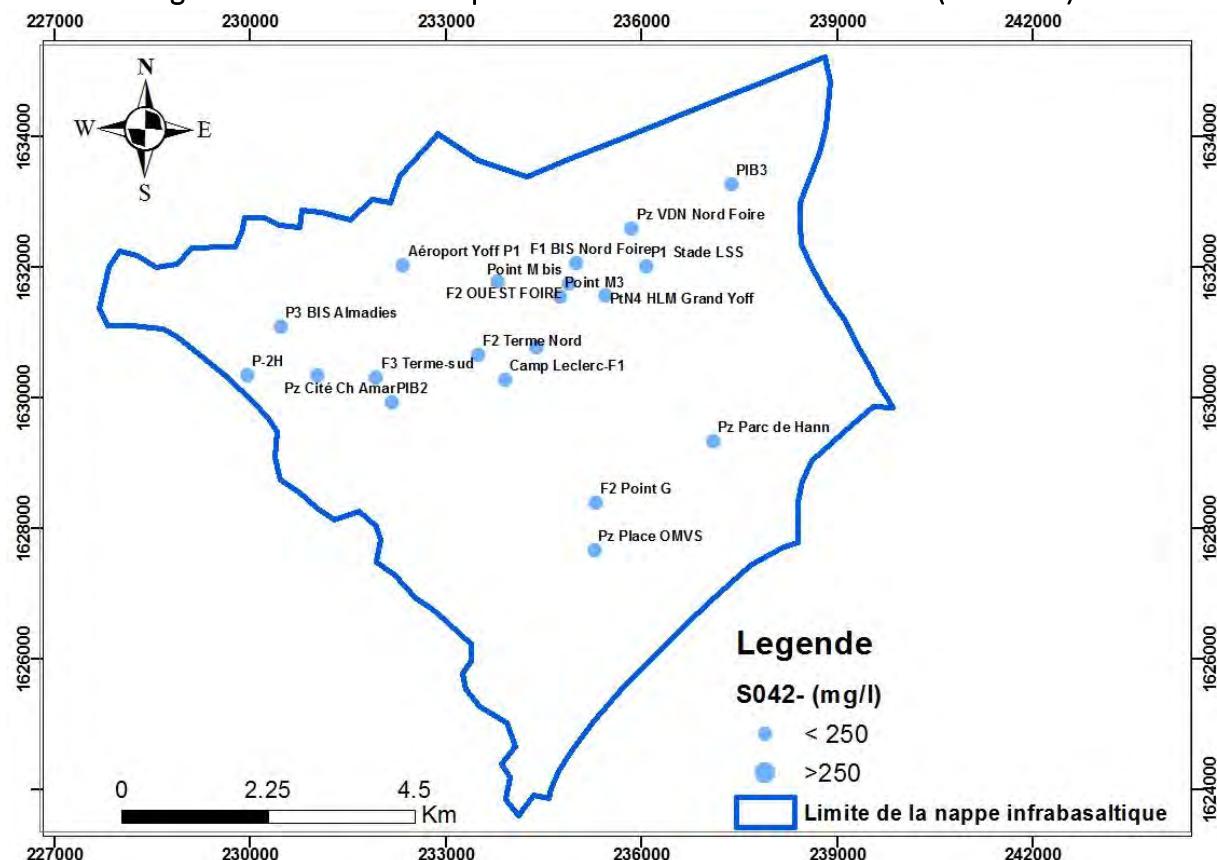


Figure 75: Distribution spatiale des teneurs en sulfates (Juin 2019)

III.2.5. Faciès chimiques des eaux de la nappe

Le diagramme de Piper a été utilisé pour déterminer les faciès des eaux de la nappe infrabasaltique (figure 76) qui reflètent la chimie des eaux échantillonnées lors de la campagne de Juin 2019.

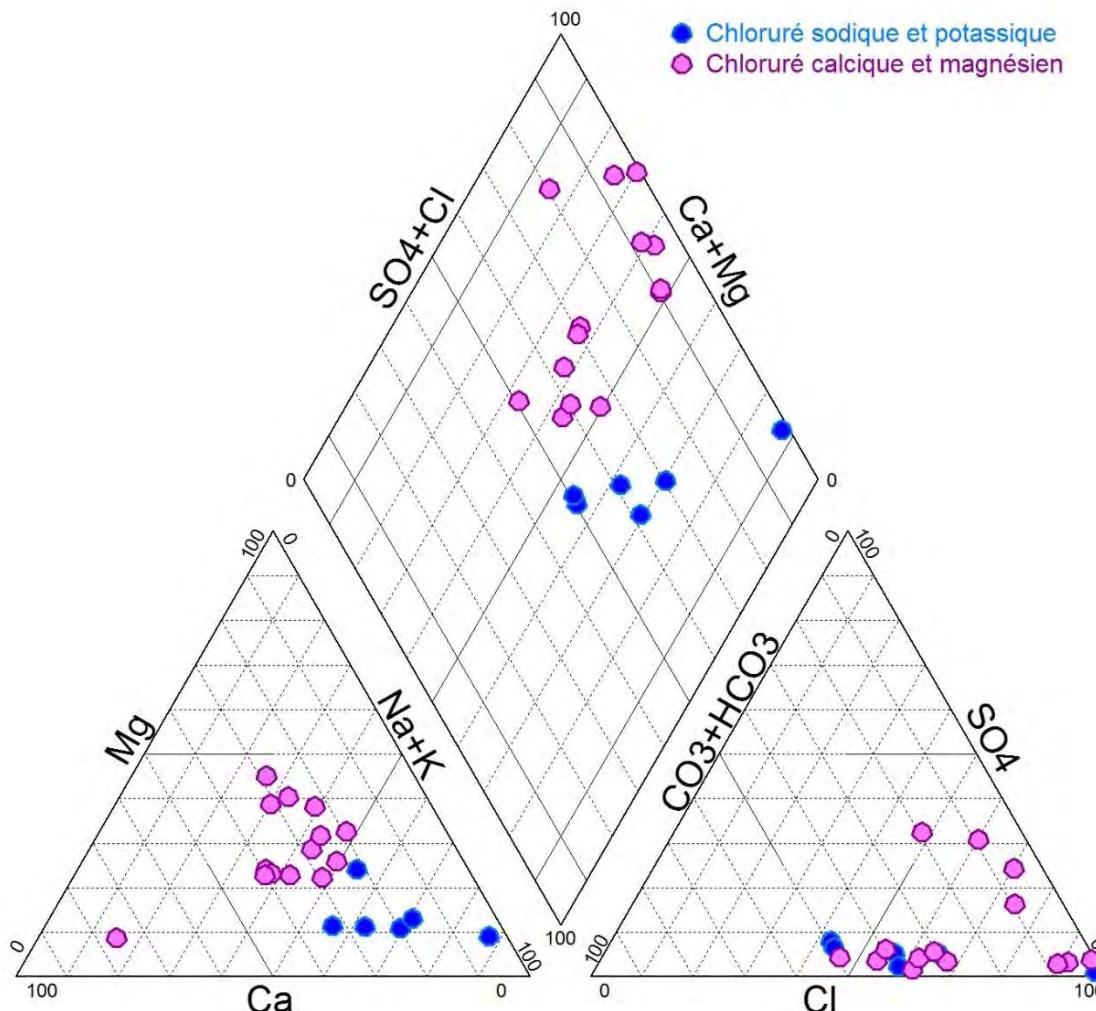


Figure 76: Diagramme de Piper des eaux de la nappe infrabasaltique (Juin 2019)

Le report des données d'analyse chimique dans le diagramme de Piper a permis de distinguer les différents faciès suivants :

- Faciès Chloruré calcique et magnésien : 70 %
- Faciès Chloruré sodique et potassique : 30 %

- Le faciès chloruré calcique et magnésien qui regroupe 70% des ouvrages échantillonnés est rencontré au niveau des piézomètres Pz cité Cheikh Amar, PIB2, P3 bis Almadies, Aéroport Yoff P1, P1 Stade LSS, PIB3, Pz VDN Nord Foire, Pz Place OMVS et des forages F2 Ouest Foire, PtN4 HLM Grand Yoff, F1 Camp Leclerc, F2 Camp Leclerc, F2 Point G et Terme Sud. Ce type de faciès peut s'expliquer par le phénomène d'échange cationique et de l'influence du substratum marneux ;
- Le faciès chloruré sodique et potassique regroupant 30% des ouvrages échantillonnés est décelé principalement au niveau des ouvrages Parc Hann, Point M3, Point M bis, F1 bis Nord Foire, F2 Terme Nord et Dakar Mamelles P2 haut BAD. Ces ouvrages présentent le même faciès avec des valeurs de conductivités très différentes. Les eaux avec des valeurs de conductivité électrique supérieur à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (par exemple le piézomètre Parc Hann) mettent en évidence l'intrusion d'eau de mer dans l'aquifère ;

III.2.6. Impact des pompages sur la chimie des eaux de la nappe

La forte exploitation de la nappe durant la période 2014-2019 a entraîné une baisse des niveaux piézométriques et un changement du comportement hydrodynamique de la nappe. Cette modification du régime d'écoulement de la nappe durant cette période peut avoir un impact sur la composition chimique des eaux.

L'augmentation des pompages au niveau de la nappe infrabasaltique peut entraîner une salinisation et/ou une pollution étant donné que la nappe est en contact directe avec l'océan et la nappe de Thiaroye respectivement au niveau des parties occidentale et orientale.

Au niveau des ouvrages PIB3 et P1 Stade LSS, les teneurs en nitrates ont atteint des valeurs très élevées, dépassant la norme admissible par l'OMS (50 mg/l). Cette contamination proviendrait probablement d'un écoulement latéral de la partie orientale où la nappe infrabasaltique est en contact avec la nappe Thiaroye.

Les valeurs de conductivités et de chlorures les plus élevées ont été observées au niveau des piézomètres Parc Hann, Pz cité Cheikh Amar, Pz Place OMVS et P-2H. Les faibles valeurs en nitrates obtenus au niveau de ces ouvrages indiquent que les eaux ne sont pas sujettes à un risque de pollution par les nitrates. Ces piézomètres sont probablement influencés par les eaux marines très proches.

Dans l'optique de voir l'impact des pompages sur la chimie des eaux de la nappe, plusieurs approches statistiques ont été utilisées, entre autres le box plot des ions majeurs, le coefficient de corrélation ou matrice de corrélation et les diagrammes binaires.

III.2.6.1. Box plot des ions majeurs

La figure 77 montre les gammes de teneurs en ions majeurs. Elle indique que le chlorure et le sodium sont respectivement l'anion et le cation dominant. Les valeurs de Cl^- varient de 67.94 à 14574 mg/l (moyenne 1096.4) et les valeurs de Na^+ varient de 23 à 8557 avec une moyenne 516.5 mg/l. Elle montre également que l'abondance relativement des ions est suivant l'ordre $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ pour les cations et $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ pour les anions.

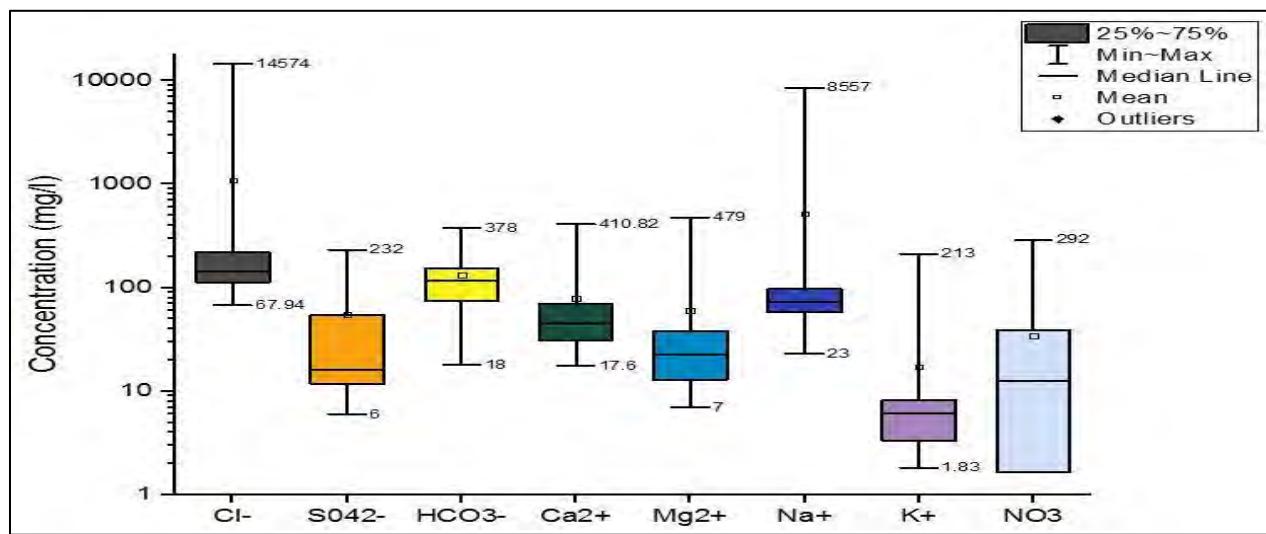


Figure 77: Box plot des ions majeurs

III.2.6.2. Matrice de corrélation des éléments chimiques

La matrice de corrélation permet d'évaluer la dépendance entre plusieurs variables en même temps. Dans le cas de notre étude (Tableau 5), la corrélation de Pearson, qui mesure la dépendance linéaire entre deux variables (Zou et al., 2003) a été retenue.

Les paramètres présentant $r > 0,7$ sont considérés comme fortement corrélés alors que r entre 0,4 et 0,7 présente une corrélation modérée. On a constaté que la plupart des paramètres présentaient une corrélation statistiquement significative les uns avec les autres, ce qui suppose qu'il y a une corrélation linéaire, relativement étroite entre les éléments chimiques.

Tableau 5 : Matrice de corrélation des éléments chimiques

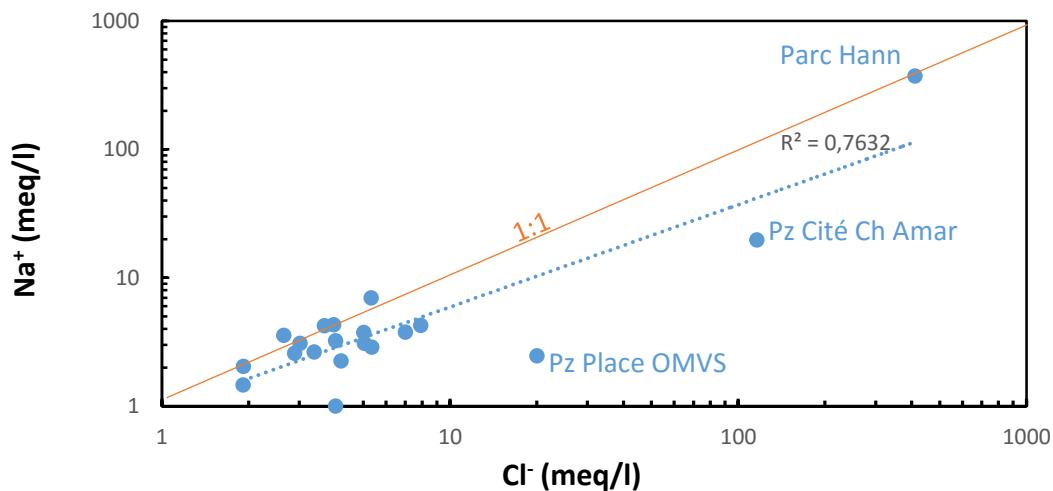
	CE	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
CE	1									
TDS	0.99	1								
Ca ²⁺	0.73	0.67	1							
Mg ²⁺	0.96	0.92	0.87	1						
Na ⁺	0.97	0.98	0.54	0.85	1					
K ⁺	0.95	0.97	0.5	0.82	0.99	1				
HCO ₃ ⁻	0.48	0.49	0.19	0.35	0.53	0.54	1			
Cl ⁻	0.98	0.99	0.71	0.95	0.97	0.95	0.47	1		
SO ₄ ²⁻	0.69	0.66	0.79	0.76	0.58	0.55	0.13	0.68	1	
NO ₃ ⁻	-0.1	-0.07	-0.08	-0.11	-0.06	-0.05	-0.31	-0.09	-0.06	1

Les coefficients de corrélation des paramètres étudiés sont présentés dans le tableau 5. On observe que le TDS est fortement corrélé avec les ions Cl^- (0.99), Na^+ (0.98), K^+ (0.97) et Mg^{2+} (0.92) et modérément corrélé avec les Ca^{2+} (0.67), SO_4^{2-} (0.66) et HCO_3^{2-} (0.49). La CE est fortement corrélé avec le TDS ($r = 0.99$), le chlorure ($r = 0.98$) et le sodium ($r = 0.97$). Une corrélation significative est observée entre Na^+ et Cl^- (0.97) et entre Mg^{2+} et Cl^- (0.95), en raison de la proximité de la nappe de la mer et probablement de l'intrusion d'eau de mer. Une forte corrélation est observée aussi entre l'ion Cl^- et les ions K^+ (0.95) et Ca^{2+} (0.71). Par ailleurs, l'ion Mg^{2+} montre également une bonne corrélation avec les ions Ca^{2+} (0.87), Na^+ (0.85) et K^+ (0.82). Le SO_4^{2-} est aussi bien corrélé aux ions Ca^{2+} (0.79), Mg^{2+} (0.76), mais moyennement corrélé au TDS (0.66) et aux ions Cl^- (0.68), Na^+ (0.58) et K^+ (0.55). Le HCO_3^- est modérément corrélé aux cations Na^+ (0.53), K^+ (0.54) et Mg^{2+} (0.35). Cependant, une faible corrélation se remarque entre Ca^{2+} et HCO_3^- ($r = 0.19$). La forte corrélation entre TDS et le Na^+ , K^+ , Cl^- , Mg^{2+} et la corrélation modérée avec Ca^{2+} , SO_4^{2-} et HCO_3^- , indiquerait que ces ions sont impliqués dans des réactions géochimiques telles que la dissolution et l'échange d'ions. Elle confirme aussi que ces éléments chimiques proviendraient d'une même source. La forte corrélation observée entre Ca-Mg indique que ces éléments chimiques auraient la même origine qui pourrait être le substratum marneux. La non-corrélation de l'ion NO_3^- avec les autres éléments chimiques s'expliquerait par le fait qu'il n'a participé à aucun processus géochimique d'une quelconque minéralisation des eaux.

III.2.6.3. Diagrammes binaires

L'ion chlorure est considéré comme un élément conservatif et ne participe pas aux interactions eau-roche (Custodio 1987; Tellam 1995 ; Hsissou et al, 1999). L'étude de cet ion par rapport aux concentrations des ions majeurs et les ratios, a été utilisé afin de mieux comprendre l'occurrence des différentes variations à l'origine des faciès et des concentrations ioniques dans les eaux souterraines.

-L'analyse du graphique Na vs Cl (Figure 78) montre que la majorité des points d'eau se positionnent presque sur la droite d'égale concentration 1:1, suggérant une origine commune qui peut être due à une contamination de l'eau de mer. (Obiefuna & al. 2011, Appelo & Postma, 2005). Les piézomètres Pz Cité Cheikh Amar et Pz Place OMVS qui se situent en-dessous de la droite d'égale concentration, indiquent un appauvrissement en sodium. Ces eaux sont contrôlées surtout par des réactions d'échange cationique (El Achheb et al, 2003).



-En fonction du positionnement des points sur le diagramme binaire NO_3^- vs Cl^- (Figure 79), trois groupes d'eau ont été identifiés :

- les eaux polluées qui renferment de fortes teneurs en nitrates et chlorures. Ce groupe est constitué des piézomètres P1 Stade LSS et PIB3, qui sont situés dans la zone Est. Cette pollution des eaux pourrait être due à une contamination de la nappe dans le secteur Est par les eaux de la nappe de Thiaroye.
- les eaux douces présentant de faibles teneurs en chlorures et nitrates. Ces eaux sont observées par exemple au niveau des ouvrages PtN4 HLM Grand Yoff, F2 Terme Nord et F2 Camp Leclerc.
- les eaux présentant de fortes concentrations en chlorures associés à de faibles teneurs en nitrates. Ceci montre une contribution de l'eau de mer dans le processus de salinisation de ces eaux. Ce groupe renferme les piézomètres Parc Hann, Pz Cité Cheikh Amar, Pz Place OMVS, P3 bis Almadies et Pz VDN Nord Foire.

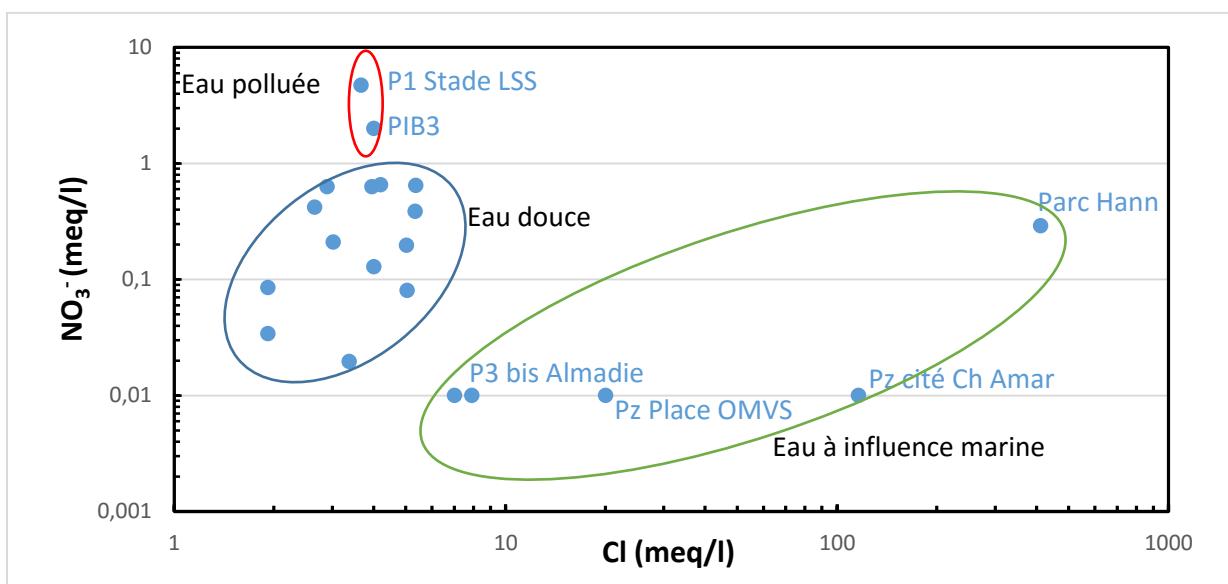


Figure 79 : Relation entre NO_3^- et Cl^- des eaux de nappe

-Le rapport molaire Na^+/Cl^- pour les échantillons analysés varie de 0.12 à 1.34 avec une valeur moyenne de 0.75. Le diagramme binaire Na/Cl vs Cl (Figure 80) montre que les piézomètres Parc Hann, Pz Cité Cheikh Amar, Pz Place OMVS, P3 bis Almadies et Pz VDN Nord Foire présentent un rapport Na/Cl inférieur à 1, indiquant un déficit en sodium. On constate que pour le piézomètre de Parc Hann, le rapport Na/Cl est très proche de celui de l'eau de mer (0.86), ce qui pourrait être lié à une influence directe par intrusion marine (Vengosh et Rosenthal 1994, Indu et al. 2015).

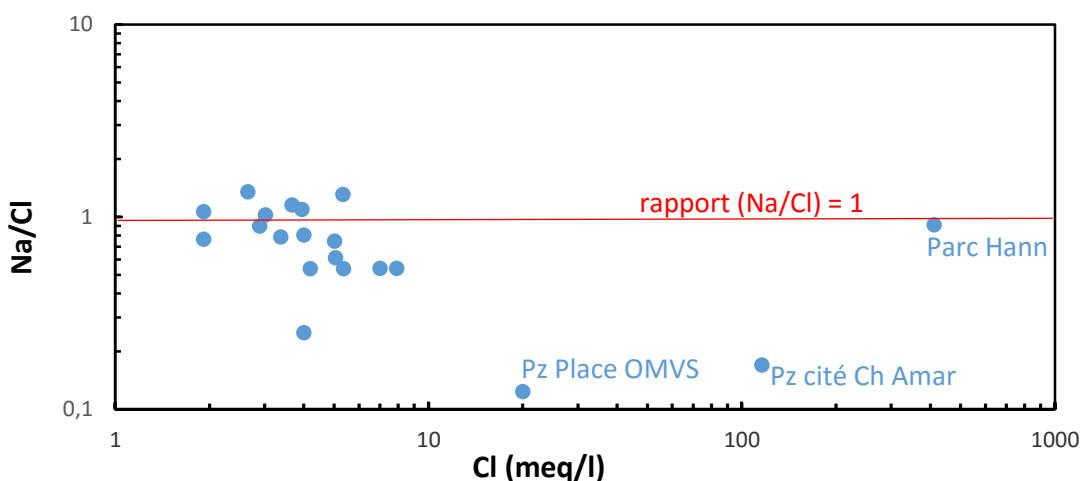


Figure 80 : Diagramme binaire du ratio molaire Na/Cl en fonction de Cl^- des eaux de nappe

-Le rapport ionique $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ est évalué en fonction des teneurs en chlorures. Le graphique $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ vs Cl^- est représenté à la Figure 79. Si le rapport est inférieur à 0,5 les eaux souterraines sont classées comme non affectées par la salinisation. Entre 0,5 et 6,6, les eaux sont faiblement à moyennement affectées par la salinisation, pour les eaux fortement affectées par la salinisation, le rapport $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ est supérieur à 6,6 (Revelle 1941, Aris et al. 2012). En considérant la classification adoptée par Revelle (1941), les piézomètres Parc Hann, Pz Cité Ch Amar, Pz place OMVS, Pz VDN N-F, P3 bis Almadies et P1 SLSS (30% des eaux) présentent un ratio $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ supérieur à 6,6, donc fortement affectés par la salinisation. Cependant, 60% des points d'eau présentent des valeurs comprises entre 0,5 et 6,6. Ces ouvrages peuvent être considérés comme peu affectés par la salinisation. Les points caractérisant les eaux les plus salées sont situés à une distance inférieure à 2 km de la côte. .

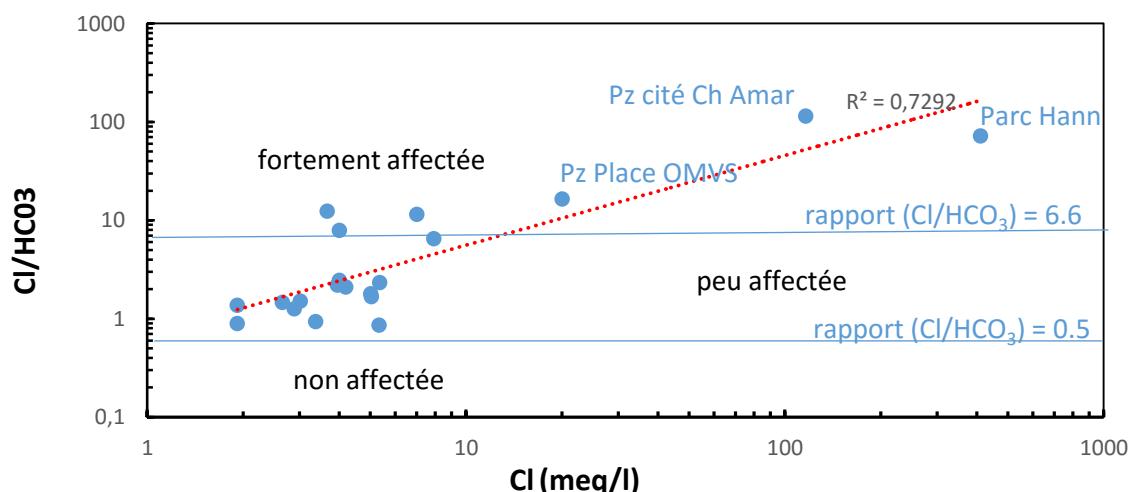


Figure 81 : Diagramme binaire du ratio molaire Cl/HCO_3^- en fonction de Cl

Conclusion partielle

A partir des diagrammes binaires, on peut déduire que la composition chimique des eaux souterraines est influencée par l'intrusion d'eau de mer au niveau des ouvrages Parc Hann, Pz Cité Ch Amar, Pz place OMVS, Pz VDN N-F, P3 bis Almadies et P1 SLSS. Cependant, les eaux échantillonnées dans la partie orientale sont caractérisées par des teneurs en nitrates très élevées laissant penser à une alimentation latérale de la nappe infrabasaltique par la nappe de Thiarore. L'hypothèse d'intrusion marine dans la partie sud-est de la nappe est justifiée par les fortes teneurs en chlorures et des teneurs en nitrates très faibles au niveau de ces ouvrages.

CONLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le système aquifère de la tête de la presque île de Dakar, situé à l'extrême ouest du Sénégal, entre les longitudes 17°25' et 17°30' Ouest et les latitudes 14°40' et 14°45' Nord, a fait l'objet de notre étude. La zone d'étude présente un régime climatique particulier à cause des influences à la fois saharienne et océanique qu'il subit. La région présente une saison sèche et fraîche de novembre à juin et une saison humide et pluvieuse de juillet à octobre pendant lesquelles s'établissent respectivement des vents qui sont l'alizé maritime et la mousson.

Sur le plan géologique, la zone appartient au bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien. Elle est entièrement recouverte par les formations du Tertiaire et du Quaternaire, subdivisées en Quaternaire ancien et en Quaternaire récent.

Sur le plan hydrogéologique, la nappe infrabasaltique est contenue dans les sables quaternaires dont le toit est recouvert de coulées basaltiques. Elle est captive à cause de la couverture volcanique qui la surmonte dans toute sa partie occidentale. Cependant, elle devient semi captive à libre vers l'Est. Partout ailleurs, à l'Ouest, au Nord et au Sud, la nappe est en contact avec l'océan.

Les principaux résultats de notre étude ont montré que la nappe infra basaltique est vulnérable à l'intrusion saline due à la proximité de la mer, en association avec l'exploitation intensive. La production actuelle de la nappe a largement dépassé le débit d'équilibre supposé de la nappe infrabasaltique.

La piézométrie de la nappe a été caractérisée à différentes échelles. On observe une baisse de la piézométrie durant les périodes 1990-1993, 2000-2004 et 2010-2020. Cette baisse est surtout engendrée par l'accroissement des pompages. Cependant, la diminution des prélèvements sur la période 1993-1995 et 2005- 2010 est à l'origine de la remonté de la nappe. A L'échelle mensuelle, on observe une baisse du niveau piézométrique pendant la saison sèche et une remonté pendant l'hivernage.

L'approche physico-chimique a montré que les eaux de la nappe sont majoritairement acides à neutres. La répartition spatiale des valeurs de conductivité électrique indique des valeurs élevées au niveau de certains ouvrages situés dans la zone de Hann, Ouakam, Dakar Mamelles et Yoff. De fortes teneurs en nitrates sont observées dans le secteur Est, à la proximité de la partie libre de la nappe et sont liées probablement à une alimentation latérale de la nappe infrabasaltique par la nappe de Thiaroye. Les eaux de la nappe sont caractérisées par trois types de faciès : faciès chloruré calcique et magnésien, faciès chloruré sodique et potassique et faciès bicarbonaté sodique et potassique.

La forte minéralisation et les faibles teneurs en nitrate observées au niveau des ouvrages Parc Hann, Pz Cité Cheikh Amar Ouakam, Pz Place OMVS et Mamelles P2 haut bis sont liées probablement à l'intrusion des eaux de la mer. Ce phénomène d'intrusion marine est accompagné par d'autres processus, dont le plus remarquable est celle de la réaction d'échange de base.

La nappe infra basaltique est une source importante d'AEP dans la région de Dakar. Cependant une gestion efficace est nécessaire pour la préservation de la ressource. C'est ainsi qu'il sera judicieux de :

- maitriser les impacts liés à la surexploitation de la nappe ;
- renforcer le réseau de surveillance existant par la réalisation de nouveaux piézomètres et une bonne organisation de campagnes de mesures ;
- réduction des prélèvements une fois la livraison de KMS 3 ;
- d'accélérer le projet du dessalement des eaux de mer en cours qui peut être également développé pour réduire l'impact de la surexploitation de la nappe infra basaltique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Appelo et Postma (2005).** Géochimie, eaux souterraines et pollution. 2nd édition, CRC Press /Balkema, 668p
- Aris et all., (2012)** The influence of seawater on the chemical composition of groundwater in a small Island : The example of Manukan Island, East Malaysia. *Journal of Coastal Research*, 279 (1), 64-75
- Bellion, Y.J.C. (1987).** Historique géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemmeden, Tchad). Thèse de Doctorat ès Sciences, Université d'Avignon (Paris, France), 302 p.
- Besbes, M. (2010).** Hydrogéologie de l'ingénieur, pp 280-291
- B.R.G.M., (1992)** Réévaluation de la ressource en eau du littoral Nord du Sénégal. Synthèse des données. Modification hydrodynamique et simulations prévisionnelles. Service sol et sous-sol. 54p.
- Castelain, J., Jardine, S., Monciardini, C., (1965)** Excursions géologiques dans le Sénégal Occidental. Mém. BRGM, Paris, 32, 357- 372.
- Cidu et al., (2009)** Impact of past mining activity on the quality of groundwater in SW Sardina (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 100 : 125-132 Impact de l'activité minière passée sur la qualité des eaux souterraines dans le Sud-ouest de la Sardaigne (Italie)
- Cissé Faye, S. (2001).** Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane. Etude de la contamination par les nitrates sur la base d'un système d'information géographique 194 p +Annexe. Thèse de doctorat de troisième cycle. Dept de Géologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal.
- Crevola, G., Gaye, C. B. (1979).** Interprétation géologique des coupes de six sondages réalisés au niveau de la tête de la presqu'île du Cap-Vert. In : «Alimentation en eau de Dakar». Rapport Département de Géologie, Université CAD, Dakar (Sénégal). Projet PNUD/OMS SEN 77011, 22 p.
- Custodio. (1987).** Problèmes des eaux souterraines dans les zones côtières, études et rapports en hydrologie 45, UNESCO, Paris, 596p

DGPRE (2009). Projet eau à long terme. Etudes Hydrogéologiques complémentaires : Phase IV. Etude des aquifères de Dakar et du littoral Nord pour le renforcement en eau potable de la ville de Dakar et environs. Rapport Phase IV-Lot 1A Modélisation numérique-Aquifère Infrabasaltique /GKW Consult, juin 2009, 44p+Annexe.

DGPRE (2015). Répertoire des forages du Sénégal.

Diedhiou M. (2011). Approche multitraceur géochimique et isotopique à l'identification des sources de la pollution nitratée et des processus de nitrification et dénitrification dans la nappe de Thiaroye. Dakar: Thèse de doctorat unique, Université Cheikh Anta Diop, 210p.

Dieng, N.M. (2009) Analyse des risques hydrologiques avec l'imagerie satellitaire optique ; cas des inondations dans la région de Dakar, Mémoire de DEA, Université Cheikh Anta de Dakar, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie. 59p.

Diouf O.C.D (2005). Exploitation et durée de vie des forages d'eau dans l'aquifère des sables infrabasaltiques de la tête de la presqu'île de Dakar (Sénégal). Mémoire DEA, Université Cheikh Anta Diop, 71p +annexes.

Diouf, O.C.D (2012). Apport des outils cartographiques et géochimiques à la validation des paramètres d'entrée du modèle hydrogéologique de la nappe des sables quaternaires de Dakar: implication sur les inondations en zone péri-urbaine. Thèse de doctorat 3ème cycle, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop, 86 p.

El Achheb et al., (2003) Mécanisme d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin Sahel Doukkala (Maroc Occidental). Approche par des traceurs hydrogéochimiques.

Elouard, P., Faure, H., & Hébrard, L. (1977) Variations du niveau de la mer au cours des 15 000 dernières années autour de la presqu'île du Cap-Vert, Dakar - Sénégal: Bulletin de Liaison de l'ASEQUA, v. 50, p. 29-49.

Envoutou, H.C (2018). Fonctionnement hydrodynamique du système aquifère du bassin sédimentaire côtier dans la ville de Douala/Cameroun : Apport des outils géochimiques, géostatistiques et isotopiques. Thèse de doctorat, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop, 182 p.

Faye, A. (1983). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du horst de Ndiass et de ses environs (Sénégal occidental). Thèse 3eme cycle Univ. Dakar. 160 p

Faye, S. (1995) Modélisation hydrodynamique de la nappe du Littoral Nord entre Cayar et Saint louis, Impact des futurs prélèvements sur l'approvisionnement de Dakar et ses environs Louis. Thèse 3ème cycle, Département Géologie, Université Cheikh Anta Diop - Dakar, 167p.

Faye, S. (2005) Apport des outils géochimiques et isotopiques à l'identification des sources de salinité et à l'évaluation du régime d'écoulement de la nappe du Saloum. Thèse de doctorat d'état, Département Géologie, Université Cheikh Anta Diop - Dakar, pp 90-93

Frissant N., René-Corail C., coll. Bonnier J. et De La Torre Y. (2005). Le phénomène d'intrusion saline à La Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR, 64 p., 27 ill., 4 tabl.

Gaye, C.B. (1980). Etude hydrogéologique, hydro chimique et isotopique de la nappe infrabasaltique de la presqu'île du Cap Vert. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Département de Géologie, Université de Dakar (Sénégal), 131 p.

Gaye C. B. (1983) La nappe des sables infrabasaltiques de la tête de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal). Bull. IFAN T.45, Série A, n° 1-2. 48 p.

Gaye, C.B. (1986). La nappe des sables infrabasaltiques de la tête de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal). Bull. de l'IFAN, tome 45, série A, n°1-2.

Ghabayen et al., (2006) Ionic and isotopic ratios for identification of salinity sources and missing data in the Gaza aquifer. J. Hydrol. 318, 360-373.

Hebrard, L. (1966). Les formations tertiaires et quaternaires de l'isthme de la presqu'île du Cap Vert (Feuille Thiaroye). Diplôme d'Etudes Supérieures. Rapport Laboratoire, Département de Géologie, Université C.A.D., Dakar (Sénégal), n°16, 75 p.

Hebrard L. & Elouard P. (1976) – Carte géologique à 1/20 000 et Notice explicative de la carte de Tiaroye (Presqu'île du Cap-Vert). Ministère du développement industriel et de l'environnement, Direction des Mines et de la Géologie, République du Sénégal, 35 p.

Hsissou et al., (1999) Utilisation du rapport Br/Cl pour déterminer l'origine de la salinité des eaux souterraines : exemple de la plaine du Souss (Maroc). C. R. Acad. Sci. Paris, 328, 381-386

Indu et al., (2015) Identification of seawater intrusion by Cl/Br ratio and mitigation through managed aquifer recharge in aquifers north of Chennai, India ; J. Groundwater Res. 2 155-162.

Kaba, M. (2009). Evaluation des zones potentielles de recharge de la nappe de Thiaroye: approche cartographique par télédétection et systèmes d'informations géographiques.

Mémoire D.E.A 128p. FST – U.C.A.D.

Kaba, M. (2017) Etude Hydrogéologique régionale et Fonctionnement hydrogéochimique des Zones humides du Littoral Nord/SENEGAL. These de doctorat unique, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 121p.

Kane, C.H., (1995) Contribution à l'étude hydro chimique de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord au Sénégal entre Kayar et Saint Louis. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop Dakar, 162 p. + annexes.

Kouzana, L., et coll (2009) Seawater intrusion and associated processes: Case of the Korba aquifer (Cap-Bon, Tunisia): C.R. Geoscience, v. 341, p. 21-25.

Le Borgne J. (1988) La pluviométrie au Sénégal et en Gambie, ORSTOM, Ministère Français de la coopération, 95 p

Madioune, D.H, (2012) Etude hydrogéologique du système aquifère du horst de Diass en condition d'exploitation intensive (bassin sédimentaire sénégalais) : apport des techniques de télédétection, modélisation, géochimie et isotopie. Thèse de doctorat, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop Dakar, 103-105 pp

Martin, A. (1967) Etude géochimique des eaux souterraines de l'Afrique de l'Ouest Presqu'île du Cap-Vert (Sénégal) : BRGM, DAK 67.

Martin, A. (1970) Les nappes de la presqu'île du Cap Vert. Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar. Rapport B.R.G.M, 56p

Mondal NC, Singh VS, Rangarajan R (2009) Aquifer characteristics and its modeling around an industrial complex, Tuticorin, Tamil Nadu, India: a case study. J Earth Syst Sci 118(3):231–244.

Obiefuna et all., (2011) Evaluation de la qualité des eaux souterraines peu profondes de la région de Pindiga Gombe, région de Yola, Nord Est, Nigéria à des fins d'irrigation et à des fins domestiques, journal de recherche des sciences de l'environnement et de la terre, pp 131-141

Olivry J.C . (1983) Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Senegambie et aux îles du Cap-vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). Cahiers ORSTM, Paris, vol.xx, no 1, pp 47-70

OMS 1972 : Etude des eaux souterraines : approvisionnement en eau et Assainissement de Dakar et ses environs. Tome III : Nappe des formations secondaires et tertiaires du massif de Ndiass et régions avoisinantes. Rapport OMS 1972 projets Sénégal 3201.

Plan directeur de l'urbanisme (2003) Direction de l'urbanisme et de l'habitat du Sénégal (PDU) de Dakar « Horizon 2025 », Livre Blanc.

Revelle, R., (1941) Criteria for recognition of the sea water in ground-waters. Transactions, American Geophysical Union 22, pp 593-597

Sarr B. (2000) Contribution à l'étude hydrogéologique des aquifères de l'Ouest du bassin du Sénégal. Thèse Docteur 3ème cycle. Univ. Cheikh Anta Diop, 128 p + annexes.

Saxena VK, Mondal NC, Singh VS (2004). Evaluation of hydrogeochemical parameters to delineate freshwater zones in coastal aquifers. J Appl Geochem 6:245–254.

Seck. M. (2018) Actualisation des connaissances sur la nappe du littoral Nord et évaluation des impacts potentiels de l'exploitation des sables minéralisés par Grande côte opérations : approche hydro chimique, isotopique et hydro chimique par modèle Sénégal. Thèse de doctorat unique, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar. 159p.

SONEES (1986) Renforcement de l'approvisionnement en eau de la région de Dakar (1986-1991) phase intérimaire. Rapport définitif, tome 1, 305 p.

SONEES (1989) Note sur la teneur en Nitrates des eaux de la nappe de Thiaroye et de ses environs. Labor. d'analyse SONEES, DK, SN, 8 p.

Tellam. (1995) La chimie et l'origine des eaux souterraines dans le grès du Trias et les dépôts Quaternaires du Nord-Ouest de l'Angleterre. Journal en hydrologie, pp 293-311

Tessier, R. (1950). Contribution à la stratigraphie et à la paléontologie de la partie Ouest du Sénégal (Crétacé et Tertiaire)- Thèse es Sciences. Marseille et Bull.Dir.Fed.Mines Géol.AOF, N°14 (1952), 267p.

Tessier, F., Lapartient, J. (1967). Observations sur la latérite récente des environs de Dakar (Sénégal). Bull. Soc. Géol. 7e série, pp 455 – 466.

Travi, Y. (1988) : L'étude hydrogéologique et hydro chimique des aquifères du Sénégal et l'hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines, Thèse doctorat es-sciences Univ. De Paris Sud(Orsay) ,190p.

Vengosh A, Rosenthal E (1994) Eau souterraine saline en Israël : son incidence sur la crise de l'eau dans le pays, journal hydrologie 156, pp 389-430

Walraevens K, Van Camp M (2005) Progrès dans la compréhension des contrôles de la qualité des eaux souterraines naturelles dans les aquifères côtiers. & Réunion sur les intrusions d'eau salée (SWIM). Cartagena 2004, Espagne, pp 451-460

Zou, K. H., Tuncali, K., & Silverman, S. G. (2003). Correlation and Simple Linear Regression.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Les prélèvements de la nappe infrabasaltique (1925-2019)

Années	Prélèvement (m ³ /j)
1925	3000
1926	3000
1927	3000
1928	3000
1929	3000
1930	3000
1931	3000
1932	3000
1933	3000
1934	3000
1935	3000
1936	3000
1937	3000
1938	3000
1939	3000
1940	12000
1941	12000
1942	12000
1943	12000
1944	12000
1945	12000
1946	12000
1947	24000
1948	24000
1949	24000
1950	24000
1951	24000
1952	24000
1953	24000
1954	24000
1955	24000
1956	24000
1957	24000
1958	24000
1959	18000
1960	18000
1961	18000
1962	18000
1963	18000
1964	18000
1965	18000
1966	18000

1967	18000
1968	18000
1969	18000
1970	18000
1971	18000
1972	18000
1973	18000
1974	18000
1975	18000
1976	18000
1977	18000
1978	18063
1979	15814
1980	17143
1981	13777
1982	15690
1983	18183
1984	18526
1985	18297
1986	17012
1987	18562
1988	18525
1989	18488
1990	18419
1991	18890
1992	19465
1993	17258
1994	17515
1995	17127
1996	18218
1997	18315
1998	15661
1999	17656
2000	13635
2001	13785
2002	14703
2003	15079
2004	15983
2005	15547
2006	12035
2007	11934
2008	11654
2009	11418
2010	11814
2011	17162

2012	16840
2013	18104
2014	17817
2015	19572
2016	25595
2017	30130
2018	34890
2019	42489

Années	Prélèvements en m³/an
1985	6821760
1986	6821760
1987	6821760
1988	6821760
1989	6748011
1990	6722859
1991	6894936
1992	7104892
1993	6299312
1994	6392990
1995	6291104
1996	6649521
1997	6684892
1998	5716429
1999	6444492
2000	4977022
2001	5031573
2002	5366910
2003	5503839
2004	5833920
2005	5674692
2006	4392931
2007	4356005
2008	4253756
2009	4167739
2010	4311941
2011	6264300
2012	6146890
2013	6608159
2014	6503517
2015	7143811
2016	9342320
2017	10997716
2018	12735091
2019	15508546

Annexe 2 : Les paramètres physico-chimiques

Ouvrage	X	Y	pH	T (°C)	CE (μ S/cm)
Point M bis	234882	1631757	7.51	31.3	532
Point M3	234750	1631550	7.3	31	634
Dakar Mammelles BAD P2 haut BIS	229959	1630347	6.98	29	1957
Pz Parc de Hann	237100	1629334	8.4	31	37181.92
F1 BIS Nord Foire	235005	1632063	7.28	30.8	475
PIB2	232169	1629942	6.41	30	1023
PIB3	237387	1633273	6.51	31.1	830
P1 Stade LSS	236082	1632021	7.02	31	600
Aéroport Yoff P1	233100	1632976	8.2	29	994
Pz Place OMVS	235278	1627664	7.18	30.1	2203.48
Pz Oakam(cité Cheikh Amar)	231034	1630345	7.84	30	11590
P3 BIS Almadies	230463	1631089	7.87	31	1188.95
Pz VDN Nord Foire	235849	1632607	7.8	30	1927
F2 Terme Nord (cité Tobago)	233493	1630665	7.34	31.6	440
F2 Point G(Liberté 3)	235294	1628400	6.75	30.3	508
F2 OUEST FOIRE	233794	1631796	7.18	30.5	610
FL6 CAMP LE CLERC	234386	1630778	6.85	30.6	740
PtN4 (HLM Grand Yoff)	235448	1631566	7.09	32	365
F3 Terme-sud(Ouakam)	231933	1630322	6.6	31.6	850
Camp Leclerc-F1(Liberté 6)	233908	1630291	6.79	30.3	755

Annexe 3 : Les données chimiques

Désignation	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
Point M bis	94	12	110	21	7	82	5	26
Point M3	140	15	110	21	10	99	7	39
Dakar Mammelles BAD P2 haut BIS	189	48	378	85	18	160	12	24
Pz Parc de Hann	14574	232	348	292	479	8557	213	18
F1 BIS Nord Foire	107	6	122	27	7	71	3	13
PIB2	190	13	140	65	24	66	6	40
PIB3	142	42	31	41	19	74	7	124
P1 Stade LSS	130	61	18	74	29	97	6	292
Aéroport Yoff P1	179	6	183	66	24	71	6	5
Pz Place OMVS	710	34.56	74.4	64.12	60.75	56.7	17	0
Pz Oakam(cité Cheikh Amar)	4118	216	62	410.82	309.82	452.5	3.5	0
P3 BIS Almadies	280.45	193.92	74.4	36.07	36.45	97.8	6.3	0
Pz VDN Nord Foire	248.5	11.52	37.2	46.49	47.62	86.7	8.6	0
F2 Terme Nord (cité Tobago)	67.97	13.88	131.15	17.76	11.98	46.76	6.98	2.12
F2 Point G(Liberté 3)	142	129.6	99.2	120.24	8.5	23	7.8	8
F2 OUEST FOIRE	102.54	9.24	140.3	34.8	21.38	59.45	2.82	39.15
FL6 CAMP LE CLERC	119.62	15.6	219.6	44.04	40.09	60.75	1.83	1.22
PtN4 (HLM Grand Yoff)	67.94	10.43	85.4	17.6	13.61	33.6	2.71	5.29
F3 Terme-sud(Ouakam)	177.91	16.44	170.3	38.02	24.35	86.05	3.21	12.21
Camp Leclerc-F1(Liberté 6)	148.6	17.8	122	60.06	20.65	51.65	19.82	40.55

Annexe 4 : Nouveaux forages

Désignation	Latitude	Longitude	Entreprise	Date de réception	Prof total(m)	Prof Inf-crép(m)	Prof Sup-crép(m)	Débit Essai(m3/h)	Niv sta(m)	ND	Rab(m)	Débit d'exploitation
Cices-F3	14°44'36"	17°27'42"	SENTER	31/07/2015	108	102.8	63.8	125	29.96	44.99	15.03	125
F1 Camp Leclerc	14°44'00"	17°28'17"	MENDEZ	10/08/2015	100	91.75	72.07	125	39.32	64.5	25.18	117
F2 Point G	14°42'59N	17°27'30"W	MENDEZ	25/09/2015	97	87	69.84	102.04	29.52	43.59	14.07	
F1 uest foire	14°44'48.88"	17°28'21.35"	Bauer	07/12/2016	100	86.03	56.45	203	22.35	36.06	13.71	150
PtN4 HLM Grand Yoff	14°44'42"	17°27'26"	SENTER	21/03/2017	105	100.95	60.6	150.73	29.93	44.78	14.85	130
F2 CAMP LECLERC	14°44'16"	17°28'1.2"	SENTER	19/05/2017	118.8	112.2	64.2	55.44	38.5	50.35	11.8	50
F3 terme sud Ouakam	14°44'0.28"	17°29'23"	SENTER	28/06/2017	95	90.2	60.2	159.4	22.1	36.81	14.71	100
F1 L.SMC	14°44'48"	17°27'23"	CGC	11/08/2017	105	101.22	98.22	117	31.15	39.07	7.92	100
F2 Nord Foire	14°44'58"	17°27'35"	CGC	17/08/2017	105	100.27	65.27	120	33.35	50	16.65	100
F1 Dieupeul-Derklé	14°42'52"	17°27'15"	CGC	27/07/2018	85	72	52	33	23.44	37	13.56	28
F1 BIS Nord Foire	14°44'58"	17°27'41"	CGC	06/08/2018	114	104	70	126.91	36.16	53.51	17.35	120
F2 Terme Nord Tobago	14°44'12"	17°28'31"	CGC	09/08/2018	126	110	72	157.2	35.48	59.01	23.53	150

Annexe 5 : Anciens forages

Forage	Latitude	Longitude	Entreprise	Date de réception	Prof total(m)	Prof Inf-crép(m)	Prof Sup-crép(m)	Débit Essai(m3/h)	Niv sta(m)	ND	Rab(m)
Terme Nord bis	14°44'36"	17°28'23"	SASIF	18/11/1967	89	86	61	104	27.76	39.34	11.58
FRONT TERRE	14°43'45"	17°27'20"	COFOR	10/02/1973	78.05	78.1	44.9	170	21.5	44.5	23
Terme Sud	14°44'03"	17°29'12"	SASIF	05/04/1973	90.7	87	66.4	150	23	40.5	17.5
Camp Penal	14°44'18"	17°27'58"	COFOR	27/06/1977	91	85	68.76	37.04	32	34.7	2.7
FORT A bis	14°43'34"	17°28'23"	SASIF	06/08/1979	102.25	100.2	66.5	95	30.45	55.35	24.9
Point Mbis	14°44'48"	17°27'45"	SASIF	27/02/1982	83.5	81	56	153	31.25	41	9.75

Annexe 6 : Nouveaux piézomètres

Piézomètres	Latitude	Longitude	Entreprise	Date de réception	Prof total(m)	Prof Inf-crép(m)	Prof Sup-crép(m)	Débit Essai(m3/h)	Niv sta(m)	Niv D (m)	Rab(m)
Pz ALSS	N14°44'56"	17°29'10"	CGC	04/12/2018	90	85,1	64,46	26.06	31.21	44.78	13.57
Pz SLSS	N14°44'57"	17°27'05"	CGC	31/12/2018	87	77	62.25	25,71	19.35	44.04	24.69
Pz cimetière Yoff	N14°45'35"	17°27'41"	CGC	13/12/2018	80	75	54,24	93,28	9.93	23.74	13.81
Pz Parc Hann	N14°43'30"	17°26'30"	CGC	21/11/2018	120	53	37,25	21	2.16	13.5	11.34
Pz Ayoff	N14°45'27"	17°28'45"	CGC	15/01/2019	90	85	65,2	80.21	14.34	38.27	24.1
Pz OUAKAM	14°44'0.70"N	17°29'53.06"	DIAMA TECH. SA	10/08/2019	84	77.7	66	14.1	19.11	36.7	17.59
Pz Place OMVS	14°42'35.04"N	17°27'30.26"	DIAMA TECH. SA	15/05/2019	64	61	43.6	14.05	16.08	32.16	16.08
P3 BIS almadies	14°44'24.70"N	17°30'12.40"	DIAMA TECH. SA	20/08/2019	75	72	54.9	14.92	13	19.47	6.47
Pz VDN Nord Foire	14°45'16"N	17°27'13"	DIAMA TECH. SA	07/05/2019	55	52	34.6	14.05	23.4	31.67	8.27

Résumé

La nappe infrabasaltique est située dans une zone côtière, à l'extrême Ouest de la presqu'île du Cap-Vert. Cet aquifère est largement en communication avec l'océan Atlantique qui constitue ses limites Ouest, Nord et Sud ce qui la rend vulnérable à l'intrusion saline. Il s'étend sur une superficie d'environ 63 Km² et représente une ressource primordiale pour la ville de Dakar. Ce système est soumis à des pompages intensifs pour contribuer à la satisfaction de la demande en eau sans cesse croissante de la ville de Dakar. Ainsi, La production de la nappe passe de 17 817 m³/j en 2014 à 42489 m³/j en 2019. Cette production actuelle a largement dépassé le débit d'équilibre supposé de la nappe infra basaltique qui est de 18000 m³/j.

Cette présente étude vise à déterminer l'impact de l'augmentation des prélèvements sur la piézométrie et de suivre l'évolution spatio-temporelle de la minéralisation des eaux pour une gestion durable de la ressource.

L'évolution de la piézométrie de la nappe montre une baisse généralisée des niveaux piézométriques causée par le pompage excessif des forages. Cette baisse est faible dans la partie Nord, forte dans le secteur Ouest. Au niveau des ouvrages P1 Aéroport Yoff ; P1 Stade LSS ; P1 Cimetière Yoff et Parc Hann, le niveau piézométrique est très marqué par les variations saisonnières.

Les caractéristiques physico-chimiques révèlent que les eaux sont majoritairement acides à neutres et une minéralisation moyenne à forte s'observe au niveau des secteurs de Hann, Ouakam et de Yoff. Les eaux de la nappe sont caractérisées par deux types de faciès chimiques : faciès chloruré calcique et magnésien (70%) et faciès chloruré sodique et potassique (30%). L'interprétation des résultats a montré que l'intrusion marine joue un rôle important dans la minéralisation des eaux de la nappe.

Mots-clés : Nappe infrabasaltique, pompage intensif, piézométrie, minéralisation, intrusion marine.
