



Année 2012

UNIVERSITE MARIEN NGOUABI
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES



N° d'ordre.....

THESE

PRESENTEE

A

L'UNIVERSITE MARIEN NGOUABI

Pour obtenir le Diplôme de

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE MARIEN NGOUABI

SPECIALITE : Hydrogéologie et Hydrologie Environnementales

Par **MOUKANDI N'KAYA Guy Dieudonne**

Titre :

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE, HYDROCHIMIQUE *IN SITU* ET MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DU SYSTEME AQUIFERE DU BASSIN SEDIMENTAIRE CÔTIER DE LA REGION DE POINTE-NOIRE

Soutenue publiquement le 03 juillet 2012 devant le jury d'examen :

Bernard M'PASSI MABIALA, Professeur, Université Marien Ngouabi

Alain LARAQUE, Directeur de recherche, IDR Montpellier

Timothée NSONGO, Maître de Conférences, Université Marien Ngouabi

Raymond MALOU, Maître de Conférences, Université Cheikh Anta Diop, Dakar

Dominique NGANGA, Professeur, Université Marien Ngouabi

Bernard MABIALA, Maître de Conférences, Université Marien Ngouabi

Président du jury

Rapporteur externe

Rapporteur interne

Examinateur

Directeur de thèse

Codirecteur de thèse

A mon père Joseph MOUKANDI à qui je rends hommage

Remerciements

Je tiens à remercier monsieur Bernard M'PASSI-MABIALA, Professeur des Universités-Université Marien Ngouabi, pour ses multiples encouragements à terminer ce travail et pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Je remercie également Alain LARAQUE, Directeur de Recherches IDR, HDR, Coordonnateur des chantiers Congo, Venezuela et Guyane de l'observatoire ORE/HYBAM, Hydrological Adviser pour la France auprès de l'OMM pour les régions AR III et IV, Montpellier pour sa confiance qu'il me fait en acceptant d'être rapporteur de cette thèse.

Que monsieur Timothée NSONGO, Maître de Conférences-Université Marien Ngouabi, trouve ici mes sincères remerciements pour ses encouragements répétés à soutenir cette thèse et de l'honneur qu'il me fait d'être rapporteur de ce travail.

Je tiens à renouveler toute ma gratitude à Raymond MALOU Maître de Conférences-Université Cheikh Anta Diop, Dakar pour sa compréhension et son amitié pour m'avoir soutenu. Qu'il trouve ici ma sincère cordialité pour la confiance accordée, ainsi que pour les précieux et discrets conseils avisés qu'il m'a sans cesse donnés.

J'adresse mes vifs remerciements à Bernard MABIALA, Maître de Conférences-Université Marien Ngouabi, lui qu'a été le chef d'œuvre de ce travail. Depuis toujours il m'a suivi avec attention. J'apprécie sincèrement son efficacité, sa rigueur scientifique et son dévouement à faire aboutir cette étude.

Je remercie monsieur Dominique NGANGA, Professeur des Universités-Université Marien Ngouabi, Coordonnateur de la Formation doctorale Sciences de l'Environnement pour m'avoir accueilli dans son équipe pour réaliser ce travail sous sa direction scientifique.

Je saisis cette opportunité pour exprimer ma profonde gratitude à monsieur Rachid ABABOU, Professeur des Universités-INPToulouse, pour sa contribution à la réalisation de cette étude.

Je remercie particulièrement monsieur Christian TATHY, Maître-Assistant à l'Université Marien Ngouabi et membre de l'Equipe de Recherches en Matériaux et Ecoulements en Milieux Poreux pour sa contribution et ses précieux conseils dans l'aboutissement de ce travail.

Je n'oublie pas monsieur Romain NIERE Maître-Assistant à l'Université Marien Ngouabi pour le plaisir que j'ai eu de travailler avec lui.

Je tiens aussi à remercier Messieurs Rémi D'ANNUNZIO, Alexandre HYAFIL, Pierre, Hugues GOMA-MBOUBA, Laurent SAINT-ANDRE et Ahmed Amine BAHRI pour leurs contributions à l'aboutissement de ce travail.

A l'université je souhaite à remercier Messieurs M.J. SAMBA-KIMBATA, Professeur des universités, M. MPOUNZA, A. PANDI et L. SITOU, respectivement climatologues, hydrologue et géomorphologue au département de géographie, pour leurs conseils précieux. Merci aussi à A. BATCHI-MAV, H. NIAMBY, B. MAKOUANGOU-MBAYI, P. MAKABA et tous mes collègues pour leur soutien moral.

Merci à Marcelline Marie Blanche GOMA qui m'a aidé, parfois de manière vitale, en répondant à un problème précis et de pouvoir me soutenir dans les sentiments les plus agréables. Merci aussi à ma fille Auréole Providence, toi que j'ai sacrifié pour ton éducation à tort ou à raison pendant le temps qu'aura duré la préparation de ce travail.

A ma mère Marie NSIMBA, terre d'accueil, terre nourricière, comme la terre sa semence, tu m'as accueillie la première, Mère, je pense à toi. Toi qui m'as portée dans le secret de ton cœur, œuf, si dense et si fragile, relié à ta vie par un lien solide, tu as frêmi à mes premiers frémissements. Ô mère, comment te dire merci ? De ta chair, tu m'as donné la chair, de ton cœur, tu m'as donné la vie. Mère de toutes les douleurs, Merci de m'avoir enfantée.

Enfin, mes remerciements vont également à mes amis et frères qui, de plusieurs manières, m'ont encouragé et soutenu moralement et/ou matériellement dans cette initiative : A. THONGO-MBOU, D. EPRON, Y. NOUVELLON, R. KIMBOUALA, W. MONDZOLA, Professeur M. NZIKOU, A. MOUNDOSSO, A. MANZILA, I.M. MOUNZIKA, D. DZOUKEKE, JC KAYA, D. MIZERE-LOUFOUMA, M. NGOUMA, JM. MOUKANDI, JC. MBENGUELE, P. MAKOUANGOU, M. NGOUALA-MABONDZO, A. KIMPENA, J.P.TATHY, L. MATINI, J.L. MOUTHOU, B. MAYIMA, A. MALONGA. Qu'ils trouvent ici ma sympathie et ma gratitude.

Je ne saurai terminer ces remerciements sans faire un clin d'œil à tout le personnel de l'ENSP pour son amitié à mon égard.

Je n'oublie pas la sympathie du personnel du Campus Numérique.

La mise sur pied de ce mémoire de thèse a nécessité de la part de l'International Foundation for Sciences (IFS) un investissement important, mais qui est récompensé dans la satisfaction du travail mené à terme. Aussi est-il important pour moi de rendre hommage à tous les acteurs, qui ont participé, de près ou de loin, aux résultats finaux présentés dans ce mémoire.

Résumé

La région de Pointe-Noire se situe dans le grand ensemble hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Congo Brazzaville, de superficie 6 000 km². Cet ensemble est formé essentiellement des roches meubles très peu ou pas consolidées à porosité d'interstice. Il est constitué d'un complexe hydrogéologique, incluant un système aquifère composé de plusieurs couches aquifères superposées avec une continuité hydraulique. La présente étude a permis de représenter et de schématiser les fonctions du réservoir et le comportement hydrodynamique de l'aquifère AQ-2. Elle a, en outre, permis de définir en première approximation le système aquifère en fonction des conditions géologiques et d'obtenir une première estimation de son mode d'alimentation et de son sens d'écoulement. Un système d'information hydrogéologique (SIH) de l'aquifère AQ-2 a été dressé à partir d'une reconstitution historique des charges piézométriques des forages et piézomètres de différentes compagnes de mesures réalisées à l'aide de systèmes d'informations géographiques (SIG). Deux zones hydrologiques liées à la topographie et/ou au relief de la zone d'étude ont été identifiées : une zone de la plaine littorale caractérisée par des protubérances et une forte profondeur de la surface piézométrique à gradient hydraulique de 0,03 révélatrice d'un débit d'écoulement moins important et d'une perméabilité moyenne qui traduit un drainage plus faible que l'alimentation ; et une zone des plateaux caractérisée par un type de structure hydrogéologique appelée seuil hydraulique traduisant une chute de la surface piézométrique et du gradient hydraulique (0,005 et 0,006) qui peut s'expliquer par des variations de débit ou de perméabilité. Cette morphologie est imposée par deux phénomènes, d'une part l'apport d'eau du plateau de Hinda et d'autre part, le drainage général axial révélé par la présence des faciès semi-perméables. L'hydrochimie des eaux souterraines réalisée montre une faible minéralisation et une différence de la distribution spatiale des ions majeurs qui pourraient s'expliquer en partie par la nature des sols du bassin sédimentaire côtier et de l'influence possible de l'environnement immédiat des ouvrages en relation probable avec leur mauvaise protection ou leur proximité avec l'océan. La modélisation des écoulements d'eau en milieu non saturé a permis d'évaluer la recharge de l'aquifère dans les différents écosystèmes occupant la zone de recharge, (Eucalyptus : 400 mm/an et savane : 520 mm/an).

La modélisation numérique des écoulements souterrains de l'AQ-2 contrôlée par la distribution des perméabilités des roches et par la configuration de la surface piézométrique qui dépend de la topographie et qui est contrôlée par le climat, est établie à l'aide du programme de modélisation Processing Modflow for Windows (PMWIN). Ce modèle d'écoulement qui se base sur « l'environnement hydrogéologique » a donné des résultats satisfaisants. D'une manière générale, Les résultats de la modélisation numérique des écoulements souterrains dans l'AQ-2, où toutes les hypothèses ont été prises en compte, sont satisfaisants. Le calage de la perméabilité, a conduit à repérer trois zones de perméabilité se rapportant aux différents horizons géologiques. La recharge moyenne de l'AQ-2 est estimée autour de 56,3 mm.an⁻¹

Mots clés : Modélisation, hydrogéologie, bassin sédimentaire côtier, hydrodynamique, hydrochimie, recharge, aquifère AQ-2, Pointe-Noire.

Abstract

The region of Pointe-Noire is located in the large hydrogeological set of coastal sedimentary basin of the Congo Brazzaville, area 6,000 km². This set is formed essentially of loose rocks very little or no consolidated porosity of gap. It consists of a complex hydrogeological, including an aquifer system consisting of several aquifers layers superimposed with a hydraulic continuity. This study allowed to represent and to mimic the functions of the reservoir and the hydrodynamic behaviour of the aquifer AQ-2. It also allowed set in first approximation the aquifer system to geological conditions and a first estimate of its mode of food and its sense of flow. A hydrogeological information system (HIS) of the aquifer AQ-2 was developed from a re-enactment of piezometers and piezometric drilling loads of different companions of measurements using geographic information (GIS) systems. Two hydrologic areas related topography or the topography of the study area have been identified: an area of the coastal plain characterized by protuberances and a strong depth of piezometric surface hydraulic gradient of 0.03 revealing a flow of less important flow and average permeability which reflects a lower than the power drainage; and upland area characterized by a type of hydrogeological structure called hydraulic threshold reflecting a fall of piezometric surface and hydraulic gradient (0.005 and 0.006), which can be explained by changes in flow or permeability. This morphology is imposed by two phenomena, from the plateau of Hinda and on the other hand, water axial general drainage revealed by the presence of semi-permeable facies. Carried out groundwater Hydrochemistry shows low mineralization and a difference of the spatial distribution of the major ions that could be explained in part by the nature of the soils of coastal sedimentary basin and the possible influence of the immediate environment works in likely relationship with their poor protection or their proximity to the ocean. Modeling of unsaturated water flow to evaluate the recharge of the aquifer in the different ecosystems in the recharge zone, (Eucalyptus: 400 mm/year and Savannah: 520 mm/year).

Numerical modeling of underground flow of the AQ - 2 controlled by the distribution of the permeabilities of the rocks and the configuration of the piezometric surface which depends on the topography and the climate-controlled is made using the Processing Modflow for Windows (PMWIN) modeling program. This flow model based on "the hydrogeological environment" has given satisfactory results. In General, the results of numerical modeling of underground flow in the AQ-2, where all assumptions were taken into account, are satisfactory. The timing of the permeability, has led to identify three areas of permeability with respect to different geological backgrounds. Average recharge of the AQ-2 is estimated around 56.3 mm.an⁻¹

Key words: Modeling, hydrogeology, sedimentary basin coastal, hydrodynamic, hydrochimy, recharge, aquiferous AQ-2, Point-Noire

Nomenclature

$\alpha(h)$: fonction de réponse au stress hydrique (sans unité) ;
 $\partial H/\partial z$: gradient de charge hydraulique (sans unité)
ANAC : Agence Nationale de l'Aviation Civile
BI : Balance Ionique
C/N : rapport Carbone/azote
 Ca^{2+} : ion calcium
CE : Conductivité Electrique ($\mu S/cm$)
CEC : Capacité d'Echange Cationique
 Cl^- : ion chlorure
CMTD : carbone minéral total dissous
ETP: Evapotranspiration potentielle
FAO: Food and Agriculture Organization
FDP : Fonction à Dérivée partielle
H : charge hydraulique
 HCO_3^- : ion Bicarbonate
K : conductivité hydraulique ($m.s^{-1}$).
 K^+ : ion potassium
Ks : conductivité maximale à la saturation
L : profondeur d'enracinement.
 Mg^{2+} : ion Magnesium
 Na^+ : ion sodium
NS: Zone Non Saturé
OMS: Organisation mondiale de la santé
P: Precipitation (mm)
pH: potentiel hydrogène
PMWIN: Processing Modflow for Windows
Q : Débit (Flux d'eau qui traverse une section donnée en une unité de temps donnée $m^3.s^{-1}$)
R : Ruissellement (mm)
RU : Reserve utile (mm)
S : coefficient d'emménagement
SIG : système d'information géographique
SIH : système d'information hydrogéologique
SNDE : société Nationale de distribution d'eau
 SO_4^{2-} : ion sulfate
T : Transmissivité (m^3/cm^2)
TAC : Titre alcalimétrique Complet
TDS : Solides Totaux Dissous
TH : Dureté totale
 T_p : est le débit de transpiration potentielle ;
z : profondeur du sol , orienté de haut en bas
 θ : teneur en eau volumique

Table des matières

Résumé	5
Abstract	6
Nomenclature	7
Table des matières	8
Liste des figures	11
Liste des tableaux	13
Introduction	14
Chapitre 1 : Contexte général de la région de Pointe-Noire	17
1.1 Contexte géographique de Pointe-Noire	17
1.1.1 Situation géographique	17
1.1.2 Géographie humaine	17
1.1.3 Activités économiques	17
1.1.4 Géomorphologie	18
1.1.5 Pédologie.....	19
1.2 Couverture végétale	21
1.3 Contexte géologique	21
1.3.1 Principales formations stratigraphiques	22
1.3.1.1 Précambrien.....	22
1.3.1.2 Formations mésozoïque et cénozoïque	22
1.3.1.2.1 Crétacé	22
1.3.1.2.2 Tertiaire	25
1.3.1.2.2.1 Sénonien, Paléocène, Eocène	25
1.3.1.2.2.2 Miocène	25
1.3.1.2.3 Quaternaire	25
1.3.2 Structure et tectonique	26
1.4 Climatologie	26
1.4.1 Introduction : contexte climatique	26
1.4.2 Pluviométrie	27
1.4.3 Températures.....	28
1.4.4 Autres facteurs climatiques.....	29
1.4.4.1 Humidité relative et insolation	29
1.4.4.2 Vent	32
1.4.4.3 Evaporation	32
1.5 Hydrologie de surface.....	33
1.6 Description hydrogéologique du système aquifère de Pointe-Noire	35
1.7 Limite verticale et épaisseur	37
Conclusion partielle	38
Chapitre 2 : Élaboration d'un système d'informations hydrogéologiques de l'AQ-2 de Pointe-Noire.....	39
2.1 Principes du SIG	39
2.1.1 Définition générale.....	39
2.1.2 Représentativité des données dans un SIG	41
2.1.2.1 Données vectorielles	42
2.1.2.2 Données raster	43
2.1.2.3 Données alphanumériques.....	43
2.1.3 Géoréférencement.....	44
2.1.3.1 Support cartographique	44

2.1.3.2 Support numérique	45
2.1.3.3 Système de coordonnées	46
2.1.4 Logiciels utilisés :	46
2.2 Elaboration d'un SIH dans la région de Pointe-Noire	47
2.2.1 Collectes des données	47
2.2.2 Traitement des données	47
2.3 Distribution et spatialisaton du mouvement naturel de l'eau souterraine	48
2.3.1 Données géomorphologique	48
2.3.2 Cartographie du mur de l'aquifère	49
2.3.3 Cartographie du toit de la nappe	49
2.3.4 Données hydrodynamiques	50
2.3.4.1 Données de coefficients de perméabilité de Darcy	50
2.3.4.2 Données de transmissivité	51
2.3.4.3 Données de coefficients d'emmagasinement	52
2.3.5 Données hydrogéologiques	53
2.3.5.1 Données piézométriques	53
2.3.5.2 Variations spatio-temporelle de la piézométrie	54
2.3.5.3 Analyse morphologique de la surface piézométrique de l'aquifère AQ-2	57
Conclusion partielle	58
Chapitre 3 : Hydrochimie de la nappe profonde AQ-2 de Pointe-Noire	59
3.1 Procédure expérimentale	59
3.2. Statistiques des concentrations des paramètres de base et des ions majeurs	60
3.3 Compositions physico-chimiques	60
3.3.1 Potentiel d'Hydrogène (pH)	61
3.3.2 Conductivité électrique	61
3.3.3 Solides totaux dissous (TDS)	62
3.3.4 Température	62
3.3.5 Magnésium Mg^{2+} et Calcium Ca^{2+}	64
3.3.6 Sodium Na^{2+}	64
3.3.7 Potassium K^{+}	66
3.3.8 Chlorure Cl^{-}	67
3.3.9 Sulfates SO_4^{2-}	67
3.3.10 Bicarbonate HCO_3^{-}	67
3.3.11 Titre alcalimétrique Complet (TAC) et Dureté totale (TH)	67
3.4 Evolution géochimique des eaux	68
3.5 Temps de séjour des eaux	69
3.6 L'origine de la minéralisation de l'eau	70
3.7 Spatialisation de l'hydrochimie	74
3.8 Etude de la potabilité des eaux	76
Conclusion partielle	77
Chapitre 4 : Modélisation des écoulements d'eau dans le milieu variablement saturé de la région de Pointe-Noire	79
4.1 Approches d'estimation des écoulements d'eau en milieu variablement saturé	80
4.2 Modélisation des transferts hydriques dans le sol	81
4.2.1 Equation de Richards	82
4.2.1.1 Equation de continuité	82
4.2.1.2 Equation dynamique : loi de Darcy	83
4.2.2 Fonctions puits et résolution de l'équation de Richards	85
4.3 Présentation du logiciel HYDRUS 1D	86
4.3.1 Paramétrisation	87

4.3.2 Conditions initiales	88
4.3.3 Conditions aux limites du modèle.....	88
4.4 Expérience de drainage interne.....	89
4.5 Relation potentiel hydrique-teneur en eau.....	89
4.6 Caractéristiques hydriques.....	92
4.7 Validation du modèle.....	93
4.8 Bilan d'eau.....	93
4.8.1 Evapotranspiration	94
4.8.2 Bilan.....	96
Conclusion partielle.....	99
Chapitre 5 : Modélisation de la nappe de l'AQ-2 de Pointe-Noire	101
5.1 Rôle de la modélisation des écoulements souterrains	101
5.2 Mise en place du modèle de la nappe des sables profonds.....	101
5.2.1 Présentation du code de calcul PROCESSING MODFLOW	102
5.2.2 Données disponibles	103
5.2.3 Modèle conceptuel de l'aquifère de Pointe-Noire	103
5.2.3.1 Limites et discrétisation de la zone étudiée.....	103
5.2.3.2-Les conditions aux limites	104
5.2.3.2.1- Limites géologiques du modèle.....	104
5.2.3.3.2 Géométrie du réservoir	105
5.2.3.3.2.1 Toit de l'aquifère AQ-2.....	105
5.2.3.3.2.2-Mur de l'aquifère AQ-2.....	105
5.2.3.3.2.3 Conditions de flux	106
5.2.3.3.2.4 Conditions de flux internes	106
5.2.3.3.2.5 Conditions aux limites	107
5.2.3.3.2.6 Paramètres hydrodynamiques	107
5.2.3.3.2.6.1 Emmagasinement.....	107
5.2.3.3.2.6.2 Perméabilité	107
5.3 Résultats.....	107
5.3.1 Simulation en régime permanent	107
5.3.1.1 Calage des perméabilités.....	107
5.3.1.2 Calage de la piézométrie	108
5.3.2 Calibrage de la recharge.....	111
5.3.3 Sensibilité de la recharge	112
5.3.4 Sensibilité des perméabilités.....	114
Conclusion partielle.....	115
Conclusion générale	116
Bibliographie.....	119
Annexes.....	126

Liste des figures

Figure 1.1: Situation géographique de la région de Pointe-Noire	18
Figure 1.2: Carte simplifiée des affleurements de la région de Pointe-Noire	20
Figure 1.3: Coupe lithostratigraphique du bassin sédimentaire côtier de Pointe-Noire	23
Figure 1.4 : Pluviométrie moyenne mensuelle de Pointe-Noire (1978-2008).....	27
Figure 1.5 : Variabilité inter annuelle de la pluviométrie de Pointe-Noire (1978-2008)	28
Figure 1.6 : Température moyenne journalière de Pointe-Noire (1978-2008).....	29
Figure 1.7 : Evolution journalière de l'humidité relative (HR%) et de l'insolation.....	30
(R heures) à Pointe-Noire (1978-2008).....	31
Figure 1.8 : Evolution du rayonnement global (Rg en MJ.m ⁻² .j ⁻¹) à Pointe-Noire	31
(1978-2009).....	31
Figure 1.9 : Evolution mensuelle de la vitesse du vent dans la région de Pointe-Noire (1978-2009)...	32
Figure 1.10 : Evolution journalière de l'évaporation à Pointe-Noire	33
Figure 1.11 : Hydrographie et hydrologie de la région de Pointe-Noire.....	34
Figure 1.12: Coupe Hydrogéologique schématique	36
Figure 2.1: Composants du SIG	40
Figure 2.2: Schéma général d'un SIG.....	41
Figure 2.3: Données d'un SIG	42
Figure 2.4: Représentation de l'information en modèle vecteur.....	43
Figure 2.5: Représentation de l'information en modèle raster.....	44
Figure 2.6: Exemple de données alphanumériques	44
Figure 2.7: Géoréférencement d'une carte.....	45
Figure 2.8: Système de coordonnées	46
Figure 2.9: Topographie de l'agglomération de Pointe-Noire	48
Figure 2.10: Carte de la profondeur du mur de la nappe AQ-2.....	49
Figure 2.11: Carte de la profondeur du toit de la nappe AQ-2 de Pointe-Noire.....	50
Figure 2.12 : Spatialisation de la perméabilité de Darcy dans la région de Pointe-Noire.....	51
Figure 2.13: Distribution de la transmissivité	52
Figure 2.14: Coefficient d'emmagasinement.....	53
Figure 2.15: Emplacement des points de mesure (forages et piézomètres) dans la région de Pointe-Noire.....	54
Figure 2.16: Carte piézométrique en 1986	56
Figure 2.17 : Piézométrie de l'AQ-2 (2009) à Pointe-Noire.....	57
Figure 3.1 : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des eaux souterraines de la nappe de l'aquifère AQ-2	65
Figure 3.1 (suite) : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des eaux souterraines de la nappe de l'aquifère AQ-2	66
Figure 3.2 : Composition moyenne en % meq/l des cations (a) et anions (b) majeurs des eaux de l'AQ-2.....	68
Figure 3.3: Diagramme de Piper des échantillons d'eaux de l'aquifère AQ-2.....	69
Figure 3.4: Indices i dans la région de Pointe-Noire	70
Figure 3.5 a, b : Relation entre Ca ²⁺ + Mg ²⁺ et SO ₄ ²⁻ + HCO ₃ ⁻ ; HCO ₃ ⁻ et Na ⁺	72
Figure 3.6a : Relation Na ⁺ + K ⁺ et Cl ⁻ + SO ₄ ²⁻	73
Figure 3.6b : Relation entre Na ⁺ et SO ₄ ²⁻	73
Figure 3.7 : Dendrogramme des piézomètres dans la zone d'étude	74
Figure 3.8a: Spatialisation de la conductivité électrique	75
Figure 3.8b: Spatialisation des bicarbonates	75
Figure 3.8c: Spatialisation des ions chlorures	76
Figure 4.1 : Schéma des bilans hydrologiques dans le milieu poreux variable saturé en interaction avec les plantes et l'atmosphère	79
Figure 4.2: Courbes de rétention d'eau aux différents horizons du sol de Pointe-Noire	91
Figure 4.3 : Simulation de l'évolution de l'humidité du sol de Pointe-Noire.....	93

Figure 4.4: Estimation de l'humidité volumique à différentes profondeurs et du drainage profond à Pointe-Noire par Hydrus1D.....	94
Figure 4.5: ETP = f(Rg) de la savane et d'eucalyptus à Pointe-Noire	95
Figure 4.6 : ETP journalière moyenne dans la savane et l'Eucalyptus (1988-2008)	96
Figure 4.7 : Simulation de drainage profond et de la transpiration sous plantation d'Eucalyptus à Pointe-Noire	98
Figure 5.1: Exemple de discrétisation du milieu	104
Figure 5.2: Maillage de la zone d'étude.....	105
Figure 5.3: Conditions aux limites imposées dans le modèle.....	106
Figure 5.4: Spatialisation des perméabilités calées	108
Figure 5.5: Piézométrie simulée en régime permanent de l'aquifère AQ-2 (1986)	109
Figure 5.6: Droite de régression entre les données piézométriques observées et calculées	110
Figure 5.7: Sensibilité au pompage de la piézométrie de Pointe-Noire (carrés rouges représentent les exutoires de pompage).....	111
Figure 5.8: Piézométries calculés à Pointe-Noire avec : (a) une baisse de la recharge de 10%, (b) avec une augmentation de la recharge de 10 %.....	113
Figure 5.9: Piézométrie calculée pour une hausse de 10% de perméabilité.....	114

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Humidité relative (HR%) à Pointe-Noire (1978-2008).....	29
Tableau 1.2 : Insolation (R en heures) à Pointe-Noire (1988-2008).....	30
Tableau 1.3 : Rayonnement global moyen journalier MJ.m ⁻² .j ⁻¹ à Pointe-Noire.....	31
Tableau 1.4 : Vitesse moyenne mensuelle du vent (m.s ⁻¹ .j ⁻¹) à Pointe-Noire (1988-2008).....	32
Tableau 1.5 : Evaporation mensuel à Pointe-Noire.....	33
Tableau 3.1 : Fiabilité des analyses des échantillons d'eaux de l'AQ-2 de Pointe-Noire	60
Tableau 3.2 : Moyennes par point d'eau, des concentrations des analyses physico-chimiques de l'AQ-2 de Pointe-Noire	63
Tableau 3.3 : Statistiques descriptives des paramètres chimiques majeurs pour la période 2009	64
Tableau 3.4 : Rapports ioniques et Faciès chimiques des échantillons d'eaux.....	71
Tableau 4.1 : Paramètres hydrodynamiques dans le sol de Pointe-Noire à différentes profondeurs.....	90
Tableau 4.2 : Caractéristiques hydriques du sol de Pointe-Noire, calculées par l'équation de van Genuchten.....	92
Tableau 4.3 : Composantes des bilans hydriques de la plantation d'eucalyptus et de la savane	97
Tableau 4.4 : Bilan hydrique moyen annuel selon les écosystèmes majeurs de la région de Pointe-Noire (1998-2008).	98

Introduction

Le bassin sédimentaire côtier du Congo présente un système hydrogéologique à aquifère multicouches qui sont comprises entre 10 et 400 m de profondeur à Pointe-Noire et 70 et 150 m à Pointe Indienne. Ces couches aquifères sont séparées par des intercalations des matériaux très composites (calcaire marneux, grès consolidés, argile...) de la série argilo gréseuses rougeâtre des grès dolomitiques et ne présentent pas un profil régulier ; les sables et les grès tendres sont pris en intercalation entre ces couches. L'eau d'excellente qualité, qu'il contient satisfait les besoins en eau potable, en industrie et en sylviculture de la région. Malgré l'importance des intérêts économiques et sanitaires en jeu, le fonctionnement de l'aquifère multicouches est encore très mal connu et les conséquences d'exploitation qui se développent de manière exponentielle et incontrôlée depuis l'apparition massive des forages profonds ne sont pas évalués.

Dans la région de Pointe-Noire les seules couches aquifères les plus exploités sont AQ-1 et AQ2. Une enquête et des observations sur le terrain montrent que l'aquifère AQ-1 est exploité par la population pour l'approvisionner en eau par l'intermédiaire des puits traditionnels de faible profondeur (allant de 0,50 à 10 m) en fin de saison sèche avec une variation saisonnière importante allant de 3 à 5 m. L'exploitation artisanale de cet aquifère n'a pas d'impact important sur l'évolution du niveau piézométrique.

Depuis le début des années 60, l'aquifère AQ-2 de Pointe-Noire est exploité dans les secteurs où la nappe est captive, voire artésienne. A partir des années 1986, les ouvrages profonds se sont multipliés. Ces ouvrages de captage alimentent le réseau d'adduction d'eau potable (de la société SNDE) de la ville de Pointe-Noire. En effet, avec le développement économique de la région, les techniques de forage et de pompage sont devenues économiquement accessibles. Depuis les années 2000, Pointe-Noire connaît un très fort taux d'accroissement de sa population. Cette croissance fulgurante est accompagnée du foisonnement des forages privés. Actuellement, les débits prélevés dépassent $88848 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$. Alors que le seuil donné dans cette région est $40000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$, passer ce seuil, le risque d'intrusion saline est important avec des baisses des niveaux piézométriques de quelques mètres.

Dans le même temps, les premiers forages artésiens ont vu leur débit diminuer. La multiplication des captages de cet aquifère a entraîné une surexploitation dudit aquifère ainsi que la détérioration de la qualité des eaux par intrusion saline. Le volume prélevé par chaque ouvrage privé correspondant aux besoins des ménages ou d'une entreprise, évolue presque chaque année (reste souvent grandissant). Le nombre de forages captant cet aquifère en 2007 se situe autour d'une centaine. Aujourd'hui la commercialisation de l'eau potable par des entreprises privées est effective, mécanisme difficile à arrêter ou à contrôler par manque d'eau dans la ville et par la non application du code de l'eau.

Aussi, des problèmes de réduction de la charge de l'aquifère dans les zones artésiennes du bassin et de forte minéralisation des eaux souterraines sont déjà identifiés par la Société Nationale de Distribution d'Eau potable, car ce réservoir présente un écoulement à forte inertie hydrodynamique. Cette inertie nécessite de prendre des mesures préventives adaptées.

Contrairement à des mesures curatives qui consistent à communiquer sur les améliorations qu'elles apportent au fur et à mesure des progrès constatés, une démarche préventive est très peu motivante car on ne peut pas évaluer son efficacité immédiate. En effet, comment connaître la situation en l'absence d'action ? De plus, comment mobiliser et engager les décideurs, les gestionnaires et les usagers alors que l'aquifère fournit encore à tout le monde une eau conforme aux normes de potabilité ?

Malgré la menace identifiée et les enjeux (sanitaires, sociaux et économiques) qui pèsent sur le système aquifère du bassin sédimentaire côtier de Pointe-Noire, l'étude et la gestion de cette ressource ne fait l'objet d'aucun programme régulier. Les connaissances actuelles ne concernant que l'agglomération de Pointe-Noire et non l'ensemble du bassin, proviennent, pour l'essentiel, d'études de cas sur l'eau et de recherches [1, 2] qui sont venues compléter ceux des pétroliers. Depuis la fin des années 1980, le constat d'une intrusion du biseau salé important dans les abords côtiers a concentré toutes les attentions des gestionnaires publics et des collectivités territoriales.

Le travail de recherche présenté dans cette thèse se fonde sur l'ensemble des études précédentes et a pour but d'apporter une vision actualisée et synthétique du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de Pointe-Noire ; alors que la connaissance du système étudié s'est toujours heurtée à sa complexité. Pour atteindre ce but, l'étude se fixe pour objectif, de :

- faire un bilan le plus complet possible des connaissances, de les actualiser et de les compléter, afin de faire une étude sur le fonctionnement hydrodynamique de l'AQ-2;
- faire une étude de la composition chimique des eaux de l'ensemble de l'aquifère AQ-2 afin de rechercher les indices d'une éventuelle intrusion saline
- et d'évaluer la recharge de ce système aquifère, afin de construire un modèle hydrogéologique de la couche aquifère la plus exploitée (AQ-2).

D'un point de vue méthodologique, c'est aussi une approche originale de l'usage des aspects de modélisation qui sont : (i) la simulation des écoulements souterrains à l'aide d'un modèle à saturation variable monodimensionnel (HYDRUS 1D), et (ii) la simulation de la piézométrie à l'aide d'un modèle à saturation totale multidimensionnel (PMWIN).

Dans les trois premiers chapitres, nous examinons tous les éléments nécessaires à une compréhension globale du système aquifère de la région de Pointe-Noire. Cette démarche est rendue possible par l'utilisation des méthodes du système d'information géographique (SIG) qui permet de rassembler les différents éléments du système en un tout afin d'élaborer un système d'information hydrogéologique (SIH) de la région.

L'acquisition de données nouvelles a eu pour but de compléter, d'actualiser les données antérieures par : (a) une analyse des données de la campagne d'essai de pompage dans les nouveaux forages, (b) un suivi des niveaux d'eau dans les forages pour actualiser la carte piézométrique et d'étudier la dynamique de l'aquifère au cours du temps, (c) une campagne d'analyse chimique des ions majeurs pour tenter de dégager des tendances dans l'évolution qualitative des eaux et le fonctionnement du système aquifère.

Dans les deux derniers chapitres, la modélisation de transfert hydrique monodimensionnelle (1D) du système sol-plante-atmosphère, sont conduites à l'aide de modèles appropriés (HYDRUS 1D). Globalement, la question du bilan hydrique et plus précisément, l'évaluation de la recharge, est étudiée avec attention. Tous ces éléments d'hydrogéologie physique (par opposition aux apports de l'hydrochimie) permettront de construire un premier modèle hydrogéologique de l'aquifère AQ-2 de Pointe-Noire à l'aide du programme multidimensionnel PMWIN.

Ce travail s'inscrit dans une étude globale de mise au point d'outils de caractérisation et de modélisation de flux d'eau souterraine et de polluant transporté par l'eau transitant en milieux poreux (variablement et totalement saturé) du système aquifère de la région de Pointe-Noire

Contexte général de la région de Pointe-Noire

1.1 Contexte géographique de Pointe-Noire

1.1.1 Situation géographique

La région de Pointe-Noire qui intègre notre étude est une agglomération située sur la côte atlantique de l'Afrique centrale, à l'extrémité Sud-Ouest du Congo. Ses coordonnées géographiques sont comprises entre les méridiens 11°30 et 12° Est et les parallèles 4°30 et 5° Sud. Sa superficie d'environ 15.660 hectares est répartie sur un rayon de 15 kilomètres (*Fig.1.1*). Présentant une position géographique très prépondérante à qui elle doit ses traits les plus caractéristiques, la région étudiée est une zone idéale du contact océan-continent où les effets des courants marins et de la masse d'air maritime atlantique présentent des effets qui ont été signalés par [3 et 4] : instabilité atmosphérique par frottement du flux humide océanique saturé d'humidité, épaisseur plus grande de la couche humide au bord du littoral qu'à l'intérieur du continent, influence constante de la houle du Sud-ouest, précipitations annuelles relativement faibles en moyenne 1200 mm par rapport à l'ensemble du pays. En dépit de ces effets, elle est la zone qui facilite en outre la pénétration du flux océanique dans le continent, attiré par les zones basses.

1.1.2 Géographie humaine

La région de Pointe-Noire possède l'un des grands ports d'Afrique et est actuellement la deuxième ville du Congo avec près de 20% de la population totale du pays. Avec plus de 600000 habitants, Pointe-Noire est entrain de connaître un très fort taux d'accroissement de sa population. Cette croissance fulgurante est accompagnée d'un développement urbain extensif qui a pour conséquence la consommation incontrôlée de l'espace. Cette forte consommation de l'espace, est aussi due au mode de construction qui privilégie l'extension horizontale pour la grande partie de la ville, c'est-à-dire toute la partie Est.

1.1.3 Activités économiques

La région de Pointe-Noire située sur la façade atlantique est le débouché naturel d'un axe de communication prépondérant pour l'Afrique Centrale. La croissance de cette région s'est développée sous l'impulsion des activités pétrolière et portuaire. Cette région constitue le poumon économique du Congo où sont concentrées presque la quasi-totalité des industries (secteur bois, secteur mines : potasse et magnésium, hydrocarbures, boisson, eau minérale...). Elle est aussi une région sylvicole où se développent des milliers d'hectares de plantations d'eucalyptus.

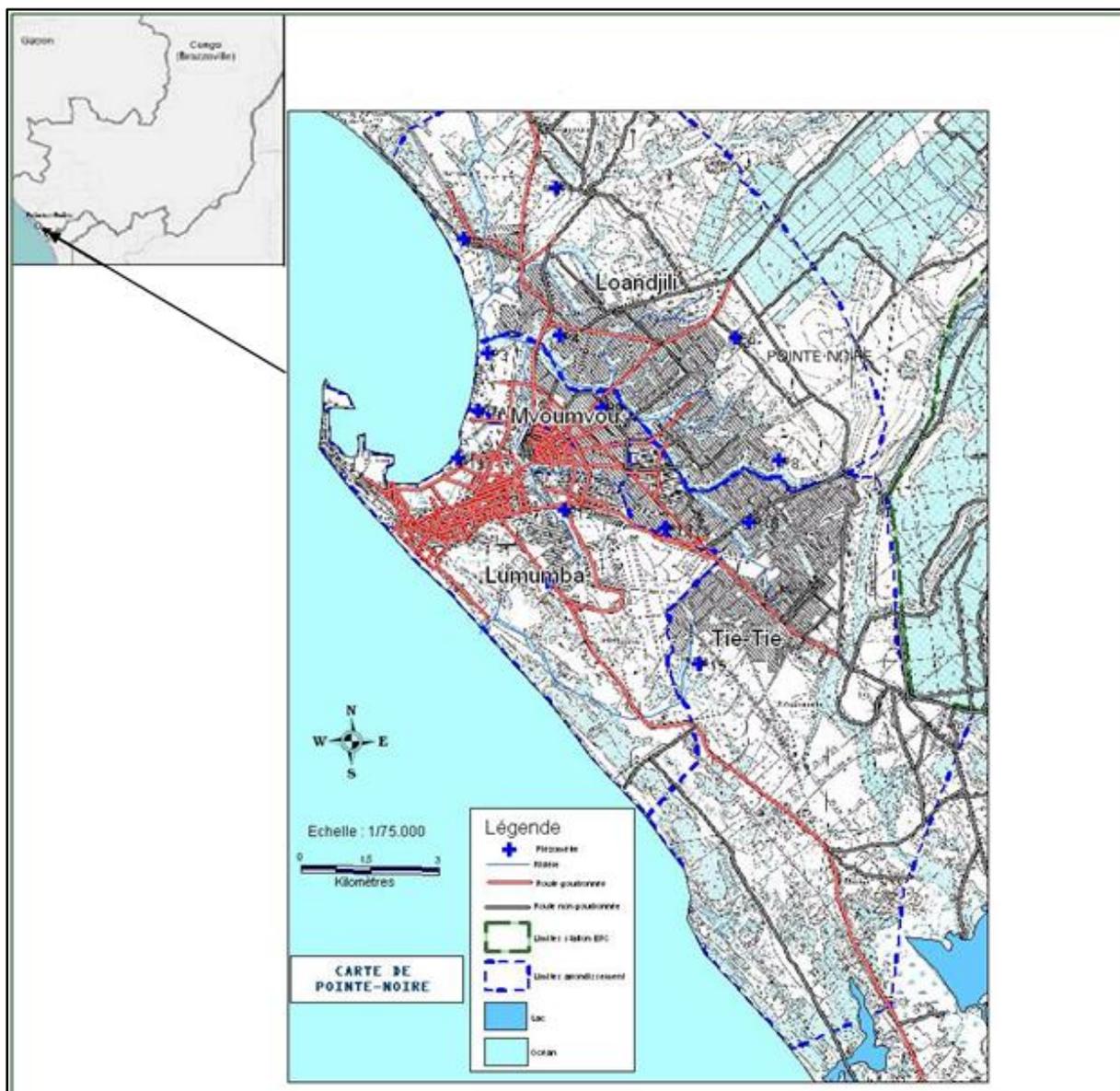


Figure 1.1: Situation géographique de la région de Pointe-Noire

Ces activités industrielles se développent chaque année, aggravant ainsi les problèmes d'alimentation en eau potable et en énergie. A cela s'ajoute la pollution de l'air, des sols et des eaux par les rejets domestiques et industriels (hydrocarbures, effluents divers) et par l'utilisation des sols (forêts d'eucalyptus).

La région de Pointe-Noire compte plus de 77 forages repartis comme suite 23 forages pour la SNDE avec pour débit d'exploitation $2477 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ soit $59448 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ et 54 forages privés (44 forages d'eau des gros consommateurs et 7 forages de petits consommateurs) pour un débit de $29400 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$; soit au total la consommation dans cette région est de $88848 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$; débit largement supérieure à l'usage prévisionnel

1.1.4 Géomorphologie

La région étudiée est une zone de subsidence peu à peu comblée par des dépôts marins et éoliens mis en place pendant la grande phase du Léopoldvillien (phase climatique du

Quaternaire datée de ça 30000 à 12000 ans BP, a été aride). Cette phase qui a culminé vers 18000 ans BP a vu une nouvelle ou une forte extension des paysages des petites savanes.

La région de Pointe-Noire est caractérisée par deux grandes unités orographiques : la plaine côtière et le plateau de Hinda bordé par un talus parallèle à la côte.

La plaine côtière à l'Ouest, est composée des cordons sableux parallèles à la côte. Ces cordons sableux sont disposés en deux ou trois séries parallèles les unes aux autres (*Fig.1.2*). La première série, la plus proche de l'Océan, a des altitudes inférieures ou égales à 10 m, la suivante à 15 m et la dernière à 21 m (*Fig.1.2*). Ces cordons constituent dans certains endroits de lourdes croupes aux sommets aplatis, séparées les unes des autres par des dépressions souvent marécageuses. Ils sont interrompus localement par des petites vallées marécageuses de la Songholo et de ses affluents. A cause de l'enfoncement de la rivière Songholo et de ses affluents, la plaine littorale de la région de Pointe-Noire est en partie vallonnée. Elle prend l'allure d'un bas plateau s'étendant sur environ 23 km² autour de la ville.

A l'arrière des cordons sableux se déploie la plaine littorale particulièrement monotone. Elle est très développée au Sud de Pointe-Noire où sa largeur atteint 4 km entre Ngoyo et côte-Matêve.

Le talus à profil redressé sépare le plateau du littoral. Il a un tracé quasi rectiligne parallèle à la côte avec une direction sud est - nord ouest et une concavité basale sensible. Il se situe dans la région de Pointe-Noire à 6 km environ de la côte. Ce talus présente localement un petit replat visible en arrière de l'agglomération de Pointe-Noire. Le long du talus et sur les versants des vallées se localisent les érosions en cirque [5].

Le plateau de Hinda à l'Est d'altitude supérieure ou égale à 80 m, peu accidenté, s'étend sur une surface monotone perturbée d'une part par des petites ondulations et, d'autre part par des vallons secs, ainsi que par quelques dépressions fermées. Le plateau est recouvert par des forêts artificielles d'eucalyptus. C'est dans cette zone où l'écoulement latéral des eaux souterraines et leur zonalité sont déterminés. A l'Est de ce plateau se développe une zone des collines polyconvexes qui détermine le bassin sédimentaire côtier et forme la transition entre ce dernier et le Mayombe.

1.1.5 Pédologie

Les sols de la région de Pointe-Noire sont rangés dans le groupe des *Ferralic Arenosols*. L'appartenance au groupe des arénosols s'explique par la présence sur une profondeur de plus d'un mètre :

- d'une texture sableuse,
- de moins de 35 % en volume de fragments grossiers (0 % à Pointe-Noire),

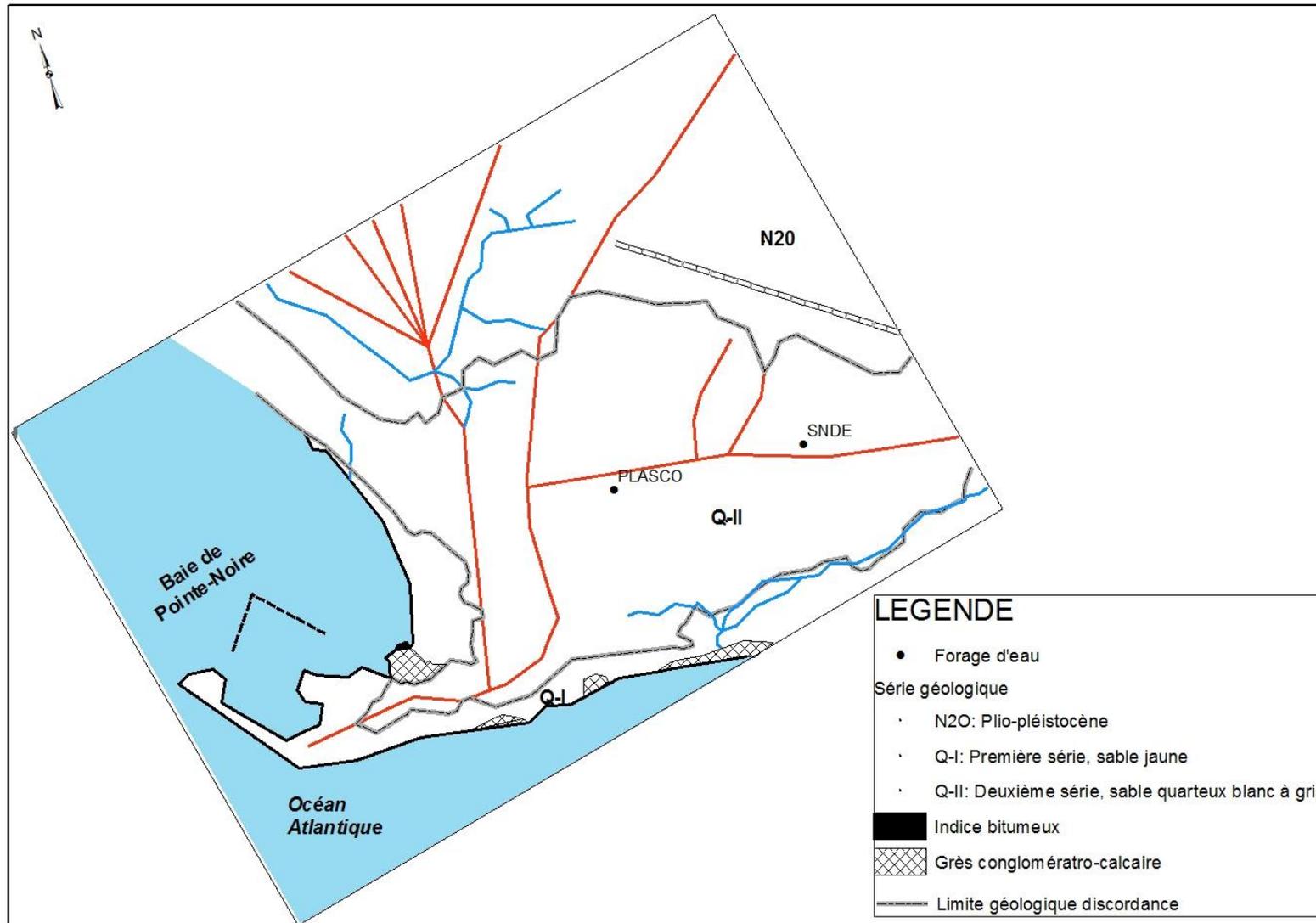


Figure 1.2: Carte simplifiée des affleurements de la région de Pointe-Noire

- et l'absence d'horizons diagnostics autres que *ochric*, *yermic* ou *albic* ou un horizon de type *plinthic*, *petroplinthic* ou *salic* au-delà de 50 cm de profondeur ou un horizon de type *argic* ou *spodic* au-delà de 2 m de profondeur [6].

Les sols de Pointe-Noire correspondent bien aux propriétés de type *ferralic*. Ces sols ont des caractéristiques physico-chimiques très semblables à celles du groupe des *Ferralic Arenosols* quelle que soit la nature de la végétation rencontrée. Ils sont développés sur matériaux détritiques où les minéraux altérables sont pratiquement absents.

Ces sols présentent une teneur en matière organique inférieure ou égale à 1 %, une texture sableuse (80 à 90 % de sable), avec une teneur en argile d'environ 7 % dans les 30 premiers centimètres supérieurs qui augmente faiblement en profondeur. La proportion de limons reste inférieure à 4 % quel que soit l'horizon considéré. Les sables grossiers et fins représentent en profondeur 82 à 90 % de la masse du sol [7]. Ces sols d'une grande homogénéité présentent un rapport C/N qui varie de 10 à 14, un taux d'humification faible généralement inférieur à 10 %, une faible capacité d'échange cationique (environ 2 mcq/100g) et un degré de saturation bas de l'ordre de 20 à 30 % [8]. En raison de cette texture sableuse, la densité apparente est élevée et la réserve hydrique limitée. On rencontre de très faibles variations de teneur de propriétés physico-chimiques [7, 6].

Ce sont des sols pauvres avec une faible capacité de rétention hydrique, montrant une alternance des sédiments sableux (sols acides très sableux, de profondeur très importante parfois localement podzolisé lié à la formation de la série de cirques). Ils présentent des propriétés physiques très favorables à l'infiltration d'eaux de pluies pour alimenter les nappes aquifères [9].

1.2 Couverture végétale

Les écosystèmes naturels sont des savanes qui sont les formations dominantes de la région ponténégrine. Elles correspondent aux pluviométries les moins fortes de la région et prennent de l'extension au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'océan. Ces savanes sont constituées de peuplement herbacé de taille réduite (0,5 à 1,5 m de hauteur) et couvrant mal le sol [6, 8]. Ce sont pour certains botanistes des *pseudo-steppes* qui prennent l'allure de *steppes graminéennes*. Ces savanes originelles ont subi un afforestation par des espèces à croissance rapide : *Eucalyptus*, *Pins*, *Acacias*. Ces espèces constituent des massifs forestiers. La savane et les Eucalyptus constituent les couvertures végétales les plus représentatives dans la zone de recharge de la région de Pointe-Noire.

1.3 Contexte géologique

La région de Pointe-Noire appartenant au bassin sédimentaire côtier d'âge crétacé et tertiaire recouverte par les formations d'âges plio-pléistocènes (série des cirques), formées de sables très perméables comprenant de multiples horizons résistants. Le crétacé n'affleure qu'en bordure du Mayombe et dans quelques fenêtres sur la côte atlantique (Fig.1.2). Des rares alluvions en bordure de quelques rivières complètent la couverture de ce bassin.

1.3.1 Principales formations stratigraphiques

Les synthèses géologiques réalisées par les travaux antérieurs [10] dont on trouvera une présentation analytique dans les travaux de [2], ont permis l'établissement d'une échelle lithostratigraphique (Fig.1.3). On a pu constater, en effet, que l'ordre dans lequel se succèdent les séries observées en affleurement et celles rencontrées par les forages profonds a permis d'accorder une valeur à cette échelle relative.

Notre zone d'étude correspond à un accident tectonique longitudinal, faille ou flexure. Le contact entre les dépôts sédimentaires et le socle précambrien, sous-jacent est discordant et témoigne d'une longue période d'érosion. Des discontinuités latérales sont observées de l'aval vers l'amont du bassin sédimentaire côtier. Ainsi, de bas en haut on observe des formations suivantes :

1.3.1.1 Précambrien

Constitué par un socle cristallophyllien qui affleure dans le Mayombe, mais dans le bassin sédimentaire, il est très profond. Cet approfondissement serait dû à un accident tectonique longitudinal, faille ou flexure. Le contact entre les dépôts sédimentaires et le socle précambrien sous-jacent est discordant et témoigne d'une longue période d'érosion

1.3.1.2 Formations mésozoïque et cénozoïque

Le Mésozoïque montre des lacunes au niveau du Trias et du Jurassique dans les données du bassin sédimentaire côtier du Congo. Dans l'ère Cénozoïque, le Paléocène, l'Oligocène et le Pliocène sont aussi lacunaires. Les faciès du Crétacé, du tertiaire (Miocène et d'Eocène/Cénomien) jusqu'au quaternaire sont représentés sous plusieurs étages et constituent les formations offshore dans le bassin sédimentaire côtier de Pointe-Noire.

1.3.1.2.1 Crétacé

Les faciès de Crétacé sont représentés sous plusieurs étages : le Néocomien, le Barrémien, l'Aptien, l'Albien, le Cénomaniens, Turonien et Maastrichtien.

Néocomien : caractérisé par des formations des grès de Vandji, d'épaisseur allant de 50 à 800 m, constituées par une alternance des grès feldspathiques parfois conglomératiques, des argiles grises silteuses et quelques rares niveaux carboniques ; les marnes de Sialivakou qui reposent en continuité sur les formations de grès de Vandji, leurs épaisseurs varient entre 130 et 800 m. Ces formations sont constituées de marnes bitumeuses à intercalations de niveaux sableux ou silteux. Elles sont couvertes des formations des grès de Djéno d'épaisseur comprise entre 800 et 1400 m, et sont constituées par une alternance de grès micacés argilo-carbonatés, de siltstones et d'argiles grises riches en matière organique.

Néocomien-Barrémien : ce sont les formations de marnes de Pointe-Noire d'épaisseur variant entre 300 et 700 m, constituées des marnes bitumineuses et pyriteuses à intercalations d'argiles silteuses et des grès micacés très fins.

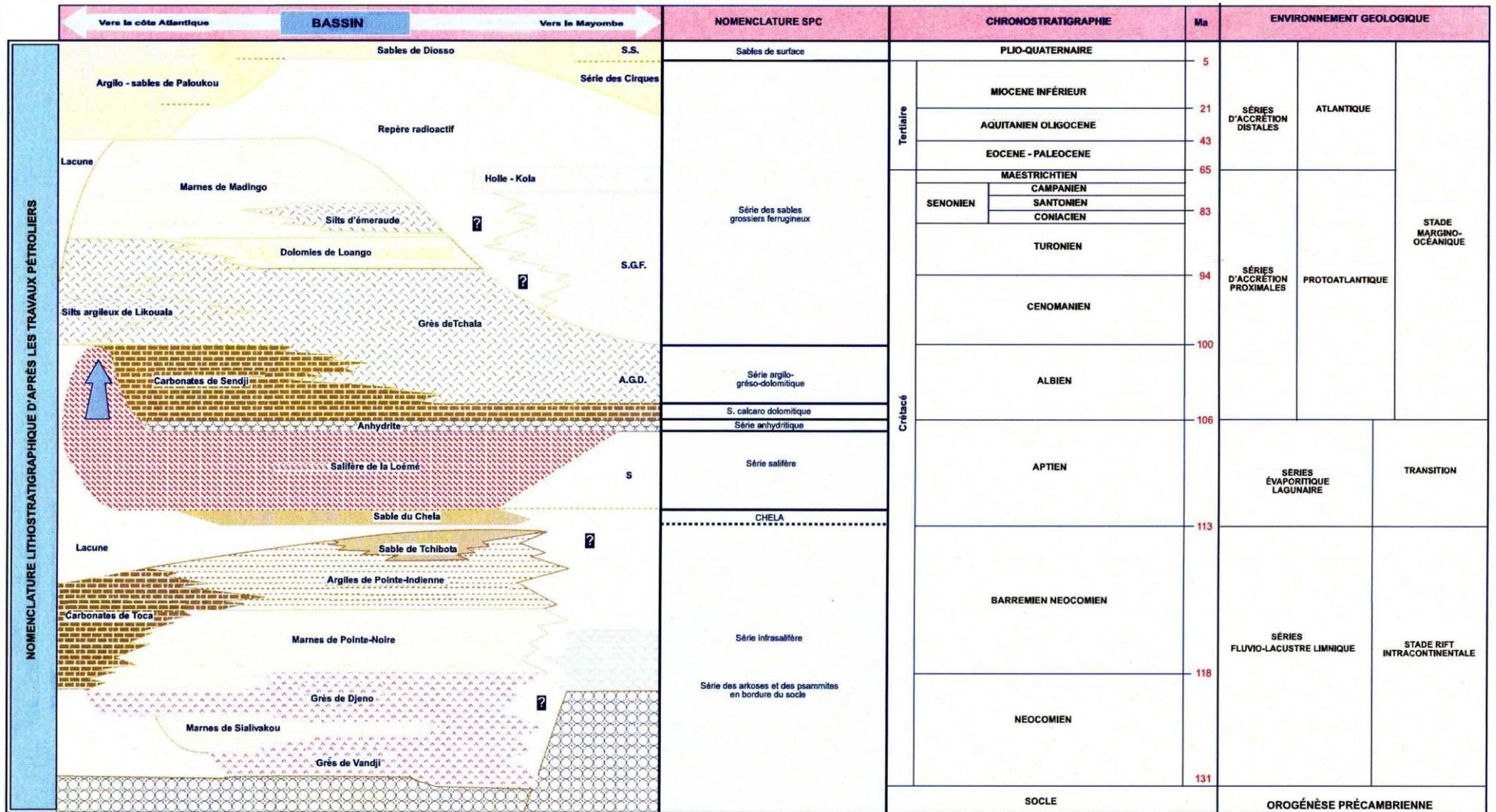


Figure 1.3: Coupe lithostratigraphique du bassin sédimentaire côtier de Pointe-Noire

Barrémien : les argiles de Pointe-Indienne d'épaisseur environ 1500 m sont plastiques de couleurs gris-vert parfois silteuses et micacées. Elles renferment des intercalations de minces niveaux de grès, de siltstones et de carbonates. Ces argiles ont comme équivalents latéraux les carbonates de Toca, les grès de Mengo et les sables de Tchibota.

Aptien : les sables de Chela, reposent en discordance sur l'ensemble des formations sous-jacentes. Ils sont constitués à la base de niveaux conglomératiques polygéniques surmontés par des sables et des grès fins à moyens à ciment dolomitique et à petits lits d'argiles vertes. Au sommet apparaissent des marnes bitumineuses riches en pyrite et à traces d'anhydrite. Son épaisseur est comprise entre 15 et 60 m.

Le salifère de la Loémé, formation d'âge Aptien présente une sédimentation cyclique atteignant 650 à 1000 m d'épaisseur. Chaque séquence est constituée à la base d'argiles noires bitumineuses riches en débris de bois à rares intercalations de bancs dolomitiques de moins de 2 m d'épaisseur et surmontées par un niveau salifère très épais (alternance d'halite, sylvinite et carnallite). Tout ce cycle est couronné par un banc d'anhydrite d'environ 50 m d'épaisseur.

Albien : les carbonates de Sendji surmontent la série salifère de Loémé. Son épaisseur varie entre 50 et 1700 m. Cet étage est constitué par une alternance des dolomies calcaires, de calcaires dolomitiques intercalés au sommet par de grès, de siltstones, d'argiles silteuses et des rares niveaux anhydritiques.

Albien supérieur, Cénomanién, Turonien : ces séries sont marquées par la formation silto-argileuse de Likouala qui est en continuité de sédimentation sur les carbonates de Sendji. Son épaisseur moyenne est de 300 m. Cette formation est constituée des grès fins et très fins, de siltstones argilo-carbonatés, de minces niveaux de calcaires bioclastiques et d'argiles silteuses gris verdâtres.

Cénomanién : caractérisée par les grès de Tchala équivalent latéral des silts de Likouala. D'une épaisseur pouvant atteindre 500 m, cette formation est constituée des sables très peu consolidés mélangés avec des grès hétérométriques fins à grossiers à ciment siliceux intercalés d'argiles, d'anhydrites, d'argiles bariolées et de calcaires argileux. Elle est beaucoup plus rencontrée dans la partie orientale du bassin.

Turonien : Caractérisée par la formation dolomitique de Loango composée de bas en haut de couches d'argile silteuse, des siltstones à ciment argilo-carbonaté passant parfois à des grès fins, de dolomie gréseuse grise à beige, microcristallines, vacuolaires. Son épaisseur est généralement constante d'environ 100 m.

Maastrichtien : Caractérisée par la série de Holle essentiellement phosphatée. Elle repose soit sur des grès soit sur des argiles d'âge crétacé moyen. Sur la côte, l'érosion marine actuelle dissèque et dénude sous forme de pointe, les affleurements rocheux de la partie inférieure non phosphatée de la série de Holle d'âge Sénonien.

1.3.1.2.2 Tertiaire

1.3.1.2.2.1 Sénonien, Paléocène, Eocène

Les marnes de Madingo peuvent atteindre 600 m d'épaisseur. Ces formations sont composées de marnes siliceuses ou sableuses intercalées par des calcaires argileux et crayeux, des argiles fossilifères silteuses riches en substances organiques.

1.3.1.2.2.2 Miocène

Le Miocène est caractérisé par des argilo-sableuses de Paloukou de la série des sables grossiers ferrugineux qui reposent en discordance sur toutes les formations post-salifères. Cette discordance est soulignée par la présence de lambeaux d'une cuirasse latéritique ancienne. Cette formation varie entre 100 m sur la plate-forme continentale et plus de 1000 m dans la zone de talus. C'est une puissante série argileuse intercalée des sables et des calcaires. Elle présente un intérêt hydrogéologique.

1.3.1.2.3 Quaternaire

Au cours du quaternaire, plusieurs cycles glaciaire et interglaciaire se sont succédés. Ceux-ci ont considérablement influencé l'évolution du relief, la sédimentation côtière avec le revêtement quasi totale de la superficie du bassin. D'où, les formations argilo-sableuses du Miocène sont surmontées par 150 à 200 m de dépôts gravelo-sableux cartographiés sous le vocable de "série des cirques" à causes des énormes excavations qui s'y sont creusées. Elle recouvre environ 99 % de la superficie du bassin côtier (*cf. Fig.1.2*).

La précision sur l'âge de ce terme supérieur du bassin sédimentaire côtier fait l'objet de divergences. Les premières études [11, 12, 13, 14, et 15] attribuent à ce terme supérieur l'âge Plio-Pléistocène. Ils l'ont attribué par analogie avec les formations des régions voisines telles que le continental terminal de la cuvette du Tchad, les sables du Bénin et du Nigeria méridional ; mais au Sénégal l'on a fini par attribuer au Continental Terminal l'âge Eocène/Miocène. Les recherches paléontologiques dans cette région, attribuent à celle-ci des âges approximatifs par rapport aux faunes trouvées qui appartiennent à l'Eocène et au Pléistocène. Plusieurs divergences peuvent être notées sur la détermination de la précision de l'âge de la série des cirques dans cette région côtière. Certains travaux [*cf. dans 10*] l'ont rapporté au Sénonien supérieur ; les autres [16] mentionnent que cette série discordante sur le Crétacé, complètement dépourvue de fossiles, considérée comme Plio-Pléistocène se serait mise en place à l'occasion de périodes morphoclimatiques nuancées..., des horizons supérieurs apparaissent comme de simples niveaux d'altération de la formation, susceptibles d'être, peut-être, rapportés à la période sub-actuelle "Kibanguienne". Les travaux de [17] confirment le caractère azoïque de la série des cirques et ajoutent qu'on peut admettre cette approximation pour les couches les plus superficielles, par contre les sondages de l'exploration pétrolière du bassin ont pu montrer que les niveaux les plus profonds étaient les équivalents latéraux continentaux des sédimentations marines Cénozoïques, voire Mésozoïques [5].

Les recherches les plus récentes [2] dans cette région, établissent une chronologie complète et précise des formations postsalifères. Elle date du Miocène la formation argilo-sableuse sur laquelle repose la série de cirques.

Mais une étude plus fine de l'âge de la série des cirques, doit être faite dans cette région pour préciser une meilleure datation de celle-ci. Tout compte fait, cette formation est constituée par plusieurs couches composées de graviers, de sable grossier et d'argiles multicolores (rouges, jaunes blanches, violettes...) qui affleurent largement dans la région de Pointe-Noire où elle occupe environ 6000 km². Cette série est intéressante d'un point de vue hydrogéologique et ses aquifères sont fortement sollicités.

1.3.2 Structure et tectonique

La structure du bassin sédimentaire côtier de la région de Pointe-Noire est dans l'ensemble monoclinale et profonde, avec de faibles pendages, inférieurs à 1 % vers l'océan (*Fig. I.3*). Ce pendage est la conséquence du rejet d'un système de faille important dû à la chaîne du Mayombe.

En général, la structuration des formations post-salifères est directement liée aux phénomènes halocinétiques dont deux grandes phases sont connues : l'Albien supérieur et le tertiaire. Cette tectonique a engendrée dans ce bassin, diverses structures réparties de l'ouest vers l'est en quatre zones : (i) la zone de grands diapirs et dômes de sels dans le grand offshore ; (ii) la zone à carapaces de tortue et structure dissymétriques ; (iii) la zone à diapirs et intumescences et (iv) la zone à sel calme dans la partie on shore du bassin [2].

1.4 Climatologie

1.4.1 Introduction : contexte climatique

La région de Pointe-Noire est située dans la partie Sud Congo dont elle doit ses traits climatiques généraux. Les principaux traits du climat du Sud Congo ont été décrits par plusieurs travaux [18, 19, 20 et 21]. Comme dans toute l'Afrique Centrale Atlantique, le Congo en général et le Sud Congo en particulier sont sous la dépendance de trois anticyclones permanents localisés au Nord-Ouest sur les îles Açores et Canaries, au Sud-Ouest sur l'île de Sainte-Hélène et au Sud-Est sur les Mascareignes, avec une influence prépondérante australe. Les anticyclones semi-permanents Egypto-lybien et Sud africain jouent aussi un rôle très important sur ce climat.

Les travaux [22], où des longues séries de données climatiques ont été analysées, subdivisent le Congo en deux types climatiques : Le climat équatorial au Nord et le climat tropical humide au Sud. La région de Pointe-Noire appartient au climat tropical humide. Ce climat est sous l'influence prépondérante de basses pressions intertropicales d'octobre à mai et de hautes pressions subtropicales australes de juin à septembre. La couverture nuageuse est d'autant plus importante et quasi-permanente que l'activité de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT) est inverse. Elle influence directement l'insolation et le rayonnement solaire.

Elle est caractérisée par une alternance de deux saisons : une saison pluvieuse et chaude qui s'étend de novembre à avril caractérisée par une pluviométrie très fortement contrastée et une saison sèche et fraîche de juin à septembre durant laquelle le bilan hydrologique est

probablement déficitaire [23]. Les mois de mai et octobre assurent une période de transition de l'entrée et de la sortie de la saison sèche.

1.4.2 Pluviométrie

La connaissance de l'évolution pluviométrique est importante pour comprendre et essayer de mieux interpréter les comportements des piézomètres implantés dans la zone d'étude. Cependant, l'évolution du niveau du système aquifère de Pointe-Noire dépend des précipitations mais également de l'évapotranspiration ; le ruissellement étant faible dans cette région influence plus ou moins la recharge de la nappe.

Le réseau de mesures pluviométriques dans le littoral congolais comporte plus de sept stations dispersées dans l'ensemble de la région. Nous nous limitons à une station synoptique, celle de l'aéroport de Pointe-Noire appartenant au Service de la Météorologie Nationale. La différence de la quantité d'eau tombée n'est pas significative entre stations.

Les résultats présentés ici sont d'une courte série (1978-2008) où la pluviométrie moyenne annuelle est de 1178 mm. Les études fines [24] plus récentes avec une longue série, effectuées dans le Sud Congo, dans lesquelles on enregistre en moyenne annuelle 1200 mm confirment ces résultats. Le régime pluviométrique (*Fig.1.4*) permet de mettre en évidence les principales périodes des séries pluviométriques annuelles. Ces séries se caractérisent par deux périodes de fortes pluies de novembre à décembre et de février à avril, séparées par une période de ralentissement pluvieuse (de janvier à février), suivies d'une période sèche (de juin à septembre). Ces périodes de fortes pluies correspondent aux périodes de recharge des nappes avec des maxima aux mois de décembre et mars.

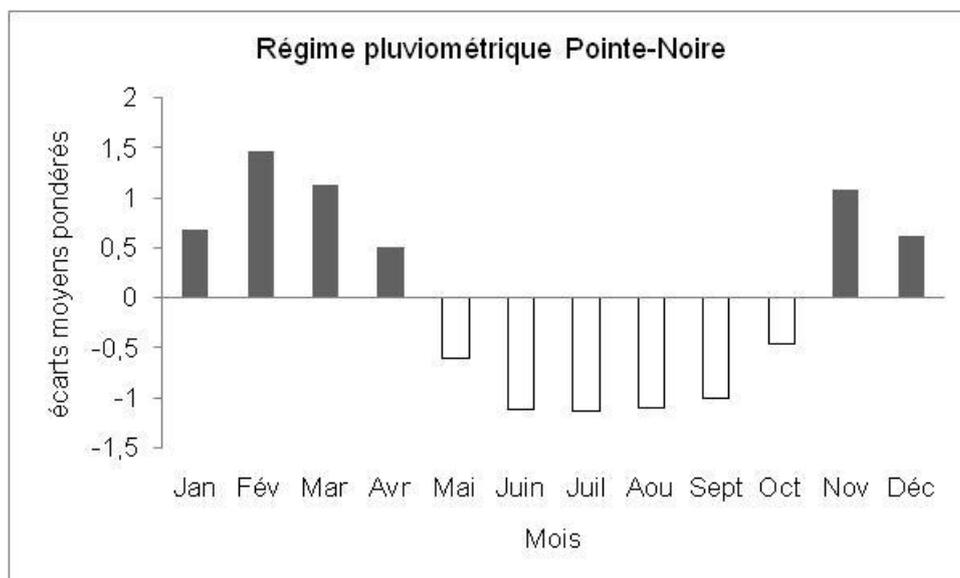


Figure 1.4 : Pluviométrie moyenne mensuelle de Pointe-Noire (1978-2008)

Les précipitations à Pointe-Noire connaissent des variations à différentes échelles de temps. On note une présence des fluctuations mensuelles importantes d'une année à une autre sans une tendance claire dans ces dernières décennies. Parfois la saison pluvieuse a la même durée que la saison sèche. Cette région connaît la plus forte variation pluviométrique de l'Afrique

Equatoriale Atlantique (31%) due à sa position en bordure de l’Océan Atlantique, qui l’expose à une influence prépondérante des anticyclones de Sainte-Hélène et sud africain.

Pointe-Noire fait partie des secteurs faiblement arrosés du Congo. Cette faiblesse constatée dans cette agglomération côtière est liée à l’effort conjugué du courant froid de Benguela et des hautes pressions subtropicales.

La variabilité pluviométrique inter-annuelle appréciée à partir des écarts moyens pondérés montre trois principales périodes dont deux périodes déficitaires (1978-1980 et 1991-1993) marquées par des écarts négatifs et une période excédentaire (1994-1999) exprimée par des anomalies positives (Fig.1.5). Une alternance d’écarts positives et négatives se caractérise à partir des années 2000 jusqu’à nos jours, marquant une tendance à la baisse.

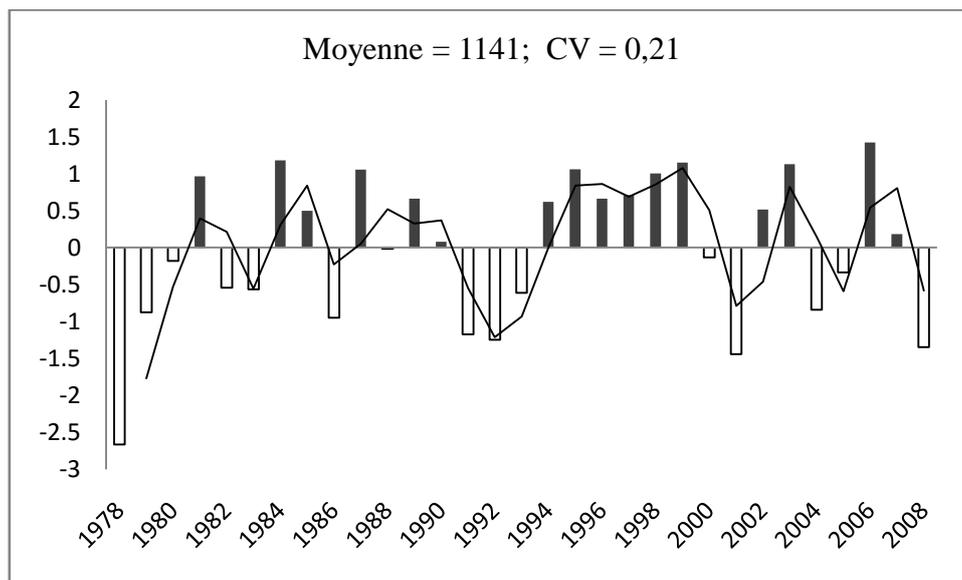


Figure 1.5 : Variabilité inter annuelle de la pluviométrie de Pointe-Noire (1978-2008)

1.4.3 Températures

Les observations disponibles (Pointe-Noire depuis 1930) montrent que les températures globales de l’atmosphère terrestre sont inégalement réparties à l’échelle temporelle (journalière, mensuelle, saisonnière et annuelle). En dépit de cette disparité thermique temporelle, les températures de Pointe-Noire comme de tout le Sud Congo sont à la hausse, une hausse qui semble aller dans le sens du réchauffement global constaté à partir d’analyse fine des séries de températures extrêmes : recherche des tendances, des ruptures possibles des séries [24, 25].

Nous représentons ici la chronique de la dernière décennie (1978 à 2008) où les températures moyennes journalières oscillent entre 22.2 et 28°C avec des faibles écarts thermiques (Fig.1.6). Cette figure (Fig.1.6) montre que les températures les plus fortes sont observées pendant les périodes pluvieuses et les plus basses pendant la période sèche, d’où les périodes pluvieuses sont chaudes et la période sèche est fraîche.

Les températures maximales journalières d’une façon générale ne sont pas très élevées, elles varient de 20.8°C à 31.9°C. Toutefois, les valeurs maximales les plus importantes

observées sont de l'ordre de 31°C et les valeurs maximales les plus basses sont de l'ordre de 20°C. **Les températures minimales journalières** sont comprises entre 15°C et 25.9°C.

Les deux dernières décennies marquent un net réchauffement des températures en surface avec une hausse d'environ 0.5°C par rapport à la normale climatologique correspondant à la période de référence 1961-1990. Ce réchauffement, au cours des deux dernières décennies, est plus important (anomalies : 0.8°C) en septembre-octobre-novembre et plus faible (anomalies : 0.4°C) en mars-avril-mai.

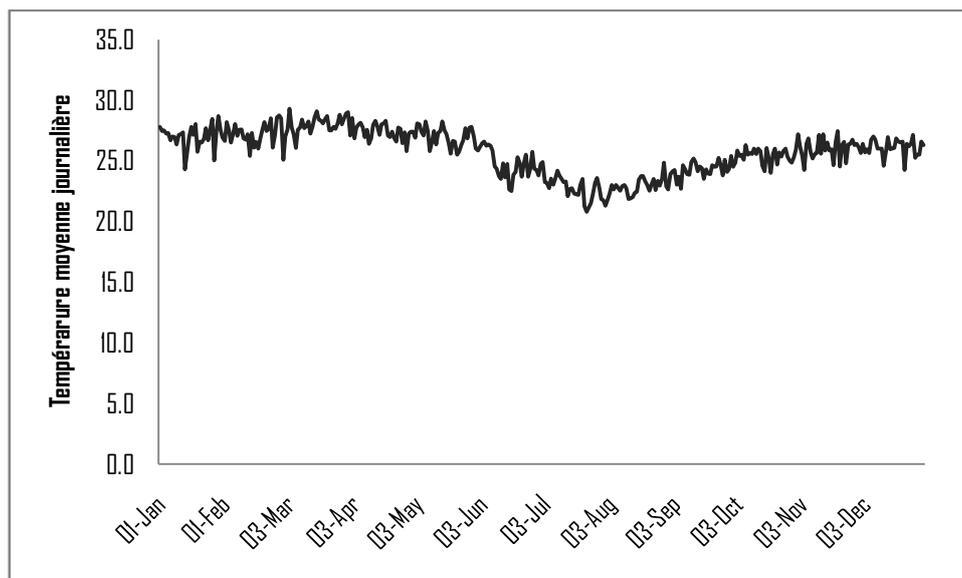


Figure 1.6 : Température moyenne journalière de Pointe-Noire (1978-2008)

L'année 2000 représente l'année où la température moyenne annuelle en surface est supérieure à la normale correspondant à la période de référence 1961-1990. La température record a été observée ces dernières décennies en 1988 (37.7°C) et la plus basses en 1993 (12.5°C).

1.4.4 Autres facteurs climatiques

1.4.4.1 Humidité relative et insolation

L'atmosphère de Pointe-Noire est en général caractérisée par une humidité moyenne journalière permanente élevée quelque soit la saison.

Les tableaux 1.1 et 1.2 et les graphiques de la figure 1.7 présentent les données d'humidité relative et d'insolation à Pointe-Noire.

Tableau 1.1 : Humidité relative (HR%) à Pointe-Noire (1978-2008)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Min	67.7	67.0	65.6	66.5	69.0	66.4	64.8	65.2	67.4	68.7	70.5	69.6	67.4
Max	95.4	95.2	95.5	95.6	95.9	95.4	94.9	94.2	93.5	92.4	94.5	95.6	94.8
Moy	81.6	81.1	80.6	81.0	82.5	80.9	79.9	79.7	80.5	80.6	82.5	82.6	81.1

Tableau 1.2 : Insolation (R en heures) à Pointe-Noire (1988-2008)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Moy	169	163	203	182	168	123	121	101	67	93	136	144	139
Ecart type	31	30	51	17	38	29	34	27	19	33	43	30	32

L'humidité relative moyenne journalière est de 81.1 % (67.4 % min et 94.8 % max). Les moyennes journalières (*Fig.1.7*) sont élevées entre novembre et février et avril et Mai et peuvent atteindre 84 % en novembre, décembre et mai. Elles ne sont jamais faibles mais retombent à des valeurs de 79 % pendant la saison sèche en juin - septembre, à cause des eaux froides du courant de Benguela qui stabilisent les bas niveaux de l'atmosphère. Le temps se caractérise par une absence des nuages convectifs.

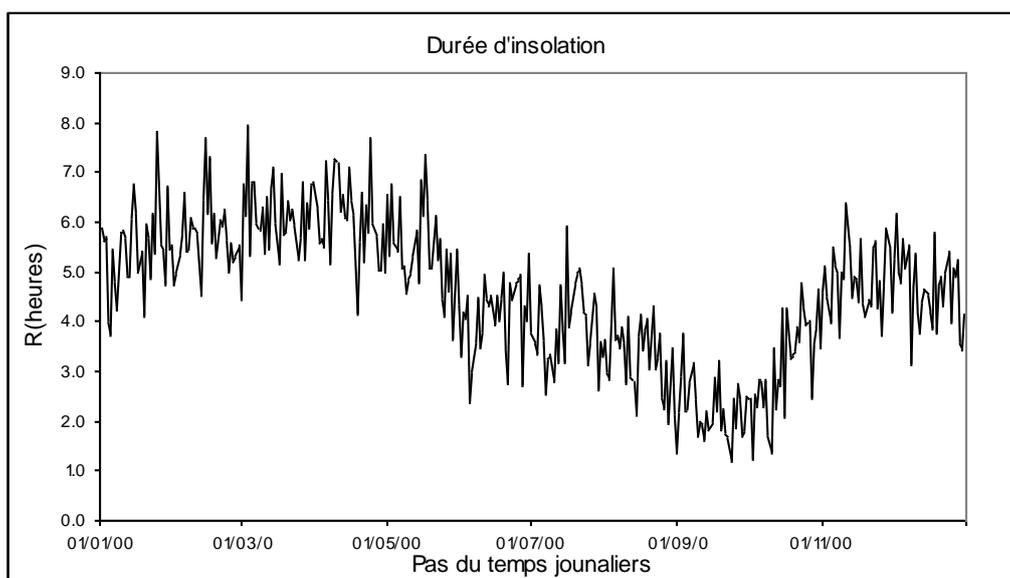
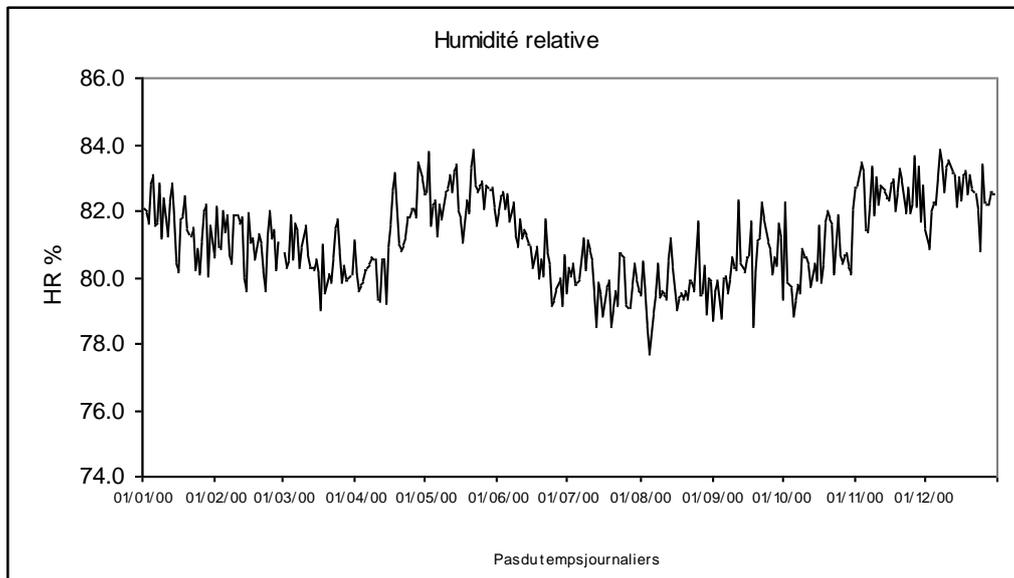


Figure 1.7 : Evolution journalière de l'humidité relative (HR%) et de l'insolation

(R heures) à Pointe-Noire (1978-2008)

La moyenne mensuelle annuelle de l'insolation est de 139 heures dans la région de Pointe-Noire (Tab.1.2). Le total annuel est faible (1669 heures) et ne dépasse guère 2000 heures à cause de la nébulosité. C'est elle qui intensifie le pouvoir évaporant de l'air et représente de ce fait le paramètre essentiel du rayonnement global. Elle détermine le bilan hydrologique et intervient surtout dans le processus du cycle de l'eau.

Sans pour autant aborder de façon *in fine*, le rayonnement global que nous avons calculé en annexe 1 selon les méthodes empiriques existantes, le tableau 1.3 présente les valeurs moyennes journalières. La figure 1.8 présente l'évolution du rayonnement global au cours de l'année.

Tableau 1.3 : Rayonnement global moyen journalier $\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ à Pointe-Noire

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Rg moy./Jour	14.8	15.5	16.2	16.1	13.6	10.9	10.6	10.1	10.3	13.9	14.7	15.7

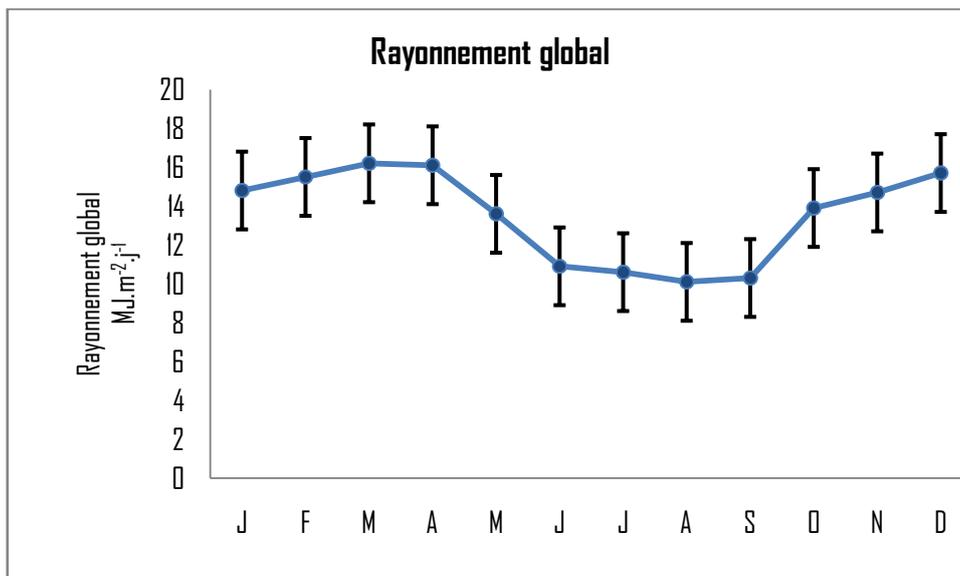


Figure 1.8 : Evolution du rayonnement global (Rg en $\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) à Pointe-Noire (1978-2009)

L'évolution annuelle du rayonnement global est assez bien corrélée avec les maxima en saison pluvieuse : 13.9, 14.7, 15.7, 14.8, 15.5, 16.2, 16.1, 13.6 $\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ entre octobre et mai. Les minima apparaissent entre les mois de juin et septembre (saison sèche). A cette période, le rayonnement global est autour de 10 $\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$. L'évolution interannuelle de la nébulosité est stable.

1.4.4.2 Vent

Les vents les plus dominants dans la région de Pointe-Noire sont les alizés, moins violents. Ils soufflent le jour de l'ouest vers l'est et stabilisent les températures et la nuit le sens inverse. Leur vitesse moyenne journalière est de 2 m.s^{-1} , avec un maximum de 5 m.s^{-1} .

Le tableau 1.4 et la figure 1.9 présentent les variations mensuelles de la vitesse moyenne du vent à Pointe-Noire.

Tableau 1.4 : Vitesse moyenne mensuelle du vent ($\text{m.s}^{-1}.\text{j}^{-1}$) à Pointe-Noire (1978-2008)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Moyenne Journalière	1.9	2.0	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.9	2.3	2.8	2.4	2.0
Ecart type	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2

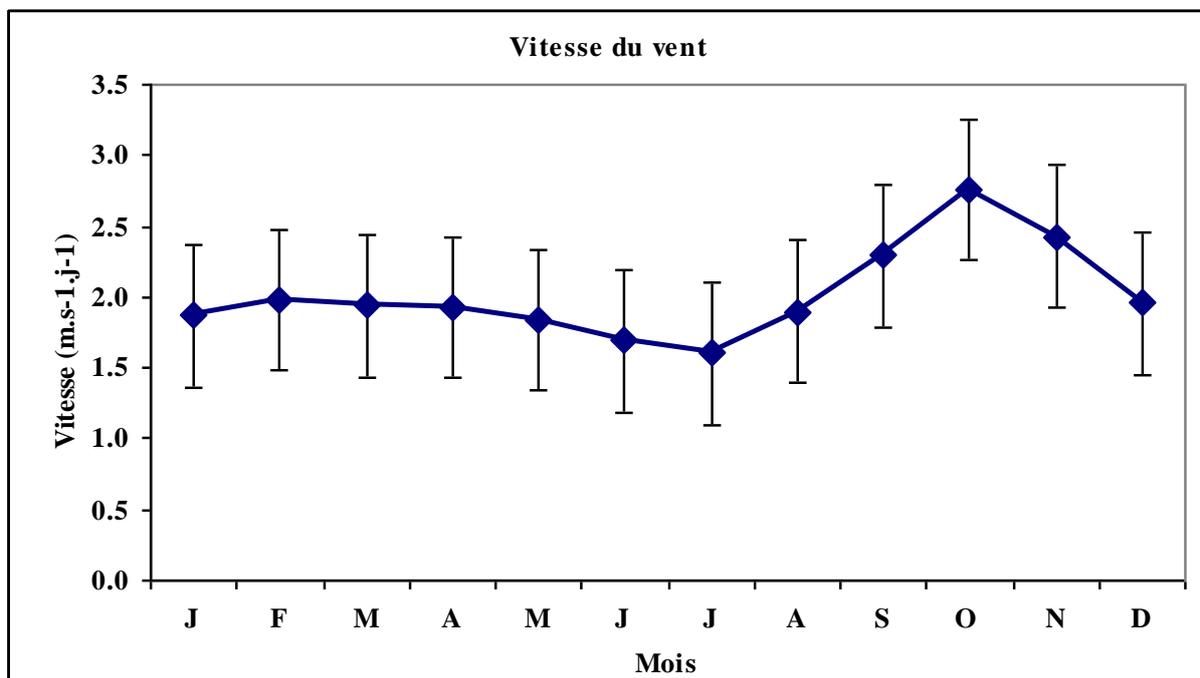


Figure 1.9 : Evolution mensuelle de la vitesse du vent dans la région de Pointe-Noire (1978-2008)

1.4.4.3 Evaporation

L'évaporation mesurée sur une nappe d'eau libre (bac Colorado enterré ou bac dit de classe) est très importante. Il mesure la hauteur d'eau évaporée sur eau libre, une valeur souvent élevée mais représentative de l'évaporation sur une station climatologique bien ventilée. Nous avons utilisé les données mesurées à pas du temps journalier dans les conditions requises à la station synoptique de Pointe-Noire.

Le tableau 1.5 présente les variations mensuelles de l'évaporation à Pointe-Noire.

L'évolution journalière de l'évaporation au cours de l'année est illustrée sur la figure 1.10. Sa moyenne inter annuelle est de 1481 mm à Pointe-Noire. Pendant la période sèche

l'évaporation subit un léger fléchissement, mais elle est toujours élevée quelque soit la saison. Il y a un fort déficit des précipitations sur l'évaporation durant l'année.

Tableau 1.5 : Evaporation mensuel à Pointe-Noire

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Moyenne	130	124	148	134	114	97	102	112	109	142	144	124	1481
Ecart type	9	12	11	10	13	11	9	7	10	14	7	6	119

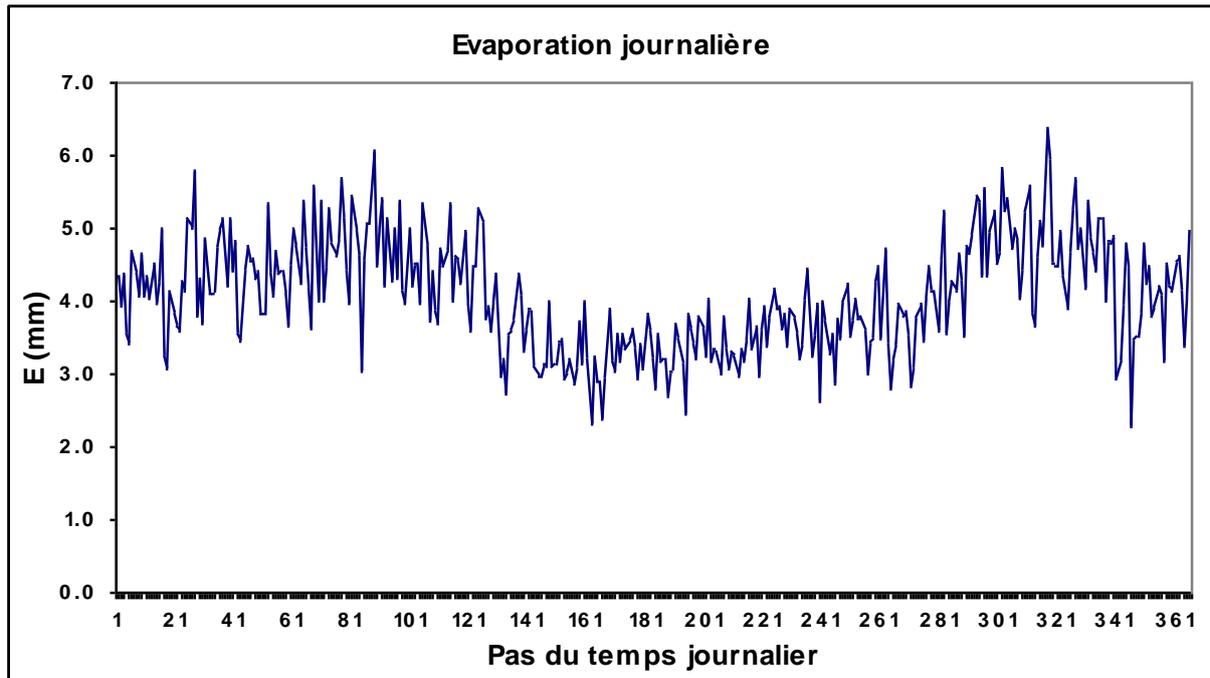


Figure 1.10 : Evolution journalière de l'évaporation à Pointe-Noire

La figure 1.9 montre que les maximums journaliers sont souvent atteints aux mois de mars et novembre (environ 6 mm.j^{-1}) et les minimums en juin et juillet (environ 2 mm.j^{-1}).

1.5 Hydrologie de surface

La région de Pointe-Noire présente un réseau hydrographique dense conquis en partie par les lagunes et les vallons marécageux. Aujourd'hui ce réseau subit une modification par l'effet de l'urbanisation. Les lagunes et vallons marécageux sont remblayés et les cours de rivières sont détournés voir réduits et sont devenus les collecteurs des voiries municipales.

Au vu de cette modification environnementale, nous distinguons quatre bassins adjacents avec, du nord au sud (*Fig.1.11*) :

a)- le bassin de Gamboussi (72 km^2), constitué par l'ensemble des petites rivières de taille modeste qui sont localisées dans la partie Nord de la région de Pointe-Noire. Son débit d'écoulement est de l'ordre de $0.0062 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Il a pour principaux affluents la *Labendé* et la *Ngwambouissi* qui se déversent dans l'océan Atlantique en formant un exutoire avec la *Songolo*. C'est dans la *Gamboussi* qu'était installée une usine de traitement d'eau de surface

afin d'alimenter la ville portuaire en eau potable. Cette usine n'est plus fonctionnelle faute de l'intrusion saline dans la rivière et de l'activité anthropique qui a modifié son cours.

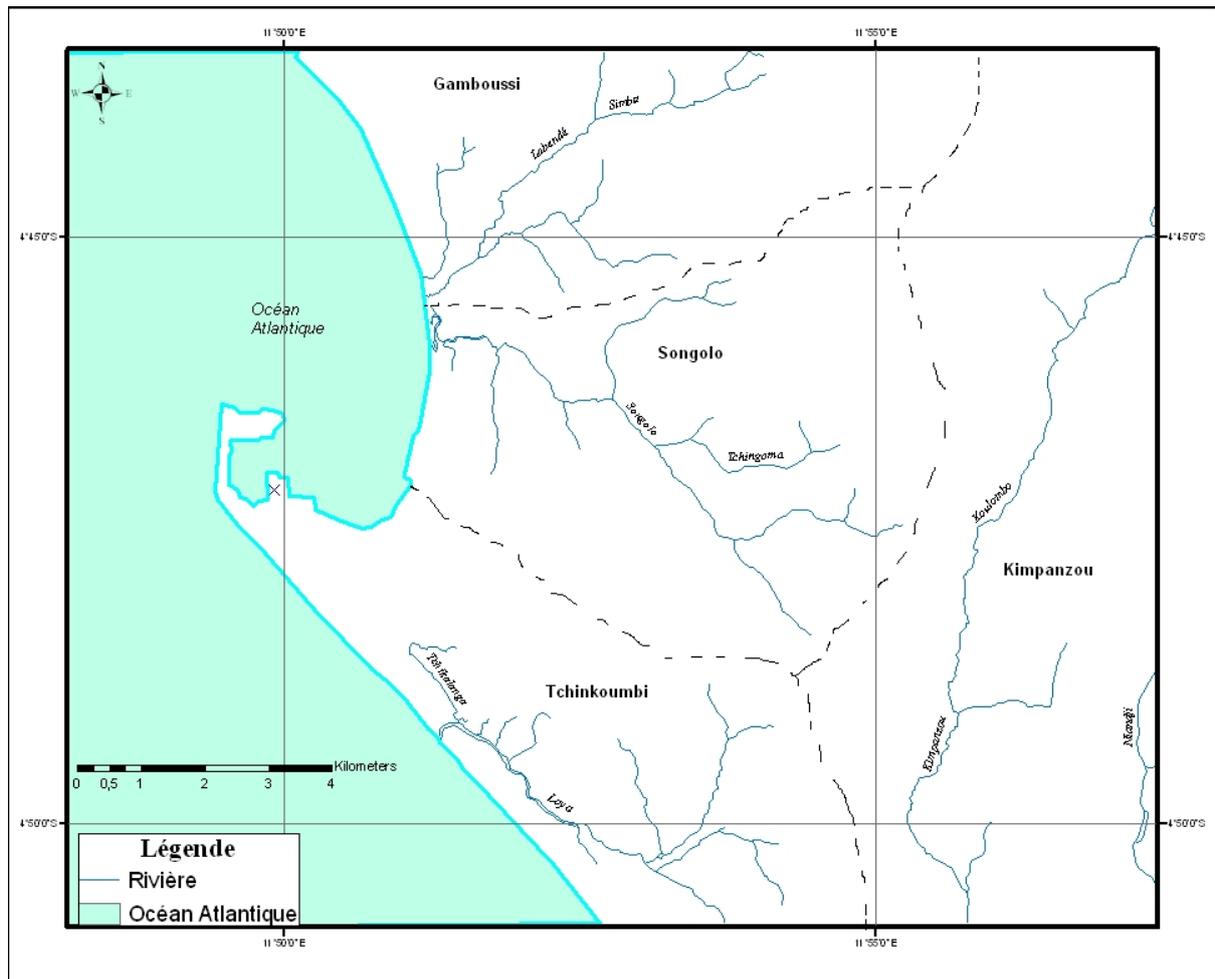


Figure 1.11 : Hydrographie et hydrologie de la région de Pointe-Noire

b)- Le bassin de Songolo (52 km^2), dont le cours est en grande partie, orienté nord ouest- sud est. La rivière présente un débit d'étiage de $0.0054 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Les principaux affluents les plus importants sont : *Tchinouka*, *Tchikondo*, *Tchingoma*,

c)- Le bassin de Tchinkoumbi : Ce bassin qui n'a ni référence de taille ni de module, recouvre les rivières du sud-ouest. Il est drainé par deux principales rivières : la *Tchinkoulou* et la *Tchinkatanga*.

La Tchikoumbi dont le cours s'étend sur quelques kilomètres, prend sa source vers le bassin côtier de la Loémé, véritable château d'eau, d'où coule le fleuve *Loémé*. Elle se nomme alors la *Tchimagni* tandis que son cours inférieur en bordure de la côte sauvage, parallèle à cette dernière, porte le nom de *Loya* qui se déverse sur l'océan.

d)- Le bassin de Koulombo, avec une superficie de 115 km^2 couvre pratiquement tout l'est de la région de Pointe-Noire. Le principal affluent est la rivière *Koulombo*, appelée également *Kimpanzou* dans son cours moyen et *Koulombo* dans son cours supérieur. Son module atteint $0.0104 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Cette rivière se jette sur le lac *Nanga*. Le tributaire le plus important est la

Tchikoulou. C'est dans ce bassin adjacent que l'écoulement latéral des eaux souterraines et leur zonalité sont déterminés.

1.6 Description hydrogéologique du système aquifère de Pointe-Noire

La région de Pointe-Noire appartient au bassin sédimentaire côtier constitué d'un complexe hydrogéologique, incluant un système aquifère composé de plusieurs couches aquifères superposées avec une continuité hydraulique. Elle consiste en une vaste dépression remplie par un complexe de dépôts plio-quaternaires, tertiaires et secondaires contenant cinq horizons aquifères ou nappes (*Fig.1.12*).

Ces couches aquifères sont caractérisées géologiquement par leur lithologie ou type de roche qu'on peut établir successivement de la manière suivante:

- l'aquifère peu profond AQ-1 (non confiné), contient une nappe libre, correspondant au milieu saturé des couches les plus perméables et plus drainants des sables de surface ;
- l'aquifère profond AQ-2 (confiné), contient une nappe profonde confinée artésienne, dans certains endroits, correspondant aux couches les plus perméables de la série des cirques (quaternaire). Elle est constituée de sables hétérogènes parfois silteux alternant avec les niveaux argilites ;
- l'aquifère profond AQ-3 (confiné), contient une nappe confinée correspondant aux couches les plus perméables des sables ferrugineux, constituée de sables hétérogènes parfois conglomératiques alternant avec des concrétions ferrugineuses ;
- l'aquifère profond AQ-4 (confiné) contient aussi une nappe confinée, reposant sur un substratum peu perméable et limitée par un superstratum peu perméable aussi, correspondant aux couches les moins perméables de la "série *gréso-dolomitique*" du crétacé (secondaire), est constitué de sables argileux et d'agrégats dolomitiques ;
- l'aquifère potentiel AQ-5, est une nappe dite potentielle correspondant à l'unité de la dolomie et de la calcite de la série calcaro-dolomitique dans laquelle des pertes de circulation ont été observées dans certains forages d'exploration minière.

Entre les deux premiers horizons supérieurs, quelques lentilles semblent se présenter dans certains forages, liés aux horizons *argileux* ou *conglomératiques*.

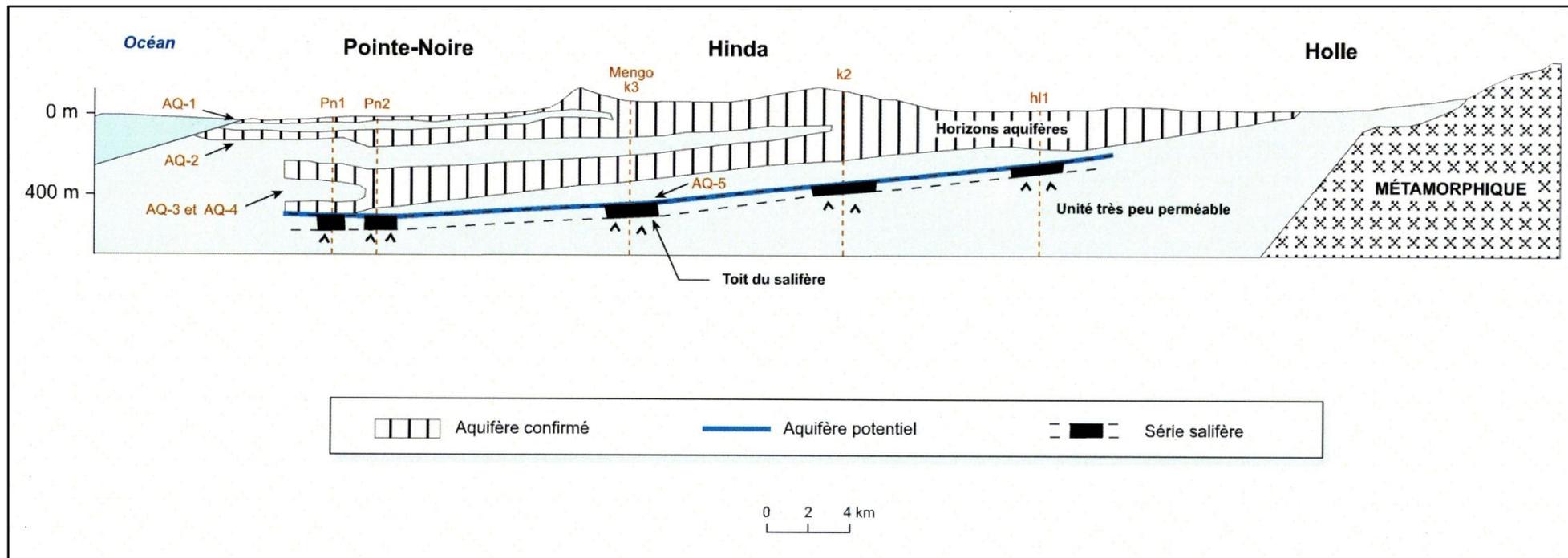


Figure 1.12: Coupe Hydrogéologique schématique

1.7 Limite verticale et épaisseur

La synthèse des études géologiques faites dans cette région [7, 8, 10, 2], a permis de définir de façon détaillée la structure des différents horizons aquifères (*Fig.1.12*). On peut établir la succession hydrogéologique suivante :

- L'aquifère AQ-1 à nappe non confinée, est une unité discontinue dont l'épaisseur moyenne observée à Pointe-Noire est environ 15 à 80 m. cette nappe est entaillée par endroit par des ravins et ravines voir même des vallées, où elle correspond aux sables observés sur les zones des plateaux. Elle est constituée principalement des sables fins avec une proportion variable de silt et d'argile, sec en surface et saturé sous le niveau de la nappe, laquelle est généralement libre.

Cet aquifère communique avec l'extérieur de multiples façons :

- connection avec l'aquifère AQ-2 sous-jacent (apports/pertes) par drainance à travers les couches silteuses et argileuses qui les séparent ;
- eaux de surface (apports/pertes) par les cours d'eau de la région et l'Océan, le long de la côte ;
- eaux de pluie (apports) par la recharge de la nappe par infiltration directe ;
- eaux de surface (pertes) par sources de débordement, émergence par infiltration

La proportion des couches silteuses et argileuses séparant les aquifères AQ-1 et AQ-2 diminue graduellement de la plaine côtière vers les plateaux de Hinda, de sorte que l'aquifère AQ-1 à nappe non confinée se confond avec l'aquifère AQ-2 confinée en aval et devient non confinée en amont dans les plateaux de Hinda à leur jonction.

- L'aquifère profond AQ-2 constitue (en région de Pointe-Noire) une nappe confinée artésienne, dont le superstratum se trouve à 80 – 180 m de profondeur. Il est constitué d'une alternance de sable fin et très fin avec des interlits de sable fins silteux et parfois de sable cimenté. Les données de forage sont très variables et semblent être contradictoires, ce qui explique l'hétérogénéité de cet horizon aquifère. L'épaisseur des lits plus grossiers est variable latéralement et leurs profondeurs relatives par rapport au niveau de l'océan diffèrent sensiblement d'un site à l'autre. L'épaisseur de cette nappe varie entre 20 et 30 m.

L'aquifère AQ-2 qui est confiné en aval (en plaine côtière) et non confinée en amont (plateaux de Hinda) se communique verticalement (apport/pertes) par des jeux de drainance à travers les couches semi-perméables le séparant avec les couches aquifères AQ-1 et AQ-3 et avec l'extérieur à travers la décharge (pertes) vers l'océan et la recharge (apport) dans la zone de Hinda

- L'aquifère AQ-3 à nappe confinée profonde, correspond à la portion plus grossière des sables ferrugineux observés entre 250 et 275 m dans la plaine côtière et dans les plateaux de Hinda, à une altitude de 100 et 125 m. La série des sables grossiers ferrugineux, épaisse de 100 à 200 m selon les endroits, est constituée de sables blancs et des sables argileux de couleur beige ou jaune, à granulométrie variable et incluant des passées conglomératiques de quartz blancs et des concrétions ferrugineux.

Les descriptions lithologiques des forages d'alimentation en eau aménagés dans la limite de la ville de Pointe-Noire ne font pas la différence entre les aquifères AQ-2,

soit les sables de la série des cirques et AQ-3, soit les sables ferrugineux. Les profondeurs de captage suggèrent que plusieurs forages captent l'aquifère AQ-2 à nappe confinée et artésienne, alors que certains plus profonds, pourraient capter l'aquifère AQ-3 à nappe aussi confinée. Ce dernier a cependant été testé grâce à des forages d'exploration hydrogéologique nouvellement réalisés sur le flanc ouest des plateaux de Hinda.

- Etant donné que les données dans les horizons les plus profonds dans la région de Pointe-Noire semblent être insuffisantes, nous pouvons considérer que les lits les plus grossiers de la série grésolo-dolomitique pourraient être un aquifère, soit l'aquifère AQ-4 à nappe confinée. Mais cette affirmation est aléatoire compte tenu de l'insuffisance des données. Les aquifères AQ-3 et AQ-4 se confondent tout juste après la plaine côtière qui à leurs tours deviennent plus loin vers Holle (en amont) un aquifère non confiné dont leur superstratum (toit) devient libre.
- L'aquifère AQ-5 à nappe confinée profonde de la série calcaro-dolomitique dont le superstratum (toit) se trouve à 400 - 465 m dans la plaine côtière et dans les plateaux de Hinda entre les altitudes 40, 250 et 315 m. Cette unité est considérée comme un aquifère contenant une nappe d'eau souterraine par une importante perte de boue de forage entre 400 et 415 m de profondeur dans la zone des plateaux, ce qui suggère une formation perméable par endroits, probablement karstique. Elle ne semble pas être en contact avec les autres couches aquifères du système aquifère sédimentaire. Elle fait peut-être partie de l'aquifère karstique qui pourrait prendre sa source depuis la série métamorphique du Mayombe.

Le présent travail ne s'intéresse qu'à la deuxième couche aquifère supérieure (aquifère AQ-2) la plus exploitée dans la région.

Conclusion partielle

De par sa position géographique et ses activités économiques, la région de Pointe-Noire possède un système aquifère dont certaines couches aquifères sont très sollicitées pour l'exploitation. Ce qui lui (système aquifère) confère une certaine vulnérabilité par les intrusions d'eau saumâtre qui limitent ses possibilités d'exploitation. Ce système aquifère multi couches, est alimenté directement par les eaux de pluies. Composé de plusieurs couches aquifères superposées avec une continuité hydraulique, ce système est caractérisé géologiquement par la lithologie ou le type de roche de chaque couche.

Élaboration d'un système d'informations hydrogéologiques de l'AQ-2 de Pointe-Noire

Dans de nombreuses études [26, 27], le manque de données et le besoin d'acquérir une meilleure connaissance de la ressource en eau souterraine sont soulignés. Certaines font valoir que, pour gérer, adéquatement l'utilisation de la ressource, il faut d'abord bien la connaître (fonctionnement, capacité d'exploitation ponctuelle, qualité, vulnérabilité, etc...). Pour d'autres, ce manque de connaissance, associée à un manque d'intégration des données disponibles sur les eaux souterraines, permet difficilement de faire une gestion optimale de la ressource, incluant sa mise en valeur et sa protection tant à l'échelle locale que régionale.

Il apparaît donc nécessaire de cartographier, de classer les propriétés hydrodynamiques des aquifères d'eau souterraine, de connaître leurs aires de recharge et de résurgence et d'établir les usages prioritaires. La majeure partie des scientifiques [28, 26, 27] estiment également qu'on doit maintenir un réseau de surveillance de la qualité et de la quantité des eaux souterraines afin de mieux documenter son fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique.

Une gestion régionale des eaux souterraines sur la base de la formation géologique aquifère apparaît difficile présentement vu que les données hydrogéologiques ponctuelles disponibles sont rarement suffisantes à cette échelle. Il existe peu de documents d'interprétation d'ensemble des données sur une base locale ou régionale (cartes hydrogéologiques). La délimitation des formations géologiques aquifères, leur potentiel d'exploitation, leur vulnérabilité, leurs aires de recharge, la qualité des eaux souterraines qui s'y écoulent, les liens avec les milieux récepteurs (plans d'eau, cours d'eau, milieux humides) sont autant de renseignements qui sont souvent incomplets ou encore disséminés au sein de divers organismes publics et parapublics. C'est ainsi que dans ce chapitre, nous faisons une rétrospective des données anciennes et nouvellement acquises afin d'illustrer le fonctionnement de l'aquifère de la région de Pointe-Noire à partir des systèmes d'informations géographique (SIG). Les SIG présentent des avantages précieux car ils sont à la fois capables de mémoriser la totalité de l'information disponible et de faciliter la manipulation et l'interprétation des données.

Dans le présent travail nous réalisons à partir des SIG, le regroupement des informations hydrogéologiques utiles pour la protection et la conservation des eaux souterraines au sein d'un même système d'informations hydrogéologiques (SIH). Ceci constitue un préalable à l'amélioration des informations de gestion.

2.1 Principes du SIG

2.1.1 Définition générale

Un **système d'information géographique** (SIG) est un outil informatique permettant d'organiser, de présenter et d'analyser des données référencées dans l'espace, ainsi que de produire des plans et cartes. Ses usages couvrent les activités géomatiques de traitement et de

diffusion de l'information géographique. La représentation est généralement en deux dimensions, mais un rendu 3D ou une animation présentant des variations temporelles sur un territoire sont possibles.

L'information géographique peut être définie comme l'ensemble de la description d'un objet et de sa position géographique à la surface de la Terre.

Un SIG est constitué de cinq composants comme l'indique la figure 2.1 :

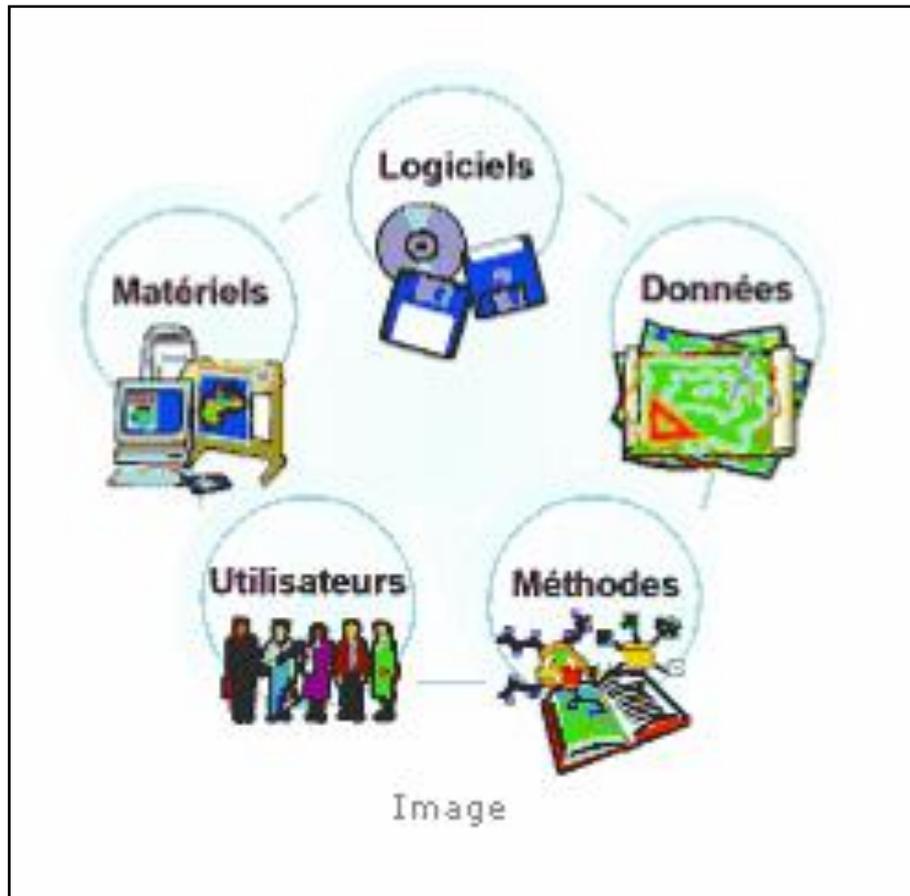


Figure 2.1: Composants du SIG

Ils assurent les 6 fonctions suivantes (parfois regroupées sous le terme des '6A'):

- ✓ saisie des informations géographiques sous forme numérique (*Acquisition*)
- ✓ gestion de base de données (*Archivage*)
- ✓ manipulation et interrogation des données géographiques (*Analyse*)
- ✓ mise en forme et visualisation (*Affichage*)
- ✓ représentation du monde réel (*Abstraction*)
- ✓ la prospective (*Anticipation*)

Un SIG permet de répondre à des questions relevant de domaines très variés comme la protection de la nature, la gestion des eaux, le contrôle de l'espace aérien... Ceux-ci peuvent également constituer une base d'aide aux décisions administratives, économiques ou

scientifiques. Il constitue une base neutre permettant de prendre des décisions [26] se rapportant à l'environnement ou à l'aménagement [27].

Un SIG doit répondre à cinq questions, quel que soit le domaine d'application :

- **Où** : où se situe le domaine d'étude et quelle est son étendue géographique ?
- **Quoi** : quels objets peut-on trouver sur l'espace étudié ?
- **Comment** : comment les objets sont-ils répartis dans l'espace étudié, et quelles sont leurs relations ? C'est l'analyse spatiale.
- **Quand** : quel est l'âge d'un objet ou d'un phénomène ? C'est l'analyse temporelle.
- **Et si** : que se passerait-il s'il se produisait tel événement ? C'est l'analyse prospective.

Telles sont les différentes questions auxquelles nous tentons de répondre pour définir le fonctionnement hydraulique, la structure et la configuration de l'aquifère de Pointe-Noire.

2.1.2 Représentativité des données dans un SIG

Les informations d'un SIG sont représentées sous forme de données géographiques qui indiquent la forme d'éléments qui se situe dans l'espace. Les objets géographiques sont généralement rassemblés en *couches* ou *layer* (Fig.2.2), chaque couche rassemblant l'ensemble des objets homogènes (bâti, rivière, voirie, parcelles, etc.). Formellement, une couche est la représentation visuelle d'un ensemble de données géographiques dans tout environnement numérique de carte. Conceptuellement, une couche est une tranche ou une strate de la réalité géographique dans un secteur particulier, et est plus ou moins équivalente à un article de légende sur une carte de papier. Sur une carte de route, par exemple, les routes, les parcs nationaux, les frontières politiques et les fleuves peuvent être comme des couches différentes.

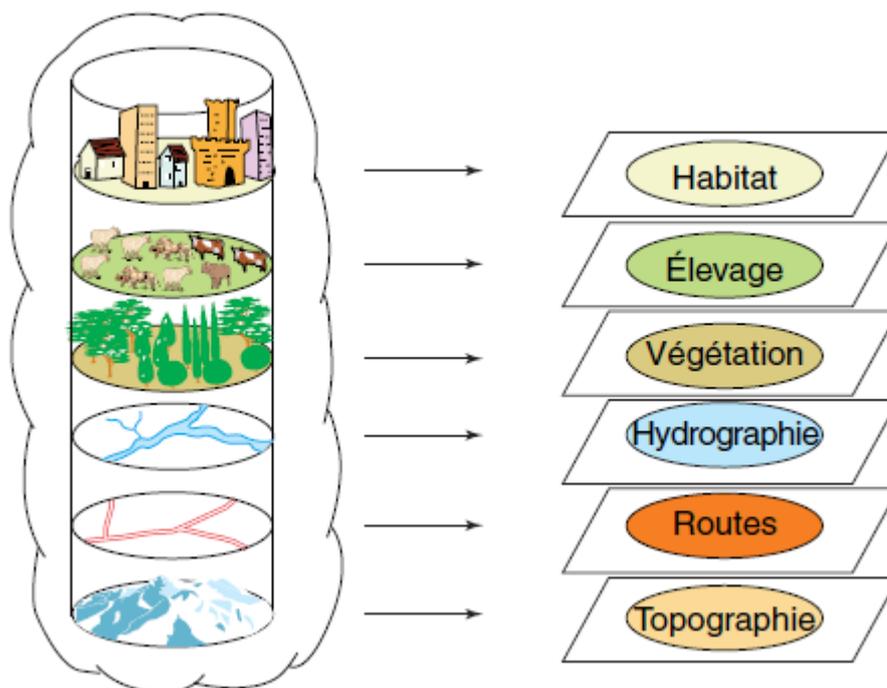


Figure 2.2: Schéma général d'un SIG

Les données géographiques d'une couche peuvent être représentées de 2 manières différentes : données vectorielles et données raster (Fig.2.3).

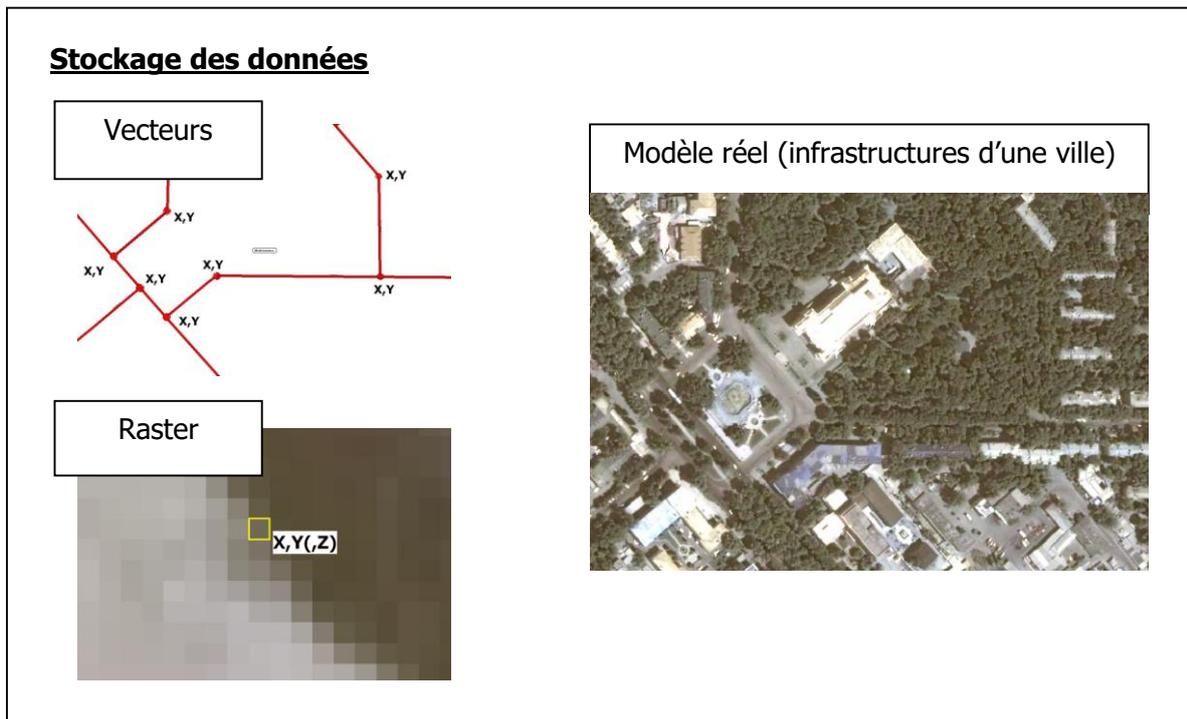


Figure 2.3: Données d'un SIG

2.1.2.1 Données vectorielles

Dans le modèle *vecteur*, chaque objet est représenté avec ses coordonnées x,y . On distingue 3 sous-types principaux (Fig.2.4) :

- Les *points* sont des variables discrètes, ponctuelles représentant des objets géographiques petits (à l'échelle d'observation) comme des cabines téléphoniques, des centres de santé, des hôpitaux, des puits ou des monuments. Les points sont utilisés pour une représentation cartographique mais aussi pour exprimer une distribution spatiale, la triangulation ou interpolation.
- Les *lignes* sont une succession de coordonnées x, y . Elles sont utilisées pour représenter des phénomènes géographiques linéaires telles que les réseaux de transport (routes, chemins de fers), réseaux hydrographiques, des frontières et d'autres réseaux connectifs.
- Les *surfaces* ou *polygones* sont une succession de coordonnées délimitant une surface fermée. Ils sont utilisés pour représenter des divisions administratives (pays, région), des lacs, des parcelles, des types de sol, etc.

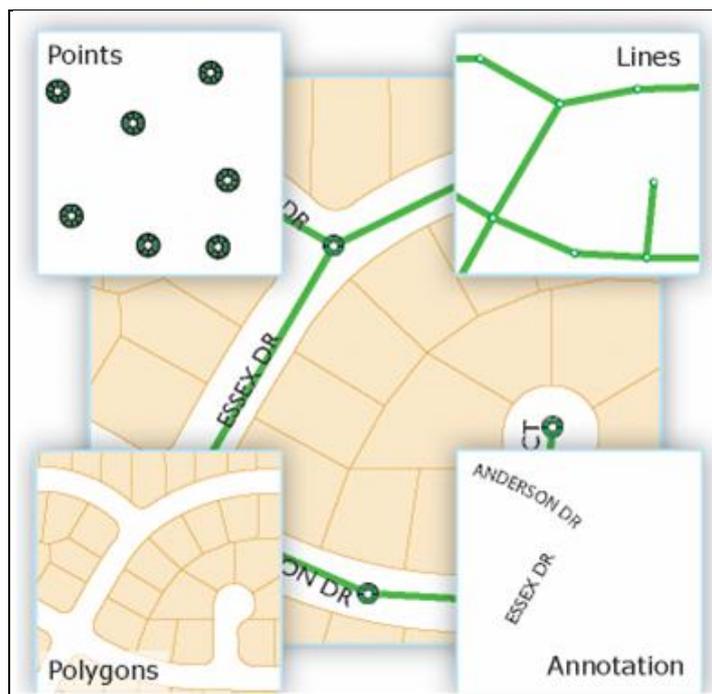


Figure 2.4: Représentation de l'information en modèle vecteur

2.1.2.2 Données raster

Dans le modèle *raster* (ou *trame*), les données sont stockées sous formes de matrices de cellules (ou de pixel), dont chacune stocke une valeur pour la partie de la surface qu'il couvre. Une cellule donnée contient une valeur simple. Ainsi la quantité du détail qui peut être représentée pour la surface est limitée à la taille des cellules de trame.

Les données raster proviennent, soit d'une image numérique telle que les images satellites, soit de plans scannés telles que les cartes et les photos aériennes (*Fig.2.5*)

2.1.2.3 Données alphanumériques

Les données alphanumériques sont des informations textuelles, qualitatives ou quantitatives décrivant l'objet géométrique.

A chaque objet est attribué un tableau contenant des informations de type alphanumérique. Ces informations décrivent l'objet (exemple : nom de la ville, numéro de la commune, type de l'occupation du sol,...).

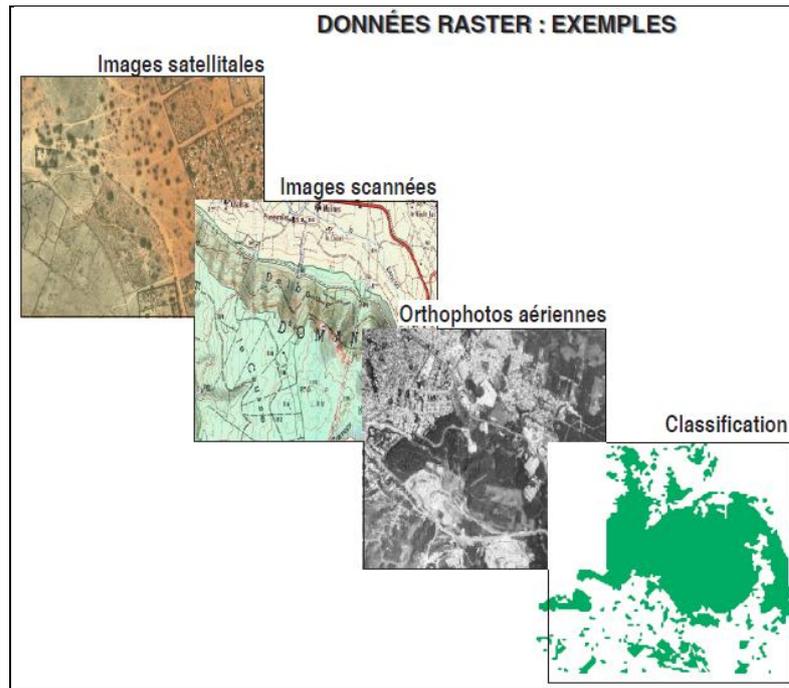


Figure 2.5: Représentation de l'information en modèle raster

Ces fiches permettent de stocker des informations qui décrivent les objets : le contenu dépend des besoins de l'étude (Fig.2.6).

Une table géographique est constituée d'une table classique (comportant des champs tabulaires de type chaîne, nombre, date), et d'un champ spécifique décrivant la nature de l'information «shape».

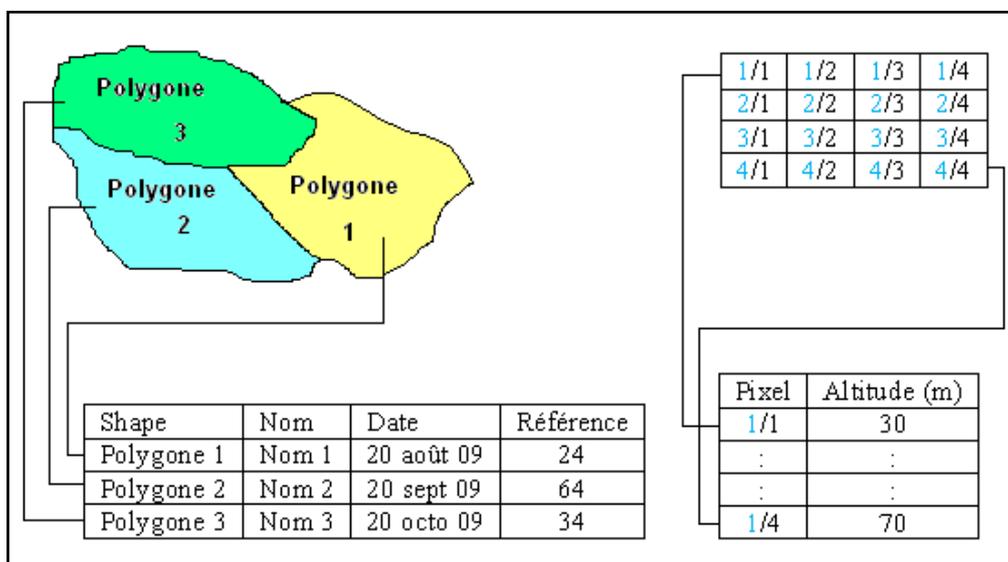


Figure 2.6: Exemple de données alphanumériques

2.1.3 Géoréférencement

2.1.3.1 Support cartographique

La première opération pour l'intégration d'une carte dans le SIG est sa numérisation qui consiste à l'enregistrer sous forme de fichiers cartographiques numériques comportant les

coordonnées géographiques réelles (x, y). Ce type de données est dit *géo référencé* parce que les objets sont liés à une référence géographique (dite également *référence spatiale*); cette référence géographique permet de mettre en relation ces objets par rapport aux autres. La référence géographique peut être explicite (coordonnées sphériques ou projectives) ou implicite (adresse, code postale, nom de route).

Le *géocodage*, processus automatisé, est le système de conversion entre les références explicites et références implicites (ex : repérer un endroit sur un plan à partir de son adresse).

Les autres données géographiques proviennent essentiellement de la vectorisation d'images existantes : fonds de carte, photos ou images satellites redressées.

Après avoir *géo référencé* l'objet, le SIGiste remplit selon ses besoins une fiche attributaire pour chaque objet, et fait entrer les données alphanumériques dites sémantiques dans le progiciel.

Le lien entre les références géographiques et les attributs de chaque objet est stocké dans des *tables* dont les colonnes représentent les différents attributs de l'objet et les lignes figurent les différents objets de la couche de données. Chaque objet de la liste est référencé par un *numéro d'identification* unique (colonne FID). La colonne *Shape* ou *Forme* indique le type de données (point, ligne ou polygone).

Le SIG manipule également des objets *graphiques non référencés* qui complètent la carte : images, textes, tableaux, légende, échelle, flèche du Nord, titre, etc. Le *référencement* permet de lier des images (par exemple vues aériennes ou satellites) à un système de coordonnées (Fig.2.7). C'est aussi le processus de convertir les coordonnées d'une carte ou une image d'un système à l'autre, typiquement en les décalant, en tournant, en mesurant, en biaisant, ou en projetant.

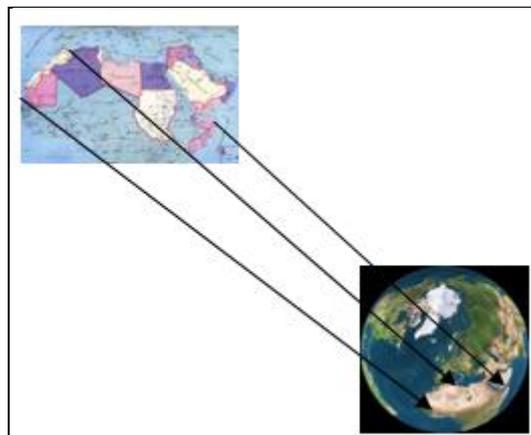


Figure 2.7: Géoréférencement d'une carte

2.1.3.2 Support numérique

Les données numériques peuvent être :

- Une base de données structurée dans un format interne à un SIG ;
- Un simple fichier textes contenant toutes les informations structurées de façon simple.

Ces données doivent être saisies en fichiers Excel ou Access...

2.1.3.3 Système de coordonnées

Tout SIG repose sur un *système de coordonnées terrestres* qui permet de référencer les objets dans les espaces et de positionner l'ensemble des objets les uns par rapport aux autres (Fig.2.8). Le système de coordonnées est dit *sphérique* ou *géographique* si les points sont mesurés par les angles formés par rapport à des points de référence (latitude et longitude). Par opposition, il est dit *projectif* ou *cartésien* s'il résulte de la projection des points à la surface du globe sur une surface plane.

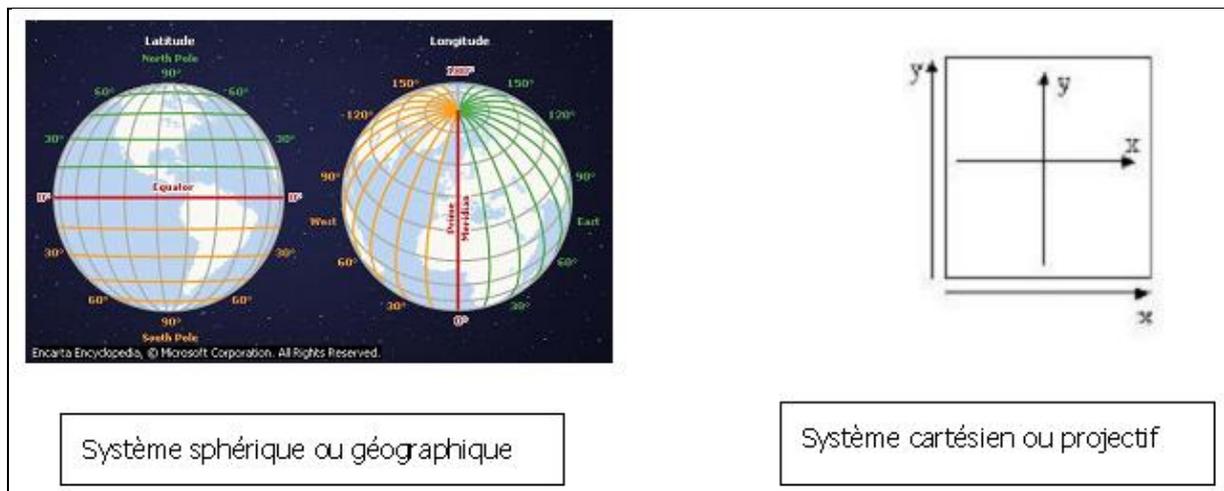


Figure 2.8: Système de coordonnées

2.1.4 Logiciels utilisés :

Les logiciels utilisés pour notre étude sont :

ENVI 3.5 de RSI

C'est un logiciel de visualisation et d'analyse de différents formats d'images :

- Données télédétectées (images, satellites, aériennes, radar) ;
- Vecteurs (formats des principaux SIG)
- Modèles numériques de terrains

Suite ArcGIS

La suite logicielle ArcGIS comporte 3 logiciels principaux : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox. Des extensions (toolbox) ont été utilisées pour augmenter les possibilités du SIG.

- ArcMap : logiciel principal pour l'élaboration des cartes. Il applique divers traitements sur les données :
 - ✓ Revue des données
 - ✓ Edition des données
 - ✓ Production de carte
 - ✓ Requêtes
 - ✓ Analyse des données
 - ✓ Diagrammes
 - ✓ Rapports

- ArcCatalog: l'explorateur des données géographiques. Il applique les traitements suivants :
 - ✓ Revue des données ;
 - ✓ Gestion de base de données ;
 - ✓ Création des données et documentation
- ArcToolbox : les boîtes à outils du geoprocessing. Il applique :
 - ✓ Gestion de base de données
 - ✓ Analyse des données ;
 - ✓ Conversion des données
 - ✓ Création d'outils personnalisés

Google Earth

Le fameux logiciel n'est pas qu'un gadget sympathique pour trouver une vue aérienne de la gare centrale de Pointe-Noire ou de la maison de mon oncle. C'est également devenu un outil de travail très important pour le sigiste qui fournit de très bonnes vues aériennes ainsi que des bases de données personnelles de points. Malheureusement la résolution est encore médiocre dans certaines de nos zones d'intervention.

Excel, Access

La suite Office de Microsoft a également des outils pratiques pour le traitement des données. L'interface avec la suite ArcGIS n'est toutefois pas toujours aisée.

2.2 Elaboration d'un SIH dans la région de Pointe-Noire

A partir des données hydrodynamiques et hydrogéologiques numérisées et géoréférencées et des informations régionales sur le régime d'exploitation des ressources en eau souterraine, l'élaboration d'un Système d'Information Hydrogéologique (SIH) pour l'aquifère de Pointe-Noire est effectuée. Ces données mémorisées sous forme de tables DBF sont importées par le logiciel ArcGis pour être combinées soit avec les données cartographiques scannées et géoréférencées soit avec des images satellitaires traitées à l'aide de la suite ArcGis. Cette combinaison permet de faire une analyse plus globale.

2.2.1 Collectes des données

Pour effectuer l'étude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère de Pointe-Noire, les données géologiques (coordonnées, relief, stratigraphie...), hydrodynamiques (perméabilité de Darcy, transmissivité hydraulique, coefficient d'emménagement...), hydrogéologiques (régime d'exploitation, piézométrie...) sont collectées. Ces données collectées sont mises sous forme de fichiers DBF.

2.2.2 Traitement des données

Le traitement des données consiste à les restaurer sous forme de table DBF afin de les rendre utilisables dans le logiciel (ArcGis). Cette informatisation s'effectue en deux phases :

- création de fichier DBF ;

- création d'une base de données cartographique sous forme d'images et de fichier (shape files) ;
- importation des données par le logiciel ArcGis.

Le logiciel ArcGis a permis de créer les cartes de fond numérisées de Pointe-Noire, tirées des images satellitaires et des données cartographiques scannées. Ces cartes numérisées sont superposées avec d'autres couvertures numérisées des différents paramètres hydrodynamiques et hydrogéologiques à l'aide du logiciel Surfer 8. Ce logiciel a permis de créer des cartes d'isovaleurs de différents paramètres étudiés.

Les données hydrodynamiques, piézométriques et chimiques sont des attributs des points d'eau stockées dans les tables DBF vers les coordonnées géographiques. L'import et l'implantation des forages et piézomètres avec leurs attributs sur les cartes numériques sous surfer ont nécessité la transformation des coordonnées géographiques de ces points d'eau en coordonnées Lambert compatibles avec celles de cartes numérisées.

2.3 Distribution et spatialisation du mouvement naturel de l'eau souterraine

2.3.1 Données géomorphologique

Le fond géologique de la région de Pointe-Noire est représenté par des images satellitaires tirées à partir de google earth et géoréférencées à l'aide de ArcGis. Cette carte est superposée sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de maille 100 m. Le MNT représente le relief (X, Y, Z (altitude)), en donnant à chaque point d'un quadrillage l'altitude d'un point correspondant sur le terrain. Ce qui permet de faire des représentations hypsométriques (coloration selon la couche d'altitude) (Fig.2.9).

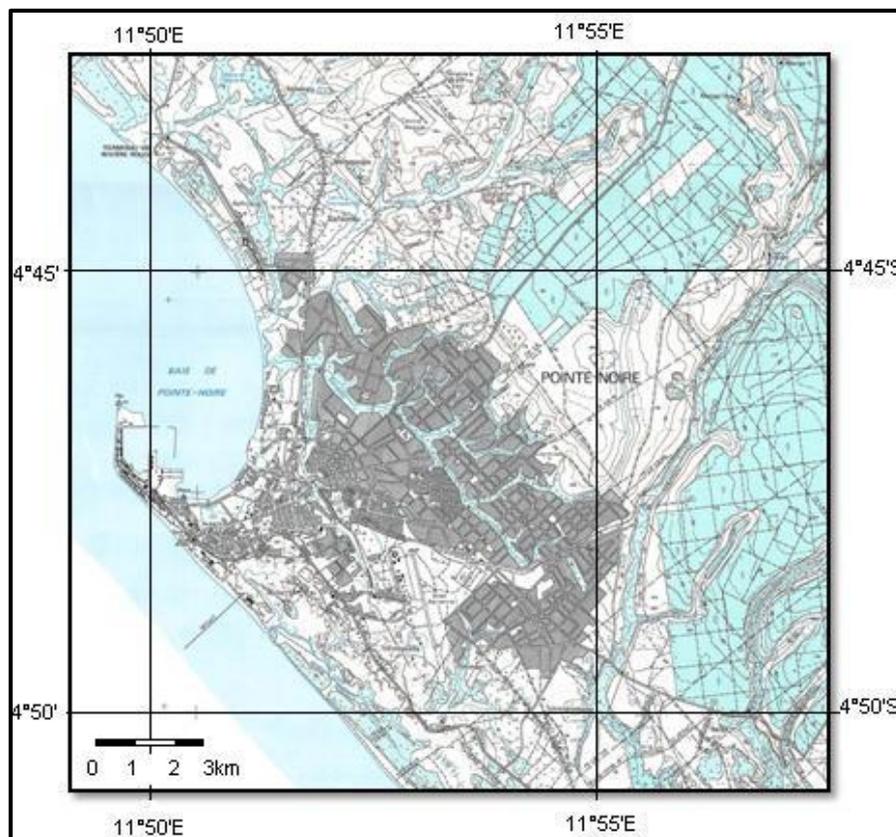


Figure 2.9: Topographie de l'agglomération de Pointe-Noire

2.3.2 Cartographie du mur de l'aquifère

Nous avons élaboré la carte du mur (Fig.2.10) à partir de l'interpolation des valeurs de la profondeur de l'AQ-2 contenu dans les différentes fiches de présentation de chaque forage, par le logiciel suite ArcGis. Ensuite, nous avons exporté le contour sous format shape file dans le SIG. La carte nous renseigne sur les variations des épaisseurs de la série de cirques et son analyse permet d'en déduire plusieurs structures :

- les structures concentriques des courbes dans la frange littorale pourraient être liées au remplissage du bassin par les dépôts plio-pléistocènes ;
- dans le plateau de Hinda, nous remarquons une dépression marquée par l'augmentation de l'épaisseur des dépôts du plio-pléistocène. Cette structure serait en relation avec une falaise parallèle à la côte.

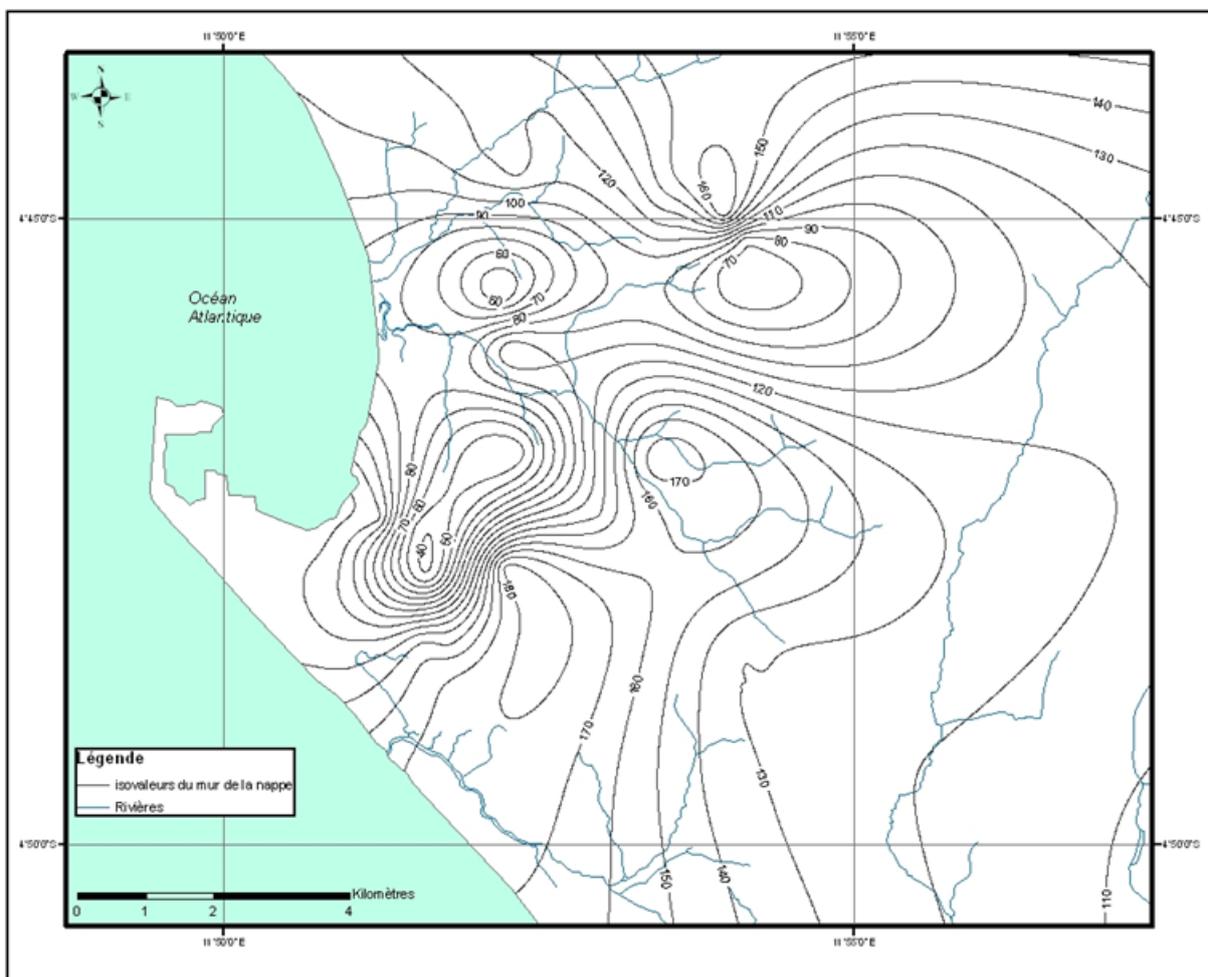


Figure 2.10: Carte de la profondeur du mur de la nappe AQ-2

2.3.3 Cartographie du toit de la nappe

A l'échelle de la zone, la nappe AQ-2 est considérée comme captive (cf.1.5.1), les lentilles silteuses susceptibles de la mettre en charge sont généralement d'extension restreinte. Par conséquent, la limite du toit de l'aquifère se trouve à 70 – 80 m correspondant aux couches les plus perméables de la série des cirques (quaternaire). Nous avons interpolé le superstratum afin d'obtenir une surface du toit absolue (Fig.2.11).

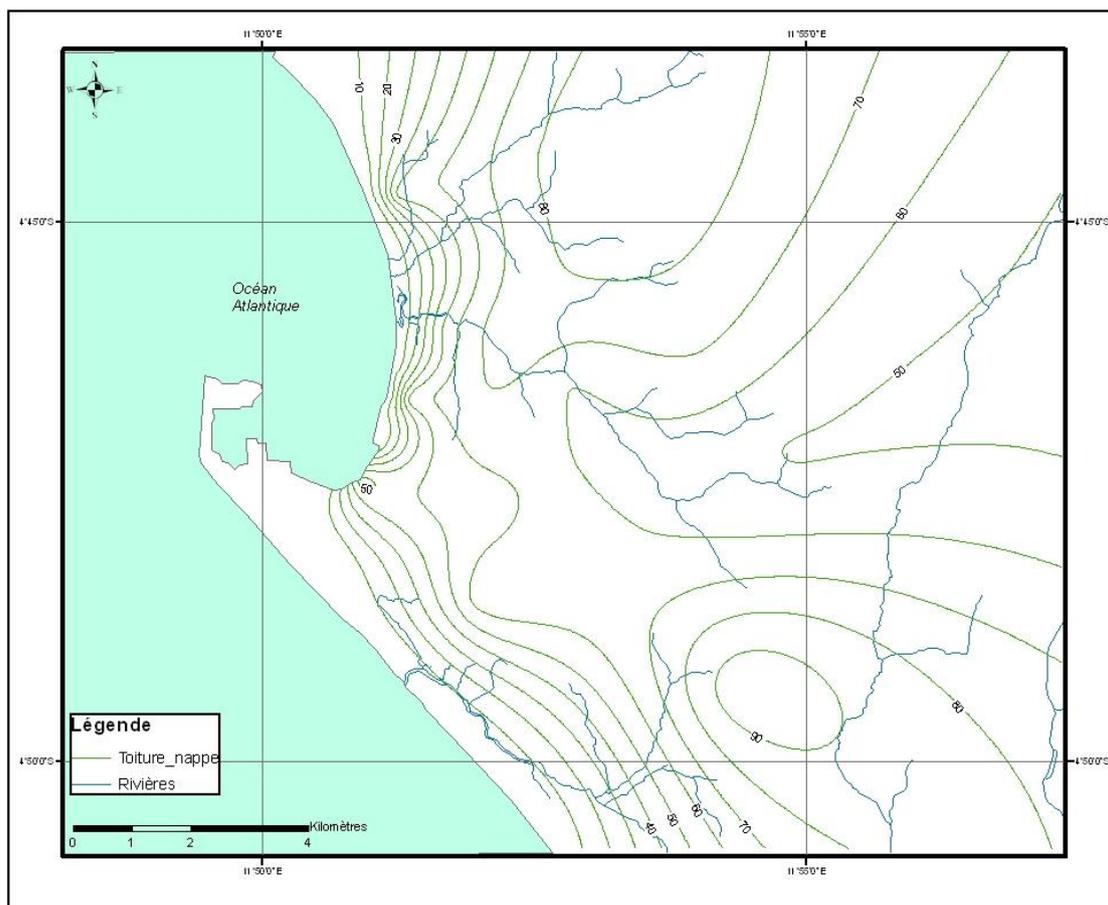


Figure 2.11: Carte de la profondeur du toit de la nappe AQ-2 de Pointe-Noire

2.3.4 Données hydrodynamiques

Les données disponibles sur les propriétés hydrodynamiques, pour la région de Pointe-Noire, sont tirées des différents essais de pompages qui ont été réalisés [1]. Ces différentes données ont été reprises par différents auteurs [2, 28] et ne semblent pas avoir été mises à jour, eu égard aux nouveaux forages d’exploitation aménagés à Pointe-Noire. La comparaison entre les différentes données disponibles présente certaines différences. En effet, ces propriétés représentent des indicateurs qui, compte tenu de la forte exploitation de l’eau souterraine à Pointe-Noire, devraient faire l’objet d’une réévaluation et d’une mise à jour englobant les nouvelles données et essais de pompage. Ces différentes données sont superposées sur les cartes numériques. Chaque propriété est reliée à une table de données à partir de laquelle on peut tracer des isovaleurs représentatives de l’information voulue, telles que la spatialisation des coefficients de perméabilité de Darcy, la transmissivité et le coefficient d’emmagasinement.

2.3.4.1 Données de coefficients de perméabilité de Darcy

Sur la carte numérisée tirée de l’image satellitaire, nous avons superposé l’attribut de coefficient de perméabilité. Ces données mises à jour en englobant les anciennes et les nouvelles, donnant lieu à une réévaluation sont reliées à une table sous format DBF. Sur un fond de carte numérisée, une carte des isovaleurs de coefficients de perméabilité est tracée (Fig.2.12).

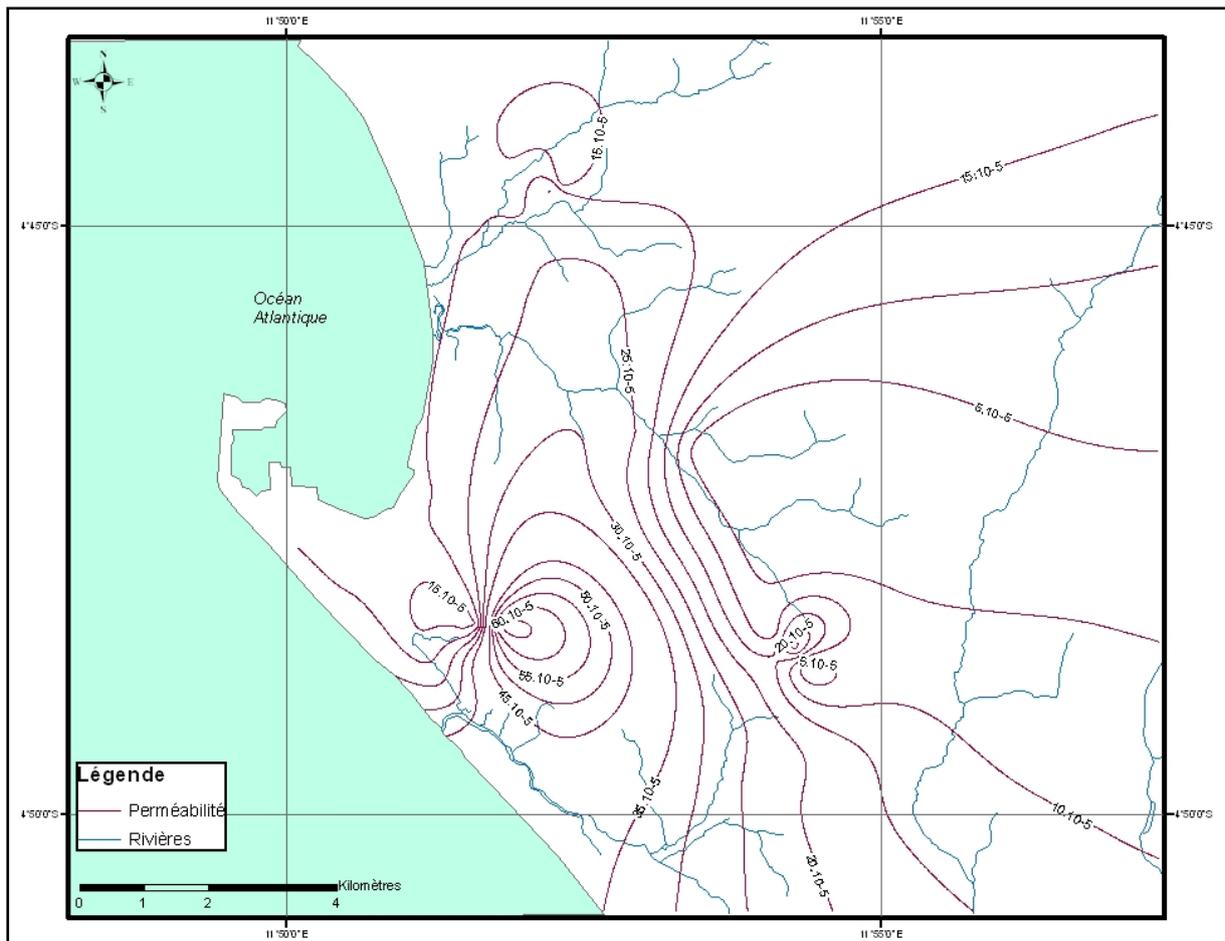


Figure 2.12 : Spatialisation de la perméabilité de Darcy dans la région de Pointe-Noire

2.3.4.2 Données de transmissivité

L'aquifère de Pointe-noire présente une grande variabilité de sa transmissivité liée à l'hétérogénéité lithologique et géométrique des couches aquifères. Les différents essais de pompages effectués précédemment [1, 2] ont permis la détermination des intervalles de variations de la transmissivité.

La transmissivité dans cette région se situe dans les intervalles, $8,0 \cdot 10^{-4}$ et $9,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui confirme les bonnes caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère. La carte réalisée montre l'existence d'une zone de transmissivité élevée prenant la forme d'un chenal orienté globalement est-ouest, débutant à l'est vers le centre et se terminant en bordure de la côte atlantique (Fig.2.13).

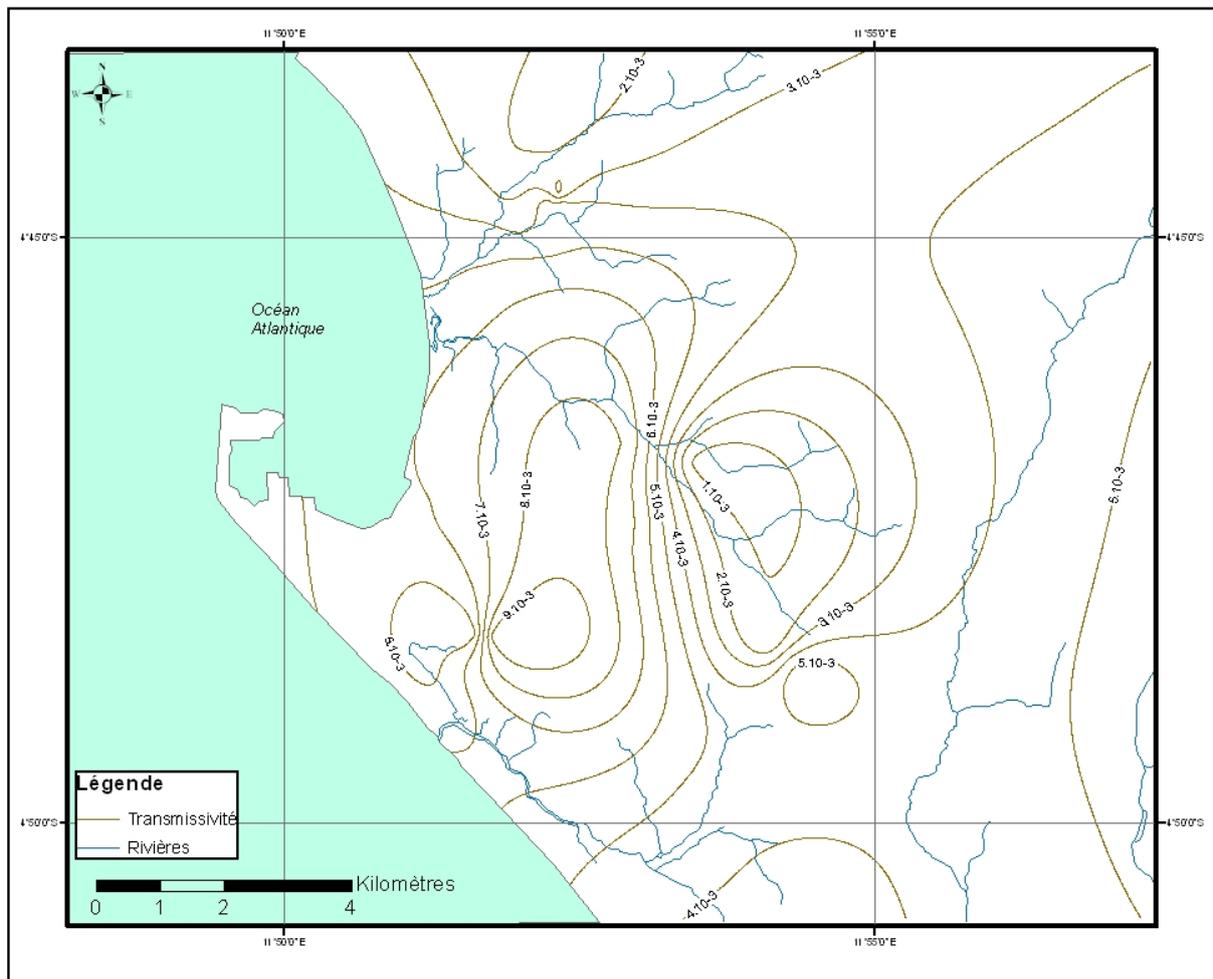


Figure 2.13: Distribution de la transmissivité

Tout juste à côté de la zone de forte transmissivité, une zone à transmissivité faible se présente également formant une vaste dépression qui s'intercale entre les zones est et ouest du domaine transmissif.

2.3.4.3 Données de coefficients d'emmagasinement

Les valeurs d'emmagasinement sont déterminées à partir de la quantité d'eau libérée pour une perte de charge donnée, c'est-à-dire une baisse de pression. Dans l'aquifère AQ-2, la perte, ou le gain, d'une certaine quantité d'eau se traduit par une variation de la charge hydraulique.

Les valeurs sont toutes très faibles (en moyenne autour de 10^{-4}) et mettent en évidence le caractère captif de l'aquifère du bassin sédimentaire de la région de Pointe-Noire. L'emmagasinement diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la frange côtière (Fig.2.14)

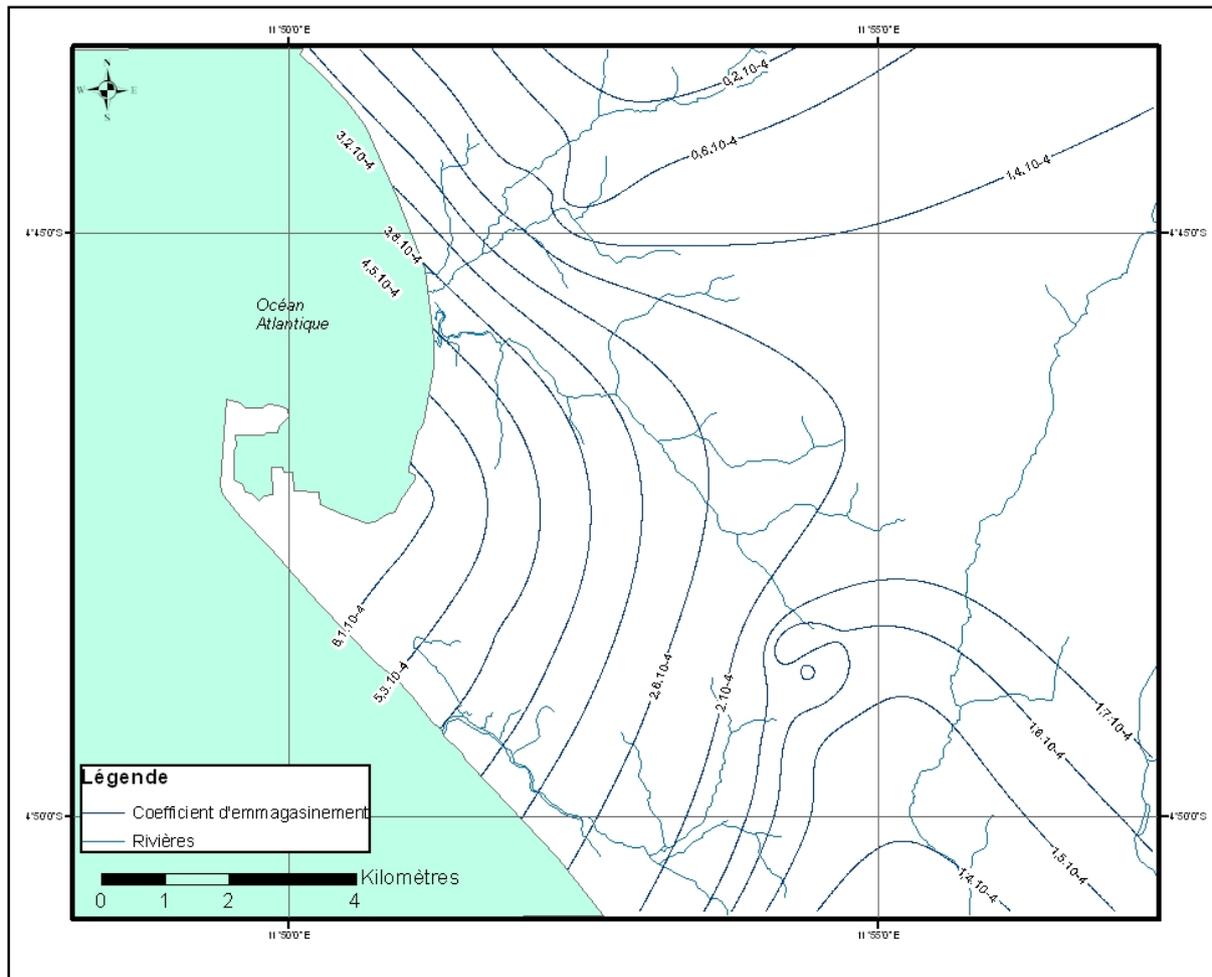


Figure 2.14: Coefficient d'emmagasinement

2.3.5 Données hydrogéologiques

2.3.5.1 Données piézométriques

La variation temporelle du niveau piézométrique de la nappe de l'AQ-2 a été mesurée d'une manière discontinue depuis les années 86. Nous avons effectué une campagne de mesure dans cette région en 2009. Le niveau de l'eau dans les piézomètres couvrant toute la région, a été mesuré à la sonde électrique par rapport à la surface du sol. Les résultats de cette campagne a ont permis de compléter les quelques mesures antérieures.

Avant toute interprétation, nous nous sommes assurés de la qualité des données par une critique de celles-ci et l'élimination des données aberrantes.

Il faut noter que d'une façon générale, la collecte des données est à la base de la connaissance et d'une bonne gestion des ressources en eau. Or cette étape importante, qui précède le stockage, le traitement et la diffusion des données, ne semble pas être facile à maîtriser.

La zone, objet de la présente étude, est la plus dotée en infrastructures de suivi quantitatif de la ressource en république du Congo. La figure ci-dessous (Fig.2.15) indique les différents points de mesure de la nappe profonde AQ-2.

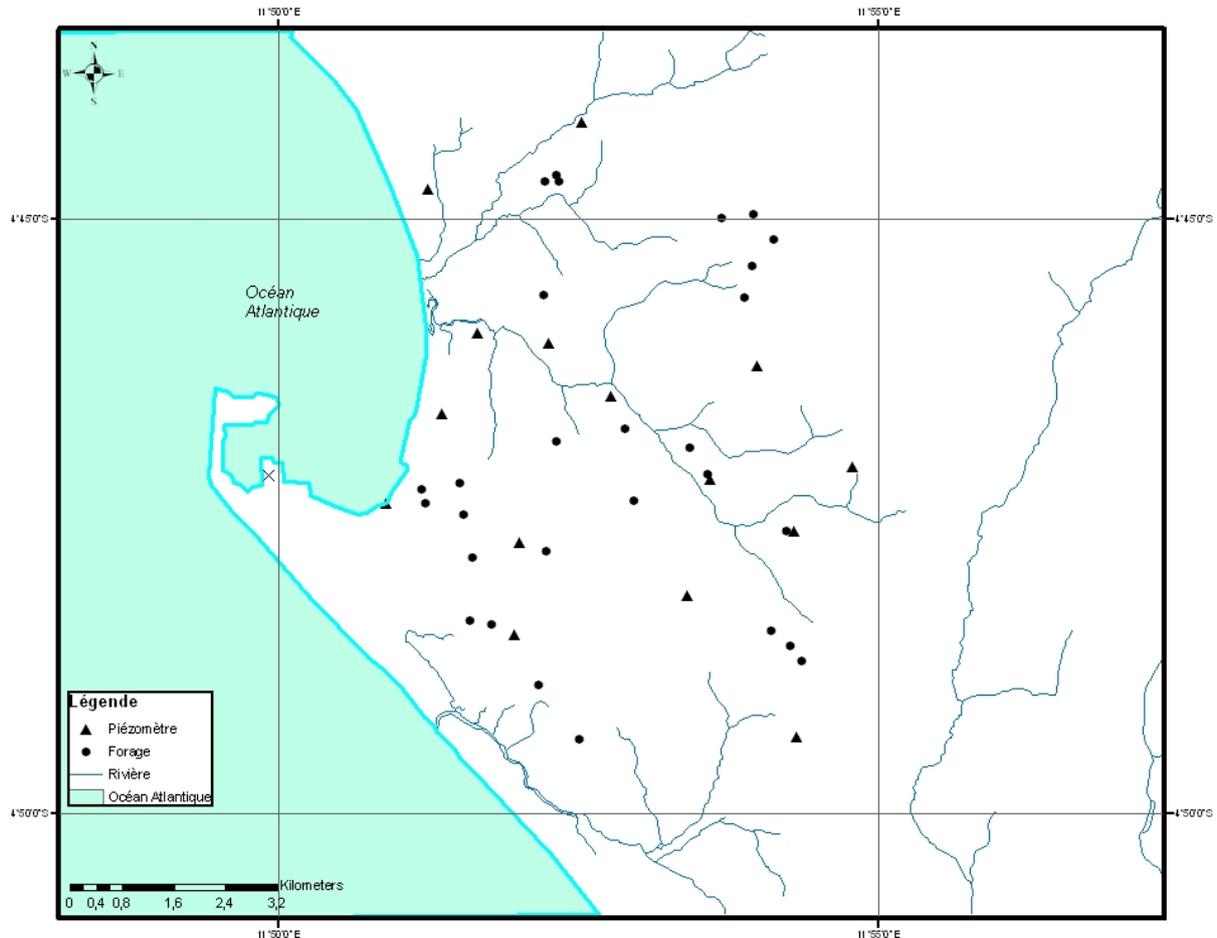


Figure 2.15: Emplacement des points de mesure (forages et piézomètres) dans la région de Pointe-Noire

Connaissant la côte topographique de chaque ouvrage, il a été possible de déduire la charge piézométrique de tous les points de mesure et ainsi procéder à l'analyse morphologique de la surface piézométrique dans le temps et dans l'espace.

2.3.5.2 Variations spatio-temporelle de la piézométrie

L'interprétation des variations du niveau des nappes peut donner accès à des paramètres se rapportant à des phénomènes non seulement de courte période, mais aussi de grande période, pouvant dépasser l'année [29, 30].

Ainsi l'interprétation de leur comportement sous l'effet des phénomènes variés qu'elles subissent, mène à de nombreuses applications pratiques [29], notamment :

- la prévision de l'évolution naturelle du niveau d'une nappe,
- la mesure de l'alimentation des nappes par les pluies,
- la mesure des caractéristiques hydrauliques des nappes, telles que le coefficient de tarissement, fonction de T/S,
- la mesure de la compressibilité de l'aquifère et surtout du coefficient d'emmagasinement « S ».

L'étude de la cartographie de l'aquifère permet de considérer à présent la surface piézométrique de l'aquifère de Pointe-Noire. Cette carte présente la morphologie qui lui est propre, comparable à celle d'une surface topographique : dépression, ondulation, ruptures des pentes, accidents, ...

Ce travail fondamental permet de représenter la configuration, la structure et de schématiser les fonctions du réservoir et le comportement hydrodynamique de l'aquifère. Ceci pour définir en première approximation le système aquifère en fonction des conditions géologiques et d'avoir une première estimation de son mode d'alimentation, du sens d'écoulement.

L'approche se base ainsi sur la reconstitution historique des charges piézométriques des forages et piézomètres de différentes compagnes de mesures de la région de Pointe-Noire. Ainsi, afin de dresser un portrait de l'aquifère AQ-2, les profondeurs et les élévations des niveaux statiques et dynamiques de l'eau souterraine ont été mesurées (*cf. annexe 1*). Le niveau statique correspond aux mesures prises dans les forages piézométriques non exploités et permet de faire ressortir les grandes directions d'écoulements. Le niveau dynamique correspond à des mesures prises dans des forages en exploitation et permet de faire ressortir l'impact de l'exploitation des forages. Il est à noter que la piézométrie n'est présentée qu'à titre indicatif compte tenu des différentes dates de mesures, du faible nombre de puits d'observation à certains endroits et de la possibilité que certains forages, inclus au lever, captent en fait l'aquifère AQ-3.

Pour remédier à cela, nous prenons comme hypothèse l'ensemble des formations aquifères comme constituant un ensemble communicant unique, pour lequel nous allons tenter d'identifier les déterminants hydrodynamiques de la circulation générale en nous fondant sur la piézométrie. Nous disposons pour ce faire de toutes les valeurs de niveaux piézométriques relevées lors d'investigations menées sur l'ensemble des documents existants pour le bassin sédimentaire de la région de Pointe-Noire. Et aussi, nous disposons de la sorte, toutes formations confondues et toutes dates confondues, de 41 valeurs de niveaux piézométriques, couvrant un territoire d'environ 13 000 km².

Ce tracé de la carte piézométrique régionale permet de mettre en évidence et d'attribuer des limites de nature hydraulique à un système aquifère dont on puisse envisager une représentation cohérente.

Ici, nous représentons les cartes de la piézométrie observée en 1986 (année de référence avant l'intensification de l'exploitation de la nappe dans l'agglomération), puis la piézométrie de 2009 (une des années de la période de la surexploitation) de la nappe AQ-2.

La carte piézométrique de 1986 (*Fig.2.16*) présente une unité hydrogéologique presque homogène, caractérisée par un écoulement général de l'est vers l'ouest.

Dans la région de Pointe-Noire, l'évolution piézométrique présente des variations faibles entre 0,1 et 3 m/an en baisse et en remontée selon la période et le piézomètre (voir annexe 1).

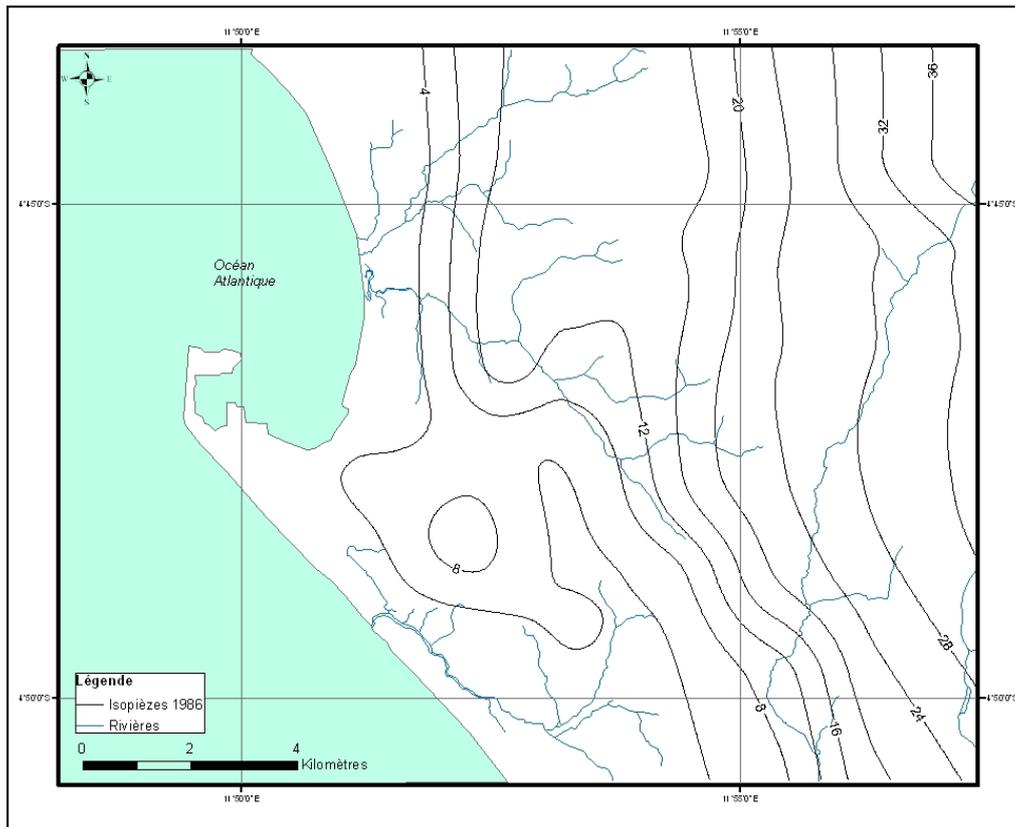


Figure 2.16: Carte piézométrique en 1986

La carte piézométrique (*Fig.2.17*) tracée en utilisant les données récoltées en 2009 dans les forages et piézomètres, présente une synthèse essentielle de l'étude hydrogéologique, schématise la fonction conduite du réservoir et le comportement hydrodynamique de l'AQ-2 avec figuration des conditions aux limites. Celle-ci représente la distribution spatiale des charges et des potentiels hydrauliques de l'AQ-2.

L'allure des courbes piézométriques offre par ailleurs de bonnes indications pour l'identification des zones d'alimentation et des axes d'écoulement. Parmi ces derniers, on peut généralement identifier est-ouest et nord est-sud ouest.

Quant aux aires principales d'alimentation de la nappe, elles semblent en première lecture, être constituées essentiellement par les affleurements est des plateaux de Hinda (courbes isopièzes 25 m et 30 m), qui expliquent aisément une mise en charge vers l'est.

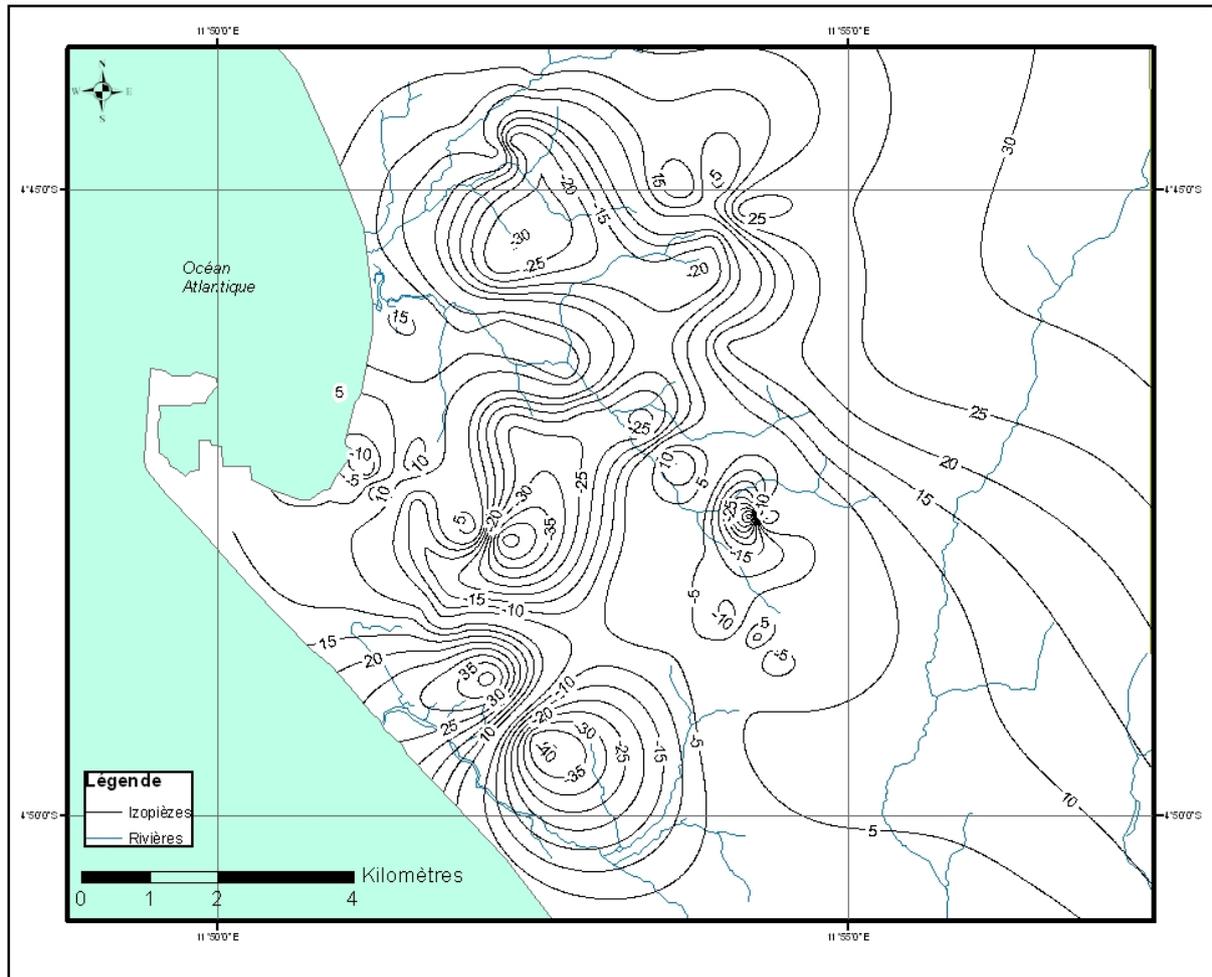


Figure 2.17 : Piézométrie de l'AQ-2 (2009) à Pointe-Noire

2.3.5.3 Analyse morphologique de la surface piézométrique de l'aquifère AQ-2

L'analyse morphologique de cette carte permet d'identifier deux zones hydrologiques liées à la topographie et/ou au relief de la zone d'étude :

- une zone de la plaine littorale caractérisée par des courbes fermées ;
- et une zone des plateaux caractérisée par des courbes parallèle au talus.

La zone de la frange littorale présente des courbes fermées qui traduisent des protubérances et une forte profondeur de la surface piézométrique. Le gradient hydraulique de 0,03 est l'expression d'un débit d'écoulement important et d'une perméabilité moyenne qui traduit un drainage plus faible que l'alimentation. Cette structure hydrogéologique indique deux types de nappes : une nappe à filets divergents au sud ouest et une nappe à filets convergents dans le reste de la frange côtière traduisant une surexploitation.

La zone du plateau présente des caractéristiques nettement différentes, le relief est accentué et augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'océan. Les courbes isopièzes sensiblement parallèles au talus et à la côte océanique montrent la présence une nappe à filets divergents. Cette surface piézométrique traduit un type de structure hydrogéologique appelée seuil hydraulique traduisant ainsi une chute de la surface piézométrique et du gradient hydraulique (0,005 et 0,006) qui peut s'expliquer par des variations de débit ou de perméabilité. Cette

zone présente aussi un cône de dépression vers le nord caractérisée par l'existence des courbes incurvées.

En somme l'aquifère AQ-2 présente une structure élémentaire ne traduisant pas sa morphologie. Celui-ci traduit soit un fort débit, soit un faible coefficient de perméabilité, soit la convergence de ces deux caractères, soit inversement. Cette morphologie est imposée par deux phénomènes, d'une part l'apport d'eau du plateau de Hinda et d'autre part, le drainage général axial souligné par la présence des faciès semi-perméables

Conclusion partielle

Dans la région de Pointe-Noire, différents aquifères sont bien individualisés mais le plus productif, et de ce fait le plus exploité, reste celui de l'AQ-2 bien que ce dernier possède des zones de productivité variable. L'AQ-2 est un aquifère largement exploité qui combine fréquemment les caractéristiques hydrodynamiques d'un milieu sédimentaire à fortes vitesses de transfert.

Cet aquifère, avec une porosité totale élevée de l'ordre de 20 % et une transmissivité moyenne de $5,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [2], constitue un matériau complexe et présente la spécificité d'avoir une porosité matricielle, lui permettant de libérer une quantité importante d'eau. La nappe de notre zone d'étude a des coefficients d'emménagement, de $4,2 \cdot 10^{-5}$ à $5,1 \cdot 10^{-4}$ en nappe captive. Dans la région de Pointe-Noire, l'aquifère AQ-2 est en régime captif parfois jaillissant dans certains endroits. Alimentée surtout par les eaux de pluie dans tout le domaine des affleurements en amont, cette nappe est drainée en amont par le réseau de cours d'eau auxquels elle apporte l'essentiel de son débit exceptionnellement régulier. Elle est peu poreuse et peu perméable. En conséquence, l'emménagement et le transfert gravitaire d'eau ne sont possibles que grâce à l'existence des zones de drainance, suffisamment denses et interconnectées avec d'autres aquifères exploitables. Cependant, dans une région, où ces conditions ne sont pas réunies, les aquifères ont des variations de productivité très fortes : l'eau ne pouvant pas circuler au sein des blocs limités par les compartiments. Ainsi nous devons examiner le comportement hydrodynamique d'un tel aquifère qui est basé essentiellement sur sa structure et sa configuration.

Hydrochimie de la nappe profonde AQ-2 de Pointe-Noire

L'hydrochimie est utilisée comme outil de compréhension des circulations au sein de l'aquifère. L'étude de la répartition dans l'espace et de l'évolution dans le temps des concentrations en ions majeurs et des isotopes du carbone complète et précise le schéma lithologique et celui des circulations [31].

Ce chapitre est consacré à l'étude hydrochimique par les ions majeurs de la campagne d'analyse effectuée. L'étude des principaux processus chimiques a permis de comprendre l'évolution statistique de la qualité de l'eau de l'aquifère l'AQ-2. Car l'eau est le facteur principal qui façonne les roches et transforme le paysage. Lors de son écoulement, elle dissout des minéraux, se sature et précipite d'autres minéraux. Par la suite, elle acquiert une qualité qui est le résultat de ses interactions avec la roche et de l'influence de facteurs externes naturels ou anthropiques [32].

L'eau joue donc deux rôles complémentaires [33] :

- 1- Réactif chimique qui dissout les minéraux et les matières organiques
- 2- Agent transporteur d'énergie et de matière.

Plusieurs facteurs peuvent intervenir dans l'acquisition la composition chimique de l'eau : dans le cas présent, l'étude a porté sur la comparaison de la composition chimique des eaux de l'ensemble des points d'eau de l'aquifère AQ-2 afin de rechercher les indices d'une éventuelle intrusion saline. Presque tous les forages de la zone d'étude ont fait l'objet de prélèvements réguliers chaque jour pendant deux mois en période de déficit pluviométrique. Les paramètres suivants ont été mesurés pour tous les prélèvements : alcalinité, dureté, conductivité, pH, température, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- .

Dans ce paragraphe, un aperçu global de la qualité chimique des eaux est donné.

3.1 Procédure expérimentale

Pour caractériser la composition chimique de la nappe AQ-2, 11 piézomètres de la Société Nationale de Distribution d'Eau (S.N.D.E) dont la localisation est donnée dans la figure 2.15 (cf. 2.3.5.1), ont été échantillonnés. L'échantillonnage a été effectué en saison sèche (juillet et août 2009). La caractérisation des eaux a porté essentiellement sur l'analyse des paramètres de base et des éléments « majeurs » qui sont: le pH, la température, la conductivité électrique (CE), les solides totaux dissous (TDS), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), le chlorure (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}), le bicarbonate (HCO_3^-), la dureté totale (TH) et le titre alcalimétrique complet (TAC). Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de capacité 1 litre, préalablement lavés à l'acide nitrique 1M et à l'eau distillée. Sur le site, les flacons ont été lavés trois fois avec l'eau à analyser puis transportés au laboratoire dans une glacière à la température de 4°C. La mesure du pH, de la conductivité électrique (CE) et des solides totaux dissous (TDS) a été faite sur le terrain à l'aide du multi paramètre Consort type C933. La détermination des concentrations en cations et anions majeurs a été faite selon les méthodes standardisées [34]. Le traitement

statistique des données a été fait avec le logiciel Statistica 7.1. La distribution spatiale des paramètres a été représentée à l'aide du logiciel Arc-Gis 8.2.

Cette analyse a pour objectif d'attester la potabilité et/ou l'agressivité de l'eau dans l'aquifère majeur de Pointe-Noire.

Le contrôle de la validité des résultats d'analyse chimique est fait à l'aide de la balance ionique (BI).

$$BI = \frac{(\sum A - \sum C)}{(\sum A + \sum C)} * 100, \text{ avec } -5 \leq BI \leq 5\%$$

avec : $\sum A$ = somme des anions en milliéquivalents par litre et $\sum C$ = somme des cations en milliéquivalents par litre

Au total 143 analyses sont disponibles et vis-à-vis de la balance ionique, la répartition révèle que près de 13% des analyses devraient théoriquement être déclarées « non recevables » (Tab.3.1).

Tableau 3.1 : Fiabilité des analyses des échantillons d'eaux de l'AQ-2 de Pointe-Noire

Points de mesure	Nombre d'analyse	BI recevable	BI non recevable
P1	13	12	1
P2	13	10	3
P4	13	12	1
P6	13	12	1
P7	13	10	3
P8	13	12	1
P10	13	11	2
P11	13	13	0
P13	13	10	3
P14	13	13	0
P15	13	9	4
Total	143	124	19

3.2. Statistiques des concentrations des paramètres de base et des ions majeurs

La composition chimique des échantillons d'eau prélevés au niveau des 11 piézomètres et les statistiques descriptives des paramètres étudiés sont présentées respectivement dans les tableaux 3.2 et 3.3.

Pour faciliter la comparaison et mieux interpréter les résultats obtenus, nous avons dans les mêmes tableaux, les différentes normes maximales de potabilité des eaux destinées à la consommation humaine selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

3.3 Compositions physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques analysés présentent, hormis la température et le pH, un coefficient de variation supérieur à 40 % caractérisant ainsi l'hétérogénéité des séries de données.

Comme le montrent les valeurs moyennes des caractéristiques physico-chimiques synthétisées dans le tableau 3.2 ainsi que la figure 3.1, il existe des contrastes relatifs entre les différents points de mesure. Seule la température et le pH ne semblent pas être des paramètres discriminants dans l'individualisation des points de mesure.

3.3.1 Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH caractérise la concentration d'une eau ou d'une solution aqueuse en ions hydronium (H_3O^+). Il est très dépendant des mécanismes chimiques. C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques dans les diagrammes Eh-pH.

Les valeurs du pH varient très peu à cause de la couverture sableuse ou argileuse qui l'isole de l'air et à cause de l'absence des autres apports acides ou alcalins [35].

Le pH des eaux naturelles est lié à la nature géologique des terrains traversés. Dans la région de Pointe-Noire, le pH des échantillons d'eau récoltés dans l'aquifère AQ-2 varie entre 5,9 et 7,2 avec une moyenne de 6,73. Les valeurs de pH des échantillons prélevés dans les piézomètres P4 (Loandjili) et P15 (Mpaka) sont inférieures à 6,5 qui est la valeur limite inférieure O.M.S [36] pour l'eau de boisson. Pour les échantillons d'eau des autres piézomètres, la valeur du pH est dans les limites acceptables pour l'eau de boisson (6,5 – 8,5) (Fig.3.1a). Ces eaux acides sont agressives ($0 < \text{pH} < 7$) et corrodent les parties métalliques des canalisations de distribution. Le risque sanitaire est alors fonction des métaux qui passent en solution dans l'eau (comme le plomb par exemple : risque de saturnisme hydrique).

3.3.2 Conductivité électrique

La conductivité représente la résistance qu'une eau oppose au passage d'un courant électrique. Elle est proportionnelle à la minéralisation de l'eau. Plus l'eau est riche en sels minéraux ionisés, plus la conductivité est élevée. La conductivité varie également en fonction de la température. La conductivité a, la plupart du temps, une origine naturelle due au lessivage des terrains lorsqu'il pleut. Ce lessivage entraîne naturellement la dissolution d'un certain nombre de sels minéraux. Elle peut également avoir pour origine l'activité humaine causée par les effluents agricoles, industriels ou domestiques qui contiennent des sels contribuant eux aussi à l'accroissement de la conductivité. Les eaux qui émergent du système aquifère présentent globalement une minéralisation importante. Cette conductivité est liée à la présence des espèces ioniques en solution. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 3.2 et représentés dans la figure 3.1b. La précision de mesures est de l'ordre de +/- 1%.

A partir de ce tableau, les valeurs de la conductivité électrique mesurées oscillent entre 27 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 685 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 225,75 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et montrent des contrastes entre les piézomètres. Les échantillons d'eau des piézomètres P15 et P11 ont respectivement la plus faible conductivité électrique et la plus élevée. Neuf des onze points mesurés, ont des valeurs inférieures à la norme de l'OMS (300 $\mu\text{S}/\text{cm}$), ce qui signifie que cette eau est faiblement minéralisée (conductivité < 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Elle peut entraîner une dissolution des métaux toxiques comme le plomb. Les piézomètres P7, P11 et P14, présentent des valeurs élevées qui varient autour de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ils sont vraisemblablement liés à la pollution.

Parmi les facteurs contrôlant la composition chimique des eaux souterraines, la nature pétrographique joue un rôle déterminant, soit directement comme source de minéraux mis en solution dans l'eau, soit indirectement en favorisant ou en limitant, selon la perméabilité, les écoulements.

Globalement, les formations renfermant des roches plus solubles (argilites et surtout carbonates et sablo-argileux) sont beaucoup plus minéralisées donc conductrices. En revanche les formations de notre aquifère sont sableuses et fournissent des eaux très peu minéralisées, donc à faible conductivité électrique, car ces roches réservoirs sont très peu solubles.

3.3.3 Solides totaux dissous (TDS)

Les solides totaux dissous de l'aquifère de la région de Pointe-Noire présentent des valeurs variant entre 41,16 mg/l et 229,1 mg/l (*Fig.3.1c*). La valeur moyenne des solides totaux dissous est de 104,84 mg/l. Les valeurs du TDS sont dans les limites acceptables de l'OMS pour l'eau de boisson car elles sont inférieures à 500 mg/l [36]. Les faibles valeurs de la conductivité électrique et des solides totaux dissous s'expliquent par la nature de l'aquifère qui est sablonneux.

3.3.4 Température

La température de l'eau est un élément essentiel dans le fonctionnement des systèmes aquifères. Elle varie en fonction de la température de l'air, des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau de l'eau par rapport à la surface du sol [37, 38]. Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique ou bactérienne et de l'évaporation des eaux.

Les températures de l'aquifère AQ-2 de la région de Pointe-Noire sont toutes supérieures aux normes de l'OMS (25°C), et varient peu dans l'espace (*Tab.3.2*). Ces températures des eaux dépendent des conditions d'écoulement et de la structure de l'aquifère. Les anomalies de températures observées sont contrôlées par les structures géologiques qui conditionnent la géométrie et le type de la circulation souterraine des eaux. Aussi, des variations de température peuvent correspondre à une circulation de l'eau relativement rapide par des réseaux de circulation.

Tous les points de mesure ont le même ordre de grandeur de température. Elle est de l'ordre de 26°C (*Fig.3.1a*). Les eaux des points de mesure ne sont pas trop influencées par les conditions atmosphériques, en effet, un écart faible de l'ordre de 0,37°C est observé entre les puits de mesure. La variance est faible (*Tab.3.3*).

Tableau 3.2 : Moyennes par point d'eau, des concentrations des analyses physico-chimiques de l'AQ-2 de Pointe-Noire

Code	Repère	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	TDS (mg/)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	TAC (mg/l CaCO ₃)	TH (mg/l CaCO ₃)
P1	Tchiali	6,8	69,6	41,16	26	6	3,6	0,94	2,2	2,5	8	28,06	23	29,81
P2	Coraf	6,7	68,4	43,12	26,2	6,2	3,48	1,45	2,41	1,9	8,61	30,02	24,61	29,81
P4	Loandjili	5,9	35,8	54,38	26,9	4,67	0,7	12,27	2,9	3,9	12	32,94	27	14,54
P6	Nkouikou	6,6	29,3	47,13	26,6	19,4	0,96	16,06	5	1,2	9,52	15,13	12,4	52,40
P7	Orstom	7	621	126,5	26,3	35,6	16,31	38,16	3,02	3,9	32	47,64	39,05	156,06
P8	Matende	6,6	29,7	53,21	26	11,9	0,96	2,67	3,6	1,7	6,87	28,06	23	33,67
P10	Voungou	7,2	30,2	229,1	26,8	49	60,48	159	7,1	1,4	16,9	22,31	18,29	371,41
P11	Cercle	7,2	685	140	26,8	38	17	35,52	3,7	4,9	35	61	50	164,89
P13	Mboukou	6,6	280,2	49,1	26,8	20,08	0,89	12,73	2,7	0,8	2,47	31,72	26	53,80
P14	Brasco	7	607	140,8	26,8	43	20	65,34	6,1	7,3	8	46,36	38	189,73
P15	Mpaka	6,4	27	228,9	26	42	60	135,9	5,6	5,7	18	48,8	40	351,95
Valeur guide OMS		6,5 - 8,5	300	500	25	75	30	200	-	250	150	300	-	300

Tableau 3.3 : Statistiques descriptives des paramètres chimiques majeurs pour la période 2009

Paramètre	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Variance
pH	5,90	7,20	6,73	0,38	0,14
CE(μ S/cm)	27,00	685,00	225,75	274,85	75544,19
TDS	41,16	229,10	104,85	73,04	5334,37
T($^{\circ}$ C)	26,00	26,90	26,47	0,37	0,14
Ca ²⁺ (mg/l)	4,67	49,00	25,08	16,81	282,52
Mg ²⁺ (mg/l)	0,70	60,48	16,76	22,69	515,05
Na ⁺ (mg/l)	0,94	159,00	43,64	55,11	3036,87
K ⁺ (mg/l)	2,20	7,10	4,03	1,66	2,74
Cl ⁻ (mg/l)	0,80	7,30	3,20	2,11	4,44
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	2,47	35,00	14,31	10,48	109,73
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	15,13	61,00	35,64	13,57	184,27
TAC(mg/l CaCO ₃)	12,40	50,00	29,21	11,13	123,80
TH(mg/l CaCO ₃)	14,54	371,41	131,64	129,42	16748,98

3.3.5 Magnésium Mg²⁺ et Calcium Ca²⁺

Les statistiques des concentrations des ions Mg²⁺ et Ca²⁺ varient respectivement 0,7 - 60,48 mg/l et 4,67 - 49 mg/l, dans l'eau du bassin sédimentaire côtier de Pointe-Noire. Les valeurs moyennes respectives en cations majeurs sont 16,76 mg/l et 25,08 mg/l. Les points de mesure P10 et P15 présentent des valeurs de Mg²⁺ supérieures à la norme, et les autres points de mesure ont des valeurs inférieures à la norme (30 mg/l) (*Fig.3.1e*).

Pour les ions Ca²⁺, on note une variabilité des valeurs dans le bassin sédimentaire de la région de Pointe-Noire. Les piézomètres P7, P10, P11, P13, P14 et P15 présentent des valeurs assez élevées, mais toujours inférieures à la norme (75 mg/l) (*Fig.3.1f*). Cette variation est due aux échanges de bases qui enrichissent les eaux de l'aquifère en alcalins dans le bassin différemment selon la géologie [39].

3.3.6 Sodium Na²⁺

La présence du sodium dans l'eau peut être d'origine anthropique ou d'origine naturelle dans le sol. Le sodium peut présenter des dangers d'encéphalopathie pour des personnes aux insuffisances rénales chroniques. Dans la région de Pointe-Noire, les résultats montrent qu'il existe des grandes variabilités des valeurs de concentration des ions de sodium dans l'eau, (comprises entre 0,95-159,00 mg/l). Il est à noter que les normes de la présence de sodium dans les eaux sont minimales (< 200 mg/l). Les points de mesures P10 et P15 ont atteint un premier niveau d'alerte (respectivement 150 et 139 mg/l) (*Fig.3.1g*). Mais ces piézomètres sont situés loin de la côte océane.

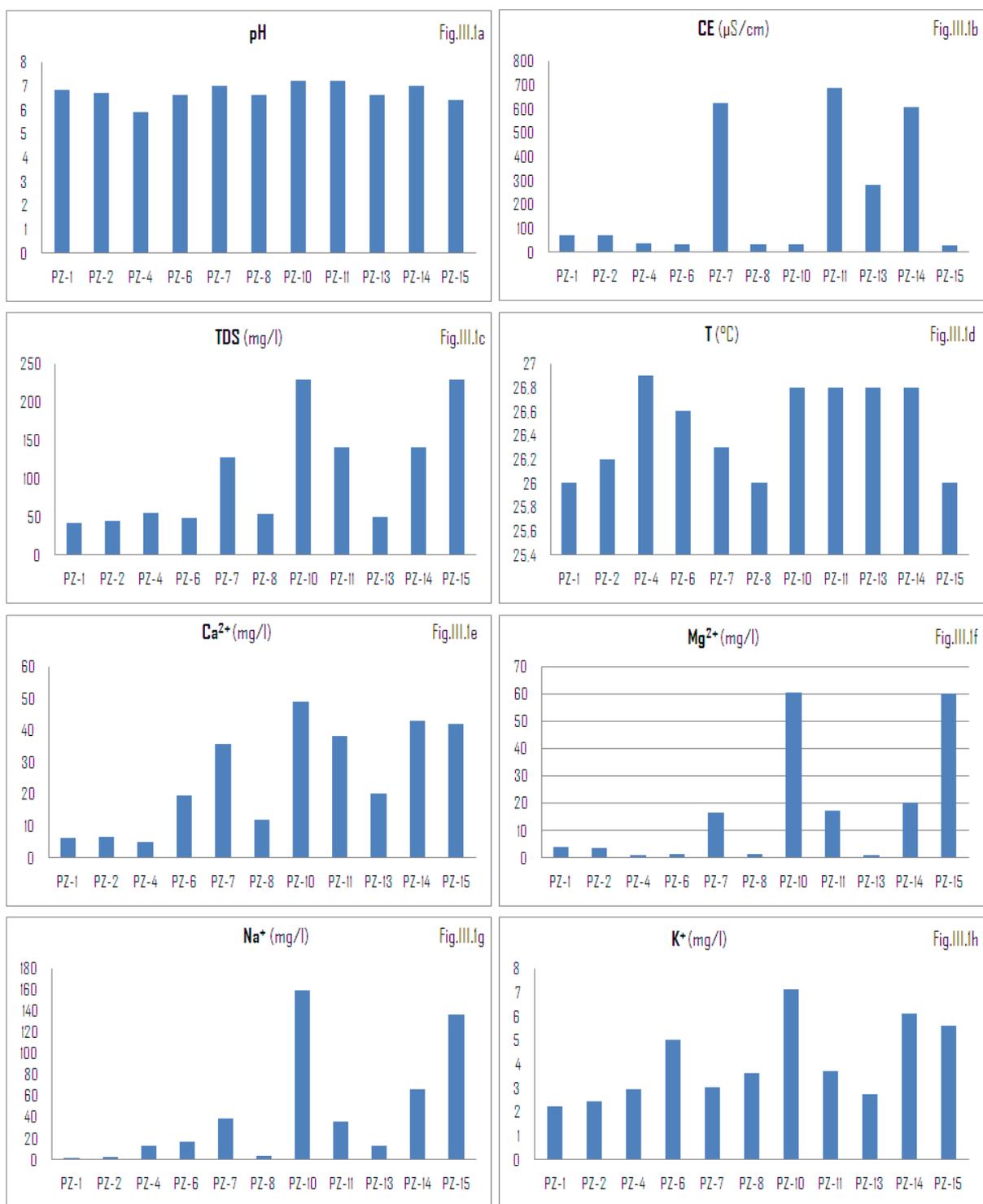


Figure 3.1 : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des eaux souterraines de la nappe de l'aquifère AQ-2

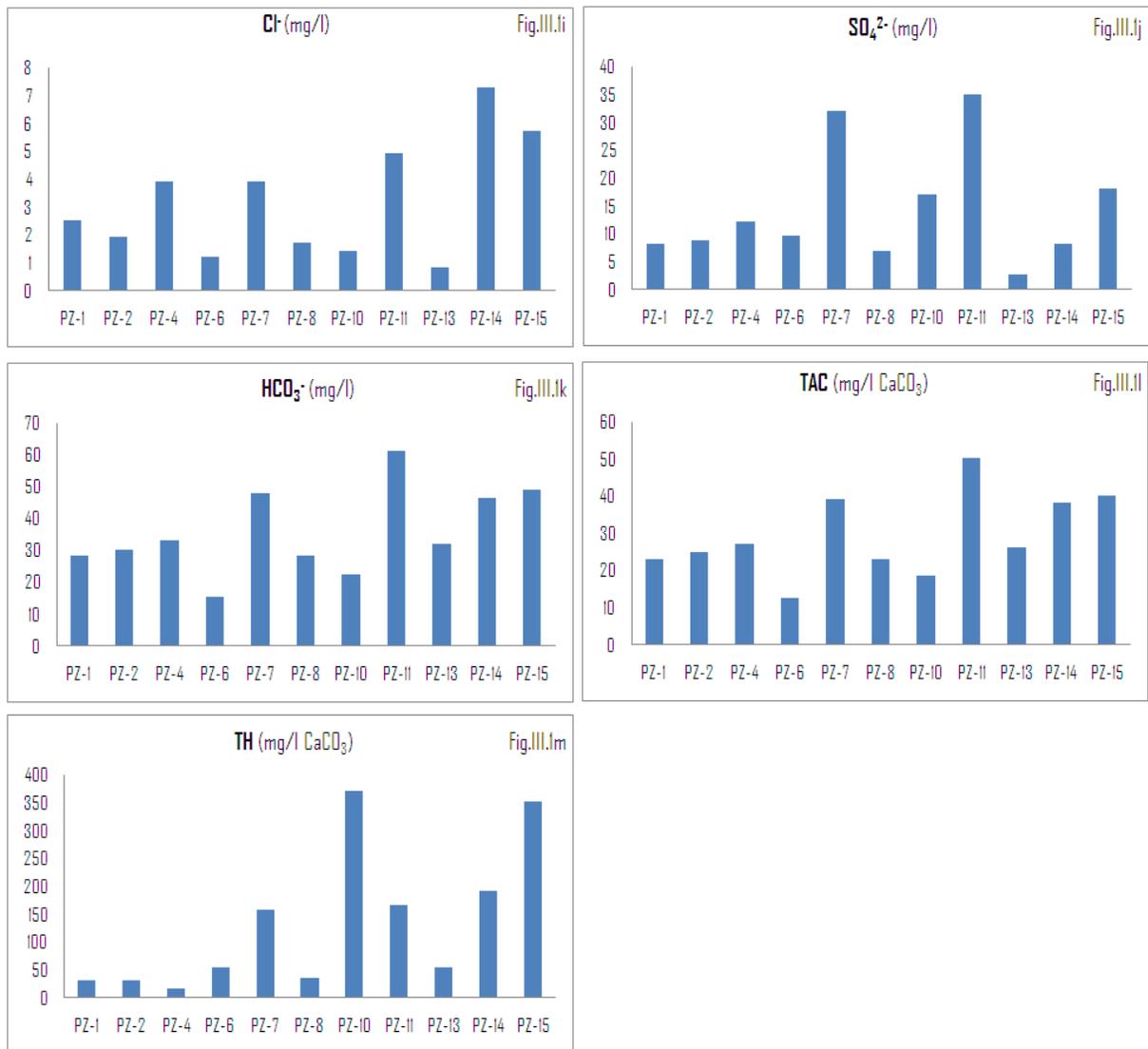


Figure 3.1 (suite) : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des eaux souterraines de la nappe de l'aquifère AQ-2

3.3.7 Potassium K⁺

Les statistiques des concentrations en potassium d'un point de mesure à l'autre sont variables (comprise entre 2,20 et 7,10 mg/l). La moyenne n'est pas significative (4,03 mg/l) avec des écarts de 1,66 mg/l et une variance de 2,74. Dans tous les points de mesure les valeurs observées sont inférieures à la norme 10 mg.l⁻¹(Fig.3.1h). Cette variation statistique des valeurs dans l'ensemble du bassin, serait liée aux échanges de bases avec les argiles.

Ces réactions d'échanges seraient donc prépondérantes par rapport aux dissolutions de calcite, de dolomite et de gypse. En effet, la saturation vis-à-vis de la calcite est quasi généralisée ; quand l'eau est en contact avec du gypse, la saturation est très vite atteinte ; compte tenu des circulations lentes dans l'aquifère, l'équilibre vis-à-vis de la dolomite est obtenu près des zones de recharge.

3.3.8 Chlorure Cl⁻

Constituants naturels de la croûte terrestre, les ions chlorures sont présents dans toutes les eaux à des concentrations différentes et sous forme de sels : chlorure de sodium NaCl, chlorure de potassium KCl ou chlorure de calcium CaCl₂ introduits par des apports naturels ou d'origine humaine.

Les analyses des eaux échantillonnées dans la région de Pointe-Noire montrent les valeurs des ions chlorures inférieures ou égales à la référence de la qualité (5 mg/l). Ces valeurs varient entre 0,80 et 7,30 mg/l. Les piézomètres P11, P14 et P15 proches de la côte présente un taux de concentration de chlorure élevé respectivement à 4,9 ; 7,3 et 5,7 mg/l (*Fig.3.1i*).

Le chlore n'est pas dangereux pour l'homme, mais la chloration permet d'obtenir une eau exemptée de virus à partir d'une eau polluée par des organismes fécaux lorsque sa concentration est maintenue aux normes.

3.3.9 Sulfates SO₄²⁻

Les sulfates présents naturellement dans les eaux (concentration inférieure à 1 g/l) peuvent se lier avec de nombreux cations (calcium, magnésium, sodium, plomb, baryum, strontium, aluminium...). L'origine de ces sulfates peut également être humaine : pollution d'industries papetières, textiles, minières ou traitement pour la potabilisation de l'eau (sulfates d'aluminium et de fer utilisés pour la floculation).

Comme pour les chlorures, les valeurs maximale ou minimale ne dépassent pas la norme de la potabilité de l'eau. Les distributions sont étendues entre 2,47 et 35,00 mg/l (*Fig.3.1j*) et leur écart type est égal à 10,48 avec une variance de 109,73.

3.3.10 Bicarbonate HCO₃⁻

Les valeurs de bicarbonate dans la zone d'étude sont dissymétriques avec le pH. Les moyennes et médianes ne sont pas significatives. Ce pourrait être une marque de la chimie des eaux en milieu sédimentaire. En effet, les eaux étant saturées ou sursaturées vis-à-vis de la calcite, une diminution de pH entraîne une augmentation en bicarbonate. Dans notre zone d'étude, les zones de pH faible présentent une concentration de bicarbonate faible ; c'est le cas des piézomètres P4 et P15 (*Fig.3.1k*). Les zones à pH neutre présentent des fortes valeurs de bicarbonate.

3.3.11 Titre alcalimétrique Complet (TAC) et Dureté totale (TH)

Le comportement d'une eau dépend du fait qu'elle est ou non à l'équilibre. Pour éviter les problèmes d'entartrage et d'agressivité, l'eau doit être la plus proche possible de l'équilibre calco-carbonique (bicarbonate de calcium Ca(HCO₃)₂, dioxyde de carbone (CO₂) libre et carbonate de calcium (CaCO₃)).

Pour évaluer l'équilibre calco-carbonique, le TAC et la TH ont été mesurés dans tous nos échantillons et les résultats sont résumés ci-dessus dans le tableau III.2 et représentés respectivement dans les figures 3.11 et 3.1m. Le titre alcalimétrique complet (TAC) dû essentiellement aux ions bicarbonates (HCO₃⁻) varie entre 12,4 et 50 mg/l CaCO₃. Quant à la dureté totale (TH) due aux ions Ca²⁺ et Mg²⁺, elle varie entre 14,54 et 371,41 mg/l CaCO₃ avec

une valeur moyenne de 131,64 mg/l CaCO₃. Les valeurs faibles de la dureté totale (TH) ainsi que celles des solides totaux dissous permettent de classer les eaux de l'aquifère AQ-2 comme étant douces.

En conclusion, les concentrations en cations et anions majeurs sont tous dans les limites acceptables pour l'eau de boisson. La composition relative à un cation ou anion est exprimée en pourcentage de meq/l du total des cations ou des anions (Fig.3.2). L'ordre de prédominance des cations et anions exprimé en pourcentage de meq/l, basé sur la moyenne calculée à l'ensemble des forages, est respectivement : Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺ ; HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ [39, 40]. De la figure 3.2, on remarque un excès des cations Ca²⁺ + Mg²⁺ par rapport aux cations Na⁺ + K⁺.

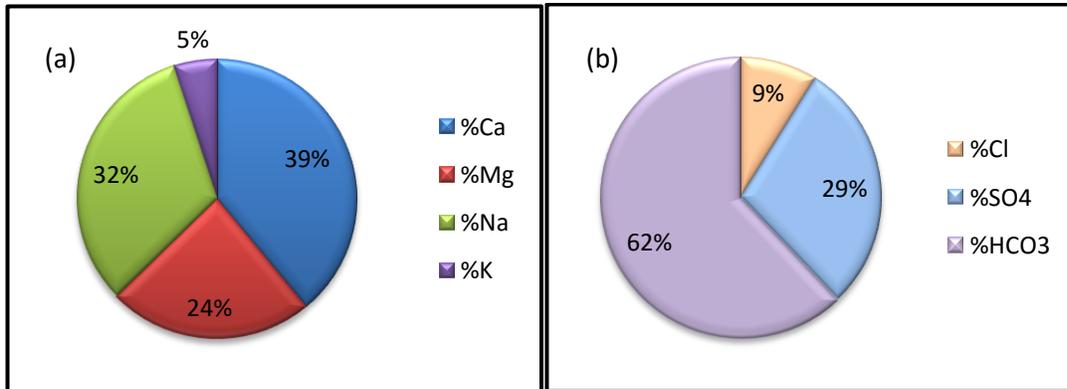


Figure 3.2 : Composition moyenne en % meq/l des cations (a) et anions (b) majeurs des eaux de l'AQ-2

3.4 Evolution géochimique des eaux

L'évolution géochimique des eaux de la nappe peut être comprise en traçant le diagramme de Piper avec le logiciel AqQA software (Fig.3.3). Dans le diagramme des cations, on observe des piézomètres au milieu du triangle ne présentant pas de dominance (P1, P2, P7, P10, P11, P14 et P15). Par contre le piézomètre P4 présente une dominance en Na⁺, les piézomètres P6, P8 et P13 présentant une dominance en Ca²⁺. Dans le diagramme des anions, tous les piézomètres sont proches du pôle bicarbonaté sauf P10 qui ne présente pas de dominance. Les échantillons d'eau analysés sont repartis dans les zones de faciès chimiques suivants : mélange cations HCO₃ (Ca-Na-HCO₃, Na-Ca-HCO₃, Na-Mg-HCO₃) représentant 36,37% du total des piézomètres, Ca-HCO₃ (27,27%), Ca-Mg-HCO₃ (18,18%), Na-HCO₃ et Na-Mg-HCO₃-SO₄ représentant chacun 9,09% des piézomètres (Tab.3.4). L'influence des eaux météoriques est nette dans la nappe étudiée [39].

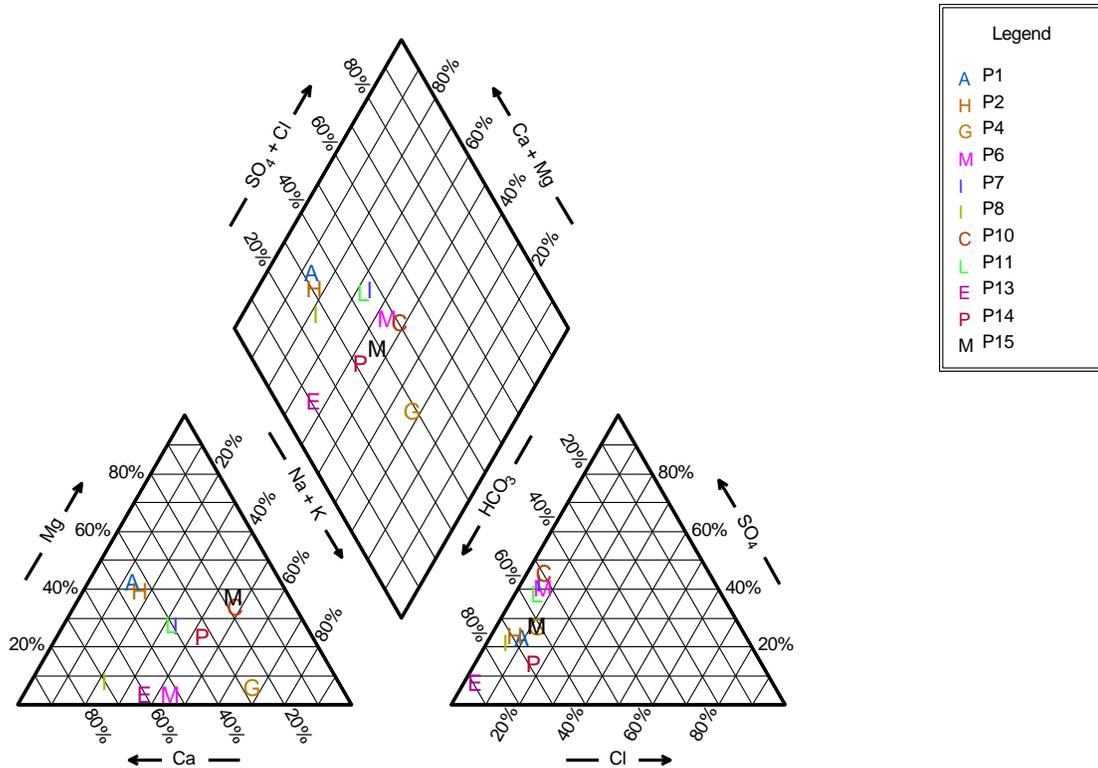


Figure 3.3: Diagramme de Piper des échantillons d’eaux de l’aquifère AQ-2

3.5 Temps de séjour des eaux

Il existe plusieurs méthodes de datation des eaux ; parmi lesquelles on peut citer :

- La méthode de datation des eaux par le carbone-14 qui consiste- à évaluer le temps de séjour moyen des eaux souterraines jusqu’à 30000 ans [41] par l’activité résiduelle en carbone-14 du carbone minéral total dissous (CMTD). Ce principe du calcul des âges radiocarbone est fondé sur la relation de décroissance radioactive ;
- la méthode de calcul des indicateurs de temps de séjour des eaux.

Le manque de données isotopiques dans le bassin incite à utiliser une méthode de calcul de l’indice du temps de séjour i . L’étude des concentrations en ions majeurs a montré que le rapport Mg/Ca et la somme Na+K augmentent avec le temps de séjour. On définit donc l’indice i par la relation suivante :

$$i = \frac{Mg^{2+} \times (Na^{+} + K^{+})}{(Ca^{2+})^2}$$

où les concentrations sont exprimées en milliéquivalents par litre.

i est donc bien d’autant plus grand que le temps de séjour est long. Cet indice de temps de séjour est qualitatif mais présente l’avantage d’être connu à travers tout le bassin à partir des données utilisées. Ainsi la carte des iso-valeurs de i (Fig. III.4), est obtenue par la méthode de Shepard modifiée.

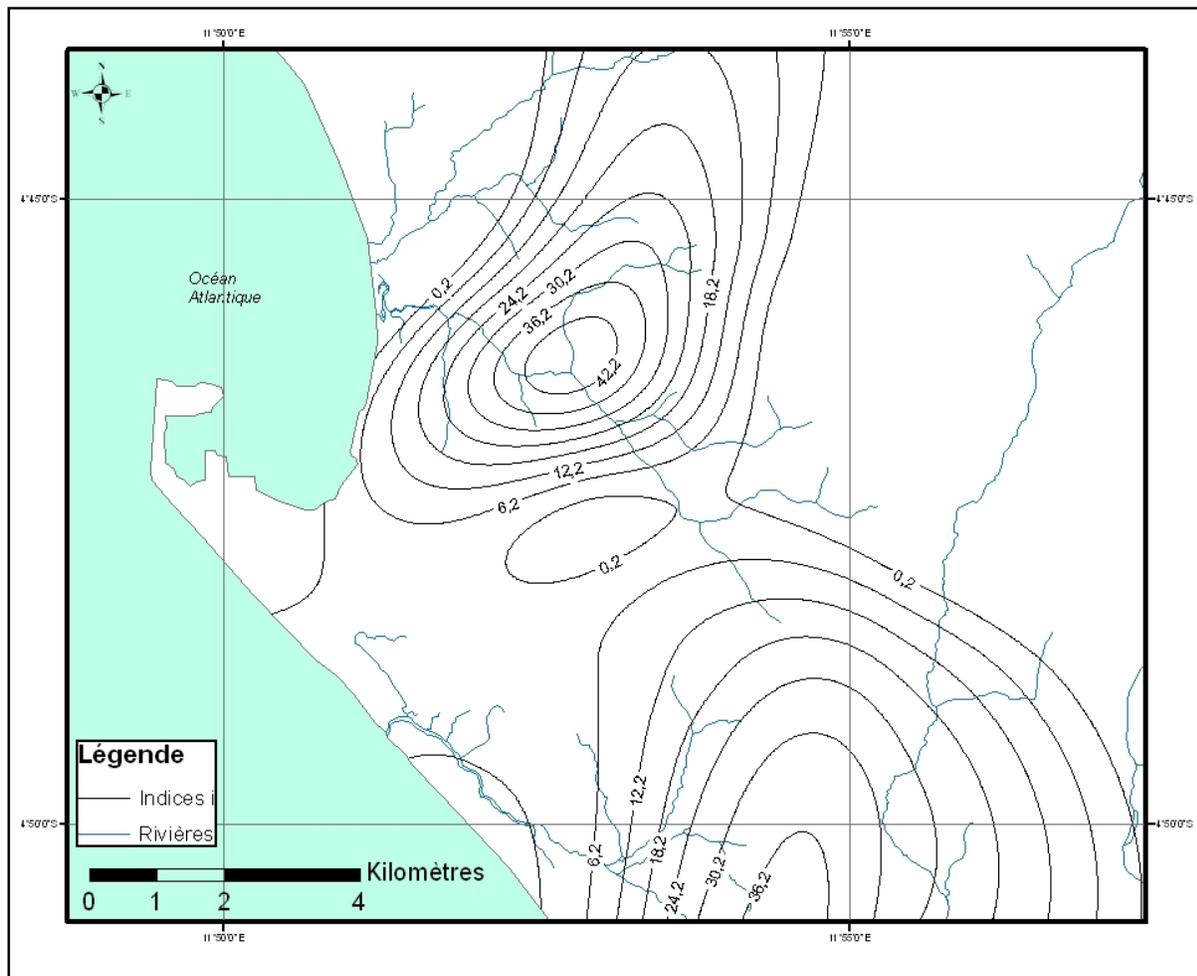


Figure 3.4: Indices i dans la région de Pointe-Noire

3.6 L'origine de la minéralisation de l'eau

Le calcul de rapports entre des éléments chimiques permet de mettre en évidence le mélange d'eaux d'origine différente. Plusieurs études [42, 43, 44, 45] donnent des exemples d'utilisation de rapports pour identifier l'origine de la salinisation de l'eau tels que Cl^-/Br^- , Na^+/Cl^- , Na^+/K^+ , Ca^{2+}/Mg^{2+} , SO_4^{2-}/Cl^- ... Ces rapports peuvent également être représentés sous forme de graphiques d'un élément par rapport à l'autre. Lorsque le mélange est consécutif, les eaux du mélange se répartissent graphiquement le long d'une droite reliant les deux eaux originelles. Les points s'écartant de la droite indiquent alors une origine différente ou multiple, voire dans un certain cas ils font ressortir des erreurs d'analyses.

L'hydrochimie de la nappe est aussi caractérisée par différents rapports ioniques (*Tab.3.4*). Le rapport Ca/Mg est caractéristique du parcours des eaux souterraines, variant entre 0,42 et 13,54. Les plus fortes valeurs sont observées dans les eaux des piézomètres P6, P8 et P13. Ceci pourrait s'expliquer par un temps de résidence plus important au niveau de ces piézomètres [39].

Tableau 3.4 : Rapports ioniques et Faciès chimiques des échantillons d'eaux

Code	Localisation	Ca/Mg	Na/Ca	Na/K	Na/Na+Cl	Na/Cl	Faciès chimiques
P1	Tchiali	1,00	0,14	0,72	1,07	0,58	Ca-Mg-HCO ₃
P2	Coraf	1,07	0,20	1,02	1,05	1,18	Ca-Mg-HCO ₃
P4	Loandjili	4,00	2,28	7,17	1,11	4,86	Na-HCO ₃
P6	Nkouikou	12,13	0,72	5,45	1,03	20,66	Ca-HCO ₃
P7	Orstom	1,31	0,93	21,43	1,11	15,10	Ca-Na-HCO ₃
P8	Matende	7,44	0,20	1,26	1,05	2,42	Ca-HCO ₃
P10	Voungou	0,49	2,82	37,98	1,04	175,33	Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄
P11	Cercle	1,34	0,81	16,28	1,14	11,19	Ca-Na-HCO ₃
P13	Mboukou	13,54	0,55	7,99	1,02	24,56	Ca-HCO ₃
P14	Brasco	1,29	1,32	18,16	1,21	13,82	Na-Ca-HCO ₃
P15	Mpaka	0,42	2,81	41,14	1,16	36,79	Na-Mg-HCO ₃

Le rapport Na/Ca varie entre 0,14 et 2,82. Pour des valeurs inférieures à 0,80, l'appauvrissement en sodium des eaux de la nappe étudiée est très caractéristique. Le rapport Na/K est de l'ordre de 47 pour l'eau de mer et inférieur à 10 pour l'eau de pluie [46]. Ce rapport scinde les eaux des piézomètres en trois groupes [39] :

- le premier groupe est constitué des piézomètres P1, P2, P4, P6, P8 et P13 avec un rapport Na/K inférieur à 10, ce qui montre l'influence des eaux de pluies. Les échantillons d'eau prélevés dans ces piézomètres ont les plus faibles valeurs du titre alcalimétrique complet (TAC) et de la dureté totale (TH) ;
- le deuxième groupe est formé par les piézomètres P7, P11 et P14 dont le rapport Na/K dans les échantillons d'eau est légèrement supérieur à celui de l'eau de pluie. Les valeurs du TAC et de TH sont supérieures à celles du premier groupe et inférieures à celles du troisième groupe ;
- le troisième groupe rassemble les piézomètres P10 et P15 dont le rapport Na/K est inférieur ou voisin à celui de l'eau de mer. Les valeurs du TAC et de TH sont les plus élevées dans la zone d'étude.

Le rapport Na/Na+Cl est supérieur à 1 dans tous les échantillons d'eaux analysés. Les valeurs supérieures à 0,5 de ce rapport traduisent le processus d'échange ionique entre Ca²⁺ et Na⁺ d'une part, et d'autre part entre Mg²⁺ et Na⁺. Ces échanges cationiques sont favorisés par la présence des minéraux argileux [47, 39]. Les ions majeurs pourraient provenir en grande partie de l'interaction eau/minéraux carbonatés et/ou de l'interaction eau/minéraux silicatés. Le rapport Na/Cl est compris entre 0,58 et 175,33. Dans le cas où le sodium proviendrait de la dissolution de l'halite, ce rapport devrait être égal à 1. Or il est supérieur à 1 dans 90,90% des échantillons d'eau, ce qui indique que la source principale du sodium est la dissolution des silicates [48, 39].

L'ion bicarbonate HCO₃⁻ est l'anion majeur qui prédomine dans ces eaux. La présence des minéraux carbonatés dans la zone de recharge et la dissolution chimique des silicates sont les

principaux facteurs qui favorisent l'augmentation de la concentration en ion bicarbonate dans les eaux souterraines de l'aquifère AQ-2 de la région de Pointe-Noire [39].

Les processus hydrochimiques qui contrôlent la composition chimique de la nappe, à savoir la dissolution des carbonates et silicates, les processus d'échanges ioniques entre cations ont été évalués à partir des relations entre cations et anions majeurs [49, 50, 51]. Ces relations sont illustrées sur des graphes dont la droite 1:1 permet de délimiter le domaine de dissolution des carbonates et de celui des silicates (*Fig.3.5 a, b*).

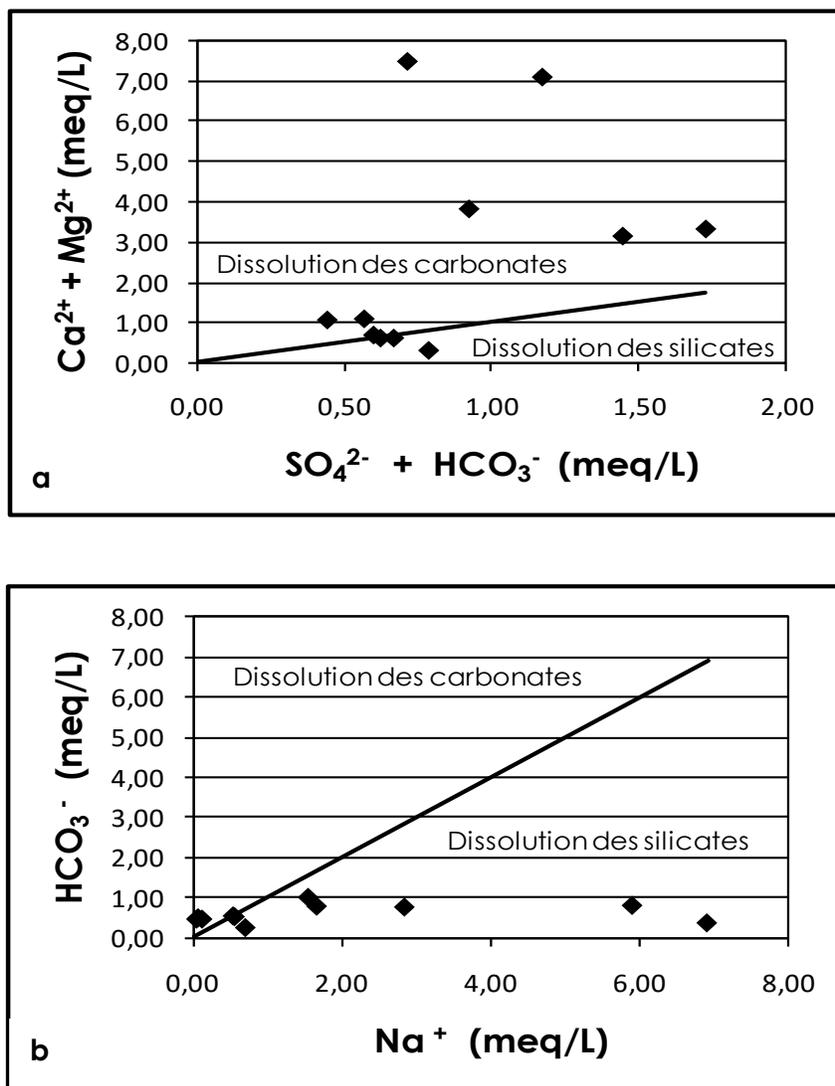
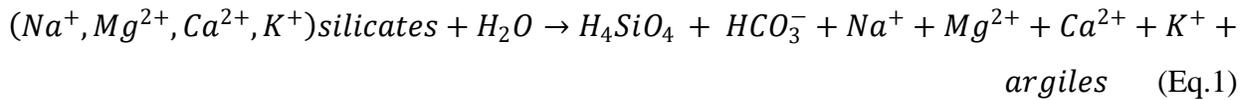


Figure 3.5 a, b : Relation entre $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ et $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$; HCO_3^- et Na^+

La figure 3.5a montre que la majorité des échantillons d'eaux se situe au-dessus de la droite 1:1, ceci indique que la dissolution des carbonates est le processus dominant qui fournit les ions calcium et magnésium dans la nappe. En plus de la dissolution des carbonates, la dissolution des silicates représentée par l'équation chimique (*Eq.3.1*) contribue aussi à augmenter la concentration en Ca^{2+} et Mg^{2+} .



La figure 3.5b montre que la dissolution des silicates est le processus qui contrôle la composition chimique de la nappe par rapport au sodium. La relation entre $(Na^+ + K^+)$ et $(Cl^- + SO_4^{2-})$ (Fig.3.6a) montre que Na^+ et K^+ présents dans la nappe ne proviennent pas des sels tels que l'halite ou le sulfate de sodium, ni du chlorure de potassium ou du sulfate de potassium. Ceci est aussi confirmé par la figure 3.6b qui montre le regroupement des piézomètres. La présence des carbonates, grès, dolomies, marnes signalés dans la litho-stratigraphie de Pointe-Noire (cf.1.2.1 et Fig.1.3) suggère que la dissolution de ces minéraux contribue de façon significative à l'augmentation de la concentration en ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ .

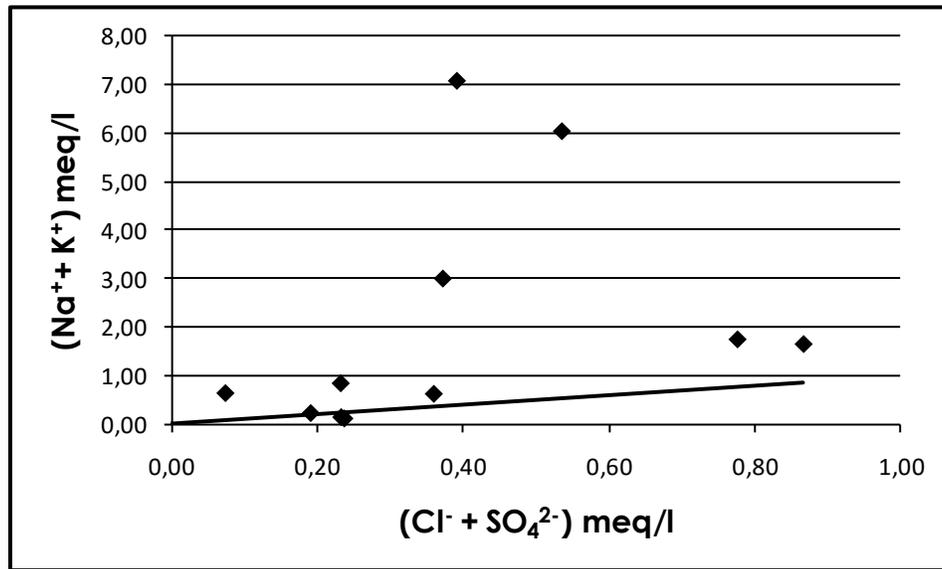


Figure 3.6a : Relation $Na^+ + K^+$ et $Cl^- + SO_4^{2-}$

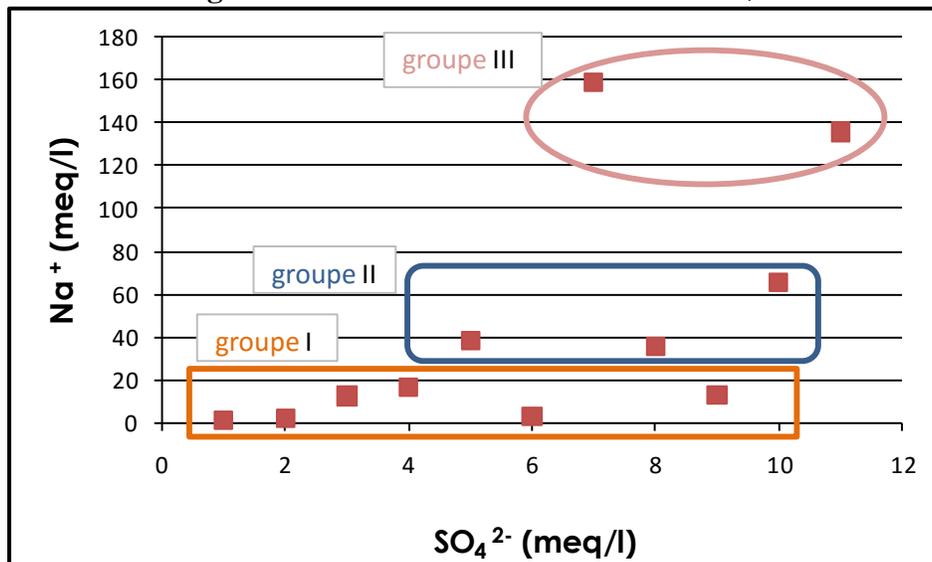


Figure 3.6b : Relation entre Na^+ et SO_4^{2-}

Le traitement statistique des données par classification ascendante hiérarchique a aussi permis de regrouper les piézomètres en trois classes. Ces classes ne sont autre que les trois regroupements obtenus à partir du rapport ionique Na/K dans les échantillons d'eau (Fig.3.7).

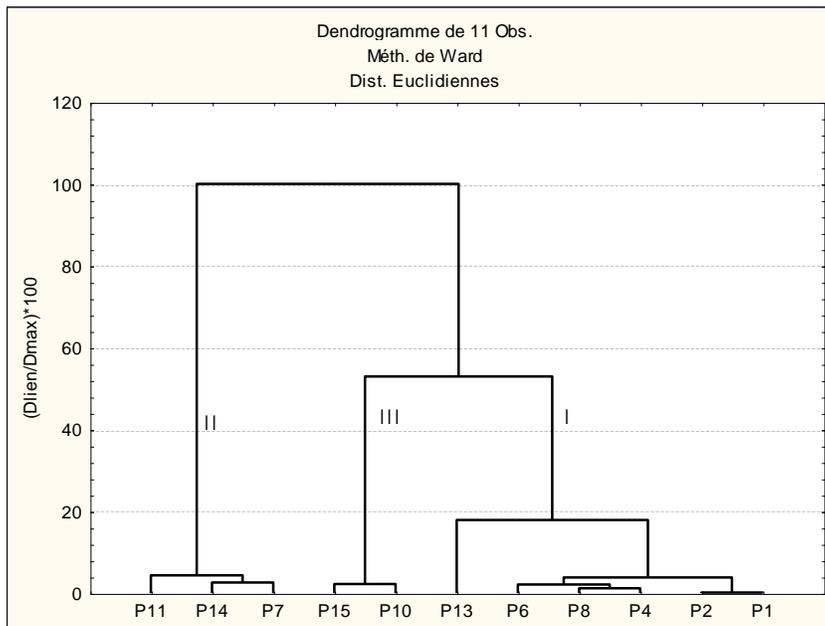


Figure 3.7 : Dendrogramme des piézomètres dans la zone d'étude

3.7 Spatialisation de l'hydrochimie

Diverses cartes (Fig.3.8) ont été établies afin d'apprécier la variabilité spatiale du chimisme des eaux (carte de la minéralisation totale, carte des iso-teneurs en chlorures et en bicarbonates) et de la conductivité électrique.

Celles-ci, au-delà du fait qu'elles permettent de matérialiser les zones d'alimentation potentielles, ne révèlent pas d'organisation spatiale permettant d'attribuer une quelconque individualisation.

La distribution spatiale de la conductivité électrique montre deux tendances variablement spatialisées (Fig.3.8a). Une tendance à la hausse caractérisée par une conductivité électrique qui varie entre 180 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans les piézomètres P7, P11, P13 et P14 et une tendance à conductivité faible caractéristique des piézomètres situés au Nord et au Sud de la région étudiée.

La spatialisation des bicarbonates dans la région de Pointe-Noire est caractérisée par trois tendances : Une tendance à faible concentration (P1, P2, P4, P6, P8 et P13, une à concentration moyenne (P10 et P15) et l'autre à forte concentration (P7, P11, et P14) (Fig.3.8b).

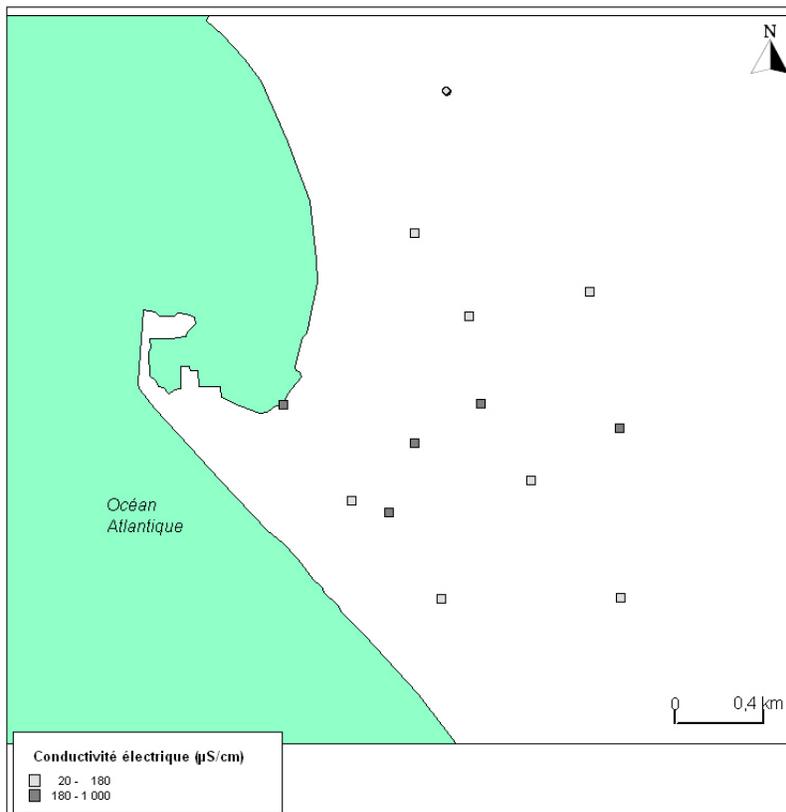


Figure 3.8a: Spatialisation de la conductivité électrique

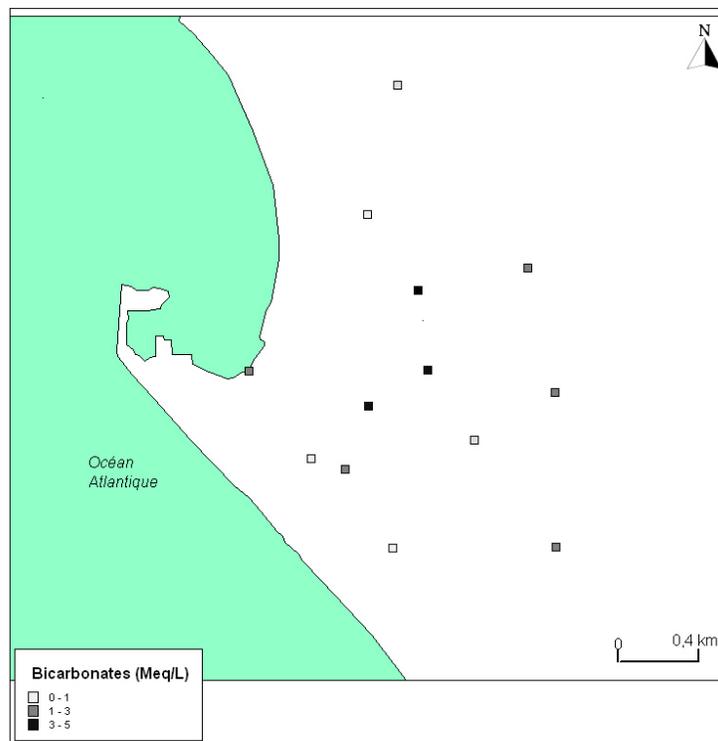


Figure 3.8b: Spatialisation des bicarbonates

Les eaux souterraines de l'AQ-2 de la région de Pointe-Noire, présentent des teneurs en chlorures variablement spatialisées (Fig.3.8c). Cette variation semble être localisée à l'environnement immédiat des piézomètres en relation probable avec la nature de la roche existante ou leur proximité avec l'océan.

3.8 Etude de la potabilité des eaux

La potabilité de l'eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, mais surtout en fonction de son usage. Pour ce qui concerne l'eau de boisson, en l'absence de normes nationales, il est fait référence aux valeurs guides de l'OMS données d'après les directives de qualité pour l'eau de boisson [37]. Par rapport à ces normes, bien que légèrement turbide, l'eau de la zone d'étude est de bonne qualité ; toutes les concentrations des éléments majeurs mesurées respectent les critères pour la qualité de l'eau potable.

L'eau souterraine de la zone d'étude peut généralement être qualifiée de fortement agressive, très faiblement minéralisée et avec une très forte alcalinité. Ce type d'eau est fortement susceptible de corroder les canalisations et la tuyauterie des pompes, et de dissoudre les métaux avec lesquels elle entre en contact.

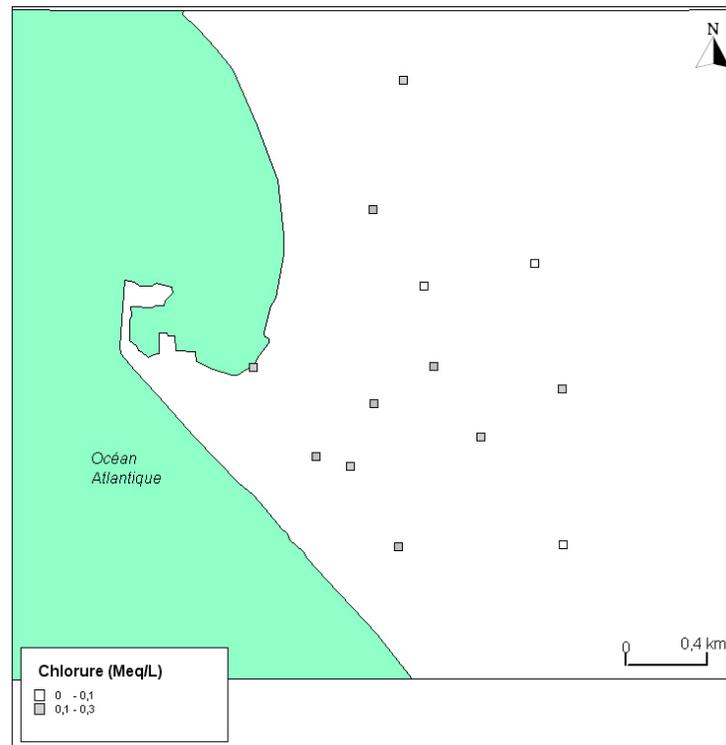


Figure 3.8c: Spatialisation des ions chlorures

En conclusion, les échantillons d'eau souterraine prélevés dans la région urbaine de Pointe-Noire démontrent que l'eau souterraine est généralement de bonne qualité. La plupart des paramètres physicochimiques de base analysés satisfont les critères pour la qualité de l'eau potable à l'exception de la température, conductivité électrique et de l'alcalinité.

La température de l'eau souterraine se situe entre 25,8 et 29,8°C. Cependant, le critère de l'OMS relatif à la température est-il applicable aux climats tropicaux ? Il est présenté seulement à titre indicatif. La conductivité électrique dans la plupart des ouvrages présente des valeurs faibles aux normes de l'OMS et montre une certaine agressivité de la nappe.

Les valeurs de l'alcalinité mesurées dans la plupart des stations d'échantillonnage excèdent également le critère pour la qualité de la potabilité ; elles varient entre 24 et 214 mg/l.

Les résultats d'analyse pour les échantillons d'eau souterraine montrent des différences importantes dans la composition physicochimique entre les stations. Bien que les échantillons aient été prélevés dans le même aquifère, on observe que plusieurs stations ayant une position spatiale plus ou moins proche de la côte atlantique, présentent généralement des valeurs plus élevées pour le pH, la conductivité et l'alcalinité. Ces différences pourraient s'expliquer en partie par la nature des sols du bassin sédimentaire côtier et de l'influence possible de l'environnement immédiat des ouvrages en relation probable avec leur mauvaise protection ou leur proximité avec l'océan.

Conclusion partielle

La chimie des eaux apporte, incontestablement, beaucoup d'éléments nouveaux dans la connaissance de la nappe et précise, pour l'instant, les données du problème. Elle permet une individualisation des aquifères pour autant que l'équipement des ouvrages isole les différentes formations qui les hébergent, empêchant toute communication hydraulique entre eux.

Il y a donc là une méthode pour mieux comprendre les grands aquifères lorsque leur géologie et leur piézométrie sont moins connues.

L'étude hydrochimique de l'aquifère AQ-2 dont la nappe est utilisée par la Société Nationale de Distribution d'Eau à Pointe-Noire au sud du Congo, a montré que les cations et anions majeurs, le pH, la conductivité électrique, les solides totaux, l'alcalinité totale complète et la dureté totale qui caractérisent la composition chimique de la nappe sont dans les limites permises pour l'eau de boisson selon les normes O.M.S. L'hydrochimie de la nappe dans cet aquifère varie en relation avec les différentes interactions eau-roche. Les caractéristiques hydrochimiques de la nappe montrent une prédominance des cations ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) sur ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), des ions bicarbonates HCO_3^- sur les ions sulfates SO_4^{2-} et chlorures Cl^- . Les ions bicarbonates proviennent principalement de la dissolution des minéraux carbonatés et silicatés. En se basant sur les constituants majeurs, les eaux de la nappe à l'étude correspondent aux faciès chimiques mélange cations – HCO_3 et $\text{Ca} - \text{HCO}_3$ qui représentent 64% des piézomètres. Les valeurs de la conductivité électrique sont relativement élevées au sud-ouest de la zone d'étude, ce qui laisse supposer une influence probable de l'eau de mer sur la composition chimique des eaux dans cette partie de la zone d'étude. Le rapport Na^+/K^+ permet un regroupement des piézomètres échantillonnés en trois groupes qui sont confirmés par une analyse statistique de classification hiérarchique ascendante.

La géochimie ne peut évidemment pas tout expliquer, pour le cas présent. On ne peut encore affirmer que la nappe s'écoule, qu'elle se renouvelle, ou bien que ses réserves s'épuisent. Il faudra sans doute faire appel à d'autres techniques pour répondre à ces questions, en particulier aux

déterminations de l'âge des eaux par les méthodes isotopiques, qui sont maintenant de plus en plus -utilisées. L'articulation étroite de ces techniques permettra une meilleure approche des connaissances hydrogéologiques de l'ensemble aquifère.

Modélisation des écoulements d'eau dans le milieu variablement saturé de la région de Pointe-Noire

Le besoin de modéliser les ressources en eau a été ressenti pour la première fois au début des années 70 avec les premiers constats des impacts négatifs causés par les activités humaines sur le cycle hydrologique. À l'heure actuelle, différents indicateurs environnementaux (e.g. pollution des eaux de surface et souterraines, érosion et désertification, tendance au réchauffement climatique global) sont assez pessimistes [52]. Il est de ce fait apparu nécessaire d'intégrer dans la politique de développement l'impact sur l'environnement et plus particulièrement sur la ressource en eau.

Le milieu poreux variablement saturé en eau du sol, milieu poreux souterrain compris entre la surface du sol et le superstratum des nappes, est l'interface de contact entre l'atmosphère et les aquifères et, de ce fait, son étude est primordiale à la modélisation des ressources en eau. La figure 4.1 schématise le bilan hydrologique à travers le milieu poreux variablement saturé : à la surface du sol, la lame d'eau de précipitation se répartit en un terme d'infiltration dans le sol et en un terme de ruissellement de surface ; une partie de la quantité d'eau infiltrée se déplace alors de façon latérale dans le milieu variablement saturé selon la pente (écoulement latéral non-saturé), une autre est reprise par évaporation dans l'atmosphère et par extraction racinaire de la végétation (quantité d'eau principalement évacuée dans l'atmosphère par transpiration, dont le tout se répartit en terme d'évapotranspiration) ; une portion de la quantité d'eau infiltrée restante s'accumule dans le milieu non-saturé et l'autre portion percole par gravité dans les nappes (terme de recharge).

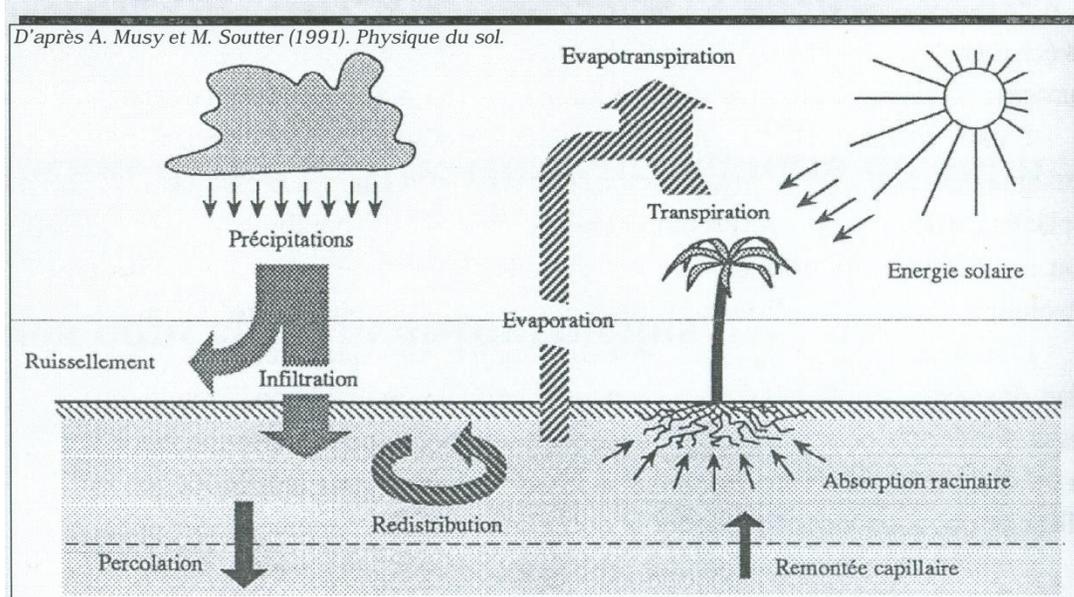


Figure 4.1 : Schéma des bilans hydrologiques dans le milieu poreux variable saturé en interaction avec les plantes et l'atmosphère

Le milieu poreux variablement saturé est un réservoir non-négligeable en eau douce, puisqu'il alimente toute la végétation. La capacité de rétention en eau de l'ensemble des sols du globe est du même ordre de grandeur que celle de tous les lacs et la quantité d'eau absorbée est environ égale au tiers de celle retenue dans les lacs. La quantité d'eau totale présente dans les sols et les aquifères dépasse d'environ deux ordres de grandeur la quantité d'eau douce de surface [53].

Enfin, le milieu poreux variablement saturé joue également un rôle crucial dans le transfert des polluants, qu'ils soient d'origine agricole, industrielle ou urbaine. La concentration à laquelle une pollution de surface atteint la nappe est dépendante principalement des caractéristiques du milieu variablement saturé, ce dernier pouvant jouer le rôle de tampon.

Le développement d'outils de gestion de la ressource en eau à l'échelle du bassin versant est stratégique pour une région surpeuplée utilisant des eaux souterraines. Les informations actuellement disponibles dans la région de Pointe-Noire laissent en effet supposer une surexploitation de la ressource qui va se traduire, à court ou moyen terme, par une diminution drastique des prélèvements possibles. L'utilisation de modèles adaptés à ce contexte hydrogéologique permet de déterminer la durabilité des pratiques actuelles et d'envisager les alternatives en matière de gestion de l'eau. C'est dans cette optique d'élaboration de modèle hydrogéologique à grande échelle qu'une étude des bilans hydrologiques doit être effectuée dans la région de Pointe-Noire pour estimer la recharge des aquifères et l'impact d'activité sylvicole qui se développe dans la région.

4.1 Approches d'estimation des écoulements d'eau en milieu variablement saturé

Afin de connaître et d'estimer quantitativement les processus d'écoulement d'eau en milieu variablement saturé (milieu non saturé), il est nécessaire de prendre en compte trois grands types de variables d'entrée :

1. la climatologie, qui va conditionner la quantité d'eau entrante par les précipitations et en partie la quantité d'eau évaporée vers l'atmosphère qui dépend de la température, l'hygrométrie, le rayonnement solaire et la vitesse du vent ;
2. la végétation qui va puiser par ses racines plus ou moins d'eau dans le sol et réémettre de la vapeur d'eau dans l'atmosphère par transpiration. Le type de végétation et son stade de développement vont conditionner ses besoins en eau et sa réponse aux contraintes extérieures (paramètres climatiques et disponibilité de l'eau dans le sol) ;
3. le sol qui agit comme un réservoir qui se vide vers le bas par gravité et vers le haut par évaporation et par les prélèvements de la végétation (*cf. Fig.4.1*).

Son évaluation se fait soit à l'échelle des bassins versants, soit à l'échelle du peuplement (formation végétale homogène). C'est le cas dans notre étude, l'évaluation des bilans hydriques se fait dans les peuplements d'eucalyptus et de la savane, formations végétales les plus caractéristiques de la région de Pointe-Noire.

Au niveau des bassins versants, on raisonne fréquemment sur des systèmes de drainage organisés et fermés en l'absence bien sûr d'apports ou de pertes externes. La situation est favorable en

bassin versant de taille suffisante (0,5 à 10 km²), drainé par des émissaires suffisamment incisés pour caractériser la couche aquifère. Mais toutes les mesures se font en un seul point, l'exutoire, sauf la pluviométrie. Il suffit de mesurer à l'exutoire les volumes écoulés (ruissellement (R.), écoulement hypodermique (E.H.), nappe souterraine (N.S.)), suivant les méthodes classiques de l'hydrologie (limnigraphie, jaugeage, tarage) pour déterminer les débits sortants avec des précisions relatives de l'ordre de 5 à 10 %. L'avantage de cette évaluation est le calcul du bilan d'eau à l'échelle macroscopique.

Les séquences et les profils de sols qui sont des systèmes d'écoulement mal délimités et à forte variabilité spatiale présentent une évaluation très incertaine. A l'échelle de la parcelle (quelques hectares), les systèmes de captage des flux de solution tels que les dispositifs lysimétriques qui servent à obtenir des échantillons d'eau, ne permettent pas d'estimer correctement les flux de solution [54], tout comme les méthodes d'utilisation des traceurs de l'infiltration et les méthodes de calcul des bilans hydriques à partir de la pluviosité (P), de l'évapotranspiration potentielle (ETP), et de la réserve en eau utile du sol (RU).

Les méthodes tensiométriques tirées de l'extension de la loi de Darcy aux milieux variablement saturés renseignent bien cependant sur le sens des transferts des flux d'eau et leur variabilité spatiale (selon la profondeur).

Notre approche est centrée sur la modélisation des flux hydriques. Les modèles de bilan hydrique du sol cultivé ou nu ont connu durant la dernière décennie un développement considérable, autorisant maintenant leur utilisation pour suivre le comportement du végétal lié à la consommation en eau et son écoulement dans un milieu poreux.

Ces modèles ont démontré leur utilité pour aborder l'évaluation de la répartition de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère. Notre étude s'inscrit dans le cadre d'une plate-forme de modélisation où le support est une représentation informatique qui utilise un modèle mécanique basé sur des lois physiques. Cette approche s'articule sur la simulation au cours du temps de l'évolution de l'humidité du sol et des flux d'eau avec le logiciel "*HYDRUS 1D*". Elle a pris depuis de nombreuses années une importance considérable et s'est montrée très efficace soit pour déterminer les paramètres hydrodynamiques du sol pour une amélioration de la prévision numérique, soit pour tester les modélisations du fonctionnement hydrique.

4.2 Modélisation des transferts hydriques dans le sol

La modélisation est devenue une approche fréquemment utilisée pour l'estimation des paramètres en sciences de l'eau. Fondamentalement, cette technique est basée sur les méthodes de contrôle optimal qui nécessitent des observations et un modèle pour le calcul des dérivées du premier ordre. Le modèle adjoint du modèle de Richards est construit pour obtenir le gradient de la fonction coût (qui mesure les écarts entre les valeurs simulées et celles observées) par rapport aux paramètres de contrôle [55].

Plusieurs approches de modélisation et hypothèses font état de bilan d'eau dans le complexe sol-plante-atmosphère. Parmi tant d'autres, nous retiendrons :

- Les modèles déterministes : les paramètres du sol et les autres données d'entrée sont définis de façon unique, si bien que la réponse du modèle est unique. Ces modèles s'appliquent uniquement à des sols uniformes et homogènes (paramètres caractérisés par des valeurs ou des fonctions uniques).
- Modèles stochastiques : les paramètres du sol et éventuellement certaines autres données d'entrée sont introduites sous forme de variables aléatoires décrites par des FDP (fonction de densité de probabilité). Les résultats de ces modèles sont donc également exprimés sous forme de FDP.
- Modèles mécanistes (à base physique) : les équations de cette catégorie de modèles, généralement des équations aux dérivées partielles, reposent sur des lois fondamentales empruntées à la physique. Elles fournissent les variations spatio-temporelles des variables d'état (teneur en eau volumique θ et potentiel hydrique h), en fonction des conditions initiales et des conditions aux limites par l'intermédiaire de paramètres.
- Modèles fonctionnels : les processus impliqués dans les transferts sont pris en compte de façon très simplifiée. La formulation mathématique de ces modèles est généralement simple. Ils exigent peu de données et sont faciles à résoudre.

En général, il existe deux grandes catégories des modèles de transfert hydrique dans les sols :

- ☞ modèles à compartiments et à flux, peu explicatifs des flux de transfert, mais basés sur les paramètres généralement beaucoup plus simples à mesurer ;
- ☞ modèles mécanistes basés sur les lois physiques de transfert hydrique dans le sol (en particulier la loi de Darcy, 1856) que la présente étude utilise.

4.2.1 Equation de Richards

L'équation de Richards est à la base du fonctionnement hydraulique des sols puisqu'elle établit une relation entre l'humidité du sol, le potentiel hydrique et la conductivité hydraulique.

C'est une équation aux dérivées partielles non-linéaires en une, deux ou trois dimensions d'espace que nous allons utiliser en dimension un.

La description mathématique du transfert hydrique est obtenue en considérant d'une part l'équation dite de continuité (*Eq.4.1*) qui exprime la conservation de la masse d'eau dans un volume élémentaire représentatif du sol et d'autre part l'équation de conservation de la quantité de mouvement (*Eq.4.2*) [56].

4.2.1.1 Equation de continuité

Une relation est établie entre le flux d'eau (q en $m \cdot s^{-1}$), l'humidité du sol (θ en $m^3 \cdot m^{-3}$) et le potentiel hydrique (h en Pa) en effectuant un bilan entrées/sorties pendant le temps ∂t (en s) pour un volume de sol d'épaisseur ∂z (en m) comme présenté par la formule ci-dessous :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} \quad (\text{Eq.4.1})$$

4.2.1.2 Equation dynamique : loi de Darcy

C'est l'équation (Eq.4.2), dite "loi de Darcy" qui permet de décrire les écoulements ou les transferts hydriques dans un milieu poreux saturé. Elle exprime la proportionnalité entre le flux d'eau ou vitesse de filtration (q) traversant une colonne et l'opposé du gradient de charge hydraulique. Bien qu'elle fut conçue à l'origine pour les écoulements en milieux saturés, elle fut étendue par Richards en 1931 aux écoulements en milieu non saturé en stipulant que la constante de proportionnalité (K) appelée conductance hydraulique est fonction de la teneur en eau du sol.

La relation proposée par Darcy (1856) et étendue aux milieux non saturés s'écrit :

$$q = K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (\text{Eq.4.2})$$

avec

q = Flux d'eau qui traverse une section donnée en une unité de temps donnée ($m.s^{-1}$) K = **conductivité hydraulique** ($m.s^{-1}$). Elle exprime la capacité du sol à transmettre l'eau suivant son état de saturation mesuré par θ ou h . La conductivité est maximale à la saturation (K_s). θ = **teneur en eau volumique** ($m^3.m^{-3}$)

C'est une variable adimensionnelle qui donne le pourcentage volumique de sol occupé par l'eau.

z = **profondeur** du sol (m) orienté de haut en bas

H = **charge hydraulique** : c'est un potentiel de pression (Pa) exprimé en hauteur d'eau (m) pour des raisons de commodité.

Elle est égale à la somme du potentiel gravitaire (z) et du potentiel de pression hydrostatique (h) mesuré par la tension Ψ (on néglige les potentiels chimique, osmotique et d'adsorption). $H = h - z$.

La tension hydraulique h mesure l'état énergétique et traduit la plus ou moins grande saturation du sol en eau. Elle est donc faible dans les sols saturés et augmente dans les sols secs. C'est une grandeur négative exprimée en Pa.

$\partial H / \partial z$ = **gradient de charge hydraulique**

Il permet de déterminer le sens de déplacement des flux hydriques lors de l'exploitation des données des tensiomètres. Il s'exprime en Pa.

Si la conductivité hydraulique K est connue, les flux hydriques tels que les remontées capillaires et le drainage peuvent être déduits en mesurant les paramètres de l'équation de Darcy à l'aide de tensiomètres et d'humidimètres. θ , K et h sont liés par des relations caractéristiques du milieu :

1. la courbe de rétention $\theta(h)$ lie la teneur en eau volumique à la tension hydrique et exprime la capacité du sol à retenir l'eau en fonction de la succion exercée. Grâce à elle, il est possible de connaître les humidités volumiques correspondant aux données tensiométriques (et vice-versa). C'est une caractéristique macroscopique fondamentale en physique du sol car elle intègre l'influence de la structure, de la porosité et de l'adsorption sur l'état de l'eau du sol ;

2. la courbe de conductivité hydraulique $K(h)$ ou $K(\theta)$.

L'importance que revêt la conductivité hydraulique pour la description de la dynamique de la phase liquide fait de sa détermination un aspect essentiel de l'évaluation des processus de l'écoulement. La détermination de la phase liquide en laboratoire s'effectue à l'aide d'échantillons non remaniés et aussi représentatifs que possible de l'ensemble du sol dont ils sont issus. Ces deux conditions sont en général très difficiles à respecter ou à vérifier (ce qui induit souvent de grosses erreurs), par contre les techniques de mise en place au laboratoire sont plus simples et fournissent des mesures relativement précises. Ces relations peuvent être aussi obtenues à partir de mesures locales sur le terrain. Cependant, ces mesures demandent des moyens humains et matériels importants et sont généralement longues et coûteuses, d'autant plus qu'une grande diversité de sols peut être rencontrée sur un même bassin. Dans le cas des sols de Pointe-Noire, on rencontre une grande homogénéité de ces sols, ce qui nous pousse à utiliser la méthode des expériences de drainage *in situ*.

La capacité capillaire $C(h) = \partial\theta/\partial h$ (m^{-1}) est la dérivée de la rétention hydrique et donne la variation de la teneur en eau pour une variation de potentiel.

La combinaison de ces deux équations monodimensionnelles de la dynamique prend la forme (Eq.4.3) (équation de Richards).

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (\text{Eq.4.3})$$

dans laquelle h est la pression relative par rapport à la pression atmosphérique de l'eau exprimée en Pa et H définie par :

$$H = h(\theta) - z. \quad (\text{Eq.4.4})$$

L'introduction du coefficient de "diffusivité" qui est le produit de la conductivité et de la pente de la relation liant la pression de l'eau h à l'humidité volumique :

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta}, \quad (\text{Eq.4.5})$$

permet d'exprimer l'équation (Eq.4.3) sous forme de θ qui devient alors, en déplacement monodimensionnel vertical :

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial\theta}{\partial z} - K(\theta) \right] \quad (\text{Eq.4.6})$$

dans laquelle D est le coefficient de diffusivité.

L'équation (Eq.4.6) est appelée équation de Fokker-Planck. Cette équation ne peut-être utilisée en milieu saturé. En effet, lorsqu'une partie du sol est saturée (teneur en eau à saturation naturelle $\theta = \theta_s = \text{cte}$), la pression de l'eau dans le sol continue à augmenter, donc la diffusivité devient infinie.

Pour un milieu non saturé, l'équation (Eq.4.3) est exprimée en fonction de la pression effective de l'eau h en introduisant le concept de capacité capillaire [57] :

$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}, \quad (\text{Eq.4.7})$$

et l'équation (Eq.4.3) prend la forme de :

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (\text{Eq.4.8})$$

4.2.2 Fonctions puits et résolution de l'équation de Richards

La résolution des équations de transfert a fait l'objet de très nombreux travaux [58, 59, 60] et, en sol nu, sans végétation, les résultats prédictifs obtenus par simulation sont souvent très satisfaisants quelle que soit la méthodologie employée. En fait, les difficultés interviennent surtout au niveau de l'identification des paramètres phénoménologiques $K(\theta)$ et $h(\theta)$ et leur variabilité [60]. L'absorption par les racines est aussi une des difficultés lorsque de l'eau peut être soustraite du système au cours de son écoulement souterrain. Dans ce cas, il faut introduire dans l'équation de Richards une fonction dite « fonction-puits S » qui doit tenir compte de la morphologie du système racinaire.

L'équation de Richards devient alors :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] + S \quad (\text{Eq.4.9})$$

avec

S : fonction d'extraction racinaire (volume d'eau extrait par unité de volume de sol et par unité de temps) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

Cette fonction d'extraction S ($\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$) a été présentée simplement par [60].

$$S = \alpha(h) \frac{T_p}{L} \quad (\text{Eq.4.10})$$

où

$\alpha(h)$ est la fonction de réponse au stress hydrique (sans unité) ;

T_p ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) est le débit de transpiration potentielle ;

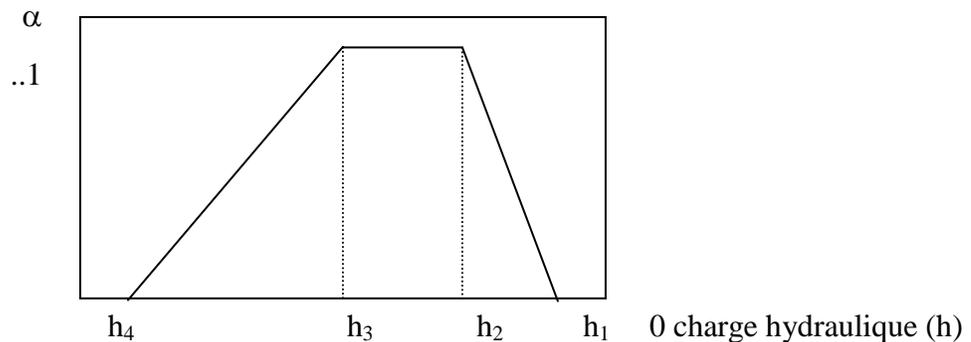
L (m), la profondeur d'enracinement.

L'équation des écoulements souterrains peut être résolue analytiquement ou numériquement. Dans notre cas cette équation est hautement non linéaire et ne peut être résolue analytiquement. D'où la résolution numérique (méthode des éléments finis ou méthode des volumes finis) est nécessaire. Pour cela, les conditions initiales et aux limites doivent être discrétisées de sorte que les erreurs numériques soient minimisées. Cette technique de modélisation a été utilisée par plusieurs auteurs [58, 59]. Les modèles incluent généralement des procédures qui permettent de faire varier automatiquement le pas de temps en fonction de la rapidité de convergence de la

solution numérique. Les modèles monodimensionnels possèdent un maillage sous forme de couche, l'espacement entre les lignes étant à définir.

La fonction « puits » S introduite dans l'équation de base tient compte du stress hydrique $\alpha(h)$. Pour représenter ce stress hydrique, on utilise la formule établie par van Genuchten (1986) qui tient compte de la pression induisant une diminution de 50 % du rendement d'une culture (h_{50}) et d'une autre constante empirique p , exponentielle :

$$\alpha(h) = (1 + (h/h_{50}))^{-p} \quad (\text{Eq.4.11})$$



h_1 : Point d'anoxie

h_2 - h_3 : Zone d'absorption potentielle maximale

h_4 : Pointe de flétrissement permanent (d'après *Feddes et al., 1978*) [61].

En outre, la résolution de l'équation de-transferts hydriques requiert une caractérisation des paramètres hydrodynamiques, une détermination de la fonction puits caractérisant l'extraction racinaire ainsi qu'une connaissance des conditions aux limites du système (condition initiale, conditions en surface et en profondeur). Cette résolution se fera à l'aide d'un progiciel modelant l'environnement pour l'analyse de l'écoulement de l'eau.

D'où la plate-forme informatique utilisée dans cette étude, *HYDRUS 1D* qui présente l'avantage de fonctionner sous un environnement convivial.

4.3 Présentation du logiciel HYDRUS 1D

Le logiciel *HYDRUS 1D* a été réalisé en 1996 par le laboratoire de salinité des ETATS-UNIS, ministère de l'agriculture des ETATS-UNIS, service de recherches d'agriculture [62]

Le programme de *HYDRUS 1D* est un modèle d'éléments finis pour simuler le mouvement unidimensionnel selon la profondeur de l'eau, de la chaleur et des multiples corps dissous dans des milieux variables. Le programme résout numériquement l'équation de Richards pour l'écoulement saturé-insaturé de l'eau. Il met en application les différents types de modèles de van Genuchten [63], de Brooks et Correy [64] et de fonction analytique de van Genuchten modifiée qui permettent de décrire les paramètres hydrauliques de sols insaturés. Des modifications ont été faites pour améliorer la description des paramètres hydrauliques près de la saturation. Le code HYDRUS incorpore le phénomène d'hystérésis en employant le modèle empirique présenté par Scott *et al.* [65] et Kool et Parker [66].

Le progiciel *HYDRUS 1D* offre la possibilité d'optimiser les paramètres de caractérisation des sols par une évaluation inverse. Cette technique consiste à faire varier les paramètres à optimiser

afin de minimiser les écarts entre les valeurs simulées (conductivité hydraulique, humidité, potentiel hydrique, flux profond) et les valeurs observées expérimentalement.

HYDRUS 1D fonctionne avec les sous unités suivantes : pour l'humidité volumique θ en $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ou $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, pour le potentiel hydrique h en m d'eau, la conductivité hydraulique K en $\text{cm}.\text{s}^{-1}$, la capacité capillaire en cm^{-1} .

4.3.1 Paramétrisation

Afin de caractériser le comportement hydrique d'un sol, on calcule la relation entre l'humidité du sol et le potentiel hydrique. Cette relation $h(\theta)$ est une composante importante des phénomènes de transfert hydrique. Pour décrire de façon continue la relation « teneur en eau/potentiel hydrique », un certain nombre d'auteurs [67, 68, 69] ont attribué à priori une certaine forme mathématique, utilisable dans des modèles de transfert [60]. Une forme simple a été introduite par van Genuchten et Nielsen [70] :

$$S_e = (1 + (\alpha h)^n)^{-m} \quad (\text{Eq.4.12})$$

où S_e représente le taux de saturation et h la valeur absolue du potentiel hydrique :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{Eq.4.13})$$

où θ_s est l'humidité volumique à saturation, et θ_r , l'humidité résiduelle.

La détermination des paramètres se fait à partir de la fonction de rétention d'eau de van Genuchten :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (\text{Eq.4.14})$$

α , n et m sont des paramètres indépendants que l'on peut déterminer par les ajustements statistiques. Une relation de dépendance entre m et n ($m = 1 - 1/n$) améliore la représentativité de la relation choisie presque pour tous les sols.

La fonction de rétention devient :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1-1/n}} \quad (\text{Eq.4.15})$$

En introduisant la fonction de capacité capillaire (Eq.4.7), l'équation (Eq.4.14) (ou (Eq.4.15)) devient :

$$C(h) = \frac{(\theta_s - \theta_r)(-m)(\alpha^n)n(h)^{n-1}}{[1 + (\alpha h)^n]^{1+m}} \quad (\text{Eq.4.16})$$

La relation peut également s'exprimer analytiquement en fonction de $K(\theta)$ ou $K(h)$ par :

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^i \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (\text{Eq.4.17})$$

ou

$$K(h) = \frac{K_s \left(1 - (ah)^{n-1} [1 + (ah)^n]^{-m} \right)^2}{[1 + (ah)^n]^{m/2}} \quad (\text{Eq.4.18})$$

Dans les équations (Eq.4.17) et (Eq.4.18), les différents paramètres désignent respectivement :

- θ_s la teneur en eau à saturation naturelle ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$),
- θ_r la teneur en eau résiduelle ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$),
- K_s la conductivité hydraulique à saturation naturelle ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
- α paramètre empirique de la courbe de rétention d'eau (m^{-1})
- m et n les paramètres de la courbe de rétention d'eau liés à la structure du sol (sans unité),
- et i , un paramètre relatif à la porosité des sols et fixé à 0,5 [71].

La caractérisation des sols requiert la détermination de ces cinq paramètres qui interviennent dans le modèle de Richards décrit ci-dessus. Les paramètres n et m sont des paramètres de forme et K_s , α , θ_s et θ_r sont des paramètres d'échelle. Certaines études [72] ont démontré que les paramètres d'échelle sont fortement liés à la texture du sol alors que les paramètres de forme dépendent principalement des propriétés structurales du sol.

4.3.2 Conditions initiales

- Si l'on utilise la forme diffusive de l'équation de Richards, on définit le profil hydrique initial $\theta(z,0)$ qui prévaut au début de la simulation ($t=0$) ;
- Si l'on utilise la forme capacitive de l'équation de Richards, on définit le profil de charge de pression initiale $h(z,0)$ qui prévaut au début de la simulation ($t=0$).

4.3.3 Conditions aux limites du modèle

Les conditions de type Dirichlet (potentiel hydrique) et de type Neumann (Flux d'eau) sont imposées selon la limite inférieure ou supérieure.

En surface

On peut choisir entre le potentiel hydrique constant, le flux d'eau constant, les conditions atmosphériques (précipitations, évapotranspiration et valeur de pression maximale d'équilibre sol/atmosphère avec ruissellement ou accumulation d'eau possible), le potentiel hydrique variable, le flux d'eau variable.

En profondeur

On peut choisir entre le potentiel hydrique constant, le flux d'eau constant, le potentiel hydrique variable, le flux d'eau variable, le drainage libre, le drainage profond, la face de suintement, et le drainage horizontal.

4.4 Expérience de drainage interne

Une expérience de ressuyage contrôlé en eau ou "méthode du drainage interne" a été effectuée lors nos travaux antérieurs [9], afin de préciser le fonctionnement hydrologique de ces sols. Dans la zone de recharge des couches aquifères de notre zone d'étude, un anneau métallique (25 cm de hauteur et 1 m de diamètre) est enfoncé dans le sol de 10 cm afin de délimiter une zone de 0,78 m² au-dessus d'une répétition de sondes TDR (Réflectométrie dans le Domaine Temporel) qui évaluent l'humidité volumique du sol. Cet anneau est entouré d'un deuxième anneau (25 cm de hauteur et 2 m de diamètre) délimitant une surface de 3,14 m². Ce deuxième anneau est installé pour limiter les écoulements latéraux.

Cette expérience de "drainage interne" consiste à saturer le sol dans la zone délimitée par ces deux anneaux par apport d'eau externe (environ 3 m³/m² d'eau ont été déversés), puis de laisser le sol se ressuyer, afin d'assurer des écoulements souterrains homogènes autour des sondes TDR. Dans l'anneau central sont installés au plus proche des sondes TDR des tensiomètres à mercure dont le point d'entrée d'air se situe aux alentours d'une pression de -800 cm d'eau. Sous l'influence de la succion du sol, l'eau contenue dans la bougie se met en équilibre de potentiel avec l'eau du sol et cette succion équilibre la montée d'une colonne manométrique de mercure. Pendant la phase de ressuyage, l'humidité volumique du sol (θ) est mesurée à pas de temps régulier avec les sondes TDR et le potentiel hydrique (h) avec les tensiomètres, placés respectivement à 15, 50, 100 et 200 cm de profondeur. Les dispositifs installés sont bâchés, ce qui permet d'éviter les pertes d'eau par évaporation.

4.5 Relation potentiel hydrique-teneur en eau

La relation potentiel hydrique-humidité volumique $h(\theta)$ est une composante importante des phénomènes des écoulements des eaux souterraines dans le milieu variablement saturé. Elle est essentielle pour décrire l'état de l'eau dans le sol [73]. Cette relation mesurée expérimentalement est représentée graphiquement par une courbe caractéristique de l'humidité du sol ou "courbe de rétention de l'humidité du sol".

A partir des données expérimentales de drainage interne *in situ*, les paramètres de l'équation de van Genuchten qui lient le potentiel hydrique à la teneur en eau du sol sont estimés par le progiciel *HYDRUS 1D* à différentes profondeurs (15, 50, 100 et 200 cm) dans la zone de recharge de notre domaine d'étude (*Tab.4.1*).

Il n'a pas été tenu compte d'éventuels phénomènes d'hystérésis car dans les sols sableux ils sont négligeables.

Tableau 4.1 : Paramètres hydrodynamiques dans le sol de Pointe-Noire à différentes profondeurs

Paramètres hydrodynamiques	Profondeur (cm)			
	15	50	100	200
θ_r ($m^3 \cdot m^{-3}$)	0.023	0.026	0.040	0.064
θ_s ($m^3 \cdot m^{-3}$)	0.446	0.436	0.410	0.360
α (m^{-1})	3.418	3.861	4.565	5.036
n (-)	1.767	1.641	1.603	1.539
K_s ($m \cdot j^{-1}$)	373.7	200.2	66.5	45.3

Pour le paramètre m , la simplification de Mualem [71] ($m = 1-l/n$) a été utilisée avec l la connectivité des pores prise égale à 0.5.

Les sols de notre zone d'étude étant très drainants, il est difficile de pouvoir déterminer l'humidité à la saturation du sol. Pour remédier à cette difficulté, les humidités à la saturation θ_s ont été fixées aux valeurs déterminées à partir de la porosité totale estimée par des densités réelles et apparentes. Les valeurs d'humidité résiduelle sont fixées aux plus faibles humidités observées en fin de saison sèche, car les valeurs minimales d'humidité sont difficiles à déterminer à partir de l'expérience de drainage interne, la limite d'utilisation des tensiomètres étant d'environ 0.8 bar (soit 816 cm d'eau).

En fixant ainsi les valeurs des paramètres θ_r et θ_s , il a donc été possible de déterminer les valeurs des paramètres empiriques (α et n) de l'équation de van Genuchten aux différentes profondeurs en minimisant les écarts entre les valeurs mesurées et estimées.

Les valeurs de K_s ont été estimées par ajustement en faisant la simulation de l'humidité volumique des sols à chaque profondeur.

Ces paramètres de l'équation de van Genuchten obtenus varient avec la profondeur. On constate que θ_r et α augmentent avec la profondeur tandis que θ_s et n diminuent avec la profondeur alors que K_s diminue fortement avec la profondeur.

Cette variabilité des paramètres hydrodynamiques traduit celle des courbes de rétention (*Fig.4.2*). Les courbes obtenues aux différentes profondeurs ont des allures de courbe caractéristique de sol sableux. Les courbes de rétention mesurées épousent bien les courbes de rétention estimées à toutes profondeurs du milieu d'étude.

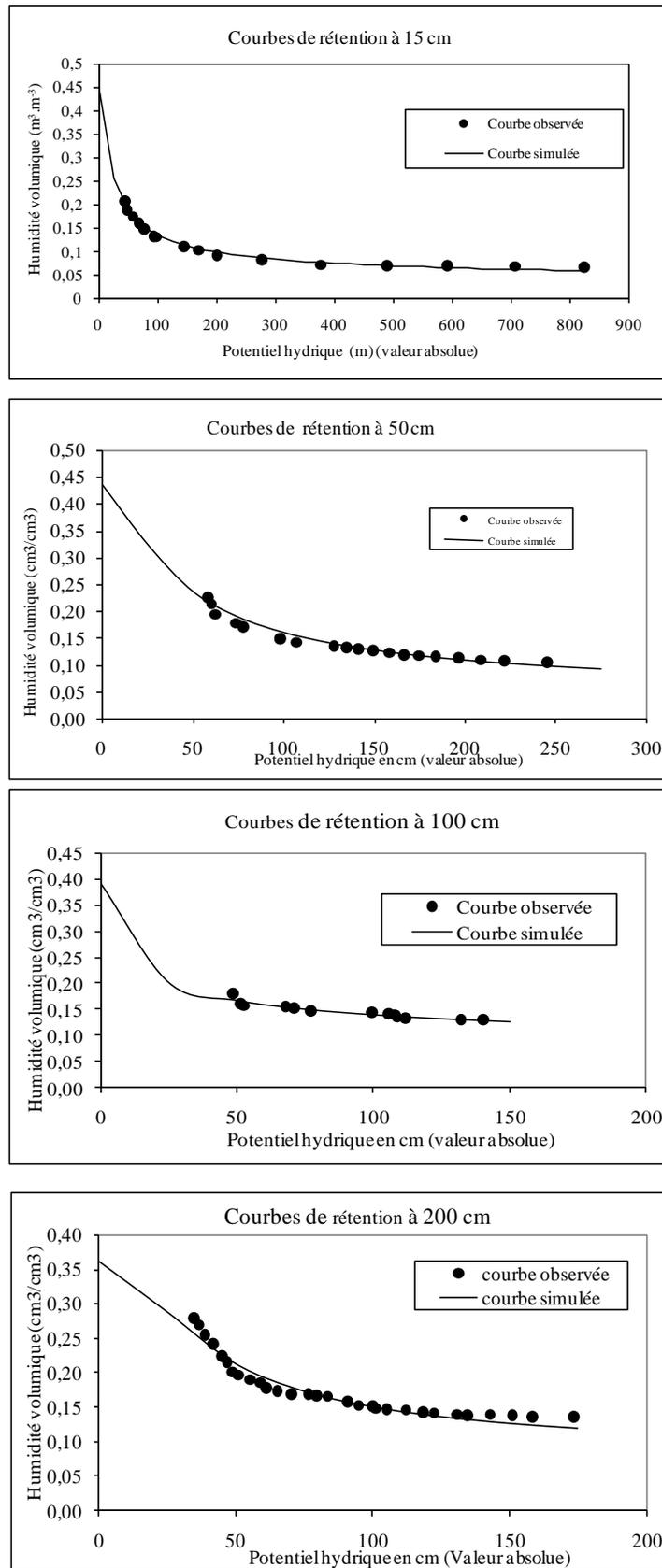


Figure 4.2: Courbes de rétention d'eau aux différents horizons du sol de Pointe-Noire

Les variations de paramètres hydriques avec la profondeur sont cohérentes avec les variations de texture, de matière organique et de la capacité d'échange, cationique (CEC).

4.6 Caractéristiques hydriques

Afin de bien caractériser le comportement hydrique des sols, les capacités au champ, les points de flétrissement permanent et les réserves utiles pour chaque profondeur ont été calculés à partir de l'équation de van Genuchten.

La capacité au champ (θ_{fc}) est définie comme la quantité d'eau restant dans le sol après drainage libre. En règle générale, la capacité au champ correspond à une force nécessaire pour extraire l'eau de 330 cm d'eau, mais cette valeur augmente avec la finesse de la texture (50 cm d'eau pour un sol sableux jusqu'à 330 cm d'eau pour des textures plus fines) [74, 9, 75, 76]. La capacité au champ a été calculée à $pF = 2$ (soit respectivement pour un potentiel hydrique $h = 100$ cm), puisque nos sols sont sableux et contiennent des faibles teneurs en argile.

Le point de flétrissement permanent (θ_{wilt}) est défini comme la quantité d'eau en dessous de laquelle les racines ne peuvent plus extraire l'eau du sol. Les racines exercent une succion jusqu'à $h = 15000$ cm d'eau pour puiser l'eau.

La réserve utile (RU) est la différence d'humidité entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent, c'est l'eau utilisable par les racines.

Les valeurs de la capacité au champ (θ_{fc}) et celles du point de fléchissement permanent (θ_{wilt}) varient avec la profondeur du sol (*Tab.4.2*).

Tableau 4.2 : Caractéristiques hydriques du sol de Pointe-Noire, calculées par l'équation de van Genuchten

Caractéristiques	Profondeur (cm)			
	15	50	100	200
θ_{fc} ($m^3.m^{-3}$)	0.106	0.108	0.105	0.116
θ_{wilt} ($m^3.m^{-3}$)	0.023	0.026	0.043	0.067
RU ($m^3.m^{-3}$)	0.082	0.081	0.062	0.049

Quelle que soit la profondeur, les valeurs de la capacité au champ sont peu variables avec la profondeur. La valeur la plus élevée est observée en profondeur ($0.116 m^3.m^{-3}$) et les plus faibles dans les 100 premiers cm.

Les quantités d'eau correspondant à la limite inférieure de l'eau capillaire absorbable par les racines (θ_{wilt}) pour chaque horizon augmentent avec la profondeur et sont presque identiques en surface dans les premiers 50 centimètres

Les valeurs de RU par couche de sol sont faibles et diminuent avec la profondeur. Pour les 15 premiers cm de sol, $RU = 12$ mm et pour les 200 premiers cm de sol, $RU = 132$ mm

Ce sol a une réserve utile (RU) théorique importante pour le profil 0-200 cm. Néanmoins l'humidité à la capacité au champ n'est jamais atteinte simultanément sur tout le profil de sol étudié (*Fig.4.4*). Ce sol étant très drainant, la quantité d'eau qui tombe sur le sol se laisse ressuyer

rapidement en profondeur. Dans ce sol, la RU par unité de volume augmente avec la profondeur et a tendance à se stabiliser.

4.7 Validation du modèle

Pour valider le modèle, différentes données analysées dans le chapitre I ont été utilisées, à savoir : la pluviométrie (P) l'évapotranspiration potentielle (ETP), la relation entre la transpiration réelle (ETR) et l'humidité volumique (θ), et la répartition en profondeur des racines fines.

Ces paramètres de transfert hydrique et agro-météorologique permettent de simuler au cours du temps l'évolution de l'humidité du sol et des flux d'eau avec *HYDRUS 1D*, puis de comparer ces simulations avec les données réelles observées et d'établir les bilans hydriques.

L'utilisation des paramètres obtenus par les expériences de drainage interne permet une bonne simulation des humidités observées quelle que soit la profondeur (*Fig.4.3* et *Fig.4.4*).

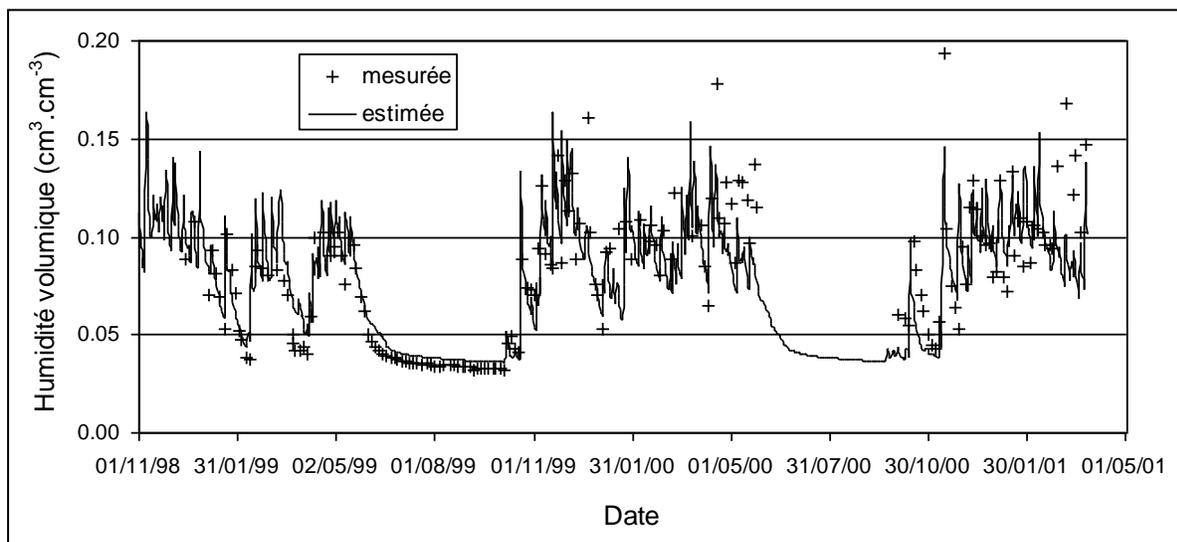


Figure 4.3 : Simulation de l'évolution de l'humidité du sol de Pointe-Noire

4.8 Bilan d'eau

Le bilan d'eau d'un système hydrologique est la *balance comptable* des entrées (recettes) égales au débit moyen des apports et des sorties (dépenses) représentées par le débit moyen des écoulements. Il se réfère à un domaine délimité, le système hydrologique et à une durée moyenne précise.

Il présente les données sur les conditions aux limites de flux, débits entrant et sortant. Celles-ci sont contrôlées et affinées par simulation lors du calage des modèles mathématiques de simulation hydrodynamique.

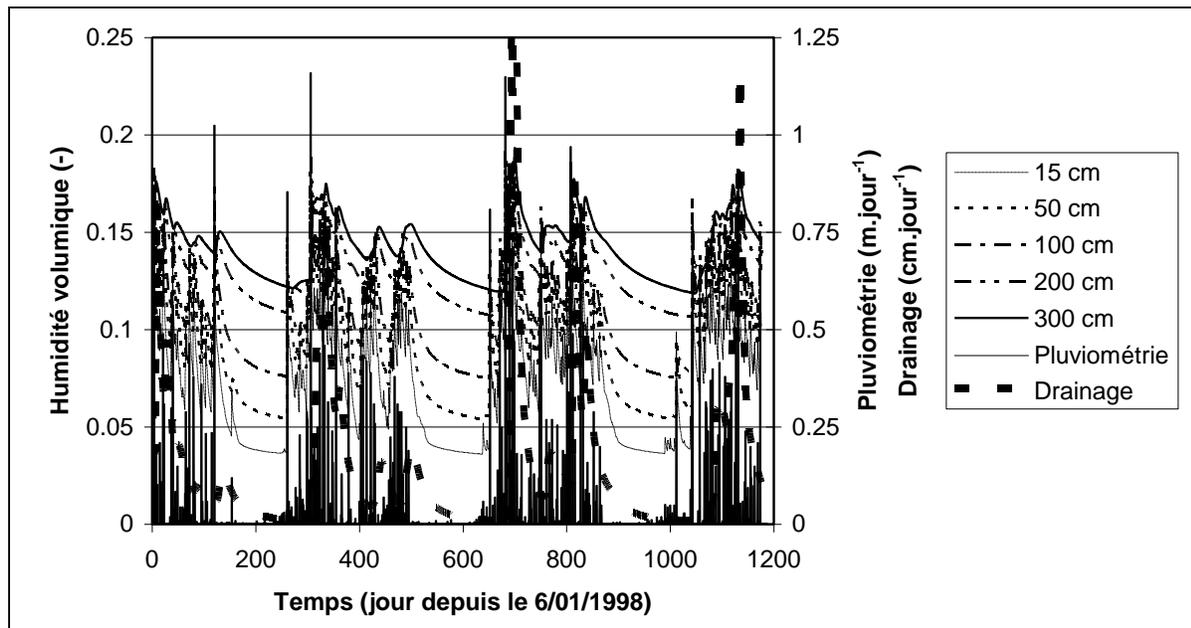


Figure 4.4: Estimation de l'humidité volumique à différentes profondeurs et du drainage profond à Pointe-Noire par Hydrus1D

4.8.1 Evapotranspiration

Dans la troposphère, soit la couche de l'atmosphère au voisinage du sol (son épaisseur est de 2 à 3 kilomètres environ), l'air ambiant n'est jamais sec mais contient une part plus ou moins importante d'eau sous forme gazeuse (vapeur d'eau) qui est fournie par :

- L'évaporation physique au-dessus des surfaces d'eau libre (océans, mers, lacs et cours d'eau), des sols dépourvus de végétation et des surfaces couvertes par de la neige ou de la glace.
- La transpiration des végétaux qui permet à la vapeur d'eau de s'échapper des plantes vers l'atmosphère.

En hydrologie, on utilise le terme d'évapotranspiration qui prend en compte la combinaison de l'évaporation directe à partir des surfaces d'eau libre et des sols nus et de la transpiration végétale. Rappelons que ces processus se traduisent par un refroidissement tandis que la transformation inverse, à savoir la condensation, libère de l'énergie calorifique et s'accompagne d'une augmentation de la température.

L'évaporation et plus particulièrement l'évapotranspiration jouent un rôle essentiel dans l'étude du cycle de l'eau. Comme le montre la figure 4.1, ces mécanismes sont importants en regard des quantités de précipitations incidentes aussi bien à l'échelle des continents qu'à celle du bassin versant.

Plusieurs méthodes de calcul ont été élaborées pour estimer l'évapotranspiration, allant des méthodes empiriques simples (la méthode Thornthwaite [77], Turc, [78, 79], Blannay-Cridle,

[80] ; Thornthwaite & Mather [81]...) reposant sur la corrélation entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des facteurs climatiques facilement accessibles (la température moyenne de l'air et la durée théorique de l'insolation), à des méthodes semi-physiques plus élaborées. Généralement, le choix de la méthode à utiliser dépend des données climatiques dont on dispose. Au Congo, la faiblesse des données climatiques a fait que les méthodes employées étaient empiriques. L'acquisition récente de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile (ANAC) des stations synoptiques mesurant plusieurs paramètres climatiques (température, humidité relative, rayonnement, vitesse du vent, point de rosée,...) permet d'utiliser des méthodes de calcul élaborées [82]. Des études comparatives récentes [83] ont montré la supériorité de la méthode basée sur l'approche Penman-Monteith [84].

Cet ainsi que dans notre étude, l'ETP journalière est calculée à partir de la formule de Penman-Monteith séparément pour la savane, et la plantation d'Eucalyptus à partir des données météorologiques de Pointe-Noire (ANAC) (cf. annexe 2).

Pour vérifier la fiabilité des calculs et des données, une corrélation entre ETP et le rayonnement globale R_g ($ETP=f(R_g)$) est effectuée dans nos différents écosystèmes (savane et eucalyptus) et cette corrélation donne des valeurs de coefficient de corrélation R^2 proche de 1 (Fig.4.5).

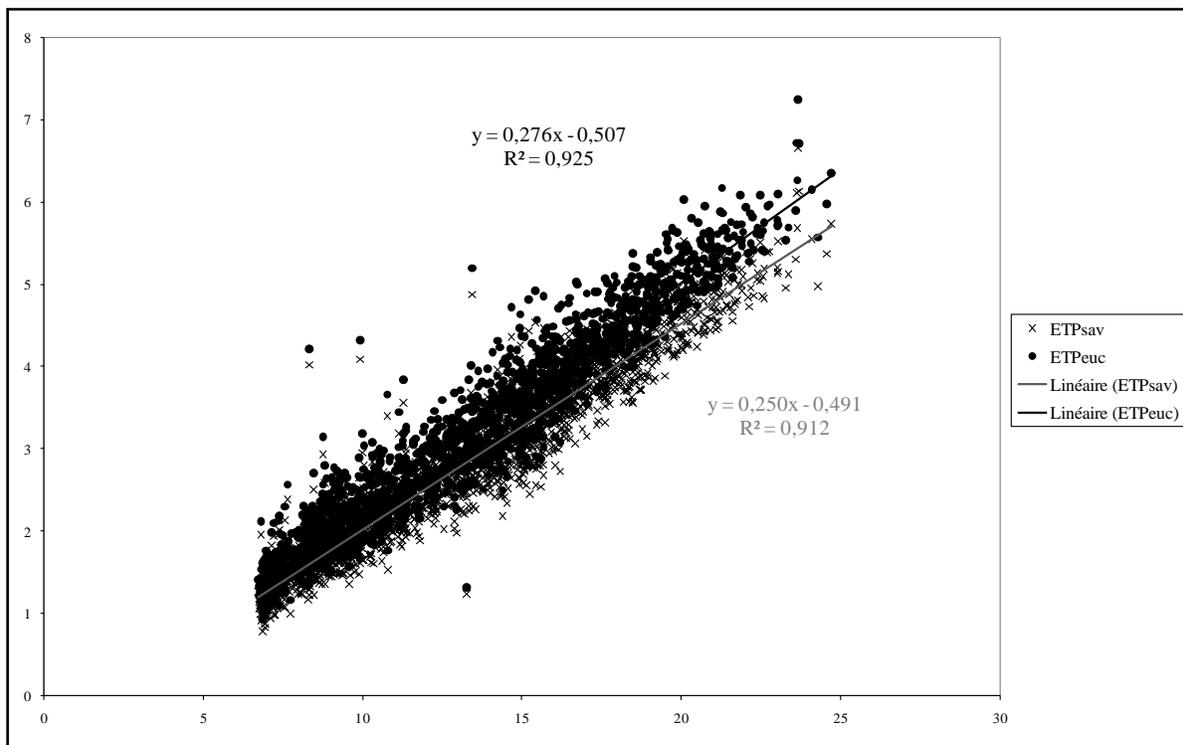


Figure 4.5: ETP = f(R_g) de la savane et d'eucalyptus à Pointe-Noire

L'ETP journalière calculée, varie en fonction du temps dans les deux écosystèmes (savane et eucalyptus). La courbe d'évolution de l'ETP (Fig.4.6) tracée à partir de la moyenne mobile montre une tendance à la baisse pendant la saison sèche.

Les différences entre l'ETP savane et l'ETP eucalyptus ne sont pas trop grandes, elles varient autour de 0,23 mm/jour. L'ETP journalière de l'eucalyptus est toujours plus grande que l'ETP de

la savane. Ceci s'explique par une grande consommation en eau du sol des eucalyptus par rapport à la savane.

4.8.2 Bilan

Le bilan hydrologique d'un bassin versant est une méthode de calcul qui permet d'apprécier les relations entre apports et sorties d'eau, sur une période de temps déterminée, qui correspond à une année hydrologique complète. Il sert à vérifier la cohérence de l'ensemble des données recueillies et calculées : mesure de précipitation, calcul d'évapotranspiration, mesure de l'écoulement moyen.

Le bilan hydrique calculé au pas de temps journalier peut s'écrire :

$$\Delta W_z = P - In - Ru - ETR - \Delta S \quad (\text{Eq.4.19})$$

avec

- ΔW_z , le flux d'eau drainée à la profondeur z
- P , la pluviométrie
- In , l'interception
- Ru , le ruissellement
- ETR , l'Evapo-Transpiration Réelle, qui dépend de l'Evapo-Transpiration Potentielle, (ETP) et de l'eau disponible dans le sol
- ΔS , la variation de stock d'eau dans le sol.

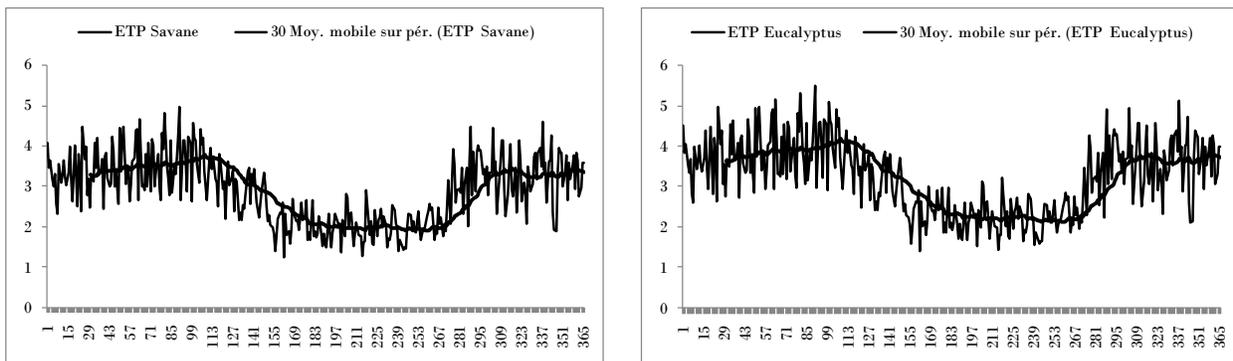


Figure 4.6 : ETP journalière moyenne dans la savane et l'Eucalyptus (1988-2008)

L'interception et le ruissellement ont été estimés à partir des formules de Laclau [6]. Le prélèvement racinaire (égal à la transpiration réelle) est estimé proportionnellement à la densité de racines fines et est contrôlé par l'équation de Feddes *et al.* [60] [85].

Les bilans hydriques établis montrent que les plantations d'eucalyptus consomment plus d'eau que la savane (*Tab.4.3*), mais cette consommation dépend du stade de développement de la plantation [9, 75].

La consommation moyenne des plantations d'eucalyptus est estimée à 64% de la pluviométrie, soit environ 20% de plus que la savane.

Les pertes par ruissellement superficiel sont faibles aussi bien sous savane que sous eucalyptus.

On note cependant que la somme ETR+Ruissellement+Drainage peut être différente de la pluviométrie à cause des variations de stock dans le sol.

Tableau 4.3 : Composantes des bilans hydriques de la plantation d'eucalyptus et de la savane

Composantes (en mm)	<i>P</i>	<i>Ps</i>	<i>EcT</i>	<i>In</i>	<i>Ru</i>	<i>ETR</i>	<i>Dr</i>	<i>Dr/P</i>
Savane								
1998	1691	1510	-	181	6	933	701	0.41
1999	1435	1220	-	175	5	852	613	0.43
2000	1470	1294	-	176	5	936	495	0.34
-								
-								
Moyenne (1998-2008)	1532	1335	-	177	5	907	603	0.39
Eucalyptus								
0-1 an(2001)	1173	1145	4	24	24	679	494	0.42
1-2 ans(2002)	1191	1084	12	95	17	770	386	0.32
2-3 ans(2003)	1590	1452	18	120	22	1048	552	0.35
3-4 ans(2004)	951	859	10	81	13	830	378	0.40
4-5 ans(1998)	1680	1531	16	133	27	1089	618	0.37
5-6 ans(1999)	1406	1273	13	120	23	990	500	0.36
6-7 ans(2000)	1469	1335	13	121	24	994	404	0.28
Moyenne (1998-2000)	1518	1380	14	125	25	1024	507	0.33
Moyenne (1998-2004)	1351	1240	12	99	21	914	476	0.35
Moyenne (2004-2008)	1302	1210	11	81	13	902	398	0.30
<i>Ratio euca./savane(1)</i>	<i>0.99</i>	<i>1.02</i>		<i>0.70</i>	<i>4.6</i>	<i>1.13</i>	<i>0.84</i>	
<i>Ratio euca./savane(2)</i>	<i>0.88</i>	<i>0.92</i>		<i>0.56</i>	<i>4.2</i>	<i>1.01</i>	<i>0.79</i>	
<i>P=précipitations ; Ps=pluiolessivats ; EcT=écoulement de tronc ; In = Interceptions ; Ru=ruissellements ; ETR=évapotranspiration réelles ; Dr= drainage profond (4m)</i>								
<i>(1) période de référence : 1998-2000 pour les 2 écosystèmes ; (2) pour une période de 1998-2000 pour la savane et 1998-2004 pour les eucalyptus</i>								

Pour une pluviométrie moyenne annuelle de 1200 mm à Pointe-Noire, la recharge des aquifères est estimée à 520 mm/an sous savane, à 680 mm/an la première année après plantation pour les Eucalyptus, à 410 mm/an pour les plantations de 1 à 2 ans, et à 260 mm/an pour une plantation de 6 à 8 ans (Tab.4.4). Pour une rotation de 7 ans, la recharge moyenne annuelle est estimée à 400 mm, soit 120 mm de moins que sous savane.

Tableau 4.4 : Bilan hydrique moyen annuel selon les écosystèmes majeurs de la région de Pointe-Noire (1998-2008).

Ecosystème		Pluviométrie	ETP ¹	ETR ²	Ruissellement	Drainage ³
Savane	mm	1200	840	660	4	528
	% ⁴	100	70	55	0.3	44
Plantation (0-1 an)	mm	1170	1020	600	10	660
	%	100	87	51	0.9	56
Plantation (2-3 ans)	mm	1390	1200	930	15	470
	%	100	86	67	1.1	34
Plantation (6-8 ans)	mm	1500	1140	1040	25	335
	%	100	76	69	1.7	22

¹ ETP : Evapo-Transpiration Potentielle du aux conditions climatique ; ² ETR : EvapoTranspiration Réelle

³ Drainage : quantité d'eau drainée ; ⁴ Pourcentage par rapport à la pluviométrie

Les résultats obtenus avec les mesures de pluviométrie (P), les calculs d'évapotranspiration potentielle (ETP), la relation entre la transpiration réelle (TR) et l'humidité volumique, et la répartition en profondeur des racines fines permettent de simuler fidèlement l'évolution de la transpiration des plantes et des flux d'eau (drainage profond) au cours du temps (Fig.4.7).

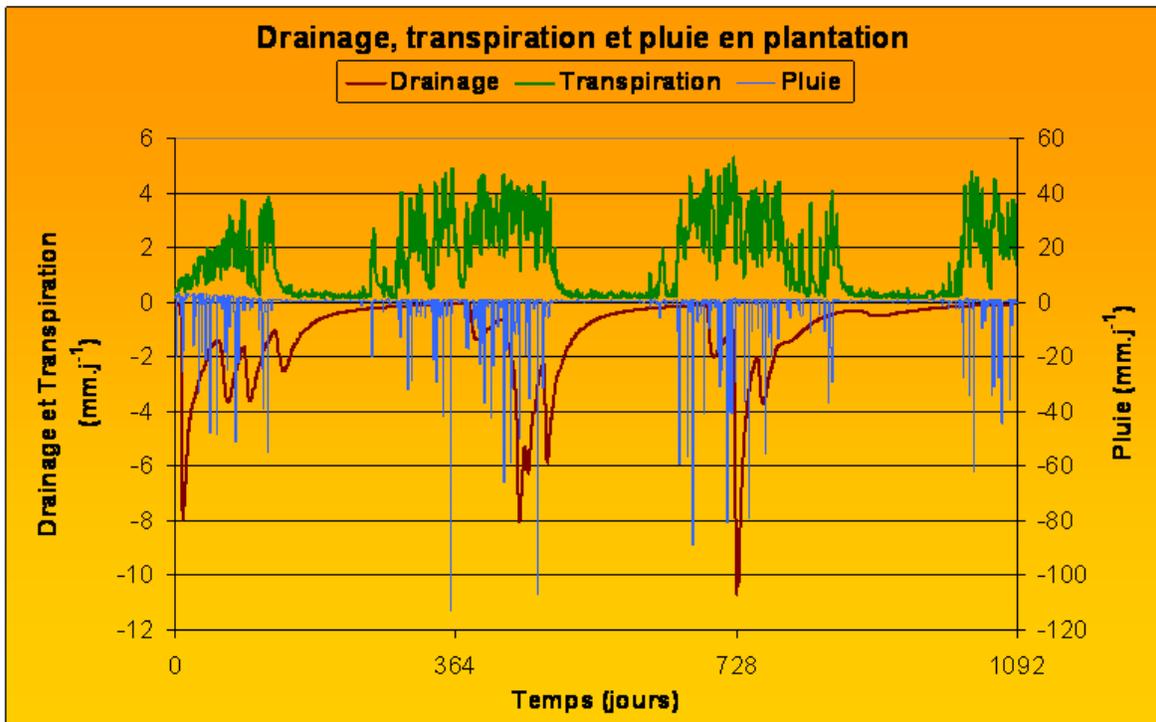


Figure 4.7 : Simulation de drainage profond et de la transpiration sous plantation d'Eucalyptus à Pointe-Noire

Conclusion partielle

L'estimation des paramètres qui caractérisent la courbe de rétention et le comportement hydrique des sols étudiés révèle une variabilité selon la profondeur. Les variations des paramètres hydriques avec la profondeur sont cohérentes avec les variations de texture, de matière organique et de CEC.

Les sols de Pointe-Noire ont une réserve utile théorique importante pour le profil 0-200 cm. Néanmoins l'humidité à la capacité au champ n'est jamais atteinte simultanément sur tout le profil des sols. Ces sols étant très drainants, la quantité d'eau qui tombe sur le sol se laisse ressuyer rapidement en profondeur.

Les bilans hydriques calculés montrent que les plantations d'Eucalyptus utilisent en moyenne 120 mm d'eau par an de plus que la savane originelle pour la durée habituelle de rotation de 7 ans. Cette augmentation de l'utilisation de l'eau est due à une transpiration plus importante des eucalyptus, surtout en saison sèche grâce à leur système racinaire plus profond (>6 m pour les eucalyptus, contre <2 m pour la savane) qui permet de prospecter des couches de sol ayant de l'eau disponible en saison sèche. Ils montrent aussi que les plantations d'Eucalyptus n'empêchent pas une recharge des nappes phréatiques superficielles, même si elles sont moindres que sous savane. Le drainage profond sous eucalyptus a toujours lieu pour deux raisons. La première est que l'ETP annuelle est en moyenne inférieure à la pluviométrie annuelle, ce qui explique que les conditions climatiques, en particulier le rayonnement, ne permettent pas aux eucalyptus de prélever toute l'eau disponible. La deuxième raison est que les sols sont très filtrants, et malgré un système racinaire très développé et croissant rapidement, les eucalyptus ne parviennent pas à capturer toute l'eau du sol lors des épisodes pluvieux importants.

Au niveau régional, la diminution de la recharge des nappes d'eau souterraine à cause des plantations d'Eucalyptus est à relativiser car ces plantations ne forment pas un massif compact. En effet, les plantations sont entrecoupées de savanes et de forêts galerie. Il est estimé qu'environ un tiers du territoire est occupé par les plantations. En extrapolant les résultats, la diminution annuelle de la recharge des nappes d'eau souterraine ne serait que de 40 mm soit moins de 10% de la recharge sous savane. Il se peut pourtant que les années sèches (pluviométrie <1000 mm), les effets des plantations d'eucalyptus sur les nappes d'eau souterraine soient relativement plus conséquents pour les populations habitant dans le périmètre des plantations.

La diminution du drainage sous eucalyptus a également pour conséquence de diminuer les risques de pertes d'éléments minéraux et de pollution des nappes d'eau souterraine par les intrants.

Ces bilans hydriques confirment également la très bonne efficacité d'utilisation de l'eau par les eucalyptus, puisque pour une consommation d'eau de 20% supérieure à celle de la savane leur production annuelle de biomasse est deux fois plus importante.

Les résultats de ce chapitre permettent de faire d'une part, (1) la simulation des écoulements souterrains à l'aide d'un modèle à saturation variable multidimensionnel pouvant gérer par exemple l'infiltration (la recharge) très rapide dans un sol très perméable ou macro-poreux – ainsi

le couplage de cette infiltration avec la nappe sous-jacente ; et d'autre part (2) en perspective la modélisation de l'intrusion saline à l'aide d'un modèle d'écoulements densitaires. Ce modèle devra tenir compte des forçages hydrologiques (pluies, évaporation), des conditions d'écoulement en amont (dans les plantations d'eucalyptus), des extractions d'eau (pompages forages industriels), et des communications (drainance) entre différents aquifères (profond, superficiel,...). On pourra commencer à *décomposer* le problème de façon simplifiée : (i) intrusion saline en plan dans la zone côtière par approche « interface abrupte » du code de calcul; (ii) analyse en coupe (x, z) de la recharge-infiltration-évaporation dans la plantation d'eucalyptus (régime à saturation variable) ; (iii) modélisation en plan du système régional d'écoulement de nappe à plus grande échelle ; et enfin (iv) intégration et couplage de ces différents aspects du cycle hydrologique.

Modélisation de la nappe de l'AQ-2 de Pointe-Noire

Les caractéristiques hydrogéologiques du système aquifère de la région de Pointe-Noire influencent les conditions de réalimentation et d'exploitation qui induisent des problèmes particuliers dont on doit tenir compte lors de la modélisation. La surexploitation des ressources en eau dans cette région conduit à une vulnérabilité des nappes de ce système face à l'intrusion d'eaux saumâtres venant de l'océan. Ce qui limite les potentialités de la ressource et peut susciter d'énormes investissements pour garantir son utilisation.

En vue d'une exploitation durable de cette ressource vulnérable, il est important d'élaborer un modèle de gestion optimale. Ce modèle est à rechercher à travers les outils méthodologiques existants. On peut utiliser les modèles mathématiques déterministes qui ont l'avantage d'intégrer les données disponibles dans un cadre logique permettant de reconstituer les lacunes et fournir une réponse globale. Ici les modèles hydrogéologiques basés sur les lois d'écoulement en milieu poreux ont été utilisés. Ils ont l'avantage d'utiliser, en entrée, des paramètres faciles à obtenir comme la transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emmagasinement, les coefficients de recharge etc... Au plan méthodologique, le calcul est réalisé en résolvant l'équation différentielle, en tenant compte des paramètres spécifiés, des sollicitations extérieures et des conditions aux frontières.

5.1 Rôle de la modélisation des écoulements souterrains

Les modèles d'écoulements souterrains sont contrôlés par la distribution des perméabilités des roches et par la configuration de la surface piézométrique qui dépend de la topographie, contrôlée par le climat [86, 87]. Ainsi, les modèles d'écoulements se basent sur « l'environnement hydrogéologique », qui englobe la topographie, le climat et la géologie [88].

La modélisation hydrogéologique permet la caractérisation hydrodynamique des aquifères en terme de : morphologie piézométrique, gradients hydrauliques, débits et régime d'écoulement. Il est ainsi possible, à partir d'une situation initiale de référence, de quantifier les impacts des exploitations sur l'évolution de régimes et de variations des stocks. .

5.2 Mise en place du modèle de la nappe des sables profonds

Le modèle mis en place concerne la nappe des sables profonds de Pointe-Noire, qui constitue la principale ressource en eau dans la région. L'objectif de cette modélisation est de simuler la piézométrie en régime permanent et de quantifier la recharge directe de l'AQ-2. Ceci dans le but de proposer un schéma global du fonctionnement de l'aquifère des sables profonds AQ-2.

Dans un premier temps, nous présentons les éléments de modélisation en régime permanent, ensuite la discrétisation des variables et enfin l'intégration des données hydrogéologiques acquises.

5.2.1 Présentation du code de calcul PROCESSING MODFLOW

Le programme de modélisation Processing Modflow for Windows (PMWIN) a été utilisé. Il s'agit d'un système de simulation pour modéliser des procédés d'écoulement et de transport d'eaux souterraines. Ce programme comporte :

- un modèle tridimensionnel modulaire MODFLOW d'eaux souterraines de différences finies, développé en Fortran par l'USGS [89] sous la version 2.81 qui fonctionne sous l'interface « Visual Basic » ;
- les modèles de transport des particules PMPATH for Windows [90] et MODPATH [91, 92, 93], de transport de corps dissous MT3D [94] ;
- et le modèle PEST [95] d'évaluation de paramètres.

Les codes soutenus par PMWIN sont employés couramment.

Le premier modèle utilisé pour notre étude de l'aquifère de Pointe-Noire est MODFLOW vu que les applications de ce modèle, en ce qui concerne la description et la prévision du comportement des systèmes aquifères, ont considérablement évoluées au cours des dernières années. A cet effet, MODFLOW peut simuler les effets des puits, des fleuves, des drains, des frontières hydrauliques, de la recharge et de l'évapotranspiration. MODFLOW soutient également le calcul du tassement élastique et non élastique d'une couche aquifère dû aux changements des charges hydrauliques.

C'est un modèle à base physique, déterministe, capable de représenter des écoulements laminaires monophasiques tridimensionnels dans des systèmes multicouches. Il est basé sur la résolution de l'équation de l'écoulement des eaux en milieu poreux : équation de diffusivité (Eq.5.1) (combinaison de la loi de Darcy et de l'équation de continuité) par la méthode des différences finies.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Eq.5.1})$$

K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} sont les conductivités hydrauliques suivant les axes x, y, et z.

h : la charge hydraulique.

W : les débits injectés ou pompés.

S_s : l'emmagasinement spécifique.

t : le temps.

Pour ce faire, l'aquifère doit être discrétisé en mailles quadrangulaires et des conditions aux limites doivent être définies. Le nombre et la taille des mailles dépendent de la précision attendue et de la nature des données sources (nombre, distribution et qualité).

La piézométrie calculée au centre de chaque maille tient compte des paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique, porosité), des conditions aux limites (potentiel ou flux imposé, possible liaison avec un réseau hydrographique...) et des conditions de recharge (infiltration, évapotranspiration, éventuels pompages).

Le second modèle utilisé est PEST (Parameter ESTimation) dont le but est d'aider à l'interprétation de données et au calibrage du modèle. Dans cette étude, il s'agit d'incrémenter le modèle afin de lui faire reproduire au mieux les données réelles. Ce modèle a permis d'évaluer différents paramètres (Perméabilités, transmissivités...).

D'où, on peut définir les trois étapes de cette modélisation de la manière suivante :

- 1) Elaboration du modèle conceptuel : définition des conditions aux limites, saisie des paramètres d'entrée du modèle ;
- 2) Calibration : apprentissage du modèle à la reconstitution des données d'entrée ;
- 3) Simulation : phase où l'on fait tourner le modèle avec des scénarios d'exploitation ou d'évolution d'autres paramètres et définition de politiques de gestion.

5.2.2 Données disponibles

Les plus anciennes mesures piézométriques proviennent des études d'alimentation en eau potable (AEP), effectuées dans la localité, par le bureau d'études IWACO, courant 1986.

En 2000 et 2001, d'autres mesures ont été faites dans le cadre de recherche pour la présentation de l'esquisse morphologique du système aquifère de Pointe-Noire.

En 2009 enfin, nous avons réalisé une campagne de mesures pour compléter les données existantes en vue de la réalisation du présent travail. Une synthèse de toutes ces données est faite aux chapitres précédents de la présente étude. Cette synthèse a rassemblé les mesures piézométriques, les caractéristiques hydrodynamiques, les données géologiques et les prélèvements par pompes.

5.2.3 Modèle conceptuel de l'aquifère de Pointe-Noire

5.2.3.1 Limites et discrétisation de la zone étudiée

Les équations hydrodynamiques en milieu souterrain sont des équations différentielles fortement non linéaires difficiles à résoudre avec les moyens analytiques habituels. Pour cela, on utilise des méthodes numériques nécessitant une discrétisation spatiale du milieu étudiée. Le système aquifère est alors découpé en réseaux de mailles constituant les lignes et les colonnes. La taille des mailles dépend de plusieurs facteurs tels que la précision souhaitée sur les calculs, le nombre et l'éloignement des singularités (puits),...

La géométrie du maillage utilisée pour notre étude est basée sur des mailles carrées de même taille, que l'on ajuste par des lignes et des colonnes entières. Pour chaque maille, le calcul se fait en un point appelé nœuds. Ici, la schématisation retenue est celle des nœuds centrés (*Fig.5.1*).

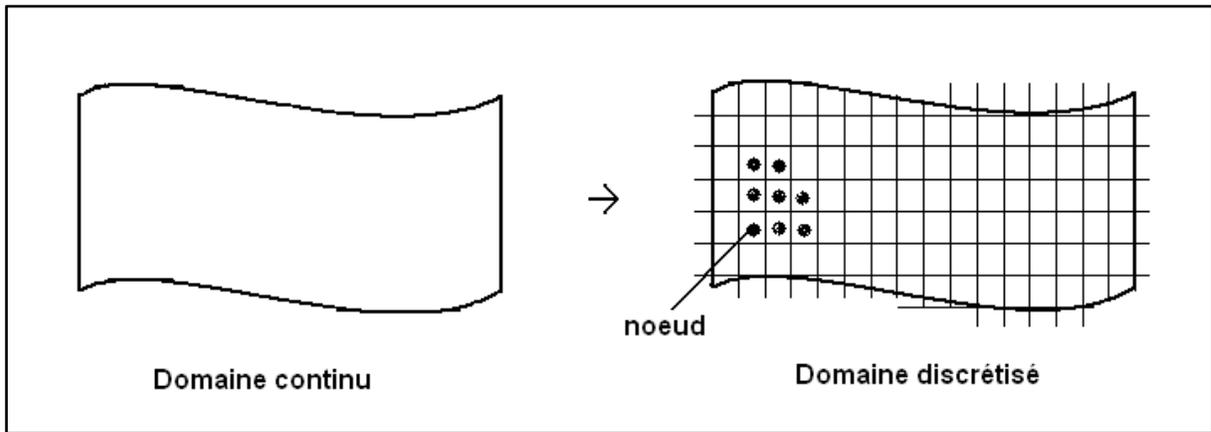


Figure 5.1: Exemple de discrétisation du milieu

La schématisation hydraulique adoptée est alors celle de Darcy-Dupuits. Les pertes de charges sont proportionnelles aux débits et à la distribution des pressions dans chaque couche qui est hydrostatique (écoulements subhorizontaux).

Le maillage

Le modèle couvre une superficie de 210 km² (Fig.5.2). Le maillage de la zone inclus des cellules inactives (mailles mortes situées dans l’océan) et consiste en un rectangle de 15 Km de long sur 14 km de large. Avec un maillage métrique, le nombre total des mailles est 21000, dont chaque maille mesure 114,28 m de côté.

5.2.3.2-Les conditions aux limites

5.2.3.2.1- Limites géologiques du modèle

La nature des limites est fondamentale pour la réalisation du modèle. Elle se doit de refléter une réalité hydrogéologique sans trop contraindre le modèle. Les conditions aux limites imposées se situent en périphérie du modèle (Fig.5.2) et sont à flux ou à potentiel imposés. Elles correspondent ainsi au fonctionnement hydrogéologique et nous permettent de mieux contrôler les débits entrant et sortant.

Les limites géologiques de la nappe sont constituées latéralement par les affleurements des roches sédimentaires adjacentes. Elles sont matérialisées à l’est par le plateau de Hinda constitué des dépôts sédimentaires du quaternaire reposant en discordance sur les faciès imperméables (cf. 1.5.2). Cette configuration peut laisser supposer une recharge directe de la nappe par les eaux de pluie provenant du plateau de Hinda. Les limites de drainage ou des échanges possibles avec les autres nappes et les limites imperméables sont décrites au paragraphe 1.5.2.

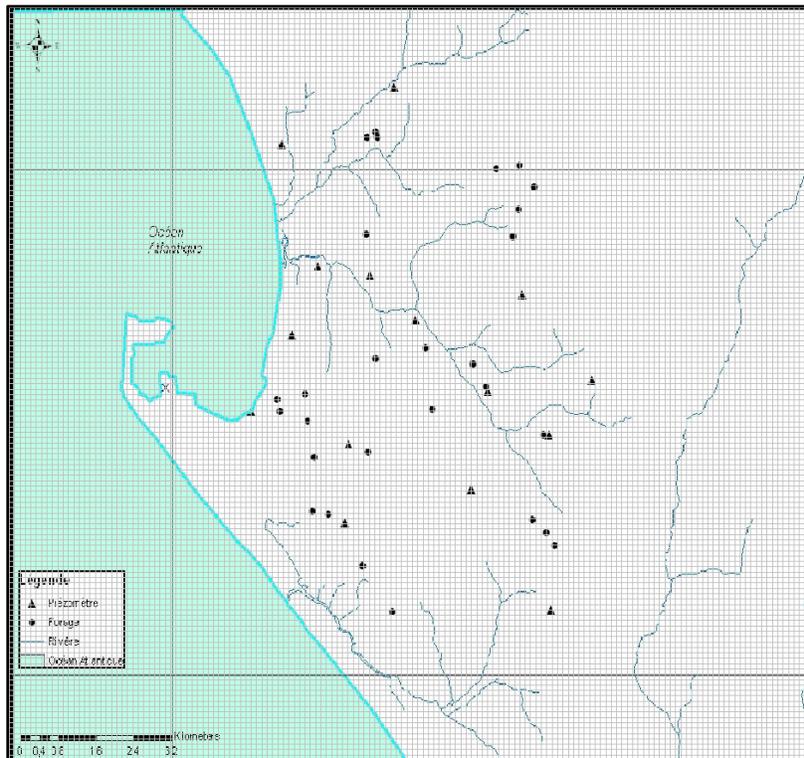


Figure 5.2: Maillage de la zone d'étude

5.2.3.3.2 Géométrie du réservoir

La géométrie du réservoir définit la couche contenue entre le toit et le mur. Elle est caractérisée par la nature géologique et l'épaisseur de l'aquifère. Ces deux paramètres conditionnent la transmissivité et par conséquent le sens de l'écoulement.

5.2.3.3.2.1 Toit de l'aquifère AQ-2

Pour toute modélisation, la connaissance de la surface de l'aquifère est nécessaire. Puisque la nappe est captive à l'échelle de la zone d'étude, la limite supérieure de l'aquifère correspond donc au superstratum de la nappe comprise entre 80 et 180 m (cf.1.5.2). Pour cela, nous avons interpolé la topographie du toit de l'aquifère en utilisant les données issues du modèle numérique de terrain (cf.2.3.3.1). Pour avoir une hauteur exacte à la réalité du toit, nous avons exploité les données issues du modèle numérique de terrain que nous avons attribué à chaque maille du modèle. La morphologie de cette surface a été interpolée afin d'obtenir une altitude pour chaque maille du modèle (cf.2.3.3.1).

Cette surface est constituée des faciès semi-perméables le permettant de se communiquer avec l'AQ-1 (cf.1.5.2).

5.2.3.3.2.2-Mur de l'aquifère AQ-2

Nous avons aussi essayé de reconstituer avec le plus de précision la morphologie générale du mur de la nappe captive des sables profonds afin d'estimer l'épaisseur de l'aquifère sédimentaire. Cet aquifère repose sur les faciès semi-perméables et imperméables. Conformément aux informations synthétisées dans le paragraphe 2.3.3.2, le substratum représente une limite à flux imposé, avec

échange par drainance avec l'aquifère AQ-3 plus profond. L'aquifère est par conséquent modélisé en système multicouches. La morphologie du mur de la nappe (cf.2.3.3.2) ne présente pas une homogénéité.

5.2.3.3.2.3 Conditions de flux

La zone d'étude est une région côtière dont toute la partie Ouest est délimitée par l'océan Atlantique. Cette limite représente une condition de flux nul pour l'aquifère AQ-2 de la région de Pointe-Noire. Elle est représentée sous forme de river dans le modèle (Fig.5.3).

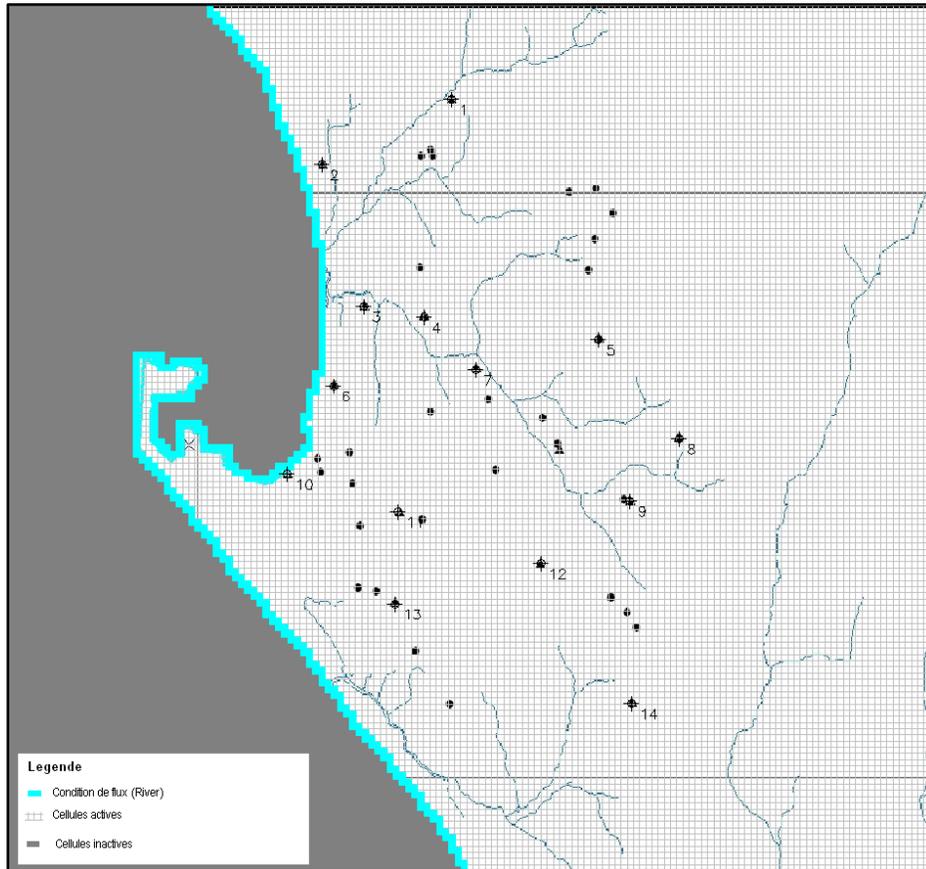


Figure 5.3: Conditions aux limites imposées dans le modèle

5.2.3.3.2.4 Conditions de flux internes

Dans le modèle, les conditions de flux internes seront exprimées en termes de recharge nette, de drainance et de débits sortants. Etant données que les zones de drainance ne sont pas connues avec exactitude et qu'à l'heure actuelle, leur contribution dans le bilan hydrodynamique relève d'énigme. C'est pourquoi, devant l'absence de données descriptives fiables, plusieurs conditions seront envisagées :

- une recharge directe diffuse infinitésimale par les précipitations (cf.4.8.2) ou, une recharge concentrée, mais homogénéisée au niveau de maille,
- une drainance avec AQ-1 ;
- une drainance avec AQ-3 ;
- des débits sortants négatifs, correspondant aux prélèvements par pompages dans la région.

5.2.3.3.2.5 Conditions aux limites

La nappe que nous modélisons, est une nappe profonde confinée et n'est pas en contact avec les cours d'eau, sauf l'océan où elle se déverse. Dans ce cas les conditions de potentiel sont nulles pour l'aquifère AQ-2.

5.2.3.3.2.6 Paramètres hydrodynamiques

5.2.3.3.2.6.1 Emmagasinement

En régime permanent ce paramètre n'intervient pas ; par conséquent sa valeur exacte importe peu.

5.2.3.3.2.6.2 Perméabilité

Dans le paragraphe 2.3.2.1 nous avons présenté la gamme de variation spatiale des perméabilités de la zone d'étude. Cette variabilité peut être due à la représentativité régionale des mesures ponctuelles surtout dans un contexte sédimentaire côtier. Dans ces conditions, nous entrerons dans le modèle, comme première base de travail, la distribution spatiale des perméabilités établie au paragraphe 2.3.2.1 que nous affinerons au fur et à mesure du calage dans une gamme de variations d'environ $0,366 \cdot 10^{-5}$ à $6,33 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Au final, une moyenne de $0,96 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ a été choisie, pour obtenir de bons résultats.

5.3 Résultats

La première étape a été de simuler la piézométrie observée de 1986 (année de référence avant l'intensification de l'exploitation de la nappe dans l'agglomération), puis la piézométrie de 2009 (une des années de la période de la surexploitation) en régime permanent. Pour ce faire nous avons fait d'abord le calage de la recharge, de la transmissivité et du réservoir de la nappe AQ-2. Nous n'avons pas pu effectuer les simulations en régime transitoire parce que les données recueillies dans la bibliographie et les mesures de terrain ne sont pas représentatives et ne prennent en compte que quelques mois d'où la difficulté à définir le pas temps de simulations.

Le calage a consisté en un ajustement successif des perméabilités, des transmissivités et de la recharge par les précipitations pour reproduire au mieux la piézométrie observée.

5.3.1 Simulation en régime permanent

5.3.1.1 Calage des perméabilités

Les perméabilités ajustées sont hétérogènes et varient de $1,92 \cdot 10^{-5}$ à $1,83 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Nous avons travaillé à partir de la position des zones supposées les plus perméables que nous avons conservées au cours du calage. Elles sont représentées (*Fig.5.4*) en trois étages de perméabilités correspondant aux cordons sableux parallèles à la côte. On remarque, qu'il y a une variation latérale des faciès, de la côte vers le continent. Ceci se traduit en terme piézométrique par une variation du gradient hydraulique dans la carte piézométrique.

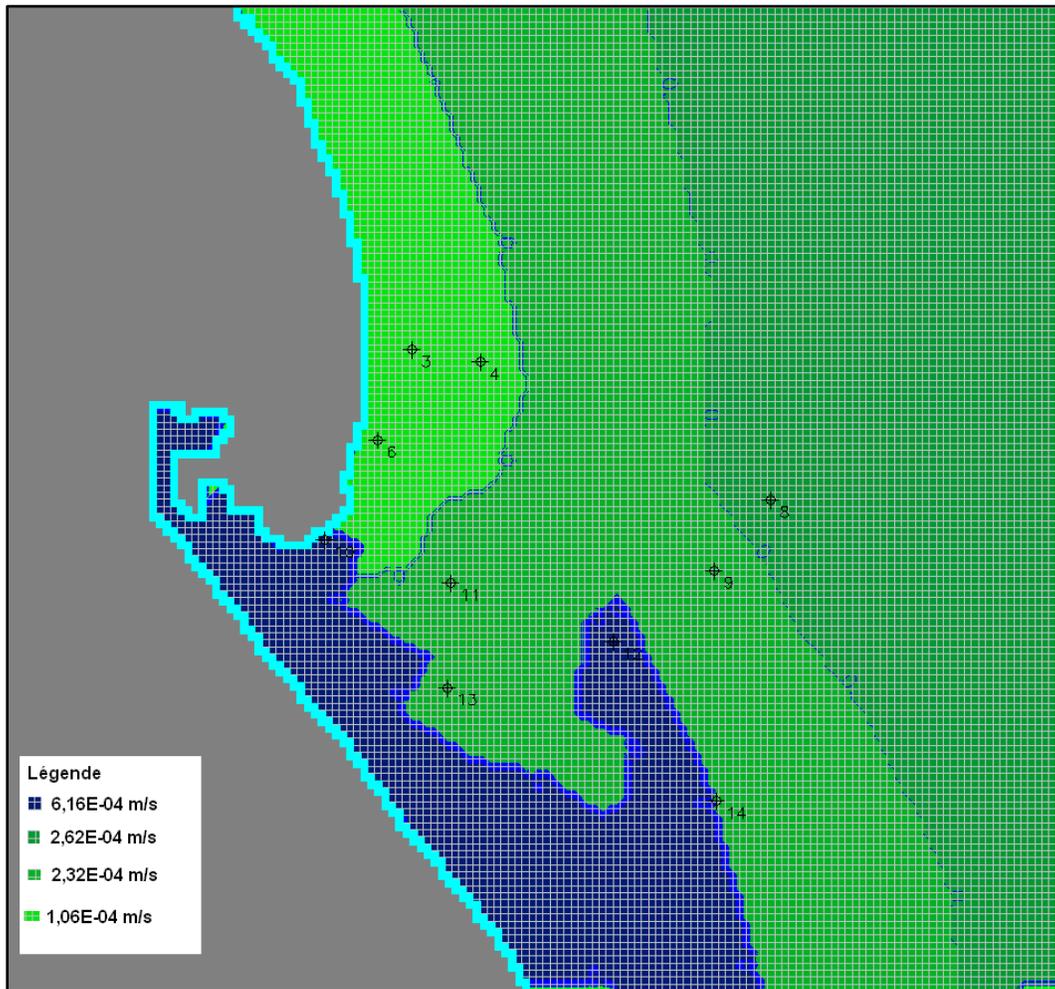


Figure 5.4: Spatialisation des perméabilités calées

En comparaison avec les valeurs ponctuelles connues de terrain, les zones de perméabilité moyenne obtenues correspondent dans certains cas aux valeurs ponctuelles mesurées.

Ces données ont été calibrées, jusqu'à obtenir une valeur moyenne nette de $9.9.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, nous avons conservé la variabilité de la conductivité hydraulique en utilisant le calage de la piézométrie observée. Cette valeur est très proche de la moyenne de valeurs observées dans la région par les différents essais de pompage ($9.6.10^{-5} \text{ m/s}$).

Une variabilité de la transmissivité évoluant dans le même sens que la perméabilité, a été observée. En prenant la valeur moyenne de la perméabilité obtenue au cours du calibrage, une transmissivité moyenne a été estimée à environ $5,9.10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ pour une épaisseur moyenne de l'aquifère AQ-2 de 60 m.

5.3.1.2 Calage de la piézométrie

Dans le calage de la piézométrie de 1986, nous n'avons pas tenu compte des prélèvements par forages. Ceux-ci ont été négligés car ils représenteraient moins de 1% des réserves exploitables et ne présenteraient pas une sensibilité. Les piézométries obtenues avec le modèle sont représentées sur la figure 5.5.

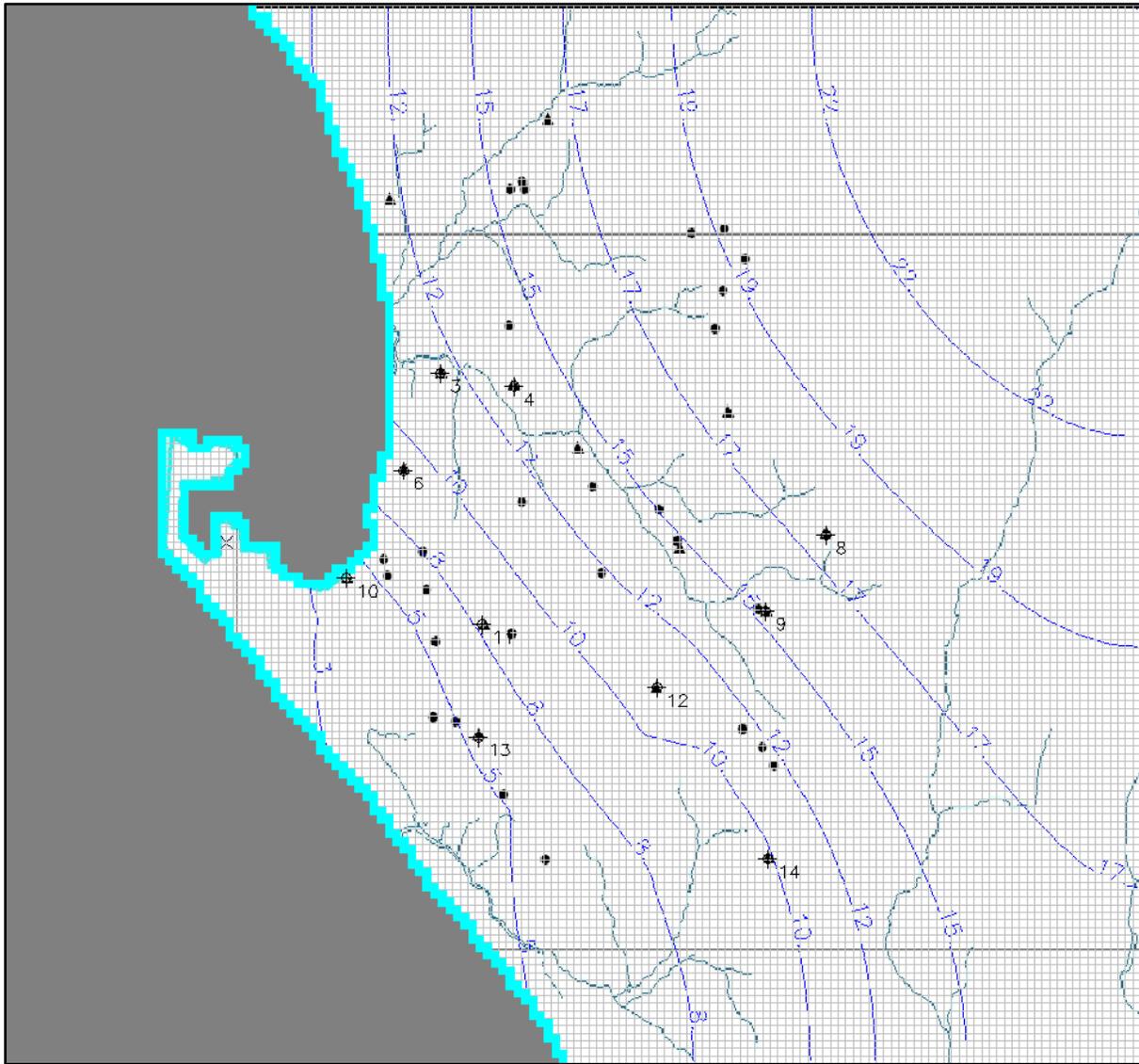


Figure 5.5: Piézométrie simulée en régime permanent de l'aquifère AQ-2 (1986)

Cette carte piézométrique montre un gradient nord est – sud ouest, dont l'écoulement est dirigé vers l'océan.

La recharge calée grâce à la simulation en régime permanent est de $1,7 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$. Cette valeur est finalement beaucoup plus proche de celle rapportée dans la littérature [9] et dans le chapitre précédent ($1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$).

Cependant, comme nous pouvons le remarquer sur la figure ci-dessous (*Fig.5.6*), la régression linéaire montre la relation entre valeurs observées et simulées. Ce qui ne veut pas dire que la courbe des valeurs observées est confondue à celle des valeurs simulées.

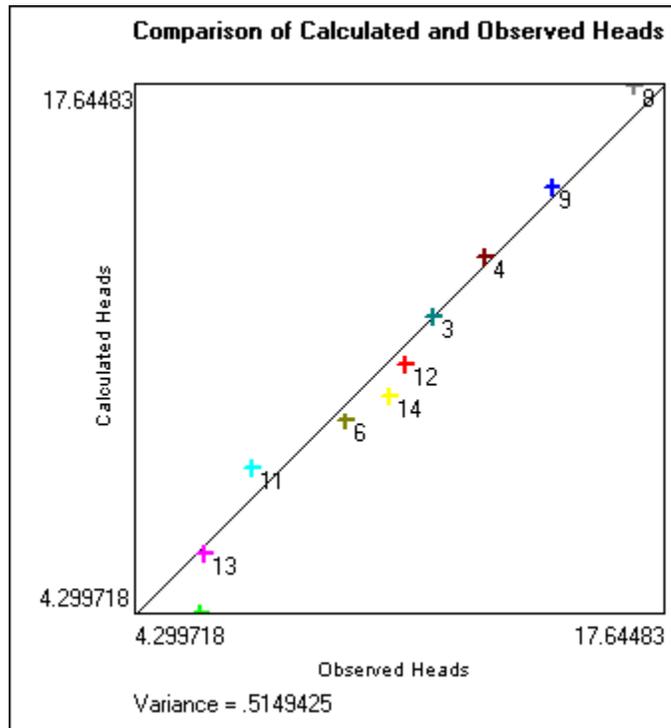


Figure 5.6: Droite de régression entre les données piézométriques observées et calculées

Actuellement la région côtière connaît une exploitation intense de ses ressources en eau de l'AQ-2. Ainsi, nous avons intégré dans le modèle le flux de pompage pour observer la sensibilité et le comportement de la nappe. En utilisant la piézométrie de 2009 avec les mêmes paramètres, nous constatons que la morphologie de la surface piézométrique est influencée par le débit de pompage. Au débit de pompage actuel (supérieur au seuil d'exploitation : $40000\text{m}^3.\text{j}^{-1}$, seuil défini par la Société Nationale de Distribution d'Eau dans la région de Pointe-Noire), la surface piézométrique présente des dépressions au centre de la région marquant une surexploitation de la nappe (Fig.5.7)

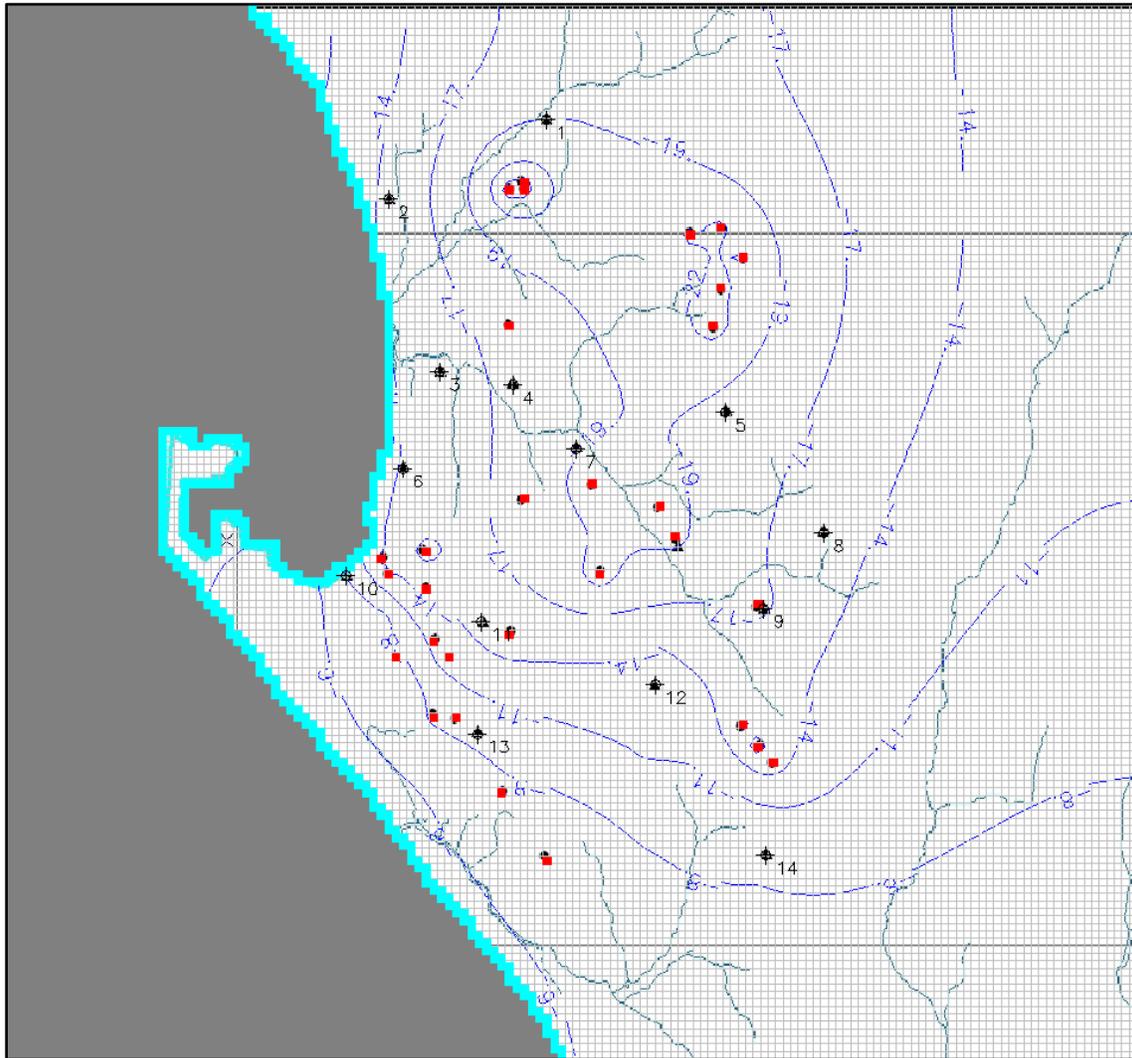


Figure 5.7: Sensibilité au pompage de la piézométrie de Pointe-Noire (carrés rouges représentent les exutoires de pompage)

5.3.2 Calibrage de la recharge

Une estimation précise de la recharge des nappes est indispensable pour une gestion optimale des ressources en eaux souterraines. Plusieurs méthodes ont été mises au point en bassins sédimentaires pour son évaluation, méthodes conduisant à des résultats très disparates compte tenu de la variabilité des propriétés des milieux et de la conception même des outils d'évaluation utilisés [96].

On admet généralement que l'alimentation des aquifères s'effectue suivant trois mécanismes : par infiltration directe des précipitations aux aires perméables, par percolation latérale à partir des berges des cours d'eau, et à travers la contribution d'eau en provenance d'autres aquifères [97]. Mais dans le cas le plus général, l'alimentation des réservoirs aquifères est subordonnée à l'infiltration efficace des précipitations pour les aquifères à nappe libre, c'est-à-dire la part de la pluie qui échappe à l'évapotranspiration et au ruissellement [98]. Comme le souligne J. Margat, une connaissance plus fine et plus rigoureuse de l'infiltration efficace implique une formulation analytique des transferts d'eau dans la zone non saturée.

Le but de notre travail n'est pas de passer en revue les différentes méthodes traitant de la question mais d'appliquer certaines d'entre elles qui s'adaptent à notre contexte. Nous disposons des données de précipitations (entrée) ainsi que des chroniques de débits en un exutoire (sortie) ainsi qu'une chronique plus ou moins élaborée de suivi piézométrique et nous cherchons à « estimer la fonction de transfert qui les relie ».

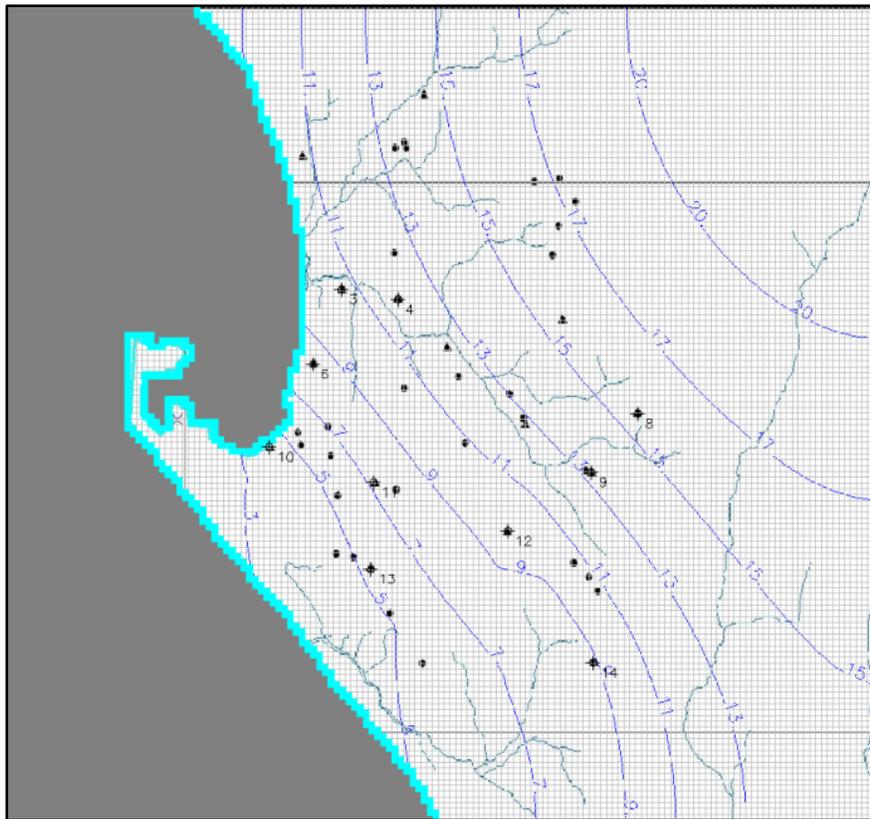
L'hypothèse d'une drainance entre les aquifères conformément au schéma de fonctionnement énoncé (cf.2.3.) a été respectée. Cette surface a été placée sur une zone très étendue considérant, d'un point de vue totalement subjectif et par commodité, qu'à partir de l'isopièze 19 m. Dans ces conditions, le calage du modèle débouche sur des valeurs comprises entre 53,6 et 59,1 mm.an⁻¹ environ. La zone d'infiltration efficace a été définie au niveau du plateau de Hinda. La recharge nette de l'AQ-2 est en moyenne autour de 56,3 mm.an⁻¹.

5.3.3 Sensibilité de la recharge

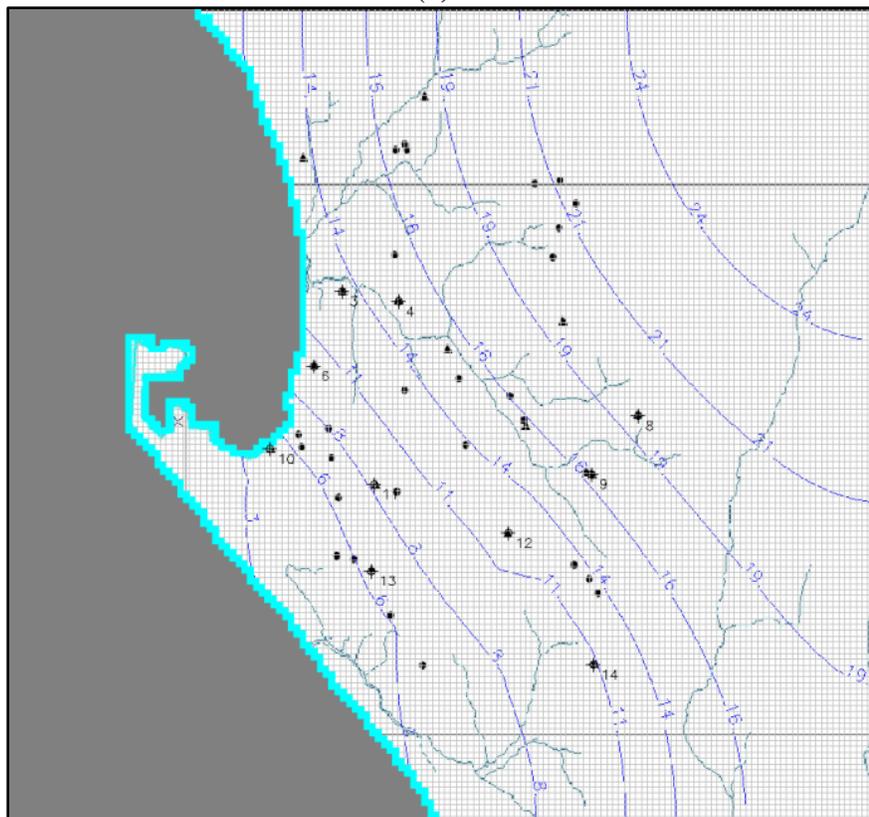
Nous avons tout d'abord testé le modèle avec une recharge uniforme par la pluie sur l'ensemble de la zone afin d'apprécier en quelles proportions la piézométrie était influencée par l'infiltration diffuse. Tous les autres paramètres demeurent fixes.

- 0 mm de recharge provoque un écoulement de surface uniforme soutenu par l'altitude des niveaux topographique et s'écoulant du nord est vers le sud ouest à raison de 2500 m³/jour,
- une baisse de 10% de recharge, les isopièzes à partir de 10 commencent à se décaler vers l'est, par conséquent on assiste à une baisse de la surface piézométrique autours de 1m dans la plaine côtière et 2m dans la partie est de la région (Plateau de Hinda) (Fig.5.8a).
- une augmentation de 10% de la recharge crée une augmentation du niveau de la surface piézométrique de 2 m dans la partie est de la zone d'étude (Plateau de Hinda), de 1m au centre de la région, provoquant ainsi une hausse du gradient piézométrique vers le centre de l'agglomération de Pointe-Noire (Fig.5.8b). Nous constatons que l'augmentation du gradient piézométrique est graduellement décroissante de l'est vers l'ouest.

Ces exemples illustrent l'importance extrême des paramètres de la recharge dans le bilan hydrodynamique du système modélisé.



(a)



(b)

Figure 5.8: Piézométries calculés à Pointe-Noire avec : (a) une baisse de la recharge de 10%, (b) avec une augmentation de la recharge de 10 %.

5.3.4 Sensibilité des perméabilités

Une des principales difficultés rencontrées au cours du calage est l'estimation des perméabilités. Par exemple, une baisse de 10 % de la perméabilité le long du "river" (Océan), suffit à baisser de 1m le niveau piézométrique dans toute la zone d'étude. A l'inverse, une hausse de 10 % provoque une avancé progressive des isopièzes vers l'est (Fig.5.9). Dans ces conditions, il devient extrêmement difficile de trouver un compromis lors du calage et la précision des valeurs est illusoire.

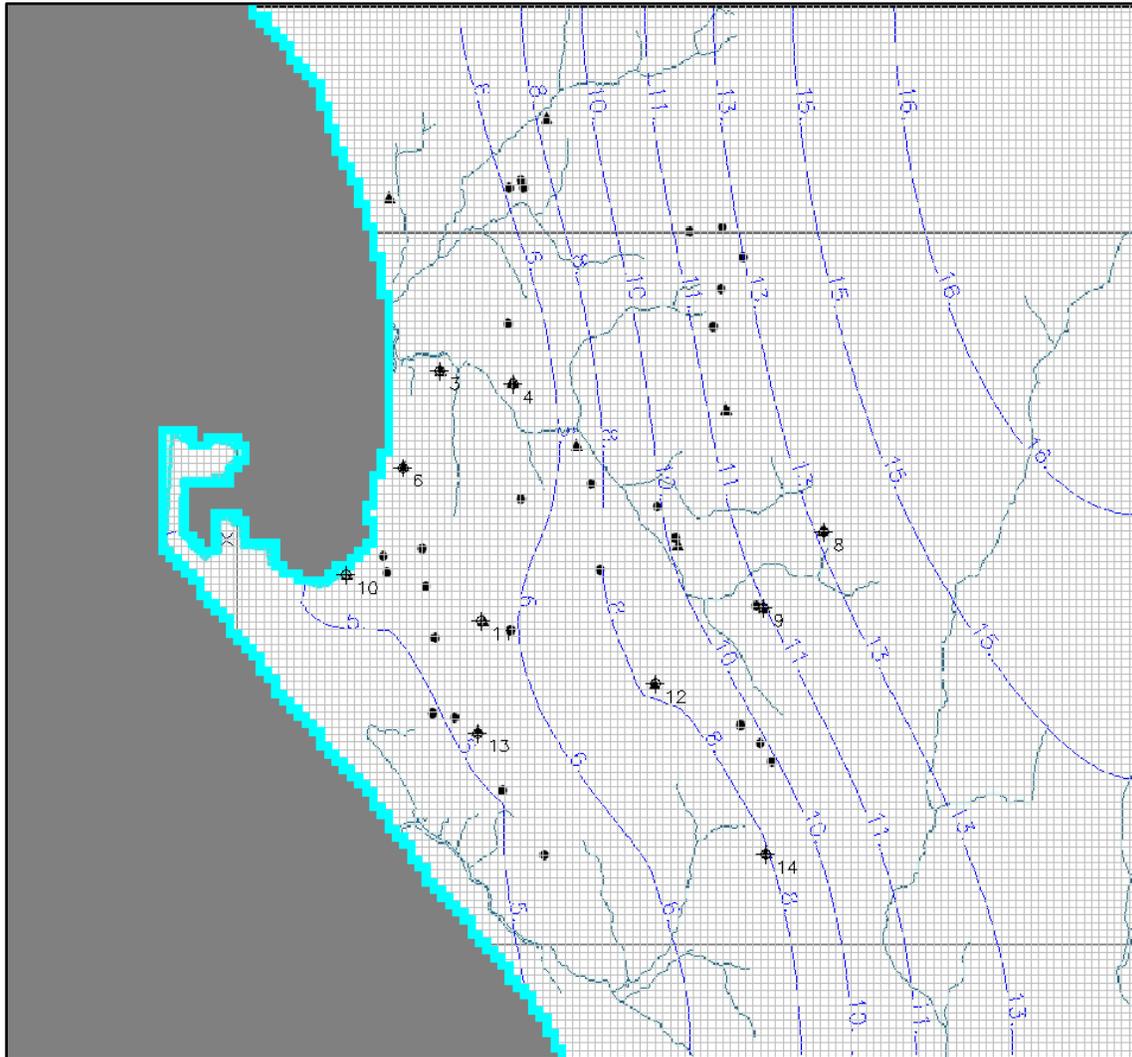


Figure 5.9: Piézométrie calculée pour une hausse de 10% de perméabilité

Il est évident que le comportement du modèle est fonction de la qualité des données. Ainsi l'étude de la sensibilité montre que, pour aboutir à un résultat unique, il faut diminuer les incertitudes et donc, dans le même temps, les intervalles de variation des valeurs mesurables sur le terrain.

Un travail sans « garde-fou » revient, lors de la modélisation, à caler tous les paramètres simultanément. Ce cas de figure nous met en difficulté pour la validation d'un schéma de fonctionnement particulier. Notre zone d'étude est caractérisée par une extrême variabilité des paramètres de terrain qui représente un obstacle à la régionalisation des spécificités locales. Des

études plus poussées pourraient permettre de mieux cerner les variables d'entrée et de proposer une gamme moins étendue de combinaisons possibles à l'aboutissement d'un résultat lors de la modélisation.

Conclusion partielle

Les résultats de la modélisation numérique des écoulements souterrains, où toutes les hypothèses ont été prises en compte, sont satisfaisants. D'une manière générale, toute modélisation hydrodynamique réalisée à partir de trop peu de données comporte un risque de ne pas aboutir. Dans le cas favorable, le croisement des rares données disponibles permet néanmoins de contraindre énormément le modèle et d'aboutir à un schéma cohérent raisonnablement précis. Dans le cas défavorable, les nombreuses incertitudes s'additionnent et de multiples combinaisons très diverses permettent d'aboutir au même résultat sans qu'il soit possible de trancher. C'est le premier cas qui est arrivé au terme de notre modélisation. Cette situation débouche sur un contexte où le croisement de quelques rares données obtenues dans la région s'est compensé entre eux, tout en restant dans une gamme de valeur acceptable par rapport aux données *in situ*.

Nous avons pris pour exemple la perméabilité, la transmissivité, la géométrie du réservoir (toit et mur de la nappe) et la recharge. Nous avons montré que les valeurs ajustées sont en accord avec les valeurs mesurés. Le problème crucial est qu'actuellement, aucune observation de terrain ne peut privilégier une hypothèse par rapport à une autre, car leur insuffisance ne permet pas de faire une modélisation en régime transitoire.

Nous avons pu poursuivre l'opération de calage du modèle puisque nous devons dans un même temps paramétrer toutes les variables. Le calage de la perméabilité, a permis de repérer trois zones de perméabilité se rapportant aux différents horizons géologiques. La recharge moyenne de l'AQ-2 a été estimée à $56,3 \text{ mm.an}^{-1}$

En revanche l'étude de la sensibilité aux différents paramètres a permis de se rendre compte de la nécessité de rechercher plus de données de base avant la mise en œuvre du projet de modélisation. D'autres études de terrain doivent permettre d'identifier avec plus de certitude les zones de drainance et leur contribution dans le bilan hydrogéologique.

Des études géochimiques complémentaires faisant suite aux études déjà menées au moyen de radio-isotopes pourraient apporter la lumière sur le choix des hypothèses à privilégier.

Conclusion générale

Cette étude du système aquifère du bassin sédimentaire côtier de la région de Pointe-Noire conduit à des conclusions et des réflexions d'ordre régional et méthodologique. Du point de vue de l'hydrogéologie régionale, elle apporte des connaissances et des éléments de compréhension au fonctionnement général de l'aquifère du bassin sédimentaire de Pointe-Noire. Sur le plan méthodologique, elle utilise les trois composantes de l'étude des systèmes aquifères : géologie, hydrodynamique et hydrochimie. Enfin les résultats obtenus indépendamment à partir de ces trois composantes sont rassemblés en un tout cohérent sous la forme d'un modèle hydrogéologique de l'AQ-2.

Des deux premières composantes, nous pouvons affirmer que la géométrie du réservoir est maintenant mieux définie. Les contours en surface étaient certes connus puisqu'ils suivent les affleurements mais les limites sous couverture et l'organisation des corps sédimentaires n'avaient pas fait l'objet d'une description à l'échelle du bassin. L'étude de l'ensemble des données géologiques disponibles (forages, géophysique, pétrolière, cartes et descriptions géologiques), montre que le bassin sédimentaire est composé de cinq couches aquifères qui ne présentent pas une stratigraphie homogène. Ces couches aquifères sont séparées par intercalations des matériaux très composites (calcaire marneux, grès consolidés, argile...) de la série argilo gréseuses rougeâtre du grésodolomitique. Bien que ces différentes couches aquifères soient précisément individualisées, la plus productive, et de ce fait la plus exploitée, reste l'AQ-2. Cette dernière possède des zones de productivité variable. L'AQ-2 est un aquifère largement exploité qui combine fréquemment les caractéristiques hydrodynamiques avec les autres couches aquifères (AQ-1 et AQ-3). Ce matériau, avec une porosité totale élevée de l'ordre de 20 % et une transmissivité moyenne de $5,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, constitue un aquifère homogène et présente la spécificité d'avoir une perméabilité, lui permettant de libérer une quantité importante d'eau. L'AQ-2 a des coefficients d'emmagasinement, de $4,2 \cdot 10^{-5}$ à $5,1 \cdot 10^{-4}$ en nappe captive. Elle est poreuse et perméable. En conséquence, l'emmagasinement et le transfert gravitaire d'eau rendent possible l'existence des zones de drainance, suffisamment denses et interconnectées avec d'autres couches aquifères exploitables (AQ-1 et AQ-3). La morphologie de sa surface piézométrique présente deux zones hydrologiques liées à la topographie et/ou au relief de la zone d'étude. Une zone de la plaine littorale caractérisée par des courbes fermées traduisant des protubérances et une forte profondeur de la surface piézométrique avec un gradient hydraulique de 0,03. Ce gradient est l'expression d'un débit d'écoulement freiné ; c'est-à-dire moins de transferts de flux suite à une faible perméabilité qui traduit un drainage plus faible que l'alimentation. Et une zone des plateaux qui est caractérisée par des courbes parallèles au talus

Les variations saisonnières de la piézométrie est négligeable sur le réseau de mesure, mais on note une baisse du niveau d'eau pendant l'activité de pompage et une remontée à la fin de l'activité. A une échelle inter-annuelle, la comparaison des cartes piézométriques et de données qualitatives a permis d'apprécier l'évolution des niveaux sur près de 25 ans. On note une

réduction de l'intensité de l'artésianisme (baisse de 4 m à 12 m de la pression) imputable à la multiplication des forages. D'un point de vue quantitatif l'aquifère AQ-2 subit la pression anthropique mais la ressource ne serait pas menacée si l'exploitation et la recharge restent inchangées.

Les résultats fournis par l'hydrochimie viennent conforter les hypothèses de fonctionnement que nous avons formulées auparavant. L'analyse géostatistique des concentrations en ions majeurs, révèle une prédominance des cations ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) sur ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), des ions bicarbonates HCO_3^- sur les ions sulfates SO_4^{2-} et chlorures Cl^- . Les ions bicarbonates proviennent principalement de la dissolution des minéraux carbonatés et silicatés. En se basant sur les constituants majeurs, les eaux de la nappe à l'étude correspondent aux faciès chimiques mélange cations – HCO_3 et $\text{Ca} - \text{HCO}_3$ qui représentent 64% des piézomètres. Les valeurs de la conductivité électrique sont relativement élevées au sud-ouest de la zone d'étude, ce qui laisse supposer une influence probable de l'eau de mer sur la composition chimique des eaux dans cette partie de la zone d'étude. Le rapport Na^+/K^+ permet un regroupement des piézomètres échantillonnés en trois groupes qui sont confirmés par une analyse statistique de classification hiérarchique ascendante.

Les résultats de la modélisation des ressources en eau montrent l'impact causé par les activités humaines sur le cycle hydrologique, dans la zone de recharge du système aquifère à multicouches de Pointe-Noire. Cette modélisation a permis d'évaluer la recharge de l'aquifère. Cette recharge a été évaluée dans deux écosystèmes (plantations d'Eucalyptus et savane) occupant la zone de recharge du système. Ces résultats montrent que les plantations d'Eucalyptus n'empêchent pas une recharge du système, même si elles sont moindres que sous savane. Le drainage profond sous Eucalyptus a toujours lieu pour deux raisons. La première est que l'ETP annuelle est en moyenne inférieure à la pluviométrie annuelle, ce qui explique que les conditions climatiques, en particulier le rayonnement, ne permettent pas aux Eucalyptus de prélever toute l'eau disponible. La deuxième raison est que les sols sont très filtrants, et malgré un système racinaire très développé et croissant rapidement, les eucalyptus ne parviennent pas à capturer toute l'eau du sol lors des épisodes pluvieux importants. Pour une pluviométrie moyenne annuelle de 1200 mm à Pointe-Noire, la recharge des aquifères est estimée à 520 mm/an sous savane, à 680 mm/an la première année après plantation, à 410 mm/an pour les plantations de 1 à 2 ans, et à 260 mm/an pour une plantation de 6 à 8 ans. Pour une rotation de 7 ans, la recharge moyenne annuelle est estimée à 400 mm, soit 120 mm de moins que sous savane.

Du point de vue méthodologique, le fait de fixer pour objectif l'élaboration d'un modèle hydrogéologique oblige à adopter une démarche scientifique systématique et rigoureuse. Tous les éléments doivent être quantifiés et, à défaut de données précises, les hypothèses doivent être clairement formulées et argumentées au mieux, sous peine de rendre la démarche incohérente. Une connaissance minimale du réservoir, de son remplissage, de sa structure, de sa géométrie et surtout de sa recharge devient indispensable. Le suivi de la piézométrie à différentes échelles de temps s'impose comme un élément primordial pour confronter les résultats du modèle avec les observations.

En définitif, ces éléments d'hydrogéologie physique (par opposition aux apports de l'hydrochimie) nous ont permis de construire un modèle hydrogéologique de l'aquifère AQ-2 de

Pointe-Noire. Les résultats de la modélisation numérique des écoulements souterrains de l'AQ-2 semblent être satisfaisants. D'une manière générale, les valeurs de la piézométrie ajustées montrent une cohérence tout à fait acceptable avec les valeurs mesurées. Le calage de la perméabilité a conduit à repérer trois zones de perméabilité se rapportant aux différents horizons géologiques. La recharge moyenne de l'AQ-2 est estimée autour de $56,3 \text{ mm.an}^{-1}$

En revanche l'étude de la sensibilité aux divers paramètres montre la nécessité d'accumuler plus d'informations avant de relancer un nouveau projet de modélisation dans l'ensemble du système aquifère.

En perspectives, ces éléments d'hydrogéologie physique, les résultats de la première modélisation de l'AQ-2 et d'autres études de terrain qui doivent permettre d'identifier avec plus de certitude les zones de drainance et leur contribution dans le bilan hydrogéologique, permettront de construire un modèle hydrogéologique de l'ensemble du système aquifère de la région de Pointe-Noire.

Néanmoins ils sont parfois négligés dans les études hydrogéologiques. L'étude de la lithologie est souvent une entreprise fastidieuse et décourageante, il faut pourtant connaître le contenant pour étudier le contenu. La piézométrie est la seule mesure possible de l'énergie du système. L'établissement et le suivi d'un réseau de mesure des niveaux d'eau sont contraignants. Mais à long terme ils peuvent apporter des renseignements précieux sur les circulations dans l'aquifère, l'évolution de celles-ci, leurs relations avec la recharge et les aquifères voisins. Avec l'utilisation des capteurs et des enregistreurs modernes, l'observation de phénomènes rapides devient possible. L'étude de l'effet barométrique est alors un outil pour estimer la valeur du coefficient d'emmagasinement (rarement connu par les essais de pompages sur des ouvrages agricoles ou domestiques) et pour évaluer le confinement de l'aquifère.

La simple constatation d'un niveau piézométrique élevé ne permet pas de trancher entre une faible diffusivité en condition d'infiltration moyenne ou une diffusivité moyenne mais avec une infiltration très importante. Des études géochimiques complémentaires faisant suite aux études déjà menées au moyen de radio-isotopes pourraient apporter la lumière sur le choix des hypothèses à privilégier.

En effet, la géochimie ne peut évidemment pas tout expliquer, pour le cas présent. On ne peut pas encore affirmer que la nappe s'écoule, qu'elle se renouvelle, ou bien que ses réserves s'épuisent. Il faudra sans doute faire appel à d'autres techniques pour répondre à ces questions, en particulier aux déterminations de l'âge des eaux par les méthodes isotopiques, qui sont maintenant de plus en plus utilisées. L'articulation étroite de ces techniques permettra une meilleure approche des connaissances hydrogéologiques de l'ensemble aquifère.

Bibliographie

- [1] Moukolo N., (1984) : Ressources en eau souterraine et approvisionnement – essai d’analyse socio-économique en région équatoriale humide (régions de Brazzaville et Pointe-Noire, Congo). Thèse de doctorat 3^e cycle en géologie appliquée, Université des sciences et techniques du Lanquedoc. 89 p, figures et annexes.
- [2] Moukolo N., (1992) : Etat de connaissances actuelles sur l’hydrogéologie du Congo Brazzaville. *Hydrogéologie*, n° 1-2, pp. 47-58, 6 fig.
- [3] Suchel J.R., (1972) : La répartition des pluies et des régimes pluviométriques au Cameroun. *GECET et CNRS*, n°5, Yaoundé, 287 p.
- [4] Samba-Kimbata M.J., (1991) : Précipitations et bilans de l’eau dans le bassin forestier du Congo et ses marges. Thèse de doctorat d’état, *Univ. Bourgogne, Dijon*, 241p +figures.
- [5] Sitou L., (1994) : Les cirques d’érosion dans la région de Pointe-Noire (Congo) : Etude géomorphologique. Thèse *doct. Univ. Louis Pasteur Strasbourg I*, 221 p.
- [6] Laclau J.P., (2001) : Dynamique du fonctionnement minéral d’une plantation d’eucalyptus. Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais ; conséquence pour la gestion des plantations industrielles. Thèse de *Doc. INA-PG*, 146 p.
- [7] Jamet R., (1969) : *Carte pédologique de reconnaissance au 1/200 000. Feuille de Pointe-Noire*. Rapport explicatif. Document ORSTOM, Brazzaville, 103 p.
- [8] Jamet R., (1975) : *Evolution des principales caractéristiques des sols de reboisement de Pointe- Noire*. Document ORSTOM, Brazzaville, 34 p.
- [9] Moukandi N’kaya G.D., Nganga D., Mabiala B., Thaty C. and Deleport P., (2011): Parameterization of the Hydric Transfer Model in three Eucalyptus Plantations in Congo. *J. Environ. Sci. Technol.*, 4 (3) : 340 – 353.
- [10] Massengo A., (1970) : Contribution à l’étude stratigraphique, sédimentologique et minéralogique de la Série Plio-Pléistocène du Bassin de côtier du Congo-Brazzaville. *Thèse 3^e cycle, Univ. Bordeaux*, 159 p.
- [11] Haas J.O., (1937) : Les recherches pétrolières en Afrique Equatoriales Française. *C.R. II^e Congrès Mondial pétrole, Fr., I, Section I*, pp183-189.
- [12] Hourcq V., (1943) : Les terrains sédimentaires de la région côtière de l’Afrique Equatoriale Française. *Bull. serv. des mines*.
- [13] Cosson J., (1955) : Carte géologique de reconnaissance de l’AEF. *Feuille N° SB-32. NE.E. I Pointe-Noire au 1/500 000*. Direction des mines et de la géologie de l’AEF. Notice explicative ; *bull de la Direction des mines et de la géologie*. N° 7, pp 7-12,
- [14] Dadet P., (1969) : Notice explicative de la carte géologique de la république du Congo Brazzaville au 1/500 000 (zone comprise entre les parallèles 2 et 5 Sud). *Mém. Du BRGM, n° 70*.
- [15] Michel P., (1973) : Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Thèse d’Etat Strasbourg (1970), *Mém. ORSTOM 63, Paris, 3 tomes, 752 p., cartes h.t.*

- [16] Peyrot B., (1983) : Interprétation : géomorphologie du littoral et de la façade maritime atlantique de la république populaire du Congo. In Travaux et documents de géographie Tropicale ; CECET N°49, p 75-98.
- [17] Giresse P. et Kouyoumontzakis G., (1990) : Témoins quaternaires du littoral du Congo et du Sud du Gabon. In paysage quaternaires de l'Afrique centrale atlantique. *Ed. ORSTOM*, pp 106-109.
- [18] Leroux M., (1975) : Climatologie dynamique de l'Afrique. Travaux et Documents de Géographie Tropicale, n° 19 CEGET, CNRS, pp. 88-112.
- [19] Samba-kimbata M.J., (1978) : Le climat du Bas Congo. Thèse 3^e cycle, Univ. Bourgogne, Dijon, 280 p. + figures.
- [20] M'pounza M. et Samba-Kimbata M.J., (1990) : Aperçu sur le climat de l'Afrique centrale occidentale. In Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique, ORSTOM, pp. 31-41.
- [21] Bigot S., (1997) : Les précipitations et la convection profonde en Afrique centrale : Cycle saisonnier, variabilité interannuelle et impact sur la végétation. *Thèse doct. Univ. Bourgogne, CRC*, 282 p.
- [22] Samba G. and Nganga D., (2011): Rainfall variability in Congo-Brazzaville 1932-2007. *Int. J. Climatol.* Published online in wiley online library 20.
- [23] IPCC, (2007): IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). IPCC, Geneva, Switzerland.
- [24] IPCC, (1990): Climate change: IPCC scientific assessment, *J.T Houghton, G.J. Jenkins, J.J. Ephraums (eds.)*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 365 p,
- [25] GIEC, 1997 – Incidences sur l'évolution du climat dans les régions : Evaluation de la vulnérabilité, 234p.
- [26] Gayte O., Libourel T., Cheylan J-P., Lardon S., (1997) : Conception des systèmes d'information sur l'environnement. Collection géomatique. Paris : Hermès, 153p
- [27] Abourida A., (2007) : Approche hydrogéologique de la nappe du Haouz (Maroc) par télédétection, isotopie, SIG et modélisation. Thèse *Univ. Cadi Ayyad*, 146 p.
- [28] Mouthou J.L., (1996) : Eau et assainissement dans une ville du tiers-monde : Pointe-Noire (République du Congo). Thèse de doctorat, Univ. Michel de Montaigne Bordeaux III, 325 p.
- [29] Degallier R., (1969) : Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes. Hydrogéologie, section III, n° 2 : pp. 7-56.
- [30] Dakoure D., (2003) : Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de taoudeni (Burkina Faso- Mali) essai de Modélisation. Thèse de doctorat. Univ. Paris VI- Pierre et Marie Curie, 255 p.
- [31] Lalbat F., (2006) : Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras (Vaucluse, France), Thèse de Doctorat, *Univ. d'Avignon et des pays de Vaucluse*, 234 p.

- [32] El-Hakim M., (2005) – Les aquifères karstiques de l’anti Liban et du nord de la plaine de la Bekaa : caractéristiques, fonctionnement, évolution et modélisation, d’après l’exemple du système karstique anjarchamsine (Liban). Thèse de Doctorat, *Univ. Montpellier 2* et *Univ. St Joseph*, 216 p.
- [33] Bakalowics M., (1979) : Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l’aquifère karstique et de sa karstification, Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Paris VI, 269 p.
- [34] Apha/Awwa, (1995): Standars Methods for Water and Wastewater Examinations. 21 Edn., American Public Health Association/American Water Works Association, Washington, DC USA.
- [35] Bakalowics M. & Mangin A., (1980) : Un précieux informateur hydrologique: le système chimique CO₂-H₂O-Carbone. Acte Coll. « cristallisation, déformation, dissolution des carbones » Bordeaux, p. 11-23.
- [36] WHO, (2004): Guidelines for Drinking Water Quality, Health Criteria and Other Supporting Information. 2nd Edn., Vol. 2, World Health Organization, Geneva, pp 231-233.
- [37] Faillat J.P., (1984) : Utilisation de l’oxygène dissous comme indicateur de structures hydrogéologiques : exemple d’application aux aquifères karstiques. C.R. Acad. Qci. Paris, 298, II, 9, 419-422
- [38] Faillat J.P. & Puradimaja D.J., (1995) : Evaluation à l’échelle régionale des contraintes hydrochimiques sur la gestion des eaux souterraines karstiques. Exemple du Languedoc Roussillon, *Hydrogéologie*, 1, 97-112.
- [39] Tathy C., Matini L., Mabilia B., Antoine F. et Moukandi N’Kaya G.D., (2010): Hydrochemistry of groundwater in the Aquifer AQ-2 in Pointe-Noire, South-West Congo-Brazzaville. *Res. J. Applied Sci.*, 5 (5) : 361 – 369.
- [40] Tathy C., Matini L., Moukandi N’Kaya G.D. Mabilia B., (2011) : Assessing Factors Controlling the Hydrochemistry and suitability for Irrigation Purposes of Aquifer AQ-2 in Pointe-Noire South-West Congo Brazzaville. *Res. J. Appli Sci. Eng.Technol.*, 3(7) :617 – 624
- [41] Fontes J.C., (1985): Some considerations on groundwater dating using environmental isotopes. Hydrogeology in the service of Man, Memoirs of the 18th Congress of the International Association of Hydrogeologists, Cambridge, 118-154
- [42] Rosenthal E., (1987): Chemical composition of rainfall and groundwater in recharge areas of the bet Shean-Harold multiple aquifer, Israel. *J. of Hydrol.* 89(3/4), pp. 329-352.
- [43] Vengosh A. and Rosenthal E., (1994): Saline groundwater in Israel: its bearing on the water crisis in the country. *J. of Hydrol.*, 156, pp.389-430.
- [44] Morell I., Gimenez E., Fagundo R., Pulido-Bosch A., Lopez-Chicano M., Calvache M.L. and Rodriguez-Rubio J.E., (1997): Hydrochemitry and karstification in the Cienaga de Zapata aquifer (Matanzas, Cuba). In Karst water & environmental impacts, Günay & Jonhson eds, Balkema, pp. 191-198.

- [45] Davis S.N. Whittemore D.O. and Fabryka-Martin J., (1998): Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water. *Groundwater*, 36(2), pp 338-350.
- [46] Stournaras G., Panagoupoulos A. et Sotiropoulou K., (1989) : La signification Hydrogéologique des conditions hydrochimiques et géomorphologiques d'un terrain gypseux. Les sources de Drymos(Grèce occidentale), *Annales de l'université de Provence*, tome XVI, n° 4 311-320
- [47] Subba R.N. Devadas D.J. Srinivasa K.V., (2006): Interpretation of groundwater quality using principal component analysis from Anantapur district, Andhra Pradesh, India. *Environ. Geosci.*, 13 : 239-259.
- [48] Meyback M., (1987): Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *Am. J. Sci.* 287: 401-428
- [49] Datta P.S. and Tyagi S.K., (1996): Mayor ions chemistry of groundwater in Delhi area: Chemical weathering processes and groundwater flow regimes. *J. Geol. Soc. India*, 47: 179-188
- [50] Giridharan L., Venugopal T. and Jayaprakash M., (2008): Evaluation of the seasonal variation on the geochemical parameters and quality assessment of the groundwater in the proximity of River Cooum, Chennai, India. *Environ. Monitor. Assess.*, 143 : 161-178
- [51] Jalali M., (2007): Hydrochemical identification of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the Chah basin in Western *Iran*. *Environ. Monitor. Assess.*, 130 : 347-364
- [52] de Condappa D., (2005) : Etude de l'écoulement d'eau à travers la zone non saturée des aquifères de socle à l'échelle spatiale du bassin versant. Application à l'évaluation de la recharge au sein du bassin versant de Maheshwaran, Andhra Pradesh, Inde. Thèse de *Doc. UJF, LTHE, UMR 5564 (CNRS, INPG, UJF, IDR)*, 361p.
- [53] Kutilek M. et Nielsen D.R., (1994): Soil hydrology. Catena Verlag, Germany.
- [54] Bourrie G. et Lelong F., (1994) : Les solutions du sol du profil au bassin versant. In : Pédologie. Constituants et propriétés du sol. In Bonneau et Souchier. *Vol. 2, 2^{ème} éd. Masson. Paris, Milan, Barcelone*, pp 239-273
- [55] Ngnepieba P., Le Dimet F.X., Boukong A. et Ngnetseng G., (2002) : Identification des paramètres : Une application à l'équation de Richards. *ARIMA. Vol. 1*, pp 127-157.
- [56] Darcy H., (1856) : Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris.
- [57] Richards L.A., (1931): Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics*, pages 318–333.
- [58] Vauclin M., Haverkamp R. et Vachaud G., (1979) : *Univers. Scient. et Médic. Rapport HL-78-1*. Presses Univ. De Grenoble, 183p.
- [59] Lafolie F., (1986) : Etude numérique de la résolution des équations de transfert: Application à l'irrigation localisée. Thèse Université d'Avignon, 344p.
- [60] Guennelon R., (1994) :Le sol et l'eau. In Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol. Bonneau et Souchier. *2^{ème} édition. Masson. Paris, Milan, Barcelone*, pp 395-428.
- [61] Feddes R.A., Kowalik P.J., and Zaradny H., (1978): Simulation of field water use and crop yield. *John Wiley & Sons, New York*, 188p.

- [62] Šimunek J., Šejna M. *et al.*, (1998): The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0 Riverside, California, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, 80 p.
- [63] van Genuchten M.Th., (1980): A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am.J.14*, pp 892-898.
- [64] Brooks R.H. and Correy A.T., (1964): Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap. 3, colo. State Univ., Fort Collins*.
- [65] Scott P.S., Farquhar G.J. & Kouwen N. (1983): Hysteretic effects on net infiltration, 163-170, In *Advances in Infiltration, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI*.
- [66] Kool, J. B. and J. C. Parker, (1987): Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, 23(1), 105-114.
- [67] Haines W.B., (1936): Studies in the physical properties of soils: the hysteresis effect in capillary properties and the modes of moisture distribution associated therewith. *J. agric. Sci.* 20. 97-116
- [68] Philip J.R., (1964): *J. Geophysic. Res.*, 69, 1553-1562
- [69] Rogowski A.S., (1971): Watershed physics: model of soil moisture characteristics. *Water Resour. Res.* 7., 1575-1582
- [70] van Genuchten M.Th and Nielson D.R., (1985): *E.G.S. Ann. Geophysic.*, 3, 675-628
- [71] Mualem Y., (1976): A New model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522.
- [72] Haverkamp R., Bouraoui F., Zammit C., Angulo-Jaramillio R., (1998): "Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone"; *The Handbook of Groundwater Engineering*, chapter 5.
- [73] Ababou R., (1981) : *Modélisation des Transferts Hydriques dans le Sol en Irrigation Localisée*. Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 218 pp.,
- [74] Lagergren, F. And A. Lindroth, (2002): Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agr. For. Meteorol.*, 112: 67-85.
- [75] Moukandi N'kaya G.D., Mabila B., Thaty C, Nganga D. and Deleport P., (2010): Paramétrisation de modèles de transfert hydrique dans le sol sous trois plantations d'eucalyptus dans la région de Pointe-Noire (Congo) : Applications à l'établissement de Bilan Hydriques. *Ann. Univ. Marien Ngouabi ; Sc. Et Tech.*; 11 (4) 70-83.
- [76] Moukandi N'kaya G.D., Deleport P., Ababou R. (2007): Identification des paramètres de modèles de transfert hydrique dans le sol sous plantations d'Eucalyptus dans la région de Pointe-Noire (Congo). Journées Nationales de l'Etudes des sols, 3-4-5 avril 2007, Angers, France. 375-377.
- [77] Thornthwaite C.W., (1948): An approach toward a rational classification of climate. *The Geographical Review* vol. XXXVIII no 1 p. 55-94
- [78] Turc L., (1954) : Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évapotranspiration et écoulement. *Ann. Agron.* 5, p. 491-596.
- [79] Turc L., (1961) : Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales agronomiques* vol. 12 n° 1 p. 13-49 I.N.R.A.

- [80] Blaney H.F. and Criddle W.D., (1950): Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *USDA (SCS) TP-96*, 48p
- [81] Thornthwaite C. W. & Mather J. R., (1955): The water balance. *Pub. Climatol. Lab. Climatol. Drexel Inst. Technol.* 8, p. 1-104.
- [82] Penman H.L., (1963): Vegetation and hydrology. *Tech. Com.* 53, Commonwealth Bureau of soils, Harpenden, England.
- [83] Allen R.G., Jensen M.E., Wright J.L. and Burman R.D., (1989): Operational estimates of evapotranspiration. *Agron. J.* 81: 650-662.
- [84] Smith M., (1991): Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines of prediction of crop water requirements. FAO Land and Water Development Division, Rome, 45p
- [85] Laclau J.P., Arnaud M., Bouillet J.P. & Ranger J., (2001): Spatial distribution of *Eucalyptus* roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. *Tree Physiol.*, 21, 2-3: 129-136.
- [86] Toth, J., (1963): A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research* 68/16, pp. 4795-4812
- [87] Freeze R-A. & Witherspoon P.A., (1967): Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow: 2. Effect of Water-Table configuration and Subsurface Permeability Variation. *Water Resources Research*, Vol. 3, N° 2, pp. 623-634
- [88] Toth, J., (1970): A conceptual model of the groundwater regime and the hydrologic environment. *J. of Hydrology*, 10, pp. 164-176
- [89] McDonald M.G., Harbaugh A.W.B., Orr R. and Ackerman D.J., (1991): BCF2 – A method of converting no-flow cells to variable-head cells for the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-water Flow Model. U.S. Geological Survey, Open-File Report 91 536, Denver.
- [90] Chiang W.H., (1994): PMPATH for Windows. User's manual. Scientific Software Group. Washington, DC.
- [91] Pollock, (D.W.) 1988 – Semi analytical computation of path lines for finite difference models. *Ground Water* (26)6, 743-750.
- [92] Pollock D.W., (1989): MODPATH (version 1.x)- Documentation of computer programs to compute and display path lines using results from the U. S. Geological Survey modular three dimensional finite-difference ground-water model. U. S. Geological Survey Open-file report 89-381.
- [93] Pollock D.W., (1994): User's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW the U. S. Geological Survey finite difference groundwater flow model. Reston, VA. U. S. Geological Survey.
- [94] Zheng C., (1990): MT3D, a modular three-dimensional transport model, S.S. Papadopoulos & Associates, Inc., Rockville, Maryland.
- [95] Doherty J., Brebber L. and Whyte P., (1994) : PEST - Model-independent parameter estimation. User's manual. Watermark Computing. Australia.
- [96] Bazie P. et Dieng B., (1995) : Bilan des transferts verticaux d'eau en zone non-saturée sous climat soudano-sahélien: application à l'estimation de la recharge des nappes. *Rev. Sc. Eau*, 8 (2): pp. 237-260.

- [97] Aranyossy J.F. & Mamou A., (1985) : Apport des techniques nucléaires à l'étude des aquifères du Sud tunisien. 51p. RAF/8/007. IAEA. Vienne.
- [98] Margat J., (1992) : Les eaux fossiles. Afrique contemporaine, N°161 (Spécial) 1er trimestre.

Annexes

Annexe 1 : Données piézométriques et hydrodynamiques

Annexe 2 : Calcul de l'ETP

Annexe 1 : Données piézométriques et hydrodynamiques

Code	X	Y	Données piézométriques (en m)						Données hydrodynamiques			
			Z(1986)	Z(1990)	Z(2000)	Z(2005)	Z(2009)	Z(Moyenne)	Z(Mur) en m	K (m/s)	T (m ² /s)	S
PZ-1	11°52'31,207"E	4°44'10,533"S	11,5	11,6	11,7	11,6	11,75	11,6	119			
PZ-2	11°51'15,357"E	4°44'43,542"S			10,95	14,05		12,5	102			
PZ-3	11°51'39,236"E	4°45'57,285"S				12,3	12,77	12,3				
PZ-4	11°52'15,054"E	4°46'10,499"S	10,6		9,8	8,03		9,5	115			
PZ-6	11°53'58,997"E	4°46'12,736"S	12,75		13,85		13,85	13,3				
PZ-7	11°51'20,975"E	4°46'37,317"S			7,25	6,15		6,7				
PZ-8	11°52'45,956"E	4°46'28,187"S			11,6			11,6				
PZ-9	11°54'47,457"E	4°47'40,006"S			10,9		10,89	10,9				
PZ-10	11°54'18,662"E	4°47'37,015"S	14,75		14,25		14,23	14,5				
PZ-11	11°50'52,883"E	4°47'23,671"S	1,6		2,7			2,7				
PZ-12	11°52'0,305"E	4°47'41,931"S	6,55		7,25			6,9				
PZ-13	11°53'23,881"E	4°48'8,619"S	3,95		3,25		3,27	3,6				
PZ-14	11°51'57,496"E	4°48'28,986"S	8,3		5,15		6,5	6,7				
PZ-15	11°54'19,365"E	4°49'20,256"S					7,4	7,4				
P-1	11°53'35,821"E	4°47'11,029"S										
F1	11°52'57,193"E	4°47'21,564"S		9,4					129,1	23,17.10 ⁻⁵	6,95.10 ⁻³	
F2	11°51'11,143"E	4°47'15,243"S		11,2				-11,6	121,5	19,83.10 ⁻⁵	5,95.10 ⁻³	6,13.10 ⁻⁴
F3	11°51'13,25"E	4°47'22,266"S		14,1				11,0	121,5			
F5	11°51'35,022"E	4°48'22,666"S		6,6		6,7		6,7	150	15,33.10 ⁻⁵	4,6.10 ⁻³	5,1.10 ⁻⁴
F6	11°51'46,259"E	4°48'23,368"S		-2,5		-8,3		-5,4	150	6,33.10 ⁻⁴	9,5.10 ⁻³	4,5.10 ⁻⁴
F7	11°52'52,979"E	4°46'45,745"S		6,3				-18,9	115,1	26,17.10 ⁻⁵	7,85.10 ⁻³	

F8	11°52'19,97"E	4°44'40,432"S		9,8		9,8		9,8	118	18,33.10 ⁻⁵	3,95.10 ⁻³	4,2.10 ⁻⁵
F9	11°52'18,566"E	4°44'37,221"S		13				-19,7	121,7	13,00.10 ⁻⁵	1,95.10 ⁻³	
F10	11°52'12,947"E	4°44'40,03"S		1,9		6,4		4,1	116	24,50.10 ⁻⁵	4.10 ⁻³	1,5.10 ⁻⁴
F11	11°54'6,021"E	4°48'26,879"S		21,5				-8,9	131	9,33.10 ⁻⁵	1,4.10 ⁻³	
F12	11°54'15,853"E	4°48'33,903"S		11,1		11,1		11,1	131	25,66.10 ⁻⁵	3,85.10 ⁻³	1,5.10 ⁻⁴
F13	11°54'21,472"E	4°48'42,33"S		18,2				-6,1	125	3,66.10 ⁻⁵	5,5.10 ⁻³	1,7.10 ⁻⁴
F14	11°53'25,286"E	4°46'54,173"S		6,7				-24,3	175	3,83.10 ⁻⁵	1,15.10 ⁻³	
F15	11°53'34,416"E	4°47'7,517"S		14,2		13		13,6	168			
F16	11°53'52,677"E	4°45'39,025"S						-19,6				
F17	11°52'30,505"E	4°49'22,363"S						-36,5				
F19	11°51'30,105"E	4°47'12,434"S		10,7				10,7				
F20	11°52'13,649"E	4°47'46,145"S						-43,3	181,6			
F21	11°54'14,448"E	4°47'36,312"S						-51,0	156			
F22	11°53'42,142"E	4°44'58,29"S				18,45		19,0	132			
F23	11°53'57,593"E	4°44'56,183"S						3,8	167			
JIKA	11°52'9,435"E	4°48'53,568"S				40,9		40,9				
BOPLAC	11°51'36,426"E	4°47'49,656"S						-12,5	41			
Sicé	11°51'32,915"E	4°47'28,587"S						-10	44			
Loan	11°52'12,947"E	4°45'36,918"S						-27	45			
Tra	11°53'57,593"E	4°45'22,872"S						-11	70			
Nana	11°54'7,425"E	4°45'9,527"S			26			26	74			
PNR	11°52'18566	4°46'51,364"S						-24,1	44			

Annexe 2 : Estimation de l'ETP à partir des données de l'aéroport de Pointe Noire

1-Équation de Penman-monteith:

L'énergie utilisée journalièrement pour l'évaporation d'un couvert végétal, ou flux de chaleur latente, LE (MJ m² jour⁻¹), peut-être calculée selon l'équation. de Penman-Monteith:

$$LE = \frac{sA + \rho_a c_p \frac{D}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_{sc}}{r_a}\right)} \quad \text{Eq.1}$$

Dans cette équation, A est l'énergie disponible (MJ m⁻² jour⁻¹), s est la pente de la courbe de pression de vapeur saturante (kPa °C⁻¹), ρ_a est la densité de l'air (kg m⁻³), c_p est la chaleur spécifique de l'air à pression constante (≈1012 10⁻⁶ MJ kg⁻¹ °C⁻¹), γ est la constante psychrométrique (kPa °C⁻¹), D est le déficit de pression de vapeur saturante (kPa), r_a est la résistance aérodynamique du couvert (jour m⁻¹), et r_{sc} est la résistance stomatique du couvert (jour m⁻¹).

Le premier terme de l'Eq.1, $\left[\frac{sA}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_{sc}}{r_a}\right)} \right]$ est souvent appelé “composante radiative” car il dépend essentiellement du rayonnement net: l'énergie disponible, A (MJ m⁻² jour⁻¹), calculée en fonction du rayonnement net Rn (MJ m⁻² jour⁻¹), du flux de chaleur dans le sol, G (MJ m⁻² jour⁻¹ = stockage de chaleur dans le sol), et du stockage de chaleur dans le bois et dans l'air sous et dans la canopée, S_b et S_a (MJ m⁻² jour⁻¹) :

$$A = Rn - G - S_b - S_a \quad \text{Eq.2}$$

Lorsque l'Eq. de Penman-Monteith est appliquée au pas de temps horaire ou serai-horaire, G, S_b et S_a ne peuvent être négligés. Par contre, lorsqu'elle est appliquée au pas de temps journalier, on les néglige car on suppose que le stockage de chaleur pendant la journée est compensé par le déstockage pendant la nuit. Donc, au pas de temps journalier, A ≈ Rn.

Le second terme, $\left[\frac{\rho_a c_p \frac{D}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_{sc}}{r_a}\right)} \right]$ représente la “composante advective”, qui dépend essentiellement du déficit de pression de vapeur saturante D (kPa), qui est la différence entre la pression de vapeur saturante e_s (kPa) et la pression de vapeur mesurée, e (kPa).

$$D = e_s - e \quad \text{Eq.3}$$

e_s et e peuvent être calculée selon les Eq. 11 et 10 du fichier “calculRn.doc”.

La densité de l'air, ρ_a (kg m⁻³) peut être estimée empiriquement à partir de la pression atmosphérique P (kPa) et la température de l'air T (°C) selon:

$$\rho_a = 3,486 \frac{P}{275 + T} \quad \text{Eq.4}$$

La pente de la courbe de pression de vapeur saturante, s (kPa °C⁻¹) peut être estimée empiriquement en fonction de la pression de vapeur saturante e_s (kPa), et la température de l'air (°C) selon :

$$s = \frac{4098 e_s}{(237,3 + T)^2} \quad \text{Eq.5}$$

La constante psychrométrique γ (kPa °C⁻¹) est calculée à partir de la chaleur spécifique de

l'air à pression constante, C_p ($\approx 1012 \cdot 10^{-6} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), de la pression atmosphérique, P (kPa), de la chaleur latente de vaporisation, λ (MJ kg^{-1}), et du rapport ε entre la masse moléculaire de la vapeur d'eau et celle de l'air sec ($\varepsilon=0,622$) :

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0,0016286 \frac{P}{\lambda} \quad \text{Eq.6}$$

Pour obtenir l'évaporation réelle E ($\text{kg d'eau m}^{-2} \text{ jour}^{-1} = \text{mm jour}^{-1}$) à partir de LE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$), il suffit de diviser LE par la chaleur latente de vaporisation, λ (MJ kg^{-1}) :

$$E = \frac{LE}{\lambda} \quad \text{Eq.7}$$

λ vaut environ $2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ à 0°C , et décroît légèrement avec la température T ($^\circ\text{C}$)

$$\lambda = 2,501 - 0,002361T \quad \text{Eq.8}$$

2-Calcul du rayonnement net et rayonnement global à partir des données de l'aéroport de Pointe-Noire

Les échanges radiatifs correspondent à des transferts d'énergie par rayonnement. Le rayonnement absorbé par un objet ou une surface correspond au rayonnement net. Le rayonnement net (R_n) est la quantité d'énergie radiative disponible à la surface terrestre et pouvant être transformée en d'autres formes d'énergie par les divers mécanismes physiques ou biologiques de la surface. Le rayonnement net (R_n) est obtenu par l'Eq.9 du bilan radiatif :

$$R_n = (1 - \alpha_s)R_g + (1 - \rho_s)R_a - \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad \text{Eq.9}$$

Dans cette équation, R_n rayonnement net (W.m^{-2}) ; l'albédo α_s , R_g le rayonnement global de petite longueur d'onde (W.m^{-2}) ; ρ_s coefficient de réflexion thermique de la surface ; le rayonnement thermique incident de grande longueur d'onde, émis par l'atmosphère (de $3,5$ à $8 \mu\text{m}$) (W.m^{-2}) ; ε_s émissivité de la nature ; σ constante de Stefan-Boltzman ($\text{W.m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) et T_s température radiative de surface ($^\circ\text{K}$)

Le rayonnement global, R_g , peut-être calculé par des relations empiriques en fonction de la durée d'insolation, N , de la durée théorique du jour, N_o et du rayonnement global extraterrestre R_{g_o} :

$$R_g = \tau R_{g_o} \left[b + (1 - b) \frac{N}{N_o} \right] \quad \text{Eq.10}$$

ou

$$R_g = R_{g_o} \left[c + d \frac{N}{N_o} \right] \quad \text{Eq.11}$$

Dans ces équations, N_o et R_{g_o} sont calculés en fonction de la latitude du lieu et du jour de l'année, tandis que les coefficients τ et b ou c et d sont obtenus par calibration à partir de mesures de R_g et de N . Le coefficient τ ou la somme $c+d$ correspondent à la transmission atmosphérique par temps clair (journée complètement ensoleillée : $N=N_o$). Le produit $\tau \cdot b$ ou le coefficient c correspondent à la transmission atmosphérique par temps nuageux (journée complètement couverte : $N=0$).

La durée maximum du jour, N_o (en heures), est calculée en fonction de la latitude, ϕ et de la déclinaison, δ :

$$\begin{cases} N_o = \frac{24}{\pi} \omega_s \\ \omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \tan(\delta)] \end{cases}$$

La latitude, ϕ (radians), est positive dans l'hémisphère nord, est négative dans l'hémisphère sud.

La déclinaison δ (radians), est calculée en fonction du jour julien, J :

$$\delta = 0,4093 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,405\right)$$

Le rayonnement global extraterrestre Rg_o ($\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$) est calculée en fonction de, ϕ et δ :

$$\begin{cases} Rg_o = E_o \frac{24}{\pi} d_r [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \sin(\omega_s)] \\ d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \end{cases}$$

E_o est l'éclairement énergétique extraterrestre (constante solaire) et vaut environ $4.932 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ pour la distance moyenne terre-soleil. d_r est la distance relative terre-soleil.

2.1-Estimation des paramètres τ et b ou c et d

Pour estimer la valeur des paramètres τ et b , ou c et d nous avons utilisé des mesures de rayonnement global obtenues par l'ORSTOM, à Pointe Noire, entre 1990 et 1992, et des mesures d'insolation obtenues par l'aéroport de Pointe Noire sur la même période (Figure 1 et 2). La valeur des paramètres τ et b obtenues par calibration pour ces 3 années sont reportées dans le tableau 1

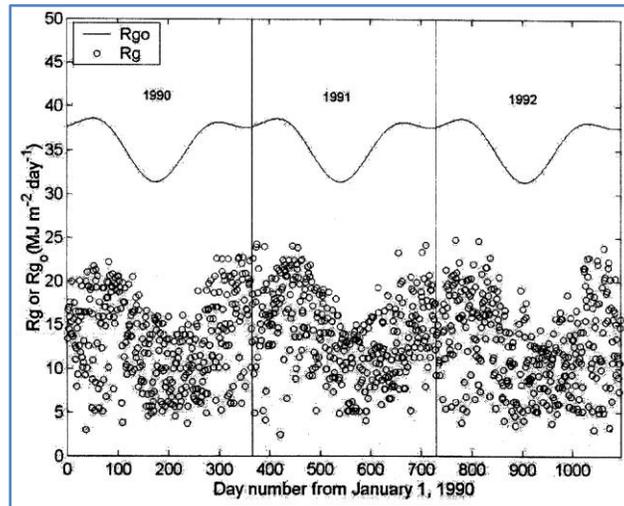


Figure 1 : Rayonnement global mesuré à Pointe-Noire entre 1990 et 1992, et rayonnement global aux confins de l'atmosphère

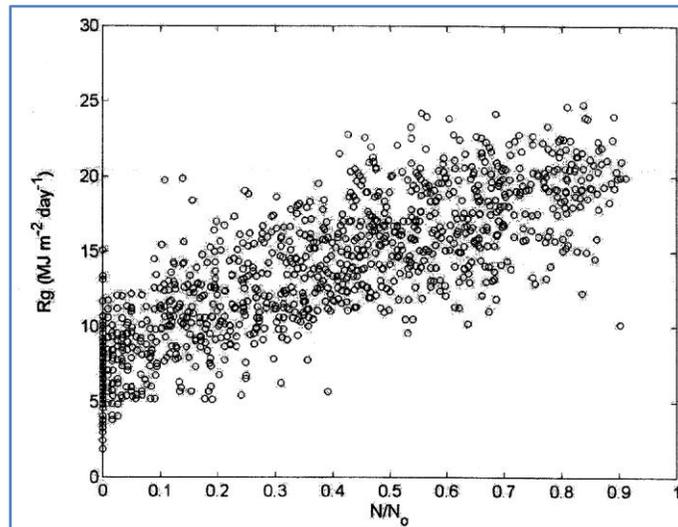


Figure 1 : Rayonnement global mesuré à Pointe-Noire entre 1990 et 1992 versus N/N_0

Tableau 1 : Valeur des coefficients τ et b estimés à Pointe Noire

Période	τ	b
1990	0.608	0.381
1991	0.641	0.370
1992	0.661	0.307
1990-1992	0.635	0.352

Sur la période 1990-1992, b est de l'ordre de 0.35. Par comparaison, Riou (1975) a obtenu 0.31 à partir de données acquises à Brazzaville entre 1968-1971.

La transmission atmosphérique par temps clair (τ dans l'équation 1 ou $c+d$ dans l'équation 2) dépend de la concentration en aérosols dans l'atmosphère, et peut ainsi présenter de fortes variations saisonnières (tableau 2 et figures 3 et 4). Elle est minimale pendant la saison sèche lorsque l'atmosphère est fortement chargée en aérosols. En 'lessivant' une partie des aérosols en suspension dans l'atmosphère, les pluies contribuent à diminuer le trouble atmosphérique et à augmenter la transmission atmosphérique : la transmission atmosphérique par temps clair est maximale pendant le saison des pluies, et augmente avec les précipitations mensuelles.

Tableau 2 : Estimations des valeurs mensuelles de τ , c et d

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
τ à Pointe Noire (1990-1992)	0,6215	0,6221	0,6333	0,6597	0,6278	0,6236	0,5804	0,5613	0,6172	0,7036	0,6524	0,6860
τ à Brazzaville (1968-1971)	0,730	0,720	0,735	0,745	0,740	0,660	0,610	0,650	0,680	0,700	0,750	0,740
c (Pointe Noire)	0,237	0,218	0,198	0,255	0,228	0,220	0,214	0,208	0,226	0,231	0,233	0,214
d (Pointe Noire)	0,364	0,403	0,453	0,387	0,392	0,403	0,347	0,332	0,362	0,509	0,414	0,505
$C + D$	0,600	0,622	0,651	0,642	0,620	0,622	0,561	0,540	0,588	0,739	0,646	0,718

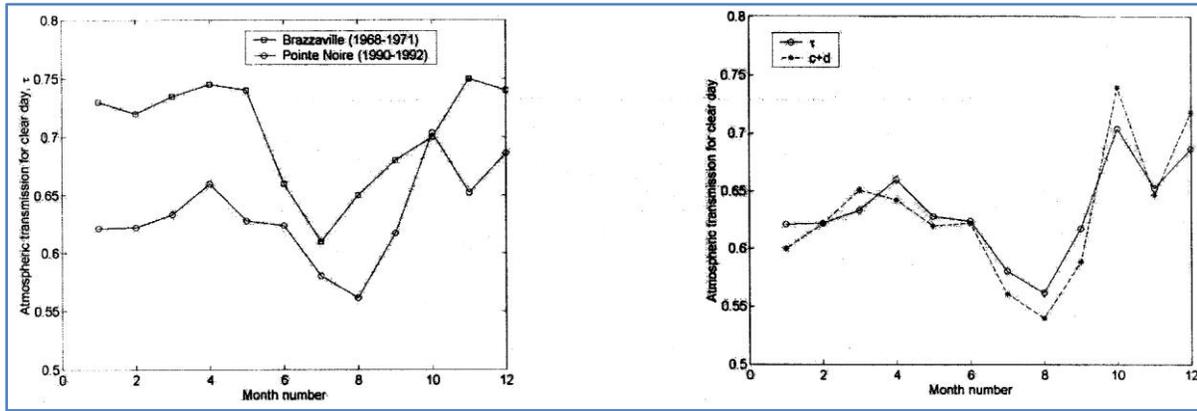


Figure 3 : Variations saisonnières des transmissions atmosphériques par temps clair (τ ou $c+d$)

Après estimation des valeurs mensuelles moyennes de τ , l'Eq. 1 permet d'obtenir d'assez bonnes estimations de R_g à partir des mesures d'insolation (Figure 4 et 5). Les résultats sont légèrement meilleurs avec l'Eq. 2 (relation de Prescott modifiée), et pourraient sans doute être améliorés si l'on faisait varier la valeur mensuelle de τ en fonction des précipitations.

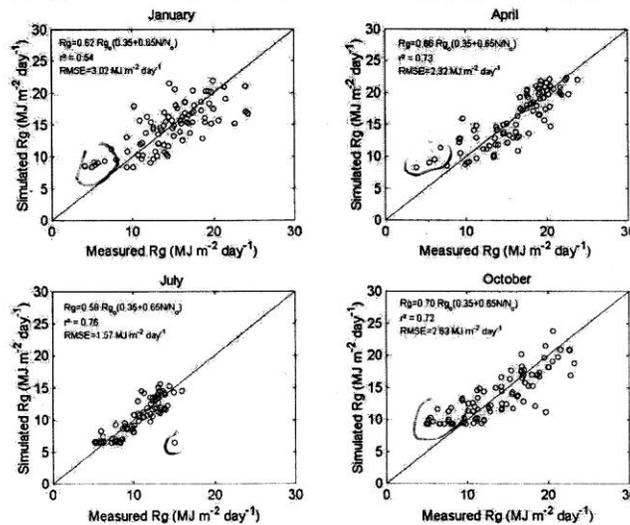


Figure 4 : Comparaison des valeurs journalières calculées de R_g pour 4 mois des années 1998-2009

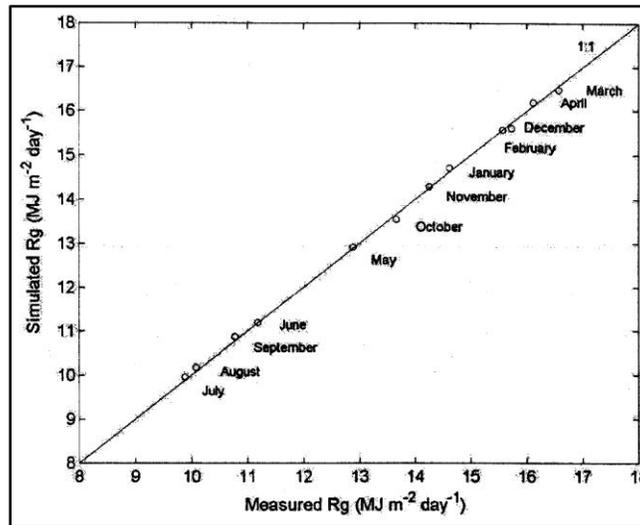


Figure 5 : Comparaison de Rg calculés et mesurés (période 1998-2009)

3-Calcul des résistances aérodynamiques et stomatiques

En supposant un profil logarithmique du vent, la résistance aérodynamique, r_a (jour m^{-1}) peut-être calculée selon l'équation :

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{(z_u-d)}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{(z_e-d)}{z_{ov}}\right]}{k^2 U_r} \quad \text{Eq/12}$$

Dans cette équation, z_u et z_e (m) sont les hauteurs auxquelles sont mesurées la vitesse du vent et l'humidité relative, d (m) est la hauteur de **déplacement**, z_{om} et z_{ov} (m) sont les longueurs de rugosité associées aux flux de quantité de mouvement et de vapeur d'eau, k la constante de Von Karman (0,41), et U_r (m jour⁻¹) la vitesse du vent mesurée à la hauteur de référence. Les hauteurs de déplacement et longueurs de rugosité peuvent être estimées empiriquement en fonction de la hauteur du couvert, h (m): $d \approx 0.67 h$, $z_{om} \approx 0.123 h$, et $z_{ov} \approx 0.0123 h$.

La résistance stomatique du couvert dépend de la résistance stomatique moyenne des feuilles, r_s (jour m^{-1}) et du LAI:

$$r_{sc} = \frac{r_s}{LAI} \quad \text{Eq.13}$$

Différents modèles existent pour calculer la résistance stomatique foliaire en fonction du rayonnement incident, humidité relative, température de l'air, et autres variables micrométéorologiques ou physiologiques (modèles de Jarvis, de Ball et Berry, ect.).

4-Application : calcul des ETP-savanes et plantations d'Eucalyptus à partir des données de l'aéroport de Pointe-Noire

Il existe plusieurs définitions de l'évaporation potentielle et de l'évapotranspiration potentielle (voir par exemple Lhomme, 1997).

Pour l'évapotranspiration potentielle (ETP), on peut retenir la définition donnée par Brutsaert (1982): c'est l'évapotranspiration d'une surface large (large afin de pouvoir négliger l'advection (effet d'oasis)), complètement et uniformément couverte par une végétation en croissance, en permanence bien alimentée en eau. Dans ce cas, r_{sc} prend une valeur minimum r_{scmin} permettant de calculer l'ETP selon l'Eq. 1.

Sur savane, le calcul de r_{sc} (et r_{scmin}) selon l'Eq.13 n'est pas possible car le LAI (et ses variations annuelles) n'est pas connu. Pour contourner cette difficulté, on peut calculer l'évaporation

potentielle, telle qu'elle est définie par Perrier (1977) ou Brutsaert (1982) : c'est l'évaporation d'un couvert lorsque toutes ses surfaces d'échange sont saturées en eau, soit l'évaporation qui serait mesurable après une pluie, une irrigation par aspersion ou en présence d'une forte rosée. Dans ce cas, la résistance de surface devient nulle ($r_{sc} = 0$), et l'Eq. 1 devient donc:

$$LEP = \frac{sA + \rho_a c_p \frac{D}{r_a}}{s + \gamma} \quad \text{Eq.14}$$

C'est l'équation de Penman (1948). L'évaporation potentielle EP (mm jour⁻¹) peut ainsi être calculée selon :

$$EP = \frac{1}{\lambda} \frac{sA + \rho_a c_p \frac{D}{r_a}}{s + \gamma} \quad \text{Eq.15}$$

Cette équation peut encore s'écrire sous la forme:

$$EP = \frac{sA}{\lambda(s + \gamma)} + \frac{\gamma E_a}{s + \gamma} \quad \text{Eq.16}$$

Où E_a (mm jour⁻¹) représente le "pouvoir évaporant" de l'air :

$$E_a = \frac{\rho_a c_p \frac{D}{r_a}}{\lambda \gamma} \quad \text{Eq.17}$$

la principale difficulté pour appliquer cette équation avec les données de l'aéroport de Pointe-Noire concerne l'estimation de la composante advective, $\left(\frac{\rho_a c_p \frac{D}{r_a}}{s + \gamma}\right)$, car la vitesse du vent n'a pas été mesurée au dessus des couverts de savane et Eucalyptus (donc on ne peut normalement pas utiliser directement les mesures de vitesse pour estimer les résistances aérodynamiques, r_a) : savane et Eucalyptus n'ont pas les mêmes longueurs de rugosités et hauteur de déplacement, donc les profils de vitesse du vent au dessus de ces couverts sont différents. La vitesse du vent qui serait mesurée à 2 m au dessus d'un couvert de savane ne serait pas la même que celle mesurée à 2 m au dessus d'un couvert d'Eucalyptus, ou à la même hauteur à l'aéroport de Pointe-Noire. La meilleure solution est probablement d'estimer la composante advective dans les conditions de la station météorologique de Pointe-Noire (sur couvert de graminée tondu de temps en temps), et de prendre cette valeur indifféremment pour savane et Eucalyptus. Cette extrapolation induit certainement une petite erreur, mais qui ne devrait pas affecter de manière importante l'estimation des ETP-savane et Eucalyptus, car en milieu tropical la composante advective est faible (du fait des faibles valeurs de déficit de pression de vapeur d'eau) comparée à la composante radiative.

Application numérique:

A l'aéroport de Pointe-Noire, la vitesse du vent et l'humidité relative sont mesurées à respectivement 11 m et 1,5 m ($z_u = 11$ m et $z_e = 1,5$ m).

On peut prendre $h = 0.12$ m. C'est ce qui est utilisé pour calculer l'évaporation d'un couvert de référence (couvert de graminée de 12 cm de haut et d'albédo = 0.23), et c'est proche de ce que j'ai pu observer à l'aéroport de Pointe-Noire (pelouse tondu de temps en temps).

Pour l'albédo, prendre 0.12 pour l'Eucalyptus, et une valeur comprise entre 0.17 à 0.22 pour la savane.

Les figures 6 et 7 présentent une comparaison des évaporations diurnes et mensuelles mesurées à l'aéroport de Pointe Noire (Bac A) entre 1998 et 2002 et simulées par l'équation de Penman (albédo de l'eau = 0.05).

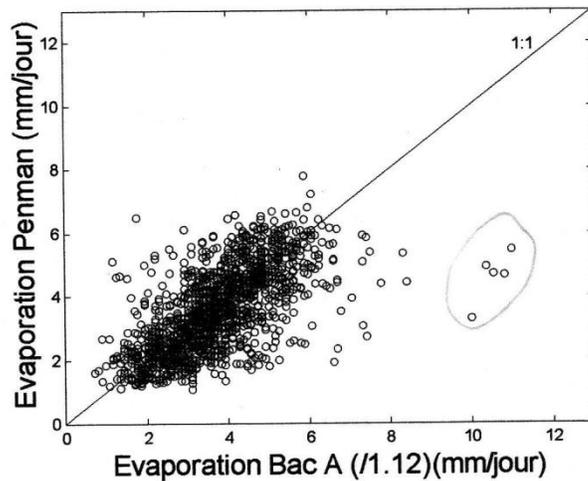


Figure 6 : Comparaison des évaporations mesurées en bac A (et divisées par 1,12 pour tenir compte de la surestimation par le bac A) à l'aéroport de PNR et des évaporations simulées par Penman (albédo de l'eau = 0.05)

Les mesures d'évaporation (bac A) ont été divisées par 1.12 sur la base des résultats de Riou (1978) qui a comparé à Brazzaville les évaporations mesurées en bac A et celles mesurées en bac enterré, jugées beaucoup plus fiables et représentatives de la réalité: les bacs A sont en *effet* disposés au dessus du sol, et bénéficient donc d'apports supplémentaires d'énergie radiative au niveau des parois qui sont par ailleurs le siège d'échanges thermiques avec l'air (apports d'énergie par advection). Cette disposition perturbe aussi les écoulements de l'air. Riou a montré à Brazzaville que les évaporations obtenues par bac enterré et par Bac A étaient très corrélées, mais avec un rapport $E_{\text{bac A}} / E_{\text{bac enterré}}$ de l'ordre de 1.12.

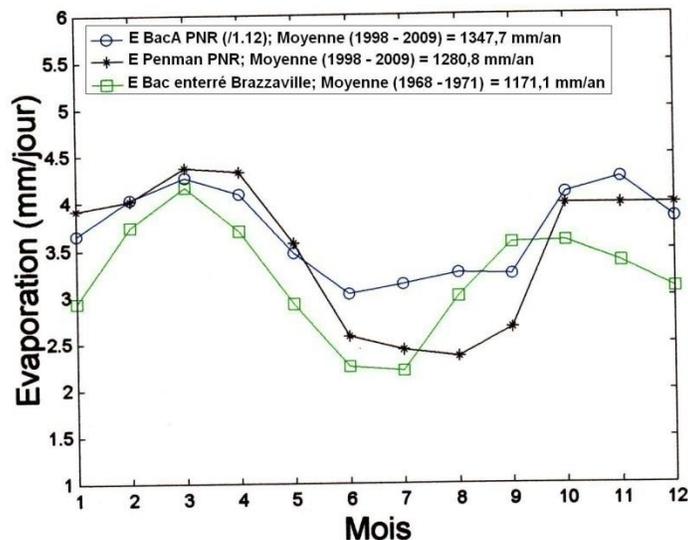


Figure 7 : Comparaison des évaporations mensuelles moyennes mesurées à l'aéroport de PNR entre 1998 et 2009, et des évaporations calculées par l'équation de Penman (albédo de l'eau = 0.05). Les évaporations mensuelles moyennes mesurées à partir des bacs enterrés par Riou à Brazzaville entre 1968 et 1971 sont également présentées

Riou a aussi montré que les mesures d'évaporation à l'échelle journalière ne sont pas très précises (ce qui pourrait expliquer une partie de la dispersion des points sur la Figure 1), en raison des erreurs de mesure, mais que les erreurs deviennent négligeables lorsque les mesures sont cumulées sur

plusieurs jours.

Comme le montre la figure 2, on a une assez bonne concordance entre les évaporations calculées et mesurées, sauf pendant la saison sèche où les évaporations calculées sont nettement inférieures aux évaporations mesurées. Cette différence entre valeurs calculées et mesurées pendant la saison sèche pourrait être attribuée soit à une mauvaise estimation de certains paramètres utilisés pour calculer le rayonnement net, les résistances aérodynamiques, ect., soit à une surestimation de l'évaporation potentielle par les mesures en Bac A... : normalement, le bac A devrait être placé au milieu d'une pelouse d'au moins 400 m² régulièrement alimentée en eau afin de réduire les `effets oasis' (apports externes d'énergie advective). Le bac A de la station météorologique de l'aéroport de Pointe-Noire est bien placé au milieu d'une pelouse (de matiti!) d'environ 400 m², mais qui n'est certainement pas arrosé régulièrement en saison sèche !!! Donc il est probable qu'on ait un fort effet oasis (donc surestimation de l'évaporation potentielle par les mesures en bac) en saison sèche. Cet effet ne devrait par contre pas être très important en saison des pluies, puisque la pelouse reçoit des apports d'eau par les précipitations.

Pour estimer cet effet oasis, Riou (1978) a comparé les évaporations mesurées à partir de bacs enterrés installés au milieu d'une pelouse régulièrement alimentée en eau, ou au milieu d'une surface de sol nu non irriguée. Ces mesures montrent une augmentation très nette de l'évaporation du bac « sol nu » par rapport à celle du bac « pelouse ». La différence atteignait 30% en saison sèche. Ces résultats n'ont pas été obtenus à Brazzaville, mais dans une station météorologique du Tchad où l'on peut s'attendre à des effets oasis beaucoup plus marqués qu'en zone équatoriale. A Pointe Noire, cet effet devrait donc être moins marqué du fait de la différence de climat, mais d'un autre côté il devrait être amplifié du fait de l'utilisation d'un bac A, beaucoup plus sensible aux effets oasis que les bacs enterrés (à cause de l'augmentation des surfaces d'échanges (parois du bac)).

Si l'on supposait (ou s'il s'avérait exact) qu'en saison sèche le bac A surestime l'EP de 15 à 30%, les valeurs corrigées d'évaporation seraient similaires à celles calculées par l'équation de Penman. La comparaison avec les valeurs mesurées à Brazzaville est intéressante, car ces dernières ont été obtenues avec un bac « pelouse ».

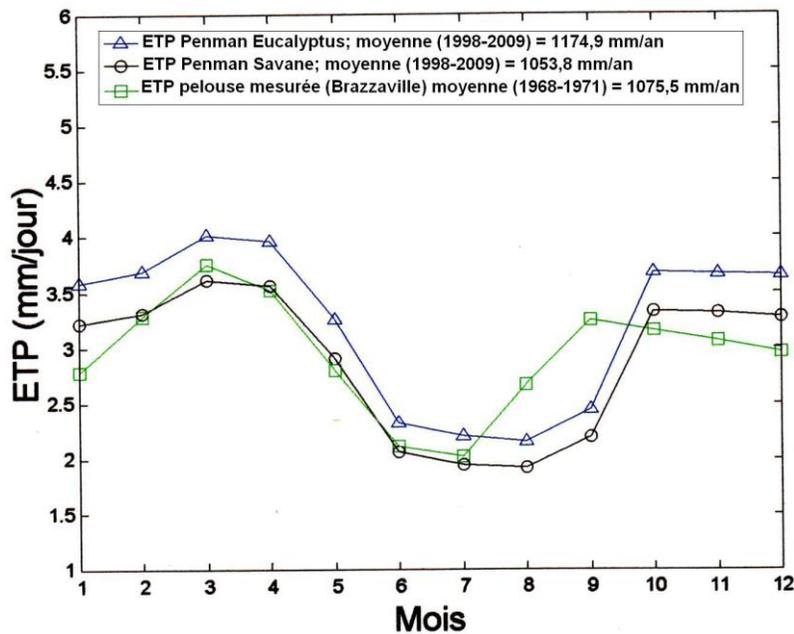


Figure 8 : ETP mensuelles moyennes (1998-2002) calculées par l'équation de Penman à partir des

données météorologiques de l'aéroport de PNR, pour un couvert de savane (albédo de 0.20) ou d'Eucalyptus (albédo de 0.12), et ETP mesurées par Riou (moyennes mensuelles sur la période 1968-1971), à Brazzaville, à partir d'évapotranspiromètres plantés par *Paspalum* ou *Cyclodon dacrylon* (albédo mesuré =0.20). Au niveau annuel, les différences entre les évapotranspiromètres plantés en *Paspalum* ou *Cyclodon* n'étaient que de 1% à 3% suivant les années !!!

Comme le montre la figure 3, les moyennes mensuelles d'ETP-savane calculées par l'équation de Penman à partir des données météorologiques de l'aéroport sont très similaires -sauf pour les mois d'août et de septembre- à celles mesurées par Riou à Brazzaville entre 1968 et 1971. Les moyennes annuelles ne diffèrent que de 22 mm, soit une différence de 2%. Les différences observées en août et septembre sont liées à la fois à de plus fortes valeurs de R_g (et donc de S_n), et de pouvoir évaporant de l'air (E_a), à Brazzaville qu'à Pointe Noire, pour ces 2 mois (Figures 9b et 9d).

D'une manière générale, S_n est plus élevé à Brazzaville qu'à PNR (transmission atmosphérique plus importante à Brazzaville qu'à Pointe Noire), mais cette différence est compensée par un Ln plus élevé (moins négatif) à Pointe Noire qu'à Brazzaville, et un plus fort pouvoir évaporant de l'air (E_a) à Pointe Noire, d'où des ETP peu différentes entre ces 2 villes.

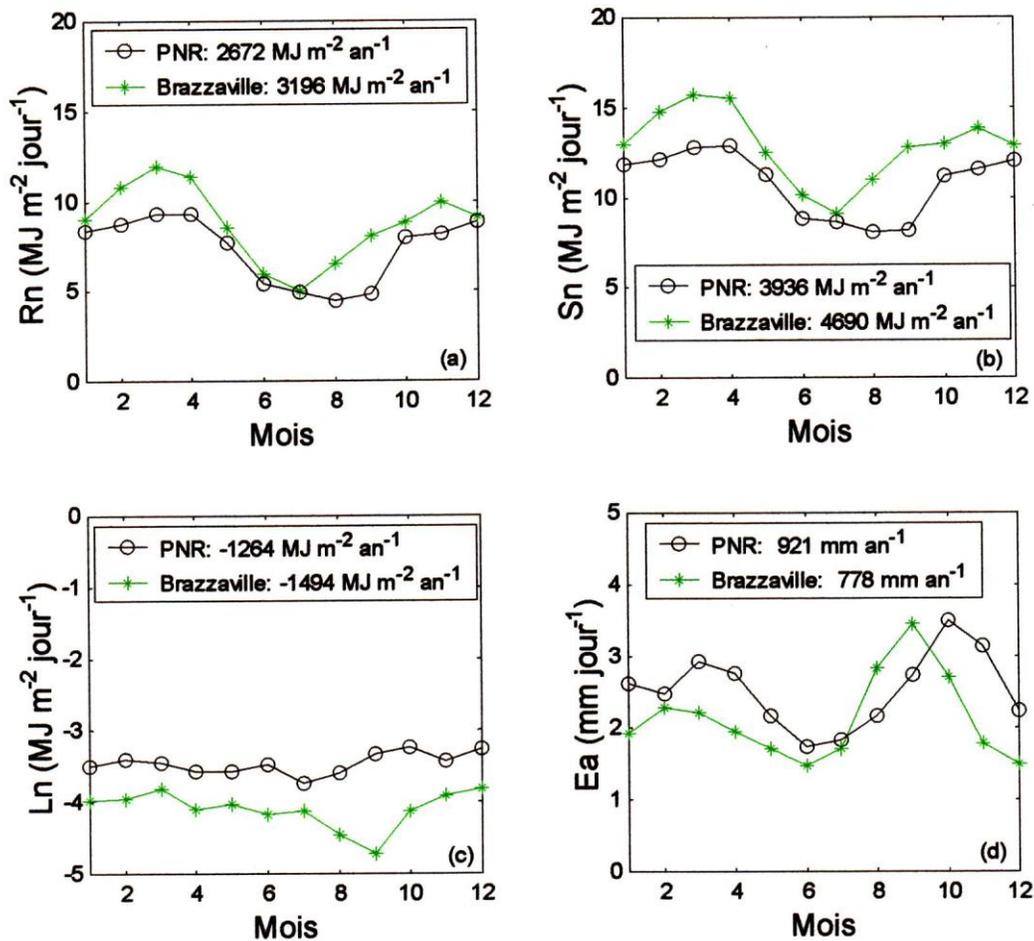


Figure 9: Comparaison des valeurs mensuelles moyennes du rayonnement net, R_n (Fig 9a), et de ses composantes, S_n et Ln (Fig. 9b et 9c), calculées à Pointe Noire (1998-2009), et mesurées à Brazzaville (1968-1971). Les valeurs mensuelles moyennes du pouvoir évaporant, E_a , calculées à Pointe Noire et à Brazzaville sont également présentées (Fig. 9d).

La figure 10 montre l'importance respective des 2 composantes ('radiative' et 'advective') de l'équation de Penman. En milieu équatorial, la composante 'advective' est connue pour être faible, du fait

des faibles déficits de pression de vapeur d'eau (humidité relative élevée). Au niveau annuel, cette composante est estimée à environ 0.63 mm joi' à Pointe Noire. A Brazzaville, Riou (1978) l'estimait à 0.40 mm jour'.

Comme en milieu équatorial la composante advective est faible en comparaison de la composante radiative, et que d'autre part les pertes d'énergie dans les grandes longueurs d'onde (L_n) sont faibles par rapport aux apports d'énergie dans les courtes longueurs d'onde (S_n), il en résulte qu'au niveau mensuel ou annuel l'ETP est généralement bien ^{corrélée} avec R_g (Figure 11). La corrélation est excellente à Brazzaville, avec une pente de 0.45, lorsque R_g est exprimé en équivalent mm d'eau. A Pointe Noire, la corrélation est un peu moins bonne, et on obtient une pente plus élevée (~0.53), pour les raisons évoquées ci-dessus (R_g plus faible, et composante advective plus importante).

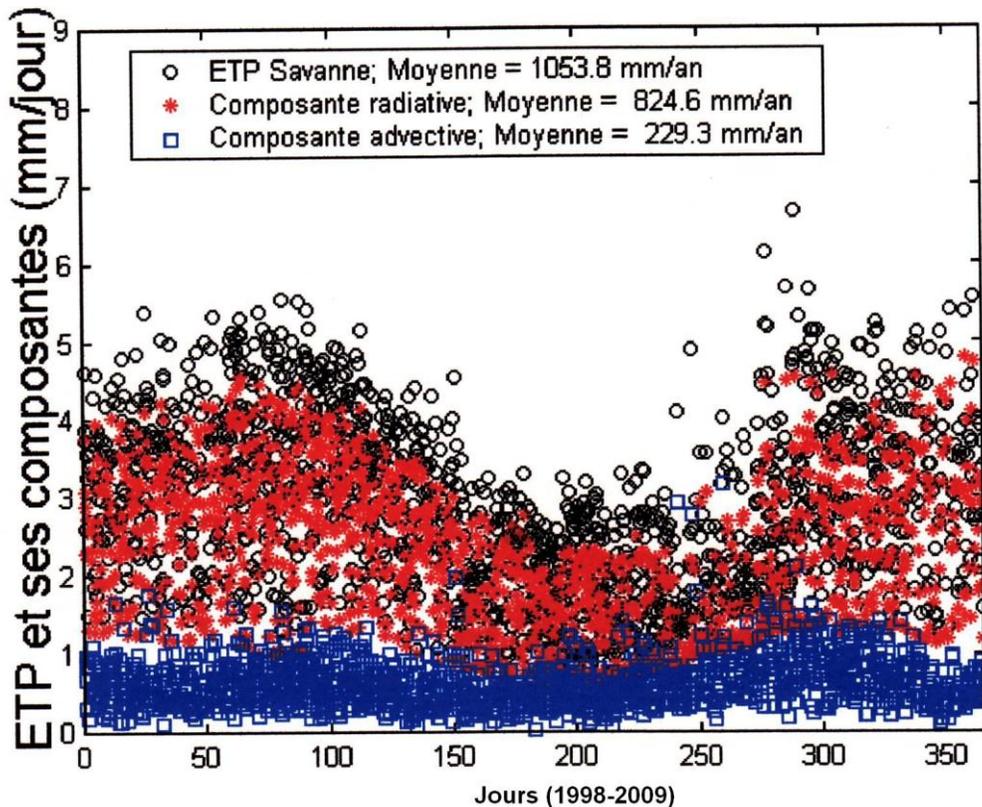


Figure 10: ETP journalières calculées par l'équation de *Penman*. Importance relative des composantes 'radiatives' et 'advectives'.

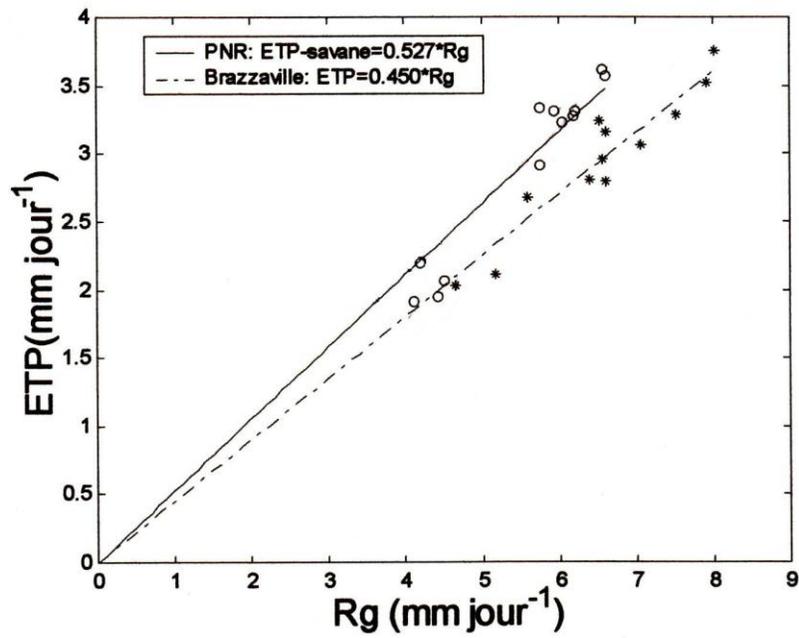


Figure 11: Comparaison des valeurs mensuelles d'ETP et de rayonnement global (R_g), à Pointe Noire (1998-2009) et à Brazzaville (1968-1971). Le rayonnement global est exprimé en équivalent mm, d'eau jour^{-1} (après division par), $\lambda \approx 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$ d'eau).

